

Användningen av satellitdata för att utveckla miljöövervakningen i Sverige

En syntes

Sofie Hellsten, Yifang Ban,
Stefanos Georganos, Jane Ihrfors,
Veronika Kronnäs, Sebastian Hafner,
Puzhao Zhang

RAPPORT 7083 | DECEMBER 2022



Användningen av satellitdata för att utveckla miljöövervakningen i Sverige

En syntes

av Sofie Hellsten, Yifang Ban, Stefanos Georganos, Jane Ihrfors,
Veronika Kronnäs, Sebastian Hafner och Puzhao Zhang

NATURVÅRDSVERKET

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

E-post: natur@cm.se

Postadress: Arkitektkopia AB, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/publikationer

Naturvårdsverket

Tel: 010-698 10 00

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, SE-106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-7083-0

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2022

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2022

Omslagsfoto: Pixabay



Förord

I den här rapporten presenteras resultaten av syntesprojektet ”Miljöavkänning: En syntes om satellitdata för att förenkla miljöövervakning (SENSE)”, ett av sex syntesprojekt som genomförts inom ramen för forskningssatsningen Digitalisering som stöd för en hållbar förvaltning.

Med satsningen ville Naturvårdsverkets och Havs- och vattenmyndigheten visa på digitaliseringens möjligheter i myndigheternas förvaltningsarbete.

Projektet har finansierats med medel från Naturvårdsverkets miljöforskningsanslag.

Författare är Sofie Hellsten, IVL Svenska Miljöinstitutet, Yifang Ban och Stefanos Georganos, KTH, Jane Ihrfors och Veronika Kronnäs, IVL, Sebastian Hafner och Puzhao Zhang, KTH. Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Stockholm i november 2022

Maria Ohlman
Avdelningschef, Hållbarhetsavdelningen

Innehåll

Förord	3
Begreppslista	6
Sammanfattning	13
Summary	16
1. Inledning	19
1.1 Syfte	20
1.2 En kort introduktion till satellit-fjärranalys	20
1.3 Molnbehandlingsplattformar och artificiell intelligens	26
1.3.1 Molnbehandlingsplattformar	26
1.3.2 Artificiell intelligens för jordobservationer	28
1.4 Europeiska initiativ	29
1.4.1 Copernicus tjänster	29
1.4.2 Relevanta EU Projekt	30
2. Metod	32
3. Fjärranalysapplikationer	33
3.1 Luftkvalitet	33
3.1.1 Partiklar	35
3.1.2 Luftföroreningar (NO ₂ , SO ₂ , O ₃ , NH ₃)	36
3.1.3 Växthusgaser (CO ₂ och metan)	39
3.2 Biodiversitet	41
3.2.1 Vad kan vi mäta?	41
3.2.2 Boreala miljöer	42
3.2.3 Geografisk skala	43
3.3 Användning för sjöar, kust och hav	44
3.3.1 Vattenmassan	44
3.3.2 Förändring av kust	45
3.3.3 Sediment och muddring	45
3.3.4 Identifiering av fiskebåtar	46
3.4 Övervakning av naturresurser	47
3.4.1 Användning av fjärranalys i olika länder	47
3.4.2 Marktäcke, markanvändning, naturtyper och utveckling hos växtsamhällen	48
3.4.3 Enskilda arter eller individer	49
3.4.4 Bränder: upptäckt och övervakning av miljöeffekter	50
3.4.5 Andra tillämpningar	51
3.5 Kartläggning och övervakning av grön infrastruktur i stadsmiljön	52
4. Användandet av fjärranalys vid myndigheter	54
4.1 Naturvårdsverket	54
4.2 HaV	56
4.3 Projekt inom miljöövervakning hos andra svenska myndigheter	57

4.4	Internationella exempel på myndigheters fjärranalystillämpningar	59
4.4.1	Luftkvalitet	59
4.4.2	Användning för sjöar kust och hav	61
4.4.3	Övervakning av naturresurser	62
4.4.4	Statistiska tillämpningar	62
4.4.5	Urbana tillämpningar	63
5.	Diskussion	64
5.1	Begränsningar och överväganden	64
5.2	Möjligheter för Naturvårdsverket och HaV att använda satellit fjärranalys för miljöövervakning	66
5.2.1	Miljöövervakning av luftkvalitet – möjligheter	68
5.2.2	Biodiversitet – möjligheter	70
5.2.3	Användning för sjöar, kust och hav – möjligheter	71
5.2.4	Övervakning av naturresurser – möjligheter	71
5.2.5	Kartläggning och övervakning av grön infrastruktur i stadsmiljön – möjligheter	73
6.	Rekommendationer	74
7.	Slutsatser	78
	Källhänvisningar	81
	Appendix A: Exempel på kartläggning av enskild art – Skador av granbarkborre	97
	Appendix B: Wildfire monitoring and environmental impacts	102
B.1	Wildfire detection and monitoring	102
B.2	Environmental Impacts of Wildfires	104
	Appendix C: Sammanställning av internationella exempel på myndigheters fjärranalystillämpningar	110
	Appendix D: Ett urval av svenska myndigheters arbete med fjärranalys	115
	Appendix E: Sammanställning av fjärranalysapplikationer från forskningsartiklar som ingår i syntesen	121

Begreppslista

AI	Artificial Intelligence, ”maskinintelligens” är förmågan hos datorprogram och robotar att efterlikna människors och andra djurs naturliga intelligens, exempelvis förmågan att lära sig saker av tidigare erfarenheter, lösa problem och att generalisera.
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder – satellitsensor på NASA:s Aqua satellit
AIS	Automatic Identification System – ett system som gör det möjligt att identifiera fartyg och dess rörelser, baserat på information som skickas ut från varje fartyg via en digital radiokanal.
Akustisk telemetri	Sändare (exempelvis på fiskar) skickar ut en ljudsignal som är ”stämplad” med ett ID-nummer och tid.
AOD	Aerosol optical depth – metod för att uppskatta aerosolkoncentrationen. Optical depth (Optiskt djup) är ett mått på transparens (andelen strålning som inte sprids eller absorberas under passage av ett medium).
API	Application programming interface (applikationsprogrammeringsgränssnitt) – en specifikation av hur olika applikationsprogram kan använda och kommunicera med en specifik programvara (vanligen ett dynamiskt länkat bibliotek).API:et är ett gränssnitt mellan applikationen och biblioteket.
Aqua	Satellit (NASA)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer – Satellitsensor
Batymetri	Terrängens fysiska form under vatten (motsvarigheten till topografi på land)
Big data	”Stora datamängder” – Digitalt lagrad information av sådan storlek att det är svårt att bearbeta den med traditionella databasmetoder.
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service (Copernicus atmosfärövervakningstjänst) – tillhandahåller data och information om atmosfärens sammansättning.
Carbon Mapper	En ideell organisation med planer på att distribuera en hyperspektral satellitkonstellation som kan lokalisera, kvantifiera och spåra metan- och CO ₂ -utsläpp från punktkällor.
CDOM	Colored dissolved organic matter – ”Färgat löst organiskt material” är den optiskt mätbara komponenten av löst organiskt material i vatten.

CEMS	Copernicus Emergency Management Service (Copernicus katastrofhanteringstjänst), https://emergency.copernicus.eu/
CEOS	The Committee on Earth Observation Satellites – en internationell organisation angående jordobservations satelliter.
CEOS ESA	Databas om CEOS fjärranalysuppdrag, satelliter och instrument.
CNN	Convolutional Neural Networks – Inom “deap learning” är CNN en klass av ”artificial neural network” som oftast används för att analysera visuella bilder.
CO2M	Carbon Dioxide Monitoring mission – Ett Copernicus Sentinel-uppdrag som kommer att vara det första att mäta hur mycket koldioxid som släpps ut i atmosfären specifikt genom mänsklig aktivitet.
Copernicus	EU:s jordobservationsprogram.
COSMO-SkyMed	Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation – ett radarsystem för jordobservations-satelliter finansierat av det italienska forsknings- och försvarsministeriet avsett för både militärt och civilt bruk.
CPP	Cloud Processing Platform.
CrIS	Cross-track Infrared Sounder (CrIS) instrument.
CubeSats	“Kubsatelliter” – kubiska små satelliter (ca 10 centimeter).
CZCS	Coastal zone colour scanner – satellitsensor
Datorseende algoritmer	Bearbetar och ”förstår” automatiskt innehållet i digitala bilder, dvs. att specifika typer av information extraheras ur bilder beroende på den uppgift som ska lösas.
Deep learning	Djupinlärning/djup maskininlärning maskininlärning genom artificiella neuronnät. Algoritmer försöker modellera abstraktioner i data på hög nivå med många processlager med komplexa strukturer, bestående av många linjära och icke-linjära transformationer.
DES	Digital Earth Sweden – ett nationellt innovationsnav för svenska myndigheter som använder jordobservationsdata, och för utveckling av AI-baserad analys av data (https://digitalearth.se/)
DIAS	Data and Information Access Services – fem molnbaserade plattformar som ger tillgång till Copernicus-data och information samt till bearbetningsverktyg. (https://www.copernicus.eu/en/access-data/dias)
ECV	Essential Climate Variables – viktiga klimatvariabler.
EEA	Europeiska miljöbyrån (https://www.eea.europa.eu/)
EnMAP	Environmental Mapping and Analysis Program – ett tyskt hyperspektralt satellituppdrag för övervakning av jordens miljö på global nivå (https://www.enmap.org/)

ENVISAT	”Environmental Satellite” – en stor inaktiv jordobservations-satellit som fortfarande är i omloppsbanan (rymdskräp). Den drivs av ESA och var världens största civila jordobservations-satellit.
EO	Earth Observation – jordobservation.
EO4SDG	Jordobservationer i syfte att främja Agenda 2030 för hållbar utveckling (http://eo4sdg.org/)
ESA	European Space Agency – Europeiska rymdorganisationen (https://www.esa.int/)
Fjärranalys	Metoder att göra mätningar av egenskaper hos omgivningen från satellitbilder och flygbilder.
GeoCarb	Geostationary Carbon Cycle Observatory – ett jord-observationsuppdrag (NASA) som ska mäta kolets kretslopp.
GeoEye	Jordobservations-satellit.
Geostationära satellitsensorer	En satellit som rör sig synkront med planeten och således ständigt förblir över samma punkt på ytan.
GHGSat	Konstellation av satelliter med fokus på växthusgaser
GOME	The Global Ozone Monitoring Experiment – satellit-instrument
Google Earth engine	En global plattform för geodata och analys.
GOSAT	Greenhouse Gases Observing Satellite - en jordobservations-satellit (världens första satellit med syfte att undersöka jordens halter av växthusgaser).
GPP	Gross Primary Produktion – bruttoprimärproduktion, dvs allt upptag av CO ₂ till träden
HAPS	High-altitude platform station – en station på ett föremål på en höjd av 20 till 50 km vid en specificerad, fast punkt i förhållande till jorden.
HARMONIA	EU-projekt (http://harmonia-project.eu/)
HaV	Havs- och Vattenmyndigheten.
Hyperspektral	Information från hela det elektromagnetiska spektrumet.
IASI	Infrared Atmospheric Sounded Interferometer – satellit-instrument.
ICEYE	Satellitkonstellation (https://www.iceye.com/)
IKONOS	Jordobservations-satellit (fram till 2015) – den första satellit som samlade in allmänt tillgängliga högupplösta bilder med 1- och 4-meters upplösning, multispektrala och pankromatiska bilder.
IMO	International Maritime Organisation (https://www.imo.org/)

KNAS	Kontinuerlig Naturtypskartering av Skyddade områden.
LAI	Leaf Area Index – Bladområdesindex – den gröna bladarean per enhet markyta.
Landsat	Jordobservations satellit.
LiDAR	Light detection and ranging (även ljusradar, laserradar, laser mapping, LADAR,) är ett optiskt mätinstrument som mäter egenskaper hos reflekterat ljus för att finna avståndet till och/eller andra egenskaper hos ett avlägset föremål.
Machine-learning	Maskininlärning - område inom AI angående metoder för att med data ”träna” datorer att upptäcka och ”lära” sig regler för att lösa en uppgift, utan att datorerna har programmerats med regler för just den uppgiften.
MAUP	The Modifiable Area Unit Problem – påverkar resultaten när punktdata aggregeras i zoner. Resultatet påverkas både av formen och skalan hos aggregeringszonen.
MERIS	MEDium Resolution Imaging Spectrometer – satellit-insensor (2002–2012).
MERLIN lidar	Methane Remote Sensing Lidar Mission – satellituppdrag.
MethaneSAT	Mikrosatelliter – små satelliter (10–100 kg) – för att undersöka metan – planerat för 2022.
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – satellitsensor.
MSI	MultiSpectral Instrument.
Multispektral	Ett flertal intensitetskanaler från frekvenser inom det elektromagnetiska spektrumet.
Multitemporal	Flera bilder av samma scen tagna vid olika tidpunkter.
NAEI	National Atmospheric Emissions Inventory – Storbritanniens nationella emissionsinventering.
Nanosatelliter	Miniatyrsatellit (mindre än 10 kg).
Nationella Rymddatalabbet	Swedish Space Data Lab (https://rymddatalabbet.se).
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index – ett index som indikerar mängden levande vegetation och beräknas från hur mycket ljus som reflekteras i en bilds våglängdsband i nära-infrarött och rött ljus.
NEE	Net ecosystem CO ₂ exchange – GPP minus all respiration i ekosystemet, inte bara trädens.
neurala nätverk	En sammankopplad grupp noder, likt det stora nätverk av neuroner i en hjärna.

NILS	Nationell Inventering av Landskapet i Sverige – nationella miljöövervakningsprogram med ett flertal inventeringar som syftar till att samla, analysera och presentera data om hur landskap och naturtyper i Sverige ser ut och förändras över tid. (https://www.slu.se/centrumbildningar-och-projekt/nils/)
Nimbus	Satellite (1964–1978).
NMD	NMD – Nationella marktäckedata – Aktuell och heltäckande kartering av Sveriges marktäcke. (https://www.naturvardsverket.se/verktyg-och-tjanster/kartor-och-karttjanster/nationella-marktackedata/)
NOAA	US National Oceanic and Atmospheric Administrations – ett amerikanskt vetenskapligt organ.
NPP	Net Primary Production – nettoprimärproduktion, dvs GPP med trädens egen respiration bortdragen.
OBIA	Object-Based Image Analysis – bildanalys för fjärranalys som definierar och undersöker bildobjekt: grupper av angränsande pixlar som representerar verkliga geografiska objekt.
OLCI	Ocean and Land Colour Instrument – satellitinstrument (300 m upplösning).
OMI	the Ozone Monitoring Instrument – satellitinstrument.
OMPS	Ozone Mapping Profiler Suite – satellitinstrument.
Open data Cube	Ett open source-samfund – ett icke-vinstdrivande projekt med öppen källkod för bättre hantering av satellitdata. (https://www.opendatacube.org/)
PALSAR	Phased Array typ L-band Synthetic Aperture Radar – satellitsensor,
Pankromatisk bild	Gråskalebild med en hög rumslig upplösning som ”kombinerar” informationen från de synliga R-, G- och B-bandet.
Pixel	Den minsta delen av rastergrafik.
Planet	Konstellation av CubeSat-satelliter. (www.planet.com)
PM	Particulate Matter – partiklar (aerosoler).
PRISMA	Hyperspectral Precursor of the Application Mission – ett italienskt jordobservationsystem som kombinerar en hyperspektral sensor med en pankromatisk kamera med medelhög upplösning.
QuickBird	Jordobservationssatellit.
RADARSAT	RCM – Ett kanadensiskt fjärranalysprogram för jordobservationssatelliter.

Radiometrisk upplösning	Beskriver det effektiva bitdjupet hos sensorn (antal gråskalenivåer) och uttrycks vanligtvis som 8-bitars (0–255), 11-bitars (0–2 047), 12-bitars (0–4 095) eller 16-bitars (0–65 535).
RCM	RADARSAT Constellation Missions, se RADARSAT.
RGB	Förkortning för färgerna rött, grönt och blått, vilka används som grundfärger i optisk färgblandning, dvs en blandning av ljus med olika färg (strålning med tre specificerade våglängder).
Rumslig täckning	Det geografiska område som omfattas.
SAR-data	Synthetic Aperture Radar – en typ av aktiv datainsamling där en sensor producerar sin egen energi och sedan registrerar mängden energi som reflekteras tillbaka efter att ha interagerat med jorden.
SCIAMACHY	The SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartography – satellitinstrument.
Semantisk segmentering	Förutsäger fördefinierade klassetiketter för varje pixel i en bild.
Sentinel	Satellitkonstellation från Copernicus.
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature Radiometer (1 km upplösning).
SNAP	Jordobservationssatellit.
Spatial upplösning	Den fysiska dimensionen (avståndet) som representerar en pixel i bilden.
Spektral upplösning	Våglängdsintervalllets storlek (diskreta segment av det elektromagnetiska spektrumet) och intervallnummer som sensorn mäter.
Spektralband	Delar av det elektromagnetiska spektrumet av specifika våglängder.
SPM	Suspended Particulate Matter – suspenderat material/partiklar.
SPOT	Jordobservationssatellit
SST	Sea surface temperature – vattentemperaturen nära vattenytan
SVM	Support Vector Machine- – stödvektormaskin - en typ av statistisk klassificerare (en generaliserad linjär klassificerare).
SWIR	Short Wave Infra Red – termisk kortvågskamera, värmekamera (kortvågig infraröd strålning).
TanDEM-X	TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement – tysk jordobservationssatellit.

Terra (TerraSAR)	Jordobservations satellit.
TES	Technology Experiment Satellite – indisk jordobservationssatellit.
Tidsmässig upplösning	Temporal upplösning – Den tid som passerar mellan periodernas bildinsamling.
TROPOMI	The TROPospheric Monitoring Instrument – satellit-instrument.
UHI	Urban Heat Island – urban värmeö, dvs ett storstadsområde som är påtagligt varmare än omgivningarna.
USC	Union of Concerned Scientists – en ideell vetenskapsorganisation baserad i USA.
VIIRS	The Visible Infrared Imaging Radiometer Suite – satellitsensor.
ViT	Vision Transformers – är inriktade på synbearbetningsuppgifter som bildigenkänning.
VNIR	Visible and near-infrared – del av det elektromagnetiska spektrumet och har våglängder mellan cirka 400 och 1 100 nanometer (nm).
WMO OSCAR	Databas med information om miljösatellituppdrag.
WorldView	Jordobservationssatelliter.
xView3	En tävling för att upptäcka mörka fartyg med hjälp av datorseende och SAR-satellitbilder.

Sammanfattning

Den här rapporten sammanställer kunskapsläget med avseende på miljöövervakning med fjärranalys, med fokus på de ämnesområden som är relevanta för Naturvårdsverket och Havs- och Vattenmyndigheten (HaV). Fjärranalys omfattar metoder för att samla in information om objekt, områden och fenomen på jordytan från mätningar som görs på avstånd via satellitbilder eller flygbilder. De viktigaste tillämpningsområdena för jordobservationssatelliter är bland annat atmosfär, land, hav, klimatförändringar, nödsituationer och säkerhet. Denna syntes bidrar till att ge Naturvårdsverket och HaV en god genomlysning och sammanställning av relevanta tillämpbara metoder för insamling av data med stöd av fjärranalys. Syntesen omfattar beskrivningar av teknikens möjligheter, utmaningar och begränsningar.

Det här projektet har utförts i samarbete mellan IVL Svenska Miljöinstitutet och KTH (Avdelningen för Geoinformatik). Projektet genomfördes i nära samarbete med en referensgrupp, med representanter från Naturvårdsverket, HaV och Länsstyrelsen i Stockholm.

En av de viktigaste förändringarna i tillgången till information av hög kvalitet under de senaste åren är lanseringen av Copernicus tjänster för land- och vattenövervakning, och särskilt satellituppdraget Sentinel. I linje med kommissionens rekommendationer och initiativ uppmuntras nationella myndigheter och offentliga institutioner att använda Copernicusprogrammets produkter för sina behov. En stor mängd av dessa data kan förbehandlas med tillgängliga molnbaserade databehandlingsplattformar. Exempelvis kommer utvecklingen av dataplattformen Digital Earth Sweden att bidra till att myndigheter och forskare kan jobba mer standardiserat med metoder och skript och enklare dela dem med varandra.

Fjärranalys har ett brett spektrum av applikationer inom miljöövervakning, relevant för både Naturvårdsverket och HaV, t.ex. luftkvalitetsapplikationer, kust- och havsapplikationer, hantering av naturresurser, riskbedömningar, officiell statistik, grön infrastrukturkartläggning och övervakning. Men ännu har inte alla applikationer uppnått en tillräckligt hög mognadsgrad. Även om fjärranalys erbjuder goda möjligheter för miljöövervakning, så omfattar användningen av satellitdata ett flertal utmaningar.

Fjärranalysdata kommer med olika tidsmässiga, rumsliga och radiometriska upplösningar. För att kunna utnyttja dem till sin fulla potential är det viktigt för användare och intressenter att förstå deras avsedda användning. Dagens arbetssätt inom miljöövervakningen kommer att påverkas eftersom fjärranalysövervakningen behöver integreras i den nuvarande miljöövervakningen. Därför är det viktigt att göra en kostnads-nyttoanalys avseende användningen av fjärranalysdata när behoven för en applikation har specificerats.

Det är av avgörande betydelse att tydlig, replikerbar datainsamling och applikationer måste utvecklas för en smidig användning av satellitdata för Naturvårdsverket och HaV:s behov. Detta kan omfatta automatiska procedurer som minimerar användarinsatsen under insamlingen av data, lämpliga användargränssnitt, samt möjligheten att effektivt och kontinuerligt uppdatera befintliga modeller och produkter när nya data blir tillgängliga.

Rumslig täckning är en av de stora fördelarna med majoriteten av satellitdata jämfört med observationsmätningar på markytan. Dessutom kan de långa tidsserierna av satellitdata vara ett verktyg för att studera trender bakåt i tiden (förutsatt konsekvent korrigering av data över tid), likaväl som ett stöd för att prognostisera (framtida) utveckling.

I dagsläget används inte satellitdata för luftkvalitet eller växthusgaser av Naturvårdsverket, men vi bedömer att den potentiella tillämpbarheten inom luftkvalité kommer att öka för Naturvårdsverket framöver. Utvecklingen på området går snabbt framåt, med ett flertal nya satelliter och instrument som kommer att få stor betydelse för att förbättra övervakningen av luftföroreningar från satelliter. NO₂-mätningar är troligtvis den mest lämpliga luftföroreningen för Naturvårdsverket att börja med, eftersom satellitinstrumenten har en hög känslighet för NO₂ samtidigt som det finns en högre mognadsgrad för NO₂-mätningar, jämfört med andra luftföroreningar. Satellitmätningar av luftföroreningar behöver valideras och kommer därför inte att ersätta behovet av ytobservationer, oavsett vilken typ av applikation och satellitsensor som används.

Det finns även stor potential för miljöövervakning av vattenmassor och kuster med hjälp av den tillgängliga data som finns idag genom bl.a. Copernicus. Flera fjärranalysapplikationer för sjöar, kust och hav är redan aktiva och används av myndigheterna. Den största potentialen finns i att använda dessa metoder inom fler områden än vad som görs idag.

Fjärranalysmetoder används redan idag för att följa upp vissa av FN:s globala mål (de så kallade SDG:erna). Utvecklingen av ny teknik går snabbt framåt och exempelvis drönare har utvidgat möjligheterna ytterligare.

Fjärranalys har potential att underlätta för både Naturvårdsverket och HaV att följa upp Sveriges Miljökvalitetsmål, exempelvis vad gäller frisk luft, vattenkvalitet, skogar, odlingslandskapet, fjälllandskapet och våtmarker. Övervakning av marktäcke, markanvändning (i bredare kategorier som skog, åker, vatten, eller i smalare som typ av grödor eller skog), förändringar i marktäcke (vid avverkningar, bränning, planteringar, byggnationer, glaciärvsmältning med mera), trädhöjd och fenologi är välanvänt och välutvecklat även som underlag för modelleringar av habitat och erosionsrisk.

Det är uppenbart att fjärranalysbilder kan användas för att kartlägga biologisk mångfald (såsom olika skogstyper, flora- och faunaarter) i olika skalor. Fjärranalystillsämplingar med öppna satellitdata, kräver dock kompletterande in-situ-data för att initialt träna modellerna. Detta innebär att HaV och Naturvårdsverket behöver producera data som är i) standardiserade och ii) geolokaliserade och iii) tidsmässigt uppdaterade, för att kunna användas i kombination med satellitdata.

Övervakning av mikroklimat och modellering av dess påverkan på biota och deras anpassningsförmåga inför klimatförändringar är ett viktigt område under utveckling. Även modellering av ekosystemtjänster och av enskilda hotade eller problemskapande arter är mindre väl utvecklat, men det kommer fler och fler tillsämplingar.

När det gäller fjärranalys i urbana miljöer rekommenderar vi undersökning av flerskalig analys med hjälp av satellitbilder med flera källor med olika upplösningar, i kombination med kraftfulla djupinlärningsalgoritmer (deep learning algorithms) för att få mer exakta kartor över urbana marktäckekartor.

Fjärranalys är ett mycket kraftfullt verktyg som för närvarande är underutnyttjat av HaV och Naturvårdsverket. Potentialen i fria och offentliga satellitbilder från ESA:s Sentineluppdrag har till exempel visat sig vara en potent lösning för stor-skalig kartläggning inom olika applikationsområden som organisationerna arbetar med. Dessa metoder kommer oundvikligen att bli vanliga under de kommande åren i flera av EU:s länder, som redan arbetar mot operativa nivåer. Därför rekommenderar vi olika åtgärder som Naturvårdsverket och HaV kan vidta för att ytterligare integrera fjärranalys i miljöövervakningen:

- Fortsätta att följa utvecklingen inom fjärranalys för Naturvårdsverkets och HaV:s syften.
- Initiera och stödja fortsatt forskning och utveckling:
 - Studier för att utveckla standardiserade operativa rutiner för att välja, analysera och tolka satellitdata.
 - Studier med multiplattform- och multisensorteknik.
 - Svenska studier inom fjärranalysområden som redan framgångsrikt testats av andra internationella myndigheter.
 - Studier om kostnadseffektiviteten av att använda satellitdata som komplement till nuvarande miljöövervakning.
- Användning av utbildad personal för insamling, användning och analys av fjärranalys- och geospatiala data.
- Väl omhändertagna och underhållna geospatiala databaser.
- Kombinera fritt tillgänglig satellit- och flygdata med kompletterande data, exempelvis drönar-data.
- Aktörsinvolverande.
- Ökad grad av samverkan mellan myndigheter.

En stor del av de potentiella tillämpningarna sträcker sig längre än en enda myndighets behov och kapacitet och kommer att kräva samarbete mellan flera myndigheter för att utveckla och driva en tjänst. Därför är det av avgörande betydelse att myndigheterna förbättrar sina samarbeten när det gäller datadelning, tillgänglighet och transparens. Framtiden kommer att präglas av mer internationellt samarbete och samordning mellan regeringar och internationella organisationer för att säkerställa långsiktig kontinuitet i fjärranalysdata och för att främja förverkligandet av fjärranalysens fulla samhällsnytta.

Summary

This report compiles the state of knowledge about environmental monitoring with remote sensing, focusing on topics relevant to the Swedish Environmental Protection Agency (SEPA) and the Swedish Agency for Marine and Water Management (HaV). Remote sensing includes methods for collecting information about objects, areas and phenomena on the earth's surface from measurements made from a distance via satellite or aerial images. The most important areas of application for Earth observation satellites include atmosphere, land, sea, climate change, emergencies and security. This synthesis contributes to giving SEPA and HaV a good overview and compilation of relevant applicable methods for collecting data with the support of remote sensing. The synthesis includes descriptions of possibilities, challenges and limitations with remote sensing applications.

This project has been carried out in collaboration between IVL Swedish Environmental Research Institute and KTH, Royal Institute of Technology (Department for Geoinformatics). The project was carried out in close collaboration with a reference group, with representatives from SEPA, HaV and the County Administrative Board in Stockholm.

One of the most important improvements regarding access to high-quality information in recent years is the launch of Copernicus services for land and water monitoring, and in particular the Sentinel satellite mission. In line with the Commission's recommendations and initiatives, national authorities and public institutions are encouraged to use Copernicus program products. A large amount of this data can be pre-processed with available cloud-based data processing platforms. For example, the development of the Swedish national Digital Earth Sweden data platform will contribute to authorities and researchers being able to work more standardized with methods and scripts and more easily share them with each other.

Remote sensing has a wide range of applications in environmental monitoring, relevant both to SEPA and HaV, e.g. air quality applications, coastal and marine applications, natural resource management, risk assessments, official statistics, green infrastructure mapping and environmental monitoring. However, not all applications have yet reached a sufficiently high degree of maturity. Although remote sensing offers good opportunities for environmental monitoring, the use of satellite data involves several challenges.

Remote sensing data comes with different temporal, spatial and radiometric resolutions. To utilize them to their full potential, it is important for users and stakeholders to understand their intended use. Today's working methods in environmental monitoring will be affected because remote sensing monitoring needs to be integrated into the current environmental monitoring. Therefore, it is important to perform a cost-benefit analysis regarding the use of remote sensing data once the needs of an application have been specified.

It is of crucial importance that clear, replicable data collection and applications must be developed for the smooth use of satellite data for the needs of both SEPA and HaV. This may include automated procedures that minimize user effort during data collection, appropriate user interfaces, and the ability to update existing models and products as new data becomes available.

Spatial coverage is one of the major advantages of satellite data compared with ground-based observational measurements. In addition, the long time series of satellite data can be used to study trends backwards in time (assuming consistent correction of data over time), as well as a support for forecasting (future) development.

Currently, satellite data for air quality or greenhouse gases are not used by SEPA, but we believe that the potential applicability for remote sensing data in air quality will increase for SEPA in the future. Developments in the field are advancing rapidly, with several new satellites and instruments that will be of great importance in improving the monitoring of air pollution from satellites. NO₂-measurements are probably the most suitable air pollutant for SEPA to start with, as the satellite instruments have a high sensitivity to NO₂ and there is also a higher degree of maturity for NO₂ measurements, compared with other air pollutants. Satellite measurements of air pollution need to be validated and will therefore not replace the need for surface observations, regardless of the type of application and satellite sensor used.

There is also great potential for environmental monitoring of surface water and coasts with remote sensing data such as Copernicus. Several remote sensing applications for lakes, coasts and oceans are already active and used by the authorities. The greatest potential lies in using these methods in more areas than is done today.

Remote sensing methods are already used today to follow up on some of the UN's global sustainable development goals (SDGs). The development of new technology is progressing rapidly, and, for example, drones have expanded the possibilities even further.

Remote sensing has the potential to facilitate for both SEPA and HaV to follow up on Sweden's environmental quality goals, for example in terms of fresh air, water quality, forests, agricultural landscapes, mountain landscapes and wetlands. Monitoring of land cover, land use (in broader categories such as forest, field, water, or in narrower ones such as type of crops or forest), changes in land cover (for logging, burning, planting, construction, melting glaciers, etc.), tree height and phenology are well used and well developed also as a basis for modeling habitat and erosion risk.

Remote sensing images can be used to map biodiversity (such as different forest types, flora and fauna species) at different scales. Remote sensing applications with open satellite data, however, require complementary in-situ data to initially train the models. This means that HaV and SEPA need to produce data that is i) standardized and ii) geolocalized and iii) temporally updated, to be used in combination with satellite data.

Monitoring microclimate and modeling its impact on biota and their adaptability to climate change is under development. Even modeling of ecosystem services and of individual threatened or problem-creating species is less well developed, but more and more applications are being available.

For remote sensing in urban environments, we recommend investigating multi-scale analysis using multi-source satellite imagery with different resolutions, combined with powerful deep learning algorithms to obtain more accurate urban land cover maps.

Remote sensing is a very powerful tool that is currently underutilized by HaV and SEPA. The potential of free and public satellite images from ESA's Sentinel mission has, for example, proven to be a potent solution for large-scale mapping

in various application areas that the organizations work with. These methods will inevitably become common in the coming years in several of the EU countries, which are already working towards operational levels. Therefore, we recommend various measures that SEPA and HaV can take to further integrate remote sensing into environmental monitoring:

- Continue to follow developments in remote sensing for the purposes of SEPA and HaV.
- Initiate and support continued research and development:
 - Studies to develop standardized operational procedures for selecting, analyzing and interpreting satellite data.
 - Studies using multi-platform and multi-sensor technology.
 - Swedish studies in remote sensing areas that have already been successfully tested by other international authorities.
 - Studies on the cost-effectiveness of using satellite data to complement current environmental monitoring.
- Use of trained personnel for the collection, use and analysis of remote sensing and geospatial data.
- Well cared for and maintained geospatial databases.
- Combine freely available satellite and aerial data with complementary data, for example drone data.
- Actor-involving.
- Increased degree of collaboration between authorities.

A large proportion of the potential applications extend beyond the needs and capabilities of a single agency and will require collaboration between multiple agencies to develop and operate a service. Therefore, it is of crucial importance that the authorities improve their collaborations in terms of data sharing, accessibility and transparency. The future will be characterized by more international cooperation and coordination between governments and international organizations to ensure long-term continuity of remote sensing data and to promote the realization of remote sensing's full societal benefits.

1. Inledning

Vår planet står inför miljöutmaningar utan motstycke, bland annat snabb urbanisering, avskogning, föroreningar, förlust av biologisk mångfald, stigande havsnivåer, smältande polarisar och klimatförändringar, för att bara nämna några. Därför är effektiva metoder och verktyg av avgörande betydelse för att kartlägga, övervaka och analysera miljöförändringar och utvärdera deras påverkan i tid och på ett tillförlitligt sätt. Med sin översiktsbild och repeterbarhet erbjuder satellitbaserad fjärranalys ett kraftfullt och effektivt sätt att observera och övervaka vår föränderliga planet på lokal, regional och global nivå (Ban, 2016).

Observera att fjärranalys från luften har använts flitigt för miljöövervakning. En genomgång av dess användning av olika myndigheter i Sverige ingår i denna rapport, men en fullständig genomgång av flygbaserad fjärranalys ligger utanför ramen för detta projekt.

- **Kapitel 1** – I det här kapitlet presenteras först syftet med studien. Därefter ger vi en kort introduktion till satellitbaserad fjärranalys. Därefter granskas molnbehandlingsplattformar och AI för EO big data processing sammanfattas. Slutligen diskuteras EU:s Copernicus-tjänster och relevanta projekt inom EU:s forskningsprogram Horizon 2020.
- **Kapitel 2** presenterar hur vi har genomfört den här litteraturstudien.
- **Kapitel 3** omfattar en litteraturstudie av fjärranalysapplikationer inom de mest relevanta områdena för miljöövervakning. Detta gäller fjärranalysapplikationer för luftkvalitet, biodiversitet, användning för sjöar, kust och hav, förvaltning av naturresurser (markanvändning, marktäcke, barkborreangrepp, övervakning av bränder mm), samt kartläggning och övervakning av grön infrastruktur i städer.
- **Kapitel 4** redovisar användandet av fjärranalys vid myndigheter, både vid Naturvårdsverket och HaV, samt vid andra svenska myndigheter. I kapitlet presenteras även exempel på hur man har använt sig av fjärranalys vid myndigheter i andra länder.
- **Kapitel 5** omfattar en diskussion med avseende på begränsningar och potential för Naturvårdsverket och HaV att använda fjärranalys inom miljöövervakningen.
- **Kapitel 6** ger rekommendationer på åtgärder som Naturvårdsverket och HaV kan vidta för att komplettera miljöövervakningen med fjärranalys.
- **Kapitel 7** ger en kort sammanfattning av studiens slutsatser.

1.1 Syfte

Syftet med denna syntes är att genomlysas kunskapsområdet för fjärranalys inom miljöövervakning för att föreslå lämpliga vägar framåt för Naturvårdsverket (NV) och Havs- och vattenmyndigheten (HaV) att tillvarata nyttan av fjärranalysinformation. Huvudmålen har varit att identifiera:

- Nya områden/applikationer där fjärranalys har potential att effektivisera arbetet för både Naturvårdsverket och HaV.
- Områden/applikationer som har störst utvecklingspotential för att uppfylla målen för de två myndigheternas olika förvaltningsområden och SDG.
- Rekommendationer för framtida forskning och framtida policyarbete inom området.

Den övergripande frågan har varit att bedöma potentialen av insamling och tillämpning av fjärranalysdata med avseende på myndigheternas administrativa områden, miljömålen och SDG.

Syntesens målgrupp omfattar de handläggare på Naturvårdsverket och Hav som har behov av att introducera nya metoder och teknik för innovativ datainsamling och nya tillämpningsområden för hur satellitdata kan bidra till ökad transparens och ett mer effektivt informationsutbyte mellan olika intressenter, forskare och allmänheten. Syntesen vänder sig även till de handläggare på Naturvårdsverket och HaV som kommer att ansvara för det framtida forskningsprogrammet ”Digitalisering som stöd för en hållbar förvaltning”.

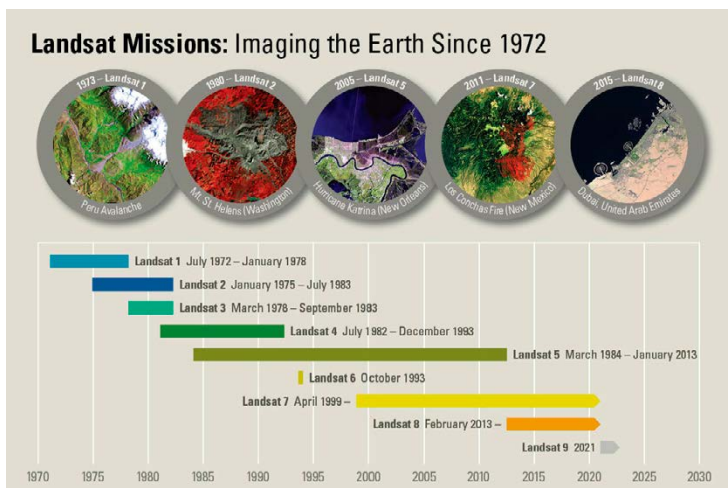
1.2 En kort introduktion till satellit-fjärranalys

Fjärranalys är vetenskapen om hur man får information om objekt, områden och fenomen från mätningar som görs på avstånd med hjälp av elektromagnetisk strålning i ett eller flera områden av det elektromagnetiska spektrumet. Terrestrisk fjärranalys är vetenskapen om hur man får information om objekt, områden och fenomen på **jordytan** från mätningar som görs på avstånd med hjälp av elektromagnetisk strålning (Lillesand m.fl., 2015). Sedan uppskjutningen av Landsat-1 1972 har många jordobservationssatelliter (EO) skjutits upp som ger stora mängder multitemporala data som samlades in av multispektrala, hyperspektrala, passiva mikrovågor, syntetisk aperturradar (SAR) och LiDAR-sensorer (exempel visas i Figur 1). Det ökande antalet jordobservationssystem ger ökad förmåga att samla in multitemporala data om jordytan med förbättrad spektral, spatial, radiometrisk och tidsmässig upplösning. Dessa nya förutsättningar ökar avsevärt vår förmåga att observera, övervaka och förutsäga dynamiken i naturliga och antropogena processer, vilket bidrar till att förbättra vår förståelse av miljö- och klimatförändringar och till att stödja en hållbar utveckling (Ban, 2016).



Figur 1. ESA:s EO Uppdrag. Källa: ESA (2019).

Den första Landsat-satelliten, som lanserades den 23 juli 1972, markerade en ny era för jordobservationer (Figur 2). I dag levererar mer än 970 jordobservationsatelliter kontinuerligt data för långsiktig observation och övervakning av regionala och globala förändringar (Belward & Skøien, 2015; UCS, 2022). Antalet jordobservationsatelliter ökar snabbt, med 400 % mellan 2014 och 2021. Av satelliterna är nästan hälften kommersiella, ungefär en tredjedel tillhör regeringar, en liten del universitet, medan ungefär en femtedel är militära och några är militära och statliga samarbeten. USA är ledande när det gäller ägande och kontroll av EO-satelliter, med över 400 helägda satelliter och ett par som ägs gemensamt av USA och andra länder. Kina kommer på andra plats, med över 200 helägda satelliter och ett par som ägs gemensamt av Kina och andra länder. Japan, Ryssland, Indien och Europeiska Rymdorganisationen (ESA, Figur 1) har också betydande andelar av EO-satelliterna. Av de över 970 EO-satelliterna är en tredjedel CubeSats (1–10 kg) och minst 100 är mikrosatelliter (10–100 kg), dvs. nästan hälften av det totala antalet EO-satelliter, enligt uppgifter från Union of Concerned Scientists (UCS, 2022). Kommersiella enheter har varit drivkraften bakom den exponentiella tillväxten av EO-satelliter med uppskjutningar av CubeSats och mikrosatelliter under de senaste åren (Ban, 2021). Som jämförelse kan nämnas att det totala antalet civila EO-satelliter var 197 år 2013 med endast 4 CubeSats, dvs. Planet Labs Dove-1 till 4 (Belward & Skøien, 2015).



Figur 2. Landsat Uppdrag. Källa: USGS (2021).

Sensorer på EO-satelliter inkluderar multispektrala sensorer, hyperspektrala sensorer, termiska skannrar, passiva mikrovågor, SAR-radar (Synthetic Aperture Radar) och LiDAR. Majoriteten av sensorerna på EO-satelliterna är optiska, medan endast 74 är SAR-sensorer. När det gäller den spatiala upplösningen varierar den från flera km för geostationära satellitsensorer till 30 cm för satellitsensorer i polära omloppsbanor. Den tidsmässiga upplösningen ökar också för högupplösta satellitsensorer, med 150+ Planet Labs' Dove som dagligen samlar in data var som helst på jorden med 3–5 m upplösning. De viktigaste tillämpningsområdena är bland annat atmosfär, land, hav, klimatförändringar, nödsituationer och säkerhet.

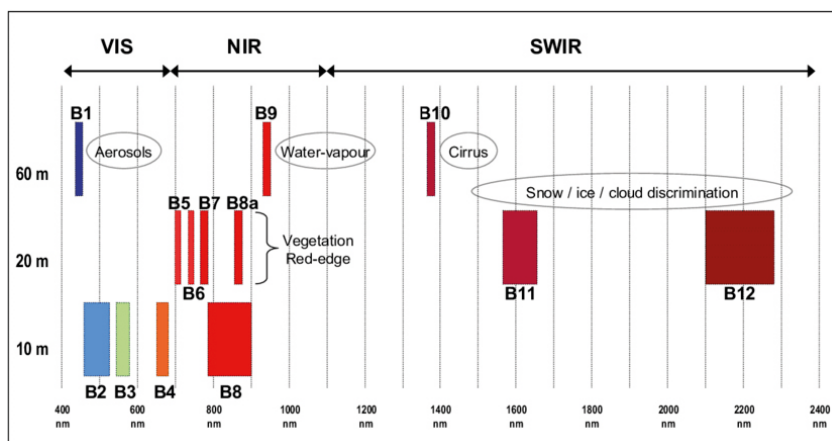
Utvalda exempel på optiska och radarsatellituppdrag presenteras i Tabell 1 och Tabell 2 nedan. De spektrala egenskaperna hos Sentinel-2 MSI visas i Figur 3 medan jämförelsen av Sentinel-2 MSI och Landsat 7 och 8-banden presenteras i Figur 4. Figur 5 och 6 visar exempel på Sentinel-2 MSI och Sentinel-1 SAR-bilder respektive. Mer information om dessa och andra satellituppdrag finns på ESA:s Earth Online-webbplats.

Tabell 1. Utvalda exempel på optiska satellituppdrag med sensoregenskaper.

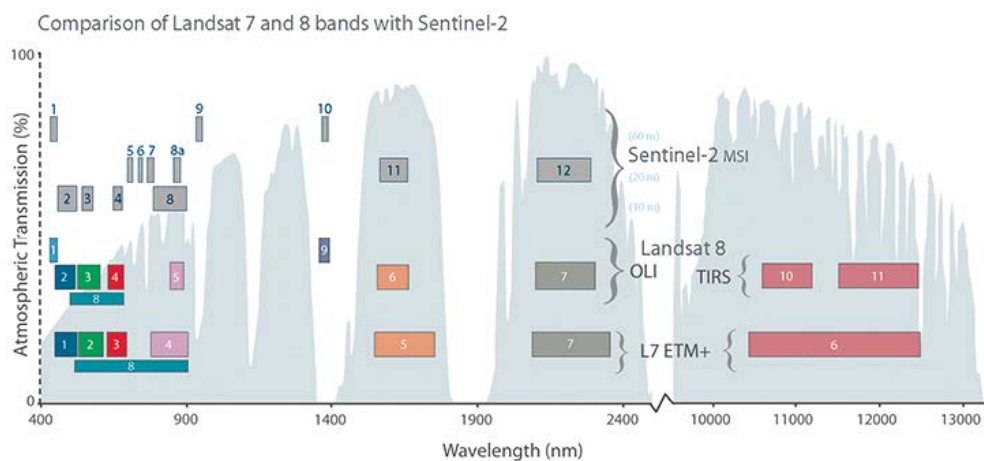
Mission	Sensor	Sensor Characteristics	# of Satellites	Data Availability	Country	Launch Year
Sentinel-2	MultiSpectral Instrument (MSI)	Multispectral (VNIR and SWIR) Swath Width: 290 km Resolution: 10 m/20 m	2	Free, and Open	ESA	2015 2017
Landsat-8/-9	Operational Land Imager (OLI) Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Panchromatic, and Multispectral VNIR, SWIR, TIR) Swath Width: 185 km Resolution: Pan:15, MS: 30 m, TIRS: 100 m	1 1	Free, and Open	USA	2013 2021
SPOT-6/-7	NAOMI	Panchromatic and Multispectral (VNIR) Swath Width: 60–120 km Resolution: Pan: 1.5 m; MS:6m Operating Mode: Stripmap, and HR modes	1 1	Free for R&D; Commercial	France	2012 2014
Pléiades-1A /-1B		Panchromatic and Multispectral (VNIR) Swath Width: 20 km at nadia Resolution: Pan: 50 cm; MS:2 m	1 1	Commercial	France	2011 2012
Pléiades Neo-3/-4		Multispectral (VNIR) Swath Width: 14 km at nadia Resolution: Pan: 30 cm; MS:1.2 m	2	Commercial	France	2021
PlanetScope		Multispectral (VNIR) Resolution: 3–5 m	> 120	Commercial	USA	2016–2022
SkySat-1 to SkySat 21 (Planet Labs)		Panchromatic and Multispectral (VNIR) Swath Width: Approx. 5.5–8 km Resolution: Pan: 57–86 cm; MS: 0.75–1 m	21	Commercial	USA	2013–2020
WorldView-3/-4		Panchromatic and Multispectral (VNIR, SWIR) Swath Width: Approx. 13km Resolution: Pan: 31 cm; MS: 1.24–4 m	1	Commercial	USA	2014 2016
Mission	Sensor	Sensor Characteristics	# of Satellites	Data Availability	Country	Launch Year
Sentinel-3	Ocean and Land Colour Instrument (OLCI) Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR)	Multispectral (VNIR) Swath Width: 1 270 km Resolution: 300 m Multispectral (V, SWIR/MIR, TIR) Swath Width: 1 420 km (nadir) Resolution: 500 m/1 km	2	Free, and open access	ESA	2016 2018
TERRA	ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer MODIS Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer	Multispectral (VNIR, SWIR, TIR); Swath Width: 60 km Resolution: 15 m/30 m/90 m (VNIR, SWIR, MIR, TIR); Swath Width: 2 330 km Resolution: 250 m/500 m/1 km	1	Free, and Open	USA	1999
Suomi National Polar- orbiting Partnership (Suomi NPP)/NOAA-20	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)	Multispectral (VNIR, SWIR, TIR); Swath Width: 3 000 km Resolution: 375 m/750 m	1 1	Free, and Open	USA	2011 2017
The Environmental Mapping and Analysis Program (EnMAP)	Hyperspectral Imager (HSI)	Hyperspectral (VNIR: 228 bands; SWIR:163 bands) Swath Width: 30 km Resolution: 30 m	1	Free, and open to Scientific Users Commercial	Germany	2022

Tabell 2. Valda exempel på radarsatellitupdrag med sensoregenskaper.

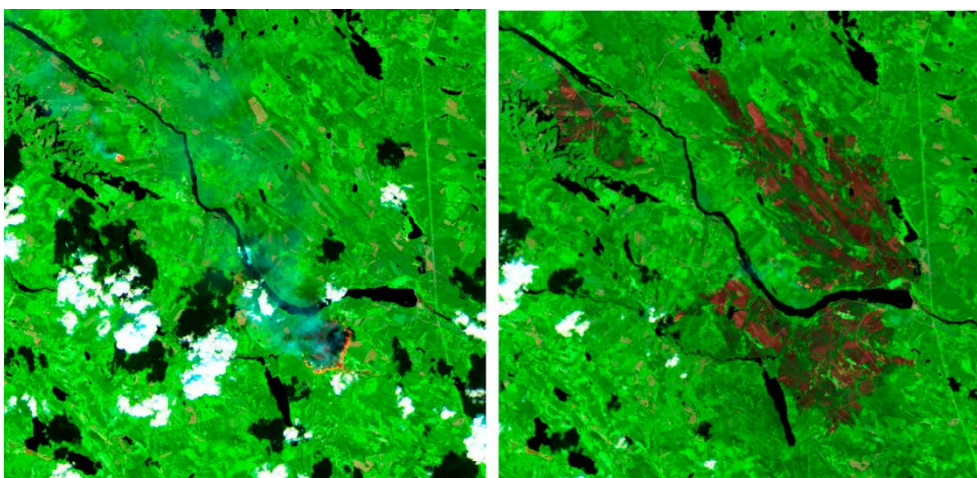
Mission	Sensor	Sensor Characteristics	# of Satellites	Data Availability	Country	Launch Year
Sentinel-1	C-band SAR	Stripmap (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra Wide swath (EW), and Wave (WV) mode Swath Width: 80 km/250 km/400 km Resolution: 5 m/20 m/100 m	2	Free, and Open	ESA	2014 2016 (S-1B failed in Dec., 2021)
RADARSAT-2	C-SAR	Fine, Standard, ScanSAR, Ocean Surveillance Selective Single or Dual Polarization/Polarimetric Swath Width: 45 km – 500 km Resolution: 2 m – 500 m	1	Commercial	Canada	2013 2021
RADARSAT Constellation Mission (RCM)	C-SAR	Spotlight, Very High, High, Medium, Low, Ship Detection Selective Single or Dual Polarization/Polarimetric Swath Width: 5 km – 500 km Resolution: 1 m – 100 m	3	Restricted access	Canada	2019
TerraSAR-X/ TANDEM-X	X-SAR	Stripmap, Spotlight and ScanSAR Swath Width: 5 km – 100 km Resolution: 1 m, 3 m, 16 m	2	Free, and open to Science Users Commercial	Germany	2007 2010
COSMO SkyMed	X-SAR	Spotlight, Stripmap, and ScanSAR Selectable Single or Dual Polarization Swath Width: 10 km – 200 km Resolution: 1 m – 100 m	4	Limited access to Scientific Users, Restricted	Italy	2007–2010
ICEYE	X-SAR	STRIP, SPOT, SLEA, SCAN Swath Width: 30 km/5 km/15 km/100 km Resolution: 3 m/1 m/1 m/15 m	21 (out of 48) Stripmap (SM), Interferometric Wide swath (IW), Extra Wide swath (EW), and Wave (WV) mode Swath Width: 80 km/250 km/400 km Resolution: 5 m/20 m/100 m	Commercial	Finland	2018–2022
Capella	X-SAR	Spotlight, Sliding Spotlight, Stripmap Swath Width: 5 km – 20 km Resolution: 0.5 m – 1.2 m	8 (out of 36)	Commercial	USA	2018–2022



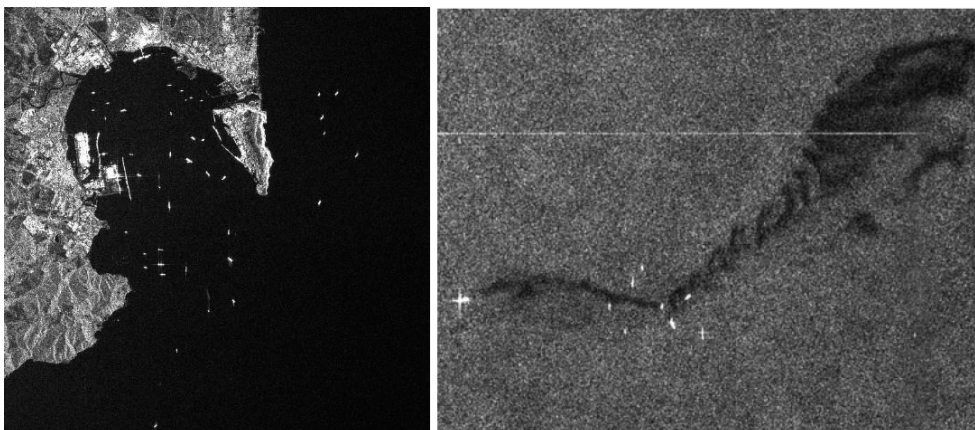
Figur 3. Spektrala egenskaper hos Sentinel-2 MSI-data. Källa: ESA (2022). <https://sentinel.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>



Figur 4. Jämförelse av Sentinel-2 MSI med Landsat-7 ETM+ och Landsat-8 OLI. <https://www.usgs.gov/media/images/comparison-landsat-7-and-8-bands-sentinel-2>



Figur 5. Sentinel-2 MSI-bilder över Enskogens skogsbränder i Sverige 2018. Till vänster: tidigt skede av de bränder som observerades 2018-07-16; Höger: drabbade områden observerade 2018-07-24.



Figur 6. Sentinel-1 SAR-bilder. Till vänster: Olika fartyg observerade mellan Gibraltar och Algeiras i september 2017; Till höger: Oljeutsläpp observerat utanför den belgiska kusten nära Zeebrugge den 08/10/2015 efter en kollision mellan två fartyg. Källa: ESA (2022).

1.3 Molnbehandlingsplattformar och artificiell intelligens

Med det ökande antalet jordobservationssatelliter utgör stora data från fjärranalys en utmärkt möjlighet att övervaka vår föränderliga planet. Uppgifterna i sig är dock inte tillräckliga för att studera globala miljöförändringar och för att införa operativa och tillförlitliga tjänster. För att utnyttja dem måste man ta hänsyn till två viktiga aspekter: 1). Datainfrastrukturen för att lagra och hantera data, och 2). Modellerna och algoritmerna för att utvinna värdefull information från EO:s långa och täta tidsserier (big data).

1.3.1 Molnbehandlingsplattformar

Under de senaste åren har molnbehandlingsplattformar utvecklats med bidrag från open source-samfund (Open data Cube), rymdorganisationer (ESA Thematic Exploitation Platform, DIAS) och privata företag (Google Earth Engine, Amazon Web Services, Azure, Sentinel-Hub). Den största utmaningen är bristen på funktionalitet för analys av stora EO-data (dvs. API för bearbetning på hög nivå) för att omvandla stora data till användbar information och på ett tillförlitligt sätt (Ban, 2021). I Tabell 3 presenteras de viktigaste parametrarna för Earth observations cloud processing platform (EO-CPP) (Gomes m.fl., 2020).

Tabell 3 – Nyckelparametrar för EO-CPP. Källa: Gomes m.fl. (2020).

	Data abstraction	Processing abstraction	Physical infrastructure abstraction	Open Governance	Reproducibility of science	Infrastructure replicability	Processing scalability	Storage scalability	Data access interoperability
GEE	High: Image, ImageCollection, Feature and FeatureCollection	Medium: Redefined pixel-wise functions	High: Both data storage and processing infrastructure	Low: Proprietary software, closed source software	Medium: Data links and scripts shareable without guarantee to be reproducible	Low: Proprietary closed source software	High: Code automatically executed in parallel using a MapReduce approach	High: Google storage services	Medium: Tile service
Sentinel Hub	High: Data Source, Instances and Layers	Medium: Custom scripts (Evalscripts) layers perform pixel-wise processing	High: Both data storage and processing infrastructure	Low: Proprietary closed source software	Low: Without any ease	Low: Proprietary closed source software	High: Closed solution	High: Closed solution	High: OGC Services
ODC	High: Product and Dataset	Medium: Xarray and celery	Medium: Only data storage infrastructure	High: Defined governance process	Low: Without any ease	High: Open source code, docker containers and documentation available	Medium: A template application available (Python and Celery)	High: Distributed File System, S3 and HTTP	High: OGC Services
OceanEO	High: Collection and Granule	Medium: User-Defined Functions, Process graphs and Jobs	High: Both data storage and processing infrastructure	Medium: Only open source repository	Low: Without any ease	Undefined: Dependent on the backend used	Undefined: Dependent on the backend used	Undefined: Dependent on the backend used	High: OGC Services

För att underlätta och standardisera tillgången till data har Europeiska kommissionen finansierat införandet av fem molnbaserade plattformar. De ger centraliserad tillgång till Copernicus data och information samt till bearbetningsverktyg. Dessa plattformar kallas Data and Information Access Services (DIAS). De fem DIAS-plattformarna online gör det möjligt för användare att upptäcka, manipulera, bearbeta och ladda ner Copernicus-data och information. Alla DIAS-plattformar ger tillgång till Copernicus Sentinel-data, liksom till informationsprodukter från Copernicus sex operativa tjänster, tillsammans med molnbaserade verktyg (öppen källkod och/eller mot betalning per användning). Var och en av de fem konkurrerande plattformarna ger också tillgång till ytterligare kommersiella satellitdata eller andra datauppsättningar än satellitdata samt erbjudanden i form av stöd eller prioritet (EU, 2022). Destination Earth (DestinE), som lanserades av Europeiska kommissionen och partners i mars 2022, syftar till att utveckla en mycket exakt digital modell av jorden för att övervaka och förutsäga samspelet mellan naturfenomen och mänskliga aktiviteter (EC, 2022).

I Sverige pågår utvecklingen av Nationella Rymddatalabbet (Digital Earth Sweden, <https://rymddatalabbet.se>, <https://digitalearth.se/>), vilket är tänkt att vara ett nationellt innovationsnav för svenska myndigheter som använder jordobservationsdata, och för utveckling av AI-baserad analys av data. Målet är att få data, teknik och metodik på plats för att möjliggöra systematisk utveckling av rymddatabaserade tjänster och applikationer. Plattformen ger tillgång till öppna data från Copernicus, samt erbjuder verktyg för att göra data sökbar, exempelvis via Open Data Cube. Rymddatalabbet bidrar till att insamling, verktyg och kunskap om fjärranalys finns samlade på ett ställe, vilket ökar samverkan och användningen av rymddata hos myndigheter. För närvarande (2020–2024) utvecklas plattformen ytterligare genom projektet DES (Digital Earth Sweden, <https://digitalearth.se/>). Detta kopplar till ett redovisat regeringsuppdrag till Rymdstyrelsen om utvecklingen av ett nationellt rymddatalabb inom ramen för den svenska datastrategin (Ramboll, 2021). Utvecklingen av rymddatalabbet har även kopplingar till EU:s datastrategi och common european dataspace.

1.3.2 Artificiell intelligens för jordobservationer

Tack vare den snabba utvecklingen av satellittekniken är vi på väg in i en ny era av jordobservation (EO). Nationella och internationella rymdorgan och innovativa företag har startat olika program för satellitobservation som samlar in enorma mängder satellitbilder med högre rumslig upplösning och tät tidsmässig täckning. Även om dessa stora datamängder från EO ger stora möjligheter att övervaka land- och vattenmiljön, innebär de också nya utmaningar. Det behövs nya algoritmer och modeller för att bearbeta och utvinna användbar information från tidsserier av satellitbilder med flera upplösningar, flera sensorer, långa och täta tidsserier av satellitbilder.

Djupinlärning (deep learning) är den snabbast växande trenden inom big data-analys och ansågs vara en av de tio banbrytande teknikerna 2013 (Zhu m.fl., 2017). Under de senaste åren har övervakad djupinlärning, t.ex. convolutional neural networks (CNN), använts alltmer inom fjärranalys, inklusive bildklassificering, objektigenkänning och -detektering, semantisk segmentering och förändringsdetektering (Ban m.fl., 2020). Vanligtvis krävs tätt märkta data för att träna semantiska segmenteringsmodeller.

Prestandan hos den övervakade djupinlärningen är starkt beroende av kvaliteten på de annoterade fjärranalysdata. Att märka högkvalitativa träningsetiketter i stor skala är dock extremt tidskrävande och dyrt (Hafner m.fl., 2022). Märkning av data

förblir en stor utmaning för stora datamängder inom jordobservation, och därför har oövervakad inlärning, semi-övervakad inlärning, svagt övervakad inlärning och självövervakad inlärning fått ökad uppmärksamhet på grund av att de inte är så beroende av dataannotering (Hafner m.fl., 2022; Schmitt m.fl., 2020, Wang m.fl., 2022). Hafner m.fl. (2022) föreslog till exempel en metod för global stadskartläggning med hjälp av semiövervakad inlärning som kan dra nytta av både märkta och icke-märkta data från Sentinel-1 SAR- och Sentinel-2 MSI-data.

Kärnblocket i CNN, kan fånga lokala interaktioner mellan element (t.ex. information om konturer och kanter), men det lokala mottagningsfältet i CNN begränsar modelleringen av långväga beroenden i en viss bild. Baserat på självuppmärksamhetsmekanismen (the self-attention mechanism) har vision transformers (ViT) förmågan att fånga långväga beroenden och interaktioner, vilket är särskilt eftertraktat för modellering av tidsserier för fjärranalys (Aleissae m.fl., 2022). Sammanfattningsvis tror vi att CNN- och ViT-baserade djupinlärningsmodeller kommer att fortsätta att dominera i olika fjärranalystillämpningar.

1.4 Europeiska initiativ

Det finns flera europeiska initiativ för att integrera, utforska och utveckla jordobservationsdata och system med påverkan på samhället. Observera att exemplen nedan inte är avsedda att vara fullständiga.

1.4.1 Copernicus tjänster

Copernicus genomförs av Europeiska kommissionen med stöd från Europeiska rymdorganisationen (ESA) och Europeiska miljöbyrån (EEA). Copernicus mål är att övervaka och analysera land- och havsytor för att stödja strategier för begränsning av och anpassning till klimatförändringar, effektiv hantering av nödsituationer och förbättring av säkerheten för alla medborgare (<https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems/what-copernicus>). Information och data från Copernicus förbättrar människors säkerhet, t.ex. genom att tillhandahålla information om naturkatastrofer som skogsbränder eller översvämningar, och bidrar därmed till att förhindra förlust av liv och egendom samt skador på miljön. Copernicusprogrammet betjänas av särskilda satelliter (Copernicus Sentinel-satelliterna) och en uppsättning ytterligare bidragande uppdrag (satelliter som drivs av olika kommersiella och nationella organ). Sex Copernicustjänster omvandlar fullständiga, kostnadsfria och öppna data till mervärdesinformation genom att bearbeta och analysera data och omvandla dem till tjänster och produkter såsom informativa kartor och dataset:

- Copernicus atmosfärövervakningstjänst (CAMS)
- Copernicus tjänst för övervakning av den marina miljön
- Copernicus landövervakningstjänst
- Copernicus klimatförändringstjänst
- Copernicus katastrofhanteringstjänst (CEMS)
- Copernicus säkerhetstjänst

CAMS-PRODUKTER OCH APPLIKATIONER

CAMS använder satellitdata i kombination med observationer och datormodeller och erbjuder dagliga och fördröjda lägesberäkningar av atmosfärens sammansättning, växthusgaser, luftkvalitet och atmosfäriska pollenhalter. CAMS syftar till att förbättra möjligheterna till ett informerat beslutsfattande inom viktiga sektorer som hälsa, energi och stadsplanering (NCMRWF, 2019). Förutom gratis, tillgängliga data från t.ex. Copernicus utvecklas kommersiella satellitprodukter för specifika tillämpningar, t.ex. för specifika luftkvalitetstillämpningar, som kan mäta punktkällor med mycket hög upplösning. De europeiska initiativens avgörande roll kan dessutom återspeglas i Copernicus katastrofhanteringstjänst (CEMS), som erbjuder snabbt stöd vid naturkatastrofer som översvämningar, torka och skogsbränder. Det är därför absolut nödvändigt att anpassa vissa av dessa egenskaper och ramar till de svenska nationella myndighetsramarna utifrån dess användar- och intressentbehov och särdrag. Resultaten av denna syntes kommer att kunna hjälpa Naturvårdsverket och HaV att upprätthålla och främja sin effektivitet i en tid av Big Data och Digital Transformation, gemon att utnyttja alla tillgängliga resurser tillsammans med lämpliga sätt att samla in, analysera och sprida dem.

1.4.2 Relevanta EU Projekt

När det gäller att överbrygga forskning och beslutsfattande och interaktion med intressenter, användare och offentliga myndigheter har HORIZON-Europe Programmet finansierat flera storskaliga projekt som använder fjärranalysdata för att ta itu med frågor som är relevanta för HaV och Naturvårdsverket. Nedan ges några exempel:

Stadsområden är särskilt sårbara för klimatförändringarnas effekter. I takt med att andelen av världens befolkning som bor i städer fortsätter att öka, kommer också klimatpåverkan och dess skadliga effekter på medborgarnas välbefinnande att förvärras. Denna allvarliga situation kräver mer motståndskraftiga miljöer och stadsutvecklingsstrategier. Det nuvarande (2021–2025) EU-projektet HARMONIA (<http://harmonia-project.eu/>) använder en mängd olika offentligt tillgängliga EO-data som extraherats från Copernicus arkiv för att minska urbana problem som översvämningar, jordbävningar och skogsbränder, samt ta itu med klimatförändringseffekter genom att mäta effekterna av Urban Heat Island (UHI) och urban grönhet. Att exakt kvantifiera effekterna av klimatförändringar med avseende på resiliensbedömningar är något som HaV och Naturvårdsverket kan integrera i sina utvecklingsplaner för att utnyttja kraften i fjärranalys för sina egna behov och plattformar.

Myndigheter som HaV och Naturvårdsverket gynnas mest av lösningar som är skraddarsyddas för beslutsfattare och beslutsfattare. Horizon E-Shape-projektet (<https://e-shape.eu/>) ger riktlinjer för hur man bäst kan dra nytta av Copernicusdata och deras tillgångar. Projektet tillhandahåller riktlinjer och pilotapplikationer för att beräkna indikatorer för hållbar utveckling, luft- och vattenkvalitet och faror effektivt och snabbt, och övervakning av biologisk mångfald och våtmarker (Tarantino m.fl., 2021; Tomaselli m.fl., 2021) bland andra. Användningen av allmänt tillgängliga EO-data som Sentinel 1 och 2 betonades särskilt i fallstudier av nya tillämpningar såsom storskaliga uppskattningar av trädkronornas höjd (Alagioglou m.fl., 2021). Dock finns för Sveriges del bättre tillgängliga data i form av laserdata.

En av de mest brådskande frågorna är övervakningen av biologisk mångfald på lång och kort sikt. Projekt som ECOPOTENTIAL (<http://www.ecopotential-project.eu/>) har framgångsrikt demonstrerat potentialen hos fjärranalysinformation för att förstå,

modellera och förutsäga framtida ekosystemförhållanden och tjänster i stora kartläggningsskalor. Exemplifierande tillämpningar involverade användning av Copernicus EO-data för att förutsäga barkborreangrepp (Dittrich m.fl., 2019), vattenhalt i våtmarker (Lefebvre m.fl., 2019) och sällsynta växtarter samt mycket högupplösta satellitbilder för att kartlägga invasiva trädarter (Tarantino m.fl., 2019).

När det gäller kust- och havstillämpningar har flera projekt undersökt utnyttjandet av EO-data för att ta itu med ämnen som vattenkvalitet, optimala fiskeområden, fiskodlingsplatser och vattenklassificering. Viktigast av allt är att de överbryggat klyftor mellan analytiker och intressenter, mot operativa och tolkningsbara ramar. Till exempel Copernicus Evolution – Forskning för harmoniserad vattenobservation i övergångszon (2021–2025; <https://certo-project.org/About>), fokuserar på övervakning av vattenkvaliteten. Den använder Copernicus-data som är utformade för att observera vattenkvaliteten och tjänster för att tillhandahålla data och information till slutanvändare inom industri, förvaltning, övervakningsorgan och vetenskap. Den innehåller fallstudier i Östersjön (Kuriska lagunen), som delvis speglar liknande miljöer som svenska kustområden.

2. Metod

Det här projektet har utförts i samarbete mellan IVL Svenska Miljöinstitutet och KTH (Avdelningen för Geoinformatik). Projektet genomfördes i samarbete med en referensgrupp. Referensgruppen, bestående av sju personer (två från HaV, tre från Naturvårdsverket och två från Länsstyrelsen i Stockholm) har följt projektet och fått möjlighet att bidra med input via två referensgruppsmöten samt bidragit till synpunkter på slutrapporten. Referensgruppen har på så sätt bidragit till att lyfta de områden som är intressanta för respektive myndighet att vidareutveckla med avseende på fjärranalys.

Syntesen omfattar en systematisk sammanställning och genomgång av befintlig nationell och internationell kunskap (vit och grå litteratur) om fjärranalys kopplat till miljöövervakning.

Vi följde en s.k. ”Double Diamond process”, som består av fyra delar: Discover, define, develop och deliver. Referensgruppen användes för att identifiera utmaningar (discover), samt för att identifiera och definiera de viktigaste sakområdena (define), för att därefter, med hjälp av litteraturstudier, identifiera möjliga fjärranalystillämpningar (develop) för att slutligen mynna ut i rekommendationer (deliver).

Vi har valt att fokusera på följande ämnesområden, som alla faller inom Naturvårdsverkets och HaV:s förvaltningsområden:

- Luftkvalitet
- Biodiversitet
- Användning för sjöar, kust och hav
- Förvaltning av naturresurser (markanvändning, naturtyper, barkborreangrepp, övervakning av bränder mm)
- Kartläggning och övervakning av grön infrastruktur i städer

Rapporten fokuserar på fjärranalys med satelliter, men även andra typer av fjärranalys diskuteras översiktligt för vissa applikationer (t.ex. flygbilder och användning av drönare, även kallade UAV efter ”Unmanned Aerial Vehicles”).

Vi har baserat syntesen på kunskapsinhämtning från forskningsartiklar, internationella och nationella rapporter, webbsidor och övrig relevant litteratur. Syntesen omfattar en sammanställning av kunskap om aktuell användning av fjärranalys inom Naturvårdsverkets och HaV:s administrativa områden, men redovisar också potential och möjligheter till framtida användning baserat på internationella och nationella exempel.

Analysen omfattar:

- En övergripande introduktion till fjärranalys, med fokus på satellitövervakning
- En kunskapssammanställning om aktuell användning av fjärranalys inom Naturvårdsverkets och HaV:s förvaltningsområden.
- Identifiering av potentiella möjligheter att använda fjärranalys för Naturvårdsverket och HaV baserat på nationella och internationella exempel. Exempelvis (nya) områden/applikationer som har störst utvecklingspotential för att uppfylla målen för de två myndigheternas olika förvaltningsområden, där fjärranalys har potential att effektivisera arbetet för både Naturvårdsverket och HaV.
- Rekommendationer för framtida forskning och framtida policyarbete inom området, samt potential för kunskapsöverföring för ändamål som miljöövervakning, naturresursförvaltning och effektivare kunskapsutbyte.

3. Fjärranalysapplikationer

Fjärranalys har ett brett utbud av tillämpningar inom många olika områden, exempelvis inom:

- Luftkvalitetstillämpningar för att uppskatta utsläpp av föroreningar och övervaka långsiktiga trender
- Kusttillämpningar, exempelvis för att övervaka strandlinjeförändringar, spåra sedimenttransporter och kartlägga kustnära förändringar i det gemensamma syftet att förstå drivkrafterna bakom fenomenen men också för att förebygga dem.
- Havsapplikationer, exempelvis för övervakning av havscirkulation och ström-system, mätning av havstemperatur och våghöjder och kartläggning av havsis.
- Naturresursförvaltning, exempelvis övervakning av förändrad markanvändning och marktäcke, våtmarker, biologisk mångfald och kartläggning av vilda livsmiljöer.
- Naturkatastrofer, där fjärranalysdata kan användas för att bedöma effekterna av en naturkatastrof och skapa beredskapsstrategier som kan användas före och efter en farlig händelse, exempelvis skogsbränder, erosion, oljeutsläpp och översvämningar.
- Statistiska tillämpningar – förbättrade underlag för officiell statistik.

Nedan presenterar vi en översikt av kunskapsläget med avseende på fjärranalys-applikationer inom de områden som bedömts vara mest relevanta med avseende på miljöövervakning. Detta gäller fjärranalysapplikationer för luftkvalitet, biodiversitet, användning för sjöar, kust och hav, förvaltning av naturresurser (markanvändning, marktäcke, barkborreangrepp, övervakning av bränder mm), samt kartläggning och övervakning av grön infrastruktur i städer.

3.1 Luftkvalitet

Satellitövervakning av luftkvalitet har utvecklats enormt under de senaste 20 åren och ett brett utbud av föroreningar och växthusgaser kan övervakas såsom aerosoler, ozon (O_3), kvävedioxid (NO_2), ammoniak (NH_3), kolmonoxid (CO), koldioxid (CO_2), metan (CH_4), formaldehyder ($HCHO$) och svaveldioxid (SO_2). Fjärranalys kan exempelvis användas för mätning av luftkoncentrationer, uppskattningar av utsläpp eller analyser och prognoser av händelser som påverkar luftkvalitén, exempelvis vulkanutbrott. Satellitdata har potential att komplettera befintliga markbaserade mätstationer och ge storskalig täckning där markbaserade data är otillgänglig eller knapphändig.

Fjärranalys kan exempelvis användas för att studera utsläpp från stora punktkällor, exempelvis NO_x och SO_2 från koleldade kraftverk. Kina och Indien har varit lämpliga områden för studier av punktkällor då båda länderna innehåller stora koleldade kraftverk. Satelliter kan även detektera naturliga punktkällor som exempelvis vulkanutbrott (Schmidt m.fl., 2015). En tydlig fördel som satelliter har jämfört med markmätningar är möjligheten att övervaka utsläpp från en källa som kan vara mycket avlägsen och otillgänglig, samt kostsam eller farlig för människor att övervaka på plats.

En annan potentiell tillämpning för satellitobservationer är att uppskatta utsläpp i städer, där det kan finnas många små källor av olika typer som sammantaget representerar ett stort utsläppsbidrag spridda över ett brett område av exempelvis NO₂ (Lange m.fl., 2022). Även kondensstrimmor från flygplan kan övervakas med fjärranalys (Vázquez-Navarro m.fl., 2015).

Fjärranalys av luftkvalitet med hjälp av satelliter, använder sig av sensorer/instrument som mäter föroreningar i en luftpelare, snarare än vid en fast punkt i marknivån. Enkelt uttryckt utförs satellitmätningar av luftföroreningar och växthusgaser genom att mäta solstrålning som sprids genom hela atmosfärskolonnen. Detta mätresultat kan sedan konverteras till bidraget från troposfären genom att korrigera för det stratosfäriska bidraget. Ofta finns det flera olika modeller/algoritmer som testats av olika forskargrupper för att uppskatta atmosfärsmängden och följaktligen kan det finnas flera produkter tillgängliga för samma förorening från samma instrument. Dessutom kan förfining av en specifik hämtningsalgoritm ske under flera år, vilket leder till flera versioner och förhoppningsvis förbättringar av en given produkt från samma forskargrupp (Duncan m.fl., 2014).

För mätning av gaser mäts antalet molekyler i den totala luftkolonnen med spektroskopiska och radiometriska kameror (UV, synligt ljus, nära-IR och kortvågigt IR). Gaser i atmosfären detekteras genom absorption, och varje gas har ett specifikt absorptionsspektrum. Genom att veta hur och i vilken mängd olika molekyler absorberar strålning vid olika våglängder är det möjligt att identifiera ett ”fingeravtryck” för varje atmosfärisk beståndsdel (Duncan m.fl., 2014). Partiklar kan inte mätas direkt, utan istället mäts s.k. AOD (aerosol optical depth), varifrån partikelkoncentrationer härleds (se kapitel 3.1.1).

SATELLITINSTRUMENT OCH PRODUKTER

Numera finns det en stor mängd information tillgänglig online med avseende på satellitinstrument och deras kapacitet att mäta luftföroreningar och växthusgaser. Två av de vanligaste databaserna omfattar:

- WMO OSCAR – ger information om miljösatellituppdrag (WMO, 2022). Databasen innehåller exempelvis information om tidslinjer av satellitinstrument för specifika föroreningar.
- CEOS ESA – Denna databas presenterar de viktigaste funktionerna för satellitobservationer, deras tillämpningar och en systematisk översikt över nuvarande och planerade CEOS fjärranalysuppdrag och deras instrument (CEOS, 2022). Databasen uppdateras årligen och är fullt sökbar.

Satellitprodukter, dvs data från satellitinstrument, finns tillgängliga på olika nivåer (L0-L4), se Tabell 4. Generellt sett är det produkter från L2-nivån som laddas ner och bearbetas för att resultera i produkter på nivå L3 eller L4. Data på nivå L2 och L3 omfattar data från hela atmosfärskolumnen, och ger därför inte några uppskattningar av koncentrationer nära markytan. Mer än en L2-produkt kan finnas tillgänglig för samma förorening från samma instrument.

Tabell 4. Exempel på nivåer för satellitprodukter. Källa: Brown m.fl. (2021).

Nivå	Förklaring
L0	Obearbetade instrumentdata
L1	Kalibrerade strålnings- eller reflektansdata (vid amosfärens topp)
L2	Geofysiska variabler (t.ex. NO ₂ , CH ₄) vid stråkbreddens upplösning
L3u	Geofysiska variabler för en omlopps bana eller delområde mappad till ett grid
L3	Geofysiska variabler (genomsnittliga) över t.ex. dagliga eller månatliga tidsskalor mappade till ett grid
L4	Utdata eller resultat från analyserna av L0 till L3-data

L2-produkter kan innehålla olika datatyper. Exempelvis finns det tre olika datatyper för den ”officiella” L2-produkten från ESA för metan:

- Data nästan i realtid: Tillgänglig inom 3 timmar, ger snabb åtkomst till data för operativa applikationer, men är möjligen ofullständig och saknar full datakvalitet.
- Offline data: Tillgänglig några dagar efter mätning; lämplig för de flesta användare.
- Ombearbetning av data: Avsedd för långsiktig analys med den senaste versionen som ska användas för att säkerställa enhetlighet i databehandlingen.

Produkter från L2-nivån valideras innan de släpps och åtföljs vanligtvis av dokumentation för att stödja användaren. Sådan dokumentation kan variera i detaljeringsgrad, från stora ’användarguider’ som tagits fram för ESA L2-produkter, t.ex. användarhandboken för L2-produkten för metan från TROPOMI (Apituley m.fl., 2022) till mer kortfattad dokumentation för vissa andra produkter, t.ex. IASI (Infrared Atmospheric Sounded Interferometer) instrumentets L2 ammoniakprodukt (AERIS, 2020). De mindre komplexa användarhandböckerna stöds dock vanligtvis av detaljerade forskningsartiklar, exempelvis van Damme m.fl. (2017) för ammoniakprodukten IASI L2.

Utöver satelliter så undersöker flera företag och forskargrupper (t.ex. Airbus och University of Leicester) även användningen av HAPS (high-altitude platform stations) för att mäta luftföroreningar och växthusgaser, se exempelvis Airbus (2020).

En detaljerad beskrivning av satellitmätningar av luftföroreningar och växthusgaser ligger utanför ramen för denna rapport, men vi presenterar här en översikt över nyckelaspekter med avseende på satellitmätningar av luftkvalitet och växthusgaser. Vi har valt att fokusera på de luftföroreningar och växthusgaser som är mest relevanta för Naturvårdsverket (partiklar, NO₂, SO₂, O₃, NH₃, CO₂ och CH₄).

3.1.1 Partiklar

Partiklar kan inte mätas direkt av satellitinstrumenten, utan i stället mäts s.k. AOD (aerosol optical depth), varifrån partikelkoncentrationer härleds (Wei m.fl., 2020). Även om utvecklingen inom partikelmätningen har gjort stora framsteg under senare år (Li m.fl., 2021), så finns det fortfarande stor förbättringspotential att uppnå bättre PM-koncentrationskartor. Zhang m.fl. (2021a) nämner ett flertal områden där PM-mätning med hjälp av satelliter har potential att förbättras i framtiden:

1. **Nya satellitsensorer** som förväntas förbättra observationerna av aerosoler, vilket ökar förutsättningarna att få fram mer exakta PM-masskoncentrationskartor. Dubovik m.fl. (2019) ger en bra sammanställning av nuvarande och framtida instrument.

2. **Förbättringar av algoritmerna**– algoritmerna utvecklas och uppdateras kontinuerligt för att dra full nytta av de nya satellitsensorerna (Wei m.fl., 2020).
3. **Förbättring av metoder** (exempelvis interpolationstekniker) för att åtgärda datagapp, vilket kan bero på exempelvis störningar orsakade av moln.

Ett flertal studier förespråkar att man kombinerar satellitdata med andra data (spridningsmodeller mm) för att få fram PM-koncentrationskartor (e.g. Zhang m.fl. 2021a, Schneider m.fl., 2020)

Kartor för dagliga PM_{2,5}-koncentrationer (1 km × 1 km) har tagits fram både på nationell nivå (e.g. Storbritannien, 2008–2018, Schneider m.fl., 2020) och för Europa (2018–2020, Ibrahim m.fl., 2022). För att ta fram PM_{2,5}-kartan över Storbritannien använde sig Schneider m.fl. (2020) av en ”machine-learning-model”, som kombinerade data från flera källor (satellitdata, klimat- och atmosfärsmodeller, spridningsmodeller mm). Även Ibrahim m.fl. (2022) baserade den Europeiska PM_{2,5}-kartan på en ”machine-learning-model” som kombinerade data från flera källor. Ibrahim m.fl. (2022) är den första studien med hög rumslig och tidsmässig upplösning som endast är beroende av öppna data och som täcker hela Europa.

3.1.2 Luftföroreningar (NO₂, SO₂, O₃, NH₃)

Satellitobservationer av troposfärisk NO₂ har utförts sedan 1995 och har kontinuerligt förbättrats med avseende på både geografisk och tidsmässig upplösning. Exempelvis har lanseringen av satellitsensorn Sentinel-5P TROPOMI (2017) gjort det möjligt att mäta NO₂ med en pixelstorlek på 5,5 × 3,5 km (sedan augusti 2019). Även NO₂-algoritmerna och modeller har förbättrats. Exempelvis föreslår Scheibenreif m.fl. (2022) en ”deep learning model” där man kombinerar satellitdata med markobservationer för att förbättra uppskattningarna av troposfäriskt NO₂ ytterligare.

När Jamali m.fl. (2020) analyserade geografisk fördelning och trender i troposfäriska NO₂-koncentrationer på en global nivå (2005–2018) med OMI-instrumentet (Ozon Monitoring Instrument), drog de slutsatsen att satellitmätningarna överensstämde väl med markbaserade mätningar. I en senare studie har även NO₂ emissioner uppskattats från Sentinel-5P TROPOMI-observationer (Lange m.fl., 2022).

Satellitmätningar av NO₂ och/eller NO_x har även använts för att validera utsläppsinventeringar, både på europeisk nivå (Szymankiewicz m.fl., 2021) och nationell nivå (Linehan, 2021; Pope m.fl., 2022); se exempelvis Avsnitt 4.4 och Figur 17. Szymankiewicz m.fl. (2021) visade bl.a. att satellitobservationer av NO₂ skulle kunna användas för att korrigera utsläppsuppskattningar.

Mätningar av antropogen SO₂ har gjorts med instrumenten GOME, SCIAMACHY, OMI och nyligen TROPOMI. Fioletov m.fl. (2020) genomförde den första globala utsläppsuppskattningen av svaveldioxid (SO₂) för punktkällor, och kunde då identifiera 274 källor med betydande årligt utsläpp.

Det finns ytterligare ett flertal exempel på fjärranalystillämpningar av SO₂-mätningar. Exempelvis identifierade Wang m.fl. (2021a) SO₂ och NO₂ hotspots i Jiangsu-provinsen i Kina (2005–2020), baserat på satellitmätningar med OMI. Studien undersökte den spatiotemporala fördelningen och variabiliteten av SO₂ och NO₂. Satellitdata har även använts i ett flertal studier för att följa upp effekten av vulkanutbrott. Exempelvis jämförde Ialongo m.fl. (2015) satellitmätningar av SO₂ från OMI och OMPS (Ozone Mapping Profiler Suite) med markbaserade mätningar i samband med ett vulkanutbrott på Island i september 2014.

Marknära ozon har mätts med satellit sedan mitten av 1990-talet. Satellitmätningarna, i kombination med andra data (markobservationer mm) kan användas för att bättre förstå marknära ozons rumsliga och tidsmässig utveckling. Det finns ett flertal satellit-instrument för att mäta marknära ozon, exempelvis GOME-2, IASI, TROPOMI, OMI, SCIAMACHY, Sentinel 4 och Sentinel-5 med flera. Cuesta m.fl. (2022) undersökte förändringarna i marknära ozon över Europa i samband med covid-19-pandemin våren 2020 baserat på en kombination av data från satelliter (IASI+GOME2), markobservationer och spridningsmodellering. Enligt författarna är detta troligtvis den första studie som använder direkta satellitobservationer av marknära ozon i en sådan multidataanalys.

Gaudel m.fl., (2018) visade på inkonsekvenser med avseende på satellitmätningar av ozon, både på global och regional nivå. Förutsättningarna att förbättra mätningarna av marknära ozon förbättras dock kontinuerligt tack vare nya instrument och förbättrade algoritmer för att separera andelen marknära ozon från atmosfären.

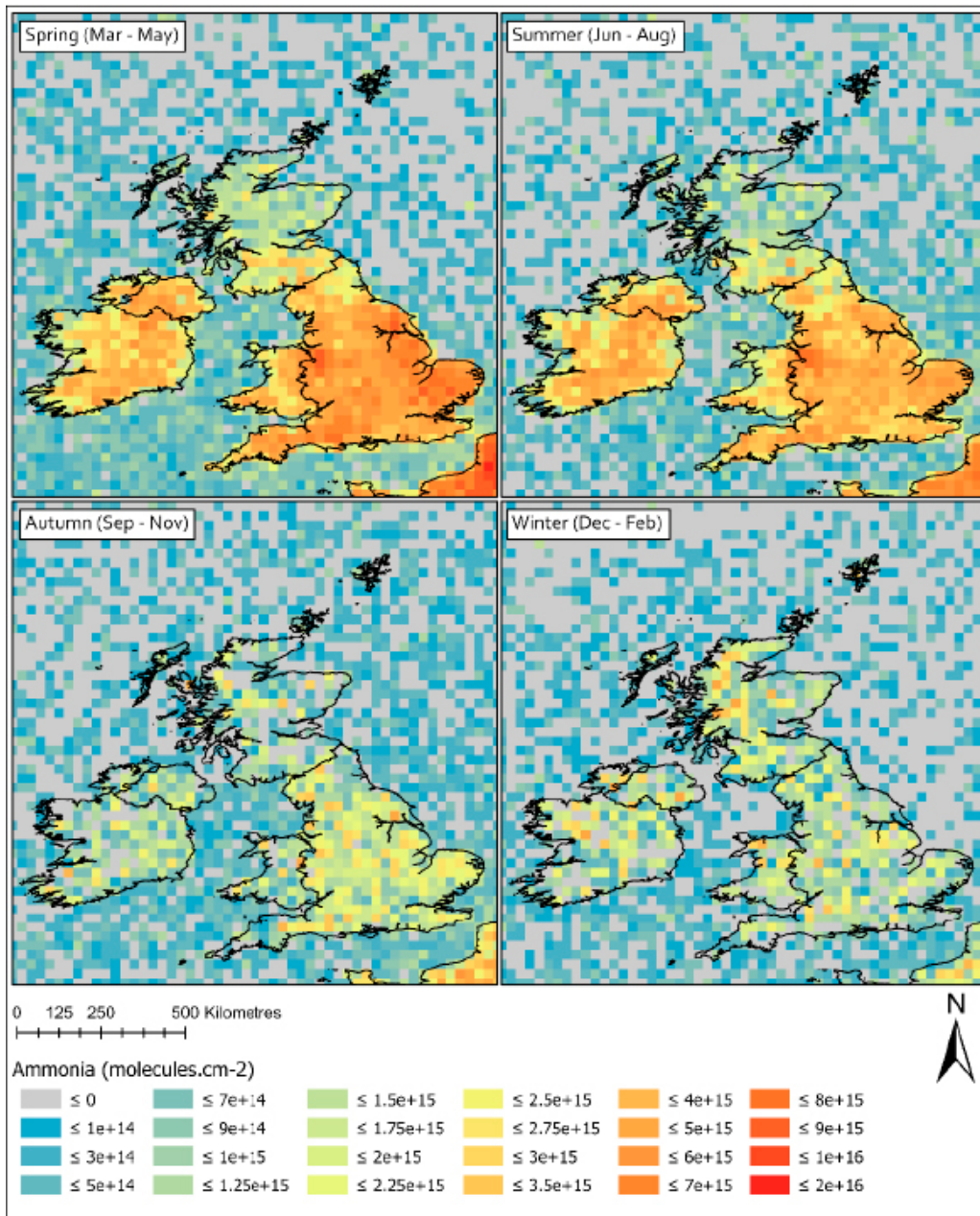
När det gäller ammoniak, så har satellitobservationerna för NH_3 förbättrats under senare år. Exempelvis bidrar de senaste förbättringarna av hämtningsalgoritmer för satellitsensorn AIRS ombord på NASA:s Aqua-satellit till att man nu kan utföra dagliga globala mätningar av atmosfäriskt NH_3 . Satellitobservationer kan fånga spatiotemporala variationer av NH_3 i kolumner såväl som yt-koncentrationer (e.g. Someya m.fl., 2020). Satellitmätningar av NH_3 kan också, i kombination med atmosfäriska modeller, användas för att förbättra NH_3 -emissionsinventeringen som ligger till grund för kemiska spridningsmodeller (Zhu m.fl., 2013; Tsagatakis m.fl., 2022). Nair & Yu (2020) menar att kombinationen av mätningar, satellitobservationer och modellering kommer att bidra till förbättrad förståelse av NH_3 i atmosfären.

Även om satellitobservationer kan vara värdefulla som komplement till markbaserade mätningar av NH_3 -koncentrationer, så finns fortfarande några begränsningar. Exempelvis är nuvarande mätinstrument inte ombord på geostationära satelliter och ger därför inte någon kontinuerlig global täckning (Nair & Yu, 2020). Vidare minskar tillförlitligheten i tolkningen av den spektrala signaturen nattetid och vid molnighet. Det finns också svårigheter i att omvandla satellitinformationen till NH_3 -koncentrationer, bland annat eftersom signalen från NH_3 är liten i jämförelse med bakgrunden. Dessutom är den rumsliga upplösningen på skalan av flera kilometer i diameter, där det kan finnas betydande variabilitet i NH_3 -koncentrationer. För att hantera och förstå ovanstående problem har valideringsstudier genomförts (e.g. Sun m.fl., 2015; van Damme m.fl., 2015; Guo m.fl., 2021). Enligt Nair & Yu (2020) behöver fjärranalysmetoderna ställas in specifikt för mätning av NH_3 -koncentrationer.

Mätning av ammoniakkoncentrationer med satellitdata har gjorts i ett flertal studier på global nivå. Warner m.fl. (2016) redovisade globala NH_3 -koncentrationer (2003–2015) från AIRS och beskrev utsläpp, fördelning och geografiska variationer av NH_3 ur ett globalt perspektiv. I en senare studie redovisade Liu m.fl. (2019) globala NH_3 koncentrationer för tidsperioden 2008–2016.

Van Damme m.fl. (2018) identifierade, kategoriserade och kvantifierade hotspots för ammoniakutsläpp i världen baserat på nästan ett decennium av dagliga IASI-satellitobservationer av NH_3 . I en senare studie av van Damme m.fl. (2021) härleddes globala, regionala och nationella trender av NH_3 från 2008 till 2018, baserat på version 3 av IASI NH_3 dataset. I Storbritannien karterade Marais m.fl. (2021) de nationella NH_3 emissionerna med satellitobservationer med IASI and CrIS (10 km × 10 km), och noterade då att ”Bottom-up” emissionerna var 27 procent lägre än för IASI och

49 procent lägre än CrIS. Även Brown m.fl. (2021) och Tzagatakis m.fl. (2022) har använt satellitdata för att kartera ammoniakemissionerna i Storbritannien, se exempelvis Figur 7.



Figur 7. Medianvärde av ammoniak (molekyler/cm²) i kolonnen i varje rutnät över Storbritannien, Irland och omgivande vatten för de fyra årstiderna (data från 2008–2018). Källa: Brown m.fl. (2021).

3.1.3 Växthusgaser (CO₂ och metan)

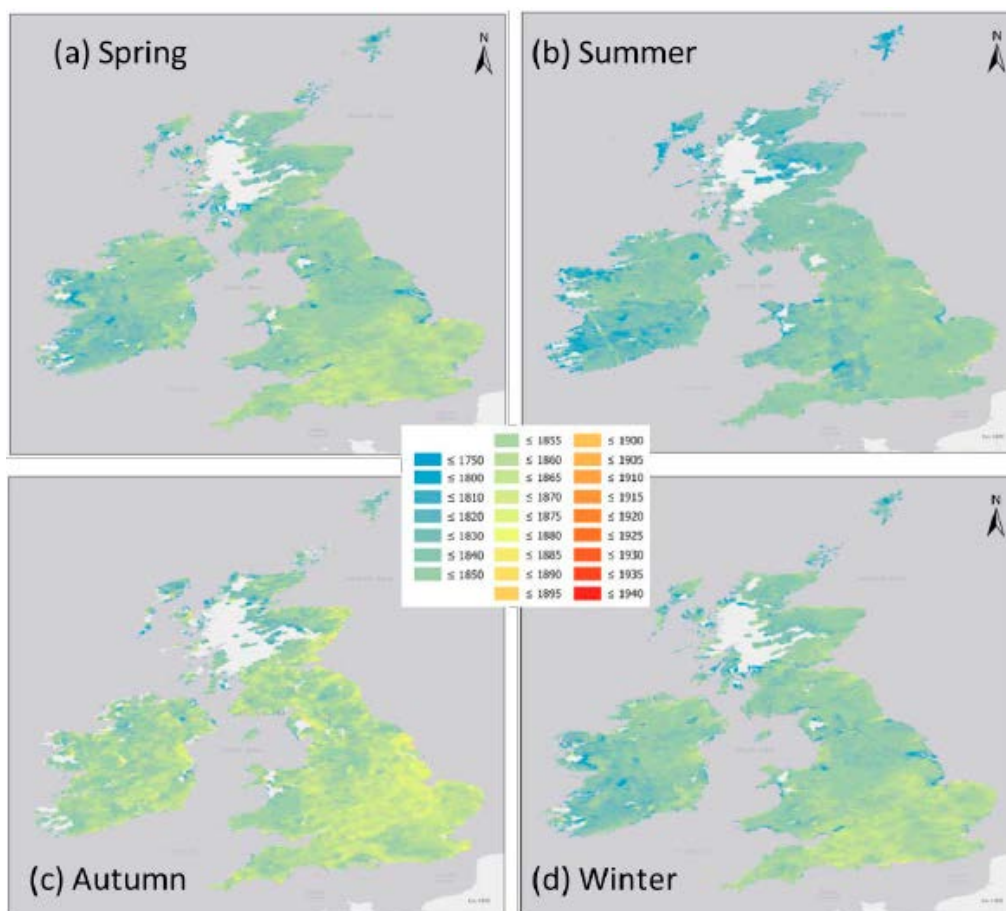
Många satellitsensorer kan mäta CO₂-kolonner, exempelvis SCIAMACHY, AIRS, TES och GOSAT, men svårigheten ligger i att separera det antropogena CO₂-flödet från naturliga källor. Det naturliga bidraget av CO₂ är mycket högre än det antropogena bidraget, vilket utgör en stor utmaning för mätinstrumentering och design av satellitplattformar.

Enbart satellitobservationer kan för närvarande inte tillhandahålla den noggrannhet som krävs för att detektera utsläpp från punktkällor, utan endast tillsammans med markbaserade sensorer och meteorologiska data. 2025 planeras dock CO2M (Carbon Dioxide Monitoring mission). CO2M är planerat som ett tvåsatellituppdrag, med möjlighet till en tredje satellit. CO2M är avsedd att bli Europas främsta satellit för att övervaka och spåra koldioxidutsläpp från antropogena utsläpp.

När det gäller metan har det varit möjligt att mäta metan med satelliter (GOSAT) sedan 2009. Sedan dess har utvecklingen av satellitinstrument för mätning av metan förbättrats, likaväl som hämtningsalgoritmerna (e.g. Hu m.fl., 2016). Jacob m.fl. (2022) klassificerade satellitinstrument för mätning av atmosfärisk metan (SWIR, shortwave infrared) i två olika grupper:

1. "Area flux mappers" (GOSAT och TROPOMI), dvs instrument med hög precision (< 1%) med 0,1–10 km pixelstorlek utformade för att kvantifiera totala metanemissioner på regional till global skala.
2. "Point source imagers" (GHGSat-konstellationen, samt flera hyperspektrala och multispektrala sensorer såsom PRISMA, Sentinel-2, Landsat-8/9 och WorldView-3), dvs instrument med fina pixlar (< 60 m) utformade för att kvantifiera individuella punktkällor genom avbildning av plymer.

Enligt Jacob m.fl. (2022) utgör GOSAT och TROPOMI redan en kraftfull resurs för att kvantifiera nationella metanutsläpp till stöd för Parisavtalet. Exempelvis har Lu m.fl. (2022) utvärderat nationella emissionsinventeringar av metanutsläpp och sektoriella trender 2010–2017 i USA, Kanada och Mexiko, med jämförelse med satellitobservationer. Buchwitz m.fl. (2017) beräknade årliga metanutsläpp i delar av USA, samt Azerbajjan och Turkmenistan med hjälp av data från SCIAMACHY och GOSAT instrument. Det finns även globala studier där man har kvantifierat metanutsläpp baserat på GOSAT i kombination med andra datakällor, t.ex. Palmer m.fl. (2021). Framtida instrument, exempelvis MethaneSAT, GOSAT-GW, Sentinel-5, GeoCarb, CO2M och MERLIN lidar, kommer att öka möjligheten att kvantifiera metanutsläpp med hög upplösning ytterligare (Jacob m.fl., 2022). I Storbritannien har kartering av metan gjorts på nationell nivå (Brown m.fl., 2021; Tsagatakis m.fl., 2022), se Figur 8. Palmer m.fl. (2018) bedömer att satellitmätningar av metan kommer att spela en allt större roll i framtiden för att validera brittiska växthusgasutsläpp.



Figur 8. Metan (ppb-medelvärde) i kolumnerna över Storbritannien och Irland under de olika årstiderna, baserat på v2.1.2 av ESA L2 TROPOMI-metanprodukten för perioden 180504–200630, upplösning: 0,01° x 0,01°. Källa: Brown m.fl. (2021).

Varon m.fl. (2018) redovisar metoder för tillämpning av satellitobservationer för att kvantifiera punktkällor av metan, och Schneising m.fl. (2020) visade att regionalt CH₄-utsläpp från stora olje- och gasfält kan övervakas med dagliga TROPOMI-mätningar. I en senare studie identifierade Lauvaux m.fl. (2022) de största metanläckorna i världen, det vill säga anläggningar som släpper ut oproportionerligt mycket metan, något som inte var möjligt före TROPOMI. Dessa anläggningar med utvinning av gas och olja finns framförallt i USA, Ryssland och Turkmenistan.

Tekniken med satellitövervakning av metanutsläpp utvecklas väldigt snabbt och inom en fyraårsperiod förväntar sig forskarna att det ska finnas nätverk av mindre satelliter, så kallade nanosatelliter, som kan övervaka metanutsläpp. Utvidgningen av konstellationer av GHGSat och Carbon Mapper under de kommande åren kommer att förbättra observationen av metan avsevärt för punktkällor med högre geografisk och temporal upplösning. Dessa nanosatelliter kommer att göra det möjligt att se metanutsläpp från ännu mindre källor/utsläpp, vilket i sin tur skulle kunna göra det möjligt att använda satellitövervakning för att hålla enskilda företag ansvariga för utsläppen.

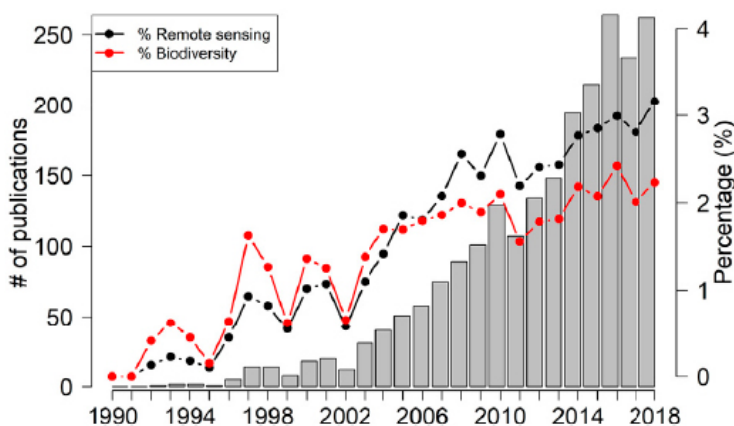
I kapitel 4.4 (och Appendix C) redovisar vi internationella exempel på myndigheters fjärranalystillämpningar. Exempelvis har man gjort fallstudier på användningen av satellitdata för mätning av NO₂ (Storbritannien och Irland), NH₃ (Storbritannien) och metan (Storbritannien och Norge). I Storbritannien har man även jämfört satellit-

mätningar med nationella emissionsinventeringar för NO₂, SO₂ och NH₃. Dessa tillämpningar visar på potentialen även för svenska myndigheter att använda fjärranalys för att förbättra miljöövervakningen (se kapitel 4).

3.2 Biodiversitet

Satellitövervakning kan samla in information om stora områden på ett tidsmässigt konsekvent sätt. Fjärranalysdata kan bland annat användas för att mäta biologisk mångfald, såsom habitatfördelning, arter eller funktionella grupper. De omedelbara fördelarna med satellitövervakning jämfört med traditionella provtagningsmetoder på plats är kostnadseffektivitet eftersom traditionell provtagning vanligtvis är en tidskrävande och dyr process när den utförs över stora områden. Å andra sidan behövs även traditionell provtagning för att träna och verifiera modellerna.

Figur 9 visar det årliga antalet publikationer relaterade till biologisk mångfald och satellitövervakning under en 28-årsperiod, vilket indikerar en kraftigt ökande trend i popularitet. En förklaring till denna starkt ökande trend är uppskjutningen av ESA Sentinel-satelliterna i mitten av 2010, som kraftigt har ökat möjligheten till kartläggning av biologisk mångfald med hjälp av öppna och fritt tillgängliga satellitdata.

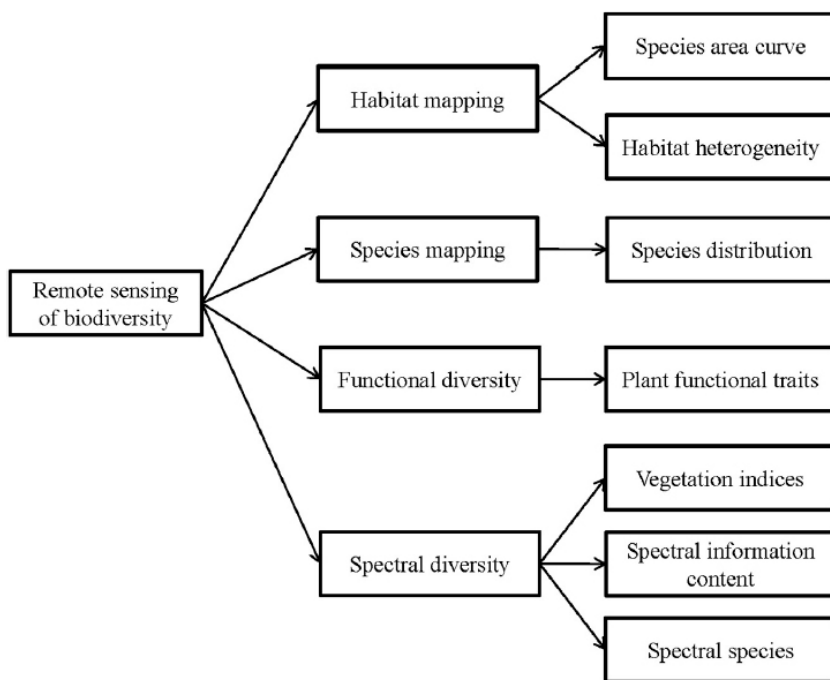


Figur 9. Årliga antalet publikationer om "fjärranalys av biologisk mångfald" (som kombinerar sökttermerna "biologisk mångfald" och "fjärranalys", stapeldiagram, vänster Y-axel) och procentandelar av det totala antalet publikationer som hittats med sökttermerna "fjärranalys" respektive "biologisk mångfald" (linjer, höger Y-axel) från 1990 till 2018 i Web of Science (uppdaterad i januari 2019). Källa: Wang & Gamon (2019).

3.2.1 Vad kan vi mäta?

Vanliga direkta mätningar med fjärranalys och luftburna sensorer som är relevanta för biologisk mångfald kan tillämpas på olika nivåer såsom enskilda organismer, artsamlingar eller ekologiska samhällen. Ett alternativt sätt att extrahera information om biologisk mångfald från fjärranalys är genom indirekta mätningar (dvs. genom att förlita sig på miljöparametrar som approximeringar). Till exempel är många arter begränsade till diskreta livsmiljöer, såsom skogsmark, gräsmarker eller havsgräsbäddar, som tydligt kan identifieras med fjärranalysmetoder. På liknande sätt kan information om arternas livsmiljöbehov kombineras med marktäckningskartor från satellitbilder och därigenom ge robusta uppskattningar av artrikedomen.

Figur 10 beskriver en vanlig kategorisering av tillämpningar för biologisk mångfald med hjälp av satellit- och luftburna sensorer. Huvudkategorierna anges som i) habitatkartläggning, ii) artkartläggning, iii) funktionell mångfald och iv) spektral mångfald, inklusive underkategorier som utvidgar de huvudsakliga metodologiska kategorierna. Som sådan är det uppenbart att fjärranalystillämpningar för biologisk mångfald för närvarande tillämpas i stor utsträckning, och att det i hög grad kan bidra till att övervaka indikatorer i Sverige.



Figur 10. "Taxonomi" för fjärranalys av biologisk mångfald, som illustrerar fyra breda metodologiska kategorier, tillsammans med exempel på specifika delmetoder. Exempel på varje kategori av bedömning av biologisk mångfald diskuteras närmare nedan. Källa: Wang & Gamon (2019).

3.2.2 Boreala miljöer

I Boreala miljöer har satellitövervakning konsekvent använts för att extrahera information om biologisk mångfald. Exempelvis använde Luoto m.fl. (2002) klassificerade Landsatbilder för att fastställa livsmiljözoner (övervakad klassificering) och för att förutsäga djurarters utbredning i ett studieområde i Finland. Likaså Parviainen m.fl. (2009), visade att NDVI-data (Normalized Difference Vegetation Index) utgjorde ett viktigt underlag till modell och kartläggning av växters biologiska mångfald i boreala miljöer. I båda fallen användes Landsat satellitdata (15 meters upplösning). I den boreala skogsmiljön i Kanada, visade Powers m.fl. (2013) att fjärranalysindikatorer som snötäcke och vegetationsproduktivitet var viktiga prediktorer för flora- och faunatrikedom. Modellerna var anmärkningsvärt exakta med avseende på trädslag (mer än 90 % av variansen kunde förklaras), medan resultaten för djurdiversitet (fåglar, däggdjur och insekter) var blygsamma till goda. Powers m.fl. (2013) drog slutsatsen att "Om biologiska data saknas eller är ofullständiga har fjärranalystekniker kapacitet att ge värdefull rumsligt uttömmande information om vissa aspekter av biologisk mångfald."

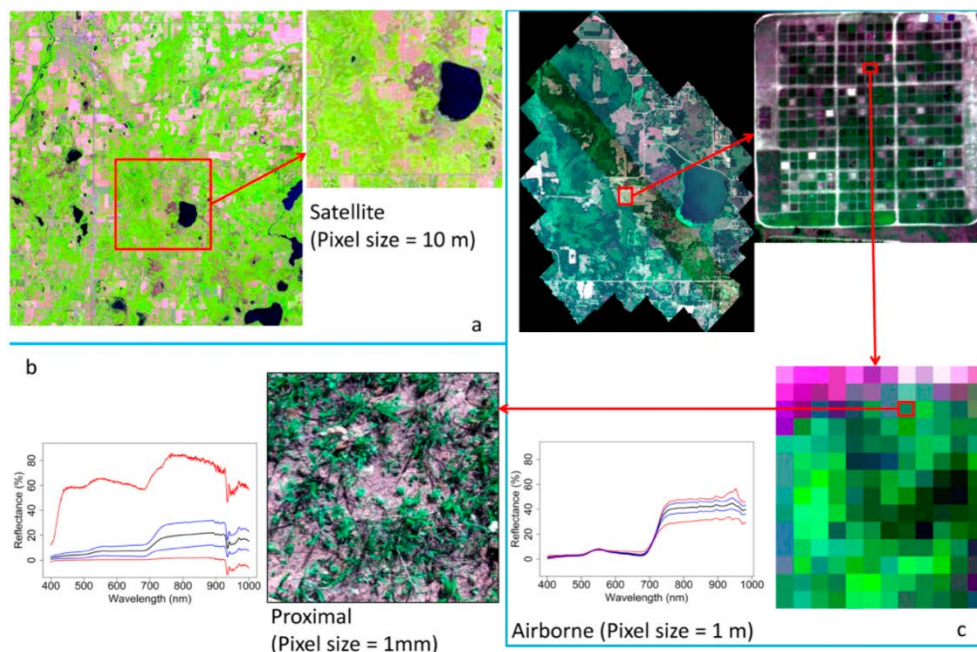
I södra Sverige använde Udali m.fl. (2021) radar Sentinel-1-data (C-band) för att klassificera skogstyp och trädslag. Med tanke på att molntäckning är ett av de största

hindren för optiska sensorer i det boreala landskapet i Sverige, var den framgångsrika användningen av Sentinel-1 för att kartlägga växternas biologiska mångfald när som helst på året en viktig milstolpe och bör övervägas av relevanta intressenter på grund av dess tidsmässiga konsistens. På liknande sätt användes multi-temporala Sentinel-2-bilder för att kartlägga trädarter i nordiska boreala miljöer, med anmärkningsvärd noggrannhet. Persson m.fl. (2018) använde Sentinel-2-data för att klassificera gran (*Picea abies*), tall (*Pinus silvestris*), hybridlärk (*Larix × marschlinii*), björk (*Betula sp.*) och ek (*Quercus robur*) med noggrannheter över 85 % och med mycket fina rumsliga upplösningar (10 meter).

Naturvårdsverket har använt fjärranalys för att generera nationella marktäckedata (NMD) och har även använt fjärranalys för att kartera naturtyper i skyddade områden i Sverige (KNAS), se kapitel 4.1.

3.2.3 Geografisk skala

Rumslig upplösning (den minsta måttenheten) har ett omvänt förhållande till kartläggning av diversitet, se Figur 11. Satelliter med låg upplösning har sämre förmåga att kartlägga mångfald och funktionella egenskaper eftersom flera objekt (träd-kronor, arter) samplas inom en enda pixel. En kostnadsnyttoanalys är nödvändig för att bedöma vilken typ av satellit som behövs baserat på användarkraven och omfattningen av tillämpningen. Nyligen uppskjutna satelliter som Sentinel 1 och 2 tillhandahåller vanligtvis kapacitet för övervakning av biologisk mångfald på nationell nivå i vissa aspekter såsom identifiering av livsmiljöer och skogar och växtegenskaper såsom LAI (Leaf Area Index). Icke desto mindre, för indikatorer som kräver finare upplösningar som vegetationshöjd eller kronstorlek, är flygbilder med laserskannrar lämpligt eftersom de kan tillhandahålla 3D-information. Genom att kombinera informationen från satellitbilder och flygbilder kan man på så sätt tillhandahålla ännu bättre dataunderlag. Ytterligare information om fjärranalystillämpningar inom biodiversitetsområdet återfinns i kapitel 3.4.



Figur 11. Effekten av rumslig skala vid kartläggning av biologisk mångfald. Källa: Wang & Gamon (2019).

3.3 Användning för sjöar, kust och hav

3.3.1 Vattenmassan

Havsvatten är möjligt att övervaka med hjälp av satellitsensorer eftersom färgen på havet är en bra indikator på vad som finns i vattnet. Exempelvis är klorofyll enkelt att detektera eftersom det har en specifik våglängd som det absorberar. Att scanna kustzonen för att utvärdera klorofyllhalten gjordes första gångerna 1978–1986 med hjälp av en CZCS (coastal zone color scanner) monterad på satelliten Nimbus-7 (McClain, 2009). Detta visade sig fungera bra och data från scannern användes av forskare världen över. Efter Nimbus-7 skickades därför flera satelliter med olika typer av ocean colour sensors upp av olika länder se Tabell 5.

Tabell 5. Ett urval av "ocean colour sensors" och vilken satellit de finns monterade på.

Sensor	Satellit	Uppskjutning och Driftsdatum	Stråkbredd (km)	Upplösning (m)	Antal band	Spektrum (nm)
CZCS	Nimbus-7	24 Okt 78 till 22 Jun 86	1 556	825	6	433–12 500
OCTS	ADEOS	17 Aug 96 till 1 Jul 97	1 400	700	12	402–12 500
MOS	IRS P3	21 Mar 96–	200	500	18	408–1 600
SeaWiFS	Orbview-2	1 Aug 97–	2 806	1 100	8	402–885
OCI	ROCSAT-1	Jan 99	690	825	6	433–12 500
OCM	IRS-P4	May 99	1 420	350	8	402–885
MODIS	Terra	18 Dec 99	2 330	1 000	36	405–14 385
MISR	Terra	18 Dec 99	360	250	4	446–867
OSMI	KOMPSAT	20 Dec 99	800	850	6	400–900
MODIS	Aqua	Dec 2000	2 330	1 000	36	405–14 385
MERIS	ENVISAT-1	Jun 2001	1 150	300, 1 200	15	412–1 050
GLI	ADEOS-2	Nov 2001	1 600	250, 1 000	36	375–12 500
MODIS-Aqua	Aqua (EOS-PM1)	Maj 2002	330	250, 500, 1 000	36	405–14 385
GOCI	COMS	Jun 2010	2 500	500	8	400–865
VIIRS	Suomi NPP	Okt 2011	3 000	375, 750	22	402–11 800
OLCI	Sentinel 3A	Feb 2016	1 270	300, 1 200	21	400–1 020

Källa: International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), Website: <https://ioccg.org/resources/missions-instruments/current-ocean-colour-sensors/>

Sedan 1981 har satelliter använts för att mäta havsytans temperatur (sea surface temperature, SST) tack vare avancerad radiometer med mycket hög upplösning som kan mäta termisk infraröd strålning. En annan metod för att mäta SST som introducerades 1997 var möjligheten att mäta mikrovågor med hjälp av passiva radiometrar för mikrovågor (copernicus.org). Inom Copernicusprogrammet finns denna data tillgänglig för samtliga länder inom EU, se kapitel 1.3.1.

Med hjälp av dessa två typer av sensorer finns stora möjligheter att bedriva både lokal och global övervakning av flera faktorer som rör våra hav, sjöar och kustvatten samt hur dom mår. Detta eftersom SST och klorofyll A är några av de starkast drivande faktorerna för flera miljöindikatorer som algblomning, uppvällning, primärproduktion osv.

Övervakning av vattenkvalitet med fjärranalys sker genom att titta på tre olika parametrar som bidrar till vattenkvaliteten; Klorofyll A, suspenderat material och färgat löst organiskt material (CDOM, Colored dissolved organic matter). Alla dessa faktorer påverkar vattnets färg och parametrarna har olika unika optiska signaturer. Klorofyll A används som indikator för primärproduktion, det suspenderade materialet avgör klarheten på vattnet vilket är avgörande för produktiviteten och statusen för vattenområden (Hakimdavar, m. fl, 2020). Den här metoden används idag i Sverige och Norge för att övervaka status hos havsområden (se kapitel 4.2 och 4.4.2). På flera platser i världen, bland annat i Kina, används den här metoden för att övervaka vattenkvaliteten för insjöar och floder (Wang & Yang, 2019). Även Norge har tittat på hur detta kan användas vid miljöövervakning av sjöar i norra Europa, (Ledang, m.fl., 2019).

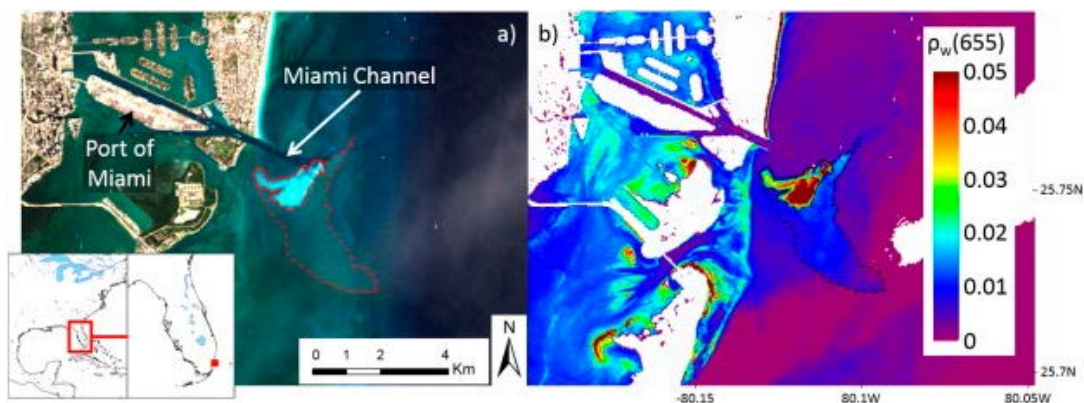
3.3.2 Förändring av kust

Satellitbilder och sensorer kan även användas för övervakning av ändringar av kustlinjen, så som erosion och större byggnationer. Exempel på förändringar som testats att övervakas är havsnivåer och erosion i kustlinjen. Detta görs bland annat i Indien där man vid två tillfällen gjort undersökningar kopplade till kusterosion. Dessa gjordes för perioderna 1989–1991 och 2004–2006. I dessa undersökningar tittade man även på antropogena förändringar längs kusten så som vågbrytare, strandkoningar och hövder. Den metod som användes är ett observationsbaserat tillvägagångssätt. Genom att generera transekter som går vinkelrätt mot referensbaslinjen (strandlinjen) vid ett användarspecificerat avstånd längs land. Avståndet mellan baslinjen och varje korsningspunkt på transekten hjälper till att beräkna förändringen i strandlinjen genom avståndsmätningar till pixel klassad som landmassa (Parthasarathy & Deka, 2019).

Man övervakar även havsisar i Arktis så väl som Antarktis glaciärer och vattentemperaturer. Dessa data kan användas för att förstå hur och i vilken takt som haven förändras (Liang m.fl., 2019; Cimoli m.fl., 2017).

3.3.3 Sediment och muddring

Sedimentplymer kan identifieras med hjälp av satellitbilder, och detta har gjorts i Sverige (se kapitel 4.2) men även på flera andra platser i världen. Bland annat har man använt detta vid Miami port (Barnes, m.fl., 2015), men även i Estland har detta använts för att titta på muddringsplymers påverkan på kustekosystemet (Kutser, m.fl., 2007). I Estland har man använt sig av data från MODIS-satelliten. Vid undersökningen av Maimi Port använder man medium (30 m) till högupplösta bilder (2,4 m) från till exempel Landsat med 30 meters upplösning (Barnes, m.fl, 2015). Flera undersökningar som nämns i Barnes artikel har tittat på olika algoritmer om hur man kan detektera muddringar med hjälp av satellitbilder och då främst genom att titta på hur muddringar ser ut i $\rho_w(655)$ bilder från Landsat satelliter. I Figur 12 så kan man se den tydliga plym som finns även i det ”vanliga” RGB fotot, men i $\rho_w(655)$ kan man även se det större påverkansområdet.



Figur 12. I dessa två bilder kan man tydligt se en muddringsplym utanför Miami. Den vänstra bilden (a) är en högkoncentrerad RGB-bild medan den högra bilden (b) är $p_w(655)$.
Källa: Barnes m.fl. (2015).

Barnes m.fl. (2015) har använt två olika metoder dels att ritat ut plymerna manuellt och dels med reflectance thresholds. Det man kom fram till var att turbiditet kan identifieras från MODIS och Landsat. Man har lyckats ta fram en metod för muddringsplymers storlek och utbredning. Metoden kräver att man använder lokala miljödata för att utesluta naturliga plymer.

Även den estniska studien visar vikten av att ha kännedom om användandet av de lokala sedimentationstransportmönstren för att utesluta naturligt förekommande plymer (Kutser, m.fl., 2007). Båda studierna påpekar även att övervakningen av muddringsplymer kräver relativt detaljerade bilder då muddringen behöver täcka mer än 1 pixel för att kunna synas. Med andra ord, om du har en upplösning på 30 meter så behöver muddringen vara minst 31 meter i diameter. Ett annat problem är återkomsttiden för satelliterna för att få en kontinuerlig övervakning. Landsat har t.ex. en återkomsttid på 16 dagar, vilket ger ett gap i övervakningen.

I de estniska studierna har man även kunna se att fjärranalys av grunda kustvatten har nått nivåer där satellitbaserade batymetri- och habitatkartor accepteras av flera användare bland annat IMO (International Maritime Organisation) och används idag rutinmässigt i ekologiska studier, miljöövervakning och förvaltning av kustmiljöer (Kutser, m.fl., 2020). Detta visar på att det finns mycket mer att utveckla kring mer statioär påverkan av mänsklig aktivitet än temporära indikatorer som muddringsplymer.

3.3.4 Identifiering av fiskebåtar

Olagliga, orapporterade och oreglerade fiskefartyg utgör en stor risk för ett hållbart fiske av bestånden och har en betydande påverkan de marina ekosystem och spelar också en roll för att höja de politiska spänningarna runt om i världen, både i nationella och internationella vatten (Long m.fl., 2020). Årliga globala fiskeförluster har ett uppskattat värde på mellan 10 och 23,5 miljarder USD, och denna siffra är ännu högre när effekter över hela värdekedjan och ekosystemen beaktas. Olagligt fiske organiseras ofta internationellt över flera länders ekonomiskazoner, och som en följd av detta lämnar det ekonomiska värdet av dessa fångster de lokala samhällena där det annars skulle höra hemma. Identifieringen av olagliga fiskefartyg är ett svårt problem som tidigare krävde antingen data från Automatic Identification System (AIS) (Long'ep'e m.fl., 2018) eller kortdistansmetoder som akustisk telemetri (Salloum m.fl., 2018). För detektering av fartyg har SAR-bilder visat sig vara en pålitlig metod

i kombination med traditionella datorseende algoritmer (Touzi m.fl., 2004, Tello m.fl., 2005), och på senare tid neurala nätverk (Chang m.fl., 2019, Li m.fl., 2017, Relekar och Shanmugam, 2021). Den stora fördelen jämfört med andra metoder är att den är tillämplig under alla väderförhållanden och inte kräver samarbete med fartygen. Det största hindret för att utveckla effektiv identifiering av olagliga fartyg var bristen på högupplöst och tillförlitligt märkt data, eftersom moderna neurala nätverksbaserade metoder förlitar sig på överflödet av data för tillförlitliga och trovärdiga förutsägelser. Den nyligen släppta xView3 (Paolo m.fl., 2022) data-uppsättningen och portalen där en kostnadsfri tävlings utlystes för att träna programmet ger en utmärkt testplats för att anpassa neurala nätverksbaserade objekt-detekteringsmetoder till SAR-baserad identifiering av illegala båtar. Data-setet med öppen källkod innehåller över 1 000 scener av maritima regioner av intresse, med VV och VH SAR-data från europeiska rymdorganisationens Sentinel-1-satelliter, batymetri, vindhastighet, vindriktning, vindkvalitet, land-/ismasker och med tillhörande fartygsattribut, t.ex. AIS (Automatic Identification System) information.

3.4 Övervakning av naturresurser

3.4.1 Användning av fjärranalys i olika länder

Enligt Estoque (2020) följs 30 sociala och ekologiska indikatorer relaterade till 13 av de globala målen för hållbar utveckling med hjälp av fjärranalys, direkt eller indirekt. De mål som har bäst förutsättningar att följas upp med fjärranalys uppges vara nummer 6 (Rent vatten och sanitet för alla), 11 (Hållbara städer och samhällen), 14 (Hav och marina resurser) och 15 (Ekosystem och biologisk mångfald) och exempel på mål där fjärranalysdata används är 3.9.1 ("Mortality rate attributed to household and ambient air pollution"), 6.4.2 ("Level of water stress: freshwater withdrawal as a proportion of available freshwater resources"), 11.6.2 ("Annual mean levels of fine particulate matter (e.g. PM2.5 and PM10) in cities (population weighted)"), 14.5.1 ("Coverage of protected areas in relation to marine areas") och 15.2.1 ("Progress towards sustainable forest management"). Inrapporterade data för de globala hållbarhetsmålen finns tillgängliga på websidan unstats.un.org/sdgs/dataportal (FN, 2022).

I de nordiska länderna bygger numera oftast skogsinventeringar på fjärranalysdata (satellitdata, lidardata och flygfoton), som används för att avgöra marktäckning, avgränsa olika bestånd, inventera dominerande trädarter, trädhöjd, grundyta med mera. Fjärranalysdata används också som grund för att modellera virkesvolym, markfuktighet, risk för granbarkborreangrepp och annat. Användningen av fjärranalysdata, som komplement till fältinventeringar, började redan på 1940-talet, med hjälp av flygfoton, och har utvecklats successivt, särskilt från 1970-talet när stereofotogrammetrin utvecklades (Maltamo m.fl., 2021).

Området kring den 3 540 km långa vandringsleden Appalachian trail i USA övervakas med fjärranalys i verktyget A.T.-DSS. Där används data från flera olika satellitövervakningsprogram för att ge underlag till bedömning av bland annat markfuktighet, brutto- och nettoprimärproduktion (GPP och NPP), nettoflöde av koldioxid (NEE), fenologi och ändringar i markanvändning. Utifrån satellitdata och data från mätningar på plats modelleras utvecklingen av ekosystem och ekosystemtjänster i ett framtida ändrat klimat m.m. (Wang, 2020).

I Storbritannien används fjärranalys för att övervaka naturresurser i en rad tillämpningar, bl.a. för våtmarker, markanvändning, habitat, inventering av skogsmark, förändringar av hedmarker, ekosystemtjänster, inventering av träd i strandmiljöer och för att kartlägga jordbruksgrödor, (se mer information i kapitel 4.4.3).

3.4.2 Marktäcke, markanvändning, naturtyper och utveckling hos växtsamhällen

Marktäcke och förändringar av detta kartläggs numera med hjälp av fjärranalys, både globalt med hjälp av satellitdata, och lokalt i finare upplösning med hjälp av drönare och flygbilder (Roy m.fl., 2022, se även kapitel 4.1 om användningen vid svenska myndigheter).

Markanvändning från fjärranalysdata är mer osäkert än marktäcke, och kan bygga på många olika typer av satellitdata som bearbetas på olika sätt för att få sannolik markanvändning för en viss region, eventuellt också med en skattning av hur sannolik den uppgivna markanvändningen är för varje pixel i kartan. Den är också beroende av att det finns inventeringar på plats, för att ”träna” systemet på de olika möjliga markanvändningsklassernas utseende (Environmental Information Data Centre UK, 2022a; MohanRajan m.fl., 2020).

Även habitatkartläggning bygger på fjärranalysdata i kombination med inventeringar på plats, och finns därför för områden där inventeringar har gjorts. Det finns flera olika metoder som används, som bygger på olika satellitdata, LIDAR, flygfotografering och drönare (Jongman m.fl., 2019).

Våtmarker har studerats mycket med fjärranalys, både i Sverige och i andra länder, och det finns metoder för att klassificera våtmarker, kartlägga vegetation, vattenrörelser, höjdskillnader på millimeternivå, våtmarkens biogeokemi, produktivitet med mera (Chasmer m.fl., 2020a; 2020b, se även kapitel 4.1 och 4.3 om användningen vid svenska myndigheter).

Fjärranalys för att mäta förändringar på grund av klimatförändringar i växtsäsong och fenologi (årstidsväxlingar i naturen) har använts sedan början på 1980-talet och anses nu lika säkra eller säkrare än markbaserade inventeringar (Situch m.fl., 2022). Både naturliga växtsamhällen och grödor används för detta. Situch m.fl. (2022) har gått igenom 285 studier där man med fjärranalys har undersökt fenologi, och konstaterar att flest studier har skett i Nordamerika, Europa och Asien, medan bland annat Arktis är underrepresenterat. Både satellitdata och drönare användes, och även markbaserade undersökningar. De markbaserade undersökningarna görs med hjälp av fast monterade kameror eller sensorer (av samma typ som på satelliter) riktade mot växtsamhällen under lång tid. Kamerorna eller sensorerna kan vara monterade på exempelvis master använda för andra typer av mätningar, som mätningar av kolflöden till och från ekosystem. Fördelen med markbaserade kameror eller sensorer är att tidsupplösningen kan bli bättre än med satelliter som bara kan ta bilder medan de passerar området. Vissa årstidsbaserade förändringar kan ske snabbt, så tidsupplösningen kan ha stor betydelse (Zeng m.fl., 2020). Många olika sensorer kan användas, gärna flera i kombination, eftersom de har olika styrkor och svagheter (Thapa m.fl., 2021).

Mikroklimatet på en plats kan skilja sig mycket från regionala värden och har stor betydelse för organismerna på platsen. Nord- och sydsluttningar kan ha mycket skilda förutsättningar och trädbeskuggade platser har annat mikroklimat än skogsbryn och öppna platser, både med avseende på dygnsvariation och medelvärden.

Mikroklimatet, snarare än makroklimatet, är vad organismerna på en plats upplever och det som avgör om de kan etablera sig och finnas kvar på en plats. Enligt Zellweger m.fl. (2019) är kartläggning och övervakning av mikroklimat en nyckel till effektiv naturresursförvaltning, exempelvis inom skogsbruk, agroskogsbruk och jordbruk, inte minst i ett klimat i förändring. Med hjälp av modellering baserad på data från fjärranalys kan mikroklimat kartläggas och modelleras framåt i tiden, för att exempelvis upptäcka mikrorefugier där organismer kan överleva trots ett, i medelvärden över regionen räknat, olämpligt klimat. Klimatförändringens påverkan på framtida fenologi är också beroende av kunskap om mikroklimat, eftersom det är småskaliga tidsvariationer av temperatur kring exempelvis lövsprickning som avgör om organismen klarar att överleva på platsen, och de småskaliga variationerna inte nödvändigtvis påverkas på samma sätt som exempelvis vårmedeltemperaturen. Mikroklimatet i spridningskorridorer påverkar om organismer kommer att kunna använda dem eller ej. LiDAR, terrester laserskanning, infraröd fjärranalys (med satellit eller drönare) är viktiga verktyg för modellering av mikroklimat (Zellweger m.fl., 2019).

Det pågår forskning på användning av reflektansdata från drönare och satelliter för att påvisa förekomst i mark av vissa föroreningar, såsom tungmetaller, olja och radioaktiva ämnen (Gholizadeh m.fl., 2018; Shi m.fl., 2018).

3.4.3 Enskilda arter eller individer

Fjärranalys och databehandling gör det numera möjligt att mäta träd- och skogsstruktur från löv till landskap (Lines m.fl., 2022). Framstegen inom fjärranalys ger oss inte bara tillgång till mer exakta data, utan också data som spänner över ett mycket bredare spektrum av rumsliga, tidsmässiga och ekologiska skalor. Lines m.fl. (2022), som har syntetiserat arbetet inom fjärranalys och skogsekologi, drog till och med slutsatsen att *”möjligheterna att studera skogens struktur och dynamik (ovan jord) numera begränsas mer av kreativitet än av vad vi kan mäta”*.

Enskilda trädarter kan kartläggas med drönare. Asp är exempelvis en art som oftast inte kartläggs inom skogsbrukets inventeringar, eftersom det ofta finns relativt få och den är av ett relativt lågt ekonomiskt värde, men som har ett stort biologiskt värde och som därför är av intresse för dess ekosystemtjänster (Kuzmin m.fl., 2021).

För hotade arter kan fjärranalys användas för att identifiera potentiella habitat där arten skulle kunna finnas, baserat på platsens egenskaper idag och bakåt i tiden sedan relevanta satelliter togs i bruk. De potentiella habitaterna kan sedan inventeras på plats. Ray m.fl. (2022) beskriver användning av tekniken för att inventera hotade groddjur i Nordamerika. Sällsynta växter kan både upptäckas genom identifiering av potentiella växtplatser, och ibland, även för relativt små plantor, genom direkt observation med fjärranalys (Cerrejón m.fl., 2021).

Data från fjärranalys kan också användas i avancerade ekologiska modeller för att beräkna arters distribution idag och i framtiden under olika klimatscenarier (Randin m.fl., 2020).

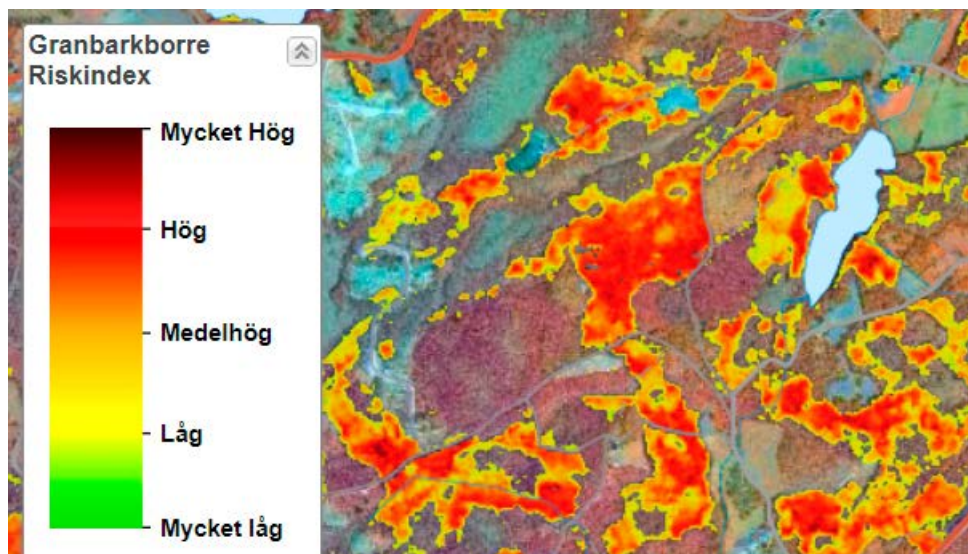
Enskilda träd i öppna miljöer, som strandmiljöer, kan upptäckas med fjärranalys. I Storbritannien används det för att bedöma hur skuggade vattendrag är (Environment Agency UK, 2022b).

Bohlin m.fl. (2021) har i en studie visat att det går att använda LIDAR-data för att modellera produktion av blåbär och lingon, baserat på korrelation med skogens struktur, som ett exempel på kartläggning av ekosystemtjänster.

Ett företag i Sverige utvecklar autonoma drönare som ska övervaka jordbruksmark, artbestämma djur och skrämja bort djur som räknas som skadedjur (Harnesk, 2022).

Fjärranalys kan användas för att upptäcka spridning av invasiva eller på annat sätt problematiska arter, genom modellering av riskområden, baserad på fjärranalysdata. Ibland kan invasiva arter upptäckas direkt från fjärranalysdata. Särskilt växter, som tar lite större plats och kan ha annorlunda reflektans än den inhemska vegetationen, kan gå att detektera direkt (Ahmed m.fl., 2020).

I Sverige används tekniken med modellering av riskområden för granbarkborreangrepp, se Figur 13 (Skogsstyrelsen, 2022). Det pågår sedan lång tid också mycket forskning för att direkt detektera granbarkborreangrepp, se appendix A. Optiska data (rött och kortvågigt infrarött) från satelliter används, liksom radardata. Angreppen behöver upptäckas tidigt för att spridningen ska kunna stoppas, men tidigt under angreppen är de synliga tecknen på angrepp på träden mycket små, och tekniken för att upptäcka angrepp behöver förbättras (Huo m.fl. 2021).



Figur 13. Skogsstyrelsens riskmodellering för granbarkborre, som visar röda färger där risken för granbarkborreangrepp är hög (Skogsstyrelsen, 2022).

3.4.4 Bränder: upptäckt och övervakning av miljöeffekter

Bränder har stora konsekvenser på miljön, både direkt under branden, och efteråt. Förutom att själva bränderna är farliga där och då, så har de också stor kort- och långsiktig påverkan på kol- och näringsförråd i mark och vegetation, utsläpp av växthusgaser, livsmiljö för olika arter, jordstruktur och erosion, utlakning av både näringsämnen och toxiska ämnen till vattendrag med mera. Det finns därför stor anledning att upptäcka och följa bränders utbredning, samt att följa utvecklingen efter bränder med hjälp av fjärranalys. Aktiva bränder detekteras av infraröd värmestrålning, med hjälp av satelliter (se även appendix B). Det finns en konflikt

mellan upplösning i tid och geografiskt, där många satelliter ger en ganska grov upplösning geografiskt (250 m och uppåt), men tar bilder varje dygn eller oftare över hela jorden. För närvarande fås den bästa kompromissen mellan rums- och tidsupplösning från 375m VIIRS-banden på satelliten National Polar-Orbiting Partnership (NPP) sedan 2013 och på NOAA-20 sedan 2017 (Chuvienco m.fl., 2019). I vissa fall kan även radardata användas för att följa förloppet vid bränder, eftersom radar kan göra observationer trots tjock rök eller moln (Tanase m.fl., 2019). Enligt Chuvienco m.fl. (2019) har en kombination av radar, optiska och andra satellitdata stor potential. Dessa metoder kan inte bara upptäcka eld, utan används också för att beräkna eldintensitet, mängd frisläppt kol med mera.

I Sverige använder Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB, fjärranalys för att riskklassa vegetation ur brandsynpunkt, utgående från marktäcke (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, www.msb.se/sv/verktyg--tjanster/brandbransleklassificering/).

3.4.5 Andra tillämpningar

En hel del ämnes- och vattenbalanser kan kartläggas med hjälp av fjärranalys: Många komponenter av kolcykeln kan mätas eller beräknas med hjälp av fjärranalys: kol-förråd i ovanjordsdelar av vegetation och i mark (Xiao m.fl., 2019), i våtmarker, sjöar, vattendrag och hav (Campbell m.fl., 2022) och i jordbruksmark (Mandal m.fl., 2020), kolflöden såsom brutto- och nettoprimärproduktion, ekosystemrespiration och kol frisläppt av bränder, avverkning och andra typer av vegetationspåverkan (Xiao m.fl., 2019). Markfuktighet kan mätas eller modelleras med hjälp av både satellitdata (Beringer m.fl., 2022, Ågren m.fl., 2021) och drönare (Putra & Nita, 2020), liksom vattenstress hos växter (Zhang m.fl., 2021c; Beringer m.fl., 2022).

Fjärranalystekniker används som verktyg för turism i och vård av naturområden med speciell geologi. Williams & McHenry (2020) intervjuade 39 forskare eller verk-samma inom området om deras användning av fjärranalys och GIS. Nästan 30 % av intervjupersonerna använde drönare i deras arbete och ytterligare 14 % planerade att göra det. De vanligaste användningarna av drönare var för framställning av kommunikations- och utbildningsmaterial, planering, kartläggning av områdena och inventeringar och miljöövervakning. Enligt litteraturstudien i Williams & McHenry (2020) används fjärranalys för att framställa informationsmaterial, kart-lägga och klassificera geologiska strukturer, inklusive jordskred, sprickbildningar, jordbävningpåverkan, karstdepressioner och vulkanism, särskilt i svår terräng, kartlägga riskområden, geologisk diversitet i områden under havsytan och på land, biodiversitet, landformer och turismens påverkan och slitage på områdena.

Forskning pågår för att hitta sätt att upptäcka platser med hög risk för att bli olovliga soptippar, med hjälp av fjärranalys. I ett kanadensiskt projekt (Karimi m.fl., 2022) användes satellitdata som underlag för bedömning av riskområden för olovlig tippning av sopor. Verkytyget markerade 7% av den undersökta ytan som högrisk-platser för olovlig tippning av sopor. Studien fokuserade på hur hälsorisker och sårbarhet hos den fattiga befolkningen kan minskas genom att identifiera och åtgärda platser där sopor kan komma att tippas, inte på att hitta redan tippade sopor. Metoden ansågs lovande.

3.5 Kartläggning och övervakning av grön infrastruktur i stadsmiljön

Urbaniseringen fortskrider snabbt på många platser runt om i världen (Liu m.fl. 2020). När stadsområden växer reduceras och fragmenteras ofta grönområden – som är värdefulla för att upprätthålla biologisk mångfald och ekosystemtjänster – vilket leder till potentiell negativ miljöpåverkan (Aronson m.fl., 2014). Därför har urban grön infrastruktur fått stort intresse som ett planeringsverktyg för hållbar stadsutveckling (t.ex. Tzoulas m.fl., 2007, Pauleit m.fl., 2019). I Sverige har till exempel handlingsplaner för grön infrastruktur tagits fram i samtliga län. För att underlätta beslutsfattandet i stadsplaneringen för hållbar stadstillväxt är det dock avgörande att man i rätt tid och korrekt kartlägger förändringar i stadsmiljön och bedömer miljöpåverkan.

Fjärranalys kan tillhandahålla data som täcker stora geografiska områden på ett konsekvent sätt och med hög tidsfrekvens, vilket är värdefull geografisk information för kartläggning och övervakning av förändringar i stadsmiljön (Herold m.fl., 2005, Gamba & Herold, 2009). Många studier har använt satellitdata med medelhög upplösning för att utföra kartläggning av stadsmiljön och övervakning av stadstillväxt (t.ex. Furberg & Ban 2012, Wang m.fl., 2012, Liu & Yang 2015, Haas & Ban 2018). Att producera detaljerade marktäckningskartor över stadsmiljöer från satellitdata, särskilt vid högre rumsliga upplösningar, är dock en utmanande uppgift på grund av stadsrummets komplexa natur (Ban m.fl., 2010, Myint m.fl., 2011, Ma m.fl., 2017). Momeni m.fl. (2016) fann till exempel att rumslig upplösning har störst inverkan på klassificeringsnoggrannheten i komplexa stadsmiljöer; Därför erbjuder moderna satelliter med mycket hög upplösning stor potential för att kartlägga stadsmarktäckningen från rymden. För detta ändamål har flera studier distribuerat mycket högupplösta data från olika satelliter, inklusive IKONOS, QuickBird och WorldView, för att klassificera urbana marktäckningstyper (t.ex. Myint m.fl., 2011, Shackelford & Davis, 2003, Haas & Ban, 2016, Mugiraneza m.fl., 2019). Andra relaterade tillämpningar inkluderar kartläggning av olika typer av faunahabitat (t.ex. Mutuku m.fl., 2009, Recio m.fl., 2013), gröna och blå strukturer (t.ex. Sawaya m.fl., 2003, Mathieu m.fl., 2007, Lang m.fl., 2018) och ekosystemtjänster (t.ex. Haas & Ban, 2016, Lakes & Kim, 2012).

Boyle m.fl. (2014) demonstrerade nyttan av högupplösta fjärranalysdata för övervakning av förändringar i marktäckningen för bevarande, men fann också att dess användning var mycket begränsad, vilket de kopplade till anskaffningskostnaden för högupplösta bilder. Som en följd av detta finns det hittills relativt få högupplösta fjärranalysbaserade marktäckningsbedömningar av effekter på livsmiljöer och relaterade komponenter för biologisk mångfald från urbanisering, som vanligtvis har genomförts på grundval av kartor eller information från flygfoton eller kartläggningar och med hjälp av information från flygskannrar (t.ex. Nagendra m.fl., 2013, Löfvenhaft m.fl., 2004, Hartfield m.fl., 2011). Furberg m.fl. (2020) betonade att den ökande tillgången på högupplösta satellitdata som ger detaljerade, exakta och upprepade fjärranalysobservationer, gör att det finns ett behov av att undersöka dess fulla potential för övervakning av grön infrastruktur. För detta ändamål kvantifierade de marktäckningsförändringen i Stockholms stad mellan 2003 och 2018 med hjälp av två WorldView-2-bilder från 2018 och tre QuickBird-2-bilder från

2003. Klassningskartor som kunde skilja på 11 olika marktäckningstyper producerades med hjälp av OBIA (Object-Based Image Analysis) och SVM (a Support Vector Machine). Den efterföljande stadsförändringsanalysen visade att stadsområdena i Stockholm under den perioden ökade med cirka 4 %, främst på grund av utbyggnaden av transportnätet, asfalterad yta och byggområden, medan grönområdena minskade med 2 % (Furberg & Ban, 2012).

Även om potentialen hos mycket högupplösta fjärranalysbilder för övervakning av grön infrastruktur i städer har påvisats, kan användningen av kommersiella satellitbilder hindra, inte bara överförbarheten av metoder för att övervaka grön infrastruktur i olika städer, utan också möjligheten att uppdatera dessa metoder. Det senare kan vara en avgörande begränsning, med tanke på den snabba urbaniserings-takten (Liu m.fl., 2020). För att ta itu med dessa begränsningar undersökte Labib & Harris (2018) den senaste generationen satelliter med måttlig upplösning, nämligen Sentinel-2 och Landsat 8, i stället för kommersiella satellitbilder, för att extrahera grön infrastruktur till en låg eller ingen kostnad. Med hjälp av en OBIA-metod uppnådde de en acceptabel utvinning av grön infrastruktur för stadsområden, där Sentinel-2 befanns vara effektivare än Landsat 8 (Labib & Harris, 2018). Efter denna trend att använda satellitbilder med måttlig upplösning, visade Kranjčić m.fl. (2019) att grön infrastruktur effektivt kan klassificeras från Sentinel-2-bilder med hjälp av olika maskininlärningsmetoder för två kroatiska städer.

Den senaste trenden inom satellitövervakning av urbanisering och miljöpåverkan är dock flerskaliga tillvägagångssätt som undersöker samma geografiska område vid flera rumsliga upplösningar och utbredningar baserat på olika satellitbilder (Furberg & Ban, 2021). Därmed antar flerskaliga angreppssätt (multiscale approaches) utmaningen att välja en lämplig områdesenhet för analys, i syfte att övervinna problemet med MAUP (the Modifiable Area Unit Problem). Faktum är att på grund av landskapens komplexitet när det gäller spatiotemporala mönster och processer anser många att flerskalig analys är nödvändig för att på ett adekvat sätt förstå och hantera landskapsanalyser (Hay m.fl., 2001, Blaschke & Hay, 2001, Minang m.fl., 2015). Nyligen har Furberg & Ban (2021) implementerat ett flerskaligt tillvägagångssätt för att övervaka urbanisering och miljöpåverkan i Stockholm i regional skala med hjälp av medelupplösta (30 m) och högupplösta (10 m) satellitbilder och på kommunnivå med mycket högupplösta (< 1 m) bilder. Efter att ha använt OBIA och en SVM för att få marktäckningskartor från bilderna i olika skalor användes en utvald grupp landskapsmått för att analysera förändringar. Furberg & Ban (2021) drog slutsatsen att flerskalig analys avslöjar mer information om urbanisering och miljöpåverkan än någon enskild analys på egen hand. Specifikt illustrerar den de bredare trenderna för urbanisering och åtföljande miljöpåverkan samtidigt som den identifierar lokala miljöaspekter där åtgärder eller gränsöverskridande samarbete kan behövas. Denna typ av information kan hjälpa stadsplaneringen genom att öka medvetenheten om trender samtidigt som den anger möjliga ”utgångspunkter” för nästa steg/planeringsåtgärd.

4. Användandet av fjärranalys vid myndigheter

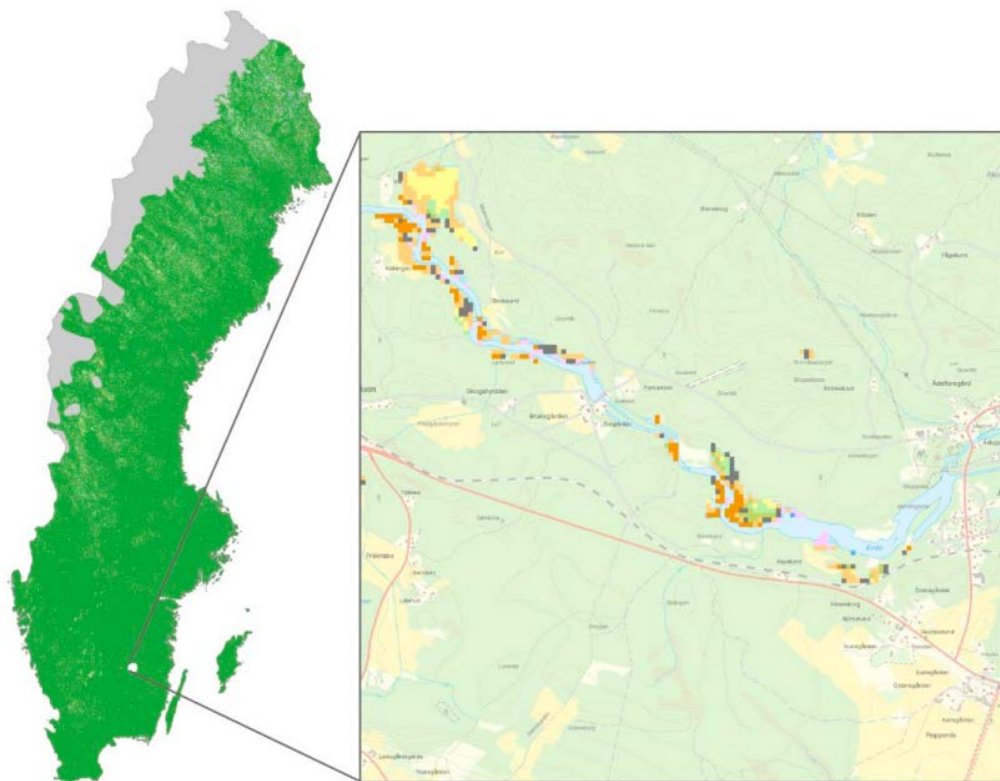
Fjärranalys har använts under lång tid av flera svenska myndigheter, bland annat Skogsstyrelsen, Lantmäteriet, Naturvårdsverket och Havs- och Vattenmyndigheten. I Appendix D presenteras de utredningar som kunnat hittas som genomförts hos myndigheter sedan 2016 och är framtagen tillsammans med Metria AB (leverantör av GIS och fjärranalystjänster till Naturvårdsverket). Nedan presenteras ett urval av olika metoder som används vid respektive myndighet samt ett urval av arbeten med fjärranalys vid myndigheter i andra länder. De projekt som presenteras nedan har valts ut för att få en bred uppfattning av de metoder som redan ska användas inom myndigheterna.

4.1 Naturvårdsverket

Miljöövervakning med hjälp av fjärranalys görs inom flera områden inom Naturvårdsverkets kontinuerliga arbete, bland annat övervakning av våtmarker. Det har även gjorts flera utredningar inom andra områden där det finns potential att arbeta mer med fjärranalys. Nedan redovisas ett urval av undersökningar och miljöövervakning som görs eller tidigare gjorts på myndigheten.

- Den satellitbaserade övervakningen av våtmarker är utformad för att upptäcka markanvändningsrelaterade förändringar i öppna myrar, se Figur 14. Förändringsanalysen baseras på Landsat TM/ETM satellitdata från två tidpunkter med ca 10-års mellanrum. För att undvika att mellanårsvariation ska påverka utfallet görs en analys av fenologi (vegetationsutveckling) och väderförhållanden för de utvalda scenerna. I urvalet eftersträvas bilder som är registrerade mellan 20 juni och 15 augusti (Hahn, 2021).
- Kontinuerlig kartering av våtmarker gjordes 2015 i den boreala regionen med automatiserade metoder där indata bestod av historiska ortofoton, gamla och nya optiska satellitdata. Karteringen har därefter preciserats och gjorts mer detaljerad. (Ahlcrona m.fl. 2017).
- Nationella marktäckedata (NMD) är en heltäckande kartering av Sverige. Syftet med karteringen är att få grundläggande information om landskapet och hur det förändras. Karteringen genomfördes under 2017–2019 och planen är att karteringen ska uppdateras vart 5:e år. Karteringen bygger på data från satelliterna Sentinel 2a och 2b som kombineras med laserskanningen över Sverige. Utifrån denna data och definitioner av olika typer av markanvändning klassas sedan samtliga pixlar i satellitbilderna (Naturvårdsverket, 2019b). Denna kartering har ersatt den tidigare KNAS (Kontinuerlig naturtypskartering av skyddade områden) som gjorts sedan 2001.

- 'Skog och mark' (Naturvårdsverkets årliga rapport) år 2020 hade tema Ekosystemtjänster. I kapitlet 'Fältdata och fjärranalys visar förutsättningar för friluftsliv' redovisas potentialen i att använda NILS (Nationell Inventering av Landskapet i Sverige) för att inventera kulturella ekosystemtjänster och friluftsliv. En av de faktorer och ett av miljökvalitetsmålen som undersöktes med fjärranalys är den storslagna fjällmiljön där man använde flygbilder för att titta på bland annat snölegor och trädutbredning (Hedblom m.fl., 2019).
- Vid SLU har man genomfört ett forskningsprojekt där man tittar på sambanden mellan Älgens hälsa och tillgången på foder i landskapet. Detta gör man bland annat genom att titta på tillgången på naturligt bete. Till detta använder man underlag dels från Nationell marktäckedata och Skogsstyrelsens datalabb, samt satellitbilder. Det man vill identifiera är ung barrskog och sly som utgör den största delen av älgens naturliga bete (<https://www.naturvardsverket.se/om-miljoarbetet/forskning/viltforskning/forskning-om-klovvilt/hur-naringsekologi-kan-pavisa-samband-mellan-algens-halsa-och-landskapets-foder/>).



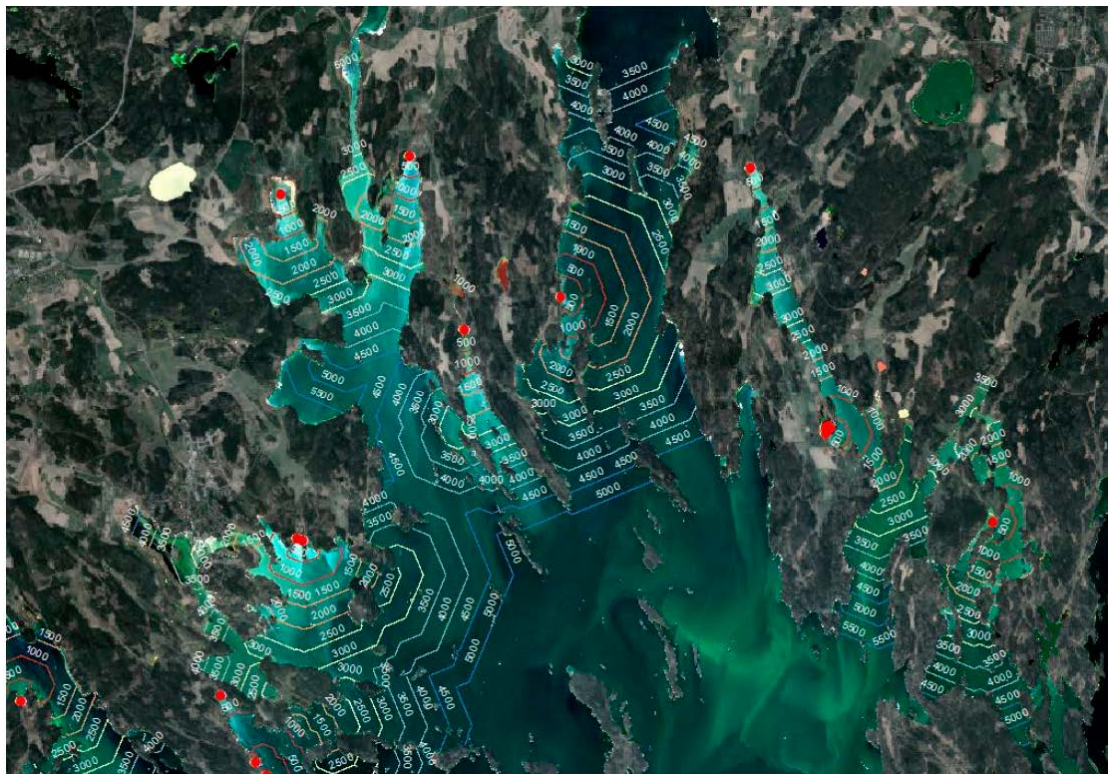
Figur 14. En översiktsskild över basklassningen för hela undersökningsområdet, samt ett exempel på hur basklassningen kan se ut för ett ca 10 km² stort område med topografiska kartan i bakgrunden (Hahn, 2021).

4.2 HaV

HaV har redan en pågående och en planerad framtida kontinuerlig övervakning med hjälp av fjärranalys. Det finns även flera potentiella områden som har identifierats av myndigheten där möjligheterna har undersökts tillsammans med Metria AB.

Nedan redovisas sammanfattningar av några av dessa.

- HaV använder Sentinel 3 satelliten, som har en daglig passeringstid över Sverige, för att bland annat övervaka primärproduktionen i Östersjön och även algbloomningen. Sentinel 3 har OLCI-instrument (ocean and land colour instrument) som med 21 spektralband möjliggör analys av våglängder som lämnar till exempel vatten (water leaving reflectance). Det gör OLCI lämplig för studier av vattnets optiska egenskaper. Genom att anpassa algoritmer till karaktäristiska absorptionspektrum kan produkter som klorofyll, SPM och CDOM skapas genom att titta på t.ex. blå-grön ratio. Sentinel har flera sensorer som gör det möjligt att t.ex. ta fram data för att beräkna primärproduktion, och beroende på metod kan stödparametrar exempelvis vara temperatur och ljusabsorption. Temperatur beräknas som SST, "Sea Surface Temperature" det vill säga i de översta millimetrarna i vattnet, men översätts till en temperatur som kan sägas motsvara översta vattenlagret (<https://www.havochvatten.se/overvakning-och-uppfoljning/miljoovervakning/marin-miljoovervakning/fjarranalys-av-fria-vattenmassan.html>).
- Satellitbaserad statusklassning av Sveriges kustvattenförekomster genomfördes av HaV för perioden 2016–2018. Det primära syftet med datamängden är att den ska användas till expertbedömning av växtplankton och siktdjup i Sveriges kustvattenförekomster. Datamängden innehåller satellitbaserade data och statusklassningar av klorofyll A och siktdjup samt data om absorption och turbiditet i Sveriges kustvattenförekomster. HaV använder sig här av satellitsensorn MERIS som har en markupplösning på 300 m × 300 m, utifrån denna data så klassas varje pixel med hjälp av de olika parametrarnas färg (se kapitel 3.3.1) (havochvatten.se).
- År 2020 publicerade Metria tillsammans med Hav rapporten 'En operationell metod för detektion och avgränsning av muddringar med hjälp av satellitdata'. Syftet med rapporten var att utreda möjligheterna att kartlägga muddringar med hjälp av fjärranalys. I slutsatsen kom man fram till en metod där man genom att höja kontrasten i bilderna, eller byta plats på banden, får en tydlig skillnad mellan hög och låg turbiditet (se Figur 15). Detta gjorde att man kunde analytiskt avgränsa muddringsplymer (suspenderat material) och även båtar och bryggor kan identifieras i de fall de är större än en pixel. Detta krävde dock mer manuell styrning. (Törnqvist m.fl., 2017).



Figur 15. Flera muddringar som på ett påtagligt sätt påverkar vattenmiljön runt Mörkö, Sörmlands skärgård (Törnqvist m.fl., 2017).

4.3 Projekt inom miljöövervakning hos andra svenska myndigheter

Fintrådiga alger. Fjärranalys av fintrådiga alger i grunda vatten längs den svenska västkusten projektet konstaterade att det är möjligt att upptäcka områden med trådiga alger längs den svenska västkusten med hjälp av satellit fjärranalys. Men det är inte möjligt som i det här fallet, med en Landsat-7-bild, att kvantifiera täcket av alger. En regelbunden övervakning av tillväxten av trådiga alger är därför inte att rekommendera om man använder en satellit med en rumslig upplösning på 30 m. (EU-Life Algae, Länsstyrelsen Västra Götaland Naturvård- och fiskeenheten).

Riskindexkarta granbarkborre. Syftet med kartan är att visa de områden som löper störst risk att angripas av granbarkborren och därmed hjälpa skogsägaren och skogstjänstemän att styra stegen i rätt riktning för att underlätta sökning av angripna bestånd. Kartan har tagits fram med fjärranalysmetoder. Utvärderingar visar att den har bra träffsäkerhet, det vill säga att merparten av angreppen sker i de skogarna som har identifierats som högrisk. (Skogsstyrelsen, skogsdatalabbet)

Sumpskog. Sumpskogsinventeringen är ett underlag till var det kan finnas höga naturvärden. Inventeringen bygger till största del på fjärranalys av flygbilder och endast en mindre andel är fältbesökta. (Skogsstyrelsen, skogsdatalabbet)

Multiskadad. Aktiviteter som ska genomföras inom projektet är bland annat att sammanställa nuvarande forskningsläge, förbättra möjligheterna till att använda fjärranalys samt göra en konsekvensanalys av skadenivåerna på skog. (Skogsstyrelsen, skogsdatalabbet)

I Översvänningsportalen MSB redovisas översvänningskarteringarna framtagna för de större älvarna och vattendragen samt kustområdena. De är framtagna med hjälp av Sveriges nya nationella höjddata som underlag och visar vattnets utbredning vid flera olika flödessituationer. (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, gisapp.msb.se/Apps/oversvamningsportal/enkel-karta.html)

Brandbränsleklassificering: MSB har även en fjärranalysbaserad webbtjänst med riskklassificering av vegetation ur brandsynpunkt, som underlag för detta används data från NMD (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, www.msb.se/sv/verktyg--tjanster/brandbransleklassificering/)

Regional miljöövervakning våtmarker. Strategin för Länsstyrelsen Norrbottens programområde våtmark är att med kostnadseffektiva metoder följa tillståndet i länets våtmarker med fokus på förutsättningar för biologisk mångfald. Övervakning med fjärranalys av flygbilder och satellitbilder samt analyser av digital geografisk information är kostnadseffektiva metoder i ett till ytan stort län som Norrbotten med vidsträckta och svårtillgängliga våtmarker (Hahn m.fl., 2014). Samma metod används inom naturvårdsverkets miljöövervakningsprogram för våtmarker del programmet Satellitbaserad våtmarksövervakning se kapitel 4.1 (Hahn m.fl., 2021).

Fjärranalys av skador på al utmed vattendrag och sjöar i södra och västra Sverige. Denna studie undersöker hur satellit- och flygbildsdata kan användas för att identifiera skador på lövträd, främst klibbal, utmed vattendrag i Blekinge (Mörrumsån), Skåne (Helge å) och Västra Götalands län (Säveån och Mölndalsån). Utöver detta gjordes omfattande fältundersökningar för att kontrollera fjärranalysresultaten. Även lokal kunskap och tidigare inventeringar användes. Analysen visade att det går att urskilja skador på lövträd utmed vattendrag med automatiserad fjärranalys. Däremot krävs manuella detaljstudier av enskilda småbestånd för att med säkerhet avgöra om det är fråga om t.ex. al. Skador på ask och alm kunde inte alltid separeras från al. De undersökta områdena domineras dock av alträd och en betydande andel har skador. En stor mängd satellit- och flygbilder användes och kvaliteten i detta material var mycket varierande, något som försvårade analyserna. (Bjelke m.fl., 2013)

Satellitbildsanalys ålgräs sannolikhet Denna rapport redovisar en kartering av biotopen "ålgräs" (*Zostera* sp.) på grunda marina botten i Västra Götalands län för sommaren 2008 genom multivariat kategorisering med lärande datorprogram (så kallad stödvektormaskin) av registreringar av geosatelliten SPOT-5. Rapporten redogör för grundläggande klassificering av miljön, metoder för kartering och noggrannhetsuppskattning, samt redovisar den uppskattade noggrannheten för den resulterande karteringen och diskuterar resultatet, karteringsmetodiken och satellitdatan (Envall & Isaksson, 2012).

Modellerade Naturvärdesobjekt Ålgräs Länsstyrelsen Östergötland har tagit fram en rapport med som underlag för planering av kustvattenmiljön på läns- och kommunal nivå inom Östergötlands marina miljö. Kartorna ska anpassas till planernas behov, den modellerad art- eller habitatutbredningskarta, en s.k. prediktion, visar den sannolika utbredningen av en art eller ett habitat (Envall & Isaksson, 2012).

4.4 Internationella exempel på myndigheters fjärranalystillämpningar

Vi har identifierat ett flertal internationella exempel på myndigheters användning av fjärranalys, och dessa exempel sammanfattas i en tabell i Appendix C.

4.4.1 Luftkvalitet

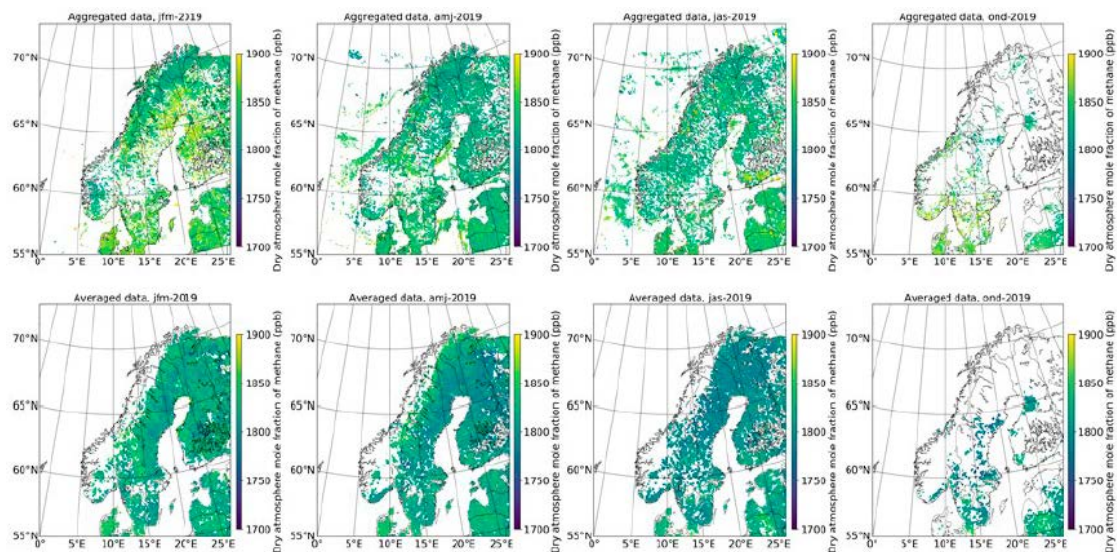
I Storbritannien har Brown m.fl. (2021) utvärderat möjligheten för motsvarigheten till deras Naturvårdsverk (Environment Agency) att tillämpa fjärranalys. Brown m.fl. (2021) genomförde tre fallstudier som omfattade mätningar av ammoniak (med IASI-instrumentet), kvävedioxid och metan (båda med TROPOMI-instrumentet):

- Ammoniakstudien visade att det var möjligt att identifiera tydliga månatliga och säsongsmässiga variationer i uppmätt ammoniak över Storbritannien, och att dessa variationer överensstämde med data från det brittiska ammoniakövervakningsnätverket. Däremot kunde man inte identifiera någon trend under en 11-årig tidsperiod, vilket troligtvis berodde på att antalet giltiga mätningar som representerade varje årsgenomsnitt var få.
- NO₂-studien (TROPOMI) visade att satellitdata kunde användas för att identifiera förhöjda nivåer av troposfäriskt NO₂ runt tre stora punktkällor av NO_x i Storbritannien. Potts m.fl. (2021) föreslog olika tekniker för att förbättra tolkningen av satellitdata (från TROPOMI) för myndighetsutövning i Storbritannien, med fokus på NO₂-utsläpp från punktkällor. Studien belyste hur nuvarande och framtida instrument kan tillhandahålla kompletterande data för brittiska myndigheter.
- Metan-studien (TROPOMI) visade att det inte var möjligt att upptäcka förhöjda halter eller utsläppsplymer av metan från deponier i Storbritannien. Däremot kan framtida satelliter, designade för att mäta punktkällor av metan, förväntas vara bättre på att detektera brittiska punktkällor av metan.

Brown m.fl. (2021) och Potts m.fl. (2021) har visat att forskningen om och framstegen inom satellitövervakning, under vissa förutsättningar, kan bidra med relevanta uppgifter för de brittiska tillsynsmyndigheterna. Studien analyserade NO₂ i samband med punktkällor, men mer forskning behövs för att testa och anpassa dessa metoder även för andra typer av mer diffusa källor som städer eller deponier.

I Irland har Central Statistics Office (CSO) arbetat tillsammans med Irlands EPA (motsvarigheten till Naturvårdsverket) för att titta på NO₂ emissioner med Sentinel 5P (7 km × 7 km) (Linehan, 2021). En slutsats var att markmätningar är bäst, men att det finns en roll att spela även för satellitdata.

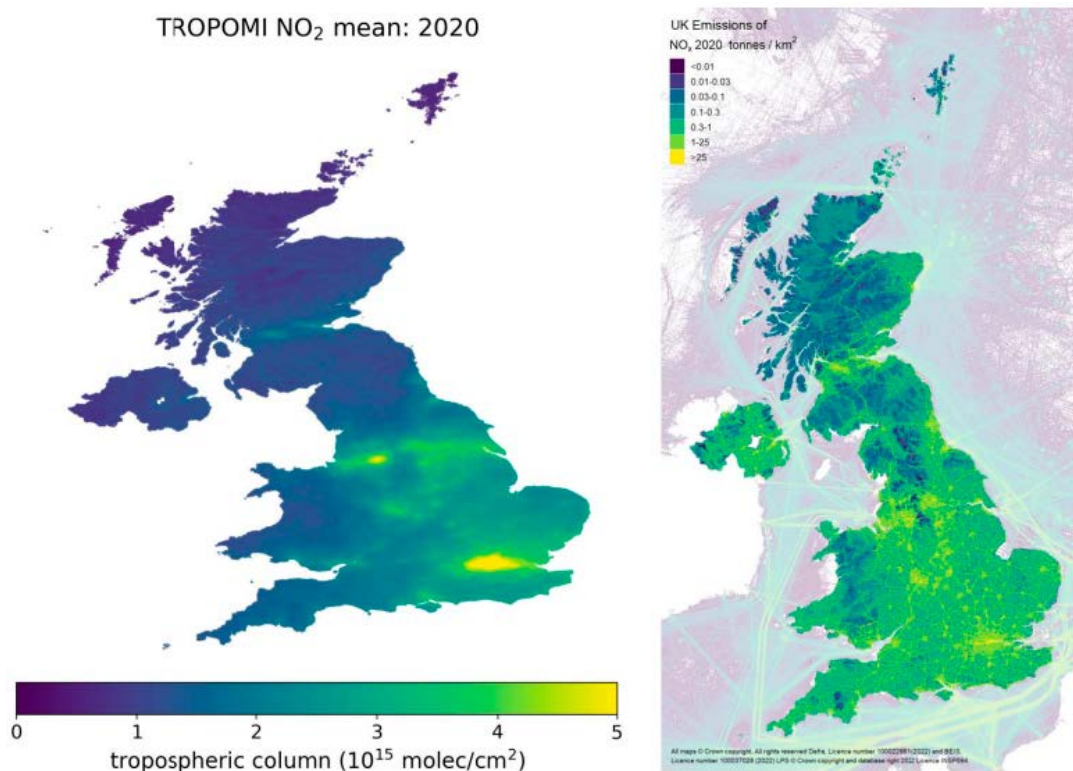
I likhet med Storbritannien har man även i Norge tittat på möjligheten att kartera metanutsläpp med hjälp av satellitdata, se Figur 16. Kylling m.fl. (2021) undersökte möjligheten att använda Sentinel-5P för årliga nationella emissionskartor för metan. I den norska studien undersökte man möjligheten att upptäcka utsläpp från tre system: våtmarker (mossar), områden i Arktis med permafrost samt olje- och gasverksamhet på land och i havet. Kylling m.fl. (2021) drog slutsatsen att, med Sentinel-S5Ps känslighet, kommer det endast att vara möjligt att observera stora enstaka utsläpp i samband med olyckor vid landbaserade olje- och gasverksamheter, förutsatt att observationsförhållandena är gynnsamma. De menade även att årliga nationella täckningskartor för metan anses vara möjligt att generera.



Figur 16. Kolumndensitet ($x\text{CH}_4$) för 2019 per kvartal. Den första kolumnen visar första kvartalet, osv. Saknade data representeras av vita pixlar. Övre raden har analyserats enligt Schneising m.fl. (2020) och den nedre raden visar medelvärdet för den operativa S5P-metanprodukten (Hu m.fl., 2016).

I Storbritannien har man även undersökt möjligheten att använda fjärranalys för att validera utsläppsmätningar och för att minska osäkerheten i den geografiska fördelningen av emissioner i den nationella emissionsinventeringen UK NAEI (UK National Atmospheric Emissions Inventory), (Tsagatakis m.fl., 2022). I ett första steg har man kvalitativt jämfört den geografiska fördelningen av utsläpp av atmosfäriska kolonner från satelliter av tre viktiga NAEI-föroreningar: kväveoxider (NO_x), svaveldioxid (SO_2) och ammoniak (NH_3). I studien genomförde man en första kvalitativ jämförelse mellan koncentrationskartor från TROPOMI-mätningar och NAEI-utsläppskartor för NO_2 och SO_2 (2019) och NH_3 (2018). Jämförelsen visade en rimlig överensstämmelse i fördelningarna, speciellt för NO_2 , se Figur 17, vilket bl.a. beror på att majoriteten av Storbritanniens NO_2 -utsläpp härrör från antropogena källor som är väl representerade i NAEI. Dessutom är satellitprodukten för NO_2 mer mogen jämfört med de andra föroreningarna som hämtas från TROPOMI. De större tätorterna kunde lätt identifieras i den satellitbaserade NO_2 -kartan, men däremot såg man inget tydligt utsläppsmönster från vägtrafiken i satellitkartan, medan vägarnas rumsliga mönster tydligt framgår i NAEI-kartorna, se Figur 17. Detta beror på den begränsade upplösningen av satellitobservationen och den påverkan som övriga källor i området har.

Tsagatakis m.fl. (2022) bedömde att jämförelsen för SO_2 inte är lika enkel. Exempelvis kunde inte städer som London tydligt observeras i satellitkartan. För ammoniak var det däremot möjligt att identifiera det övergripande geografiska mönstret i satellitkartan. Detta är en första jämförelse och ytterligare analys måste upprättas för att helt kunna härleda utsläpp från dessa satellitobservationer. Studien visar att ytterligare studier krävs för att bättre förstå skillnaderna mellan satellitdata och nationella emissionskarteringar. En svårighet med satellitobservationerna är exempelvis att de naturliga källorna inte kan särskiljas från de antropogena källorna, medan emissionsinventeringen från NAEI redovisar de totala antropogena utsläppen av varje förorening.



Figur 17. NO₂ troposfärisk kolumnmedelvärde i molekyler/cm² 2020 (vänster). Totala NAEI NO_x-utsläpp i ton för 2020 (höger). Skala för båda kartorna: 1 km x 1 km. Källa: Tsagatakis m.fl. (2022).

4.4.2 Användning för sjöar kust och hav

I Norge har man arbetat med flera utvecklingsprojekt där man tittat på vinsterna med att använda fjärranalys för att Miljöovervaka både tidvattenszoner (Haarpaintner, 2020) och även sjöar (Ledang, 2019). Den drivande faktorn för utvecklingen i Norge har varit möjligheten att billigare kunna övervaka otillgängliga platser. Följande program och rapporter finns hos Norska Miljödirektoratet:

- Övervakning av innsjøer med satellitt-metodeutvikling M-1579
- Marine heatwaves in Northern Sea areas: Occurrence, effects, and expected frequencies M-2239
- Pilotprosjekter for bruk av fjernmåling i overvåkning (Miljødirektoratet, 2022)
- Copernicus marine tjenester og Miljødirektoratets økokyst- og havforsuringsprogrammer M-1873 (Pettersson m.fl., 2020)
- Satellite Based Intertidal-Zone Mapping from Sentinel-1&2 M-1646
- Mapping conifer trees by means of remote sensing M-939
- Vårøppblomstring av planteplankton i Norskehavet (<https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/hav-og-kyst/havindikatorer/norskehavet/plankton/varoppblomstring-av-planteplankton-i-norskehavet/>)
- Deteksjon av skogsveger – Kartlegging av naturinngrep – fase 2 M-1934
- Kartlegging av naturinngrep – sluttrapport M-1695
- Fjernmåling av Landøkologisk Kart (FALK) – M1867

4.4.3 Övervakning av naturresurser

I Storbritannien används fjärranalys för att övervaka naturresurser i en rad tillämpningar, så som marktäcke, markanvändning (typ av grödor inom jordbruket, skogsinventering m.m.), habitat, hedlandskapets skötsel och utveckling, våtmarker m.m.:

- årlig kartläggning av jordbruksgrödor med hjälp av Sentinel 1 (radar) och 2 (optiska bilder) (Rural Payments Agency UK, 2022),
- markanvändning, habitat och ekosystemtjänster, bland annat med LIDAR-data (Morton m.fl. 2021; UKCEH, 2022; JNCC, 2022a; Scottish Government SpatialData.gov.scot, 2022; Environmental Information Data Centre UK, 2022a; Environment Agency UK, 2022a; Oppla, 2022a och Oppla, 2022b),
- årlig kartläggning av förändringar av hedmarker (som exempelvis var de har bränts; Gov.UK, 2022; Natural England, 2022),
- enskilda träd i strandmiljöer (Environment Agency UK, 2022b), bar jord och erosionsrisk (JNCC, 2022b),
- temperatur, vegetationsutveckling och fuktighet i våtmarker, som en del i beräkningar av växthusgasbalaser (Environmental Information Data Centre UK, 2022b) och
- inventeringar av skogsmark (Forestry Commission, 2022).

4.4.4 Statistiska tillämpningar

Satellitbilder har potential att tillhandahålla statistiska resultat, att minska behovet av undersökningar, att minska respondentbördan och andra kostnader och att tillhandahålla data på en mer disaggregerad nivå för välgrundat beslutsfattande. Detta utforskas på EU-nivå och i internationell samverkan mellan statistiksystem och geodatasystem, exempelvis *The Global Statistical Geospatial Framework*. Exempelvis har man i Kanada moderniserat datainsamlingen för jordbruket genom att använda satellitbilder för att förutsäga grödans tillväxt (Statistics Canada, 2021).

UN-CEBD Task Team on Earth Observation Data (UN-CEBD, 2017) har publicerat en handbok för användningen av satellitdata för att förbättra officiell statistik. Handboken innehåller en kort introduktion till användningen av fjärranalysdata för officiell statistik samt tillgängliga källor och metoder för att producera statistik från denna typ av data. Rapporten innehåller även fyra fallstudier från Australien, Mexico, Colombia och Google.

I en senare rapport gör UN-CEBD (2019) en fördjupad granskning av fjärranalysteknik för tillämpning i officiell statistik. Rapporten fokuserar på användningen av fjärranalys för officiell statistik, och dess potential att ta itu med aktuella eller nya databehov. Dokumentet ger en översikt över internationella organisationers verksamhet (e.g. Eurostat), samt vissa länders program (Österrike, Kanada och Mexiko). Granskningen identifierar möjligheter och lärdomar samt ger rekommendationer om hur man kan främja användningen av fjärranalys i officiell statistik, ett intressant område både för Naturvårdsverket och HaV. Ytterligare exempel på pågående fallstudier från UN-CEBD Task Team on Earth Observation Data återfinns på deras webbplats (UN-CEBD, 2022).

4.4.5 Urbana tillämpningar

I Irland har Central Statistics Office Irland (CSO, 2020) detekterat ljusföroreningar baserat på satellitbilder, 2015–2019. Fjärranalysdatan baserades på NOAA:s (US National Oceanic and Atmospheric Administrations) system för ”Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day-Night Band” (VIIRS-DNB), som mäter atmosfäriskt ljus. Central Statistics Office Irland tillämpade GIS-tekniker för att extrahera ljus-emissionsdata för irländska (och internationella) platser.

5. Diskussion

Fjärranalys kan vara ett viktigt verktyg för att utveckla kunskapen och miljöövervakningen för offentliga myndigheter som HaV och Naturvårdsverket. En av de viktigaste förändringarna i tillgången till information av hög kvalitet under de senaste åren är lanseringen av Copernicus tjänster för land- och vattenövervakning, och särskilt satellituppdraget Sentinel. Till exempel ger Sentinel-1/-2 uppdragen kompletterande SAR- och optiska data med en hög tidsupplösning på 5–6 dagar globalt och 2–3 dagar för Sverige och en rumslig upplösning på 10–20 meter, vilket möjliggör fördjupade möjligheter att konsekvent övervaka nyckelindikatorer för HaV och Naturvårdsverket. Dessa data är dessutom öppna och fritt tillgängliga. Men tillgängligheten är dock bara en förutsättning för att använda dessa data. Att faktiskt använda dem kräver både kunskap, kompetens och resurser. En stor mängd av dessa data kan förbehandlas med tillgängliga molnbaserade databehandlingsplattformar som Google Earth engine (dock ej för kommersiellt bruk) eller tillgänglig mjukvara och verktygslådor som SNAP, och de kan laddas ner på ett antal hubbar som ESA:s Copernicus Open Access Hub. I linje med kommissionens rekommendationer och initiativ uppmuntras nationella myndigheter och offentliga institutioner att använda Copernicusprogrammets produkter och tjänster för sina behov.

Framväxande ny teknik som drönare (UAV) har utvidgat möjligheterna ytterligare. Fjärrstyrda UAV kan dock endast användas inom siktområdet för den mänskliga operatören, vilket allvarligt kan äventyra operatörens liv vid naturkatastrofer som skogsbränder. Andra nackdelar med att använda en drönare för övervakning inkluderar låg tidsupplösning, begränsad rumslig täckning och begränsad flygtid. För att utnyttja EO-informationens fulla potential är dock en kombination av gratis och billig satellit- och flygdata, som ESA:s Sentinel-satelliter, Lantmäteriets långa arkiv med flygbilder, luftburna laserskanningsdata och drönar-data en av de lämpliga vägarna att fortsätta utveckla. Om vi tar som exempel insektsinducerad avlövnings som kan bryta ner biomassa i subalpin björkskog kan den upptäckas med hjälp av offentligt tillgängliga grova och medelupplösta satellitdata (dvs. MODIS eller Sentinel-2) och avslöja hotspots av intresse. Drönare kan sedan användas för att noggrant bedöma skadorna med en mycket fin upplösning i dessa regioner, vilket ger myndigheterna en snabb och robust bedömning av situationen som hjälper till att förhindra ytterligare skador och underlätta evidensbaserade handlingsplaner.

Inom en snar framtid kommer dataplattformen Digital Earth Sweden att göras offentlig, och tanken är att man via deras webbplats ska kunna skicka analyskommandon till datalabbet som sedan genererar ett svar. Detta kommer förhoppningsvis att bidra till att myndigheter och forskare kan jobba mer standardiserat med metoder och skript och enklare dela dem med varandra. Vi vill dock poängtera att detta arbete måste drivas aktivt för att komma till stånd.

5.1 Begränsningar och överväganden

Fjärranalys har ett brett spektrum av applikationer inom miljöövervakning, relevant för både Naturvårdsverket och HaV, t.ex. luftkvalitetsapplikationer, kust- och havsapplikationer, hantering av naturresurser, riskbedömningar, grön infrastruktur-

kartläggning och övervakning. Men ännu har inte alla applikationer uppnått en tillräckligt hög mognadsgrad, se kapitel 5.2. Även om fjärranalys erbjuder goda möjligheter för miljöövervakning, så omfattar användningen av satellitdata ett flertal utmaningar.

Fjärranalysdata kommer med olika spektral, rumsliga, tidsmässiga och radiometrisk upplösningar. För att kunna utnyttja dem till sin fulla potential är det viktigt för användare och intressenter att förstå deras avsedda användning. Till exempel är det bättre att använda nära infraröd och kortvågsinfraröd strålning för vegetationsövervakning än den synliga delen av spektrumet. Att använda grova upplösningsdata (500 meter) för att upptäcka förändringar i små områden skulle inte vara möjligt eller mycket suboptimalt. Det är därför uppenbart att när behoven för en applikation har specificerats är en kostnadsnyttoanalys avseende användningen av fjärranalysdata absolut nödvändig. Detta är också starkt kopplat till tillgängligheten av data på plats för att träna eller validera fjärranalysbaserade modeller.

Ett annat viktigt övervägande är valet av bearbetnings- och analysmetoder. Under de senaste decennierna har en mängd olika fjärranalysbaserade kartläggnings- och övervakningsmetoder utvecklats med hjälp av maskininlärning/djupinlärning. Användare måste vara medvetna om att metoder som fungerar bra för optiska bilder (till exempel Sentinel-2) kanske inte fungerar för SAR-bilder (till exempel Sentinel-1) och vice versa. Ibland kan de utvecklade metoderna vara regionspecifika (t.ex. boreala eller tropiska) eller applikationsspecifika. Därför är det viktigt att välja lämplig metod för den valda fjärranalysdatan för en specifik applikation.

Detta är också starkt kopplat till tillgängligheten av data för att träna och validera EO-baserade modeller vilket också är ett viktigt övervägande. Standardiserade och ofta uppdaterade inventeringar (dvs. skogsinventeringar, vatten- och luftkvalitet) bör utvecklas i de fall de inte redan finns, eftersom de utgör ryggraden i robusta analyser med hjälp av EO-data. Dessa databaser bör vara lättillgängliga och driftskompatibla för andra myndigheter, eftersom det ofta behövs mer än en typ av data för komplexa tillämpningar såsom uppskattning av biomassa i stor skala.

För att använda fjärranalysdata på ett tillförlitligt sätt i miljöövervakning är spårbarhet viktigt. Exempelvis kan luftkvalitets- och växthusgasprodukter härröra från ett antal datakällor och parametrar, inklusive "rå" satellitdata. EU projektet QA4ECV (Quality Assurance for Essential Climate Variables) (QA4ECV, 2019a) kan vara en viktig informationskälla för spårbarheten och andra kvalitetssäkringsaspekter av satellitprodukter av väsentliga klimatvariabler (ECV). Exempelvis har projektet tagit fram detaljerade och interaktiva spårbarhetskedjor för tre atmosfäriska produkter: formaldehyd, NO₂ och CO (QA4ECV, 2019b).

Även kalibrering och validering av satellitinstrumenten är viktiga för att säkerställa kvalitén. Satellitinstrumenten kalibreras vanligtvis före lansering och sedan även under flygning. När det gäller satellitmätningar av luftföroreningar och växthusgaser så valideras dessa mot antingen markbaserade mätningar eller flygplansbaserade mätningar av vertikala profiler. Exempelvis kalibreras metanmätningar från TROPOMI mot FTIR-instrument som ingår i nätverken NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) och TCCON (Total Carbon Column Observing Network) (ESA, 2017). Eventuella korrigeringar från dessa valideringsmätningar ingår i algoritmen som producerar L2-produkten. Fullständiga detaljer om kalibrerings- och valideringsaktiviteterna för TROPOMI finns tillgängliga (ESA, 2020).

En nackdel inom satellitövervakning kan vara tidsupplösningen, samt dataförluster exempelvis orsakade av molntäckning. I många fall finns tekniker för att motverka dessa dataglapp, exempelvis interpolationstekniker, modeller eller algoritmer. Dataförluster kan dock i vissa fall påverka tolkningen av satellitdatan. Exempelvis när det gäller beräkning av årliga medelvärden för luftföroreningar är det sannolikt att dessa inte är representativa för det ”riktiga” årsvärdet, eftersom det är vanligare med molnfria mätningar på sommaren än på vintern. Geostationära satelliter och konstellationssatelliter kommer att kunna ge en stegvis förbättring med avseende på den tidsmässiga upplösningen, även om problemen med dataförluster på grund av molntäcke kommer att kvarstå.

Satelliter uppdateras och förbättras kontinuerligt och trender i längre tidsserier kan därför ibland bero på artefakter relaterade till mätningen och inte bara förändringar i miljön. Ett exempel på det är ett larm från internationella forskare år 2020, om att Sverige och Finland abrupt ökade sin slutavverkningstakt med 50 % på kort tid, baserat på Landsatdata. Det forskarna såg visade sig dock till stor del bero på uppgraderad mjukvara hos satelliten, som gjorde att den fick bättre upplösning i slutet av den undersökta perioden jämfört med i början av perioden (Ceccherini m.fl., 2020; Breidenbach m.fl., 2022).

5.2 Möjligheter för Naturvårdsverket och HaV att använda satellit fjärranalys för miljöövervakning

Tillgängligheten för fjärranalysinformation har ökat exponentiellt under det senaste decenniet. Tillgängligheten och tillgången till stora mängder satellitbilder (t.ex. genom EU:s jordobservationsprogram – Copernicus) har öppnat nya möjligheter för insamling av större och nya typer av data för marktäcke, markanvändning och vattenmiljön, i en aldrig tidigare skådad geografisk och temporal upplösning. Således finns en stor potential i att anpassa dessa data till de svenska nationella myndigheternas behov. Samtidigt kan det vara utmanande att samla in och hantera fjärranalysdata för att möjliggöra snabb analys och integration med andra informationskällor.

Lanseringen av ESA:s Sentinel-satellitkonstellationer tillsammans med andra kommersiella satelliter, såväl som den ökande populariteten för drönare har låst upp enorma möjligheter för miljöövervakningen. Denna potential har materialiserats på olika sätt, såsom intensiv kommersialisering av tjänster, till exempel inom området jordbruksförvaltning genom precisionsjordbruk. Å andra sidan har nationella och internationella myndigheter i allt större utsträckning integrerat fjärranalysdata för mark- och vattenförvaltning och stöd i sina tjänster, inklusive de svenska myndigheterna (se kapitel 4). Under de senaste åren har ansträngningar inriktats på att skapa övervaknings- och prognosmodeller i nästan realtid, samt snabb uppdatering av befintliga databaser, ofta flera gånger om året. Detta återspeglas till exempel i kartläggning av skogsbränder, urban tillväxt, marktäcke och övervakning av naturresurser som strandlinjer och våtmarker (se kapitel 3).

Ny teknik och nya metoder kan effektivisera datainsamlingen och förbättra kunskapsbasen för Naturvårdsverket och HaV. Det finns dock ett behov av att bedöma hur tillgängligheten och användningen av dessa data bäst kan tillämpas

för myndigheternas behov. Tillgängligheten av öppet tillgängliga satellit- och luftburna data är enorm, men kräver ofta omfattande beräkningar och bearbetning för att vara tillämpbara. Det är utmanande att samla in och hantera dessa data för att möjliggöra snabb analys och på ett smidigt sätt integrera dessa data med andra informationskällor, exempelvis mätdata från fält, kartläggningar, artobservationer, mobiltelefondata mm. Dataåtkomst är ofta ett hinder för dataanvändning på grund av det större antalet datatyper, metadata och webbplatser för att hitta data. Det är därför viktigt att förstå styrkorna och begränsningarna hos data för en applikation. Fjärranalysdata kräver teknisk bearbetning och analys för att passa behoven hos intressenter som Naturvårdsverket och HaV. Dessutom har den ökade rumsliga och tidsmässiga upplösningen av fjärranalysensorer utökat det potentiella utbudet av slutprodukter som kan vara relevanta för Naturvårdsverket och HaV. Lika viktigt är att lämplig validering av slutprodukterna krävs för att säkerställa sanningshalten i resultaten.

Det är av avgörande betydelse att tydlig, replikerbar datainsamling och applikationer måste utvecklas för en smidig användning av satellitdata för Naturvårdsverket och HaV:s behov. Detta kan omfatta automatiska procedurer som minimerar användarens bearbetning av datan under insamlingen av data, lämpliga användargränssnitt, samt möjligheten att effektivt och kontinuerligt uppdatera befintliga modeller och produkter när nya data blir tillgängliga.

Fjärranalys är inte ett universalmedel, utan ett kraftfullt verktyg för HaV och Naturvårdsverket, som, om det används på rätt sätt, kan uppgradera deras bredd och kvalitet på sina applikationer. Bearbetning och leverans av sådan information kräver dock utbildad personal med en grundläggande bakgrund inom fjärranalys. Dessutom kan lagring och bearbetning av sådana data kräva måttliga till högkvalitativa beräkningsresurser som sträcker sig från datoranvändning till användning av molnbaserade datorplattformar på regional eller nationell nivå, exempelvis Digital Earth Sweden. Detta gör också att det finns ett behov av kontrollerad data-delning då sammanställningar av data och analysresultat kan ha ett skyddsbehov. Dessutom, för fjärranalysbaserade modeller, är maskininlärningsalgoritmer vanligtvis nödvändiga för optimala resultat, och om källkoden för dessa algoritmer är öppen ökar transparensen. Det är därför oundvikligt att HaV och Naturvårdsverket behöver ha tillgång till personal som är kunniga inom fjärranalys för att fullt ut kunna utnyttja potentialen hos fjärranalys. Man behöver inte nödvändigtvis ha egen personal, men samverka med andra myndigheter och samarbete med exempelvis akademi och/eller industri, kan bidra till att minska ner uppstartstiden för nya fjärranalystillämpningar.

En annan viktig faktor är att fjärranalys inte förväntas ersätta fältarbete, utan snarare komplettera det. In situ-undersökningar är avgörande för datainsamling, tolkning av resultat från satellitdata och identifiering av ytterligare behov. Dessutom kan fältdatainsamlingen behöva anpassas med tanke på att informationen kommer att användas av fjärranalysbaserade modeller. Detta innebär att man noggrant bedömer frågor som god geolokalisering och tidsmässig konsekvens. Dagens arbetssätt inom miljöövervakningen kommer alltså att påverkas, eftersom det kommer att behöva anpassas till fjärranalysmetoderna.

En annan kritisk aspekt är insamlingen och förbearbetningen av dessa data för att

1. möjliggöra snabb analys med de senaste AI-algoritmerna (dvs. Deep Learning) och
2. integreras harmoniskt med andra informationskällor som sociala medier, media, mobiltelefondata samt klassiska rumsliga datastrukturer.

Därför är det avgörande att tydlig, replikerbar datainsamling och metodologiska protokoll måste utvecklas för att fjärranalysdata ska kunna integreras smidigt för de relevanta intressenternas behov och specifikationer. Det finns således ett behov av begrepps och informationsmodeller, s.k. informationsutbytesmodeller. Det handlar om utveckling av automatiska procedurer som optimerar insamling av data, praktiska användargränssnitt, samt möjligheten att effektivt och kontinuerligt uppdatera befintliga modeller och produkter när nya data blir tillgängliga.

Rumslig täckning är en av de stora fördelarna med majoriteten av satellitdata jämfört med observationsmätningar på markytan eller flyg/UAV. Dessutom kan de långa tidsserierna av satellitdata vara ett verktyg för att studera trender bakåt i tiden (förutsatt konsekvent korrigerad av data över tid), likaväl som ett stöd för att prognostisera (framtida) utveckling. I förändringsstudier är det dock viktigt att ha kunskap om hur satellitprodukten har förändrats över tid, för att undvika att resultaten i förändringsstudien feltolkas.

Utöver insamlande av data från satelliter och markobservationer finns också möjligheten att samla in mycket exakta data, i en mellanskala mellan in-situ markobservationer och satellitmätningar data via exempelvis HAPS (high-altitude platform stations) eller drönare utrustade med olika sensorer (d.v.s. termisk, LiDAR, hyperspektral, mikrovågor). Dessa data kan utgöra ytterligare komplement till markobservationer för att utveckla applikationer för att utvärdera och verifiera kvaliteten på satellitdata med andra instrument.

5.2.1 Miljöövervakning av luftkvalitet – möjligheter

I dagsläget används inte satellitdata för luftkvalitet eller växthusgaser av Naturvårdsverket, men vi har noterat att användningen av sådana data har ökat kraftigt, inte bara inom forskningsvärlden, utan även av exempelvis internationella myndigheter och organisationer. Dessutom förbättras både metoder och satellitinstrument kontinuerligt. Vi bedömer därför att den potentiella tillämpbarheten av dessa typer av data kommer att öka även för Naturvårdsverket framöver. Exempelvis erbjuder det nya TROPOMI-instrumentet (på Sentinel-5P) luftkvalitetsdata med högre geografisk upplösning än tidigare. Dessutom kommer fler förbättrade satellitinstrument att lanseras inom en snar framtid, och dessa förväntas erbjuda förbättringar både med avseende på känslighet och geografisk och temporal upplösning, exempelvis med avseende på metan (Jacob m.fl., 2022).

Brown m.fl. (2021) har sammanfattat fördelar och nackdelar med satellitmätningar av luftföroreningar och växthusgaser jämfört med markbaserade mätinstrument (se nedan).

I Storbritannien utvärderade Lingard m.fl. (2015) fördelarna, nackdelarna och hindren för en bredare användning av innovativ teknik för mätning av luftkvaliteten i Storbritannien. De drog slutsatsen att även om användandet av fjärranalysensorer inte förväntas bli en del av det brittiska luftövervakningsnätet inom de närmsta åren (2025), så har de ett antal fördelar jämfört med traditionella övervakningsinstrument, vilket skulle kunna vara användbart som komplement. Lingard m.fl. (2015) nämner bl.a. följande fördelar med avseende på fjärranalysmätning av luftkvalitet med satelliter:

- Uppskattning av föroreningskoncentrationer över stora områden.
- Identifiering av regionala källor till luftföroreningar som påverkar den lokala luftkvaliteten.
- Tillhandahållande av samtidig och kontinuerlig mätning av flera föroreningar.

Fördelar

- En mycket stor geografisk täckning (global täckning för polära satelliter och solsynkrona satelliter; ungefär kontinental täckning för geostationära satelliter).
- Mätningar kan göras på platser där inte finns några markbaserade mätinstrument.
- Mätningar av hela atmosfärskolonnen från satelliter är mer tillämpliga för övervakning av plymer jämfört med markbaserade instrument.
- Konsekventa, kontinuerliga historiska data gör det möjligt att undersöka historiska trender.
- Data är (i allmänhet) gratis att ladda ner och använda.
- Samtidiga mätningar av flera föroreningar och gaser (detta är också fallet från vissa markbaserade instrument).

Nackdelar

- En grov rumslig upplösning (vanligtvis en pixelstorlek på några km).
- En grov tidsupplösning (vanligtvis daglig med polär omloppsbanan och solsynkron satellit).
- Osäkerheten i mätningarna är svår att fastställa och är ofta mycket större än för markbaserade instrument, exempelvis för NO₂, se Boersma m.fl. (2018).
- Underliggande antaganden som används vid bearbetning av data från till exempel L2 till L3.
- Omvandling av totala kolumnmått (ofta i enheter av molekyler per cm²) till mer användbara marknära mätningar (i enheter av t.ex. µg per m³) kräver tillämpning av komplexa, kemiska transportmodelleringsmetoder, se t.ex. Liu m.fl. (2019) för ammoniak, vilket bidrar till ytterligare osäkerheter i dataresultatet.
- Bearbetning och tolkning av data kräver expertkunskaper och färdigheter.
- Det kan vara vanskligt att vara beroende av en oersättlig enskild källa med satellitdata, på grund av riskerna för att instrumentet misslyckas eller förlorar känslighet som påverkar datatillgången och/eller kvaliteten. Dock finns det ofta kompletterande datakällor tillgängliga, i form av andra satellitinstrument och markbaserade mätinstrument.
- För tillämpning inom regulatorisk verksamhet finns det för närvarande en obalans mellan den geografiska och tidsmässiga upplösningen av satellitdata (som är stora och sällsynta) och reglerade processer (som vanligtvis är små och kontinuerliga).

I en senare utredning undersökte Brown m.fl. (2021) hur satellitmätningar av luftföroreningar och växthusgaserna kan tillämpas av motsvarigheten till Naturvårdsverket i Storbritannien (the Environment Agency, EA). Utredningen omfattade tre fallstudier; mätningar av ammoniak (med IASI-instrumentet), kvävedioxid och metan (båda med TROPOMI-instrumentet), se kapitel 4.4.1. Baserat på dessa fallstudier bedömde Brown m.fl. (2021) att NO₂-mätningar troligtvis är den mest användbara för tillämpningar i Storbritannien, eftersom instrumenten har en hög känslighet för NO₂ samtidigt som det finns en större forskningsgrund (högre mognadsgrad) med avseende på dessa mätningar. Dock är det fortfarande svårt att mäta NO₂ koncentrationer nära marken (snarare än troposfäriskt NO₂, eftersom det är svårt att skilja marknära NO₂ från högre nivåer av plymer). När det gäller mätningar av ammoniak och metan så är dessa problematiska eftersom de ger en lägre intensitetssignal i instrumenten, så för dessa föroreningar bedömde Brown m.fl. (2021) att potentialen i närtid inte var lika hög som för NO₂.

Ytterligare ett potentiellt område för Naturvårdsverket är att, i likhet med exempelvis Tsagatakis m.fl. (2022) använda fjärranalys för att validera utsläppsmätningar och minska osäkerheten i den geografiska fördelningen av emissioner i den nationella emissionsinventeringen. Studierna att med hjälp av satellitbaserade data validera utsläpp, är ännu i ett tidigt skede. De flesta av studierna använder komplexa modelleringsmetoder som kräver en stark teknisk expertis och betydande beräkningsresurser för att härleda utsläppen.

Fjärranalys med hjälp av satelliter kan erbjuda en unik möjlighet att verifiera emissionsuppskattningar, men fortfarande krävs ytterligare studier för att utveckla tillämpningen. Satellitobservationer kan ha en grövre upplösning jämfört med

markbaserade mätningar och endast ge en eller två observationer per dag över samma plats. Dessutom kan satellitobservationerna påverkas av vädreffekter som molntäckning, vilket kan minska noggrannheten. Satellitobservationer kompletterar ytoobservationer eftersom ytoobservationer inte är homogent fördelade över landet. För vissa föroreningar ger satellitobservationer bättre täckning än nuvarande markbaserad övervakning och möjliggör därmed förbättrad rumslig fördelning av föroreningarna. Möjligheten att kombinera mätningar, satellitdata och modellering har därför potential att förbättra miljöövervakningen.

Sammanfattningsvis bedömer vi att det på sikt är troligt att kartläggning av luftkvalitet med fjärranalys för vissa luftföroreningar och växhusgaser kan ge ett bra resultat, förenligt med lägre kostnad och i större rumsliga skalor. Än så länge finns det dock endast ett fåtal instrument i omloppsbanan som är optimerade för luftkvalitetstillämpningar, men utvecklingen på området går snabbt framåt. Ett flertal nya satelliter och instrument är redan planerade, som kommer att få stor betydelse för att förbättra övervakningen av luftföroreningar från satelliter. Satellitmätningar av luftföroreningar behöver dock valideras och kommer därför inte att ersätta behovet av ytoobservationer, oavsett vilken typ av applikation och satellitsensor som används.

5.2.2 Biodiversitet – möjligheter

Det är uppenbart att fjärranalysbilder kan användas för att kartlägga biologisk mångfald (såsom olika skogstyper, flora- och faunaarter) i olika skalor. I vår litteraturstudie omfattade de flesta studierna fallstudier på subnationell nivå. Noterbart är att fria och öppna satellitdata som ESA:s Sentinel-1 och -2, samt Landsat, visar sig vara mycket konsekventa i dessa uppgifter, med hög noggrannhet. Medan potentialen för SAR-data (Sentinel-1) fortsätter att utvecklas och etableras, är optiska data redan väl undersökta och har visat bra resultat i olika miljöer och förhållanden. För att dessa fjärranalysbaserade modeller ska fungera krävs dock vissa in-situ-data för att initialt träna modellerna. Detta innebär att HaV och Naturvårdsverket behöver producera data som är i) standardiserade och ii) geolokaliserade och iii) tidsmässigt uppdaterade, för att kunna användas i kombination med satellitdata. När dessa kriterier har fastställts, och efter validering av de fjärranalysbaserade modellerna, kan indikatorer för biologisk mångfald rutinmässigt extraheras vid höga rumsliga (10–100 meter) och tidsmässiga (månatliga till årliga) upplösningar, vilket kan visas genom att sammanställa de olika resultaten från studier som täcker stora delar av Sverige (kartläggning på nationell nivå).

Vissa forskare har också påpekat att satellitdata är underutnyttjade och har stor potential för studier som övervakar biologisk mångfald (Turner m.fl., 2015, Pettorelli m.fl., 2014). Särskilt användningen av fjärranalys med medelhög upplösning har sett en omfattande utveckling för att övervaka biologisk mångfald (Pettorelli m.fl., 2014). Exempelvis visade en nyligen genomförd studie att biologisk mångfald kan bedömas från rymden med hjälp av Sentinel-2-data baserat på en testplats i en schweizisk skog (Helfenstein m.fl., 2022). Men Helfenstein m.fl. (2022) belyser också betydelsen av rumslig upplösning för att mäta diversitet. Fjärranalys har också potential att ge data om livsmiljökvantitet och kvalitet (Mairota m.fl., 2015).

5.2.3 Användning för sjöar, kust och hav – möjligheter

Det finns stor potential för miljöövervakning av vattenmassor och kuster med hjälp av den tillgängliga data som finns idag genom bl.a. Copernicus och Sentinel-satelliterna har en hög återkommande frekvens över Sverige. Flera av de metoder som presenteras i litteraturstudien är redan aktiva och används av myndigheterna. Den största potentialen finns i att använda dessa metoder som redan finns inom fler områden än vad som görs idag. Ett exempel är att använda de metoder som idag används inom ”fjärranalys av den fria vattenmassan” vid kontinuerlig övervakning även för inlandsvatten. Även den data som beskrivs för övervakning av våtmarker och kustlinjen är data som redan idag inhämtas till andra verktyg hos myndigheterna och metoderna som används liknar de metoder som bland annat används vid framtagandet av Nationella marktäckedata (NMD). Som nämns i de rapporter som skrivits av Lst Norrbotten är att den största vinsten vad gäller fjärranalys är där det som ska övervakas ligger avlägset eller där en stor yta behöver täckas med små resurser.

Bevisen i litteraturen har visat att fartygsdetektering är möjlig med hjälp av rymdburna SAR-data. De ger därför en oöverträffad möjlighet för Naturvårdsverket och HaV att expandera i områden där fjärranalys inte har tillämpats systematiskt, med små kostnader eftersom satellitdata som krävs är antingen gratis (Sentinel-1) eller till en låg kostnad. Det är dock svårt att skilja illegalt fiske från andra fartyg. Ytterligare forskning behövs för att använda öppna datauppsättningar för att träna fjärranalysbaserade Deep Learning modeller. Detektering av muddring med hjälp av fjärranalys är också en svår uppgift, men förekomsten av muddringsfartyg utgör ytterligare ett bevis och kan därför förstärka styrkan i argumentet att fjärravkända mönster av ökad vattenturbiditet kan hänföras till muddringsaktiviteter.

5.2.4 Övervakning av naturresurser – möjligheter

Fjärranalys har potential att underlätta för både Naturvårdsverket och HaV att följa upp Sveriges Miljökvalitetsmål, exempelvis vad gäller frisk luft, vattenkvalitet, skogar, odlingslandskapet, fjälllandskapet och våtmarker. Fjärranalysmetoder används redan idag för att följa upp vissa av FN:s globala mål (de så kallade SDG) (Estoque, 2020). 2016 lanserades ett initiativ kallat ”Earth Observations in Service of the 2030 Agenda for Sustainable Development” (EO4SDG) (<http://eo4sdg.org/>), med syftet är att organisera och förverkliga potentialen av fjärranalys för att främja uppföljningen av SDG:erna, och därigenom uppnå målen för hållbar utveckling.

Utvecklingen av ny teknik går snabbt framåt och exempelvis drönare har utvidgat möjligheterna ytterligare. Drönardata kan erbjuda oöverträffad kvalitet (centimeterprecision) om än till en betydande kostnad (kostnad för utrustning och utbildad personal). Till exempel kan drönare ha en stor potential för att upptäcka skogsbränder i högriskområden och med tanke på klimatförändringarna skulle det kunna vara en fördelaktig tillämpning för offentliga myndigheter att utveckla.

För att utnyttja fjärranalysens fulla potential är dock en kombination av öppna och fritt tillgängliga data (som Sentinel) och drönare en lämplig väg framåt. Ett annat exempel är insektsskador som kan bryta ner biomassa (avlövning) i granskog eller subalpin björkskog, där potentiella skadade områden kan detekteras med hjälp av öppna, fritt tillgängliga data (dvs. MODIS eller Sentinel). Drönare kan sedan användas för att noggrant bedöma skadorna med en mycket fin upplösning i dessa

regioner, vilket ger myndigheterna en snabb och robust bedömning av situationen som hjälper till att förhindra ytterligare skador och underlättar arbetet med åtgärder och evidensbaserade handlingsplaner.

Det finns flera studier som har använt fjärranalys för att upptäcka barkborreangrepp i tidigt skede i europeiska skogar. De flesta studierna använder de fritt tillgängliga optiska satellitbilderna från Landsat, som drivs gemensamt av NASA och USGS, eller Europeiska unionens Copernicus Sentinel-2. Båda projekten ger multispektrala högupplösta (10 m – 30 m) bilder med frekventa återbesök, vilket gör dem lämpliga för snabb upptäckt av angrepp. Mest lovande för tillförlitlig och snabb upptäckt av barkborreattacker är de röda och kortvågsinfraröda banden, medan backscatterinformation från SAR-data (t.ex. Sentinel-1) är mindre lovande. En stor begränsning av studierna är dock att de uteslutande har tillämpats i lokal skala, och den tekniska beredskapsnivån är för närvarande på forskningsstadiet och kräver ytterligare utveckling, inklusive tillämpning i större skala (t.ex. nationell skala), för att komma närmare spridningsfasen. I Sverige har skogsbolaget Holmen kartlagt angrepp under 2019 och tidig sommar 2021 i delar av sydöstra Sverige (Holmen, 2022). De här tidiga resultaten finns också på Skogsstyrelsens webbplats, se även kapitel 4.3 om användningen vid svenska myndigheter.

Övervakning av marktäcke, markanvändning (i bredare kategorier som skog, åker, vatten, eller i smalare som typ av grödor eller skog), förändringar i marktäcke (vid avverkningar, bränning, planteringar, byggnationer, glaciäravsmältning med mera), trädhöjd och fenologi är välanvänt och välutvecklat (Roy m.fl. 2022; Situch m.fl., 2022), även som underlag för modelleringar av habitat och erosionsrisk (Jongman m.fl., 2019; JNCC, 2022b). I Sverige finns till exempel marktäckedata som baseras på fjärranalys (NMD) på www.naturvardsverket.se/verktyg-och-tjanster/kartor-och-karttjanster/nationella-marktackedata/.

Övervakning av mikroklimat och modellering av dess påverkan på biota och deras anpassningsförmåga inför klimatförändringar är ett viktigt område under utveckling (Zellweger m.fl., 2019). Även modellering av ekosystemtjänster (som produktion av blåbär) och av enskilda hotade eller problemskapande arter är mindre väl utvecklat, men det kommer fler och fler tillämpningar (Kuzmin m.fl., 2021; Randin m.fl., 2020; Huo m.fl. 2021).

För övervakning av bränder finns FireCCI med 250 m upplösning och MODIS-data med 500 m upplösning på global bränd area per månad eller daglig förändring. Det finns försök att använda djupinlärning för att kartlägga bränd area i regional skala med bättre upplösning, med Landsat-8, Sentinel-2 och Sentinel-1 etc., men det finns ingen produkt med bränd area global med medelhög upplösning tillgänglig hittills. Produkter för bränd area med årlig eller månatlig tidsupplösning och bra geografisk upplösning, som görs tillgängliga snabbt, skulle vara viktiga att utveckla, eftersom de skulle vara av stor betydelse för övervakning av brandeffekter och utsläpp från bränder. Finansiering och samarbete bör uppmuntras för att påskynda utvecklingen och spridningen av regionala och globala produkter från bränder med medelhög upplösning.

5.2.5 Kartläggning och övervakning av grön infrastruktur i stadsmiljön – möjligheter

Studierna om urban grön infrastruktur (kapitel 3.5) visar att satellitbilder har potential att användas för att övervaka urbanisering och dess miljöpåverkan på lokal eller regional nivå. Flera studier utnyttjade mycket högupplösta (< 1 m) bilder från satelliter som QuickBird-2 eller WorldView-2 för att kartlägga urban marktäckning vid flera tillfällen med hjälp av objektbaserad bildanalys. Marktäckningskartorna användes därefter för att analysera urbaniseringens miljöpåverkan, där förlusten av urban grön infrastruktur spelar en grundläggande roll. Eftersom användningen av kommersiella, mycket högupplösta data begränsar applikationsskalan till den lokala skalan, använde andra studier högupplösta (10 m – 30 m) bilder från Landsat- eller Sentinel-2-satelliter för att utöka den urbana miljöövervakningen till regional skala. Även om lovande resultat har uppnåtts genom dessa studier, är en lokaliserad analysnivå med mycket högupplösta bilder avgörande för att fånga urbanisering mer exakt, särskilt med hänsyn till komplexiteten i stadsmiljöer. Flerskalig analys, som utnyttjar både högupplösta och mycket högupplösta bilder, identifierades som ett lovande verktyg för att övervinna bristerna i båda tillvägagångssätten. Dessutom tillämpar de flesta studier fortfarande konventionella ”machine learning classifiers” som SVM (support vector machines), medan ”deep learning-based mapping” avsevärt kan förbättra kvaliteten på de genererade marktäckningskartorna och följaktligen kvaliteten på den efterföljande miljökonsekvensanalysen. Därför rekommenderar vi undersökning av flerskalig analys med hjälp av satellitbilder med flera källor med olika upplösningar, i kombination med kraftfulla djupinlärningsalgoritmer (deep learning algorithms) för att få mer exakta kartor över urbana marktäckekartor.

6. Rekommendationer

Fjärranalys är ett mycket kraftfullt verktyg som för närvarande är underutnyttjat av HaV och Naturvårdsverket. Potentialen i fria och offentliga satellitbilder från ESA:s Sentineluppdrag har till exempel visat sig vara en potent lösning för stor-skalig kartläggning inom olika applikationsområden som organisationerna arbetar med, inklusive miljömål och SDG:er. Dessa metoder kommer oundvikligen att bli vanliga under de kommande åren i flera av EU:s länder, som redan arbetar mot operativa nivåer.

Dagens arbetssätt inom miljöövervakningen kommer att påverkas eftersom fjärranalysövervakningen behöver integreras i den nuvarande miljöövervakningen. För att kunna nyttja satellitdata och fjärranalys i större utsträckning inom miljöövervakningen i Sverige behöver mer fokus läggas på kvalitetssäkring, validering och verifiering av metoder. Resultat från analyser behöver bli mer robusta och uppföljningsbara samtidigt som man utvecklar och integrerar nya data och nya tekniker. Exempelvis kommer en ökad tillgång på in-situ data att behövas för att träna och validera produkter/analyser baserade på EO-data. Det behövs robusthet i resultaten och utökade valideringsinsatser för att ge trovärdighet till nya metoder för miljöövervakning. Detta är förknippat med kostnader trots att mycket data idag är kostnadsfritt. Därför är det viktigt att göra en kostnads-nyttoanalys avseende användningen av fjärranalysdata när behoven för en applikation har specificerats.

Det finns också en brist på kompetens som överbrygger gapet mellan teknik och sakkexpertis. Området behöver både forskning och framförallt metदानpassningar till svenska förhållanden. Detta görs antagligen bäst baserat på konkreta behovsställningar från myndigheternas sakverksamheter.

Vi föreslår här olika åtgärder som Naturvårdsverket och HaV kan vidta för att utveckla verktyg och robusta metoder för att utveckla tillämpningen av satellitdata inom miljöövervakningen:

Fortsätta att följa utvecklingen inom fjärranalys för Naturvårdsverkets och HaV:s syften

Viktiga informationskällor inkluderar:

- EO4SDG – Jordobservationer i syfte att främja Agenda 2030 för hållbar utveckling (<http://eo4sdg.org/>)
- Sentineluppdrag, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>
- Copernicus Open Access Hub, <https://scihub.copernicus.eu/>
- Copernicus tjänster. <https://www.copernicus.eu/en>
- EU:s tjänst för data- och informationsåtkomst (DIAS), <https://www.copernicus.eu/en/access-data/dias>
- Horizon Europé programmets projektsidor.
- Bevakning av Regeringsuppdrag under den nationella datastrategin.
- Rekommendationer om hur man kan främja användningen av fjärranalys i officiell statistik: <https://unstats.un.org/bigdata/task-teams/earth-observation/index.cshhtml>

- Nationella Rymddatalabbet (Digital Earth Sweden, <https://rymddatalabbet.se> (<https://digitalearth.se/>))
- Sentinel-Hub, <https://www.sentinel-hub.com/>
- Google Earth Engine, <https://earthengine.google.com/>
- Landsat-programmet, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/#>

Initiera och stödja fortsatt forskning och utveckling

Till exempel bidra eller initiera synergistiska studier som kombinerar mätningar, satellitobservationer och modellering för att förbättra miljöövervakningen och få en ökad förståelse för luftföroreningar och växthusgaser i atmosfären, processer och interaktioner i mark- och vattenmiljön, samt urbaniseringens miljöpåverkan på grön infrastruktur, skogsbränders inverkan på biologisk mångfald och utsläpp/föroreningar.

Initiera och stödja studier för att utveckla standardiserade operativa rutiner för att välja, analysera och tolka satellitdata

Tillsynsmyndigheter kräver robusta och granskningsbara data, det är viktigt att utveckla standardiserade operativa förfaranden och tekniska miljöer för att välja, analysera och tolka satellitdata för en viss applikation.

Initiera och stödja nära realtidsövervakning med multiplattform- och multisensortechnik

Drönare växer i popularitet och kommer utan tvekan att etableras som standard EO-verktyg under de kommande åren. Tillsammans med satellitdata har de stor potential för övervakning i nära realtid, åtkomst till svåråtkomliga platser och mycket hög upplösning av data (< 1 m) är önskvärda egenskaper som Naturvårdsverket och HaV bör utforska vidare. Att etablera några pilotstudier som integrerar satellitdata och drönare för applikationer som är mest relevanta för Naturvårdsverket och HaV, rekommenderas.

Initiera och stödja svenska studier inom fjärranalysområden som redan framgångsrikt testats av andra internationella myndigheter

Genom att använda internationella exempel som redan tagit fjärranalysen till operationell nivå, kan man dra nytta av erfarenheter från andra länder. Det är dock viktigt att titta på förutsättningarna i Sverige jämfört med andra länder, exempelvis vad det finns för komplement till laserdata.

I dagsläget används inte satellitdata för luftkvalitet eller växthusgaser av Naturvårdsverket, men vi bedömer att det finns stor potential att utveckla miljöövervakningen av luftföroreningar med hjälp av satellitdata. Exempelvis har studier i Storbritannien visat att forskningen och framstegen inom satellitövervakning, på vissa villkor och med villkorligt utvalda data, kan bidra med relevanta uppgifter för de brittiska tillsynsmyndigheterna. Vi rekommenderar därför att man påbörjar studier för fjärranalys med NO₂, vilket är den luftförorening för vilken fjärranalysapplikation har uppnått högst mognadsgrad. Även studier av metan kan troligtvis bli intressant att titta på inom en snar framtid, men mer forskning behövs för att testa och anpassa dessa metoder för diffusa källor som städer eller deponier.

Initiera och stödja studier om kostnadseffektiviteten av att använda satellitdata som komplement till nuvarande miljöövervakning

En stor del av de tillgängliga fjärranalysdata som är lämpliga för Naturvårdsverket- och HaV-ändamål är öppna och fritt tillgängliga. Kostnaderna bör främst avse utbildning av personal, externa kontrakt och anskaffning av utrustning, vilket är relativt lågt i jämförelse med vad fjärranalysdata kan tillföra. Ett av de mest konkreta resultaten av EO-integration hos myndigheterna är att underlag och mer exakta kartor kan produceras med omfattande täckning.

Studier av kostnadseffektivitet kommer att behöva göras i nära samarbete med Naturvårdsverket och HaV för att bedöma potentiella besparingar, eller kostnaden för att lägga till den extra information som kan erhållas från satellitdata jämfört med dagens mätningar och modellering. Ett exempel på kostnadsnyttoanalyser är exempelvis det pågående norska projektet ”Pilotprosjekter for bruk av fjernmåling i overvåkning” (Miljødirektoratet, 2022).

Användning av utbildad personal för insamling, användning och analys av fjärranalys- och geospaciala data

Medan en stor del av tillgängliga EO-data är analysklara, kräver deras omvandling till meningsfull information för intressenter färdigheter som affinitet i maskin-inlärning, bildanalys och visualisering. Denna typ av kompetens kan förvärfvas genom att anställa utbildad personal för den dagliga driften och samarbeta med akademi eller industri i långa och korta projekt.

Väl omhändertagna och underhållna geospaciala databaser

In-situ-data är avgörande för både träning och validering av EO-modeller och därför rekommenderas starkt att HaV och Naturvårdsverket utvecklar standardiserade databaser enligt INSPIRE-direktivet, med information som enkelt kan uppdateras, kopplas samman mellan olika applikationer och är lätt att hantera av maskin-inlärningsalgoritmer som använder dem tillsammans med EO-data.

Kombinera fritt tillgänglig satellit- och flygdata med kompletterande data, exempelvis drönar-data

För att utnyttja EO-informationens fulla potential är en kombination av gratis och billig satellit- och flygdata med exempelvis drönar-data en lämplig väg framåt. Exempelvis kan offentligt tillgängliga grova och medelupplösta satellitdata (dvs. MODIS eller Sentinel-2) användas för att avslöja hotspots av insektsinducerad avlövnings i subalpin björkskog. Med hjälp av drönare kan man därefter noggrannare bedöma skadorna, vilket ger myndigheterna en snabb och robust bedömning av situationen som hjälper till att förhindra ytterligare skador.

Aktörsinvolverande

För att nå operativa nivåer i applikationer som använder fjärranalysdata och därigenom maximera fördelarna för HaV och Naturvårdsverket är myndigheternas och övriga aktörers engagemang avgörande under alla utvecklingsnivåer. Framtida projekt och finansieringsmöjligheter bör innebära en nära styrning av myndigheterna under alla utvecklingsnivåer. Samarbete mellan forskningsinstitutioner, industriella och offentliga partners rekommenderas starkt. Även om kunskapen om

de vetenskapliga och tekniska aspekterna redan finns tillgänglig är det av största vikt att den integreras med de exakta specifikationerna, kraven och behoven hos HaV och Naturvårdsverket

Ökad grad av samverkan mellan myndigheter

Det finns även stora möjligheter att samverka mellan svenska myndigheter för att få ett ökat utbyte av metoder och tillvägagångssätt för att gemensamt ta fram robusta arbetsmetoder vad gäller fjärranalys. Även om denna fråga sträcker sig bortom Naturvårdsverket och HaV är det av avgörande betydelse att myndigheterna förbättrar sina samarbeten när det gäller datadelning, tillgänglighet, transparens och standarder baserade på EU:s INSPIRE-direktiv. En stor del av de potentiella tillämpningarna sträcker sig längre än en enda myndighets behov och kapacitet och kommer att kräva samarbete mellan flera myndigheter för att utveckla och driva en tjänst. NMD är ett lysande exempel på detta. I andra fall kan ett ramverk som utvecklats av och för en specifik applikation snabbt anpassas och justeras för en annan applikation av en annan myndighet. För att underlätta effektiva framsteg och utnyttja den fulla potentialen hos information om riskdelning är det viktigt att det finns ett mer öppet och samarbetsinriktat ramverk mellan relevanta partner. Det finns flera pågående regeringsuppdrag under den nationella datastrategin relevanta för NV och HaV att bevaka, exempelvis Data från satelliter för hållbar utveckling (Rymdstyrelsen).

7. Slutsatser

Fjärranalys är ett viktigt verktyg för att utveckla kunskapen och miljöövervakningen för offentliga myndigheter som HaV och Naturvårdsverket. Tillgängligheten för fjärranalysdata har ökat exponentiellt under det senaste decenniet. Nationella och internationella myndigheter har i allt större utsträckning integrerat fjärranalysdata för mark- och vattenförvaltning och stöd i sina tjänster, inklusive de svenska myndigheterna.

En av de viktigaste förändringarna i tillgången till data och information av hög kvalitet under de senaste åren är lanseringen av satellituppdraget Sentinel och Copernicus tjänster för land- och vattenövervakning. För att utnyttja satellitdatas fulla potential är en kombination av gratis och billig satellit- och flygdata med drönar-data, eller med in-situ-mätningar och modellering, en av de lämpliga vägarna att fortsätta utveckla.

Ny teknik och nya metoder kan effektivisera datainsamlingen och förbättra kunskapsbasen för Naturvårdsverket och HaV. Det finns dock ett behov av att bedöma hur tillgängligheten och användningen av dessa data bäst kan tillämpas för myndigheternas behov. Det är av avgörande betydelse att tydlig, replikerbar datainsamling och applikationer måste utvecklas för en smidig användning av satellitdata för Naturvårdsverket och HaV. Detta kan omfatta automatiska procedurer som minimerar användarens insats under insamlingen av data, lämpliga användargränssnitt, samt möjligheten att effektivt och kontinuerligt uppdatera befintliga modeller och produkter när nya data blir tillgängliga. När behoven för en applikation har specificerats är en kostnadsnyttoanalys avseende användningen av fjärranalysdata absolut nödvändig. Detta är också starkt kopplat till tillgängligheten av data på plats för att träna och validera fjärranalysbaserade modeller.

HaV och Naturvårdsverket behöver ha tillgång till personal som är kunniga inom fjärranalys för att fullt ut kunna utnyttja potentialen hos fjärranalys. Samverkan med andra myndigheter och samarbete med exempelvis akademien och industri, kan bidra till att minska ner uppstartstiden för nya fjärranalystillämpningar. Inom en snar framtid kommer dataplattformen Nationella Rymddatalabbet (Digital Earth Sweden) att göras offentlig, vilket förhoppningsvis kommer att bidra till att myndigheter och forskare kan jobba mer standardiserat med metoder och skript och enklare dela dem med varandra.

Fjärranalys förväntas inte ersätta fältarbete, utan snarare komplettera det. In situ-undersökningar är avgörande för datainsamling och tolkning av resultat från fjärranalysdata. Dagens arbetssätt inom miljöövervakningen kommer att påverkas, eftersom det kommer att behöva anpassas till fjärranalysmetoderna.

Rumslig täckning och frekventa återbesök är två av de stora fördelarna med satellitdata jämfört med observationsmätningar på markytan. Dessutom kan de långa tidsserierna av satellitdata vara ett verktyg för att studera trender bakåt i tiden (förutsatt konsekvent korrigerat av data över tid), likaväl som ett stöd för att prognostiserade (framtida) utveckling.

I denna litteraturgenomgång har vi identifierat viktiga teman för vilka fjärranalysdata är relevanta, såsom övervakning av biologisk mångfald, luftkvalitet, naturresursförvaltning och urbana indikatorer på grön infrastruktur i stadsmiljön.

Satellitmätningar av luftföroreningar och växthusgaser erbjuder en mängd fördelar jämfört med markbaserade instrument, exempelvis uppskattning av föroreningskoncentrationer över stora områden, identifiering av regionala källor till luftföroreningar som påverkar den lokala luftkvaliteten och tillhandahållande av samtidig och kontinuerlig mätning av flera föroreningar.

I dagsläget används inte satellitdata för luftkvalitet eller växthusgaser av Naturvårdsverket, men vi har noterat att användningen av sådana data har ökat kraftigt, inte bara inom forskningsvärlden, utan även av exempelvis myndigheter och organisationer. Dessutom förbättras både metoder och satellitinstrument kontinuerligt. Vi bedömer därför att den potentiella tillämpbarheten av dessa typer av data kommer att öka även för Naturvårdsverket framöver.

Sammanfattningsvis bedömer vi att det på sikt är troligt att kartläggning av luftkvalitet med fjärranalys för vissa luftföroreningar och växthusgaser kan ge ett bra resultat, förenligt med lägre kostnad och i större rumsliga skalor. Utvecklingen på området går snabbt framåt, med ett flertal nya satelliter och instrument som kommer att få stor betydelse för att förbättra övervakningen av luftföroreningar från satelliter, exempelvis med avseende på metan. Satellitmätningar av luftföroreningar behöver dock valideras och kommer därför inte att ersätta behovet av ytobservationer, oavsett vilken typ av applikation och satellitsensor som används.

Det är uppenbart att fjärranalysbilder kan användas för att kartlägga biologisk mångfald (såsom olika skogstyper, flora- och faunaarter) i olika skalor. Fjärranalystillämpningar med öppna satellitdata, kräver dock kompletterande in-situ-data för att initialt träna modellerna. Detta innebär att HaV och Naturvårdsverket behöver producera data som är i) standardiserade och ii) geolokaliserade och iii) tidsmässigt uppdaterade, för att kunna användas i kombination med satellitdata. Vissa forskare har påpekat att satellitdata är underutnyttjade och har stor potential för studier som övervakar biologisk mångfald. Användningen av fjärranalys med medelhög upplösning har sett en omfattande utveckling för att övervaka biologisk mångfald.

Det finns stor potential för miljöövervakning av vattenmassor och kuster med hjälp av den tillgängliga data som finns idag genom bl.a. Copernicus. Flera av de metoder som presenteras i litteraturstudien är redan aktiva och används av myndigheterna. Den största potentialen finns i att använda dessa metoder som redan finns inom fler områden än vad som görs idag. Bevisen i litteraturen har visat att fartygsdetektering är möjlig med hjälp av rymdburna SAR-data.

Övervakning av mikroklimat och modellering av dess påverkan på biota och deras anpassningsförmåga inför klimatförändringar är ett viktigt område under utveckling. Även modellering av ekosystemtjänster och av enskilda hotade eller problemskapande arter är mindre väl utvecklat, men det kommer fler och fler tillämpningar.

När det gäller fjärranalyser i urbana miljöer rekommenderar vi undersökning av flerskalig analys med hjälp av satellitbilder med flera källor med olika upplösningar, i kombination med kraftfulla djupinlärningsalgoritmer (deep learning algorithms) för kartläggning av urban marktäckning och övervakning av förändringar i urban grön infrastruktur samt bedömning av urbaniseringens miljöpåverkan.

Fjärranalys har potential att underlätta för både Naturvårdsverket och HaV att följa upp Sveriges Miljökvalitetsmål, exempelvis vad gäller frisk luft, vattenkvalitet, skogar, odlingslandskapet, fjällandskapet och våtmarker. Övervakning av marktäcke, markanvändning (i bredare kategorier som skog, åker, vatten, eller i smalare som typ av grödor eller skog), förändringar i marktäcke (vid avverkningar, bränning,

planteringar, byggnationer, glaciärvsmältning med mera), trädhöjd och fenologi är välanvänt och välutvecklat även som underlag för modelleringar av habitat och erosionsrisk.

Fjärranalysmetoder använd redan idag för dataproduktion för att stödja övervakning av FN:s globala mål (de så kallade SDG:erna). Utvecklingen av ny teknik går snabbt framåt och exempelvis drönare har utvidgat möjligheterna ytterligare.

Vi rekommenderar följande åtgärder som Naturvårdsverket och HaV kan vidta för att förbättra miljöövervakningen med hjälp av fjärranalysapplikationer:

- Fortsätta att följa utvecklingen inom fjärranalys för Naturvårdsverkets och HaV:s syften.
- Initiera och stödja fortsatt forskning och utveckling:
 - Studier för att utveckla standardiserade operativa rutiner för att välja, analysera och tolka satellitdata.
 - Studier med multiplattform- och multisensorteknik.
 - Svenska studier inom fjärranalysområden som redan framgångsrikt testats av andra internationella myndigheter.
 - Studier om kostnadseffektiviteten av att använda satellitdata som komplement till nuvarande miljöövervakning.
- Användning av utbildad personal för insamling, användning och analys av fjärranalys- och geospatiala data.
- Väl omhändertagna och underhållna geospatiala databaser.
- Kombinera fritt tillgänglig satellit- och flygdata med kompletterande data, exempelvis drönar-data.
- Aktörsinvolverande.
- Ökad grad av samverkan mellan myndigheter.

Källhänvisningar

- AERIS. 2020. *IASI ammonia product guide* [online]. Tillgänglig på: https://iasi.aeris-data.fr/NH3_readme/ [Hämtad 17 september 2022].
- Ahlcrona, E., Giljam, C., & Wennberg, S. 2017. Kartering av kontinuitetsskog i boreal region. *Metria AB på uppdrag av Naturvårdsverket*, 79.
- Ahlcrona, E., Willén, E., Forslund, S., Forslund, M., & Johansson, T. 2000. Satellitdatabaserad förändringsanalys av buskskikt och skog på Öland–användarutvärdering och rekommendationer. G-PUBL-9, Satellus.
- Airbus. 2020. Zephyr: The first stratospheric UAS of its kind [online]. Tillgänglig på: <https://www.airbus.com/defence/uav/zephyr.html> [Hämtad 17 september 2022].
- Ahmed, N., Atzberger, C. & Zewdie, W. 2020. Integration of remote sensing and bioclimatic data for prediction of invasive species distribution in data-poor regions: a review on challenges and opportunities. *Environ Syst Res* 9, 32. doi.org/10.1186/s40068-020-00195-0
- Alagialoglou, Leonidas, m.fl. 2021 “Canopy Height Estimation from Spaceborne Imagery Using Convolutional Encoder-Decoder.” International Conference on Multimedia Modeling. Springer, Cham.
- Aleissae, A.A., Kumar, A., Anwer, R.M., Khan, S., Cholakkal, H., & Xia, G.S. 2022. Transformers in Remote Sensing: A Survey. arXiv preprint arXiv:2209.01206.
- Apituley, A., Pedernana, M., Sneep, M., Veefkind, J.P., Loyola, D. Hasekamp, O., Delgado, A.L. and Borsdorff, T. 2022. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Methane, Royal Netherlands Meteorological Institute, SRON-S5P-LEV2-MA-001
- Aronson, M. F., La Sorte, F. A., Nilon, C. H., Katti, M., Goddard, M. A., Lepczyk, C. A., Warren, P. S., Williams, N. S., Cilliers, S., Clarkson, B. m.fl. 2014. ‘A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers’, *Proceedings of the royal society B: biological sciences* 281(1780), 20133330.
- Ban, Y. 2016. *Multitemporal Remote Sensing. Methods and Applications* (1st ed. 2016.). Springer International Publishing.
- Ban, Y. 2021. Earth Observation in 2040. In report *Spaning mot Rymdteknik 2040, med speciell relevans för försvar och säkerhet*. KTH Space Center
- Ban, Y., Hu, H. & Rangel, I. M. 2010. ‘Fusion of quickbird ms and radarsat sar data for urban land-cover mapping: Object-based and knowledge-based approach’, *International Journal of Remote Sensing* 31(6), 1391–1410.
- Ban, Y., Zhang, P., Nascetti, A., Bevington, A.R. & Wulder, M.A. 2020. Near real-time wildfire progression monitoring with Sentinel-1 SAR time series and deep learning, *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–15.
- Barnes, B. B., Hu, C., Kovach, C., & Silverstein, R. N. 2015. Sediment plumes induced by the Port of Miami dredging: analysis and interpretation using Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 170, 328-339.

- Belward, A.S and Skøien, J.O. 2015. Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, pp. 115–128
- Beringer, J., Moore, C.E., Cleverly, J., Campbell, D.I., Cleugh, H., De Kauwe, M.G. m.fl. 2022. Bridge to the future: Important lessons from 20 years of ecosystem observations made by the OzFlux network. *Global Change Biology*, 28, 3489–3514. [Doi.org/10.1111/gcb.16141](https://doi.org/10.1111/gcb.16141)
- Bjelke, U., Jönsson, C., Ahlcrona, E., Isacson, G., McKie, B. & Olsson, C. 2013. Fjärranalys av skador på al utmed vattendrag och sjöar i södra och västra Sverige – utveckling av metodik och beskrivning av status, *Artdatabanken Rapporterar*:13.
- Blaschke, T. & Hay, G. J. 2001. 'Object-oriented image analysis and scale- space: theory and methods for modeling and evaluating multiscale landscape structure', *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34(4), 22–29.
- Boersma, K. F., Eskes, H. J., Richter, A., De Smedt, I., Lorente, A., Beirle, S. m.fl. 2018. Improving algorithms and uncertainty estimates for satellite NO₂ retrievals: results from the quality assurance for the essential climate variables (QA4ECV) project, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 6651–6678, <https://doi.org/10.5194/amt-11-6651-2018>, 2018.
- Bohlin I., Maltamo, M., Hedenås, H., Lamås, T., Dahlgren, J. & Mehtatalo, L. 2021. Predicting bilberry and cowberry yields using airborne laser scanning and other auxiliary data combined with National Forest Inventory field plot data. *Forest Ecology and Management*, ISSN: 0378-1127, Vol: 502, 119737. doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119737
- Boyle, S. A., Kennedy, C. M., Torres, J., Colman, K., P´erez-Estigarribia, P. E. & de la Sancha, N. U. 2014. 'High-resolution satellite imagery is an important yet underutilized resource in conservation biology', *PLoS One* 9(1), e86908.
- Breidenbach, J., Ellison, D., Petersson, H., Korhonen, K.T., Henttonen, H.M., Wallerman, J., Fridman, J., Gobakken, T., Astrup, R. & Næsset, E. 2022. Harvested area did not increase abruptly—how advancements in satellitebased mapping led to erroneous conclusions. *Annals of Forest Science*, 79:2. doi.org/10.1186/s13595-022-01120-4
- Brown, A., Hayward, T., Timmis, R., Wade, K., Pope, R., Trent, T., Boesch, H. and Guillo, R.B. 2021. Satellite measurements of air quality and greenhouse gases: application to regulatory activities, Chief Scientist's Group report, May 2021, Version SC200001/R, Environment Agency.
- Buchwitz, M., Schneising, O., Reuter, M., Heymann, J., Krautwurst, S., Bovensmann, H. m.fl. 2017. Satellite-derived methane hotspot emission estimates using a fast data-driven method, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 5751–5774, 2017, www.atmos-chem-phys.net/17/5751/2017/doi:10.5194/acp-17-5751-2017
- Campbell, A.D., Fatoyinbo, T., Charles, S.P., Bourgeau-Chavez, L.L., Goes, J., Gomes, H. m.fl.. 2022. A review of carbon monitoring in wet carbon systems using remote Sensing. *Environ. Res. Lett.* 17 025009. doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4d
- Campbell, A. D., Fatoyinbo, T., Charles, S. P., Bourgeau-Chavez, L. L., Goes, J., Gomes, H. m.fl. 2022. A review of carbon monitoring in wet carbon systems using remote sensing. *Environmental Research Letters*.

Ceccherini, G., Duveiller, G., Grassi, G., Lemoine G., Avitabile, V., Pilli, R. and Cescatti, A. 2020. Abrupt increase in harvested forest area over Europe after 2015. *Nature* 583, 72–77. doi.org/10.1038/s41586-020-2438-y

CEOS. 2022. CEOS/ESA Earth Observation Handbook, Tillgänglig på: <http://database.eohandbook.com/> [Hämtad 17 september 2022].

Cerrejón, C., Valeria, O., Marchand, P., Caners, R.T. & Fenton, N.J. 2021. No place to hide: Rare plant detection through remote sensing. *Divers Distrib.* 27: 948– 961. doi.org/10.1111/ddi.13244

Chang, Y.-L. Anagaw, A., Chang, L., Wang, Y.C., Hsiao, C.-Y. and Lee, W.-H. 2019. Ship detection based on yolov2 for sar imagery. *Remote Sensing*, 11(7):786.

Chasmer, L., Cobbaert, D., Mahoney, C., Millard, K., Peters, D., Devito, K. m.fl. 2020a. Remote Sensing of Boreal Wetlands 1: Data Use for Policy and Management. *REMOTE SENSING*, 12(8), 1320. doi-org.ludwig.lub.lu.se/10.3390/rs12081320

Chasmer, L. m.fl. 2020b. Remote sensing of boreal wetlands 2: methods for evaluating boreal wetland ecosystem state and drivers of change, *Remote Sens.*, vol. 12, no. 8, p. 1321.

Chuvienco, E., Mouillot, F., van der Werf, G.R., San Miguel, J., Tanase, M., Koutsias, N., García, M. Yebra, M. Padilla, M., Gitas, I. m.fl. 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225: 45–64.

Cimoli, E., Meiners, K.M., Lund-Hansen, L.C. & Lucieer, V. 2017. Spatial variability in sea-ice algal biomass: an under-ice remote sensing perspective, *Adv. Polar Sci.*, vol. 28, no. 4, pp. 268–296.

Cohen, W.B., Yang, Z. & Kennedy, R. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly landsat time series: 2. timesync—tools for calibration and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(12):2911–2924.

CSO. 2020. “How dark is your sky?” Estimating artificial light in Ireland from satellite imagery, 2015-2019, CSO Frontier Series Output, CSO statistical publication, 19 November 2020, Central Statistics Office, Ireland, <https://www.cso.ie/en/releasesandpublications/fp/fp-ealsi/ealsi/> [Accessed: 2022-09-04]

Cuesta, J., Costantino, L., Beekmann, M., Siour, G., Menut, L., Bessagnet, B., Landi5, T.C., Dufour, G. & Eremenko, M. 2022. Ozone pollution during the COVID-19 lockdown in the spring of 2020 over Europe, analysed from satellite observations, in situ measurements, and models, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 4471–4489, 2022. <https://doi.org/10.5194/acp-22-4471-2022>

Dittrich, Andreas, m.fl. 2019. “Modelling distributions of rove beetles in mountainous areas using remote sensing data.” *Remote Sensing* 12.1, 80.

Dubovik, O., Li, Z., Mishchenko, M.I., Tanré, D., Karol, Y., Bojkov, B. m.fl. 2019. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 224 (2019) 474–511, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.11.024>

Duncan. B.N. m.fl., 2014. Satellite data of atmospheric pollution for US air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid, *Atmos. Environ.*, vol. 94, pp. 647–662.

- Envall, A., & Isaksson, I. 2012. Ålgräsutbredning (*Zostera* sp.) i Västra Götalands län sommaren 2008. Länsstyrelsen i Västra Götalands län. Rapport, 58.
- Environment Agency UK, 2022a. www.data.gov.uk/dataset/1707e638-6a2d-48f5-a534-1db0b240cc37/casi-and-lidar-habitat-map [Hämtad 2022-09-02]
- Environment Agency UK, 2022b. www.data.gov.uk/dataset/227ab487-e8f2-4cbb-b26a-9e6d3b662265/national-lidar-programme-vegetation-object-model [Hämtad 2022-09-02]
- Environmental Information Data Centre UK, 2022a. www.data.gov.uk/dataset/042e702f-9614-48dd-a5a0-bb25a0502ae3/land-cover-map-2020-10m-classified-pixels-gb [Hämtad 2022-09-02]
- Environmental Information Data Centre UK, 2022b. www.data.gov.uk/dataset/3bb0c0b4-825c-40ef-b3a0-58c69ff6be50/peatland-vegetation-field-and-laboratory-measurements-of-carbon-dioxide-fluxes-and-spectral-reflectance [Hämtad 2022-09-02]
- ESA. 2017. Sentinel-5 Precursor Calibration and Validation Plan for the Operational Phase, Issue 1, Revision 1, 26 pp., available at: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2474724/Sentinel-5P-Calibration-and-Validation-Plan.pdf> [Accessed: 220930]
- ESA, 2019. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/05/ESA-developed_Earth_observation_missions
- ESA, 2020. Copernicus Open Access Hub [online]. Tillgänglig på: <https://scihub.copernicus.eu/> [Hämtad 17 september 2022].
- ESA, 2022. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/applications/maritime-monitoring>
- EC, 2022. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>
- EU, 2022. <https://www.copernicus.eu/en/access-data/dias>
- Estoque, R.C. 2020. A Review of the Sustainability Concept and the State of SDG Monitoring Using Remote Sensing. *Remote Sens.* 2020, 12, 1770; doi:10.3390/rs12111770
- Fioletov, V., McLinden, C. A., Griffin, D., Theys, N., Loyola, D. G., Hedelt, P. m.fl. 2020. Anthropogenic and volcanic point source SO₂ emissions derived from TROPOMI on board Sentinel-5 Precursor: first results. *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 5591–5607. Retrieved from <https://acp.copernicus.org/articles/20/5591/2020/>
- FN, 2022. unstats.un.org/sdgs/dataportal [Hämtad 2022-09-02]
- Forestry Commission, 2022. www.data.gov.uk/dataset/4f73f738-5c3f-4b40-8a8e-0ccea-715de2f/national-forest-inventory-woodland-map-2019-gb [Hämtad 2022-09-02]
- Furberg, D. & Ban, Y. 2012. 'Satellite monitoring of urban sprawl and assessment of its potential environmental impact in the greater toronto area between 1985 and 2005', *Environmental management* 50(6), 1068–1088.
- Furberg, D. & Ban, Y. 2021. 'Satellite monitoring of urbanization and environmental impacts in stockholm, sweden, through a multiscale approach', *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis, and Modeling in the Urban Environment* pp. 217–244.
- Furberg, D., Ban, Y. & Mörtberg, U. 2020. Monitoring urban green infrastructure changes and impact on habitat connectivity using high-resolution satellite data, *Remote Sens.*, vol. 12, no. 18, p. 3072.

Gamba, P. & Herold, M. 2009. Global mapping of human settlement: experiences, datasets, and prospects, CRC Press.

Gaudel, A., Cooper, O.R., Ancellet, G., Barret, B., Boynard, A., Burrows, J.P. m. fl. 2018. Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day distribution and trends of tropospheric ozone relevant to climate and global atmospheric chemistry model evaluation. *Elem Sci Anth*, 6: 39. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.291>

Gholizadeh, A., Saberioon, M., Ben-Dor, E. & Borůvka, L. 2018. Monitoring of selected soil contaminants using proximal and remote sensing techniques: Background, state-of-the-art and future perspectives, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, DOI: 10.1080/10643389.2018.144771

Gomes, V.C.F.; Queiroz, G.R.; Ferreira, K.R. 2020. An Overview of Platforms for Big Earth Observation Data Management and Analysis. *Remote Sensing*, 12, 1253. <https://doi.org/10.3390/rs12081253>

Gov.UK, 2022. naturalengland.blog.gov.uk/2021/02/19/our-eyes-in-the-sky-the-moorland-change-map/ [Hämtad 2022-09-02]

Guo, X., Wang, R., Pan, D., Zondlo, M.A., Clarisse, L., Van Damme, M. m.fl. 2021. Validation of IASI satellite ammonia observations at the pixel scale using in situ vertical profiles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033475. <https://doi.org/10.1029/2020JD033475>

Haarpaintner, J., & Davids, C. 2020. Satellite Based Intertidal-Zone Mapping from Sentinel-1&2. Sluttrapport: Fjernmålingsbasert kartlegging og overvåking av tidevannssonen. Mars 2020, REPORT 2-2020 NORCE Klima

Haas, J. & Ban, Y. 2016. 'Mapping and monitoring urban ecosystem services using multitemporal high-resolution satellite data', *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 10(2), 669–680.

Haas, J. & Ban, Y. 2018. 'Urban land cover and ecosystem service changes based on sentinel-2a msi and landsat tm data', *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 11(2), 485–497.

Hafter, S., Ban, Y., Nascetti A. and Azizpour, H. 2022. Unsupervised Domain Adaptation for Global Urban Extraction using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data. *Remote Sensing of Environment*. Volume 280, 113192, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113192>.

Hahn, N., Wester, K., & Gunnarsson, U. 2021. Satellitbaserad övervakning av våtmarker: Nationell slutrapport första omdrevet, Naturvårdsverket Rapport 6950.

Hahn, N., Wester, K., Hedvall, T., Backe, S., Gunnarson, U., & Kellner, O. 2014. Satellitbaserad övervakning av våtmarker-Kartering av vegetation på öppna myrar. Brockman Geomatics Sweden AB, 2014-02-11.

Hakimdavar, R., Hubbard, A., Policelli, F., Pickens, A., Hansen, M., Fatoyinbo, T. m.fl. 2020. Monitoring water-related ecosystems with earth observation data in support of Sustainable Development Goal (SDG) 6 reporting. *Remote Sensing*, 12(10), 1634.

Harnesk, T. 2022. www.nyteknik.se/premium/patrulldronare-ska-skydda-akrarna-fran-vilt-med-ljud-och-ljus-7037089 [Hämtad 2022-09-04]

Hartfield, K. A., Landau, K. I. & Van Leeuwen, W. J. 2011. 'Fusion of high resolution aerial multispectral and lidar data: land cover in the context of urban mosquito habitat', *Remote Sensing* 3(11), 2364–2383.

Hav. 2020. Fysisk karaktärisering av avrinningsområden – Landskapets fysiska styrning av vattendrag och sjöar. Havs och vattenmyndigheten, Rapport 2020:16.

Hay, G., Marceau, D., Dube, P. & Bouchard, A. 2001. 'A multiscale framework for landscape analysis: object-specific analysis and upscaling', *Landscape Ecology* 16(6), 471–490.

Hedblom, M., Hedenås, H., Blicharska, M., Adler, S., Knez, I., Mikusinski, G., Svensson, J., Sandström, S., Sandström, P. & Wardle, D.A. 2019. Landscape perception: linking physical monitoring data to perceived landscape properties. *Landscape Research*, Volume 45, Issue 2.

Helfenstein, I. S., Schneider, F. D., Schaepman, M. E. & Morsdorf, F. 2022. 'Assessing biodiversity from space: Impact of spatial and spectral resolution on trait-based functional diversity', *Remote Sensing of Environment* 275, 113024.

Herold, M., Couclelis, H. & Clarke, K.C. 2005. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change, *Computers, environment and urban systems* 29(4), 369–3

Holmen, 2022. www.holmen.com/granbarkborre/ [Hämtad 2022-11-10]

Hu, H., Hasekamp, O., Butz, A., Galli, A., Landgraf, J., Aan de Brugh, J., Borsdorff, T., Scheepmaker, R., and Aben, I. 2016. The operational methane retrieval algorithm for TROPOMI, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 5423–5440, <https://doi.org/10.5194/amt-9-5423-2016>, 2016.

Ialongo, I., Hakkarainen, J., Kivi, R., Anttila, P., Krotkov, N.A., Yang, K., Li, C., Tukiainen, S., Hassinen, S. & Tamminen, J. 2015. Comparison of operational satellite SO₂ products with ground-based observations in northern Finland during the Icelandic Holuhraun fissure eruption, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 2279–2289, doi:10.5194/amt-8-2279-2015

Ibrahim, S. Landa, M. Pešek, O. Brodský, L. & Halounová, L. 2022. Machine Learning-Based Approach Using Open Data to Estimate PM_{2.5} over Europe. *Remote Sens.* 2022, 14, 3392. <https://doi.org/10.3390/rs14143392>

Jacob, D.J., Varon, D.J., Cusworth, D.H., Dennison, P.E., Frankenberg, C., Gautam, R. m.fl. 2022. Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 9617–9646, 2022, <https://doi.org/10.5194/acp-22-9617-2022>.

JNCC, 2022a. data.jncc.gov.uk/data/c650f50d-092a-4d15-8c66-5e95b70c22ef/land-cover-and-habitat-mapping.pdf [Hämtad 2022-09-02]

JNCC, 2022b. data.jncc.gov.uk/data/c650f50d-092a-4d15-8c66-5e95b70c22ef/bare-soil.pdf [Hämtad 2022-09-02]

Jongman, R.H.G., Múcher, C.A., Bunce, R.G.H., Lang, M. & Sepp, K. 2019. A Review of Approaches for Automated Habitat Mapping and their Potential Added Value for Biodiversity Monitoring Projects. *Journal of Landscape Ecology*, vol.12, no.3, pp.53–69. doi.org/10.2478/jlecol-2019-0015

Karimi, N., Tsun Wai Ng, K., Richter, A. 2022. Development and application of an analytical framework for mapping probable illegal dumping sites using nighttime light imagery and various remote sensing indices, *Waste Management*, Volume 143, pp. 195-205, ISSN 0956-053X, doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.031.

Karlson, M. 2012. Assessing GIS-based indicator methodology for analyzing the physical vulnerability of water and sanitation infrastructure. *Water and Environmental Studies*, Department of Thematic Studies, Linköping University, ISRN: LIU-TEMAV/MPSSD-A--12/014--SE

Kranjčić, N., Medak, D., Župan, R. & Rezo, M. 2019. 'Machine learning methods for classification of the green infrastructure in city areas', *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8(10), 4.

Kutser, T., Hedley, J., Giardino, C., Roelfsema, C., & Brando, V. E. 2020. Remote sensing of shallow waters—A 50 year retrospective and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111619.

Kutser, T., Metsamaa, L., Vahtmäe, E., & Aps, R. 2007. Operative monitoring of the extent of dredging plumes in coastal ecosystems using MODIS satellite imagery. *Journal of Coastal Research*, 180-184.

Kuzmin, A., Korhonen, L., Kivinen, S., Hurskainen, P., Korpelainen, P., Tanhuanpää, T., Maltamo, M., Vihervaara, P. & Kumpula, T. 2021. Detection of European Aspen (*Populus tremula* L.) Based on an Unmanned Aerial Vehicle Approach in Boreal Forests. *Remote Sens.* 13, 1723. doi.org/10.3390/rs13091723

Kylling, A., Stebel, K., Fjæraa, A.M., Schneider, P. 2021. Fjernmåling av metanutslipp ved bruk av Sentinel-5P: en mulighetsstudie, NILU rapport 09/2021.

Labib, S. & Harris, A. 2018. 'The potentials of sentinel-2 and landsat-8 data in green infrastructure extraction, using object based image analysis (obia) method', *European Journal of Remote Sensing* 51(1), 231–240.

Lakes, T. & Kim, H.-O. 2012. 'The urban environmental indicator "biotope area ratio" – an enhanced approach to assess and manage the urban ecosystem services using high resolution remote-sensing', *Ecological Indicators* 13(1), 93– 103.

Lang, S., Blaschke, T., Kothencz, G. & Hölbling, D. 2018. Urban green mapping and valuation, in 'Urban Remote Sensing', CRC Press, pp. 287–308.

Lange, K., Richter, A., and Burrows, J. P. 2022. Variability of nitrogen oxide emission fluxes and lifetimes estimated from Sentinel-5P TROPOMI observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 2745–2767, https://doi.org/10.5194/acp-22-2745-2022.

Lauvaux, T., Giron, C., Mazzolini, M., d'Aspremont, A., Duren, R., Cusworth, D., Shindell, D. and Ciais, P. 2022. Global assessment of oil and gas methane ultra-emitters, *Science*, Vol 375, Issue 6580, pp. 557-561, DOI: 10.1126/science.abj43

Ledang, A. B., Harvey, E. T., & Marty, S. 2019. Performance and applications of satellite remote sensing data for water quality in Norwegian lakes. Evaluation of MERIS, Sentinel-2 and Sentinel-3 products. *NIVA-rapport*.

Lefebvre, Gaëtan, m.fl. 2019. "Introducing WIW for detecting the presence of water in wetlands with landsat and sentinel satellites." *Remote sensing* 11.19, 2210.

- Li, J., Qu, C. and Shao, J. 2017. Ship detection in sar images based on an improved faster r-cnn. In 2017 SAR in Big Data Era: Models, Methods and Applications (BIGS-ARDATA), pages 1–6. IEEE.
- Li, Y., Yuan, S., Fan, S., Song, Y., Wang, Z., Yu, Z., Yu, Q. & Liu, Y. 2021. Satellite Remote Sensing for Estimating PM_{2.5} and Its Components. *Curr Pollution Rep* 7, 72–87. doi.org/10.1007/s40726-020-00170-4
- Liang, S., Wang, D., He, T. & Yu, Y. 2019. Remote sensing of earth's energy budget: synthesis and review, *Int. J. Digit. Earth*, vol. 12, no. 7, pp. 737–780.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. & Chipman, J.W. 2015. *Remote sensing and image interpretation* (7. ed.). Wiley.
- Linehan, T. 2021. DGINS 2021 – Official Statistics from Satellite imagery, Central Statistics Office, Ireland, https://dgins2021.stat.gov.pl/images/presentations/Tim_Linehan_Official_Statistics_from_Satellite_Imagery.pdf
- Lines, E.R., Fisher, F.J., Owen, H.J.F & Jucker, T. 2022. The shape of trees: Reimagining forest ecology in three dimensions with remote sensing, *Journal of Ecology*, 110, 1730-1745, DOI: 10.1111/1365-2745.13944.
- Lingard, J., Scarbrough, T., Grebot, B., Karagulian, F., Sykes, D., Loader, A., Stacey, B., Willis, P., Stratton, S., Bell, M., Jones, R. and Monks, P. 2015. Investigating the Feasibility of Innovative Technologies to Improve Air Quality Monitoring over the Medium to Long Term Stage 1 and Stage 2 Report, AQ0954, Ref: ED60468 – Final Version, 30 October 2015.
- Liu, L., Zhang, X., Wong, A. Y. H., Xu, W., Liu, X., Li, Y., Mi, H., Lu, X., Zhao, L., Wang, Z., Wu, X., and Wei, J. 2019. Estimating global surface ammonia concentrations inferred from satellite retrievals, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 12051–12066, <https://doi.org/10.5194/acp-19-12051-2019>.
- Liu, T. & Yang, X. 2015. 'Monitoring land changes in an urban area using satellite imagery, gis and landscape metrics', *Applied Geography* 56, 42–54.
- Liu, X., Huang, Y., Xu, X., Li, X., Li, X., Ciais, P., Lin, P., Gong, K., Ziegler, A. D., Chen, A. m.fl. 2020. 'High-spatiotemporal-resolution mapping of global urban change from 1985 to 2015', *Nature Sustainability* 3(7), 564–570.
- Long, T., Widjaja, S., Wirajuda, H. and Juwana, S. 2020. Approaches to combatting illegal, unreported and unregulated fishing. *Nature Food*, 1(7):389–391, 2020.
- Long 'ep' e, N., Hajduch, G., Ardianto, R. de Joux, R., Nhunfat, B., Marzuki, M.I., Fablet, R. m.fl. 2018. Completing fishing monitoring with spaceborne vessel detection system (vds) and automatic identification system (ais) to assess illegal fishing in indonesia. *Marine pollution bulletin*, 131:33–39.
- Lu, X., Jacob, D. J., Wang, H., Maasackers, J. D., Zhang, Y., Scarpelli, T. R. m.fl. 2022. Methane emissions in the United States, Canada, and Mexico: evaluation of national methane emission inventories and 2010–2017 sectoral trends by inverse analysis of in situ (GLOBALVIEWplus CH₄ ObsPack) and satellite (GOSAT) atmospheric observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 395–418, <https://doi.org/10.5194/acp-22-395-2022>, 2022.
- Luoto, Miska, Mikko Kuussaari, & Tuuli Toivonen. 2002. "Modelling butterfly distribution based on remote sensing data." *Journal of Biogeography* 29.8, 1027-1037.

- Löfvenhaft, K., Runborg, S. & Sjögren-Gulve, P. 2004. 'Biotope patterns and amphibian distribution as assessment tools in urban landscape planning', *Landscape and urban planning* 68(4), 403–427.
- Ma, L., Li, M., Ma, X., Cheng, L., Du, P. & Liu, Y. 2017. 'A review of supervised object-based land-cover image classification', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 130, 277–293.
- Mairota, P., Cafarelli, B., Didham, R. K., Lovergine, F. P., Lucas, R. M., Nagen-dra, H., Rocchini, D. & Tarantino, C. 2015. 'Challenges and opportunities in harnessing satellite remote-sensing for biodiversity monitoring', *Ecological Informatics* 30, 207–214.
- Maltamo, M., Packalen, P. & Kangas, A. 2021. From comprehensive field inventories to remotely sensed wall-to-wall stand attribute data — a brief history of management inventories in the Nordic countries. *Can. J. For. Res.* 51: 257–266. [dx.doi.org/10.1139/cjfr-2020-0322](https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0322)
- Mandal, A., Majumder, A., Dhaliwal, S.S., Toor, A.S., Mani, P.K., Naresh, R.K., Gupta, R.K. & Mitran, T. 2020. Impact of agricultural management practices on soil carbon sequestration and its monitoring through simulation models and remote sensing techniques: A review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, DOI: 10.1080/10643389.2020.1811590
- Marais, E.A., Pandey, A.K., Van Damme, M., Clarisse, L., Coheur, P.-F., Shephard, M.W. m.fl. 2021. UK ammonia emissions estimated with satellite observations and GEOS-Chem. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2021JD035237. <https://doi.org/10.1029/2021JD035237>
- Mathieu, R., Freeman, C. & Aryal, J. 2007. 'Mapping private gardens in urban areas using object-oriented techniques and very high-resolution satellite imagery', *Landscape and urban planning* 81(3), 179–192.
- McClain, C.R. 2009. A decade of satellite ocean color observations. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1(1), 19–42.
- Metria. 2022. Användarstöd: Framtida Potentiella Lövskogar, Metria, 22-04-30.
- Miljødirektoratet. 2022. Pilotprosjekter for bruk av fjernmåling i overvåkning – Miljødirektoratet samarbeider med Norsk Romsenter gjennom Copernicus-programmet. (<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/overvaking-arealplanlegging/miljoovervaking/overvakingprogrammer/basisovervaking/fjernmaling/>) [Hämtad 22-11-11].
- Minang, P. A., Duguma, L. A., Alemagi, D. & van Noordwijk, M. 2015. 'Scale considerations in landscape approaches', *Climate-Smart Landscapes: Multifunctionality in Practice*; Minang, PA, van Noordwijk, M., Freeman, OE, Mbow, C., de Leeuw, J., Catacutan, D., Eds pp. 121–133.
- MohanRajan, S.N., Loganathan, A. & Manoharan, P. 2020. Survey on Land Use/Land Cover (LU/LC) change analysis in remote sensing and GIS environment: Techniques and Challenges. *Environ Sci Pollut Res* 27, 29900–29926. doi.org/10.1007/s11356-020-09091-7
- Momeni, R., Aplin, P. & Boyd, D. S. 2016. 'Mapping complex urban land cover from spaceborne imagery: The influence of spatial resolution, spectral band set and classification approach', *Remote Sensing* 8(2), 88.

- Morton, R.D.; Marston, C.G.; O'Neil, A.W.; Rowland, C.S. 2021. Land Cover Map 2020 (10m classified pixels, GB). NERC EDS Environmental Information Data Centre. <https://doi.org/10.5285/35c7d0e5-1121-4381-9940-75f7673c98f7>
- Mugiraneza, T., Nascetti, A. & Ban, Y. 2019. 'Worldview-2 data for hierarchical object-based urban land cover classification in kigali: integrating rule-based approach with urban density and greenness indices', *Remote Sensing* 11(18), 2128.
- Mutuku, F., Bayoh, M., Hightower, A., Vulule, J., Gimnig, J., Mueke, J., Amimo, F. & Walker, E. 2009. 'A supervised land cover classification of a western kenya lowland endemic for human malaria: associations of land cover with larval anopheles habitats', *International journal of health geographics* 8(1), 1–13.
- Myint, S. W., Gober, P., Brazel, A., Grossman-Clarke, S. & Weng, Q. 2011. 'Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery', *Remote sensing of environment* 115(5), 1145–1161.
- Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J. P., Jongman, R. H., Tarantino, C., Adamo, M. & Mairota, P. 2013. 'Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats', *Ecological Indicators* 33, 45–59.
- Nair, A.A. & Yu, F. 2020. Quantification of Atmospheric Ammonia Concentrations: A Review of Its Measurement and Modeling, *Atmosphere* 2020, 11, 1092; doi :10.3390/atmos11101092
- Natural England, 2022. publications.naturalengland.org.uk/publication/5699825585881088 [Hämtad 2022-09-02]
- Naturvårdsverket 2019b. Nationella marktäckedata 2018 – Teknisk rapport. Projektion SWEREF99TM. Naturvårdsverket, Utgåva 1.0, 2019-08-19.
- Naturvårdsverket. 2011. GIS-baserade metoder för att kartlägga fiskars livsmiljöer i grunda havsområden. Rapport 6427 maj 2011.
- Naturvårdsverket. 2019. Landskapsplanering av skog – för biologisk mångfald och ett varierat skogsbruk. Rapport 6909 DECEMBER 2019
- NCMRWF. 2019. National center for medium-range weather Forecasts, 2019 report.
- Oppla, 2022a. oppla.eu/monitoring-natural-capital-lessons-national-habitat-monitoring-uk [Hämtad 2022-09-02]
- Oppla, 2022b. oppla.eu/product/19777 [Hämtad 2022-09-02]
- Palmer, P.I., Feng, L., Lunt, M.F., Parker, R.J., Bösch, H., Lan, X., Lorente, A., Borsdorff, T. 2021 The added value of satellite observations of methane for understanding the contemporary methane budget. *Phil. Trans. R. Soc. A* 379: 20210106. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0106>
- Palmer, P.I., O'Doherty, S., Allen, G., Bower, K., Bösch, H., Chipperfield, M.P. m.fl. 2018. A measurement-based verification framework for UK greenhouse gas emissions: an overview of the Greenhouse gAs Uk and Global Emissions (GAUGE) project, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 11753–11777, 2018, <https://doi.org/10.5194/acp-18-11753-2018>
- Paolo, F., Lin, T., Gupta, R., Goodman, B., Patel, N., Kuster, D. Kroodsma, D. and Dunnmon. J. 2022. xview3-sar: Detecting dark fishing activity using synthetic aperture imagery. arXiv preprint arXiv:2206.00897.

- Parthasarathy, K.S.S. & Deka, P.C. 2019. Remote sensing and GIS application in assessment of coastal vulnerability and shoreline changes: a review, *ISH J. Hydraul. Eng.*, pp. 1–13.
- Parviainen, Miia, Miska Luoto, & Risto K. Heikkinen. 2009. “The role of local and landscape level measures of greenness in modelling boreal plant species richness.” *Ecological Modelling* 220.20, 2690-2701.
- Pauleit, S., Ambrose-Oji, B., Andersson, E., Anton, B., Buijs, A., Haase, D., Elands, B., Hansen, R., Kowarik, I., Kronenberg, J. m.fl. 2019. ‘Advancing urban green infrastructure in europe: Outcomes and reflections from the green surge project’, *Urban Forestry & Urban Greening* 40, 4–16.
- Persson, M., Lindberg, E. & Reese, H. 2018. “Tree species classification with multi-temporal Sentinel-2 data.” *Remote Sensing* 10.11, 1794.
- Pettersson, L.H., Bertino L. & Johannessen, J.A. 2020. Copernicus marine tjenester og Miljødirektoratets Økokyst- og Havforsuringsprogrammer M-1873:2020, The Nansen Environmental and Remote Sensing Center på uppdrag av Miljødirektoratet.
- Pettorelli, N., Laurance, W. F., O’Brien, T. G., Wegmann, M., Nagendra, H. & Turner, W. 2014. ‘Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges’, *Journal of Applied Ecology* 51(4), 839–848.
- Pope, R.J., Kelly, R., Marais, E.A., Graham, A.M., Wilson, C., Harrison, J.J., Moniz, S.J.A., Ghalaieny, M., Arnold, S.R., and Chipperfield, M.P. 2022. Exploiting satellite measurements to explore uncertainties in UK bottom-up NOx emission estimates, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 4323–4338, <https://doi.org/10.5194/acp-22-4323-2022>.
- Potts, D.A., Ferranti, E.J.S., Timmis, R., Brown, A.S. & Vande Hey, J.D. 2021. Satellite Data Applications for Site-Specific Air Quality Regulation in the UK: Pilot Study and Prospects. *Atmosphere* 2021, 12, 1659. <https://doi.org/10.3390/atmos12121659>
- Powers, Ryan P., m.fl. 2013. “A remote sensing approach to biodiversity assessment and regionalization of the Canadian boreal forest.” *Progress in Physical Geography* 37.1, 36-62.
- Putra, A.N. & Nita, I. 2020. Reliability of using high-resolution aerial photography (red, green and blue band) for detecting available soil water in agricultural land. *J. Degrad. Min. Land Manage.* 7(3): 2221-2232, DOI: 10.15243/jdmlm. 2020.073.2221.
- QA4ECV. 2019a. Quality Assurance for Essential Climate Variables – What is QA4ECV? [online]. Tillgänglig på: <http://www.qa4ecv.eu/> [Hämtad 17 september 2022].
- QA4ECV. 2019b. Quality Assurance for Essential Climate Variables – QA4ECV Essential Climate Variables [online]. Tillgänglig på: <http://www.qa4ecv.eu/ecvs> [Hämtad 17 september 2022].
- Ramboll. 2021. Analys – Förutsättningar för ett utvecklat Nationellt rymddatalabb. Ramboll.
- Randin, C.F. m.fl. 2020. Monitoring biodiversity in the Anthropocene using remote sensing in species distribution models,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 239, p. 111626.
- Randin, C.F., Ashcroft, M.B., Bolliger, J., Cavender-Bares, J., Coops, N.C., Dullinger, S. 2020. Monitoring biodiversity in the Anthropocene using remote sensing in species distribution models. *Remote Sensing of Environment*, Volume 239, 111626, ISSN 0034-4257, doi.org/10.1016/j.rse.2019.111626

- Ray, A.M., Hossack, B.R., Gould, W.R., Patla, D.A., Spear, S.F., Klaver, R.W. m.fl. 2022. Multi-species amphibian monitoring across a protected landscape: Critical reflections on 15 years of wetland monitoring in Grand Teton and Yellowstone national parks. *Ecological Indicators* 135, 108519. doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108519
- Recio, M. R., Mathieu, R., Hall, G. B., Moore, A. B. & Seddon, P. J. 2013. 'Landscape resource mapping for wildlife research using very high resolution satellite imagery', *Methods in Ecology and Evolution* 4(10), 982–992.
- Relekar H. and Shanmugam, P. 2021. Transfer learning based ship classification in sentinel-1 images incorporating scale variant features. *Advances in Space Research*, 68(11):4594–4615.
- Roy, P.S., Ramachandran, R.M., Paul, O., Thakur, P.K., Ravan, S., Behera, M.D., Sarangi, C., Kanawade, V.P. 2022. Anthropogenic Land Use and Land Cover Changes—A Review on Its Environmental Consequences and Climate Change. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing (August 2022)* 50(8):1615–1640, doi.org/10.1007/s12524-022-01569-w
- Rural Payments Agency UK, 2022. www.data.gov.uk/dataset/be5d88c9-acfb-4052-bf6b-ee9a416cfe60/crop-map-of-england-crome-2020 [Hämtad 2022-09-02]
- Salloum, H., Sutin, A. and Pollara, A. 2018. Detecting illegal fishing activity with acoustic technology: Passive acoustic methods help uscg fight illegal fishing. *Coast Guard Journal of Safety & Security at Sea, Proceedings of the Marine Safety & Security Council*, 75(1).
- Sawaya, K. E., Olmanson, L. G., Heinert, N. J., Brezonik, P. L. & Bauer, M. E. 2003. 'Extending satellite remote sensing to local scales: land and water resource monitoring using high-resolution imagery', *Remote sensing of Environment* 88(1-2), 144–156.
- Scheibenreif, L., Mommert, M & Borth, D. 2022. Toward Global Estimation of Ground-Level NO2 Pollution With Deep Learning and Remote Sensing, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 60, doi:10.1109/TGRS.2022.3160827
- Schmidt, A. m.fl., 2015. Satellite detection, long-range transport, and air quality impacts of volcanic sulfur dioxide from the 2014--2015 flood lava eruption at Bárðarbunga (Iceland),” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 120, no. 18, pp. 9739–9757.
- Schmitt, M., Prexl, J., Ebel, P., Liebel, L., & Zhu, X. X. 2020. Weakly supervised semantic segmentation of satellite images for land cover mapping--challenges and opportunities. arXiv preprint arXiv:2002.08254.
- Schneider, R., Vicedo-Cabrera, A.M., Sera, F., Masselot, P., Stafoggia, M., de Hoogh, K., Kloog, I., Reis, S., Vieno, M. & Gasparrini, A. 2020. A Satellite-Based Spatio-Temporal Machine Learning Model to Reconstruct Daily PM2.5 Concentrations across Great Britain, *Remote Sens.* 2020, 12, 3803; doi:10.3390/rs12223803.
- Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Vanselow, S., Bovensmann, H., and Burrows, J. P. 2020. Remote sensing of methane leakage from natural gas and petroleum systems revisited, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 9169–9182, https://doi.org/10.5194/acp-20-9169-2020.
- Scottish Government SpatialData.gov.scot, 2022. www.data.gov.uk/dataset/911c87c4-a0d3-4bb8-9089-f7657980113e/scotland-habitat-and-land-cover-map-2020 [Hämtad 2022-09-02]

- Shackelford, A. K. & Davis, C. H. 2003. 'A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high-resolution multispectral data over urban areas', *IEEE Transactions on GeoScience and Remote sensing* 41(10), 2354–2363.
- Shi, T., Guo, L., Chen, Y., Wang, W., Shi, Z., Li, Q. & Wu, G. 2018. Proximal and remote sensing techniques for mapping of soil contamination with heavy metals, *Applied Spectroscopy Reviews*, DOI: 10.1080/05704928.2018.1442346
- Siłuch, M., Bartmiński, P., Zglobicki, W. 2022. Remote Sensing in Studies of the Growing Season: A Bibliometric Analysis. *Remote Sens.* 14, 1331. doi.org/10.3390/rs14061331
- Skogsstyrelsen, 2022. kartor.skogsstyrelsen.se/kartor/?startapp=skador [Hämtad 2022-09-02]
- Someya, Y., Imasu, R., Shiomi, K. & Saitoh, N. 2020. Atmospheric ammonia retrieval from the TANSO-FTS/GOSAT thermal infrared sounder. *Atmos. Meas. Tech.* 2020, 13, 309–321. doi:10.5194/amt-13-309-2020.
- Statistics Canada. 2021. Writing a Satellite Imaging Pipeline, Twice: A Success Story,. <https://www.statcan.gc.ca/en/data-science/network/satellite-imaging>, [Accessed: 2022-09-04]
- Sun, K., Cady-Pereira, K., Miller, D.J., Tao, L., Zondlo, M.A., Nowak, J.B., Neuman, J.A., Mikoviny, T., Müller, M., Wisthaler, A. m.fl. 2015. Validation of TES ammonia observations at the single pixel scale in the San Joaquin Valley during DISCOVER-AQ. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015, 120, 5140–5154. doi:10.1002/2014jd022846.
- Svensson, J., Mikusiński, G., & Bengt Gunnar, J. 2019. Det boreala skogslandskapets gröna infrastruktur, *Naturvårdsverket Rapport 6910*.
- Szymankiewicz, K., Kaminski, J.W. & Struzewska, J. 2021. Application of Satellite Observations and Air Quality Modelling to Validation of NO_x Anthropogenic EMEP Emissions Inventory over Central Europe. *Atmosphere* 2021, 12, 1465. <https://doi.org/10.3390/atmos12111465>
- Tarantino, Cristina, m.fl. 2019. "Ailanthus altissima mapping from multi-temporal very high resolution satellite images." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 147, 90-103.
- Tarantino, Cristina, m.fl. 2021. Intra-annual sentinel-2 time-series supporting grassland habitat discrimination." *Remote Sensing* 13.2, 277.
- Tello, M., López-Martínez, T. and Mallorqui, J.J. 2005. A novel algorithm for ship detection in sar imagery based on the wavelet transform. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 2(2): 201–205.
- Thapa, S., Garcia Millan, V. E., & Eklundh, L. 2021. Assessing forest phenology: A multi-scale comparison of near-surface (UAV, spectral reflectance sensor, phenocam) and satellite (MODIS, sentinel-2) remote sensing. *Remote Sensing*, 13(8), [1597]. <https://doi.org/10.3390/rs13081597>
- Tomaselli, Valeria, Giuseppe Veronico, & Maria Adamo. 2021. "Monitoring and Recording Changes in Natural Landscapes: A Case Study from Two Coastal Wetlands in SE Italy." *Land* 10.1, 50.

- Touzi, R., Charbonneau, T., Hawkins, R. and Vachon, P. 2004. Ship detection and characterization using polarimetric sar. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3):552–559.
- Tsagatakis, I., Richardson, J., Evangelides, C., Pizzolato, M., Pearson, B., Passant, N., Pommier, M. & Otto, A. 2022. UK Spatial Emissions Methodology: A report of the National Atmospheric Emission Inventory 2020.
- Tullback, K., Kilnäs, M., & Schönfeldt, I. 2001. *Fysisk störning av stränder: metodstudier för övervakning av exploateringsgraden*. Länsstyrelsen. Hav 2020:16
- Turner, W., Rondinini, C., Pettorelli, N., Mora, B., Leidner, A. K., Szantoi, Z., Buchanan, G., Dech, S., Dwyer, J., Herold, M. m.fl. 2015. 'Free and open- access satellite data are key to biodiversity conservation', *Biological Conservation* 182, 173–176.
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J. & James, P. 2007. 'Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: A literature review', *Landscape and urban planning* 81(3), 167–178.
- Törnqvist, O., Gilljam, C., & Rosengren, M. 2017. En operationell metod för detektion och avgränsning av muddringar med hjälp av satellitdata: Arbetsrapport inom biogeografisk uppföljning och projektet Fysisk påverkan i svenska kustvatten. Metria AB, 2017-11-28.
- Udali, Alberto, Emanuele Lingua, & Henrik J. Persson. 2021. "Assessing Forest Type and Tree Species Classification Using Sentinel-1 C-Band SAR Data in Southern Sweden." *Remote Sensing* 13.16, 3237.
- UKCEH, 2022. catalogue.ceh.ac.uk/documents/017313c6-954b-4343-8784-3d61aa-6e44da [Hämtad 2022-09-12]
- UN-CEBD. 2017. Earth Observations for Official Statistics Satellite Imagery and Geospatial Data Task Team report, https://unstats.un.org/bigdata/task-teams/earth-observation/UNGWG_Satellite_Task_Team_Report_WhiteCover.pdf
- UN-CEBD. 2019. In-depth review of satellite imagery / earth observation technology in official statistics, Economic Commission for Europe, ECE/CES/2019/16, https://unece.org/DAM/stats/documents/ece/ces/2019/ECE_CES_2019_16-1906490E.pdf
- UN-CEBD. 2022. UN Big Data, Task Team of the UN Committee of Experts on Big Data and Data Science for Official Statistics, webpage, <https://unstats.un.org/big-data/task-teams/earth-observation/index.cshtml>, [Accessed 22-09-23]
- UCS. 2022. Union of Concerned Scientists (UCS), UCS Satellite Database
- USGS, 2021. The Landsat Program. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>
- Van Damme, M., Clarisse, L., Franco, B., Sutton, M.A., Erisman, J.W. m.fl. 2021. Global, regional and national trends of atmospheric ammonia derived from a decadal (2008–2018) satellite record, *Environ. Res. Lett.* 16, 055017, doi.org/10.1088/1748-9326/abd5e0
- Van Damme, M., Clarisse, L., Whitburn, S., Hadji-Lazaro, J., Hurtmans, D., Clerbaux, C., Coheur, P.F. 2018. Industrial and agricultural ammonia point sources exposed," *Nature*, vol. 564, no. 7734, pp. 99–103. doi:10.1038/s41586-018-0747-1.

- Van Damme, M.V., Erisman, J.W., Clarisse, L., Dammers, E., Whitburn, S., Clerbaux, C., Dolman, A.J. & Coheur, P.F. 2015. Worldwide spatiotemporal atmospheric ammonia (NH₃) columns variability revealed by satellite. *Geophys. Res. Lett.* 2015, 42, 8660–8668. doi:10.1002/2015gl065496.
- Van Damme, M., Whitburn, S., Clarisse, L., Clerbaux, C., Hurtmans, F. & Coheur, P.-F. 2017. Version 2 of the IASI NH₃ neural network retrieval algorithm: near-real-time and reanalysed datasets, *Atmospheric Measurement Techniques*, 10, 4905–4914. <https://doi.org/10.5194/amt-10-4905-2017>
- Varon, D.J., Jacob, D.J., McKeever, J., Jervis, D., Durak, B.O.A., Xia, Y. and Huang, Y. 2018. Quantifying methane point sources from fine-scale satellite observations of atmospheric methane plumes, *Atmos. Meas. Tech.*, 11, 5673–5686, 2018, <https://doi.org/10.5194/amt-11-5673-2018>
- Vázquez-Navarro, M., Mannstein, H. and Kox, S. 2015. Contrail life cycle and properties from 1 year of MSG/SEVIRI rapid-scan images, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 8739–8749, 2015 www.atmos-chem-phys.net/15/8739/2015/ doi:10.5194/acp-15-8739-2015
- Wang, L., Li, C., Ying, Q., Cheng, X., Wang, X., Li, X., Hu, L., Liang, L., Yu, L., Huang, H. m.fl. 2012. 'China's urban expansion from 1990 to 2010 determined with satellite remote sensing', *Chinese Science Bulletin* 57(22), 2802–2812.
- Wang, X. & Yang, W. 2019. Water quality monitoring and evaluation using remote sensing techniques in China: A systematic review, *Ecosystem health and sustainability*, vol 5 no 21, pp. 47-56
- Wang, Y. 2020. *Terrestrial ecosystems and biodiversity*. Second edition. CRC Press, 2020. ISBN 1138333913
- Wang, Y., Ali, M.A., Bilal, M., Qiu, Z., Mhawish, A., Almazroui, M., Shahid, S., Islam, M.N., Zhang, Y. & Haque, M.N. 2021a. Identification of NO₂ and SO₂ Pollution Hotspots and Sources in Jiangsu Province of China. *Remote Sens.* 2021, 13, 3742. <https://doi.org/10.3390/rs13183742>
- Wang, R. & Gamon, J.A. 2019. Remote sensing of terrestrial plant biodiversity. *Remote Sensing of Environment* 231: 111218.
- Wang, Y., Albrecht, C.M., Braham, N. A.A., Mou, L., & Zhu, X.X. 2022. Self-supervised learning in remote sensing: A review. *arXiv preprint arXiv:2206.13188*.
- Warner, J.X., Wei, Z., Strow, L.L., Dickerson, R.R. & Nowak, J.B. 2016. The global tropospheric ammonia distribution as seen in the 13-year AIRS measurement record,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 16, no. 8, pp. 5467–5479.
- Wei, X., Chang, N.-B., Bai, K. & Gao, W. 2020. Satellite remote sensing of aerosol optical depth: advances, challenges, and perspectives, *Critical reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 50, NO 16, 1640-1725. doi.org/10.1080/10643389.2019.1665944
- Williams, M.A. & McHenry, M.T. 2020. The Increasing Need for Geographical Information Technology (GIT) Tools in Geoconservation and Geotourism. *Geoconservation Research Volume 3:1*, sid. 17-32. e-ISSN: 2645-4661. DOI: 10.30486/gcr.2020.1901102.1019

- WMO. 2022. OSCAR – Observing Systems Capability Analysis and Review Tool, World Meteorological Organization 2011–2022. [online] Tillgänglig på: <https://space.oscar.wmo.int/> [Hämtad 17 september 2022]
- Wramner, P., Wester, K., Backe, S., Gunnarsson, U., Hahn, N., & Alsam, S. 2015. Tavvavuoma: Inledande dokumentation inom övervakningsprogram för Sveriges palsmyrar. Länsstyrelsens rapportserie 20/2015.
- Xiao J., Chevallier, F., Gomez, C., Guanter, L., Hicke, J.A., Huete, A.R. m.fl. 2019. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: A review of advances over 50 years, *Remote Sensing of Environment*, Volume 233, 111383, ISSN 0034-4257, doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383
- Zellweger F., De Frenne, P., Lenoir, J., Rocchini, D. & Coomes, D. 2019. Advances in Microclimate Ecology Arising from Remote Sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, April 2019, Vol. 34, No. 4. doi.org/10.1016/j.tree.2018.12.012
- Zeng, L., Wardlow, B.D., Xiang, D., Hu, S. & Li, D. 2020. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 237, 111511, ISSN 0034-4257. doi.org/10.1016/j.rse.2019.111511.
- Zhang, L., Han, W., Niu, Y., Chávez, J.L., Shao, G. & Zhang, H. 2021c. Evaluating the sensitivity of water stressed maize chlorophyll and structure based on UAV derived vegetation indices, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 185, 106174, ISSN 0168-1699, doi.org/10.1016/j.compag.2021.106174.
- Zhang, Y., Li, Z., Bai, K., Wei, Y., Xie, Y., Zhang, Y. m.fl. 2021a. Satellite remote sensing of atmospheric particulate matter mass concentration: Advances, challenges, and perspectives, *Fundamental Research*, V1, I3, May 2021, 240-258. doi.org/10.1016/j.fmre.2021.04.007
- Zhu, X.X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G. S., Zhang, L., Xu, F. & Fraundorfer, F. 2017. Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(4), 8–36.
- Zhu, L., Henze, D.K., Cady-Pereira, K.E., Shephard, M.W., Luo, M., Pinder, R.W., Bash, J.O. & Jeong, G.R. 2013. Constraining U.S. ammonia emissions using TES remote sensing observations and the GEOS-Chem adjoint model. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013, 118, 3355–3368. doi:10.1002/jgrd.50166.
- Ågren, A.M., Larson, J., Paul, S.S., Laudon, H., Lidberg, W. 2021. Use of multiple LIDAR-derived digital terrain indices and machine learning for high-resolution national-scale soil moisture mapping of the Swedish forest landscape, *Geoderma*, 404. Article 115280, 10.1016/j.geoderma.2021.115280

Appendix A: Exempel på kartläggning av enskild art – Skador av granbarkborre

Den europeiska granbarkborren (*Ips typographus* [L.]) har dödat mer än 150 miljoner m³ skog under de senaste 50 åren i Europa (Schroeder & Cocos 2018). Det gör den europeiska barkborren till den ekonomiskt mest destruktiva skadeinsekten i barrskogar (Biedermann m.fl. 2019). Något som förvärrar situationen är att antalet generationer granbarkborrarna hinner med per sommar har ökat på grund av klimatförändringen, och förutspås öka ännu mer (Jakoby m.fl. 2019, Potterf m.fl. 2019). I Sverige är läget inte lika illa som i Centraleuropa, men granbarkborrar förstörde 3–4 miljoner m³ svensk skog år 2018, och året därpå ökade mängden angripen skog i Sverige till 7 miljoner m³. Den stora ökningen av angripen skogsareal berodde på en generation barkborrar mer än det tidigare normala, i augusti 2018, på grund av den extremt varma torra sommaren det året. Granbarkborrar orsakar mest skada på granskog (*Picea abies*) i södra Sverige (Huo m.fl., 2021).

Granbarkborrar kan bekämpas genom att angripna träd identifieras och tas bort medan larverna fortfarande är inne i stammen. Tidigt under angreppet syns dock inte den minskade vitaliteten hos trädkronorna på angripna träd. Huo m.fl. (2021) delade in barkborreangrepp i tre stadier efter möjligheten att upptäcka dem i det synliga spektrumet: (1) grön fas: den tidiga perioden utan onormala synliga färger i trädkronorna under barkborrens kolonisering; (2) röd fas: en period då kronorna blir gula eller rödaktiga med avsevärt minskat vatteninnehåll i barren (och granbarkborren redan har hunnit spridas till nya träd) och till sist (3) grå fas: när barrträd gradvis tappar barren efter att de har dött. Avsaknaden av färgförändring under granbarkborrens kolonisering gör det svårt att upptäcka en attack i tid, om man utgår från det synliga spektrumet. Med data i våglängder bortom det visuella spektrumet kan fjärranalys kartlägga förändringar orsakade av barkborrar innan attacken blir synlig i trädkronan (Huo m.fl., 2021).

Forskning om upptäckt av skadedjursangrepp på träd har bedrivits sedan 1960-talet (Puritch 1981, Tanase m.fl. 2018, Wulder m.fl. 2006), med hjälp av fjärranalysdata från satelliter, inklusive Landsat (Coops m.fl. 2006, Meddens m.fl. 2013), QuickBird (Coops m.fl. 2006) och Hyperion (White m.fl. 2007). Flygbilder har också använts (Meddens m.fl. 2011), liksom LiDAR-data (Coops m.fl. 2009). Generellt visar dessa studier på svårigheten att upptäcka skalbaggar i ett tidigt skede (när träden fortfarande är gröna). Å andra sidan är vattenstress inducerad av attacken tydligt detekterbar även i detta skede (Puritch 1981, Wulder m.fl. 2006, Wulder m.fl. 2009). Studier med fokus på europeiska granbarkborrar har kommit till liknande slutsatser (Abdullah m.fl. 2019, Immitzer & Atzenberger 2014, Klouček m.fl. 2019). Nyliga studier har undersökt tidig upptäckt av attacker från europeiska granbarkborrar med hjälp av sensorer som Sentinel-2, TerraSAR-X, luftburen laserskanning (ALS) och markbaserad laserskanning (TLS). Huo m.fl. (2021) fann att ”gröna attacker” från första generationens europeiska granbarkborrar vanligtvis uppträder från maj

till juli, medan övergången från gröna till röda stadier brukar ske under augusti. Tidpunkten för den ”gröna attacken” beror både på när träden först angrips (det förekommer ju flera generationer granbarkborrar under en och samma sommar) och på klimatzonen. En ”grön attack” kan ofta inte upptäckas i tid för att angreppet ska kunna bekämpas. I centrala och norra Europa är sommarens första generation granbarkborrar vuxna och lämnar trädet i slutet av juni (Abdullah m.fl. 2018, Yang 2019). Tidig upptäckt av attacker i maj och juni är därför avgörande, eftersom endast då kan angripna träd tas bort med de larver och puppor de innehåller.

För identifiering av granbarkborresattacker – inklusive attacker i tidigt skede – från optiska satellitbilder, används ofta Near Infrared (NIR)-baserade index, som Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) och Normalized Difference Water Index (NDWI). NIR-baserade index och data baserat på det röda bandet har dock visat inkonsekventa trender i olika studier med olika observationsskalor (laboratorieexperiment jämfört med RapidEye-bilder) (Abdullah m.fl. 2018, Ortiz m.fl. 2013). Klouček m.fl. (2019) drog slutsatsen att detektion av barkborreangrepp baserat på det röda bandet presterar bättre jämfört med indexbaserad detektion inklusive NIR-bandet. Å andra sidan verkar de röda och kortvågiga infraröda (SWIR) banden vara mer robusta för olika observationsskalor (Abdullah m.fl. 2018, Klouček m.fl. 2019, Minařík & Langhammer 2016, Näsi m.fl. 2015). Huo m.fl. (2021) visade dessutom att de röda och kortvågiga infraröda (SWIR) banden ger den bästa separerbarheten mellan friska och stressade träd för en testplats i södra Sverige med Sentinel-2-bilder som tagits mellan april och oktober 2018 och 2019. På dessa fynd föreslog de indexet Normalized Distance Red & SWIR (NDRS) för tidig upptäckt av skogsstress från europeisk granbarkborreangrepp (Huo m.fl. 2021).

Nyare forskning har också undersökt radarbilder för att upptäcka skogsskador orsakade av insekter (Hollaus & Vreugdenhil 2019). Grunden bakom radarbaserad insektsskadedetektering är att C-bandsradardata är känsliga för vegetationsstruktur (Dostálová m.fl. 2018, Frison m.fl. 2018, Veloso m.fl. 2017) och fukthalt (Paloscia m.fl. 2013, Wang m.fl. 1998). Vegetationsstruktur och fukthalt kan båda i sin tur vara indikatorer på skogsskador. Flera studier har undersökt detta för att visa på insektsskador (Kaasalainen m.fl. 2010, Ranson m.fl. 2003, Tanase m.fl. 2018, Xue m.fl. 2018), men endast Tanase m.fl. (2018) kunde klassificera attacker baserat på L-band ALOS PALSAR-bilder med hjälp av tröskelvärden. Dessutom drogs slutsatsen att radarbackscatter-information från Sentinel-1 inte ger en bra separerbarhet jämfört med de synliga och NIR Sentinel-2-banden. Slutligen bidrog Sentinel-2-banden endast lite till prestandan om de lades till den multispektrala informationen som inhämtats av Sentinel-2 (Huo m.fl. 2021). Även om det finns uppenbara nackdelar med användningen av radardata för att upptäcka barkborresattacker, bör det noteras att radarsensorer, till skillnad från optiska sensorer, i stort sett inte påverkas av väder eller atmosfäriska förhållanden. Följaktligen kan täta tidsserier erhållas från radarsatelliter, medan optiska tidsserier ofta missar observationer på grund av moln eller molnskuggor. Den bättre datatillgänglighet som radarsatelliter erbjuder kan därför bidra till att tidigt upptäcka barkborreangrepp, om optiska data inte är tillgängliga.

Referenser

- Abdullah, H., Darvishzadeh, R., Skidmore, A. K., Groen, T. A. & Heurich, M. 2018. 'European spruce bark beetle (*ips typographus*, l.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties', *International journal of applied earth observation and geoinformation* 64, 199–209.
- Abdullah, H., Skidmore, A. K., Darvishzadeh, R. & Heurich, M. 2019. 'Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of european spruce bark beetle (*ips typographus*, l.) compared with landsat-8', *Remote sensing in ecology and conservation* 5(1), 87–106.
- Biedermann, P. H., Müller, J., Grégoire, J.-C., Gruppe, A., Hagge, J., Hammerbacher, A., Hofstetter, R. W., Kandasamy, D., Kolarik, M., Kostovcik, M. m.fl. 2019. 'Bark beetle population dynamics in the anthropocene: challenges and solutions', *Trends in ecology & evolution* 34(10), 914–924.
- Coops, N. C., Johnson, M., Wulder, M. A. & White, J. C. 2006. 'Assessment of quickbird high spatial resolution imagery to detect red attack damage due to mountain pine beetle infestation', *Remote Sensing of Environment* 103(1), 67–80.
- Coops, N. C., Varhola, A., Bater, C. W., Teti, P., Boon, S., Goodwin, N. & Weiler, M. 2009. 'Assessing differences in tree and stand structure following beetle infestation using lidar data', *Canadian Journal of Remote Sensing* 35(6), 497–508.
- Dostálová, A., Wagner, W., Milenković, M. & Hollaus, M. 2018. 'Annual seasonality in sentinel-1 signal for forest mapping and forest type classification', *International Journal of Remote Sensing* 39(21), 7738–7760.
- Frison, P.-L., Fruneau, B., Kmiha, S., Soudani, K., Dufrene, E., Le Toan, T., Koleček, T., Villard, L., Mougín, E. & Rudant, J.-P. 2018. 'Potential of sentinel-1 data for monitoring temperate mixed forest phenology', *Remote Sensing* 10(12), 2049.
- Hollaus, M. & Vreugdenhil, M. 2019. 'Radar satellite imagery for detecting bark beetle outbreaks in forests', *Current Forestry Reports* 5(4), 240–250.
- Huo, L., Persson, H. J. & Lindberg, E. 2021. 'Early detection of forest stress from european spruce bark beetle attack, and a new vegetation index: Normalized distance red & swir (ndrs)', *Remote Sensing of Environment* 255, 112240.
- Immitzer, M. & Atzberger, C. 2014. 'Early detection of bark beetle infestation in norway spruce (*picea abies*, l.) using worldview-2 data', *Photogramm. Fernerkund. Geoinf* 2014(351367), 73.
- Jakoby, O., Lischke, H. & Wermelinger, B. 2019. 'Climate change alters elevational phenology patterns of the european spruce bark beetle (*ips typographus*)', *Global change biology* 25(12), 4048–4063.
- Kaasalainen, S., Hyypä, J., Karjalainen, M., Krooks, A., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M. & Jaakkola, A. 2010. Comparison of terrestrial laser scanner and synthetic aperture radar data in the study of forest defoliation, na.
- Klouček, T., Komárek, J., Surový, P., Hrach, K., Janata, P. & Vašíček, B. 2019. 'The use of uav mounted sensors for precise detection of bark beetle infestation', *Remote Sensing* 11(13), 1561.

Meddens, A. J., Hicke, J. A. & Vierling, L. A. 2011. 'Evaluating the potential of multi-spectral imagery to map multiple stages of tree mortality', *Remote Sensing of Environment* 115(7), 1632–1642.

Meddens, A. J., Hicke, J. A., Vierling, L. A. & Hudak, A. T. 2013. 'Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date landsat imagery', *Remote Sensing of Environment* 132, 49–58.

Minařík, R. & Langhammer, J. 2016. 'Use of a multispectral uav photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics.', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences* 41.

Näsi, R., Honkavaara, E., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Tanhuanpää, T. & Holopainen, M. 2015. 'Using uav-based photogrammetry and hyperspectral imaging for mapping bark beetle damage at tree-level', *Remote Sensing* 7(11), 15467–15493.

Ortiz, S. M., Breidenbach, J. & Kändler, G. 2013. 'Early detection of bark beetle green attack using terrasars-x and rapideye data', *Remote Sensing* 5(4), 1912–1931.

Paloscia, S., Pettinato, S., Santi, E., Notarnicola, C., Pasolli, L. & Reppucci, A. 2013. 'Soil moisture mapping using sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation', *Remote Sensing of Environment* 134, 234–248.

Potterf, M., Nikolov, C., Kočická, E., Ferencík, J., Mezei, P. & Jakuš, R. 2019. 'Landscape-level spread of beetle infestations from windthrown-and beetle-killed trees in the non-intervention zone of the tatra national park, slovakia (central europe)', *Forest Ecology and Management* 432, 489–500.

Puritch, G. S. 1981. *Nonvisual remote sensing of trees affected by stress. A review*, Pacific Forest Research Centre.

Ranson, K., Kovacs, K., Sun, G. & Kharuk, V. 2003. 'Disturbance recognition in the boreal forest using radar and landsat-7', *Canadian journal of remote sensing* 29(2), 271–285.

Schroeder, M. & Cocco, S. D. 2018. 'Performance of the tree-killing bark beetles *Ips typographus* and *Pityogenes chalcographus* in non-indigenous lodgepole pine and their historical host norway spruce', *Agricultural and forest entomology* 20(3), 347–357.

Tanase, M. A., Aponte, C., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T. & Heurich, M. 2018. 'Detection of windthrows and insect outbreaks by l-band sar: A case study in the bavarian forest national park', *Remote Sensing of Environment* 209, 700–711.

Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Planells, M., Dejoux, J.-F. & Ceschia, E. 2017. 'Understanding the temporal behavior of crops using sentinel-1 and sentinel-2-like data for agricultural applications', *Remote sensing of environment* 199, 415–426.

Wang, Y., Day, J. L. & Davis, F. W. 1998. 'Sensitivity of modeled c-and l- band radar backscatter to ground surface parameters in loblolly pine forest', *Remote Sensing of Environment* 66(3), 331–342.

White, J., Coops, N., Hilker, T., Wulder, M. & Carroll, A. 2007. 'Detecting mountain pine beetle red attack damage with eo-1 hyperion moisture indices', *International Journal of Remote Sensing* 28(10), 2111–2121.

Wulder, M. A., Dymond, C. C., White, J. C., Leckie, D. G. & Carroll, A. L. 2006. 'Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities', *Forest Ecology and management* 221(1-3), 27–41.

Wulder, M. A., White, J. C., Carroll, A. L. & Coops, N. C. 2009. 'Challenges for the operational detection of mountain pine beetle green attack with remote sensing', *The Forestry Chronicle* 85(1), 32–38.

Xue, J., Yu, L., Lin, Q., Liu, G. & Huang, H. 2018. 'Using sentinel-1 multi-temporal insar data to monitor the damage degree of shoot beetle in yunnan pine forest', *Remote Sensing for Land & Resources* (4), 108–114.

Yang, S. 2019. 'Detecting bark beetle damage with sentinel-2 multi-temporal data in sweden', *Student thesis series INES*

Appendix B: Wildfire monitoring and environmental impacts

B.1 Wildfire detection and monitoring

Wildfires are growing in intensity and frequency around the world, they are expanding their reaches into the arctic. The boreal forests of the Northern Hemisphere are the grandest carbon sinks of the world, and a significant increase in wildfires could cause disequilibrium in the Northern boreal forest's capability as a carbon sink and cause significant impacts on the biodiversity and regional or global climate. Wildfires may affect the structure, composition, and functions of boreal forests, playing a complex role in reshaping forests. Climate scientists suggest the growing incidence and intensity of wildfire has a high correlation with the global temperature rising. Climate change contributes to more and bigger fires, and in turn, wildfires are expected to impact climate changes by emitting massive amounts of greenhouse gases. Therefore, it is urgent to develop robust methods for utilizing satellite image time series to detect active wildfire and monitor wildfire progression in a cost-effective way.

Active wildfire detection is mostly based on thermal remote sensing, including MODIS, VIIRS, AVHRR, and Sentinel-3 Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) coarse-resolution satellites (Stroppiana m.fl., 2000; Giglio m.fl., 2008; Wooster m.fl., 2012; Schroeder m.fl., 2014; Giglio m.fl., 2016). Table 1 shows the main sensors currently used for active fire detection, and the middle-infrared (3–4 μm) and thermal-infrared (10–12 μm) bands of these sensors are widely used for thermal anomaly detection and generating active fire products. The Active fire products from various satellite systems have been extensively used to support fire management systems, introduced as input in air quality and carbon emission estimation. Medium-resolution satellites like Landsat-8 and Sentinel-2 are now providing open-access optical imagery that can supplement present active fire products with the ability of medium resolution global land surface monitoring (Csizsar and Schroeder, 2008; Schroeder m.fl., 2016; Murphy m.fl., 2016; Kumar and Roy, 2018). Currently, the best compromise between spatial and temporal resolution is provided by the operational active fire product derived from the 375m VIIRS bands on board the National Polar-Orbiting Partnership (NPP) satellite since 2013 and on board the NOAA-20 since 2017. Most of the algorithms developed in the last few years are mainly based on the use of contextual tests to detect thermal anomalies that rely on the determination of the background temperature and the analysis of the strong contrast in brightness temperature between the potential fire pixel and the low background temperature (Chuvieco m.fl., 2019).

Table B1. Main sensors currently used for active fire detection (Clmvioco et al. 2020).

Sensor	MSG-11 SEVIRI	Advanced Himawari Imager-8	GOES-16 ABI	GOES-17 ABI	Terra and Aqua MODIS	NPP and NOAA-20-VIIRS
Spatial resolution	3 km	2 km	2 km	2 km	250–500–1 000 m	375–750 m
Spectral bands	12	16	16	16	2–5–29	5–16
Temporal resolution	5–15 min	10 min	5–15 min	5–15 min	12 h	12 h
Radiometric resolution (bits)	10	14	14	14	10	10
Launched on	2015	2014	2016	2018	2002	2012
Operational full disk	Feb-2018	July 2015	Dec-2018	Feb-2019		
Satellite type	Geostationary	Geostationary	Geostationary	Geostationary	Polar-orbiting	Polar-orbiting
Centered at	0°	140.7°	75.2°	137.2°		
Operational fire product (spatial resolution)	Yes (3 km)	No	Yes (2 km)	No	Yes (1 000 m)	Yes (375 m)

Most of available global burn area products are based on optical sensors that provide very high temporal resolution (one or more images per day), and coarse spatial resolution (greater than 250m), such as MODIS MDC64A1, FireCCI50 and NASA’s MCD45A1 burn area products. To cope with the great diversity of worldwide fire conditions, vegetation types, and topography, global burn area mapping algorithms were expected to be robust and spatially adaptable. The local-adapted and physical based approaches are the most common two for global burn area mapping in the last years. With the improvements in cloud computing power and the free access to Landsat and Sentinel-2 data, the focus has been shifted towards developing regional or national products based on medium resolution optical data, in recent years. In 2008, the public release of the Landsat archived data opened a new era for exploiting medium resolution data for regional or even global retrieval of vegetation changes, booming the long-term time series detection algorithms. Time series segmentation and time series decomposition are the widely used two techniques for time series forest disturbance detection. Kennedy *m.fl.* proposed a trajectory-based forest disturbance detection and labelling method based on dense time series of Landsat TM and ETM+ images, which takes all time series images into consideration, and use idealized temporal trajectory of spectral bands to detect and characterize changes (Kennedy *m.fl.*, 2007). Based on trajectory segmentation strategy, two other methods were developed, i.e., Vegetation Change Tracker (VCT) (Huang *m.fl.*, 2009, 2010) and Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery (LandTrendr) (Kennedy *m.fl.*, 2010; Cohen *m.fl.*, 2010). Based on the recognition that change is not simply a contrast between conditions at two points in time, but rather a continual process operating at both fast and slow rates on landscapes, both of VCT and LandTrendr divide annual time series of spectral responses into piecewise segments, and then detect the changes between segments and exploit the characteristics of segments to delineate forest disturbances (Chuvioco *m.fl.*, 2019).

SAR data has been frequently exploited for burned area mapping over tropical areas characterized by persistent cloud cover (Verhegghen *m.fl.*, 2016; Lohberger *m.fl.*, 2018) or at high latitudes where low sun angles hindered optical observations

(Chuvieco m.fl., 2019). For other climate zones or geographic regions, SAR data also has the potential to increase the temporal resolution for tracking more progressions, and map burned areas of on-going wildfires, when optical observation could be disabled by heavy smoke cover. Although monitoring forest change with SAR has been demonstrated on an operational scale, the interpretation of SAR signal over vegetation changes is often more ambiguous than optical observations. SAR-based studies assess the fire impacts mainly from the backscatter coefficient (Reiche m.fl., 2018), the interferometric coherence (Tanase m.fl., 2010b; Jung m.fl., 2017), or polarimetric properties (estimated by polarimetric decomposition techniques) (Engelbrecht m.fl., 2017). However, both sensor characteristics and scene properties may affect SAR backscattering mechanism, which has been investigated in these studies (Tanase m.fl., 2010a,b, 2015; Imperatore m.fl., 2017; Vreugdenhil m.fl., 2018; Tanase m.fl., 2019). Tanase m.fl. investigated X-, C-, and L-band co/cross-polarization SAR backscatter for burn severity and studied the effects of local topography and weather conditions on the SAR backscatter response. It was observed that the sensitivity of radar backscatter coefficients to burn severity increases with the increase of radar wavelength, and the local incidence angle strongly affects the backscatter coefficients from burned areas at all wavelengths and polarizations (Tanase m.fl., 2010a). The relationship between burn severity and interferometric coherence was also investigated, and it was found that the association strength between coherence and burn severity was strongest for images acquired under stable, dry environmental conditions.

Instead of using optical or radar sensors alone, integrating different EO sensors has shown great potential in strengthening the discrimination of burned pixels and reducing both omission and commission errors (Chuvieco m.fl., 2019). The most widely used synergistic approach is the combined use of thermal anomalies (active fire alerts) and changes in optical reflectance (Roy m.fl., 2019) or SAR backscatter (Reiche m.fl., 2018). Multi-sensor approaches that combined SAR and optical sensor have clearly demonstrated improved land cover mapping accuracy (Park m.fl., 2018; Onojeghuo m.fl., 2018; Ienco m.fl., 2019), however the use of SAR-optical time series for detecting forest changes has been rather limited to date and leaves loss of potential to explore (Reiche, 2015). SAR-optical fusion approaches have the potential to increase the observation frequency, which could help to decrease the delay of detecting change events and increase the forest disturbance mapping accuracy.

B.2 Environmental Impacts of Wildfires

Increasing wildfire frequency and severity may shift boreal forests from carbon sinks to carbon sources and amplify climate warming (Loehman, 2020; Walker m.fl., 2019). Analysis indicates that fuel characteristics are important drivers of wildfire carbon emissions across boreal forest. The boreal region of North America is an important global carbon reservoir that is warming twice as fast as the global average, associated with intensified fire weather, increase wildfire burned areas, and shorter fire intervals and more severe fires. Large, severe forest fires consume substantial amounts of above- and below-ground biomass and can cause source-sink shifts in carbon exchange with the atmosphere. Climate driven changes in fire emission may serve as a strong, positive feedback to further warming and fire activity. Many forest types, including boreal forests, are fire prone and fire adapted,

meaning that fire is an integral and predictable part of their ecological functioning. The amount and rate of carbon release from a fire are directly related to fuel combustion, which depends on the fire's extent and severity as well as pre-disturbance site conditions and productivity. In fire-adapted ecosystems and in the absence of major shifts in climate and disturbance, carbon losses from fire are balanced by carbon accumulation in live and dead vegetation and soils when integrated over long time periods. The Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) provides up-to-date information on the location, intensity, and emissions of wildfires around the globe through its Global Fire Assimilation System (GFAS), which is based on the measurements from instruments on satellites that can detect the fire radiative power (FRP), i.e., the heat signal of active fires. The information on the physical size of wildfires hasn't been considered in estimating wildfire carbon emissions since there is no global burned areas products available in near real-time. Predictions of future fire emissions and feedbacks to the global climate system thus require an understanding of the variables that influence fuel combustion, including top-down (that is, climate- and weather-related) variables, bottom-up (that is, fuel- and environment-related) variables and their interactions. These relationships are complex and do not operate independently; for example, climate warming and drying are linked to widespread tree mortality and changes in fuel structure and availability. such conditions can also increase fuel flammability. Over long timespans (decades to centuries), climate patterns influence forest composition, age, structure, and rates of fuel accumulation and decomposition, all of which affect, and are affected by, wildfires (Loehman, 2020).

Wildfire regime is changing rapidly in response to human induced climate change across the globe, varying across space and time, and it potentially leads to novel environmental conditions. The rapid shift may alter ecosystem status in unpredictable and non-linear ways. Boreal forests occupy a diversity of tree stand ages, physical structure, and successional trajectories and species compositions, however, larger, more frequent, and more severe fires in boreal forests will affect the distribution and availability of late-successional communities and alter habitat for boreal biodiversity that rely on these areas. Increased fire frequency in parts of western North America's boreal forests would decrease the availability of spruce-dominated late-successional habitats, which may transition to deciduous forests, shrubs, or even to a grassland state in some portions of the region (Palm m.fl., 2022). Bushfire is a common phenomenon in Australia. Around more than 3 billion native vertebrates excluding invertebrates comprise about 143 million mammals, 2.46 billion reptiles, 181 million birds, 51 million frogs were burnt out by bushfires of 2020 in Australia stated by the World wildlife Found Australia (Van Eeden m.fl., 2020). Various types of extinct varieties plants are found in the forest of Australia. Scientists feared that some of them would be destroyed from their natural habitat. It occurs in a small area, but in other places the endangered animals remain safe but in the present fires spread through all part of their habitat which create the possibility of dying out of some endangered species.

Wildfire has hazardous effects on the soil quality and structure, reducing the availability of some important nutrients like N, P and S and the water holding capability. During wildfire, temperature of surface soil can be reached up to 900 °C. High temperature totally burns the surface organic layers causes the organic material mineralized or volatilized during oxidation. It enhances the excessive soil erosion from the upper layer of the forest land. Mulching with natural cover or litter and

other organic material of surface of the soil prevent the excessive soil erosion rates. Fires burn the cover of the surface soil and enhance soil erosion (Haque m.fl., 2021). The temperature changes for the future climate are predicted to be the most pronounced in boreal and arctic regions, affecting the stability of permafrost and fire dynamics of these areas. Fires can affect soil microbiome (archaea, bacteria, fungi, and protists) directly via generated heat, whereas fire-altered soil properties have an indirect effect on soil micro-biome. Fires usually decrease microbial biomass and alter microbial community composition. These changes can take decades to recover to pre-fire states. As the fire occurrence times are expected to change in the future, and the fire return intervals, intensity, and severity are expected to increase in boreal environments, the fire-related changes in the soil microbiome, including its recovery and resilience, are inevitable. The first rain after wildfire would carry harmful chemicals, and various pollutants into streams, rivers, and large bodies of water, which may destroy the balance of water ecosystems. Post-fire flash flood is of great impendence for water bodies. These floods contain heavy metal from ash and killed under water vegetation, living organisms. Wildfire reduces the drinkable water sources. Fire ash contains nitrogen and phosphorous. Excess concentration of these nutrients causes the growth of cyanobacteria which reduces quality of water, along with bad taste, odder and harmful chemicals also. The ash also blows through the ocean and creates the same problem. Algae take oxygen in the water for growing itself and assuage dissolved oxygen after their death and during decomposition. It may throttle aquatic animals and other marine life and hampers to biodiversity. After a burn, stream flow can transport solid and dissolved materials that degrade water quality (Haque m.fl., 2021).

Wildfire produces various toxic substances, and the smoke has harmful outcomes in human inhalation organs, and it may lead to both physical and mental health problems among the residents and fire fighters years after the events. The increasing wildfires are posing a threat to the boreal forests, which affects the air quality and human health to many hundreds of thousands of kilometers away. Fire emission factors may differ because of varying fire intensities, fuels, and combustion efficiencies. Beyond emissions, transport, and transformations of smoke from wildfires and prescribed burns are also distinct, resulting in differences in health impacts associated with each type of fire. While wildfires expose large populations to severe air pollution episodically, prescribed fire smoke can impact local populations with lower concentrations over longer time intervals (Navarro m.fl., 2018). Air quality analyses that incorporate the consequences of prescribed fire on wildfire likelihood, burn area, intensity, and emissions are needed to understand the tradeoffs of wildfire and prescribed fire emissions. Air quality impacts must also be placed into the larger context of land and environmental management. Decisions about fire suppression and fuel treatment not only influence fire damage and air pollution; they also determine land management costs and environmental benefits tied to wildland conditions. Air quality is only one dimension of fire management decision-making in which public health and ecological land management goals can be misaligned. Comprehensive cost-benefit analyses of wildland fires that consider monetized fuel treatments, fire and smoke damages, ecological services, climate benefits, and other components of complete land management programs must be developed. A more uniform land management approach across the arctic boreal regions is desirable, though challenging (Jaffe m.fl., 2020).

Referenser

- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G.R., San Miguel, J., Tanase, M., Koutsias, N., Garcia, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I. m.fl. 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225: 45–64.
- Cohen, W.B., Yang, Z. & Kennedy, R. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly landsat time series: 2. timesync—tools for calibration and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(12):2911–2924.
- Csiszar I.A. & Schroeder, W. 2008. Short-term observations of the temporal development of active fires from consecutive same-day etm+ and aster imagery in the amazon: Implications for active fire product validation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 1(4):248–253.
- Engelbrecht, J., Theron, A. Vhengani, L. & Kemp, J. 2017. A simple normalized difference approach to burnt area mapping using multi-polarisation C-Band SAR. *Remote Sensing*, 9(8):764.
- Giglio, L., Csiszar, I., Resta's, A., Morissette, J.T., Schroeder, W. Morton, D. & Justice, C.O. 2008. Active fire detection and characterization with the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (aster). *Remote Sensing of Environment*, 112(6):3055–3063.
- Giglio, L., Schroeder, W. & Justice, C.O. 2016. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178:31–41. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2016.02.054.
- Haque, M.K., Azad, M.A.K., Hossain, M.Y., Ahmed, T., Uddin, M. & Hossain, M.M. 2021. Wildfire in australia during 2019-2020, its impact on health, biodiversity and environment with some proposals for risk management: A review. *Journal of Environmental Protection*, 12(6):391– 414.
- Huang, C., Goward, S.N., Masek, J.G., Thomas, N., Zhu, Z. & Vogelmann, J.E. 2010. An automated approach for reconstructing recent forest disturbance history using dense landsat time series stacks. *Remote Sensing of Environment*, 114(1):183–198, 2010.
- Huang, C., Goward, S.N., Schlewes, K., Thomas, N. Masek, J.G. & Zhu, Z. 2009. Dynamics of national forests assessed using the landsat record: Case studies in eastern united states. *Remote sensing of Environment*, 113(7):1430–1442.
- Ienco, D., Interdonato, R. Gaetano, R. & Minh, D.H.T. 2019. Combining sentinel-1 and sentinel-2 satellite image time series for land cover mapping via a multi-source deep learning architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158:11–22.
- Imperatore, P., Azar, R., Calo, F., Stroppiana, D., Brivio, P.A., Lanari, R. & Pepe, A. 2017. Effect of the vegetation fire on backscattering: an investigation based on sentinel-1 observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(10): 4478–4492.
- Jamali, S., Klingmyr, D. and Tagesson, T. 2020. Global-Scale Patterns and Trends in Tropospheric NO₂ Concentrations, 2005–2018, *Remote Sensing*, 12, 3526; doi:10.3390/rs12213526.

- Jaffe, D.A., O'Neill, S.M., Larkin, N.K., Holder, A.L., Peterson, D.L., Halofsky, J.E. & Rappold, A.G. 2020. Wildfire and prescribed burning impacts on air quality in the United States. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 70(6):583–615.
- Jung, J., Yun, S.-H., Kim, D.-J. & Lavallo, M. 2017. Damage-mapping algorithm based on coherence model using multitemporal polarimetric–interferometric sar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(3):1520–1532.
- Kennedy, R.E., Cohen, W.B. & Schroeder, T.A. 2007. Trajectory-based change detection for automated characterization of forest disturbance dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 110(3):370–386.
- Kennedy, R.E., Yang, Z. & Cohen, W.B. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly landsat time series: 1. landtrendr—temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 114(12):2897–2910.
- Kumar, S.S. & Roy, D.P. 2018. Global operational land imager Landsat-8 reflectance-based active fire detection algorithm. *International Journal of Digital Earth*, 11(2):154–178. ISSN 17538955. doi: 10.1080/17538947.2017.1391341. URL <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=tjde20>.
- Loehman, R.A. 2020. Drivers of wildfire carbon emissions. *Nature Climate Change*, 10(12):1070–1071.
- Lohberger, S., Stängel, M., Atwood, E.C. & Siegert, F. 2018. Spatial evaluation of indonesia's 2015 fire-affected area and estimated carbon emissions using sentinel-1. *Global change biology*, 24(2):644–654, 2018.
- Murphy, S.W., de Souza Filho, C.R., Wright, R., Sabatino, G. & Correa Pabon, R. 2016. HOTMAP: Global hot target detection at moderate spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2016.02.027.
- Navarro, K.M., Schweizer, D., Balmes, J.R. & Cisneros, R. 2018. A review of community smoke exposure from wildfire compared to prescribed fire in the United States. *Atmosphere*, 9(5): 185.
- Onojeghuo, A.O., Blackburn, G.A., Wang, Q., Atkinson, P.M., Kindred, D. & Miao, Y. 2018. Mapping paddy rice fields by applying machine learning algorithms to multitemporal sentinel-1a and landsat data. *International journal of remote sensing*, 39(4):1042–1067, 2018.
- Palm, E.C., Sutor, M.J., Joly, K., Herriges, D.D., Kelly, A.P., Hervieux, D., Russell, K.L., Bentzen, T.W., Larter, N.C. & Hebblewhite, M. 2022. Increasing fire frequency and severity will increase habitat loss for a boreal forest indicator species. *Ecological Applications*, 32(3): e2549.
- Park, S., Im, J., Park, S., Yoo, C., Han, H. & Rhee, J. 2018. Classification and mapping of paddy rice by combining landsat and sar time series data. *Remote Sensing*, 10(3):447.
- Reiche, J., Verhoeven, R., Verbesselt, J., Hamunyela, E., Wielaard, N. & Herold, M. 2018. Characterizing tropical forest cover loss using dense sentinel-1 data and active fire alerts. *Remote Sensing*, 10(5):777.
- Reiche, J. 2015. Combining sar and optical satellite image time series for tropical forest monitoring. Doctoral Thesis.

Roy, D.P., Huang, H., Boschetti, L., Giglio, L., Yan, L., Zhang, H.H. & Li, Z. 2019. Landsat-8 and sentinel-2 burned area mapping-a combined sensor multi-temporal change detection approach. *Remote Sensing of Environment*, 231:111254.

Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L. & Csizsar, I.A. 2014. The New VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 143:85–96. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2013.12.008. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>.

Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., Quayle, B., Lorenz, E. & Morelli, F. 2016. Active fire detection using landsat-8/oli data. *Remote sensing of environment*, 185:210–220.

Stroppiana, D., Pinnock, S. & Gregoire, J.M.- 2000. The global fire product: Daily fire occurrence from april 1992 to december 1993 derived from NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6-7):1279–1288, 2000. ISSN 13665901. doi: 10.1080/014311600210173.

Tanase, M., Kennedy, R. & Aponte, C. 2015. Radar burn ratio for fire severity estimation at canopy level: An example for temperate forests. *Remote Sensing of Environment*, 170:14–31.

Tanase, M.A., Villard, L., Pitar, D., Apostol, B., Petrila, M., Chivulescu, S., Leca, S., Borlaf-Mena, I., Pascu, I.-S., Dobre, A.-C. m.fl. 2019. Synthetic aperture radar sensitivity to forest changes: A simulations-based study for the romanian forests. *Science of The Total Environment*, 689: 1104–1114.

Tanase, M.A., Santoro, M., de La Riva, J., Fernando, P., Le Toan, T. m.fl. 2010a. Sensitivity of x-, c-, and l-band SAR backscatter to burn severity in Mediterranean pine forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(10):3663–3675.

Tanase, M.A., Santoro, M., Wegmüller, U., de la Riva, J. & Pe´ rez-Cabello, F. 2010b. Properties of X-, C-and L-band repeat-pass interferometric SAR coherence in Mediterranean pine forests affected by fires. *Remote Sensing of Environment*, 114(10):2182–2194.

Van Eeden, L., Nimmo, D., Mahony, M., Herman, K., Ehmke, G., Driessen, J., O’Connor, J., Bino, G., Taylor, M. & Dickman, C. 2020. Impacts of the unprecedented 2019–2020 bushfires on australian animals. Report prepared for WWF-Australia, Ultimo NSW.

Verhegghen, A., Eva, H., Ceccherini, G., Achard, F., Gond, V., Gourlet-Fleury, S. & Cerutti, P.O. 2016. The potential of sentinel satellites for burnt area mapping and monitoring in the congo basin forests. *Remote Sensing*, 8(12):986.

Vreugdenhil, M., Wagner, W., Bauer-Marschallinger, B., Pfeil, I., Teubner, I., Rüdiger, C. & Strauss, P. 2018. Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to vegetation dynamics: An Austrian case study. *Remote Sensing*, 10(9):1396.

Walker, X.J., Baltzer, J.L., Cumming, S.G., Day, N.J., Ebert, C., Goetz, S., Johnstone, J.F., Potter, S., Rogers, B.M., Schuur, E.A. m.fl. 2019. Increasing wildfires threaten historic carbon sink of boreal forest soils. *Nature*, 572(7770):520–523.

Wooster, M.J., Xu, W. & Nightingale, T. 2012. Sentinel-3 SLSTR active fire detection and FRP product: Pre-launch algorithm development and performance evaluation using MODIS and ASTER datasets. *Remote Sensing of Environment*. ISSN 00344257. doi: 10.1016/j.rse.2011.09.033.

Appendix C: Sammanställning av internationella exempel på myndigheters fjärranalystillämpningar

Tillämpning/Titel	Myndighet/land/år	Satellit/Upplösning	Teknikberedskapsnivå	Skala/Studieområde	Sammanfattning	Referens
Mätning av ammoniak: Satellite measurements of air quality and greenhouse gases: application to regulatory activities	Environment Agency, Storbritannien, 2021	IASI	Testning/ Under utveckling	Regional skala (England)	Fallstudie som visade att det var möjligt att identifiera tydliga månatliga och säsongsmässiga variationer i uppmätt ammoniak över Storbritannien, och att dessa variationer överensstämde med data från det brittiska ammoniakövervakningsnätverket. Däremot kunde man inte identifiera någon trend under en 11-årig tidsperiod, vilket troligtvis berodde på att antalet giltiga mätningar som representerade varje årsgenomsnitt var få.	Brown m.fl. (2021)
Mätning av NO₂: Satellite measurements of air quality and greenhouse gases: application to regulatory activities	Environment Agency, Storbritannien, 2021	TROPOMI	Testning/ Under utveckling	Regional skala (England)	Studien visade att satellitdata kunde användas för att identifiera förhöjda nivåer av troposfäriskt NO ₂ runt tre stora punktkällor av NO _x i Storbritannien.	Brown m.fl. (2021)
Mätning av metan: Satellite measurements of air quality and greenhouse gases: application to regulatory activities	Environment Agency, Storbritannien, 2021	TROPOMI	Testning/ Under utveckling	Regional skala (England)	Studien visade att det inte var möjligt att upptäcka förhöjda halter eller utsläppspolymer av metan från deponier i Storbritannien. Däremot kan framtida satelliter, designade för att mäta punktkällor av metan, förväntas vara bättre på att detektera brittiska punktkällor av metan.	Brown m.fl. (2021)

Tillämpning/Titel	Myndighet/land/år	Satellit/Upplösning	Teknikberedskapsnivå	Skala/Studieområde	Sammanfattning	Referens
Mätning av metan: Fjernmåling av metan-utslipp ved bruk av Sentinel-5P: en mulighetsstudie	Miljødirektoratet, Norge, 2021	Sentinel-5P	Testning/ Under utveckling	Nationell skala (Norge)	Rapporten beskriver vilka möjligheter Sentinel-5P kan ge med tanke på att utveckla produkter för årliga nationella täckningskartor med areauppskattningar med tonvikt på växthusgasen metan. Rapporten beskriver de möjligheter som Sentinel-5P kan ge för att utveckla produkter för årliga norska täckningskartor med areauppskattningar för metanväxthusgasen.	Kylling m.fl. (2021)
Jämförelse av satellitmätningar med nationella emissionsinventeringar för NO₂, SO₂ och NH₃: UK Spatial Emissions Methodology: A report of the National Atmospheric Emission Inventory 2020	UK NAEI (National Atmospheric Emissions Inventory, Storbritannien, 2022)	1 km x 1 km för TROPOMI-data (ursprunglig markpixel på 3,5 x 7 km) och 2 km x 2 km med IASI-data (ursprunglig markpixel på 12 km i diameter vid nadir).	Testning/ Under utveckling	Nationell skala (Storbritannien)	I studien genomförde man en kvalitativ jämförelse mellan koncentrationskartor från TROPOMI-mätningar och NAEI-utsläppskartor för NO ₂ , SO ₂ och NH ₃ (2020).	Tsagatakis m.fl. (2022)
Fjärranalys för statistik-tillämpningar: Earth Observations for Official Statistics Satellite Imagery and Geospatial Data Task Team report	UN-CEBD, 2017	-	Testning/ Under utveckling	Globalt till lokalt (Fallstudier i Australien, Mexico, Colombien, och Google)	Handboken innehåller en kort introduktion till användningen av fjärranalysdata för officiell statistik, tillgängliga källor och metoder för att producera statistik från denna typ av data, fallstudieexempel mm.	UN-CEBD, 2017
In-depth review of satellite imagery/earth observation technology in official statistics	UN-CEBD, Economic Commission for Europe (ECE), 2019	-	Testning/ Under utveckling	Globalt till lokalt (Fallstudier i Österrike, Kanada, Mexico)	Fördjupad granskning av fjärranalysteknik för tillämpning i officiell statistik. Rapporten fokuserar på användningen av fjärranalys för officiell statistik, och dess potential att ta itu med aktuella eller nya data-behov. Dokumentet ger en översikt över internationella organisationers verksamhet (e.g. Eurostat), samt vissa länders program (Österrike, Kanada och Mexiko). Granskningen identifierar möjligheter och lärdomar samt ger rekommendationer om hur man kan främja användningen av fjärranalys i officiell statistik.	UN-CEBD (2019; 2022)

Tillämpning/Titel	Myndighet/land/år	Satellit/Upplösning	Teknikberedskapsnivå	Skala/Studieområde	Sammanfattning	Referens
Satellitbilder för att förutsäga grödans tillväxt	Statistics Canada, 2021	Landsat B	Testning/ Under utveckling	Nationell (Kanada)	Modernisering av data-insamlingen för jordbruket genom att använda satellitbilder för att förutsäga grödans tillväxt.	Statistics Canada, 2021
Detektering av ljusföroreningar: "How dark is your sky?" Estimating artificial light in Ireland from satellite imagery	Central Statistics Office, Ireland, 2020	NOAA:s system för VIIRS-DNB, som mäter atmosfäriskt ljus. (1 km x 1 km)	Testning/ Under utveckling	Nationell (Irland)	Detektering av ljusföroreningar i Irland baserat på satellitbilder, 2015–2019. Central Statistics Office Irland tillämpade GIS-tekniker för att extrahera ljus-emissionsdata för irländska (och internationella) platser.	Websida CSO (2020), Linehan, T. (2021)
Emissioner av NO2: Gas emissions: Nitrogen Dioxide NO2 Sentinel 5P	Central Statistics Office & EPA, Ireland, 2021	Sentinel SP (7 km x 7 km)	Testning/ Under utveckling	Nationell (Irland)	Arbete pågår för att titta på NO2 emissioner (med Sentinel 5P), från Copernicus Hub. En slutsats var att markmätningar är bäst, men att det finns en roll att spela även för satellitdata.	Linehan, T. (2021)
Övervakning av Isbjörnar och deras livsmiljö:	Miljødirektoratet, Norge, 2022	-	Används	Regionalt, Svalbard och Jan Mayen	I Norge övervakar man både isbjörnarnas rörelse med satellithalsband, denna data kombineras med satellitdata över havsisarna i arktis.	Norwegian Polar Institute (2022). Polar bear cubs per litter. Environmental monitoring of Svalbard and Jan Mayen (MOSJ). URL: http://www.mosj.no/en/fauna/marine/polar-bear.html
Copernicusdata i Ekokust- och havsförsumningsprogram: Copernicus marine tjenester og Miljødirektoratets Økokyst- og Havforsurningsprogrammer	Miljødirektoratet, Norge, 2020	Copernicus (se utförliga tabeller i rapport)	Under utveckling och implementering	Nationell (Norge)	Norska miljödirektoratet gav NERSC(Nansen environmental and remote sensing center) uppdrag att utvärdera vilka parametrar inom kust- och havsmiljöövervakningsprogrammen som idag hämtas in från andra källor kan hämtas in från Copernicus.	Pettersson m.fl. (2020)
Utvärdering av kostnads-effektiva tekniker för kartläggning- och övervakningsmetoder: Pilotprosjekter for bruk av fjernmåling i overvåkning	Miljødirektoratet, Norge, 2016– pågår	-	Pilotprojekt	Nationell (Norge)	Bilder från satelliter, flygplan och drönare ger data över stora områden, uppmätta samtidigt med mätinstrument som ger jämn kvalitet på data. De kan därför vara användbara för kartläggning och övervakning av miljöparametrar, särskilt i kombination med fasta mått/referensmätningar.	https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/overvaking-arealplanlegging/miljoovervaking/overvaking-programmer/basisovervaking/fjernmaling/

Tillämpning/Titel	Myndighet/land/år	Satellit/Upplösning	Teknikberedskapsnivå	Skala/Studieområde	Sammanfattning	Referens
Miljöövervakning av status för insjöar: Övervakning av innsjøer med satellitt-metode-utvikling	Miljødirektoratet, Norge, 2020	Sentinel 1 och 2	Metodutveckling	Nationell, Norge	Satellitdata ger högupplöst data om koncentrationer i sjöar och är ett bra komplement till in situ mätningar. Med satellitdata kan man även addera andra parametrar som turbiditetsplymer från utflöden till kontrollerade parametrar.	
Fjernmålingsbasert kartlegging og overvåking av tidevannssonen.	Miljødirektoratet, Norge, 2020	Sentinel-1 C-band synthetic aperture radars (C-SAR) S1A and S1B and Sentinel-2 MultiSpectral Instruments (MSI) S2A and S2B from the European Copernicus Program	Metodutveckling	Regional, Trondheim		
Performance and applications of satellite remote sensing data for water quality in Norwegian lakes. Evaluation of MERIS, Sentinel-2 and Sentinel-3 products	Miljødirektoratet, Norge,	MERIS, Sentinel-2 and Sentinel-3	Metodutveckling	Regional, Mjøsa		
Mapping conifer trees by means of remote sensing	Miljødirektoratet, Norge,	Sentinel-1 and ALOS PALSAR-2	Metodutveckling	Regional, Hordaland		
MARINE HEATWAVES IN NORTHERN SEA AREAS	Miljødirektoratet, Norge,	EU Copernicus Program	Metodutveckling	Global		
Övervakning av grödor: Crop Map of England (CROME) 2020	Rural Payments Agency UK	Sentinel-1 Radar, Sentinel-2 Optical Satellite	Används	Nationell skala (England)	The classification was created automatically using supervised classification (Random Forest Classification), checked against survey data collected by field inspectors and visually validated	Rural Payments Agency UK, 2022
Marktäcke: Land cover map	Environment Agency UK	Sentinel	Används	Nationell skala (UK)	Uses Sentinel data and a machine learning algorithm to create an annual land cover map based on the Biodiversity Action Plan (BAP) Broad (2017,2018, 2019).	Morton, m.fl., 2021

Tillämpning/Titel	Myndighet/land/år	Satellit/Upplösning	Teknikberedskapsnivå	Skala/Studieområde	Sammanfattning	Referens
Habitat och marktäckning: Scotland Habitat and Land cover map – 2020	Scottish Government	Ej angett	Används	Nationell skala (Skottland)	Habitat and land cover maps created using AI to classify satellite data to EUNIS level 2 by Space Intelligence in partnership with NatureScot.	Scottish Government SpatialData.gov.scot, 2022
Habitat: CASI and LIDAR Habitat Map	Environment Agency UK	airborne CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) and LIDAR (Light Detection and Ranging) data	Används	Nationell skala (UK)	The habitat map is derived from CASI multispectral data, LIDAR elevation data and other GIS products. The classification uses ground data from sites collected near to the time of CASI capture. Ground data are used to identify the characteristics of the different habitats in the CASI and LIDAR data. These characteristics are then used to classify the remaining areas into one of the different habitats.'	Environment Agency UK, 2022a
Hedmarksövervakning: The Moorland Change Map (TIN179)	Natural England	optical satellite data from Sentinel 2 satellites	Används	Local (UK)	Fires and cuttings are detected from optical satellite data, comparing NDVI between time periods. Validation from field data.	Natural England, 2022
Träd längs vattendrag: National LIDAR Programme Vegetation Object Model	Environment Agency UK	LIDAR, Sentinel 2	Används	Nationell skala (England)	GIS modelling of the Environment Agency national LIDAR programme 1 metre elevation data into discrete objects, with spatial proximity queries against features in Ordnance Survey mapping and Sentinel 2 imagery aiding in the classification of vegetation and non-vegetation objects.	Environment Agency UK, 2022b
Jorderosion: Bare Soil Erosion Risk Detection	Environment Agency Wales	Sentinel2 ARD, LIDAR	Används	Nationell skala (England)	Uses Sentinel2 ARD and LIDAR data to identify bare fields and steep slopes which are vulnerable to erosion.	JNCC, 2022b
Våtmarker: Peatland vegetation: field and laboratory measurements of carbon dioxide fluxes and spectral reflectance	Environmental Information Data Centre UK	Ej angett	Används	Nationell skala (Skottland)		Environmental Information Data Centre UK, 2022b
Skogsövervakning: NATIONAL FOREST INVENTORY WOODLAND ENGLAND 2020	Forestry Commission	Sentinel 2, colour aerial orthophotographic imagery	Används	Nationell skala (GB)		Forestry Commission, 2022

Appendix D: Ett urval av svenska myndigheters arbete med fjärranalys

Titel	Myndighet	Genomförande år	Tillämpning	satellit/Sensorer/band	Studieområde	Skala (lokal, regional, Nationell)	Metod	Teknikberedskapsnivå	Referens	Länk
Algblommning	HaV	Pågående	Miljöövervakning	Sentinel 3/OLCI, SST	Östersjön, Skagerack, kattegatt, bottenviken, bottenhavet	Nationell	Neurala nätverk	Används	https://www.havochvatten.se/	https://www.havochvatten.se/miljopaverkan-och-atgarder/miljopaverkan/overgodning/algblomning.html
Fjärranalys av fria vattenmassan	HaV	Pågående	Miljöövervakning	Sentinel 3/OLCI, SST	Östersjön, Skagerack, kattegatt, bottenviken, bottenhavet	Nationell		Används	https://www.havochvatten.se/	https://www.havochvatten.se/overvakning-och-uppfoljning/miljoovervakning/marin-miljoovervakning/fjarranalys-av-fria-vattenmassan.html
Satellitbaserad statusklassning av Sveriges kustvattenförekomster	HaV	2016–2018	Miljöövervakning	S3 OLCI	Östersjön, Skagerack, kattegatt, bottenviken, bottenhavet	Nationell		Används	https://www.havochvatten.se/	https://www.havochvatten.se/data-kartor-och-rapporter/kartor-och-gis/karttjanster/karttjanster-fran-oss/satellitbaserad-statusklassning-av-sveriges-kustvattenforekomster.html
En operationell metod för detektion och avgränsning av muddringar med hjälp av satellitdata	HaV	2020	Miljöövervakning	Sentinel 2	Stockholms län	regional	förstärkt naturlig reflektans i RGB-banden, R+B-G (B3+B1-B2), R+B-G	Under utveckling	Törnqvist m.fl. (2017)	https://www.havochvatten.se/data-kartor-och-rapporter/rapporter-och-andra-publikationer/publikationer/2020-10-09-en-operationell-metod-for-detektion-och-avgransning-av-muddringar-med-hjalp-av-satellitdata.html
Havsplaner	HaV	2020	Översiktsplaner		Östersjön, Skagerack, kattegatt, bottenviken, bottenhavet	Regional/lokal		Pågår	https://www.havochvatten.se/	https://www.havochvatten.se/vagledning-foreskrifter-och-lagar/vagledning/havsplaner.html

Titel	Myndighet	Genomförande år	Tillämpning	satellit/Sensorer/band	Studieområde	Skala (lokal, regional, Nationell)	Metod	Teknikberedskapsnivå	Referens	Länk
VA-Gis Mälardalen, förstudie om GIS och databaser för gemensam effektiv hantering av data om enskilda VA	HaV	2008	Lagring och distribution	Data från lantmäteriet	Mälaren	Regional	Arbetsätt för att lagra och distribuera data	Under utveckling	Karlson (2012)	https://www.havochvatten.se/avlopp-och-dricksvatten/sma-avloppsanlaggningar/rapporter-om-sma-avlopp/rapporter-och-dokument/rapporter/va-gis-malardalen.html
Fysisk störning av stränder – Metodstudier för övervakning av exploateringsgraden	HaV	2016	Miljöövervakning	Flygbilder	Stockholms län	Regional		Under utveckling	Tullback m.fl. (2001)	https://www.havochvatten.se/vagledning-foreskrifter-och-lagar/vagledning/ovriga-vagledning/undersokningstyper-for-miljoovervakning/undersokningstyper/fysisk-exploatering-av-strander.html
Symphony	HaV		Underlag			Nationell		Används	https://www.havochvatten.se/	https://www.havochvatten.se/data-kartor-och-rapporter/rapporter-och-andra-publikationer/publikationer/2018-04-10-symphony---integrerat-planeringsstod-for-statlig-havsplanering-utifran-en-ekosystemansats.html
Fysisk karaktärisering av avrinningsområden	HaV	2022	Kartering	Lidar	Sverige	Nationell		Under utveckling	Hav 2020:16	https://www.havochvatten.se/data-kartor-och-rapporter/rapporter-och-andra-publikationer/publikationer/2022-07-12-fysisk-karakterisering-av-avrinningsomraden.html
Riskindexkarta Granbarkborre	Skogsstyrelsen		Miljöövervakning		Sverige	Nationell	Förändringsanalys	Används	skogsstyrelsen.se	https://www.skogsstyrelsen.se/sjalvservice/karttjanster/kartor-over-skador-pa-skog/
Sumpskog	Skogsstyrelsen		Miljöövervakning		Sverige	Nationell		Används	skogsstyrelsen.se	
Multiskadad ungskog	Skogsstyrelsen	Pågående	Miljöövervakning	Satellitbild	Sverige	Nationell		Används	skogsstyrelsen.se	https://www.skogsstyrelsen.se/mer-om-skog/reportage/multiskadad-ungskog-uppmarksammas/
Översvämningsportalen	MSB	Pågående	Underlag	Lidar	Sverige	Nationell		Används	MSB.se	https://gisapp.msb.se/Apps/oversvamningsportal/enkelkarta.html

Titel	Myndighet	Genomförande år	Tillämpning	satellit/Sensorer/band	Studieområde	Skala (lokal, regional, Nationell)	Metod	Teknikberedskapsnivå	Referens	Länk
Miljöövervakning våtmarker	LST Norrbotten		Miljöövervakning		Sverige	Regional		Används	Hahn m.fl. (2014)	https://www.artdatabanken.se/globalassets/ew/subw/ard/2-var-verksamhet/publikationer/10-fjarranalys-av-skador-pa-al/rapport_fjaer-ranals_av_skador.pdf
Fjärranalys av skador på AL utmed vattendrag och sjöar i södra och västra Sverige	LST Västra Götaland		Kartering	SPOT-5 Rapideye QuickBird WorldView Ortofoto IR, 4 800 m Ortofoto färg, 4600 m Ortofoto färg, 2 500 m Ortofoto IR, 4 600 m (inskannade)	Västra Sverige	Regional		10 m (20m) 6,5 m 0,6 m/ 2,4 m 0,5 m/2 m 0,5–1 m 0,5 m 1 m 0,5 m	Bjelke m.fl. (2013)	https://www.artdatabanken.se/globalassets/ew/subw/ard/2-var-verksamhet/publikationer/10-fjarranalys-av-skador-pa-al/rapport_fjaer-ranals_av_skador.pdf
Satellitbilds-analys ålgräs sannolikhet	LST Västra Götaland		Kartering	Spot-5	Västra götaland	Regional	Automatisk multivariat kategorisering med support vector machine	används	Envall & Isaksson (2012)	https://www.lansstyrelsen.se/vastra-gotaland/tjanster/publikationer/2012/algrasin-ventering-zostera-sp-i-vastra-gotalands-lan-sommaren-2008.html
Modellerade Naturvärdesobjekt Ålgräs	LST Östergötland		Kartering	Laserbatymetri	Västra götaland	Regional	Rumslig statistisk modellering/habitatmodellering	används	Envall & Isaksson (2012)	https://ext-geodatakatalog-forv.lansstyrelsen.se/PlaneringsKatalogen/GetMetaDataById?id=be876c8b-9acb-446c-9b01-98d73ec5cfb1_C
Satellitbaserad våtmarksövervakning	Naturvårdsverket	var 10:e år	Miljöövervakning	TM5-bandet, TM3/TM2-kvoten, TM4/TM3-kvoten och TM4/TM5-kvoten > 0.5 ha	Hela Sverige, ej fjällen	Nationell	Förändringsanalys	används	Hahn m.fl. (2021)	https://www.naturvardsverket.se/om-oss/publikationer/6900/satellitbaserad-overvakning-av-vatmarker/
Nationella marktäckedata (NMD)	Naturvårdsverket		Underlag	Sentinel 1/2/ Lidar/ LM_ Saccess_ mosaiker	Sverige	Nationell	Klassning, tidsserie-analys, satellitdatabaserad förändringsinformation	används	Naturvårdsverket (2019b)	https://www.naturvardsverket.se/verktyg-och-tjanster/kartor-och-karttjanster/nationella-marktackedata

Titel	Myndighet	Genomförande år	Tillämpning	satellit/Sensorer/band	Studieområde	Skala (lokal, regional, Nationell)	Metod	Teknikberedskapsnivå	Referens	Länk
Fältdata och fjärranalys visar förutsättningar för friluftsliv	Naturvårdsverket		Kartering			Nationell		Under utveckling	Hedblom m.fl. (2019)	https://pub.epsilon.slu.se/26109/1/hedblom_m_et_al_211115.pdf
GIS-baserade metoder för att kartlägga fiskars livsmiljöer i grunda havsområden	Naturvårdsverket	2011	Kartering		Östersjön, Kattegatt	Nationell		Generella additiva modeller	Naturvårdsverket (2011), rapport 6427	https://www.naturvardsverket.se/om-oss/publikationer/6400/gis-baserade-metoder-for-att-kartlagga-fiskars-livsmiljoer-i-grunda-havsomraden/
Hur näringsökologi kan påvisa samband mellan älgens hälsa och landskapets foder	Naturvårdsverket	2014–2016	Kartering		Södermanland	regional				https://www.naturvardsverket.se/om-miljoarbetet/forskning/viltforskning/forskning-om-klovvilt/hurnaringsekologi-kan-pavisa-samband-mellan-algens-halsa-och-landskapets-foder/
Landskapsplanering ska främja biologisk mångfald och ett varierat skogsbruk	Naturvårdsverket	2016–2019	Kartering	Lantmäteriet 30 x 30 meter		Nationell	Zonation (Moilanen et al. 2005, 2014)		Naturvårdsverket (2019), rapport 6909	https://www.naturvardsverket.se/om-oss/publikationer/6900/landskapsplanering-av-skog-for-biologisk-mangfald-och-ett-varierat-skogsbruk/
Det boreala skogslandskapets gröna infrastruktur	Naturvårdsverket	2019	Kartering	> 0.5 ha	Sverige	Nationell	Proxy Continuity Forests		Svensson m.fl. (2019), NV rapport 6910	https://www.naturvardsverket.se/om-oss/publikationer/6900/det-boreala-skogslandskapets-grona-infrastruktur/
Kartering av kontinuitetsskog i boreal region	Naturvårdsverket	2017	Kartering	Historiska ortofoton/Landsat MSS/Landsat TM/SPOT/Sentinel2/Laserdata 10m	Norra sverige	Regional	Proxy Continuity Forests		Svensson m.fl. (2019), NV rapport 6910	https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/aga-skog/skydda-skog/bilaga-3-kartering_av_kontinuitetsskog_boreal_region.pdf
Precisera kartering av kontinuitetsskog i Väster-norrlands län	Naturvårdsverket	2017	Kartering	Historiska ortofoton/Landsat MSS/Landsat TM/SPOT/Sentinel2/Laserdata 10m	Väster-norrland	Regional	Proxy Continuity Forests		Svensson m.fl. (2019), NV rapport 6910	https://www.skogsstyrelsen.se/globalassets/aga-skog/skydda-skog/bilaga-3-kartering_av_kontinuitetsskog_boreal_region.pdf

Titel	Myndighet	Genomförande år	Tillämpning	satellit/Sensorer/band	Studieområde	Skala (lokal, regional, Nationell)	Metod	Teknikberedskapsnivå	Referens	Länk
Kartering av skogsmark i Jönköpings län: med data från satelliten Landsat 7 ETM+	Naturvårdsverket	2002	Kartering	Landsat 7	Småland	Regional				http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A880858&dswid=1781
Satellitdata-baserad förändringsanalys av buskskikt och skog på Öland. Användarutvärdering och rekommendationer.	Naturvårdsverket	2003		Landsat 5/7	Öland	Regional	Förändringsanalys		Ahlcrona m.fl. (2000)	https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:658098/FULLTEXT01.pdf
Tavvavuoma: Inledande dokumentation inom övervakningsprogram för Sveriges palsmyrar	LST Norbotten	2015	Miljöövervakning		Norrbottnen (Kiruna)	Lokal			Wramner m.fl. (2015), Länsstyrelsens rapportserie nr 20/2015	http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A908710&dswid=1209
Vattnets fysiska egenskaper – istäcke, snötäcke	HaV/SMHI	Pågående	Miljöövervakning	Meteosat/ESA, NOAA/NASA	Östersjön, Skagerack, kättegatt, bottenviken, bottenhavet	nationell		används	SMHI	https://www.smhi.se/vader/observationer/is-tillhavs#ws=wpt-a,proxy=wpt-a
Kontinuerlig naturtypskartering av skyddade områden (KNAS)	Naturvårdsverket	Ersatt av NMD	Miljöövervakning	Landsat, SPOT-4, Spot-5	Sverige			används	Naturvårdsverket.se	https://skyddadnatur.naturvardsverket.se/
Naturtypskartan (NNK)	Naturvårdsverket	Pågående	Miljöövervakning		Sverige			används	Naturvårdsverket.se	https://skyddadnatur.naturvardsverket.se/
Skogsdata-labbet	Skogsstyrelsen	Pågående	Miljöövervakning	Sentinel 2	Sverige			används	Skogsstyrelsen.se	https://skogsdatalabbet.se/about/

Titel	Myndighet	Genomförande år	Tillämpning	satellit/Sensorer/band	Studieområde	Skala (lokal, regional, Nationell)	Metod	Teknikberedskapsnivå	Referens	Länk
Övervattensväxter och flytbladsväxter i sjöar	Naturvårdsverket	Pågående	Miljöövervakning	Flygfoto	Sverige			används	Naturvårdsverket.se	https://www.havochvatten.se/vagledning-foreskrifter-och-lagar/vagledning/ovriga-vagledning/undersokningstyper-for-miljoovervakning/undersokningstyper/overvattensvaxter-och-flytbladsvaxter-i-sjoar.html
BBK Brandbränslekartering	MSB	Pågående	miljöövervakning	Sentinel 2, 10 m	Sverige			Används	MSB.se	https://www.msb.se/sv/aktuellt/nyheter/2022/juni/nu-kan-brander-i-naturen-upptackas-med-hjalp-av-satelliter/
Agenda för landskapet	Naturvårdsverket	2020–2022	Projekt		Sverige	Nationell		Används		https://www.vinnova.se/p/agenda-for-landskapet2/
Kartering av kontinuitetsskog	Naturvårdsverket	Avslutat	Projekt	Landsat, SPOT, laserdata	Sverige	Nationellt		Används	Ahlcrona m.fl. (2017)	
Kartering av inlands-sandmarker i boreal och kontinental region	Naturvårdsverket	Pågående	Projekt	Flygbilder	Sverige	Nationellt		Används	Metria AB	
Metodik för analys av lämpliga regioner för skörd av högväxt våtmarksvegetation	Naturvårdsverket	Pågående	Projekt		Sverige	Nationellt			Metria AB	
Potentiella lövskogar	Naturvårdsverket	2022	Projekt		Sverige	Nationellt			Metria (2022)	

Appendix E: Sammanställning av fjärranalysapplikationer från forskningsartiklar som ingår i syntesen

Denna tabell finns tillgänglig via naturvardsverket.se/publikationer. Sök därefter på
rapportens ISBN: 978-91-620-7083-0

Rapporten uttrycker nödvändigtvis inte Naturvårdsverkets ställningstagande. Författaren svarar själv för innehållet och anges vid referens till rapporten.

Användningen av satellitdata för att utveckla miljöövervakningen i Sverige

En syntes

Rapporten beskriver kunskapsläget för miljöövervakning med fjärranalys, med fokus på ämnesområden som är relevanta för Naturvårdsverket och Havs- och vattenmyndigheten, exempelvis tillämpningar för luftkvalitet, naturresurser, biodiversitet samt för sjöar, kust och hav.

Fjärranalys erbjuder såväl goda möjligheter som utmaningar, eftersom fjärranalysövervakningen behöver integreras i den nuvarande miljöövervakningen.

Forskarna bedömer att tillämpbarheten inom exempelvis luftkvalitet kommer att öka framöver, genom att ett flertal nya satelliter och instrument kan förbättra övervakningen av luftföroreningar från satelliter.

Fjärranalys har potential att underlätta för både Naturvårdsverket och HaV att följa upp flera av Sveriges miljö kvalitetsmål och för att kartlägga biologisk mångfald i olika skalor, men kräver dock att HaV och Naturvårdsverket behöver producera data som är standardiserade, geolokaliserade och tidsmässigt uppdaterade, för att kunna användas i kombination med satellitdata.

Forskarna rekommenderar en rad åtgärder som Naturvårdsverket och HaV kan vidta för att ytterligare integrera fjärranalys i miljöövervakningen, samt förslag på fortsatt forskning och utveckling.

Projektet har finansierats med medel från Naturvårdsverkets miljöforskningsanslag som finansierar forskning till stöd för Naturvårdsverkets och Havs- och vattenmyndighetens kunskapsbehov.