

# Nasjonalt veikart for CO2M/CO2MVS

Arve Kylling<sup>1)</sup>, Ragnhild Børke<sup>2)</sup>, Susana Lopez-Aparicio<sup>1)</sup>, Glen P. Peters<sup>2)</sup>,  
Kerstin Stebel<sup>1)</sup> og Leonor Tarrason<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> NILU – Norsk institutt for luftforskning, Kjeller  
<sup>2)</sup> CICERO Senter for klimaforskning, Oslo



<b>NILU rapport 14/2023</b>	ISBN: 978-82-425-3125-4 ISSN: 2464-3327	TILGJENGELIGHET: A - Åpen
DATO 08.06.2023	ANSVARLIG SIGNATUR Aasmund Fahre Vik, Viseadministrerende direktør og CTO (sign.)	ANTALL SIDER 81
TITTEL Nasjonalt veikart for CO2M/CO2MVS	PROSJEKTLEDER Arve Kylling	NILU PROSJEKTNUMMER S-122066
	KVALITETSSIKRER Kjetil Tørseth	
FORFATTER(E) Arve Kylling <sup>1</sup> , Ragnhild Børke <sup>2</sup> , Susana Lopez-Aparicio <sup>1</sup> , Glen P. Peters <sup>2</sup> , Kerstin Stebel <sup>1</sup> , og Leonor Tarrason <sup>1</sup>  1) NILU – Norsk institutt for luftforskning, Kjeller 2) CICERO Senter for klimaforskning, Oslo	OPPDRAGSGIVERS REF. 74CO2119 Nasjonalt veikart for CO2M	
OPPDRAGSGIVER Norsk Romsenter, Drammensveien 165, 0277 OSLO	REFERAT  På vegne av Norsk Romsenter har NILU – Norsk institutt for luftforskning og CICERO Senter for klimaforskning utarbeidet et veikart for hvordan Norge kan nyttiggjøre seg data fra <i>CO<sub>2</sub> Monitoring</i> -satellittene (CO2M) og tjenesten <i>CO<sub>2</sub>-emissions Monitoring and Verification Support Capacity</i> (CO2MVS) i forvaltning, forskningsmiljøer og næringsliv. Veikartet avslutter med anbefalinger for veien videre for Norge vedrørende CO2M og CO2MVS.	
ENGELSK TITTEL Norwegian roadmap for CO2M/CO2MVS	EMNEORD Karbondioksid, satellitter, fjernmåling                      kalibrering og verifisering                      invers modellering, beslutningsstøttesystem	
ABSTRACT (på engelsk)  On behalf of the Norwegian Space Agency, NILU – Norwegian Institute for Air Research and CICERO Center for Climate Research have drawn up a road map for how Norway can make use of data from the CO <sub>2</sub> Monitoring satellites (CO2M) and the service "CO <sub>2</sub> emissions Monitoring and Verification Support Capacity" (CO2MVS) in government bodies, research environments and business. The roadmap concludes with recommendations for the way forward for Norway's role developing and utilizing CO2M and CO2MVS.	PUBLISERINGSTYPE: Digitalt dokument (pdf)                      FORSIDEBILDE:                      Kilde: NILU	

© NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning

Sitering: Kylling, A., Børke, R., Lopez-Aparicio, S., Peters, G. P., Stebel, K., Tarrason, L. (2023). Nasjonalt veikart for CO2M/CO2MVS. (NILU rapport 14/2023). Kjeller: NILU.

NILU er ISO-sertifisert i henhold til NS-EN ISO 9001/ISO 14001 og akkreditert i henhold til NS-EN ISO/IEC 17025.

## Forord

Dette prosjektet er utført av NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning og CICERO Senter for klimaforskning på vegne av Norsk Romsenter.

Bakgrunnen for prosjektet er at i tråd med satsningsforslaget for jordsobservasjonsdelen til EUs romsatsning, Copernicus, er det konkludert med at det skal anskaffes et nasjonalt veikart for å utrede og forberede nyttegjøring av data fra CO<sub>2</sub> Monitoring-satellittene i Norge.

Arbeidet ble utført av forskere ved NILU og CICERO. De har hentet inn informasjon og sammenstilt denne i rapporten.

Informasjonskilder for denne rapporten var:

- Vitenskapelige publikasjoner
- Andre tilgjengelige åpne rapporter
- Målrettet spørreundersøkelse
- Samtaler med aktuelle aktører.

# Innhold

<b>Forord.....</b>	<b>3</b>
<b>Sammendrag.....</b>	<b>6</b>
<b>1. Innledning.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Beskrivelse av CO2M-satelittene og CO<sub>2</sub>-emissions Monitoring and Verification Support Capacity (CO2MVS) .....</b>	<b>9</b>
2.1 CO2M-satelittene .....	9
2.1.1 Satellitter.....	10
2.1.2 Instrumenter .....	11
2.2 Datahåndtering .....	13
2.3 Dataprodukter.....	13
2.3.1 XCO <sub>2</sub> og XCH <sub>4</sub> .....	14
2.3.2 NO <sub>2</sub> .....	15
2.3.3 Aerosoler.....	15
2.3.4 Skyer.....	15
2.3.5 Fluorescens .....	15
2.4 Kalibrering/validering.....	16
2.5 Bakkenettverk .....	16
2.6 Data-assimileringstjeneste – CO2MVS.....	18
<b>3. Andre relevante satellittbaserte klimagassmålinger og norske anvendelser .....</b>	<b>21</b>
3.1 Satellittbaserte klimagassmålinger .....	21
3.2 Norsk bruk av klimagassdata fra satellitter.....	22
3.3 Tidligere og nåværende satellitt-instrumenter og eksempler på bruk.....	23
3.3.1 SCIAMACHY ombord ENVISAT .....	25
3.3.2 GOSAT og GOSAT-2 .....	25
3.3.3 OCO-2 og OCO-3 .....	26
3.3.4 TanSat.....	26
3.3.5 TROPOMI på Sentinel-5P .....	26
3.3.6 GHGSat.....	27
3.3.7 EnMAP, PRISMA, og EMIT .....	27
3.3.8 Sentinel-2 .....	28
3.3.9 Worldview-3.....	28
3.4 Planlagte satellitt-instrumenter.....	28
3.4.1 MethaneSAT.....	28
3.4.2 MicroCarb.....	29
3.4.3 Carbon Mapper .....	29
3.4.4 GOSAT-3 .....	29
3.4.5 TanSat-2 .....	29
3.4.6 Sentinel 5: UVNS, IASI-NG og 3MI.....	30
3.4.7 MERLIN.....	30
3.4.8 CHIME og SBG .....	30
<b>4. Oversikt over norsk forvaltning og klimagassregnskap .....</b>	<b>32</b>
4.1 Det nasjonale utslippsregnskapet.....	32
4.1.1 Overordnet om kravene til utslippsregnskap .....	32
4.1.2 Nasjonal rollefordeling.....	32
4.1.3 Nasjonal publisering og bruk av utslippsregnskapet .....	33
4.1.4 Metoder og datakilder .....	34

4.1.5	Kvalitetssikring, kvalitetskontroll og verifikasjon.....	34
4.2	Det kommunefordelte klimagassregnskapet.....	35
<b>5.</b>	<b>Analyse av nasjonale brukerbehov.....</b>	<b>37</b>
5.1	Sammenfatning av brukerbehov (for norske brukere) .....	37
5.2	Verifisering og forbedring av det nasjonale utslippsregnskapet .....	37
5.3	Bedre kunnskap om utslippsutviklingen globalt og i andre land/ regioner ....	38
5.4	Bedre kunnskap om utslipp på lokalt nivå (punktkilder, kommuner, byområder, fylkeskommuner osv.).....	39
5.5	Forskning.....	39
5.6	Næringsvirksomhet .....	40
<b>6.</b>	<b>Analyse av nasjonale utviklingsbehov .....</b>	<b>41</b>
6.1	Erfaringer med bruk av observasjonsdata til verifikasjon av nasjonale utslippsregnskap .....	41
6.1.1	Oversikt over IPCC-retningslinjene og land som bruker observasjonsdata ....	41
6.1.2	Erfaringer med bruk av observasjonsdata til verifikasjon for ulike drivhusgasser .....	42
6.1.3	Erfaringer fra andre brukerorienterte aktiviteter .....	43
6.2	Nasjonale utviklingsbehov knyttet til CO2MVS .....	43
6.2.1	A priori informasjon (inngangsdata) .....	44
6.2.2	Observasjoner .....	44
6.2.3	Integrasjon .....	45
6.2.4	Utputt.....	46
6.2.5	Beslutningsstøttesystemet (Decision Support System) .....	46
6.3	Tilgjengeliggjøring av data og utvikling av datatjenester for å møte brukerbehovene.....	47
<b>7.</b>	<b>Anbefalinger .....</b>	<b>48</b>
<b>8.</b>	<b>Takk.....</b>	<b>52</b>
<b>9.</b>	<b>Referanser .....</b>	<b>53</b>
<b>Vedlegg A</b>	<b>Enkelt overslag over utslipp som gir 1 ppm endring i XCO2 .....</b>	<b>66</b>
<b>Vedlegg B:</b>	<b>Spørreundersøkelse .....</b>	<b>67</b>
<b>Vedlegg C:</b>	<b>Liste over akronym .....</b>	<b>76</b>
<b>Vedlegg D:</b>	<b>Summary in English .....</b>	<b>79</b>

## Sammendrag

***CO<sub>2</sub> Monitoring satellittene (CO2M), som skal skytes opp i 2025/2026, vil sammen med tjenesten CO<sub>2</sub> Monitoring and Verification Support Capacity (CO2MVS) for overvåkning av CO<sub>2</sub>-utslipp gi utfyllende CO<sub>2</sub>-utslippsdata for viktige industriområder, megabyer, mindre regioner, land og globalt.***

***På vegne av Norsk Romsenter har NILU – Norsk institutt for luftforskning og CICERO Senter for klimaforskning utarbeidet et veikart for hvordan Norge kan nyttiggjøre seg av og bidra til CO2M og CO2MVS i forvaltning, forskningsmiljøer og næringsliv.***

Målet med klimakonvensjonen er å unngå farlige menneskeskapt inngrep i klimasystemet. Det inkluderer å begrense de globale utslippene av klimagasser. Utslippene kan tallfestes både med aktivitets- og observasjonsbaserte metoder<sup>1</sup>. Norge tallfester og rapporterer sine aktivitetsbaserte klimagassutslipp til De forente nasjoners (FN) klimakonvensjon. Nylige fremskritt innen satellittfjernmåling gjør det mulig å gjøre observasjonsbaserte målinger av CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og andre klimagasser fra verdensrommet med høy presisjon. Formålet med *CO<sub>2</sub> Monitoring (CO2M)* satellittsatsningen er å gi den Europeiske Unionen en operasjonell kapasitet som kan bidra til overvåkning av menneskeskapt CO<sub>2</sub>-utslipp. CO2M-satellittene som skal skytes opp i 2025/2026 som en del av *Copernicus Expansion Missions*<sup>2</sup>, vil sammen med dataintegrerings- og brukerstøtte-systemet *CO<sub>2</sub> Monitoring and Verification Support Capacity (CO2MVS)* gi en ny mulighet for observasjonsbasert estimering av utslipp av blant annet CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>. Andre måleparametere inkluderer NO<sub>2</sub>, fluorescens, vanddamp og aerosoler. I tillegg til CO2M, består CO2MVS av et tilhørende bakkenettverk av CO<sub>2</sub>-målinger med europeisk fokus, en operasjonell data-assimilerings-tjeneste for CO<sub>2</sub>-utslippsberegninger og et beslutningsstøttesystem. CO2M og CO2MVS utvikles i regi av *European Space Agency (ESA)*, *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT)* og EUs atmosfæretjeneste *Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS)*. Det planlegges at CO2M, bestående av to til tre satellitter, vil være operasjonell fra 2026 med en levetid på minimum 12 år for å dekke minst to globale gjennomganger (*global stocktake*, gjøres hvert 5. år fra 2023 i henhold til Paris-avtalen).

Dette nasjonale veikartet for CO2M beskriver hvordan Norge kan nyttiggjøre seg av data fra CO2M og kapasiteten CO2MVS i forvaltning, forskningsmiljøer og næringsliv.

Nasjonale brukerbehov har blitt kartlagt gjennom møter med deltakerne i prosjektets referansegruppe, en workshop, bilaterale møter og en spørreundersøkelse. Mulige bruksområder som er kartlagt dekker verifisering og forbedring av nasjonale utslippsregnskap, bedre kunnskap om utslippsutvikling internasjonalt, bedre kunnskap om utslipp på lokalt nivå, forskning og næringsvirksomhet.

I Norge har Miljødirektoratet ansvaret for Norges rapportering av nasjonale klimagassutslipp til FNs klimakonvensjon. Dataene og dokumentene som rapporteres utarbeides i samarbeid med Statistisk sentralbyrå (SSB) og Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO). Et av kjerneformålene med CO2M er å skaffe data til verifisering og forbedring av nasjonale utslippsregnskap. Per i dag brukes ikke satellitt-

<sup>1</sup> På engelsk brukes uttrykkene bottom-up og top-down. I dette dokumentet brukes aktivitetsbasert for bottom-up og observasjonbasert for top-down. Aktivitetsbaserte metoder bruker innrapporterte aktivitetsdata (industriproduksjon, transport, osv.) sammen med utslippsfaktorer til å beregne utslipp. Observasjonsbaserte metoder benytter målinger av konsentrasjoner av klimagasser og deres endringer i tid og rom til å beregne utslipp.

<sup>2</sup> <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/copernicus-expansion-missions>

og observasjonsdata til verifikasjon av det norske utslippsregnskapet, men Miljødirektoratet, SSB og NIBIO har uttrykt interesse for slik bruk av CO2M-data, særlig dersom CO2M gir data av god kvalitet på områder hvor det er stor usikkerhet i utslippsregnskapet.

Den norske miljøforvaltningen og eventuelt miljøorganisasjoner kan ha nytte av CO2M-data som en ekstra kilde til informasjon om andre lands utslipp. Regjeringens klima- og skoginitiativ bruker satellittdata til overvåking av arealbruksendringer, og kan være en potensiell bruker.

Miljødirektoratet publiserer årlig et kommunefordelt utslippsregnskap. På lokalt nivå er det til dels betydelig usikkerhet knyttet til enkelte utslippskilder, og forbedring av dette utslippsregnskapet kan ha nytteverdi for kommuner og fylkeskommuner. Det er imidlertid svært usikkert om CO2M vil gi data som vil kunne brukes til dette formålet gitt Norges beliggenhet langt mot nord og med relativt små utslipp.

Den kanskje største brukeren av CO2M-dataene vil være forskningsmiljøer bestående av universiteter, forskningsinstitutter og forskningsavdelinger i bedrifter. Det er betydelige kunnskapshull om både karbon- og metansyklusen, og satellittdata gir mange nye muligheter for å fylle noen av disse kunnskapshullene. Få norske aktører bruker klimagassobservasjoner fra satellitter direkte i sin forskning/virksomhet i dag. Økt forskningsaktivitet vil mest sannsynlig gi økt bruk av CO2M-data og tilhørende dataprodukt innen forvaltning, for eksempel for å bedre forstå hvordan karbon-syklusen på land responderer på klimaendringer.

I Europa bruker flere land atmosfæriske målinger til verifikasjon av deler av det nasjonale utslippsregnskapet. Erfaringene fra disse landene er at det er behov for høy grad av vitenskapelig kompetanse og utstrakt samarbeid mellom forskere og brukere over lang tid for å kunne utnytte observasjonsdata. Potensialet og utfordringene for bruk av observasjonsbaserte utslippsestimater er ulikt for ulike klimagasser. Bruken av observasjonsbaserte estimater er i dag mest utbredt for F-gasser, mens enkelte land bruker/prøver ut bruk av observasjonsbaserte estimater for CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O.

Strukturen i CO2MVS kan fungere som et utgangspunkt for hva slags kompetanse det er behov for å utvikle for å nyttiggjøre seg dataene, og hvor det er muligheter for norske aktører til å bidra med kompetanse inn i CO2MVS. Styrken til CO2M-data kommer til sin rette i kombinasjon med modeller og andre data. Derfor vil man ha behov for alle elementene i CO2MVS for å kunne bruke CO2M-data effektivt (om enn i noe varierende grad for ulike bruksområder). Innenfor hver del i CO2MVS-rammeverket er det behov for norsk kompetanse, både ved å bidra til å levere data og utføre modellering, og til å bruke resultatene.

Veikartet starter med en kort innledning og fortsetter med en beskrivelse av CO2M-satellittene, deres instrumenter, og analyse av måledata for å utlede mengden av CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> og aerosoler. Videre beskrives infrastrukturen CO2MVS for å koble CO2M-data til utslipp og kvantifisering av disse. Veikartet presenterer også andre eksisterende og framtidige satellittbaserte målinger av klimagasser med mulig relevans for Norge. Deretter gis en oversikt over norsk forvaltning og klimaregnskap både på nasjonalt og kommunalt nivå. En analyse av nasjonale brukerbehov og utviklingsbehov følger. Veikartet avsluttes med anbefalinger for veien videre for Norge vedrørende CO2M og CO2MVS.

Anbefalingene inkluderer både forstudier og studier etter satellittene er skutt opp. Det er ønskelig med forbedring av tidsmessig og romlig oppløsning av inngangsdata brukt i analysen av CO2M-data. Både inngangsdata og CO2M-data bør verifiseres og valideres mot bakkemålinger. Dekningsgraden av CO2M-data over Norge bør undersøkes. Nyttepotensialet til CO2M-data for norske aktører bør vurderes og studier av synergieffekter med andre målinger/produkter bør gjennomføres. Det bør undersøkes hvilken informasjon inversjonsmodeller kan gi om norske utslipp fra land og hav basert på

CO2M-målinger. Det er behov for å forbedre norske invers-modeller for å håndtere datamengden fra CO2M. Potensialet til CO2M og CO2MVS til å forbedre norske klimagass-estimer bør undersøkes gjennom kasusstudier og nøkkelkomponentene til beslutningsstøttesystemet bør identifiseres. Videre bør alternative anvendelser av CO2M-data undersøkes. For formidling om CO2M og CO2MVS bør grafiske verktøy og informasjonsmaterial utarbeides. Norsk ekspertise bør opprettholdes og utvikles gjennom kunnskapsoverføring gjennom en møteplass for CO2M/CO2MVS.



# Nasjonalt veikart for CO2M/CO2MVS

## 1. Innledning

Norge tallfester og rapporterer sine klimagassutslipp til De forente nasjoners (FN) klimakonvensjon<sup>3</sup>. Målet med klimakonvensjonen er å begrense alle lands utslipp av skadelige klimagasser. Tallfesting av utslippene kan gjøres både med aktivitets- og observasjonsbaserte metoder. *CO<sub>2</sub> Monitoring-satellittene* (CO2M), som skal skytes opp i 2025/2026, vil sammen med dataintegrerings- og brukerstøtte-systemet *CO<sub>2</sub>-emissions Monitoring and Verification Support Capacity* (CO2MVS) gi en ny mulighet for observasjonsbasert estimering av utslipp av blant annet CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>.

Dette nasjonale veikartet for CO2M beskriver hvordan Norge kan nyttiggjøre seg av data fra CO2M og CO2MVS i forvaltning, forskningsmiljøer og næringsliv.

Veikartet starter med en beskrivelse av CO2M-satellittene, deres instrumenter, analyse av måledata for å utlede ønsket målestørrelse og nødvendig infrastruktur for å koble CO2M-data til utslipp og kvantifisering av disse (CO2MVS), kapittel to. Kapittel tre tar for seg andre eksisterende og framtidige satellittbaserte målinger av klimagasser med mulig relevans for Norge. I kapittel fire gis en oversikt over norsk forvaltning og klimaregnskap både på nasjonalt og kommunalt nivå. Nasjonale brukerbehov og utviklingsbehov beskrives i henholdsvis kapittel fem og seks. Veikartet avsluttes med anbefalinger for veien videre for Norge vedrørende CO2M og CO2MVS i kapittel syv.

## 2. Beskrivelse av CO2M-satellittene og CO<sub>2</sub>-emissions Monitoring and Verification Support Capacity (CO2MVS)

CO2M-satellittsatsningen vil bestå av to til tre satellitter. Den vil være operasjonell fra 2026 med en levetid på minimum 12 år for å dekke minst to globale gjennomganger (*global stocktake*, gjøres hvert 5. år fra 2023 i henhold til Paris-avtalen). CO2M-satellittene er rom-komponenten av tjenesten CO2MVS for overvåking av CO<sub>2</sub>-utslipp. CO2MVS er under utvikling i regi av EUs atmosfæretjeneste CAMS (*Copernicus Atmospheric Monitoring Service*) i samarbeid med *European Space Agency* (ESA) og *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT). CO2MVS skal tilby utslippsregnskap for megabyer<sup>4</sup> (byer står for om lag 70% av fossile CO<sub>2</sub>-utslipp, Duren og Miller, 2012), viktige industriområder, mindre regioner, land og globalt. I tillegg til rom-komponenten dedikert til måling av CO<sub>2</sub>, inkluderer tjenesten et tilhørende bakkenettverk av CO<sub>2</sub>-målinger med europeisk fokus, og en operasjonell data-assimileringstjeneste for CO<sub>2</sub>-utslippsberegninger.

Motivasjon og bakgrunn for et system som CO2MVS er gitt i Ciaï et al. (2014). En oversikt over CO2MVS er gitt av Janssens-Maenhout et al. (2020). CO2M-satellittene og CO2MVS beskrives under.

### 2.1 CO2M-satellittene

Formålet med CO2M satellitt-satsningen er å gi EU en operasjonell kapasitet som kan bidra til global overvåking av menneskeskapt CO<sub>2</sub>-utslipp. Dette gjøres ved å bruke satellittinstrumenter til å måle solstråling reflektert fra jorden og atmosfæren. Instrumentene på CO2M vil primært måle høykvalitets absorpsjonspektra i utvalgte bølglengdeområder, såkalte *Level-1* (L1) data. L1 data vil bli analysert ved bruk av strålingsmodeller for å utlede mengden av sporgasser og aerosoler (*Level-2* (L2) data). Analysen inkluderer mengden av CO<sub>2</sub> i en vertikal kolonne mellom satellitten og jordens overflate. Mengden CO<sub>2</sub> rapporteres som forholdet mellom totalkolonnen av CO<sub>2</sub> og totalkolonnen til tørr luft. Den betegnes XCO<sub>2</sub> og har enhet ppm (*parts per million*). Menneskeskapt CO<sub>2</sub>-utslipp kommer på

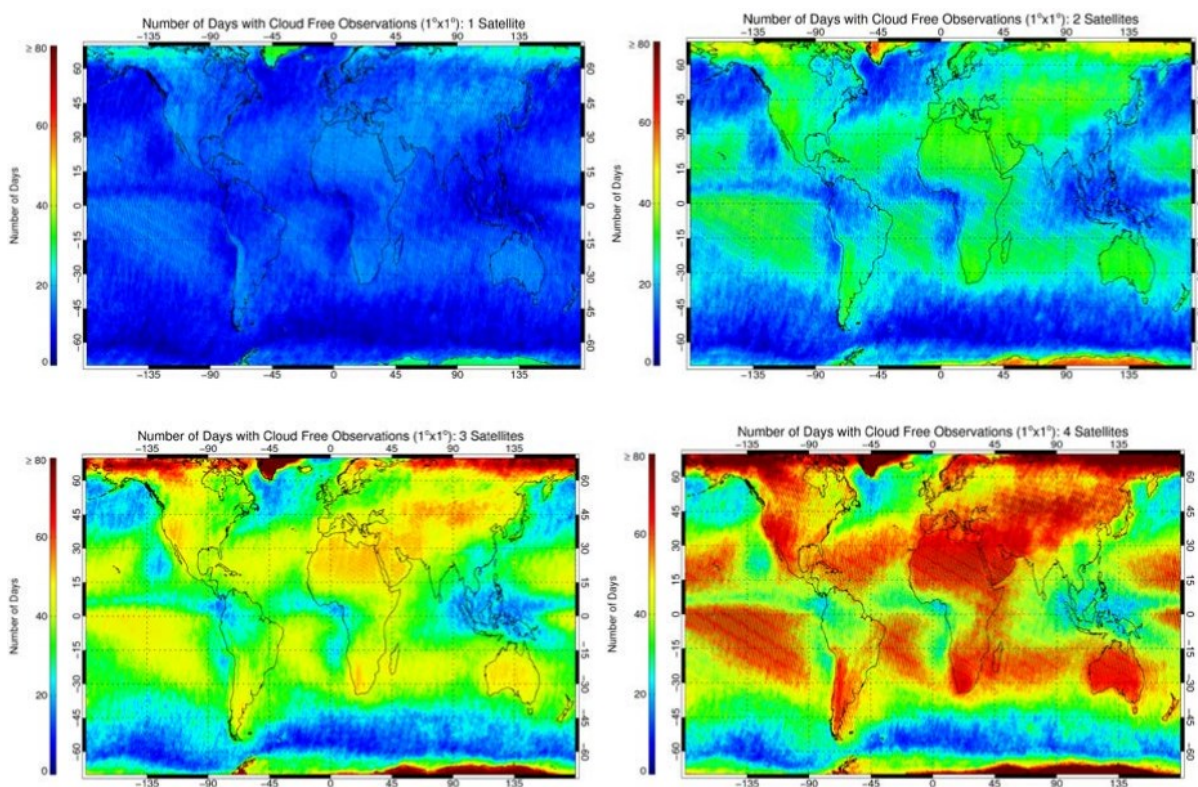
<sup>3</sup> <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/fns-klimakonvensjon>

<sup>4</sup> By som har over 10 millioner innbyggere.

toppen av bakgrunnsnivået av CO<sub>2</sub>. Dette setter strenge krav til presisjon og nøyaktighet for målingene og dataanalyse. For dataanalysen er det spesielt viktig å ha en god beskrivelse av hvordan lys spres i atmosfæren av skyer og aerosoler. L2-data planlegges brukt operasjonelt i atmosfærisk inversjon for å kartlegge menneskeskapte CO<sub>2</sub>-utslipp og tilhørende usikkerheter. I tillegg til CO<sub>2</sub>-målinger vil CO2M også gi informasjon om metan (CH<sub>4</sub>) som er den nest viktigste menneskeskapte drivhusgassen. For å bedre kunne lokalisere menneskeskapte CO<sub>2</sub>-utslipp vil nitrogendioksid (NO<sub>2</sub>), som dannes blant annet ved forbrenning av fossilt drivstoff, også bli målt.

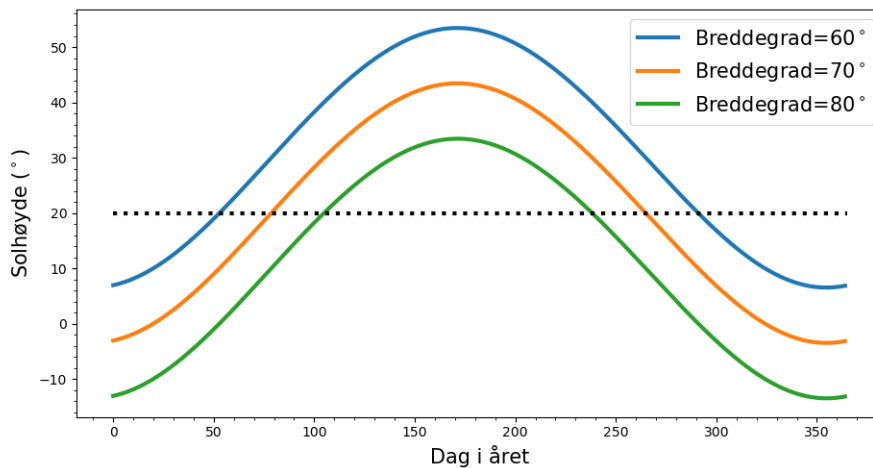
### 2.1.1 Satellitter

CO2M vil bestå av to til tre satellitter. For å kunne gi nøyaktig og presis informasjon om utslipp fra megabyer, viktige industriområder, mindre regioner, land og hele jordkloden kreves høy romlig oppløsning (2x2 km<sup>2</sup>) samtidig som målestriben må være bred nok til å dekke aktuelle utslippsområder (>250 km). Med en satellitt trengs 11 dager for å få global dekning med en målestribe på 250 km. Med to og tre satellitter oppnås global dekning på henholdsvis seks og tre dager (Lu et al., 2022). Figur 2.1 viser resultater fra en modellstudie hvor man har beregnet antall måledager per år for 1-4 satellitter hvor også skydekke er tatt hensyn til.



Figur 2.1: Antall mulige måledager per år for en 1°x1° grid for 1 (topp venstre), 2 (topp høyre), 3 (bunn venstre) og 4 (bunn høyre) satellitter. Antall skyfrie dager er utledet fra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. Fra ESA (2019).

Pålitelig CO<sub>2</sub>-dataanalyse krever at solen er mer enn 20° over horisonten. Figur 2.2 viser hvilke dager i året dette gjelder for breddegrader på 60°, 70° og 80°. På grunn av Norges beliggenhet langt mot nord, vil ikke CO2M-målinger være mulig i vintermånedene. Det vil si perioden november-februar for Syd-Norge og om lag oktober-mars for Nord-Norge.



Figur 2.2: Solhøyden gjennom året for forskjellige breddegrader.

Norges beliggenhet gjør også at polare satellitter oftere vil måle samme område over Norge enn over ekvator. For breddegrad 60° vil det ta 5-6 dager mellom hver overflyvning med en satellitt. For to og tre satellitter er tallene henholdsvis 3 og 2 dager. Av disse overflyvningene vil i overkant av 50% være påvirket av skyer og dataene vil ikke kunne analyseres for CO<sub>2</sub> (Figur 2.1). Videre vil Norges komplekse topografi redusere mengden data ytterligere med mindre CO2M analyse-algortimene tar hensyn til dette.

For å kunne identifisere og beskrive variasjoner fra år til år, samt se forskjellen på disse variasjonene og trender i drivhusgasser, planlegges det for at levetiden til CO2M-satellittene og tilhørende systemer skal være minst 12 år. Med oppskyting i 2026 vil da to globale gjennomganger av drivhusgasser dekkes.

Et spesialnummer av *Frontiers in Remote Sensing*<sup>5</sup> er dedikert til beskrivelse av CO2M.

## 2.1.2 Instrumenter

Hver CO2M-satellitt vil ha tre instrumenter for måling av CO<sub>2</sub> og tilleggsinformasjon som er uunnværlig for nøyaktig og presis beregning av totalkolonnen av CO<sub>2</sub> (XCO<sub>2</sub>).

### 2.1.1.1 CO<sub>2</sub> og NO<sub>2</sub> Imaging spektrometer (CO2IS/NO2IS)

CO2M bygger på erfaringene fra tidligere satellitter med instrument for måling av CO<sub>2</sub> (SCIAMACHY, GOSAT og OCO-2, se kapittel 3). Kravene til presisjon for XCO<sub>2</sub> er 0,7 ppm og nøyaktigheten må være bedre enn 0,5 ppm (ESA, 2019). Det medfører at man må ha samlokaliserte målinger av skyer, aerosoler, fluorescens og vanddamp (H<sub>2</sub>O) for å korrigere for effekten av disse på målingene. Videre krever målinger av XCO<sub>2</sub> med høy presisjon og nøyaktighet algoritmer med komplett beskrivelse av fysikken til solstrålingens bane gjennom atmosfæren. Algoritmene sammenligner målte spektra med spektra beregnet av strålingsmodeller. Innputt (*a priori* estimat) til strålingsmodellene er refleksjonsegenskapene til bakken, mengden og type aerosoler, temperatur- og trykkprofiler, profiler av sporgasser og geometrisk informasjon om solvinkler og observasjonsvinkler til satellitten. Mengden av sporgass endres på en systematisk måte (ved bruk av optimeringsmetoder) til man finner et

<sup>5</sup> <https://www.frontiersin.org/research-topics/20546/anthropogenic-emission-monitoring-with-the-copernicus-co2-monitoring-mission#overview>

modellestimat (*a posteriori* estimat) som best stemmer med målingene. Således er metodikken tilsvarende den som brukes ved invers modellering illustrert i Figur 2.5. Algoritmene bruker informasjon fra de tre spektralområdene SWIR-1 (*short wave infrared*) som inkluderer et svakt CO<sub>2</sub> absorpsjonsbånd og CH<sub>4</sub> absorpsjon; SWIR-2 som domineres av sterk absorpsjon av CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O; og NIR (*near infrared*) som inkluderer O<sub>2</sub>-A absorpsjonsbåndet (Tabell 2.1; Buchwitz et al., 2000; Heymann et al., 2015). SWIR-1 og SWIR-2 gir informasjon om CO<sub>2</sub> mens NIR brukes til å korrigere for vanddamp, lufttrykk, aerosoler og fluorescens fra vegetasjon (Frankenberg et al., 2011).

Tabell 2.1: Spektrale bølglengdeområder dekket av CO<sub>2</sub>IS/NO<sub>2</sub>IS.

Produkt	Bånd ID	Spektralt bølglengdeområde (nm)	Spektral oppløsning (nm)
XCO <sub>2</sub>	NIR	747-773	0.12
	SWIR-1	1590-1675	0.3
	SWIR-2	1990-2095	0.35
NO <sub>2</sub>	VIS	405-490	0.6

Primærmålene med CO<sub>2</sub>M tilsier at man tilstreber god dekning over og nær menneskeskapte utslipp. Prioritet vil bli gitt til landområder hvor man vil observere i nadir modus (det vil si man ser rett ned mot bakken/overflaten). I tillegg vil man observere over havområder både for å kunne studere utstrømning av CO<sub>2</sub> fra byer og andre kystnære kilder, og for å kunne beskrive bakgrunnsnivå. På grunn av den lave tilbakespredningen av sollys fra hav vil observasjoner over hav gjøres i såkalt solglimtmodus (*sun glint-mode*). Det vil si at i stedet for å se rett ned (nadir) vil instrumentene se ned mot overflaten i den samme vinkelen som til det innkommende sollyset. I solglimt-modus vil målestriben reduseres betraktelig til omtrent 30 km. Videre vil målinger i solglimt-modus generelt gi dårligere romlig oppløsning.

### 2.1.1.2 Multi-angle polarimeter (MAP)

Påvirkning av skyer og aerosoler på spektromettermålingene er den viktigste begrensningen for nøyaktig og presis måling av XCO<sub>2</sub>. Dette er vist ved analyse av data fra SCIMACHY, GOSAT og OCO-2. Spredt stråling fra skyer og aerosoler er inkludert i spektromettermålingene og kan delvis korrigeres for ved å bruke informasjonen om strålingens bane utledet fra NIR-båndet. Dog, denne korrigeringen er ikke tilstrekkelig for alle atmosfæriske forhold. Pågående studier viser at egne målinger av tynne skyer og aerosoler gir mer nøyaktige verdier for XCO<sub>2</sub> (Lu et al., 2022). Et eget instrument, *multi-angle polarimeter* (MAP), for måling av tynne skyer og aerosoler vil derfor være en del av CO<sub>2</sub>M. MAP vil gi informasjon om:

- Høyden på tynne sky- og aerosollag med en nøyaktighet på ~500 m.
- Optisk tykkelse<sup>6</sup> på skyer og aerosol mellom 0-0,5 med en nøyaktighet bedre enn 0,05.
- Aerosol optiske egenskaper som størrelsesfordeling, refraksjonsindeks (kjemisk sammensetning) og bølglengdeavhengigheten til disse.

For å kunne gi denne informasjonen vil MAP måle stråling i 6 spektrale kanaler inkludert polarisasjon ved 0°, 60° og 120° (Tabell 2.2). Dette vil gjøres for >40 vinkler mellom -60° og 60° langs satellittens flyretning med en romlig oppløsning på 4x4km<sup>2</sup>.

<sup>6</sup> Optisk tykkelse beskriver hvor mye stråling som slipper gjennom et stoff. Det har ingen enhet.

Tabell 2.2: MAP kanaler.

MAP kanal ID	Senter bølgelengde (nm)	Kanalvidde (nm)
VNIR-1	410	20
VNIR-2	443	20
VNIR-3	490	20
VNIR-4	555	20
VNIR-5	670	20
VNIR-6*	753	9
VNIR-7	865	40

\*VNIR-6 overlapper med NIR spektrometer for krysskalibrering og samlokalisering. Inkluderer ikke polarisasjon.

### 2.1.1.3 Cloud Imager (CLIM)

Det er ikke ønskelig med skyer i XCO<sub>2</sub>-målingene. CO<sub>2</sub>M vil derfor inneholde et eget instrument, *Cloud Imager* (CLIM), for deteksjon av skyer. For tynne og spredte skyer er målet å kunne detektere skydekke ned mot 1-5%. CLIM vil ha en romlig oppløsning på 400m for å kunne se sub-piksel skyer i spektrometermålingene. Skydeteksjon vil gjøres ved å måle reflektert solstråling i tre kanaler, Tabell 2.3.

Tabell 2.3: CLIM kanaler.

MAP kanal ID	Senter bølgelengde (nm)	Kanalvidde (nm)
CLIM-1	670	20
CLIM-2*	753	9
CLIM-3	1378	15

\*CLIM-2 overlapper med NIR spektrometer og MAP for krysskalibrering og samlokalisering.

## 2.2 Datahåndtering

For hvert omløp rundt jorden vil hver CO<sub>2</sub>M-satellitt gjøre om lag 1.1 millioner målinger. Av disse vil omtrent 200.000 være under værforhold (ingen skyer) som gjør analyse mulig. Den estimerte størrelsen på L1-produkt for et omløp er ~20 Gb mens L2-produkt er på ~5 Gb. For et døgn blir det om lag 289 Gb med L1-data og 72 Gb med L2-data. Et år med L1- og L2-data tilsvarer omtrent 132 Tb.

EUMETSAT vil stå for den operasjonelle driften av CO<sub>2</sub>M-satelittene, prosessering og formidling av dataene. Dataanalysen for å hente ut mengden sporgasser og beregne utslipp er krevende. Det gjør at skybaserte løsninger, hvor data er sentralt tilgjengelig og analyseprogram lastes opp og kjøres sentralt, er å foretrekke. Et eksempel på den slags framtidige metoder for datahåndtering er Destination Earth<sup>7</sup>.

## 2.3 Dataprodukter

For hvert dataprodukt (Tabell 2.4) vil egne dataanalyser gjøres. For enkelte dataprodukt vil flere metoder brukes for å synliggjøre innvirkning på og usikkerhet i dataene pga. forskjeller i modeller, metoder, antagelser og bakgrunnsdata.

<sup>7</sup> DestinE, <https://www.eumetsat.int/who-we-work/destine>

Tabell 2.4: Dataprodukt fra CO2M planlagt levert av EUMETSAT.

Dataprodukt	Formål
XCO2	Vertikalkolonnen av CO <sub>2</sub> , primært produkt
XCH4	Viktig drivhusgass, proxy for XCO2.
NO <sub>2</sub>	Proxy for menneskeskapt XCO2. Brukes til identifisering av XCO2 kilder, retning og vindhastighet til lokal sporgassky.
Solindusert fluorescens fra vegetasjon	Skille ut bidrag til XCO2 fra grønne områder i og rundt byområder.
Aerosol optisk tykkelse	Korreksjon for aerosoler
Aerosol laghøyde	Korreksjon for aerosoler
Vanddamp-kolonne	Korreksjon for vanddamp
Sky topphøyde	Korreksjon for skyer, skyfiltrering
Sky optisk tykkelse	Korreksjon for skyer, skyfiltrering
Bakke-lufttrykk	Korreksjon for luftmengde

Analysemetodikk for de forskjellige produktene er kort beskrevet under.

### 2.3.1 XCO2 og XCH4

Utleddning av XCO2 og XCH4 fra CO2IS-målinger vil bli gjort med dedikerte algoritmer. Eksisterende algoritmer utviklet og brukt på tilsvarende målinger blir videreutviklet og tilpasset CO2M. Utvikling av analyseprogramvare skjer i regi av EUMETSAT<sup>8</sup>. Tre algoritmer vurderes:

- FOCAL (*Fast atmOspheric traCe gAs retrieval*), utvikles og vedlikeholdes av *Institute of Environmental Physics* (IUP) ved universitetet i Bremen (IUP-UB).
- UoL FP (*University of Leicester Full 'Full Physics'*), utvikles og vedlikeholdes av universitetet i Leicester.
- RemoTAP, utvikles og vedlikeholdes av SRON, *Netherlands Institute for Space Research*.

Algoritmene bruker SWIR-1 og SWIR2 for XCO2 og XCH4 og NIR for korreksjon. Videre brukes informasjon fra vær- og klimamodeller (vertikal-profiler av sporgasser, bakkealbedo, høyde over havet med mer). En sterkt begrensende faktor ved utledning av XCO2 og XCH4 er spredning av stråling på aerosoler. Noen versjoner av algoritmene benytter seg av aerosol-informasjon fra MAP for å korrigere for påvirkning av aerosoler. CLIM benyttes til skyfiltrering. Kompleks topografi som norske fjorder og fjell, er vanskelig å håndtere for algoritmene. Videre er målinger over hav krevende å analysere på grunn av at lite solstråling reflekteres tilbake fra havet for de bølgelengder hvor CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> absorberer. Målinger over hav vil derfor gjøres i solglimt-modus. Dette modus krever tilpassede algoritmer og dette arbeides det med. Kompleks topografi er vanskelig å inkludere eksplisitt i data-analysen. For eksempel for TROPOMI så analyserer FOCAL data for fjellområder, mens RemoTAP gjør det ikke. Kvaliteten på de analyserte data over hav og for kompleks topografi kan kun vurderes ved å sjekke de mot uavhengige bakkemålinger.

<sup>8</sup> <https://www.eumetsat.int/CO2M-level2-science>

### 2.3.2 NO<sub>2</sub>

Nitrogen dioksid (NO<sub>2</sub>) dannes blant annet i forbindelse med forbrenning av fossilt brensel. NO<sub>2</sub> kan derfor brukes som en proxy for CO<sub>2</sub> nært utslippsstedet. Deteksjon og utledning av NO<sub>2</sub> gjøres i den synlige delen av solspekteret hvor signal-støy forholdet er langt større enn i den delen hvor CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> måles. Måling av NO<sub>2</sub> vil støtte oppunder målingene av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> og muliggjøre bedre bestemmelse av plassering og form på utslippsskyer av disse.

Utvikling av analysealgoritmer styres av EUMETSAT<sup>9</sup> og baseres på erfaring med tilsvarende NO<sub>2</sub>-produkt fra for eksempel Sentinel 5P. Tilpasning av algoritmer til CO2M må ta hensyn til at

- CO2M har høy romlig oppløsning.
- CO2M har lokal overflyvingstid midt på dagen som er forskjellig fra tidligere satellitter for måling av CO<sub>2</sub>.
- CO2M inkluderer instrument for aerosol-korreksjon (MAP) og sky-korreksjon (CLIM).
- Over hav vil CO2M observere i solglimt-modus.

Det bemerkes at i tillegg til å være en proxy for CO<sub>2</sub>-målinger, vil NO<sub>2</sub>-målingene også kunne brukes til luftkvalitets-produkter innenfor for eksempel *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*.

### 2.3.3 Aerosoler

Aerosoler påvirker målinger av sporgasser. Mengden aerosoler kan variere mye både i tid og rom. Egne målinger av aerosol-parametere for å kunne kvantifisere disse og om mulig, korrigere for dem, er derfor av stor nytte (Rusli et al., 2021). MAP vil gi unik informasjon som kan brukes til å utlede en rekke aerosol-parametere. Disse inkluderer bølgelengdeavhengig aerosol absorpsjon og optisk tykkelse, midlere høyde på aerosollag og størrelsesfordeling (Chen et al., 2020). For analyse av MAP-data planlegger man å bruke algoritmen GRASP (*Generalized Retrieval of Atmosphere and Surface Properties*<sup>10</sup>). Det arbeides også med metoder som samtidig analyserer CO2IS og MAP-målinger for XCO<sub>2</sub> (Lu et al., 2022).

Som for NO<sub>2</sub>, vil aerosol-produktene i seg selv være av interesse for bedømmelse av luftkvalitet i tillegg til å gi viktig aerosol-informasjon for korreksjon av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>-målingene.

### 2.3.4 Skyer

Det er ønskelig med minst mulig påvirkning fra skyer i CO2IS-piksler. Både skyer i pikselet og skyer i nabo-piksler kan påvirke nøyaktigheten til CO2IS-målingene. Målingene fra CLIM vil derfor bli analysert for å detektere skyer. CLIM-analysen<sup>11</sup> vil benytte standard skydeteksjonsmetoder for å generere en skymaske.

### 2.3.5 Fluorescens

Fluorescens fra vegetasjon påvirker målingene i O<sub>2</sub>A-båndet. Disse målingene brukes blant annet til aerosol-korreksjon. Det er derfor viktig å separere effektene av fluorescens og aerosoler på målingene i O<sub>2</sub>A-båndet slik at aerosolkorreksjonen blir så nøyaktig som mulig (Frankenberg et al., 2011). Metode for utledning av fluorescens fra målinger i O<sub>2</sub>A-båndet er beskrevet av Frankenberg et al. (2011).

<sup>9</sup> <https://www.eumetsat.int/CO2M-NO2-Level-2>

<sup>10</sup> Se <https://www.grasp-open.com/> og <https://www.eumetsat.int/CO2M-aerosol-level-2>

<sup>11</sup> Se også <https://www.eumetsat.int/CO2M-CLIM-Level-2>.

Fluorescens-målinger vil også gi informasjon om primær produktivitet gjennom vekstsesongen. De vil således være uvurderlige for å skille ut bidrag til XCO<sub>2</sub> fra grønne områder i og rundt byområder.

## 2.4 Kalibrering/validering

Kalibrering og validering av data og dataprodukter fra CO<sub>2</sub>M vil skje på flere nivåer. For L1 vil de forskjellige instrumentene kalibreres før oppskytning. Videre vil CO<sub>2</sub>IS/NO<sub>2</sub>IS-instrumentene jevnlig måle sol-spektra for å oppdage eventuelle endringer i respons. Felles kanaler på CO<sub>2</sub>IS/NO<sub>2</sub>IS, MAP og CLIM muliggjør krysskalibrering instrumentene imellom<sup>12</sup>.

Kalibrering og validering av L2-produktene gjøres mot tilsvarende produkter fra andre instrument. Dette vil primært være målinger gjort enten med instrument på fly eller på bakken. Presisjonen og nøyaktigheten til CO<sub>2</sub>M vil være slik at kalibrering mot L2-produkter fra andre satellittinstrument vil ha begrenset nytte.

Flymålinger vil typisk være kampanjebasert som for eksempel CoMet 2.0 Arctic<sup>13</sup>. De vil gi unik informasjon om vertikalfordeling av sporgasser og er til stor nytte både for kalibrering og validering, men også for uttesting av algoritmer for utledning av L2-produkt.

Bakkemålinger vil være den primære kilden for kalibrering og validering av XCO<sub>2</sub>- og XCH<sub>4</sub>-produkter fra CO<sub>2</sub>M, se under.

## 2.5 Bakkenettverk

Målinger med instrument på bakken kan gi informasjon om både totalkolonnen og in situ-verdier av sporgasser. Bakkemålinger av totalkolonnen av en sporgass er nødvendige for kalibrering og validering av tilsvarende satellittmålinger. De vil gi data på tidspunkt når satellittene ikke er over bakkestasjonene og kontinuerlige bakkemålinger vil gi informasjon om døgnvariasjoner som ikke er tilgjengelig fra CO<sub>2</sub>M-satellittene. Bakkemålinger vil også kunne brukes i atmosfærisk inversjon sammen med satellittdataene.

Et troverdig kalibrering- og validerings-system basert på bakkemålinger krever at bakkemålingene måler den samme størrelsen som satellitten måler: totalkolonnen av XCO<sub>2</sub>, XCH<sub>4</sub> og NO<sub>2</sub> (Pinty et al., 2019). Et slikt bakkenettverk må ha høy presisjon og nøyaktighet for å møte kvalitetskravene til CO<sub>2</sub>M-dataene.

Ideelt vil et bakkenettverk ha global dekning inkludert alle breddegrader og høyder over havet. Videre bør målestasjoner representere forskjellige bakkealbedo, aerosol-mengder, inkludere både bakgrunnsluftmasser og luftmasser nærmere utslippskildene, og dekke både innlands- og kystområder. Per dags dato er nettverket TCCON (*Total Carbon Column Observing Network*)<sup>14</sup> den primære bakkestandard for kalibrering av satellittinstrument for XCO<sub>2</sub> og XCH<sub>4</sub>. Globalt finnes 27 TCCON stasjoner som vist i Figur 2.3. Norge drifter ingen TCCON instrument.

<sup>12</sup> [https://www.eumetsat.int/ground\\_based\\_network\\_capacity](https://www.eumetsat.int/ground_based_network_capacity)

<sup>13</sup> <https://www.halo-spp.de/Missions/CoMet-2-0-Arctic-2022/>

<sup>14</sup> [www.tccon.caltech.edu](http://www.tccon.caltech.edu)





Figur 2.3: TCCON stasjoner. Fra <https://tccodata.org/>.

TCCON-stasjoner er kalibrert mot *World Meteorological Organization* (WMO) standarder for drivhusgasser. De fleste TCCON-stasjonene er representative for bakgrunns-luftmasser og dekker geografisk Nord-Amerika, Europa, Øst-Asia og Australia, mens målinger for Sør-Amerika, Afrika, Sentral-Asia og India mangler (Belikov et al., 2017). Det er også begrenset med målestasjoner for høye breddegrader. For CH<sub>4</sub> konkluderer Tsuruta et al. (2023) med at flere bakkestasjoner er nødvendig for høye breddegrader for å bedre resultatene fra inversjonsmodeller. Det antas at tilsvarende gjelder for CO<sub>2</sub>.

TCCON-stasjoner er relativt store installasjoner. *Nettverket Collaborative Carbon Column Observing Network* (COCCON<sup>15</sup>) består av mindre instrumenter og er kalibrert mot TCCON. Det er dermed egnet til kampanjer og for studier hvor man ønsker flere instrument innenfor et begrenset område, for eksempel i og rundt et (mega-) byområde. Der er per dags dato ingen COCCON instrument i Norge.

For at totalkolonne-målinger fra satellitt og bakke skal kunne sammenlignes, må de samlokaliseres i tid og rom. Det er ikke-trivielt, da satellitt-målinger har en annen romlig utstrekning enn bakke-målinger. Det må også tas hensyn til forskjeller i tidsoppløsning på målingene. Felles for TCCON og COCCON er at for at målingene skal være representative for hele parameter-rommet for CO<sub>2</sub>M satellitt-målingene trengs ytterligere stasjoner (Pinty et al., 2019).

Totalkolonne-målinger av XCO<sub>2</sub> og XCH<sub>4</sub> er krevende og forutsetter skyfrie forhold. In situ-målinger har den fordelen at de kan gjøres under alle værforhold og dermed gi data når totalkolonne-målinger ikke er mulig. For Vest-Europa gjøres in situ-målinger av en rekke sporgasser inkludert CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>, i regi av *Integrated Carbon Observation System* (ICOS<sup>16</sup>).

ICOS-Norge er den norske komponenten av ICOS<sup>17</sup>. ICOS-stasjonene måler primært bakkekonsentrasjonen av drivhusgasser. Disse er ikke nødvendigvis direkte overførbare til total-kolonnen som måles av satellittinstrumenter. De norske lokalitetene inkluderer tårn for luftmålinger ved Birkenesobservatoriet i Sør-Norge og Zeppelinobservatoriet på Svalbard, en skogsstasjon i Sørøst-

<sup>15</sup> <https://www.imk-asf.kit.edu/english/COCCON.php>

<sup>16</sup> <https://www.icos-ri.eu>

<sup>17</sup> <https://no.icos-cp.eu/>

Norge (Hurdal), og to forskningsskip og to kommersielle skip i Nord-Atlanteren, Nordsjøen og områder rundt Svalbard. Data fra den atmosfæriske komponenten<sup>18</sup> inngår i den nasjonale overvåkingen av klimagasser i Norge (Myhre, et al., 2022).

Bakkemålinger av totalkolonnen av NO<sub>2</sub> gjøres blant annet av Pandora-nettverket<sup>19</sup>. NILU drifter Pandora-instrumentet i Ny-Ålesund.

WMO planlegger å implementere en *Global Greenhouse Gas Monitoring Infrastructure*<sup>20</sup> som kan komme til å spille en viktig rolle i å koordinere og sette felles standarder for hvor og hvordan in-situ CO<sub>2</sub>-målinger skal gjøres og for rutiner og protokoller for deling av dataene.

## 2.6 Data-assimileringstjeneste – CO2MVS

Overvåking av utslippstrender over flere år er en av de viktigste kapasitetene til CO<sub>2</sub>-overvåkningsinitiativet fra Copernicus (Pinty et al., 2017). Verken bakke- eller rombaserte målinger kan alene gi informasjon med tilstrekkelig oppløsning i rom og tid og presisjon og nøyaktighet til å identifisere store utslipp fra småskala kilder. Til dette trengs et system som sammenstiller målinger med annen informasjon om jorden og menneskelig aktivitet.

I løpet av det siste tiåret har fagmiljøene utviklet en skisse til et system som tilrettelegger for CO<sub>2</sub>-overvåking og verifisering, *CO2 emissions Monitoring and Verification Support*, (CO2MVS, Janssens-Maenhout et al., 2020). Det er planlagt at dette skal utvikles til en tjeneste som Copernicus-programmet kan levere. Hensikten er å levere data og informasjon som er relevant for bærekraftig utvikling og implementering av politikk (Janssens-Maenhout et al. 2020).

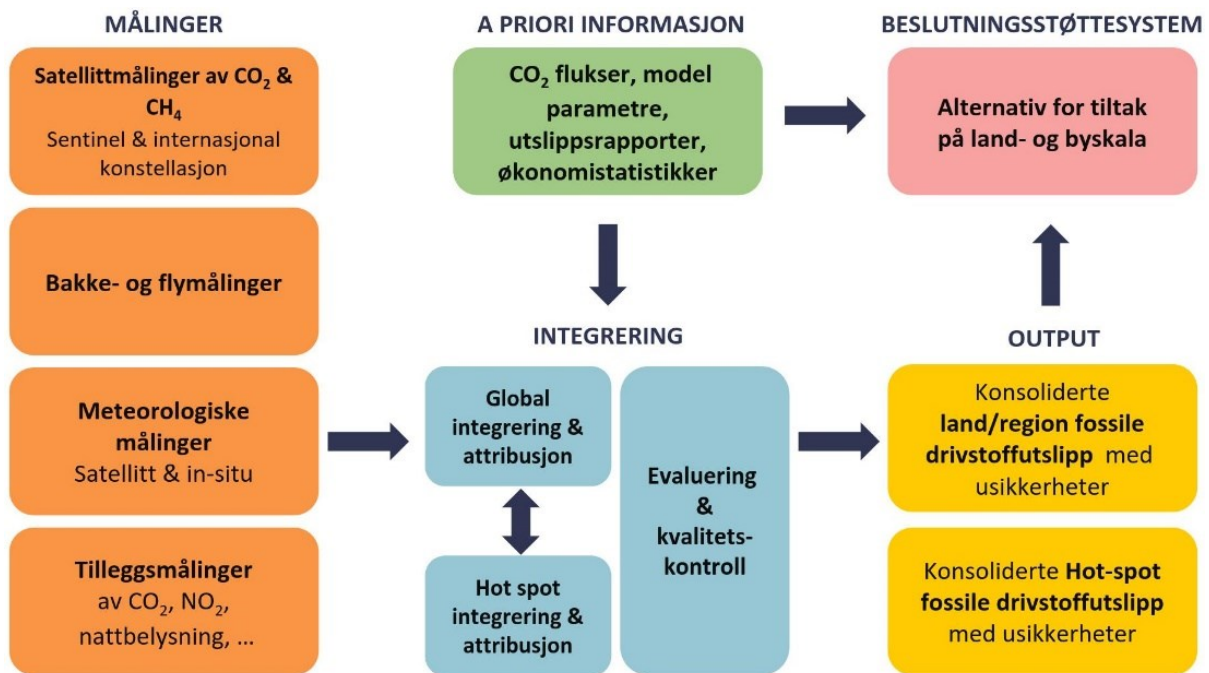
CO2MVS er en teknisk kapasitet som vil bruke CO2M satellitt-målinger sammen med utslippsdata. CO2MVS vil gi data som kan brukes til:

- Oppsporing av utslipp fra store utslippskilder som megabyer eller kraftverk.
- Overvåking av store utslippskilder for å vurdere betydning av tiltak for å redusere utslipp.
- Vurdering av endringer i utslipp mot nasjonalt fastsatte bidrag, (*Nationally Determined Contribution*, NDC).
- Vurdering av nasjonale utslipp og endringer over femårsperioder og deres bidrag til globale utslipp under Parisavtalen (*global stocktake*).

<sup>18</sup> <https://no.icos-cp.eu/atmospheric-component>

<sup>19</sup> <https://www.pandonia-global-network.org/>

<sup>20</sup> <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/greenhouse-gases/global-greenhouse-gas-monitoring-infrastructure> og [https://filecloud.wmo.int/share/s/aSeMP8\\_WSQimEhHi4qWWyW](https://filecloud.wmo.int/share/s/aSeMP8_WSQimEhHi4qWWyW)

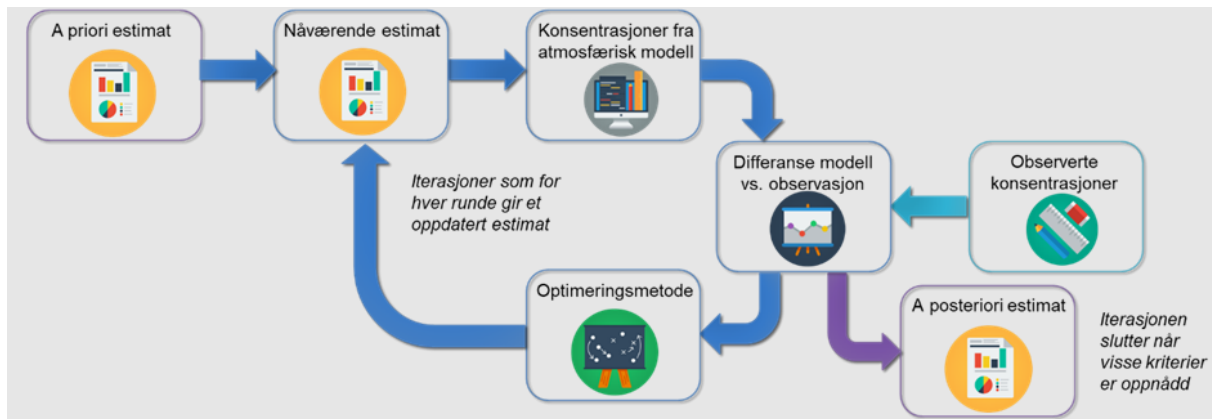


Figur 2.4: Oversikt over CO2MVS.

CO2MVS består av flere komponenter, se Figur 2.4. Målinger og *a priori* informasjon (inngangsdata) integreres for eksempel med modeller for å produsere utdata eller *a posteriori* estimater (reviderte utslippsestimater). Dette blir deretter benyttet i et beslutningsstøttesystem (for eksempel brukerfunksjoner). Beslutningsstøttesystemet er der brukerverdien tilføres. Det gjøres ved å oversette de komplekse utdataene til et mer sammenlignbart og forståelig format for brukerne, og kan avhenge av hvilken romlig og tidsmessig skala som er av interesse.

*A priori* informasjon kan være utslippsdata fra nasjonale utslippsregnskap eller andre datakilder med en romlig og tidsmessig oppløsning som er tilpasset modellen. I tillegg kan det være behov for *a priori* informasjon om karbonflukser i land og hav, samt annen statistikk avhengig av modellen som brukes.

Integrasjonsdelen av CO2MVS består i stor grad av modellering eller intensiv dataanalyse. For eksempel brukes invers modellering (IM) til å finne den fordelingen av sporgasser som best passer med målingene. Dette innebærer at man bruker målte mønstre (i rom og tid) til konsentrasjoner av drivhusgasser og luftforurensning for å begrense *a priori* utslippsestimat av de gassene man ønsker å studere, se Figur 2.5. Som vist i Figur 2.5 bruker man et innledende utslippsestimat, for eksempel basert på nasjonale utslippsregnskap, som driver i en atmosfærisk modell. Modellen simulerer klimagasskonsentrasjoner i tid og rom, og disse sammenliknes med målte klimagasskonsentrasjoner. Gjennom en optimaliseringsprosess vil modellen justere det innledende utslippsestimatet inntil man oppnår et rimelig samsvar mellom de simulerte og de målte konsentrasjonene. Forskjellen mellom det innledende utslippsestimatet og *a posteriori* utslippsestimatet gir en indikasjon på om det er kvalitetsproblemer ved det nasjonale utslippsregnskapet, men man vil trenge ytterligere informasjon om hva som skjer i modellen for å kunne trekke konkrete konklusjoner.



Figur 2.5: Invers modellering.

CO2MVS vil bruke CO2M L2-data sammen med invers modellering og *a priori* utslippsinformasjon til å lage kart over utslipp av menneskeskapt CO<sub>2</sub> inkludert usikkerheter. Kaminski et al. (2022a) har vist at et slikt system vil støtte opp under nasjonale utslippsregnskap. Videre har Kaminski et al. (2022b) vist at CO2M sammen med dertil egnet invers modellering kan gi nyttige estimat for rapportering og verifisering for utslipp fra urbane områder.

De EU-finansierte Horisont 2020-prosjektene *CO<sub>2</sub> Human Emissions* (CHE<sup>21</sup>) og *Verifying greenhouse gas emissions* (VERIFY<sup>22</sup>) forberedte utviklingen av CO2MVS ved å identifisere komplementaritet mellom målinger, modellering og data-assimileringsmetoder (Balsamo et al., 2021). CHE videreføres med prosjektet *Prototype system for a Copernicus CO<sub>2</sub> service* (CoCO2<sup>23</sup>) som skal utvikle en prototype for å overvåke menneskeskapt CO<sub>2</sub> utslipp. CoCO2 bidrar til CO2MVS-kapasiteten som vil bli en del av EUs *Copernicus Atmosphere Monitoring Service*<sup>24</sup>. Videre vil Horisont 2020-prosjektene *Process attribution of regional emissions* (PARIS<sup>25</sup>) og *Attributing and Verifying European and National Greenhouse gas and aerosol Emissions and Reconciliation with Statistical bottom-up estimates* (AVENGERS<sup>26</sup>) bidra til CO2MVS. Utvikling av et observasjonsbasert overvåkningssystem for byer er målet for *ICOS Cities Pilot Applications in Urban Landscapes* (PAUL<sup>27</sup>). Prosjektet *Verifying Emissions of climate forcers* (EYE-CLIMA<sup>28</sup>) vil studere behovet for uavhengig verifisering av nasjonale drivhusgass-beholdninger. Dette vil gjøres ved å utvikle invers-modeller for observasjonbaserte estimat av utslipp på nasjonale og mindre romlige skalaer. EYE-CLIMA vil videre arbeide tett mot aktuelle forvaltningsmyndigheter for å se på hvilke produkter som trengs for verifisering og samordning av nasjonale drivhusgass-beholdninger.

Norske aktører har vært og er involvert i flere av disse prosjektene, CHE: NILU; VERIFY: CICERO, NILU og UiB; CoCO2: CICERO; PARIS: NILU; PAUL: NSD – Norsk senter for forskningsdata; EYE-CLIMA: NILU (koordinator) og CICERO. Deltakelse i prosjektene har gitt for eksempel CICERO og NILU sentrale roller i spesifiseringen og utviklingen av CO2MVS.

<sup>21</sup> <https://che-project.eu/>

<sup>22</sup> <https://verify.lsce.ipsl.fr/>

<sup>23</sup> <https://coco2-project.eu/>

<sup>24</sup> <https://atmosphere.copernicus.eu/cop26-cams-help-measure-progress-towards-co2-goals>

<sup>25</sup> [https://verify.lsce.ipsl.fr/images/Events/GA2002/WednesdayAM/VERIFY\\_PARIS\\_intro\\_2022.pdf](https://verify.lsce.ipsl.fr/images/Events/GA2002/WednesdayAM/VERIFY_PARIS_intro_2022.pdf)

<sup>26</sup> <https://verify.lsce.ipsl.fr/images/Events/GA2002/WednesdayAM/AVENGERS.pdf>

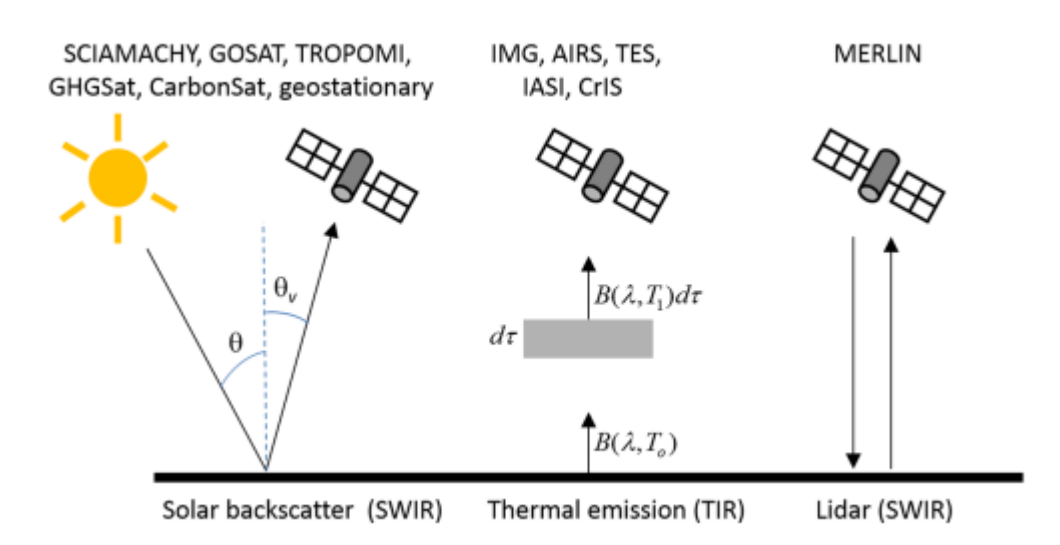
<sup>27</sup> <https://www.icos-cp.eu/projects/icos-cities-project>

<sup>28</sup> <https://eyeclima.eu/>

### 3. Andre relevante satellittbaserte klimagassmålinger og norske anvendelser

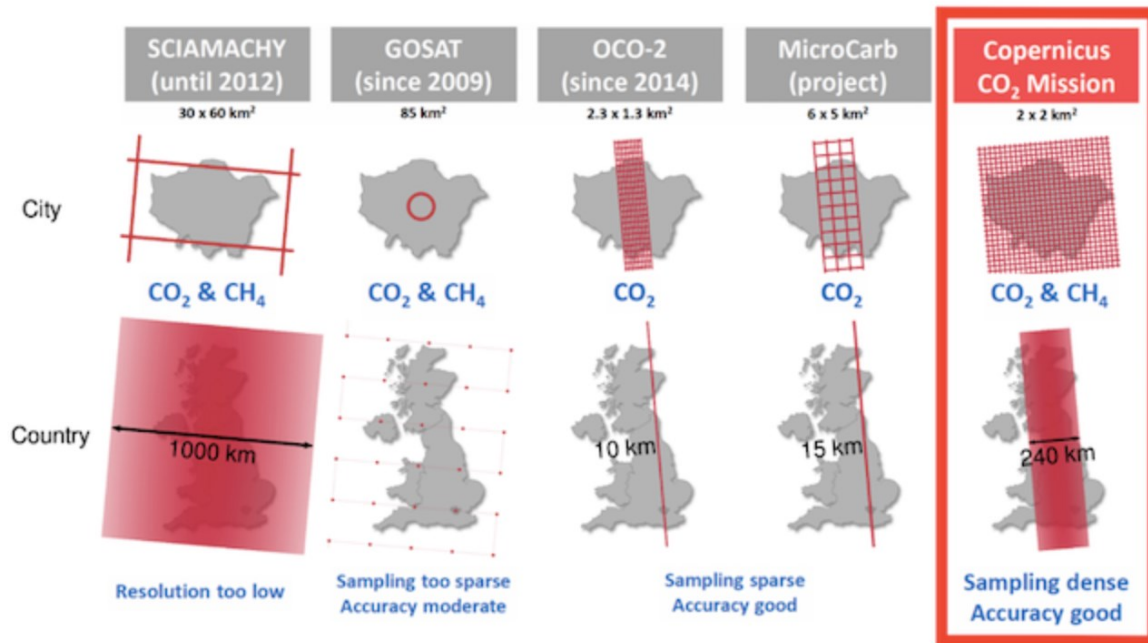
#### 3.1 Satellittbaserte klimagassmålinger

Nylige fremskritt innen satellittfjernmåling gjør det mulig å måle CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og andre klimagasser fra verdensrommet. Konsentrasjoner av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> kan estimeres ut fra høyoppløste spektra av reflektert sollys eller termisk stråling som sendes ut fra jordens overflate og atmosfære. Utledning av mengden av drivhusgasser kan gjøres i den kortbølgede infrarøde delen av solspekteret og i den infrarøde delen av det termiske spekteret (se Figur 3.1).



Figur 3.1: Forskjellige oppsett for å observere metan fra verdensrommet i de kortbølgede infrarøde (SWIR) og i termisk infrarød (TIR) delene av spekteret. Her er  $\vartheta$  senitvinkelen for solen,  $\vartheta_v$  er satellittens synsvinkel,  $B(\lambda, T)$  er svartlegemefunksjonen for bølgelengden  $\lambda$  og temperaturen  $T$  ( $T_o$  ved overflaten,  $T_1$  i høyden til den emitterende metanen), og  $d\tau$  er den optiske dybden til metan. Figur 2 fra Jacob et al. (2016).

Her konsentrerer vi oss om observasjoner av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> i det kortbølgede infrarøde bølgelengdeområdet, fordi det er kun i dette bølgelengdeområdet at instrumentfølsomheten dekker hele atmosfæren ned til jordens overflate. Dermed inkluderer målingene informasjon om overflateflukser som er essensielle for å identifisere kilder og tap av drivhusgasser (GHG). For en grundig oversikt over CO<sub>2</sub>- og CH<sub>4</sub>-observasjoner fra rombaserte sensorer, se Crisp et al., 2018 og Jacob et al., 2022. En viktig forskjell mellom instrumentene er om de er bygget for å observere klimagasskonsentrasjoner over et større område eller utslipp fra såkalte punktkilder. CO2M-målinger omfatter både global og regional skala. En sammenstilling av oppløsning og dekning for tidligere og eksisterende satellitter på by- og landsnivå er vist i Figur 3.2. Tidligere og eksisterende satellitter gir begrenset innblikk om CO<sub>2</sub>-utslipp. De viktigste tekniske forskjellene mellom instrumentene er pikselstørrelsen og bredden på målestripen. Med en målestripe på 240 km og pikselstørrelse på 2 x 2 km<sup>2</sup> vil CO2M gi hyppige observasjoner av CO<sub>2</sub> på global og regional skala.



Figur 3.2: Dekning og oppløsning til tidligere, eksisterende og planlagte CO<sub>2</sub> satellitt-instrumenter på by- og landsnivå. [Kilde: M. Buckwitz, University of Bremen, Germany].

### 3.2 Norsk bruk av klimagassdata fra satellitter

Per dags dato er det få norske aktører, e.g. NILU og *Center for Earth Evolution and Dynamics* (CEED) på forskningsfronten, og Carbon Limits og KSAT som kommersielle aktører, som bruker klimagassobservasjoner fra satellitter direkte i sin forskning/virksomhet. For indirekte utnyttelse via data-assimilerings tjenester se avsnitt 2.6.

Eksempler fra NILU inkluderer en studie for Miljødirektoratet angående hvilke muligheter Sentinel-5P har med tanke på å utvikle produkter for årlige norske nasjonale dekningskart med arealestimater for metan. Tidligere og nåværende prosjekter inkluderer generering av CH<sub>4</sub>-dekningskart og CH<sub>4</sub>-flukser i Norge / Arktiske strøk basert på data fra Sentinel-5P og Sentinel-2 (Kylling et al., 2021; Stebel et al., 2022; *Exploitation of ongoing and future Copernicus Missions for Atmospheric Applications*- ECOMAP-prosjektet, NASA #74CO2224, 2023-2025). Andre aktiviteter er prosjektet *Reliable global methane emissions estimates in a changing world* (ReGAME<sup>29</sup>), finansiert av Norges Forskningsråd (2021 – 2025) og NILUs rammeverk for atmosfærisk inversjon FLEXINVERT<sup>30</sup> som er videreutviklet til å inkludere bruk av CH<sub>4</sub>-satellittdata fra Sentinel-5P.

CEED ved Universitetet i Oslo studerer betydelige geologiske CH<sub>4</sub>-utslipp fra det hydrotermiske systemet Lusi, Indonesia, både med bakkebaserte og satellitt-målinger (TROPOMI) (Mazzini et al., 2021)

På den kommersielle siden finansierer *Oil and Gas Climate Initiative* (OGCI), hvor Equinor er medlem, prosjekter knyttet til data fra og utnyttelse av GHG-satellitter. Et eksempel er OGCI's pilotprogram med klimagassovervåkings selskapet GHGSat og det norske klimakonsultentselskapet Carbon Limits (f.eks.

<sup>29</sup> <https://www.nilu.com/2021/12/regame-exploring-methane-sources/>

<sup>30</sup> <https://flexinvert.nilu.no/>

GHGSat-overvåking over Irak for å estimere CH<sub>4</sub>-utslipp fra oljefelt<sup>31</sup>). KSAT<sup>32</sup> leverer tjenester til GHGSat fra det nye Tromsø *Satellite Operations Center* (TSOC) for satellittoperasjoner og kontroll av fem GHGSat-satellitter i bane. Ifølge deres nettside<sup>33</sup>, kan bilder fra GHGSat-konstellasjonen brukes over punktkilder eller komplekse utslippsområder ved siden av eller innpasset i KSATs andre tjenester.

### 3.3 Tidligere og nåværende satellitt-instrumenter og eksempler på bruk

En sammenstilling over tidligere, nåværende og fremtidige satellittmålinger av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> er gitt i Tabell 3.1 og kort beskrevet under, med unntak av CO2M, som er beskrevet mer detaljert i kapittel 2.1.

Tidligere og eksisterende satellitt-instrumenter for område-observasjoner er: SCIAMACHY, GOSAT og GOSAT-2, OCO-2/-3, TANSAT og TROPOMI. Eksempler for instrumenter som kan brukes for punktkildeutslipp er de kommersielle GHGSat, bilde-spektrometrene EnMAP, PRISMA og EMIT, Sentinel-2 og Worldview-3, som er beskrevet under. Planlagte satellitter for område-observasjoner er: MethaneSAT, MicroCarb, GOSAT-3, TanSAT-2, Sentinel-5, CO2M og Merlin. Fremtidige punktkildemålende instrumenter er: Carbon Mapper, CHIME og SBG.

NASAs *Geostationary Carbon Cycle Observatory (GeoCarb)*, skulle være den første geostasjonære satellitten designet for å måle CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO og solindusert fluorescens (SIF) med en romlig oppløsning på 10-20 km over Nord- og Sør-Amerika (50°N – 50°S). Den ble kansellert på grunn av kostnader, tekniske bekymringer, alternative datakilder og overordnede vitenskapelige prioriteringer for deres geovitenskapelige portefølje (*Press release 22-119*<sup>34</sup>).

---

<sup>31</sup><https://www.ogci.com/ghgsat-satellite-monitoring-project-in-iraq-helps-tackle-methane-emissions-at-oil-fields/>

<sup>32</sup> [www.ksat.no](http://www.ksat.no)

<sup>33</sup> <https://www.ksat.no/earth-observation/environmental-monitoring/greenhouse-gas/>

<sup>34</sup> [nasa.gov/press-release/nasa-to-cancel-geocarb-mission-expands-greenhouse-gas-portfolio](https://nasa.gov/press-release/nasa-to-cancel-geocarb-mission-expands-greenhouse-gas-portfolio)

Tabell 3.1: Tidslinje for CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>-satellitter. Mørk/lys grønn: nominal og forlenget levetid; blå: sensor med høy spektral oppløsning; gul: planlagte satellitter. d: diameter, pts: område, L: oppskyting, for flere akronymer se Vedlegg C.

Satellitt	Instrument (Organisasjon)	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Målestripe	Oppløsning	2002	...	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
ENVISAT	SCIAMACHY (ESA)	*	*	960 km	30x60 km <sup>2</sup>	Mar					Apr																
GOSAT	TANSO-FTS (JAXA, NIS, MOE)	*	*	3 pkt	10.5 km (d)			Jan														Des					
OCO-2	(NASA)	*		10.6 km	1.3x2.3 km <sup>2</sup>								Jul									Sep					
GHGSat-D	'Claire' (GHGSat Inc.)		*	12 km	0.0004 km <sup>2</sup>											Jun											
TanSAT	(CAS-MOST-CMA)	*		20 km	1x2 km <sup>2</sup>											Des			Jan								
Sentinel 5P	TROPOMI (ESA)		*	2600 km	5.5x7 km <sup>2</sup>											Okt										Sep	
GOSAT-2	TANSO-FTS-2 (JAXA, MOE, NIES)	*	*	3 pkt	10.5 km (d)												Okt					Des					
OCO-3	'ISS' (NASA)	*		11 km	4 km <sup>2</sup>													Mai				Des					
Worldview-3	(MAXAR)		*	13.1 km	3.7x3.7 m <sup>2</sup>								Aug									Aug					
Sentinel-2A, -2B, -2C/D	(ESA)		*	290 km	0.0004 km <sup>2</sup>									Jun		Mar							L	L			
PRISMA	(ASI)	*	*	30 km	30x30 m <sup>2</sup>													Mar					Mar				
EnMAP	(DLR)	*	*	30 km	30x30 m <sup>2</sup>																Apr				Sep		
EMIT	'ISS' (NASA)		*	75 km	60x60 m <sup>2</sup>																Jul	Sep					
MicroCarb	(CNES, UKSA)	*		13.5 km	40 km <sup>2</sup>																	Des				Des	
MethaneSAT	(EDF, NZSA)		*	260 km	0.4 km <sup>2</sup>																	Okt					
MicroCarb	(CNES, UKSA)	*		13 km	>4.5x4.5 km <sup>2</sup>																	Des				Des	
Carbon Mapper	(Carbon Mapper)	*	*	18 km	30x30 m <sup>2</sup>																						
GOSAT-GW	TANSO-FTS-3 (JAXA, MOE, NIES)	*	*	911, 90 km	1-9, 100 km <sup>2</sup>																		Mar				
CO2M-A	(ESA, EUMETSAT, COM)	*	*	250 km	4 km <sup>2</sup>																			Des			
Sentinel 5 A	(ESA, EUMETSAT, COM)		*	2670 km	7.5x7.5 km <sup>2</sup>																		Des				
MERLIN	(CNES, DLR)		*	100 m	0.15x0.15 km <sup>2</sup>																						Feb
CHIME-A	(ESA, COM)		*	130 km	30x30 m <sup>2</sup>																						
SBG	(NASA)		*	185 km	30x30 m <sup>2</sup>																						



### 3.3.1 **SCIAMACHY ombord ENVISAT**

Spektrometeret *SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CartographHY* (SCIAMACHY, 2002 – 2012; Burrows et al., 1995; Bovenmann et al., 1995; Bovenmann et al., 1999) var et banebrytende rombasert instrument for måling av blant annet CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>-konsentrasjoner fra høyspektraloppløste observasjoner av reflektert sollys. SCIAMACHY var ombord ESAs *Environmental Satellite* (ENVISAT) og gjorde samtidige observasjoner av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> (Buchwitz et al., 2005, Frankenberg et al., 2006) fra mars 2002 til april 2012. Oppløsningen til dette første instrumentet var nokså grov. For CH<sub>4</sub> var den romlige oppløsningen ved nadir 30×120 km<sup>2</sup> (30×240 km<sup>2</sup> for høye solvinkler, for eksempel polare områder om sommeren). CO<sub>2</sub> ble målt med 30×60 km<sup>2</sup> romlig oppløsning.

### 3.3.2 **GOSAT og GOSAT-2**

Det høyoppløselige Fourier-transformasjonsspektrometeret (TANSO-FTS – *Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observations – Fourier Transform Spectrometer*) ombord *Greenhouse Gases Observing SATellite* (GOSAT) ble skutt opp januar 2009 av den japanske romfartsorganisasjonen (JAXA) (Kuze et al., 2009, 2016). TANSO-FTS observerer kortbølget infrarød stråling i fire bånd som er følsomme for gasskonsentrasjoner nær jordens overflate, samt termiske infrarøde observasjoner som er følsomme for den midlere troposfæren. TANSO-FTS måler sirkelpiksler med et fotavtrykk på omtrent 10,5 km i diameter ved nadir, med en avstand på omtrent 270 km fra hverandre på tvers og langs banen. GOSAT observerer samme sted hver tredje dag.

L2-data produkter bli distribuert av det japanske *National Institute for Environmental Studies* (NIES, Yoshida et al., 2013). Flere andre vitenskapelige estimat av drivhusgasser er tilgjengelige, for eksempel gjennom ESAs *Greenhouse Gas Climate Change Initiative* (CCI) og *Copernicus Climate Change Service* (C3S) (Buchwitz et al., 2017, 2018). Parker et al. (2020) analyserte et tiår med GOSAT-observasjoner, GOSAT Proxy XCH<sub>4</sub>-data fra *University of Leicester*, og fant en total korrelasjonskoeffisient på 0,92 ved sammenligning med 22 TCOON-stasjoner, en enkeltmålingspresisjon på 13,72 ppb og en total global skjevhet på 9,06 ppb som fjernes fra proxy XCH<sub>4</sub>-dataene.

På grunn av dens relativt lave enkeltmålings-presisjon (2 ppm for CO<sub>2</sub>, 13 ppb for CH<sub>4</sub>; Kuze et al., 2016), dens relativt store fotavtrykk og den sparsomme dekkningen som tilbys av standard 3-punkts og 5-punkts skanningsmoduser, så er ikke GOSAT ideell for overvåking av punktkilder for menneskeskapt utslipp. Dataene er mer egnet for langtidsstudier, e.g., for å se på trender og endringer av utslipp som vist av Maasackers et al., (2019). De brukte GOSAT-data fra 2010-2015 i et globalt inversjonsrammeverk for å vise endringer av CH<sub>4</sub>-utslipp og trender, samt den globale konsentrasjonen og trendene for troposfærisk OH.

I 2018 lanserte Japan sin andre GHG-satellitt, GOSAT-2<sup>35</sup>. Den har et utvidet spektralområde som inkluderer CO i tillegg til CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> (Suto et al., 2021). TANSO-FTS-2 er et forbedret Fourier Transform-spektrometer med 5 bånd, et litt mindre fotavtrykk på 9,7 km i diameter, dobbelt så stor pekevinkel langs banen ( $\pm 40^\circ$ ) for å utvide både muligheten for observasjoner i solglimtmodus og til å velge observasjonspunkt (innenfor begrensningene gitt av pekespeilets bevegelsehastighet), bedre utnyttelse av det dynamiske området, og en intelligent pekemekanisme for å unngå skyer i scenen. L2-data er åpent tilgjengelig. Operative XCO<sub>2</sub> og XCH<sub>4</sub> SWIR-produkter distribueres av NIES<sup>36</sup>. En alternativ data-analyse for GOSAT og GOSAT-2 er beskrevet av Noël et al. (2022).

<sup>35</sup> <https://earth.esa.int/eogateway/missions/gosat-2>

<sup>36</sup> <https://prdct.gosat-2.nies.go.jp>, sist åpnet: 12. februar 2023

### 3.3.3 OCO-2 og OCO-3

The *Orbiting Carbon Observatory-2* (OCO-2<sup>37</sup>, 2014 - nå) ble skutt opp av *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) i juli 2014. OCO-2 har en 16-dagers gjentakelses-syklus. Den måler reflektert sollys i CO<sub>2</sub>-båndene med en 10 km smal målestripe bestående av åtte parallelogramformede  $\leq 1,29 \times 2,25$  km<sup>2</sup> fotspor. For rutinemessige vitenskapelige operasjoner peker romfartøyets instrument mot det lokale nadir eller nær solglimpunktet (Crisp et al., 2004, 2008, 2017). Strategien for OCO-2 glimt/nadir-observasjoner er blitt forfinet gjennom årene, og siden november 2015 ble solglimt-data samlet inn for baner som hovedsakelig var over hav.

Eksempel på bruk er observasjoner av XCO<sub>2</sub>-anomalier over Sentral-Afrika og Sørøst-Asia fra biomassebrenning (Hakkarainen et al., 2016), den biosfæriske karbonbalansen (Miller et al., 2018), den romlige strukturen til XCO<sub>2</sub>-variasjoner på tvers av megabyer (Schwandner et al. al., 2017) og CO<sub>2</sub>-utslipp fra fossilt brensel fra kraftverk som ligger innenfor eller i nærheten av OCO-2 sitt bakkespor (Nassar et al., 2017).

OCO-3<sup>38</sup> ombord den internasjonale romstasjonen (ISS) fra 2019 er dedikert til å overvåke CO<sub>2</sub>. ISS er ikke i en solsynkronbane, men i en bane med 51° inklinasjon, noe som betyr at OCO-3 ser steder på forskjellige tider gjennom døgnet. Derfor gir OCO-3 muligheten til å studere den daglige syklusen av CO<sub>2</sub> i atmosfæren (Eldering et al., 2013, 2019). OCO-3 L2-data distribueres av NASAs *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC) (Taylor et al., 2020).

### 3.3.4 TanSat

Den kinesiske minisatellitten TanSat med instrumentene *Atmospheric Carbon dioxide Grating Spectroradiometer* (ACGS) og *Cloud and Aerosol Polarization Imager* (CAPI) ombord ble skutt opp i desember 2016. ACGS måler CO<sub>2</sub> i to spektralbånd. CAPI brukes til å korrigere for sky- og aerosoleffekter. TanSAT har et fotspor på  $\sim 2 \times 2$  km<sup>2</sup> (nadir) med ni fotspor over banen (Liu og Yang, 2016, Yang, et al., 2018). En oppdatert analysemetode viser forbedret nøyaktighet (-0,08 ppm) og presisjon (1,47 ppm) (Yang et al. (2021). TanSat har for eksempel blitt brukt til samtidige observasjoner av XCO<sub>2</sub> og NO<sub>2</sub> (fra TROPOMI) for to byer i Kina og Japan (Yang et al., 2023).

### 3.3.5 TROPOMI på Sentinel-5P

*TROPospheric Monitoring Instrument* (TROPOMI) ombord *Sentinel 5 Precursor* (S5-P) satellitten (Veefkind et al., 2012) ble skutt opp i oktober 2017. Utledning av CH<sub>4</sub> fra SWIR-båndet har følsomhet ned til jordens overflate. TROPOMI gir globale kart over atmosfæriske metankolonner på daglig basis med en pikseloppløsning på 5,5 km  $\times$  7 km nadir (7 km  $\times$  7 km før 6. august 2019) (Hu et al., 2018; Hasenkamp et al., 2022). L2-data er åpent tilgjengelig.

Lorente et al. (2021) diskuterte nylige operative ESA TROPOMI CH<sub>4</sub>-datasett og sammenligninger med TCCON ( $-3,4 \pm 5,6$  ppb) og GOSAT ( $-10,3 \pm 16,8$  ppb) (gjennomsnittlig skjevhet og standardavvik). SWIR CH<sub>4</sub>-observasjoner er utledet fra solglimt-observasjoner med en gjennomsnittlig skjevhet og stasjon-til-stasjon-variabilitet på  $-8,4 \pm 6,3$  ppb (sammenlignet med TCCON-stasjoner nær havområder) som er innenfor oppdragskravet på presisjon og nøyaktighet (bedre enn 1 %). Sammenligningen mot GOSAT er sammenlignbar med målingene over land ( $-4,4 \pm 15,7$  ppb) (Lorente et al., 2023). Spektrale trekk ved de underliggende overflatene kan føre til falske metananomalier eller artefakter (f.eks. Barré et al., 2020). Så langt kan dette bare delvis korrigeres og etterlater en ukjent feilkilde som forårsaker systematiske albedo-skjevheter (Lorente et al., 2023). En alternativ XCH<sub>4</sub>-utledning er basert på arven

<sup>37</sup> <https://ocov2.jpl.nasa.gov/>

<sup>38</sup> <https://ocov3.jpl.nasa.gov/>

fra SCIAMACHY, ved å bruke *Weighting Function Modified DOAS* (WFM-DOAS) algoritmen (Buchwitz et al., 2006; Schneising et al., 2011) som utleder CH<sub>4</sub> og CO samtidig (Schneising et al., 2019, 2023).

Et stort antall studier har brukt TROPOMI CH<sub>4</sub>-data delvis i kombinasjon med høyere oppløsnings satellitter som Sentinel-2 eller PRISMA (som er beskrevet nærmere i neste avsnitt). For eksempel har svært store utslipp av atmosfærisk metan fra olje- og gassindustriens ultra-emittere, naturgassbrønntutblåsning og CH<sub>4</sub>-økninger fra energisektoren for mange regioner, inkludert Nord-Amerika, Europa og Turkmenistan blitt dokumentert (Varon et al., 2019; Schneising et al., 2019, 2020; Pandey et al., 2019; de Gouw et al., 2020, Sadavarte et al., 2021, Irakulis-Loitxate et al., 2022, Lauvaux et al., 2022). Foruten publikasjoner av direkte observasjoner er det publisert en rekke studier som bruker inverse modeller (f.eks. Zhang et al., 2020; Shen et al., 2021, 2022; Chen et al., 2022, Yu et al., 2023, Varon et al., 2022). En interessant, rent datadrevet tilnærming for CH<sub>4</sub>-utslippsestimater ved bruk av divergens metoder for TROPOMI CH<sub>4</sub> ble presentert av Liu et al. (2021) og Veefkind et al. (2023).

### 3.3.6 GHGSat

Den kommersielle aktøren GHGSAT Inc.<sup>39</sup> skjøt opp sin første mikrosatellitt GHGSat-D Claire i juni 2016. Den går i en solsynkron polar bane og gir CH<sub>4</sub>-utslippsestimat til kunder, primært fra olje- og gasssektoren. Fem flere satellitter med forbedret ytelse ble skutt opp i tidsperioden 2020-2022, og seks flere er planlagt i 2023. Konstellasjonen av satellitter gir data med høy romlig oppløsning på ~25 m (>50 m for GHGSat-D), og et synsfelt på 12 km x 12 km. I mai 2022 ble GHGSat med i ESAs *Third Party Mission Programme*<sup>40</sup>. Jervis et al. (2021) anslår en punktkilde-deteksjonsgrense på ~1 t/t (tonn/time) for GHGSat-D og 0,1 t/t for de etterfølgende satellittene. Varon et al. (2018) presenterte en gjennomgang av metodene for å kvantifisere CH<sub>4</sub>-punktkildeutslipp basert på høyoppløselige satellittobservasjoner av CH<sub>4</sub>-skyer. Resultatene inkluderer CH<sub>4</sub>-punktkildeutslipp fra olje/gassproduksjon og kvantifisering av gjennomsnittlige utslipp fra CH<sub>4</sub>-kilder som kullgruve-ventiler og deponier (Maasackers et al., 2022, Varon et al., 2019, 2020). I Norge tilbyr KSAT produkter fra GHGSat<sup>41</sup>.

### 3.3.7 EnMAP, PRISMA, og EMIT

Potensialet til bilde-spektrometrene EnMAP, PRISMA, EMIT og de fremtidige SBG- og CHIME-satsningene, som ikke er spesifikt dedikert til GHG-observasjoner, ble undersøkt for global deteksjon av CH<sub>4</sub> fra punktkilder av Cusworth et al. (2019). Med ~10 nm eller bedre spektral oppløsning i SWIR og en pikseloppløsning i området 30 – 60 m og signal til støyforhold på 180 – 400 eller høyere bør disse satellittinstrumentene kunne observere metan-skyer fra moderate til store kilder.

*The Environmental Mapping and Analysis Program* (EnMAP<sup>42</sup>, Guanter et al., 2015) er den tyske romfartsorganisasjonens bildespektroskopi-satsning. EnMAP ble skutt opp 1. april 2022. Det er et *pushbroom* hyperspektralt instrument, som måler i VNIR og SWIR spektralområdene. Den romlige oppløsningen er 30 x 30 m<sup>2</sup> ved nadir, målestriben er 30 km bred, en gjentagelses-syklus på 27 dager og pekefunksjon utenfor nadir (30°) for raskt gjenbesøk av mål (4 dager).

Den italienske romfartsorganisasjonens *Hyperspectral Precursor of the Application Mission* (PRISMA<sup>43</sup>; Loizzo et al., 2018) ble skutt opp 22. mars 2019. PRISMA integrerer en hyperspektral sensor med et pankromatisk kamera med middels oppløsning. PRISMA gir bilder over interesseområder mellom

<sup>39</sup> <https://www.ghgsat.com/en/>

<sup>40</sup> <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ghgsat>

<sup>41</sup> [www.ksat.no/no/earth-observation/environmental-monitoring/greenhouse-gas/](http://www.ksat.no/no/earth-observation/environmental-monitoring/greenhouse-gas/)

<sup>42</sup> <https://www.enmap.org/mission/>

<sup>43</sup> [www.asi.it/en/earth-science/prisma/](http://www.asi.it/en/earth-science/prisma/)

180°V - 180°Ø og 70°S - 70°N. Den hyperspektrale sensoren er et prismespektrometer. I «push-broom»-skannmodus måler den i VNIR og SWIR med 30 m romlig oppløsning. Gjentakelsesyklusen er omtrent 29 dager, med en målestripe på 30 km bredde og muligheter for å se 1000 km på hver side. Dermed kan repetisjonstiden være mindre enn en uke. Et eksempel på bruk er observasjon av store gassbrønntutblåsninger (Cusworth et al., 2021)

PRISMA og EnMAP gjør observasjoner på forespørsel fra det vitenskapelige miljøet og andre interessenter. De resulterende 1-dataene er deretter fritt tilgjengelige for vitenskapelig bruk (utledning av L2-data må utføres av brukeren).

NASAs *Earth Surface Mineral Dust Source Investigation* (EMIT<sup>44</sup>; Green et al., 2020) ble skutt opp i juli 2022 til ISS. EMIT kan se mer enn 50 steder på jorden hvor det er store utslipp av den potente drivhusgassen metan<sup>45</sup>, for eksempel i Perm-bassenget, USA (18,3 kt h<sup>-1</sup>), i Turkmenistan (50,4 kt h<sup>-1</sup>), og i Iran (8,5 kt h<sup>-1</sup>)<sup>46</sup>. L1 -data er tilgjengelige for brukere.

### 3.3.8 Sentinel-2

Sentinel-2 består av to identiske polar-banesatellitter i samme solsynkrone orbit, faset 180° i forhold til hverandre. Sentinel-2A og -2B ble skutt opp i henholdsvis juni 2015 og mars 2017. *Multispectral Instrument* (MSI) ombord Sentinel-2 måler jordens reflekterte utstråling i 13 spektralbånd fra VNIR til SWIR (Phiri et al., 2020). Varon et al. (2021) viste at Sentinel-2 har en moderat følsomhet for CH<sub>4</sub>. De brukte bånd 11 og 12, som inkluderer stråling over metans absorpsjonsbånd i SWIR og muliggjør deteksjon og kvantifisering av CH<sub>4</sub>. En oppdatert analysemetode ble presentert av Zhang et al. (2022) og dens ytelser ble validert med sammenligning mot bakkemålinger. På grunn av den høye romlige oppløsningen (20 m x 20 m i bånd 11 og 12), og repetisjonstid på to til fem dager, gir Sentinel-2 satellittene muligheten for høyfrekvent global sporing og kvantifisering av CH<sub>4</sub>-utslipp fra olje og gassindustrien (Ehret et al., 2022). Gorroño et al. (2023) estimerte deteksjonsgrenser til å være mellom 1-2 t/t og 5 t/t avhengig av overflatehomogenitet og tidsvariasjoner i utslippene. L1-data er tilgjengelige for brukere.

### 3.3.9 Worldview-3

Worldview-3 ble skutt opp i 2014. Det er et multispektralt instrument med 8 SWIR-bånd, en svært høy romlig oppløsning på 3,7 x 3,7 m<sup>2</sup>, og tar bilder over et 66,5 x 112 km<sup>2</sup> stort område (på forespørsel for kunder) (Sánchez-García, et al., 2022). Ved å bruke solglimt-observasjoner fra Worldview-3 og Landsat-8, kunne Irakulis-Loitxate et al. (2022) påvise store CH<sub>4</sub>-skyer fra offshoreplattformer i Mexicogulven. Data er ikke fritt tilgjengelig, L1-data kan kjøpes.

## 3.4 Planlagte satellitt-instrumenter

### 3.4.1 MethaneSAT

MethaneSAT<sup>47</sup> er et felles satellitt-prosjekt mellom USA og New Zealand. Det er organisert av *Environmental Defense Fund* (Tollefson, 2018). Foreløpig planlagt oppskyting er i 2023. Formålet med MethaneSAT er å karakterisere endringer i menneskeskapte metanutslipp, med fokus på olje-, gassindustrien, og agrikultur. Metan vil måles med et *pushbroom* spektrometer som samler inn reflektert sollys i SWIR-området med høy romlig oppløsning (100 m x 400 m ved nadir) over en målestripe på 260 km. MethaneSAT vil karakterisere diffuse CH<sub>4</sub>-utslipp over den brede målestriben og lokalisere og kvantifisere store punktkilder innenfor hvert målområde (ca. 200 x 140 km<sup>2</sup>) med en

<sup>44</sup> <https://earth.jpl.nasa.gov/emit/>

<sup>45</sup> [earth.jpl.nasa.gov/emit/news/23/methane-super-emitters-mapped-by-nasas-new-earth-space-mission/](https://earth.jpl.nasa.gov/emit/news/23/methane-super-emitters-mapped-by-nasas-new-earth-space-mission/)

<sup>46</sup> <https://www.nasa.gov/feature/jpl/methane-super-emitters-mapped-by-nasa-s-new-earth-space-mission>

<sup>47</sup> <https://www.methanesat.org/>

presisjon bedre enn 3 ppb for de om lag 1 km<sup>2</sup> store pikslene (Benmergui et al., 2020). Data fra MethaneSAT vil være fritt tilgjengelig for brukere (L1- og L2-data etter forespørsel).

### 3.4.2 *MicroCarb*

Det felles britisk-franske satellittsatsningen MicroCarb<sup>48</sup> er designet for å overvåke CO<sub>2</sub>-overflateflukser, det vil si utvekslingen mellom kilder (antropogene, naturlige) og tap (atmosfære, land, hav og vegetasjon). Oppskytingen av MicroCarb er planlagt i 2024. Satellitten vil ha et passivt nær infrarødt spektrometer som vil måle CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>. Satellitten har en målestripe på 13,5 km og en romlig oppløsning på 4,5 km (tverrbane) x 9 km (langs bane). Over land, i tillegg til nadir-målinger, kan instrumentet vinkles innenfor ± 200 km, over havet vil solglimt-målinger gjøres. I tillegg vil instrumentet pekes mot faste mål, for eksempel TCCON-stasjoner for kalibrering. MicroCarb sikter mot å måle CO<sub>2</sub>-konsentrasjon med ekstrem presisjon (i størrelsesorden 1 ppm, dvs 0,3 %). Produktene vil bli gjort tilgjengelige gjennom datasenteret AERIS<sup>49</sup>.

### 3.4.3 *Carbon Mapper*

Som start på *Carbon Mapper Satellite Program*, er oppskyting av to Carbon Mapper-satellitter planlagt i 2023 av Planet Labs PBC, som en del av et offentlig-privat partnerskap, ledet av Carbon Mapper<sup>50</sup>, en ikke-profit-organisasjon, NASAs *Jet Propulsion Laboratory* (NASA JPL) og andre amerikanske stiftelser/institusjoner. Carbon Mapper skal identifisere, kvantifisere og tilskrive globale CH<sub>4</sub>- og CO<sub>2</sub>-punktkildeutslipp i skalaen til individuelle anlegg og utstyr. Instrumentet vil måle i spektralområdet mellom 400 nm - 2,5 µm, med 6 nm spektral oppløsning, 30 m romlig oppløsning og 18 km x 1000 km målestripe og kortere stripe i target-modus (Duren et al., 2021). Data (L2 og L4) vil bli gjort tilgjengelig gjennom Carbon Mapper-dataportalen innen 90 dager etter målingen er gjort.

### 3.4.4 *GOSAT-3*

Det er planlagt å skyte opp en tredje GOSAT GHG-satellitt i 2024, *Global Observing SATellite for Greenhouse Gases and Water cycle* (GOSAT-GW) (Hirabayashi, 2020). GOSAT-3 skal måle CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og CO med vesentlig bedre romlig oppløsning og dekning enn GOSAT og GOSAT-2. Den kan brukes for høy oppløselige målinger av by-områder og er ment å være Japans bidrag til den globale innsatsen for å nå Paris-klimaavtalens mål og vil gi langsiktige CO<sub>2</sub>- og CH<sub>4</sub>-tidsserier fra sammenlignbare satellittinstrumenter (2009 og framover). L2-data vil bli åpent tilgjengelig.

### 3.4.5 *TanSat-2*

Den kinesiske konstellasjonen for karbondioksid-observasjoner (TanSat-2<sup>51</sup>) er planlagt til å bestå av seks satellitter (3 om morgenen + 3 i ettermiddags-solsynkron baner). Hver satellitt vil ha et *Large-Aperture Spatial Heterodyne Interference Spectrometer*<sup>52</sup> med stor blenderåpning for å måle CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, og CO med et fotavtrykk på 2 x 2 km<sup>2</sup> over en > 100 km målestripe (med nadir/glimt/mål/kalibreringsmodus). Oppskyting er planlagt til 2025/26.

<sup>48</sup> <https://microcarb.cnes.fr/en/MICROCARB/index.htm>

<sup>49</sup> <https://en.aeris-data.fr/>

<sup>50</sup> <https://carbonmapper.org/>

<sup>51</sup> <http://database.eohandbook.com/database/missionsummary.aspx?missionID=957>

<sup>52</sup> <http://database.eohandbook.com/database/instrumentsummary.aspx?instrumentID=1925>

### 3.4.6 Sentinel 5: UVNS, IASI-NG og 3MI

Copernicus Sentinel 5<sup>53</sup> er en av *MetOp-Second Generation*-satellittene (MetOp-SG<sup>54</sup>), som er romsegmentet til EUMETSAT Polarsystem andre generasjon (EPS-SG). Den første MetOp-SG-A satellitten vil ha åtte instrumenter. Den vil tidligst skytes opp sommeren 2024 og skal ha en 29-dagers repetisjonsperiode. Det er planlagt å skyte opp tre identiske satellitter med 7 års mellomrom. Tre av instrumentene, spektrometeret *Ultraviolet Visible Near-infrared Shortwave* (UVNS), *Infrared Atmospheric Sounder Interferometer-Next Generation* (IASI-NG), og *Multi-view Multi-channel Multi-polarization Imager* (3MI) vil utføre sporgass- og aerosolmålinger.

UVNS-spektrometeret vil måle i ultrafiolette, synlige og nære-infrarøde deler av solspekteret. Spektraloppløsning vil variere fra 0,065 – 1 nm avhengig av spektralbåndene som ligger mellom 0,27–2,4385  $\mu\text{m}$ . For bølgelengder over 0,3  $\mu\text{m}$  vil den romlige oppløsningen være 7 km. UVNS vil måle O<sub>3</sub>-profiler og totalkolonne, og totalkolonne av SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, vanndamp, CH<sub>4</sub>, CO, HCHO, CHOCHO i tillegg til vulkanske askeskyer. Som TROPOMI har UVNS en bred målestripe (108,4° eller ~2715 km) og et fotavtrykk på 7 km x 7 km nært nadir. Det gir daglig nær-global dekning på breddegrader > 12° med forventet følsomhet sammenlignbar med TROPOMI.

IASI-NG vil måle flere relevante sporgasser som O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> og NO<sub>2</sub> samlokalisert med UVNS. I tillegg vil 3MI gi multispektrale, multipolariserte, og flervinklede målinger av utgående stråling på toppen av atmosfæren. Denne vil analyseres til å gi høykvalitets informasjon om aerosoler egnet for klimaregistreringer og sporing av utslipp fra branner. L2-data vil bli åpent tilgjengelig.

### 3.4.7 MERLIN

Den fransk-tyske satellitten *METHane Remote sensing Lidar Mission* (MERLIN) skal etter planen skytes opp i 2024. Det er en liten satellitt som huser den første *Integrated Path Differential Absorption* (IPDA) LIDAR i rommet som måler på bølgelengdene  $\lambda_{\text{on}} = 1645.552 \text{ nm}$  og  $\lambda_{\text{off}} = 1645.846 \text{ nm}$  (se f.eks. Ehret et al., 2017, Nikolov et al., 2019). Det vitenskapelige hovedmålet til MERLIN er å måle profiler av XCH<sub>4</sub> med usikkerhet bedre enn 27 ppb (over 50 km gjennomsnitt langs satellittbanen) og en systematisk målefeil bedre enn 3,7 ppb (1-sigma) på regionale skalaer. MERLIN forventes å forbedre vår kunnskap om metankilder fra global til regional skala, spesielt på høye breddegrader og i tropene. Det vil være det første instrumentet som måler CH<sub>4</sub> på høye breddegrader om vinteren, der solen står for lavt til at SWIR-sensorer gir målinger. Derfor er MERLIN av spesiell interesse for Norge og Arktis, e.g. anvendelser knyttet til utslipp fra permafrost i Arktis og for overvåking av store industriutslipp, e.g. fra russiske kilde om vinteren. MERLIN har en svært smal (~120 m) nær-nadir lidar-stråle og selektive måleteknikker. Dette kan gi en høyere andel av brukbare målinger i delvis overskyede områder som tropene sammenlignet med passive SWIR-målinger, som er mer hemmet av refleksjoner og skygger fra skyer.

### 3.4.8 CHIME og SBG

ESAs *Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment* (CHIME) planlegges skutt opp i 2028 (se f.eks. Rast et al., 2021). CHIME (CHIME-A og CHIME-B) vil ha en *HyperSpectral Imager* (HSI) med over 200 bånd mellom 400 – 2500 nm med mindre enn 10 nm båndbredde. HSI vil komplementere Copernicus sin Sentinel-2. Målet med CHIME er å gi observasjoner til støtte for bærekraftig forvaltning av jordbruk og biologisk mangfold, og karakterisering av jordegenskaper. Forventet bakkeoppløsning er 30 m, målestriben er 130 km, og repetisjonssyklusen på 25 dager. Et veikart for CHIME er under arbeid i regi av Norsk Romsenter.

<sup>53</sup> <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5>

<sup>54</sup> [www.eumetsat.int/metop-sg](http://www.eumetsat.int/metop-sg)

NASAs *Surface Biology and Geology* (SBG) satsning vil måle stråling i synlig til kortbølget infrarød hyperspektralt (bildespektroskopi) og multispektral mellombølge og termiske infrarød med ~60 m pikseloppløsning. Repetisjonszyklusen er sub-månedlig over terrestriske, ferskvanns- og kystnære marine habitater. Oppskytning er planlagt tidligst i 2028 (Cawse-Nicholson et al., 201, Schimel et al., 2022).

CHIME og SBG er ikke dedikert til overvåking av drivhusgasser, men pga. at målingene gjøres i SWIR bølglengdeområdet, kan data fra disse fremtidige hyperspektrale instrumentene bli brukt til CH<sub>4</sub> målinger.

## 4. Oversikt over norsk forvaltning og klimagassregnskap

Dette kapitlet beskriver på hvilke måter statlige aktører dokumenterer nasjonale klimagassutslipp og rapporterer utlippene til FN. Kapitlet er delt i to; i) det nasjonale utslippsregnskapet; ii) det kommunefordelte klimagassregnskapet.

### 4.1 Det nasjonale utslippsregnskapet

#### 4.1.1 Overordnet om kravene til utslippsregnskap

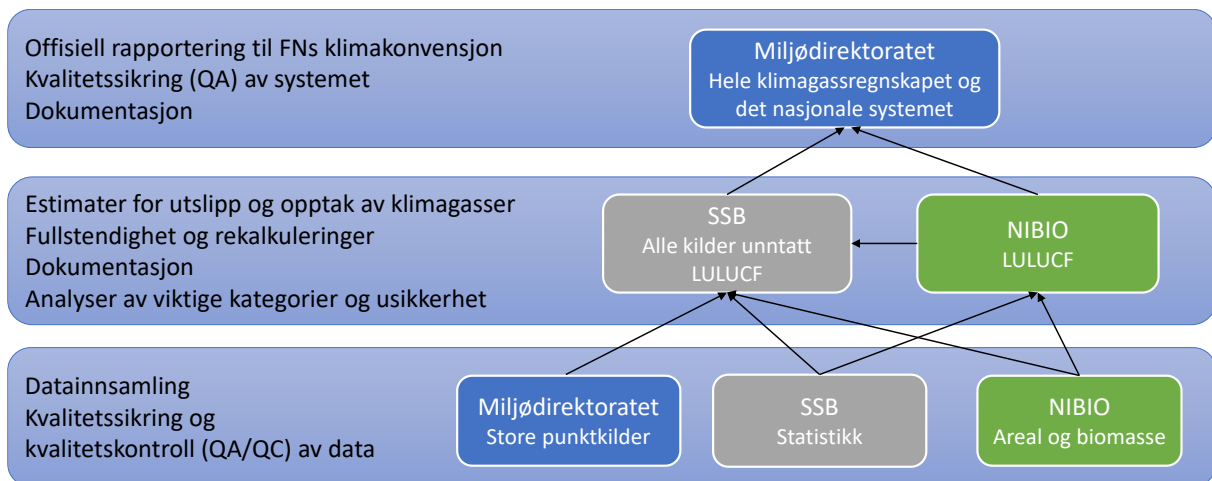
FNs rammekonvensjon om klimaendringer (UNFCCC) fra 1992 krever at partene i konvensjonen utvikler, oppdaterer og leverer årlige utslippsregnskap for klimagasser. En av forpliktelsene i konvensjonen er at partene skal rapportere nasjonale menneskeskapte utslipp etter kilder, og utslipp og opptak av drivhusgasser i skog og arealbrukssektoren. Klimaregnskapet skal inkludere drivhusgassene CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O samt fluorerte gasser (HFK, PFC, NF<sub>3</sub> og SF<sub>6</sub>). Systemgrensene (hvilke utslipp som skal rapporteres), sektorinndelingen og metodene for beregning av utslipp er avtalt av konferansen for partene i konvensjonen og definert i veiledningsdokumenter (IPPC, 2006; se også IPCC, 2019). Utslippsregnskapene gjennomgår en teknisk revisjon utført av uavhengige eksperter gjennom klimakonvensjonen.

#### 4.1.2 Nasjonal rollefordeling

I Norge har Miljødirektoratet ansvaret for Norges rapportering av nasjonale klimagassutslipp til FNs klimakonvensjon. Dataene og dokumentene som rapporteres utarbeides i samarbeid med Statistisk sentralbyrå (SSB) og Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO). Miljødirektoratet har inngått en avtale med SSB og NIBIO som forplikter disse institusjonene til å følge IPCC-reglene for kvalitetskontroll og å være tilgjengelige for spørsmål i forbindelse med den tekniske revisjonen av utslippsregnskapet. Rapportering av klimagassutslipp skjer årlig, og utslippstallene representerer to år før rapporteringsåret. Både metodene og datakilder for å utarbeide klimagassregnskapet publiseres årlig i *National Inventory Report* (NO EPA, 2022) av Miljødirektoratet.

SSB produserer utslippstall for alle kilder unntatt skog og arealbruk, som utarbeides av NIBIO. Miljødirektoratet, SSB og NIBIO bearbeider utslippstallene videre og rapporterer til FNs klimakonvensjon. Figur 4.1 viser ansvarsfordelingen og samarbeidet mellom Miljødirektoratet, SSB og NIBIO, som inkluderer datainnsamling, implementering av kvalitetskontroll (QA/QC), levering av dokumentasjon og usikkerhetsanalyse før levering av klimaregnskapet til UNFCCC.





Figur 4.1: Ansvarsfordelingen og samarbeidet mellom Miljødirektoratet, SSB og NIBIO i leveringsprosessen av klimaregnskapet til UNFCCC (figuren er basert på NO EPA (2022)).

#### 4.1.3 Nasjonal publisering og bruk av utslippsregnskapet

En rekke aktører, blant annet i forvaltningen, forskningen og næringslivet benytter data fra utslippsregnskapet. Med tanke på nasjonale brukere, er utslippsregnskapet gjort tilgjengelig gjennom SSB og gjennom miljøstatus.no. SSB publiserer utslippsregnskap for alle sektorer unntatt skog og arealbruk. Utslippstall til og med foregående år publiseres vanligvis som foreløpige tall i juni og endelige tall i november. Utslippsregnskapet som publiseres av SSB inneholder de samme dataene som det som rapporteres til FNs klimakonvensjon (unntatt skog- og arealbruk-sektorene (LULUCF)), men dataene presenteres med en litt annen sektorinndeling<sup>55</sup>. Utslippsregnskapet for skog- og arealbruk publiseres av NIBIO.

Utslippsregnskapet er sentralt i vurderingen av hvordan Norge ligger an til å nå de nasjonale klimamålene. Etter klimaloven<sup>56</sup> skal regjeringen årlig redegjøre overfor Stortinget for blant annet utviklingen i utslipp og opptak av klimagasser, framskrivning av klimagassutslippene og hvordan Norge kan nå klimamålene. Utslippsregnskapet er også en del av datagrunnlaget for de nasjonale framskrivningene av klimagassutslipp, som er et viktig grunnlag for planleggingen av klimapolitikken og vurderingen av behovet for nye/sterkere virkemidler. Gjennom klimaavtalen med EU har Norge tatt på seg forpliktelser for kutt i de ikke-kvotepfiktige utslippene som dekkes av regelverket om innsatsfordeling og regelverket om skog- og arealbruk-sektorene (LULUCF). Data fra utslippsregnskapet benyttes i vurderingen av hvorvidt disse forpliktelsene overholdes. Som en del av avtalen rapporterer Norge utslippsregnskapet til det europeiske miljøbyrået (EEA).

<sup>55</sup> IPCC-retningslinjene for utslippsregnskap er inndelt i følgende utslippssektorer: 1) energi, 2) industriprosesser og produktbruk, 3) jordbruk, skogbruk og annen arealbruk, 4) avfall og 5) annet. Hver av sektorene har flere nivå av undersektorer. Sektor 1 omfatter blant annet utslipp fra transport, energibruk i industrien, kraftproduksjon og oppvarming. Klimagassregnskapet som publiseres av SSB er inndelt i følgende utslippssektorer: 1) olje- og gassutvinning, 2) industri og bergverk, 3) energiforsyning, 4) oppvarming i andre næringer og husholdninger, 5) veitrafikk, 6) luftfart, sjøfart, anleggsmaskiner m.m., 7) jordbruk og 8) andre kilder.

<sup>56</sup> <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2017-06-16-60>

#### 4.1.4 Metoder og datakilder

Klimagassregnskapet inndeles per kilde, og inndelingen baserer seg på FNs klimapanelers standard for rapportering (IPCC; f.eks. energi, industriprosesser, jordbruk, utslipp og opptak fra skog og annen arealbruk (LULUCF), avfall, etc.).

Metodene som brukes i utslippsberegningen er i samsvar med IPCCs retningslinjer for nasjonale klimagassutslipps-regnskap (IPCC, 2006; IPPC 2019) og som anbefalt av IPCC-retningslinjene har spesifikke metoder blitt brukt der det er hensiktsmessig og for å gi mer nøyaktige estimater. Norge har et system for å produsere regnskap for klimagassutslipp som inngår i Kyoto-protokollen, samt luftforurensningene under *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution* -konvensjonen (CLRTAP), hvor SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC, NH<sub>3</sub>, CO, svevestøv, tungmetaller, og persistente organiske miljøgifter rapporteres.

Hovedutslippsmodellen (Daasvatn et al., 1992; 1994; NO EPA 2022) drives av SSB, som er ansvarlig for innsamling og utvikling av aktivitetsdata, og dataene som brukes i utslippsmodellene for energi, industriprosesser og produktbruk<sup>57</sup>, jordbruk og avfall. Miljødirektoratet har ansvar for utslippsfaktorer, for å levere data fra industri og for å vurdere kvaliteten av utslippsmodeller samt oppdatere disse. I tillegg til hovedmodellen brukes spesifikke utslippsmodeller for veitrafikk, jordbruk, flytrafikk og løsemidler for å gi et mer detaljert bilde. Utslippsberegningen i hovedmodellen baserer seg på den generelle ligningen, utslipp =  $\sum$ aktivitetsdata x utslippsfaktorer. Aktivitetsdata er energibruk eller energiprodukt, avhengig av industri typer. Energibruksdata kobles til matrisen med utslippsfaktorer for drivstoff, industri, kilde og komponenter. Utslipp fra større punktkilder er også tilgjengelig fra målinger eller andre anleggsspesifikke beregninger, og de anses som mer nøyaktige utslippsestimater. Utslipp fra punktkilder rapporteres til Miljødirektoratet og når dette er tilgjengelig, erstattes de estimerte verdiene av de målte.

Skog- og arealbrukssektoren (LULUCF) omfatter utslipp og opptak av CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O fra arealbruk og arealbruksendringer og skog, og beskrivelsen av data og metoden finnes hos Mohr et al. (2022) og NIR-rapporten (NO EPA, 2022). LULUCF-sektoren omfatter alt forvaltet landareal i skog, dyrka mark, beite, vann og myr, utbygd areal og annen utmark kategorisert basert på IPCCs regelverk. Hoveddatakilden for å beregne utslipp og opptak er landsskogtakseringen som er et overvåkningssystem basert på utvalgskartlegging, kombinert med supplerende datakilder. Landskogtakseringen omfatter fastlandsarealet av ulike kategorier med hensyn på arealtype og arealanvendelse som brukes som aktivitetsdata. Supplerende datakilder er jordsmonnkartlegging og arealressurskart for å klassifisere jordtype, og flere ulike statistikker om skogbrann, skoggjødsling og fordeling av dyrkingsvekster. Beregningen av utslipp og opptak av CO<sub>2</sub> baserer seg på endringene i karbonbeholdningene for levende biomasse (karbonbeholdningsendringer for trær), død ved og strø<sup>58</sup> (økning og tap), mineralsk og organisk jord i de ulike arealbrukskategoriene. Lagerendringen av karbon i treprodukter (trelast, trebaserte plater, og papir- og kartongprodukter) inkluderes også i klimagassregnskapet under FNs klimakonvensjon basert på landenes nasjonale produksjon og aktivitetsdata fra SSB og Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (FAOSTAT). Utslipp av CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O beregnes for nitrogengjødsling, nitrogen-mineralisering, drenert organisk jord, skogbrann og indirekte N<sub>2</sub>O utslipp fra atmosfærisk avsetning og avrenning.

#### 4.1.5 Kvalitetssikring, kvalitetskontroll og verifikasjon

IPCC-retningslinjene for utslippsregnskap inneholder anbefalinger om kvalitetssikring, kvalitetskontroll og verifikasjon. Kvalitetssikring innebærer å ha prosedyrer for revisjon av datakvalitet, sikring av at

<sup>57</sup> Produktbruk omfatter bruk av drivhusgasser i produkter (for eksempel bruk av fluorinerte gasser i kjøleteknologi eller elektroniske produkter) og bruk av fossile energivarer til andre formål enn energiproduksjon.

<sup>58</sup> Strø er dødt organisk materiale på bakken, for eksempel nåler, blader, greiner, bark og kongler.

utslippsregnskapet representerer det beste estimatet for utslippene gitt tilgjengelig kunnskap mv. Kvalitetssikringen skal utføres av personell som ikke er direkte involvert i utarbeidelsen av utslippsregnskapet. Kvalitetskontroll er et system for rutinemessige tekniske aktiviteter for å måle og kontrollere kvaliteten på utslippsregnskapet, og inkluderer blant annet kontroll av nøyaktighet, fullstendighet, transparens og tidsløp. Verifikasjon handler om å sikre at utslippsregnskapet er til å stole på for de formål det er ment å brukes til. Dette skal gjøres ved bruk av kilder som er uavhengige av utslippsregnskapet. IPCC-retningslinjene peker på bruk av uavhengige utslippsregnskap og observasjonsbaserte utslippsberegninger som to hovedtilnærminger for verifikasjon.

Norge har en formell plan for kvalitetssikring og kvalitetskontroll som er beskrevet i *National Inventory Report* (NO EPA, 2022). Miljødirektoratet koordinerer prosedyrene for kvalitetssikring og kvalitetskontroll mens SSB og NIBIO er ansvarlige for kvalitetskontrollen for sine respektive deler av utslippsregnskapet. Når det gjelder kvalitetssikring, er Miljødirektoratet ansvarlig for revisjon av utslippsregnskapet med hensyn på kvalitet og områder som kan forbedres. Det har blitt gjennomført flere studier med sammenlikning av utslippsregnskap fra ulike land (Kvingedal et al. 2000).

Når det gjelder kvalitetskontroll, består denne for det første av en del generelle sjekkpunkter som utføres på utslippsregnskapet samlet sett hvert år, og som følger IPCC-retningslinjene. For det andre utføres det kilde-spesifikk kvalitetskontroll for utvalgte utslippskilder med hensyn på utslippsfaktorer, aktivitetsdata og usikkerhetsestimater.

Mens kvalitetssikring og kvalitetskontroll følger fastlagte rutiner og gjennomføres årlig, blir verifikasjon av det norske utslippsregnskapet gjennomført mer sporadisk basert på dedikerte studier. Metodene som har blitt brukt har hovedsakelig bestått i å sammenlikne det norske utslippsregnskapet med metodikk og utslippsfaktorer brukt i andre land og sammenlikning ved bruk av standardmetoder og standard utslippsfaktorer fra IPCC. Det ble utført en verifikasjonsstudie av hele utslippsregnskapet i 2000 (Kvingedal et al. 2000) hvor norske utslippsdata ble sammenliknet med data for Canada, Sverige og New Zealand. Denne studien undersøkte i hvilken grad de norske dataene var konsistente med, og hvor fullstendige de var, sammenliknet med hva andre land rapporterer, og ikke kvaliteten på dataene per se. Ingen store feil i det norske utslippsregnskapet ble avdekket i denne studien, men enkelte mindre feil, for eksempel utslipp som var rapportert i feil kategorier, ble funnet og disse ble rettet opp i etterkant. Miljødirektoratet har også utført/bestilt flere verifikasjonsstudier for utvalgte utslippskilder, blant annet flere for jordbruk. Innenfor det europeiske kvotesystemet (ETS) er det krav om verifikasjon fra en uavhengig tredjepart. Som en del av verifikasjonen av utslippsregnskapet sjekker Miljødirektoratet utslippene i ETS opp mot utslipp som er rapportert av virksomhetene i henhold til utslippstillatelsene (NO EPA, 2022).

## 4.2 Det kommunefordelte klimagassregnskapet

I Norge publiseres også et kommunefordelt utslippsregnskap for klimagassutslipp<sup>59</sup>. Klimagasstallene publiseres av Miljødirektoratet og baserer seg på data levert av SSB, Kystverket, NILU, NIBIO, Eurocontrol, samt data fra Miljødirektoratet som inkluderer utslipp fra industri, olje og gass, energiforsyning, avfall og avløp. Utslippstallene omfatter CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O (med enhet CO<sub>2eq</sub>) som skjer innenfor hver kommunes grenser. Klimagasstallene er fordelt på 45 utslippskilder i 9 kategorier i) industri, olje og gass; ii) energiforsyning; iii) oppvarming; iv) veitrafikk; v) sjøfart; vi) luftfart; vii) annen mobil forbrenning; viii) jordbruk; og ix) avfall og avløp. Dataene er tilgjengelige gjennom Miljødirektoratets nettside og metodene er beskrevet av Zimmer Jacobsen et al. (2022). Prinsippene for å estimere kommunefordelte klimagassutslipp følger også FNs standard for rapportering (IPCC). Beregning av utslipp i kommuner følger tre metoder; i) punktutslippskilder; ii) beregning av utslipp fra aktivitetsdata på kommunenivå; eller iii) gjennom fordelingsnøkler (Tabell 4.1). For punktutslipp består

<sup>59</sup> <https://www.miljodirektoratet.no/tjenester/klimagassutslipp-kommuner/?area=428&sector=-2>

dataene av data rapportert til Miljødirektoratet eller statsforvalteren av virksomheter fra industri, olje- og gassutvinning og energiforsyning, og plasseringen i kommuner er nøyaktig. Miljødirektoratet publiserer også et utslippsregnskap for skog- og arealbruk (LULUCF) på kommunenivå. Tabell 4.1 viser en oversikt over metoder brukt i hver av kategoriene og mer detaljert informasjon finnes hos Zimmer Jacobsen et al. (2022). Fordelingsnøkler brukes når data om lokalisering av utslipp mangler og det finnes to typer; nøkler som direkte reflekterer aktivitetsdata eller surrogatdata (f.eks. befolkningstall).

Kommunene skal i sin overordnede planlegging innarbeide tiltak og virkemidler for å redusere utslipp av klimagasser. I statlige planretningslinjer for klima- og energiplanlegging er det anbefalt at kommunenes planer er basert på informasjon om klimagassutslippene fordelt på kilder og sektorer, og det kommunefordelte utslippsregnskapet kan fylle denne funksjonen.

Datagrunnlaget for å beregne utslipp på kommunenivå er noe svakere enn på nasjonalt nivå. For de sektorene hvor utslippene beregnes ved hjelp av fordelingsnøkler, er det en svakhet at utslippene ikke nødvendigvis reflekterer de lokale utslippene og at lokale trender og utslippsreducerende tiltak ikke nødvendigvis blir fanget opp i utslippsregnskapet. Det er også enkelte utslippskilder som ikke inngår i utslippsregnskapet, herunder utslipp fra industrivirksomheter som ikke rapporterer utslipp til Miljødirektoratet eller statsforvalteren, utslipp fra produkter med fluorgasser og løsemidler og utslipp fra småbåter.

Tabell 4.1: Oversikt over typer av metoder brukt i det kommunefordelte utslippsregnskapet.

Kategorier	Metoder		
	Punktutslipp	Beregning fra aktivitetsdata på kommunenivå	Fordelingsnøkler
Industri, olje og gassvirksomhet	√		
Energiforsyning	√		
Oppvarming		√	√
Veitrafikk		√	
Annen mobil forbrenning			√
Sjøfart		√	
Luftfart		√	
Avfall og avløp		√	√
Jordbruk			√
Skog og annen arealbruk		√	

## 5. Analyse av nasjonale brukerbehov

### 5.1 Sammenfatning av brukerbehov (for norske brukere)

Brugerbehovene har blitt kartlagt gjennom møter med deltakerne i prosjektets referansegruppe, en workshop og en spørreundersøkelse. Referansegruppa har bestått av representanter fra Miljødirektoratet, Statistisk sentralbyrå, NIBIO og Meteorologisk institutt. Det har blitt gjennomført ett fellesmøte for referansegruppa og bilaterale møter/skriftlig dialog med enkelte av deltakerne. Workshopen ble arrangert i oktober 2022, og samlet åtte deltakere fra forvaltningen, forskningsinstitusjoner og næringslivet, i tillegg til ca. ti deltakere fra Norsk Romsenter, NILU og CICERO. Det har også blitt gjennomført et bilateralt møte med Klima- og miljødepartementet.

Dialogen med referansegruppa og tilbakemeldingene på workshopen viste at bruk av observasjonsdata til å gi informasjon om klimagassutslipp er et nytt område for de fleste aktuelle brukerne. De fleste deltakerne hadde liten eller ingen kjennskap til CO<sub>2</sub>M i utgangspunktet, og begrenset kjennskap til bruk av andre observasjonsdata som gir informasjon om klimagasser. Dialogen har derfor i stor grad vært preget av spørsmål og diskusjon mellom deltakerne i referansegruppa/workshopen og prosjektteamet om hva vi forventer at CO<sub>2</sub>M/CO<sub>2</sub>MVS vil kunne levere. Hovedinntrykket er at deltakerne er interesserte i å forstå hvordan data fra CO<sub>2</sub>M kan brukes. Samtidig er det vanskelig å definere brukerbehovene tydelig på det stadiet vi er nå.

Spørreundersøkelsen ble sendt ut til 75 personer fra 25 forskjellige institusjoner i januar 2023. 11 personer fra 10 institusjoner svarte på spørreundersøkelsen. Svarene kommer i stor grad fra de samme aktørene som har deltatt i referansegruppa og/eller workshopen. Selv om det er få svar på spørreundersøkelsen, vurderer vi at undersøkelsen gir nyttig informasjon fordi de som har svart representerer organisasjoner som antas å være helt sentrale brukere. Resultatene fra spørreundersøkelsen er presentert i vedlegg B.

Nedenfor oppsummerer vi brukerbehovene for ulike bruksområder. Dette er basert på informasjon per januar 2023.

### 5.2 Verifisering og forbedring av det nasjonale utslippsregnskapet

Et av kjerneformålene med CO<sub>2</sub>M er å skaffe data til verifisering og forbedring av nasjonale utslippsregnskap. I Norge vil de viktigste brukerne på dette området være Miljødirektoratet, NIBIO og SSB.

Observasjonsbaserte data har hittil ikke vært brukt i verifikasjon av det norske utslippsregnskapet, og det foreligger ingen konkrete planer om å ta det i bruk. Som en del av en undersøkelse utført gjennom *European Environment Information and Observation Network (EIONET)* i 2021, ble Miljødirektoratet og NIBIO intervjuet om invers modellering av utslipp (German et al. 2021). Her framkom det at Miljødirektoratet og NIBIO var usikre på hvordan estimer fra invers modellering kan brukes i Norge. Teknisk sett er det ikke enkelt å håndtere og integrere slike data. Deltakerne så et potensiale for å bruke estimer fra invers modellering for F-gasser, siden det er få utslippskilder og ingen naturlig opptak, men de kjente ikke til slike estimer for Norge. Deltakerne var usikre på om resultater for CO<sub>2</sub> fra invers modellering ville kunne brukes fordi forholdet mellom utslipp og opptak gjør det vanskelig å tolke dataene. Dessuten vanskeliggjøres tolkning av de strukturelle forskjellene mellom invers modellering (basert på flukser) og utslippsregnskapet. Selv om Miljødirektoratet og NIBIO ikke hadde konkrete planer om å ta i bruk invers modellering, var de interessert i å følge med på utviklingen og vurdere nytten av slike metoder i framtida.

Gjennom referansegruppa har Miljødirektoratet bekreftet at det vil være interessant om observasjonsdata kan brukes til å verifisere utslippsdataene for F-gasser, siden det er en del usikkerhet

i utslippsregnskapet for F-gasser. Miljødirektoratet har også uttrykt interesse for om observasjonsdata/estimer fra invers modellering kan brukes til å identifisere hittil ukjente utslippskilder (for alle drivhusgasser).

Med tanke på forbedringer av klimagassregnskapet, har SSB gjennom referansegruppa pekt på behov for bedre data for CH<sub>4</sub>-utslipp fra avfallsdeponier og CO<sub>2</sub>-utslipp fra sjøfart, samt for utslipp av N<sub>2</sub>O for alle sektorer. SSB har også uttrykt interesse for å kunne bruke CO2M-/ observasjonsdata til kvalitetssikring av beregnede eller rapporterte tall. For eksempel vil det være nyttig å se om utslippstrendene i utslippsregnskapet og CO2M er samsvarende. For å kunne dra nytte av dataprodukter fra CO2M vil det være viktig for SSB å følge med på dataene over tid for å sjekke om det er samsvar i nivåene på utslippene og tidsseriene. SSB vil ha behov for å få innsyn i nøyaktigheten til modellene, hvilke forutsetninger som er gjort og hvilken avgrensing kildene har (om de samsvarer med kildeinndelingen i UNFCCC *Common Reporting Format* (CRF) eller SSBs kildeinndeling).

Dataprodukter på nasjonalt nivå fra CO2MVS, kan i tillegg til å brukes til formell verifikasjon og forbedring av utslippsregnskapet, potensielt gi informasjon om utslippstrender før utslippsregnskapet er klart (nær sanntid) og gi tilleggsinformasjon om geografisk og tidsmessig fordeling av utslippene. Dette kan ha en nytteverdi både for miljøforvaltningen og miljøorganisasjoner. Nyttet verdien vil trolig avhenge av hvor robuste estimatene er, og hvorvidt det er mulig å utlede hvordan ulike sektorer/ utslippskilder bidrar til trendene.

### 5.3 Bedre kunnskap om utslippsutviklingen globalt og i andre land/ regioner

CO2MVS skal levere dataprodukter med regional og global dekning. Et av formålene er at produktene skal kunne brukes gjennom *Global Stocktake* under Parisavtalen. *Global Stocktake* skal gjennomføres hvert femte år, den første fullføres i 2023. Formålet er å få oversikt over hvordan landene kollektivt ligger an til å nå målene i Parisavtalen og å identifisere mangler og mulige løsninger. Både partene i avtalen (land) og andre interessenter (såkalte non-Party stakeholders) kan levere informasjon som benyttes som underlag i prosessen. CoCO<sub>2</sub>-prosjektet (som en *non-Party stakeholder*) leverte i februar 2023 et dokument om hvilke dataprodukter som er under utvikling gjennom prosjektet (Engelen, 2023). Den første *Global Stocktake* er under gjennomføring, og det er per april 2023 ganske åpent hva slags typer konklusjoner prosessen vil føre fram til og hvilke tema som vil få særlig oppmerksomhet. Dermed er det også en del usikkerhet omkring hvilke dataprodukter og annen informasjon fra CO2MVS som vil være mest relevant i *Global Stocktake*, herunder hvorvidt det kun vil være globale data som er av relevans eller om noen form for regional inndeling vil være nyttig. Klima- og miljødepartementet deltar i prosessene under *Global Stocktake* på vegne av Norge. Arbeidet i dag handler særlig om utforming av prosessen, og vi ser per i dag ikke noen spesifikke norske interesser knyttet til hvordan CO2MVS kan utnyttes i *Global Stocktake*.

Norske myndigheter har interesse av å følge med på utslippsutvikling og arealbruksendringer i store skogland, samt å bidra til at myndighetene i landene selv kan følge med på utviklingen. Det norske klima- og skoginitiativet (NICFI<sup>60</sup>) er regjeringens satsing på arbeid med å redusere utslipp av karbon fra skogforringelse og avskoging. Arbeidet er koblet til FNs klimakonvensjons rammeverk REDD+ (*Reducing emissions from deforestation and forest degradation*), hvor Norge over mange år vært en aktiv deltaker og leder av prosesser. Norge har dermed en kompetanse som gjør Norge godt stilt til å påvirke framtidig utvikling i REDD+<sup>61</sup>. Klima- og skoginitiativet har åpenhet (transparens) som et av hovedsatsingsområdene sine. Dette innebærer blant annet å bidra til at det finnes verktøy for å overvåke hvor avskoging finner sted. Klima- og skoginitiativet har en kontrakt med bl.a. Kongsberg Satellite Services om å gjøre høyoppløselige satellittbilder gratis og offentlig tilgjengelig. Bildene kan

<sup>60</sup> [www.nicfi.no](http://www.nicfi.no)

<sup>61</sup> <https://redd.unfccc.int/>

brukes til å oppdage små endringer i skogen, for eksempel fra ulovlig hogst eller for å spore gjenvekst. Tjenesten brukes blant annet av miljøforvaltningene i flere tropiske skogland. Klima- og skoginitiativet investerer også i *Global Forest Watch* som tilbyr satellittbilder som kan vise endringer i arealbruk og FNs organisasjon for ernæring og landbruk (FAO) programmet SEPAL som legger til rette for at skogland kan bruke satellittdata. Klima- og miljødepartementet har i et bilateralt møte uttrykt interesse for CO2MVS i den grad det kan bidra til å forbedre overvåkingen av arealbruksendringer eller erstatte data fra nåværende satellitter som etter hvert vil gå ut av drift. For KLD er frekvensen og nøyaktigheten på dataene viktige kriterier for om dataproduktene vil være nyttige; dataprodukter som viser arealbruksendringer i nær sanntid er viktige for å kunne avdekke, og gripe inn, i ulovlig hogst. Samtidig er dataprodukter med stor nøyaktighet viktig for å kunne følge med på utviklingen over tid (for eksempel til bruk i årlige rapporteringer).

Den norske miljøforvaltningen og norske miljøorganisasjoner vil også kunne ha interesse av å følge med på utslippsutviklingen i enkeltland/ regioner. Særlig i land hvor utslippsregnskapene har stor usikkerhet, vil informasjon fra CO2MVS kunne være en nyttig tilleggskilde til informasjon om utslippsutviklingen.

#### **5.4 Bedre kunnskap om utslipp på lokalt nivå (punktkilder, kommuner, byområder, fylkeskommuner osv.)**

Som beskrevet i kapittel 4.2 er det enkelte hull og svakheter i datagrunnlaget for det kommunefordelte klimagassregnskapet. Kommuner og fylkeskommuner vil kunne være interesserte i data som kan forbedre utslippsregnskapet eller brukes i tillegg til utslippsregnskapet. Forutsatt tilstrekkelig tilgang på observasjonsdata, kan CO2M potensielt gi informasjon om totale utslipp innenfor bestemte geografiske områder slik som kommuner og fylkeskommuner. Presisjonsnivået vil imidlertid være lavere jo mindre enhetene er. For SSB vil informasjon om lokale variasjoner i utslipp kunne være nyttig for kvalitetssikring av kommunetall. Behovene knyttet til forbedring av det kommunefordelte utslippsregnskapet er først og fremst knyttet til bestemte utslippskilder, for eksempel sjøfart og avfallsdeponier. Eksisterende resultater fra invers modellering har ikke det detaljnivået som er nødvendig for å kunne forbedre det kommunefordelte utslippsregnskapet for disse sektorene. Sluttbrukerne av data om lokale utslipp vil særlig være kommuner og fylkeskommuner, men det kan tenkes at disse brukerne vil ha behov for data som er tilrettelagt, for eksempel Miljødirektoratet, eventuelt av konsulenter med ekspertise på bruken av slike data. Miljøorganisasjoner kan potensielt også ha interesse av data om lokale utslipp, og vil antakelig ha behov for tilsvarende tilrettelegging av dataene som kommuner og fylkeskommuner.

Informasjon om store punktutslipp, for eksempel i industri og energiforsyning, kan være av interesse for aktører både i forvaltningen, i næringslivet og i miljøorganisasjoner. For eksempel er SSB interessert i å kunne identifisere store utslippsendringer fra punktkilder før SSB mottar rapportering fra bedriftene. SSB er også interessert i data som kan avdekke overskridelser av utslippstillatelser for bedrifter. Hvilke punktutslipp som vil være mulige å detektere avhenger av størrelsen på utslippet, beliggenhet, vindforhold m.m., se vedlegg A for et eksempel på detektering av punktutslipp.

#### **5.5 Forskning**

Den kanskje største brukeren av satellittdataene vil være forskningsmiljøer bestående av universiteter, forskningsinstitutter og forskningsavdelinger i bedrifter. Det er betydelige kunnskapshull om både karbon- og metansyklusen, og satellittdata gir mange nye muligheter for å fylle noen av disse kunnskapshullene. For det globale karbonbudsjettet er en nøkkelusikkerhet variabiliteten i de ulike komponentene som inngår i budsjettet. Reduksjon av denne kreves for å redusere størrelsen på "karbonubalansen", en nøkkelmåling for hvorvidt uavhengige modeller og data kan lukke karbonbudsjettet (Friedlingstein et al., 2022). Variabiliteten begrenser også vår mulighet til uavhengig

å verifisere rapporterte CO<sub>2</sub>-utslipp (Peters et al., 2017). På samme måte lider det globale metanbudsjettet av en vedvarende ubalanse, og det er fortsatt utfordrende å identifisere driverne bak nylige endringer i atmosfæriske metan-trender (Saunio et al., 2020). Bredere og mer konsistent dekning av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> fra satellitter vil bidra til å forstå utslipp fra punktkilder og naturlige utslipp, begrense modeller og dermed forklare modellvariabiliteten, i tillegg til en mengde av andre mer økosystemspesifikke prosesser. En utfordring for forskningsmiljøene vil bli å assimilere satellittinformasjonen i modeller, spesielt når den kombineres med en rekke andre både in-situ (f.eks. flukser) og satellitt-avledet (f.eks. biomassetthet) informasjon. Modellering av CO<sub>2</sub>-syklusen inngår i flere av jordsystem-modellene som brukes i IPCCs scenarioberegninger, og dette er også under utvikling i den norske jordsystemmodellen NorESM<sup>62</sup>. Her kan satellittdataene støtte validering av modellene og prosess-studier.

Avstemming av forskjeller i estimater av netto CO<sub>2</sub>-landflukser er et stort usikkerhetsområde og et aktivt forskningsområde (Petrescu et al., 2021). Spørsmål om avgrensing mellom forskjellige systemer er viktige hvor de fleste tilnærminger fra det vitenskapelige miljøet vurderer direkte effekter på områder som gjennomgår arealbruksoverganger, mens UNFCCC-rapporteringen vurderer en mer utvidet definisjon av "forvaltet land" (inkludert skoger som ikke gjennomgår endringer i arealbruk og miljøeffekter (som CO<sub>2</sub>-gjødsling). På toppen av dette fører inventarbaserte tilnærminger (bokføringsmodeller), land-overflatemodeller (eller dynamiske globale vegetasjonsmodeller) og inversmodeller ofte til ulike estimater som er vanskelige å forene. Naturligvis har variabilitet også en stor effekt, og gjør det vanskelig å avstemme uavhengige estimater med UNFCCC-beholdninger.

I Norge arbeider flere forskningsmiljøer (bla. CICERO, NILU, NORCE, MET, UiB, Bjerknessenteret, UiO, UiT) med aktiviteter som kan bidra med data til CO2MVS, verifisering av CO2MVS-data, CO2MVS data-analyse og formidling av CO2MVS-data og resultater. For å sikre at disse aktivitetene kan bidra til CO2MVS er det behov for støtte til dem.

## 5.6 Næringsvirksomhet

Vi har svært begrenset informasjon om brukerinteressene i næringslivet. Basert på innspill fra deltakerne på workshopen, antar vi at olje- og gassnæringen kan ha interesse av å bruke satellittdata til å identifisere utslippskilder, for eksempel lekkasjer, og til å anslå omfang på utslipp fra for eksempel fakling og lekkasjer. Utover olje- og gassnæringen, kan aktuelle brukere blant annet være konsulentselskaper som leverer tjenester basert på miljøovervåking. CO2M/CO2MVS vil gi nye data med høyere oppløsning og nøyaktighet enn eksisterende data. For eksempel vil konsulentvirksomheter kunne utvikle nye innovative produkter og tjenester basert på data fra CO2M/CO2MVS og levere tjenester til CO2MVS i form av for eksempel bakkemålinger.

---

<sup>62</sup> <https://www.noresm.org/>



## 6. Analyse av nasjonale utviklingsbehov

Nasjonale brukerbehov er beskrevet over. De nasjonale brukerbehovene er beskrevet ut fra en situasjon hvor de fleste potensielle brukerne ikke (eller i liten grad) har erfaring med bruk av observasjonsdata til overvåking av klimagassutslipp. Erfaringer fra brukere i andre land kan gi nyttig informasjon om potensial og utfordringer med bruk av observasjonsdata. Før vi presenterer nasjonale utviklingsbehov gir vi derfor ytterligere bakgrunnsinformasjon om hvordan observasjonsdata kan brukes til verifisering av utslippsregnskap basert på erfaringer fra gjennomførte prosjekter og land som bruker slike data i dag. Deretter analyserer vi nasjonale utviklingsbehov innenfor de forskjellige komponentene til CO2MVS.

### 6.1 Erfaringer med bruk av observasjonsdata til verifikasjon av nasjonale utslippsregnskap

Enkelte land har allerede tatt i bruk observasjonsdata til verifikasjon av nasjonale utslippsregnskap. Gjennom ulike forskningsprosjekter og ekspertgrupper i IPCC har det vært dialog mellom forskningsmiljøene som utarbeider observasjonsbaserte estimater og byråer med ansvar for utslippsregnskap. I dette delkapittelet beskriver vi erfaringene fra disse aktivitetene, herunder hvilke utfordringer som har blitt identifisert. Erfaringene fra eksisterende bruk av observasjonsdata gir et godt utgangspunkt for å vurdere nasjonale utviklingsbehov, som omtales i neste delkapittel.

#### 6.1.1 *Oversikt over IPCC-retningslinjene og land som bruker observasjonsdata*

Som beskrevet i kapittel 4.1 er det krav til rapportering av klimagassutslipp under FNs klimakonvensjon (UNFCCC). Rapporteringskravene gjelder i dag for ei gruppe av land, men vil snart utvides til å omfatte alle land (Perugini et al. 2021). UNFCCC følger IPCCs retningslinjer for rapportering (IPCC 2006). IPCC-retningslinjene har systemer for kvalitetssikring, kvalitetskontroll og verifikasjon, jf. kapittel 0. Verifikasjon er definert som en samling av aktiviteter og prosedyrer som kan følges i planleggingen og utviklingen, eller etter ferdigstilling av et utslippsregnskap, og som kan bidra til å sikre dets troverdighet for de formålene utslippsregnskapet er ment å brukes til. Metodene skal normalt være uavhengige av utslippsregnskapet. Det kan innebære sammenlikninger med andre utslippsregnskap eller sammenlikninger med utslippsestimater basert på observasjonsdata og tilhørende modeller.

En utfordring med å sammenlikne utslippsregnskapet med estimater basert på andre utslippsregnskap, er at det ikke finnes alternative utslippsregnskap som er fullt ut uavhengige (Andrew, 2020). Dette skyldes at de normalt er basert på delvis de samme datakildene, for eksempel energidata rapportert av det aktuelle landet. Erfaringer har vist at detaljerte sammenlikninger kan bidra til å klargjøre ulikheter i systemgrenser og i noen tilfeller identifisere feil (Andrew, 2020). Forbedringer av uavhengige utslippsregnskap kan være nyttig siden disse ofte blir brukt i globale studier hvor det er ønskelig å bruke felles metoder på tvers av land.

Observasjonsbaserte estimater forutsetter observasjoner av konsentrasjoner i atmosfæren eller flukser, og disse må være koblet til en transport-modell. Disse metodene er mer komplekse, mer usikre og kan kreve omfattende og dyre beregninger. Samtidig er de mer uavhengige enn sammenlikninger basert på alternative utslippsregnskap (selv om inversmodeller også trenger utslippsregnskap som utgangspunkt for beregningene).

Da det kom oppdaterte IPCC-retningslinjer for utslippsregnskap i 2019, ble veiledningen om bruk av atmosfæriske målinger utvidet (IPCC 2019). Det ble lagt vekt på at det har blitt gjort vesentlige framskritt i bruken av invers modellering av atmosfærisk transport for å beregne utslipp på nasjonalt nivå. Flere land bruker nå atmosfæriske målinger til verifikasjon av deler av det nasjonale utslippsregnskapet. De mest omfattende analysene har vært gjort av Storbritannia og Sveits. Disse

landene har utviklet omfattende metoder basert på invers modellering, som dekker CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O og F-gasser. Flere andre land bruker observasjonsdata i mindre omfang eller basert på enklere modeller. Australia og New Zealand har beregnet regionale utslipp av CH<sub>4</sub> for å få mer kunnskap om metoden og potensialet. I tillegg til Storbritannia og Sveits, bruker også Australia og USA observasjonsdata til beregning av utslipp av F-gasser.

### **6.1.2 Erfaringer med bruk av observasjonsdata til verifikasjon for ulike drivhusgasser**

Potensialet og utfordringene for bruk av observasjonsbaserte utslippsestimater er ulikt for ulike klimagasser. Når det gjelder fossile CO<sub>2</sub>-utslipp har utslippsregnskapene i utviklede land relativt lav usikkerhet. Dermed er det begrenset hvor mye nyttig tilleggsinformasjon man får fra observasjonsbaserte data, som per i dag har høy usikkerhet. For utviklingsland, hvor datagrunnlaget for utslippsregnskapene i mange tilfeller er svakere, er det større potensial for forbedringer basert på observasjonsbaserte estimater. Kombinasjon av satellittdata for CO<sub>2</sub> og andre gasser, som NO<sub>2</sub>, kan redusere usikkerheten til observasjonsdataene for fossile utslipp og potensielt bidra til forbedringer i kartlegging av tidsvariasjoner for fossile CO<sub>2</sub>-utslipp.

For CO<sub>2</sub>-utslipp fra arealbruk har utslippsregnskapene ofte høy usikkerhet. Ved bruk av observasjonsbaserte data er det imidlertid krevende å skille mellom naturlig opptak og utslipp på den ene siden og menneskeskapt opptak og utslipp på den andre siden, og dette gjør det per i dag vanskelig å bruke observasjonsdata til verifikasjon av utslippsregnskap. Dette er likevel et område hvor det kan ha god nytteverdi å forbedre de observasjonsbaserte estimatene siden det er stort behov for å forbedre utslippsregnskapene på dette området.

For utslipp av CH<sub>4</sub> er det en del usikkerhet i utslippsregnskapene. Resultater fra invers modellering har også en del usikkerhet, men kan være mulige å bruke til verifikasjon av utslippsregnskap. Det vil i så fall være en fordel (muligens en forutsetning) å ha et sterkt bakkebasert nettverk i tillegg til satellittdata. Naturlige utslipp og sesongvariasjoner i utslippene kan utgjøre en utfordring i bruken av invers modellering. Likevel er bedre kartlegging av tidsvariasjoner (månedlige, årlige) en av fordelene med satellittobservasjoner og derfor også et område hvor bruk av observasjonsbaserte estimater kan ha god nytteverdi.

Også når det gjelder N<sub>2</sub>O er det en del usikkerhet i utslippsregnskapene, og det kan være mulig å bruke resultater fra invers modellering til verifikasjon av utslippsregnskap. I likhet med for CH<sub>4</sub> vil det være en fordel å ha et bakkebasert nettverk i tillegg til satellittdata.

F-gasser er godt egnet for invers modellering fordi alle forekomster av disse gassene i atmosfæren skyldes menneskeskapt utslipp, og fordi de er langlivede gasser. Samtidig er utslippsregnskapene ofte baserte på et begrenset datagrunnlag og har dermed høy usikkerhet.

En klar utfordring for eksisterende verifikasjonskapasitet er tilgjengeligheten av tilstrekkelige bakkebaserte observasjoner. For gasser med lang levetid og ingen naturlige kilder, som F-gasser, kan et begrenset bakkeobservasjonsnettverk være tilstrekkelig. For de fleste relevante gasser, som CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>, er det imidlertid nødvendig med et tett bakkeobservasjonsnettverk, fortrinnsvis med et mangfoldig sett med observasjoner for å kunne bruke resultatene til validering. Nasjonale utslippsregnskap har generelt høy usikkerhet for CH<sub>4</sub> og CO<sub>2</sub>-flukser fra land, og dette kan være de områdene hvor de største forbedringene kan oppnås. Spesielt for utviklingsland hvor usikkerheten er større, kan det også oppnås betydelige forbedringer for fossile CO<sub>2</sub>-utslipp.

En utfordring er at byråer med ansvar for utslippsregnskap (eller brukere i bredere forstand) kan ha andre behov enn hva dagens observasjonsdata og modeller er tilrettelagt for. Spesielt er de nasjonale byråene med ansvar for utslippsregnskap ofte interessert i sektorer og utslippsfaktorer der

usikkerheten er stor eller hvor det brukes enkle metoder. De fleste eksisterende verifikasjonssystemer, selv med høy romlig og tidsmessig oppløsning, kan ikke skille utslipp etter sektor. Et viktig område for fremtidig arbeid er å bygge bro mellom det som er mulig, gitt tilgjengelige observasjonsdata og modelleringsverktøy, med det brukerne trenger. Dette innebærer videre utforskning av mulighetene for å kombinere CO<sub>2</sub>M/CO<sub>2</sub>MVS data med data fra andre satellitter, for eksempel høyoppløselige data (Sentinel 2) og posisjonsdata (Galileo).

Bruk av satellitt-observasjoner for beregning av utslipp har vært utbredt for luftforurensningskomponenter (spesielt NO<sub>2</sub> og NH<sub>3</sub>) og erfaringene viser at disse dataene har tilleggsverdi i verifikasjon av utslippsestimatene (Tarrason et al., 2019). Bruken av observasjonsbaserte estimater er i dag mest utbredt for F-gasser (HFK, PFK og SF<sub>6</sub>), mens enkelte land bruker/prøver ut bruk av observasjonsbaserte estimater for CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O. Foreløpig er det ingen land som har brukt observasjonsbaserte estimater til detaljert verifikasjon av CO<sub>2</sub>-utslipp, verken fossile utslipp eller utslipp fra arealbruk. Tyskland har imidlertid gjort sammenlikninger mellom utslippsregnskapet og tilgjengelige resultater fra invers modellering<sup>63</sup>. De landene som har den mest omfattende bruken av analyser basert på invers modellering gjør dette i nært samarbeid mellom de som er ansvarlige for utslippsregnskapet og forskningsmiljøer med ekspertise på invers modellering.

### **6.1.3 Erfaringer fra andre brukerorienterte aktiviteter**

Gjennom de EU-finansierte forskningsprosjektene VERIFY og CoCO<sub>2</sub> har det i perioden 2018-2022 blitt gjennomført flere nettverksmøter mellom prosjektpartnerne og nasjonale byråer som har ansvar for utslippsregnskapene. IPCC gjennomførte i 2022 en ekspert-workshop om verifisering. Gjennom disse aktivitetene har det blitt identifisert en del utfordringer og utviklingsbehov.

Et gjennomgangstema har vært behovet for å øke kompetansen hos brukerne (byråer med ansvar for utslippsregnskap). De fleste brukerne startet med veldig begrenset kjennskap til invers modellering, og etterspurte en grunnleggende opplæring. I tillegg til opplæring av brukerne, så både brukerne og forskerne behov for tett og langvarig samarbeid mellom de to miljøene.

Gjennom VERIFY ble utslippsregnskapsbyråene presentert for konkrete resultater fra invers modellering og ulike aktivitetsbaserte estimater. For å kunne sammenlikne disse resultatene med utslippsregnskapene, hadde brukerne behov for å forstå hva som lå bak resultatene. Ulike systemgrenser (geografisk dekning og hvilke typer utslipp som ble dekket) og ulik bruk av terminologi i forskningsmiljøene vs. i IPCC-retningslinjene viste seg å utgjøre sentrale begrensninger for å kunne sammenlikne resultater. Det var også krevende for brukerne å forholde seg til at det kunne være stort språk mellom ulike observasjonsbaserte estimater. Andre utfordringer var at resultatene fra invers modellering ofte hadde for stor usikkerhet til å kunne brukes til verifikasjon av utslippsregnskap og at den geografiske oppløsningen i mange tilfeller ikke var god nok. Dette er utfordringer som delvis kan løses gjennom at kommunikasjonen av resultater fra invers modellering tilpasses bedre til behovene til utslippsregnskapsbyråene, men som også vil kreve videre utvikling i modelleringen og tolkningen av resultatene.

## **6.2 Nasjonale utviklingsbehov knyttet til CO<sub>2</sub>MVS**

Erfaringene med bruk av observasjonsdata, som omtalt i kapittel 6.1., viser at bruken av observasjonsdata og nødvendige modellverktøy vil kreve et høyt nivå av vitenskapelig kompetanse og utstrakt samarbeid mellom ulike fagmiljøer. CO<sub>2</sub>MVS (som er beskrevet i kapittel 2.6) utgjør et rammeverk for utvikling av denne kompetansen og samarbeidet.

<sup>63</sup> Resultatene er omtalt i Tysklands National Inventory Report 2022. CAMS estimat for fossil CO<sub>2</sub> basert på invers modellering viser en svært sammenfallende trend med det nasjonale utslippsregnskapet. Vi har imidlertid ikke informasjon om hvor robust dette resultatet er, og resultatet bør tolkes med forsiktighet.

CO2MVS er grafisk beskrevet i Figur 2.4. Denne figuren er også nyttig for å strukturere en analyse av nasjonale utviklingsbehov. For alle aktuelle bruksområder for CO2M-data, enten det er verifikasjon av rapporterte utslipp, identifikasjon av metanlekkasjer eller å forstå variasjonene i karbonsyklusen, vil man ha behov for alle elementene i CO2MVS-systemet (om enn i noe varierende grad for ulike bruksområder). Innenfor de ulikeboksene i CO2MVS-systemet, finnes det potensial for norske aktører til å bidra til å levere data og utføre modellering, og til å bruke resultatene. Begge deler vil kreve videreutvikling av kompetanse. Videre i dette kapitlet diskuterer vi nasjonale utviklingsbehov innenfor hver av kategoriene i CO2MVS-skissen.

### 6.2.1 *A priori informasjon (inngangsdata)*

Observasjonsbasert invers modellering er avhengige av inngangsdata, for eksempel utslippsregnskap og informasjon om karbonflukser for landarealer og til havs. Man bruker disse inngangsdataene sammen med observasjonsdata for å lage et nytt utslippsestimat (dette kalles *a posteriori* estimat). Inngangsdataene må normalt ha høy romlig og tidsmessig oppløsning, i tillegg til detaljerte vurderinger av usikkerheten.

De fleste utviklede land beregner klimagassutslipp og rapporterer dette til FNs klimakonvensjon. Disse utslippsregnskapene har en detaljert sektorinndeling. Utslippsregnskapene gjelder imidlertid for et helt land samlet sett, og per år. De har derfor ikke tilstrekkelig romlig og tidsmessig oppløsning til å kunne brukes i CO2MVS. Dessuten rapporterer foreløpig ikke utviklingsland utslippsregnskap etter samme format og tidsfrister. Invers modeller er derfor avhengige av utslippsestimater fra andre organisasjoner, for eksempel *Emissions Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR) som utvikles og driftes av EUs *Joint Research Centre* (JRC). Datasettene som brukes kommer fra organisasjoner som har som mål å ha globalt harmoniserte datasett og gi den nødvendige romlige og tidsmessige oppløsningen. Denne harmoniseringen medfører imidlertid at estimatene kan avvike fra det land offisielt rapporterer til UNFCCC (Petrescu et al., 2021). Landenes utslippsregnskapsbyråer har generelt mye bedre kunnskap og tilgang til landspesifikke data for å estimere utslipp med et høyt nivå av romlige og tidsmessige detaljer enn tredjepartsorganisasjoner. Følgelig vil det være et viktig bidrag til CO2MVS at Norge og andre utviklede land (og utviklingsland etter hvert som kapasiteten utvikler seg) leverer nasjonale utslippsregnskap i samsvar med hva som er rapportert til UNFCCC, men med et høyere nivå av romlig og tidsmessig oppløsning, og inkludert detaljerte usikkerhetsvurderinger. Disse vil da kunne brukes som *a priori* informasjon. Som ansvarlige for utslippsregnskapet og annen nasjonal statistikk, besitter Miljødirektoratet, SSB og NIBIO verdifull kompetanse på dette området, og vil kunne ha interesser i hvordan datasettene videreutvikles. Andre aktører som leverer data relevant for klimagassutslipp i Norge er Kystverket, NILU, og Eurocontrol. I tillegg utreder Meteorologisk institutt muligheter for å bruke sine modellverktøy (*Local Fractions* metoden, Wind et al., 2020) til invers modellering av metan for å forbedre utslippsdata i Nord-Europa.

Når det gjelder data for karbonflukser for landarealer og hav, kan disse være basert på observasjoner, modeller eller en kombinasjon. Tilsvarende som for utslippsdataene, må disse dataene ha passende romlig og tidsmessig oppløsning, slik at de kan kombineres med andre datasett og tilpasses hva som trengs i invers modellering. Norge har allerede miljøer med sterk kompetanse på estimering av havflukser. Basert på denne kompetansen, kan et mulig utviklingsområde være at disse miljøene bygger seg opp til å bli faste leverandører av globale datasett som kan benyttes som inngangsdata i CO2MVS.

### 6.2.2 *Observasjoner*

Det trengs en rekke ulike typer observasjoner til CO2MVS. I tillegg til CO2M-satellittene vil data fra andre Copernicus satellitter og Galileo være av nytt. Videre er overflate- og luftbårne observasjoner

nødvendig, både for å gi føring til invers modelleringen, men også for validering av satellittdataene. Se nærmere omtale av dette i kapittel 2.4 og 2.5. Observasjonene er komplementære, og en type observasjoner kan ikke erstatte en annen; satellitter reduserer altså ikke behovet for in-situ observasjoner. Meteorologiske observasjoner er også nødvendig for invers modelleringen. En rekke annen informasjon kan også brukes for å gi føringer til invers modelleringen. Dette kan være forekomsten av andre drivhusgasser eller forurensinger, nattlys, sosioøkonomiske variabler og så videre. Ulike typer informasjon brukes avhengig av hvilken invers-modell man bruker.

Norge kan potensielt spille flere roller når det gjelder observasjoner. Det er ganske få in situ-observasjoner i Norge, se avsnitt 2.5, og geografien legger visse begrensninger på muligheten for å bruke satellittdata. Med tanke på å oppnå brukbare resultater for Norge innen CO2MVS, vil tilgang på flere in situ-observasjoner trolig ha betydelig nytteverdi. Flere in situ-observasjoner vil kunne bidra til å tette hull i dekingen av satellittdata og gi sterkere føringer til invers-modellene. Norge kan også spille en rolle i å forberede observasjonsdata for CO2MVS.

Norske aktører med relevant kompetanse og data er blant andre Meteorologisk Institutt, NILU, ICOS Norge og NORCE. Meteorologisk institutt samler inn værdata og annen data relevant for luftkvalitet. NILU har ansvaret for å måle klimagasser ved Birkenes og Zeppelin-observatoriene (Myhre et al., 2022). NORCE driver blant annet mye med observasjoner i Nord-Norge gjennom bruk av flyvende og flytende droner. ICOS-Norge<sup>64</sup> koordinerer nettverksaktiviteter inn mot ICOS. For validering av CO2M er TCCON instrumentet ved AWIPEW-stasjonen<sup>65</sup> i Ny-Ålesund viktig.

### 6.2.3 Integrasjon

Integrasjonsdelen til CO2MVS består i stor grad av modellering eller intensiv dataanalyse. Norge har allerede betydelig kompetanse innen invers modellering, spesielt ved NILU som har bidratt til å utvikle *Common Inversion Framework* (CIF, Berchet et al., 2021). CIF er en plattform for å harmonisere inndataforutsetninger og produsere konsistente og standardiserte utdata fra ulike inversjonsmodeller.

Integrasjonsdelen til CO2MVS er selve kjernen i systemet, og det er mange måter å øke dens ytelse. Rammeverk for invers-modellering kan trenge forbedringer for å håndtere flere strømmer av observasjonsdata som kommer fra forskjellige kilder. Forbedret oppløsning og føringer fra observasjoner kan kreve ytterligere dataressurser. Mengden av data legger også mer press på robust validering og beregninger for validering. Spesielt for landsektoren blir metoder for å skille menneskeskapte og naturlige flukser stadig viktigere. Og det er behov for å formidle hvordan integreringstrinnet fungerer til et bredere publikum, samt løfte fram kunnskapen til modellørene og å overføre denne til brukere av dataene.

Norske aktører som arbeider med dataassimilasjon og modellering er blant andre universitetene, Meteorologisk institutt og NILU. NILU bruker blant annet transportmodellen *FLEXible PARTICle dispersion model* (FLEXPART<sup>66</sup>) sammen med egenutviklet programvare for invers modellering, e.g., FlexInvert<sup>67</sup> for blant annet studier av metan (se for eksempel Pisso et al., 2019; Thompson og Stohl, 2014; Thompson et al., 2017, Peng et al., 2022; Vojta et al., 2022). Meteorologisk institutt assimilerer satellittdata i sine daglige luftkvalitetsvarsler (f.eks. NO<sub>2</sub> i *European Monitoring and Evaluation Programme* - EMEP), men bruker dataene også til å evaluere sine modeller. I tillegg brukes satellitter til å forbedre utslippsestimater (både fra menneskeskapte og naturlige kilder), særlig i områder med

<sup>64</sup> <https://no.icos-cp.eu/>

<sup>65</sup> <https://www.awipev.eu/>

<sup>66</sup> [www.flexpart.eu](http://www.flexpart.eu)

<sup>67</sup> <https://flexinvert.nilu.no>

svakt datagrunnlag fra før. Her vil ikke bare CO<sub>2</sub>, men i særlig grad de andre gassene og aerosoler (biprodukter) fra CO2M-satellittene være av stor interesse.

#### **6.2.4 Utputt**

CO2MVS gir *a posteriori* resultater basert på føringer fra observasjoner. Det er flere forhold som skal være på plass for at denne informasjonen er av verdi. Kunnskap om usikkerheten i resultatene er sentrale, siden den må kobles til usikkerheten i *a priori* informasjonen for å kunne si om forskjellene mellom *a priori* og *a posteriori* estimater er statistisk signifikante, enten i absolutt verdi eller som trender. Mange modeller er drevet av klima og inkluderer variasjoner fra år til år. Dette i motsetning til mange inventarer som er basert på metoder som midler ut denne variabiliteten. Det kan derfor være nødvendig å fjerne variabilitet fra CO2MVS resultatene. Ganske ofte brukes flere kjøringar av en modell (ensembler) enten ved å kjøre en modell flere ganger med forskjellige innputt eller kjøre flere modeller med samme innputt. I mange tilfeller kan det være nødvendig å utføre statistiske analyser på ensemblet for å kunne sammenligne med resultat fra et inventar.

Alle disse aspektene handler i hovedsak om å bygge opp modelleringskapasitet og robust statistisk behandling av innputt- og utputt-data. Det er i dag for lite fokus på disse aspektene i den eksisterende litteraturen, noe som må tas opp for å få et brukbart beslutningsstøttesystem.

#### **6.2.5 Beslutningsstøttesystemet (Decision Support System)**

Beslutningsstøttesystemet (*Decision Support System*) bringer sammen komponentene i CO2MVS og oversetter dem til informasjon tilpasset brukerbehov. Brukere på forskjellige nivå vil ha ulike behov. På det høyeste nivået kan en bruker ganske enkelt være interessert i hvor robust rapporterte landutslippsestimater er, eller om landet er på vei til å oppfylle eller overgå sine utslippsløfter (NDCs). En institusjon som arbeider med utslippsregnskap, vil allerede ha et visst nivå av teknisk kompetanse og vil kanskje foretrekke analytiske verktøy som de kan bruke til å mate informasjon inn i sine eksisterende systemer. En ekspert-bruker kan ønske detaljerte data som de deretter kan bruke sammen med sine egne analyseverktøy.

En viktig del av beslutningsstøttesystemet er å forstå brukernes behov og forventninger. Deretter kan analytiske verktøy eller grafisk materiale utvikles for å møte brukerens behov. En eller annen type tjeneste som hjelper brukere å bruke og tolke dataene ved hjelp av tilgjengelige verktøy er sannsynligvis en nødvendig del av beslutningsstøttesystemet.

Til syvende og sist vil CO2MVS være et operativt verktøy administrert av Copernicus. I driftsmodus vil CO2MVS ta behandlede inndata fra en rekke kilder og frambringe nye utdata med jevne mellomrom (for eksempel daglig). Utdataene kan for eksempel være rutenettkart over estimerte CO<sub>2</sub>-flukser, som deretter må aggregeres på en måte som dekker brukerbehovene. Noen brukere kan ha behov for å få tilgang til dataene på regelmessige intervaller, for eksempel for å identifisere eller karakterisere metanlekkasjer. Andre brukere vil ønske semi-regelmessig tilgang til dataene, for eksempel årlig, for å sammenligne med rapporterte inventar-utslippsestimat. Det forventes derfor at beslutningsstøttesystemet må dekke ulike datastrømmer med ulik tidsmessig oppløsning. I tillegg til en fast daglig oppdatering, kan det være behov for perioder for mer detaljert analyse, for eksempel når helårsdata er tilgjengelig og validert.

En prosess hvor brukere engasjeres er sannsynligvis nødvendig for å informere og oppdatere brukere om CO2MVS, hva CO2MVS kan tilby, og for å avklare og klargjøre forventninger. En felles kunnskapsbase er nødvendig mellom brukere og forskere for å gjøre diskusjoner effektive. Her er det mange muligheter for Norge til å være involvert i prosesser som leder fram mot design og utvikling av

CO2MVS. Slikt arbeid har allerede startet under CoCO2-prosjektet, hvor CICERO leder arbeidet med en skisse til et beslutningsstøttesystem.

For beslutningsstøttesystemet vil sentrale brukere kunne ha en rolle i å definere brukerbehovene. Dette gjelder for eksempel Miljødirektoratet, SSB, NIBIO og Klima- og miljødepartementet, eventuelt også private selskaper, for eksempel Equinor.

### **6.3 Tilgjengeliggjøring av data og utvikling av datatjenester for å møte brukerbehovene**

Data fra CO2M-satellittene og CO2MVS vil være fritt tilgjengelig. Dermed er det opp til brukerne å bruke dem, men bruk av disse dataene vil kreve teknisk kompetanse. Derfor vil det være behov for verktøy som tilrettelegger rådata til forskjellige brukerbehov (Hermansen et al., 2021). Når det gjelder verifisering av utslipp, utvikler Copernicus CO2MVS som inkluderer et beslutningsstøttesystem (se avsnitt over). Andre brukerapplikasjoner som deteksjon av enkeltutslipp osv., vil trenge noe lignende, men hvem som skal ta den oppgaven (akademia, industri, myndigheter osv.) vil avhenge av behov, kunnskap og finansiering.

## 7. Anbefalinger

I foregående kapitler er de planlagte CO2M-satellittene og kapasiteten CO2MVS beskrevet sammen med andre eksisterende og påtenkte satellittbaserte målinger av klimagasser. En oversikt er gitt over norsk forvaltning og dens bruk og rapportering av klimaregnskap. Brukerbehovene til nasjonale aktører som forvaltning, forskningsmiljøer og industri er analysert. Videre er behovet for nasjonal utvikling i forbindelse med CO2M/CO2MVS analysert. Under gis anbefalinger for veien videre for Norge vedrørende CO2M/CO2MVS. Anbefalingene er gruppert inn i de forskjellige komponentene til CO2M/CO2MVS, se Figur 2.4 og kapittel 6.2.

### Inngangsdata

- **Forbedret tidsmessig og romlig oppløsning:** For å utnytte det fulle potensialet til data fra CO2M kreves invers modellering. Denne modelleringen trenger inngangs- og observasjonsdata, ideelt sett med en oppløsning tilsvarende CO2M. Det bør undersøkes om behandling og tilgang til inngangs- og observasjonsdata (utslippsdata, kompleks topografi, skyer og hav) kan forbedres som forberedelse til operative aktiviteter. For eksempel bør det undersøkes om det finnes måter å få bedre tidsmessig og romlig oppløsning for norske klimagassestimer (i samsvar med UNFCCC-rapporter) både for fossile og land-baserte kilder. Dette vil være nyttig fordi eksisterende estimer er ofte avhengig av tredjepartsberegninger som ikke alltid tar hensyn til spesifikke norske data.

### Observasjoner

- **Dekningsgrad for Norge:** CO2M-satellittene har annen lokal overflygningstid enn for eksempel S5P. På grunn av døgnvariasjoner i skydekke er det behov for å kartlegge dekningsgraden for CO2M-satellittene for Norge og høye breddegrader og hvordan dekningsgraden påvirker nøyaktigheten til invers modellering av utslipp fra kilder i Norge. I forkant av oppskytning kan syntetiske CO2M-data kombinert med realistiske skydata brukes. Resultatene fra disse undersøkelsene bør verifiseres med data fra CO2M-satellittene når de blir tilgjengelige.
- **Verifisering og validering:** Behovet for verifisering og validering av CO2M-målinger (for eksempel mot bakke-data og sammenligning med data fra andre satellitter) og CO2MVS-utslippestimer for norske forhold (fjell- og fjordområder, krevende skyforhold og beliggenhet langt mot nord) bør undersøkes. Dekningsgraden til CO2M-satellittene for norske interesseområder vil ha betydning for behovet for bakkemålinger. Dette kan gjøres ved en eller flere kasusstudier for å identifisere om flere in-situ observasjoner og totalkolonne-observasjoner i Norge vil være av nytte, og i så fall hvilke som vil gi størst nytteverdi (HFC, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, osv.).
- **Synergieffekter:** Det bør gjennomføres studier for å se på utnyttelse og synergi av satellittmålinger komplementære til CO2M (for eksempel fra hyperspektrale instrumenter og MERLIN). Det bør også gjennomføres studier for å se på utnyttelse og synergi av satellittmålinger komplementære til drivhusgass- og andre produkter fra CO2M (for eksempel NO<sub>2</sub> og aerosol-data).

### Integrasjon

- **Informasjon fra invers-modeller:** Gitt de føringer som skyldes Norges beliggenhet og dekningsgraden til CO2M satellittene bør det undersøkes hvilken informasjon invers-modeller kan gi om norske utslipp fra land og hav basert på CO2M-målinger. Arbeidet kan initieres med en vurdering av eksisterende modeller og resultater fra klimagassfluksene fra CAMS og deres nytte for norske forhold.
- **Forbedring av invers-modeller:** For å forberede invers-modellene til operasjonell bruk må de gjøres mer beregningseffektive for å kunne håndtere datamengden fra CO2M-satellittene.



Videre forbedringer inkluderer økt oppløsning av transportmodellene for å kunne håndtere norske forhold med kompleks topografi og utfordringer med å skille hav- og landflukser, og en full oversikt av usikkerheter og skjevheter i CO2M-dataene må forberedes for bruk i invers modellering.

#### Utputt

- **Norske klimagass-estimat:** Det bør utføres kasusstudier for å undersøke potensialet til observasjonsbaserte estimater med tanke på om disse kan bidra til forbedring og/eller verifisering av norske nasjonale og kommunefordelte klimagass-estimater. Dette bør inkludere en detaljert kartlegging av behovene til de ansvarlige for utslippsregnskapet (SSB, NIBIO, MDir) for å forbedre estimater og inkludere fossilt CO<sub>2</sub>, landbasert CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> med utgangspunkt i de behovene som er kartlagt i denne rapporten.
- **Sammenligningsverktøy:** Det bør utvikles verktøy tilpasset norske forhold for å sammenligne utslippestimat fra aktivitets- og observasjonsbaserte metoder, sammen med den romlige fordelingen av utslipp tilgjengelig i Norge (for eksempel hvorvidt/ hvordan data fra CO2M/CO2MVS kan bidra til det kommunefordelte klimagassregnskapet). Dette vil kreve nært samarbeid mellom brukere og forskere for å identifisere hvilke verktøy som bør utvikles og hvordan de kan integreres i CO2MVS.

#### Beslutningsstøttesystem

- **Beslutningsstøttesystemet** (*Decision Support System*) er den minst utviklede av CO2MVS komponentene. Norske aktiviteter kan være studie av brukerbehov i forhold til vitenskapelige muligheter. Dette kan gjøres som kasusstudier mellom de som er ansvarlige for utslippsregnskaper og forskere for å identifisere nøkkelkomponenter som er nødvendige for et effektivt og nyttig beslutningsstøttesystem.
- **Alternative anvendelser:** Norge har en lang historie med involvering og lederskap i prosessen *Reducing emissions from deforestation and forest degradation* (REDD+). Norske aktører har derfor spesiell kompetanse knyttet til dette. CO2M vil kunne gi utfyllende data som kan styrke REDD+. Det er behov for en bedre forståelse av hvilken informasjon CO2M-satellittene kan gi for å supplere REDD+ aktiviteter.
- **Norsk ekspertise:** CO2MVS vil bli viktig for observasjonsbasert beregning av utslipp. Norge bør ha egen ekspertise på CO2MVS for å best kunne ivareta sine interesser. Ved å være ledende i utvikling av verktøy kan norsk ekspertise danne grunnlaget for mange av komponentene til CO2MVS. Dette krever forankring og samarbeid med norske myndigheter og ansvarlige tiltaksutøvere. Kompetansen kan utvikles gjennom aktiv deltakelse i eksisterende prosjekt på EU-nivå og gjennom CAMS, men ytterligere initiativ vil være nødvendig for å bidra til forankring i Norge av det fulle beslutningssystemet og det konseptuelle CO2MVS rammeverket. Følgende initiativer anbefales:
  - **Kunnskapsoverføring:** Både CO2M- og CO2MVS-data er komplekse og bruk og fortolkning krever kunnskap. Det er derfor viktig med kunnskaps-overføring og -utveksling mellom forskningsmiljøer, forvaltning, industri og ikke-statlige organisasjoner. Faste kontaktflater mellom de forskjellige miljøene bør derfor opprettes. Slike kontaktflater kan være katalysatorer for nye anvendelser av for eksempel åpent tilgjengelige CO2M-data. Her kan Norsk Romsenter være kontaktpunkt og legge til rette for møter og samarbeid mellom forskjellige aktører.
  - **Møteplass for CO2M/CO2MVS:** Opprette et forum for å styrke samarbeid mellom de ansvarlige for utslippsregnskap og forskningsmiljøer for eksempel gjennom kjennskap til respektive behov og utfordringer, faguttrykk, begrensninger og muligheter med forskjellige verktøy og så videre. Spesielt anbefales aktiviteter rettet mot områder

som har høy usikkerhet og hvor CO2M-data kan bidra til å redusere denne, for eksempel LULUCF-rapportering.

- **Grafiske verktøy:** Utvikling av grafisk materiale og analyseverktøy for å sammenligne inventar- og observasjonsbaserte estimater av utslipp.
- **Informasjonsmateriell:** Det bør utvikles informasjonsmateriell for å kommunisere potensialet i observasjonsbaserte systemer til norske brukere. Dette inkluderer faktaark om invers modellering, verifisering, punktkildeidentifikasjon, CO2MVS, etc.

Flere av anbefalingene over bør iverksettes som forstudier og eventuelt videreføres når CO2M-satellittene er skutt opp og man begynner å få erfaringer med CO2MVS og dets komponenter. Under listes anbefalinger (uten prioriteringer) foreslått som forstudier i perioden 2024-2026 før oppskytning av CO2M-satellittene og studier etter oppskytning fra 2026. Forstudier kan lede til studier hvis resultatene viser at det er nødvendig. **Møteplass for CO2M/CO2MVS** anbefaler vi opprettet i andre halvdel av 2023.

### Forstudier 2024-2026

- **Forbedret tidsmessig og romlig oppløsning:** forbedret behandling og tilgang til inngangs- og observasjonsdata
- **Dekningsgrad for Norge:** Kartlegging av dekningsgrad for CO2M-satellittene for Norge og høye breddegrader med syntetiske data.
- **Verifisering og validering:** Vurdering av behov for måledata for norske forhold for verifisering og validering av CO2M-målinger og CO2MVS-utslippsestimater.
- **Synergieffekter:** Undersøke synergieffekter av satellittmålinger komplementære til drivhusgass- og andre produkter fra CO2M (for eksempel NO<sub>2</sub> og aerosol-data).
- **Informasjon fra invers-modeller:** Kartlegging av relevante informasjon fra invers-modeller for norske formål.
- **Forbedring av invers-modeller:** Forberede invers-modeller til operasjonell bruk.
- **Beslutningsstøttesystemet:** Identifisering av nøkkelkomponenter for et effektivt og nyttig beslutningsstøttesystem
- **Norsk ekspertise:** grafiske verktøy, informasjonsmateriell og kunnskapsoverføring.
- **Nyttepotensiale av CO2M-data:** vurdering av nyttepotensialet for myndigheter, forskere, industri og ikke-statlige organisasjoner.

### Studier fra 2026

- **Dekningsgrad for Norge:** Kartlegging av dekningsgrad for CO2M-satellittene for Norge og høye breddegrader med reelle CO2M data.
- **Verifisering og validering:** verifisering og validering av CO2M-målinger og CO2MVS-utslippsestimater.
- **Norske klimagass-estimat:** Vurdering av forbedringer av estimater for norske klimagassutslipp ved bruk av invers modellering.
- **Alternative anvendelser:** vurdering om informasjon fra CO2M-satellittene kan supplere REDD+ aktiviteter.

**Finansiering:**

Gjennomføring av anbefalingene over krever finansiering. Finansieringskilden vil avhenge av størrelsen på aktiviteten som anbefales og om den er innenfor finansieringskildens mandat. For eksempel kan en rekke av anbefalingene for beslutningsstøttesystem-komponenten delfinansieres via eksisterende ordninger (post 74) til Norsk Romsenter eller ESAs Prodex program. Videre har ESA nylig initiert programmet Sentinel User Preparation (SUP) som spesifikt er rettet blant annet mot CO2M-satellittene. Langt mer ressurskrevende anbefalinger er for eksempel kasusstudier av nytten av bakkestasjoner for validering og verifisering av CO2M-målinger i Norge (observasjons-komponenten) og eventuelt utbygging av slike. Infrastruktur-program til Norges forskningsråd kan være en mulig finansieringskilde her. Det er muligheter for CO2MVS aktiviteter innenfor Horizon Europe<sup>68</sup>.

---

<sup>68</sup> [https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-8-climate-energy-and-mobility\\_horizon-2023-2024\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/docs/2021-2027/horizon/wp-call/2023-2024/wp-8-climate-energy-and-mobility_horizon-2023-2024_en.pdf)

## **8. Takk**

Takk til referansegruppen bestående av Johannes Breidenbach (NIBIO), Kathrine Loe Bjønness (Miljødirektoratet), Harald Schyberg (MET Norge) og Berit Storbråten (SSB) for diskusjoner og kommentarer. Også takk til deltakerne på workshop for diskusjoner og innspill.

## 9. Referanser

- Andrew, R. M. (2020). A comparison of estimates of global carbon dioxide emissions from fossil carbon sources. *Earth Syst. Sci. Data*, *12*, 1437–1465. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1437-2020>
- Balsamo G, Engelen R, Thiemert D, Agusti-Panareda A, Bousserez N, Broquet G, Brunner D, Buchwitz M, Chevallier F, Choulga M, Denier Van Der Gon H, Florentie L, Haussaire J-M, Janssens-Maenhout G, Jones MW, Kaminski T, Krol M, Le Quéré C, Marshall J, McNorton J, Prunet P, Reuter M, Peters W and Scholze M (2021). The CO<sub>2</sub> Human Emissions (CHE) Project: First Steps Towards a European Operational Capacity to Monitor Anthropogenic CO<sub>2</sub> Emissions. *Front. Remote Sens.* *2*, 707247. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.707247>
- Barré, J., Aben, I., Agustí-Panareda, A., Balsamo, G., Bousserez, N., Dueben, P., Engelen, R., Inness, A., Lorente, A., McNorton, J., Peuch, V.-H., Radnoti, G., and Ribas, R. (2021). Systematic detection of local CH<sub>4</sub> anomalies by combining satellite measurements with high-resolution forecasts. *Atmos. Chem. Phys.*, *21*, 5117–5136. <https://doi.org/10.5194/acp-21-5117-2021>
- Belikov, D. A., Maksyutov, S., Ganshin, A., Zhuravlev, R., Deutscher, N. M., Wunch, D., Feist, D. G., Morino, I., Parker, R. J., Strong, K., Yoshida, Y., Bril, A., Oshchepkov, S., Boesch, H., Dubey, M. K., Griffith, D., Hewson, W., Kivi, R., Mendonca, J., Notholt, J., Schneider, M., Sussmann, R., Velasco, V. A., and Aoki, S. (2017). Study of the footprints of short-term variation in XCO<sub>2</sub> observed by TCCON sites using NIES and FLEXPART atmospheric transport models. *Atmos. Chem. Phys.*, *17*, 143–157. <https://doi.org/10.5194/acp-17-143-2017>
- Benmergui, J. S., Rohrschneider, R., Omara, M., Gautam, R., Miller, C. C., Sun, K., Franklin, J. E., Hamburg, S., Wofsy, S. C., and Preetz, B. (2020). Science Planning for the MethaneSAT Mission. AGU Fall Meeting 2020, 1–17 December 2020 AGU. <https://agu.confex.com/agu/fm20/meetingapp.cgi/Paper/723615>
- Berchet, A., Sollum, E., Thompson, R. L., Pison, I., Thanwerdas, J., Broquet, G., Chevallier, F., Aalto, T., Berchet, A., Bergamaschi, P., Brunner, D., Engelen, R., Fortems-Cheiney, A., Gerbig, C., Groot Zwaftink, C. D., Haussaire, J.-M., Henne, S., Houweling, S., Karstens, U., Kutsch, W. L., Lujikx, I. T., Monteil, G., Palmer, P. I., van Peet, J. C. A., Peters, W., Peylin, P., Potier, E., Rödenbeck, C., Saunois, M., Scholze, M., Tsuruta, A., and Zhao, Y. (2021). The Community Inversion Framework v1.0: a unified system for atmospheric inversion studies. *Geosci. Model Dev.*, *14*, 5331–5354. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-5331-2021>
- Bovensmann, H., J. P. Burrows, M. Buchwitz, J. Frerick, S. Noël, V. V. Rozanov, K. V. Chance, and A. H. P. Goede (1999). SCIAMACHY - Mission objectives and measurement modes. *J. Atmos. Sci.*, *56*, (2), 127-150. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2)
- Buchwitz, M., Schneising, O., Reuter, M., Heymann, J., Krautwurst, S., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Boesch, H., Parker, R. J., Somkuti, P., Detmers, R. G., Hasekamp, O. P., Aben, I., Butz, A., Frankenberg, C., and Turner, A. J. (2017). Satellite-derived methane hotspot emission estimates using a fast data-driven method. *Atmos. Chem. Phys.*, *17*, 5751–5774. <https://doi.org/10.5194/acp-17-5751-2017>
- Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Boesch, H., Anand, J., Parker, R., Detmers, R. G., Aben, I., Hasekamp, O. P., Crevoisier, C., Armante, R., Zehner, C., and Schepers, D. (2018). Copernicus Climate Change Service (C3S) global satellite observations of atmospheric carbon dioxide and methane. In Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, 2018, 57–60. <https://doi.org/10.1007/s42423-018-0004-6>

- Buchwitz, M., Rozanov, V. V., and Burrows, J. P. (2000). A near-infrared optimized DOAS method for the fast global retrieval of atmospheric CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, and N<sub>2</sub>O total column amounts from SCIAMACHY Envisat-1 nadir radiances. *J. Geophys. Res.*, *105* (D12), 15231–15245. <https://doi.org/10.1029/2000JD900191>
- Buchwitz, M., de Beek, R., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Warneke, T., Notholt, J., Meirink, J. F., Goede, A. P. H., Bergamaschi, P., Körner, S., Heimann, M., and Schulz, A. (2005). Atmospheric methane and carbon dioxide from SCIAMACHY satellite data: initial comparison with chemistry and transport models. *Atmos. Chem. Phys.*, *5*, 941–962. <https://doi.org/10.5194/acp-5-941-2005>
- Burrows, J.P., Hölzle, E., Goede, A.P.H., Visser, H., and Fricke, W. (1995). SCIAMACHY—scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography. *Acta Astronautica*, *35*, (7), 445–451. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(94\)00278-T](https://doi.org/10.1016/0094-5765(94)00278-T)
- Carbon Limits (2020). Overview of methane detection and measurement technologies for offshore applications. [https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2020/08/Methane-measurement-technologies-offshore\\_for-website.pdf](https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2020/08/Methane-measurement-technologies-offshore_for-website.pdf) (last access: 20 December 2022)
- Cause-Nicholson, K., Townsend, P. A., Schimel, D., Assiri, A. M., Blake, P. L., Buongiorno, M. F., et al. (2021). NASA's surface biology and geology designated observable: A perspective on surface imaging algorithms. *Remote Sens. Environ.*, *257*, 112349. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112349>
- Chen, Z., Jacob, D. J., Nesser, H., Sulprizio, M. P., Lorente, A., Varon, D. J., Lu, X., Shen, L., Qu, Z., Penn, E., and Yu, X. (2022). Methane emissions from China: a high-resolution inversion of TROPOMI satellite observations. *Atmos. Chem. Phys.*, *22*, 10809–10826. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10809-2022>
- Chen, C., Dubovik, O., Fuertes, D., Litvinov, P., Lapyonok, T., Lopatin, A., Ducos, F., Derimian, Y., Herman, M., Tanré, D., Remer, L. A., Lyapustin, A., Sayer, A. M., Levy, R. C., Hsu, N. C., Descloitres, J., Li, L., Torres, B., Karol, Y., Herrera, M., Herreras, M., Aspetsberger, M., Wanzenboeck, M., Bindreiter, L., Marth, D., Hangler, A., and Federspiel, C. (2020). Validation of GRASP algorithm product from POLDER/PARASOL data and assessment of multi-angular polarimetry potential for aerosol monitoring. *Earth Syst. Sci. Data*, *12*, 3573–3620. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3573-2020>
- Ciais, P., Dolman, A. J., Bombelli, A., Duren, R., Pregon, A., Rayner, P. J., Miller, C., Gobron, N., Kinderman, G., Marland, G., Gruber, N., Chevallier, F., Andres, R. J., Balsamo, G., Bopp, L., Bréon, F.-M., Broquet, G., Dargaville, R., Battin, T. J., Borges, A., Bovensmann, H., Buchwitz, M., Butler, J., Canadell, J. G., Cook, R. B., DeFries, R., Engelen, R., Gurney, K. R., Heinze, C., Heimann, M., Held, A., Henry, M., Law, B., Luyssaert, S., Miller, J., Moriyama, T., Moulin, C., Myneni, R. B., Nussli, C., Obersteiner, M., Ojima, D., Pan, Y., Paris, J.-D., Piao, S. L., Poulter, B., Plummer, S., Quegan, S., Raymond, P., Reichstein, M., Rivier, L., Sabine, C., Schimel, D., Tarasova, O., Valentini, R., Wang, R., van der Werf, G., Wickland, D., Williams, M., and Zehner, C. (2014). Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system. *Biogeosciences*, *11*, 3547–3602. <https://doi.org/10.5194/bg-11-3547-2014>
- Crisp, D., Meijer, Y., Munro, R., Bowman, K., Chatterjee, A., Baker, D. et al. & the CEOS Atmospheric Composition Virtual Constellation Greenhouse Gas Team (2018). A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space, Version 1.2 – 11 November 2018.

[https://ceos.org/document\\_management/Virtual\\_Constellations/ACC/Documents/CEOS\\_AC-VC\\_GHG\\_White\\_Paper\\_Publication\\_Draft2\\_20181111.pdf](https://ceos.org/document_management/Virtual_Constellations/ACC/Documents/CEOS_AC-VC_GHG_White_Paper_Publication_Draft2_20181111.pdf) (last accessed 23 January 2023).

- Crisp, D., Atlas, R.M., Bréon, F.-B., Brown, L.R., Burrows, J.P., Ciais, P., Connor, B.J., Doney, S.C., Fung, I.Y., Jacob, D.J., Miller, C.E., O'Brien, D., Pawson, S., Randerson, J.T., Rayner, P., Salawitch, R.J., Sander, S.P., Sen, B., Stephens, G.L., Tans, P.P., Toon, G.C., Wennberg, P.O., Wofsy, S.C., Yung, Y.L., Kuang, Z., Chudasama, B., Sprague, G., Weiss, B., Pollock, R., Kenyon, D., Schroll, S. (2004). The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. *Advances in Space Research*, 34, 700–709. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.08.062>
- Crisp, D., Miller, C.E., and DeCola, P.L. (2008). NASA Orbiting Carbon Observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space. *J. Appl. Remote Sens.*, 2, 023508. <https://doi.org/10.1117/1.2898457>
- Crisp, D., Pollock, H. R., Rosenberg, R., Chapsky, L., Lee, R. A. M., Oyafuso, F. A., Frankenberg, C., O'Dell, C. W., Bruegge, C. J., Doran, G. B., Eldering, A., Fisher, B. M., Fu, D., Gunson, M. R., Mandrake, L., Osterman, G. B., Schwandner, F. M., Sun, K., Taylor, T. E., Wennberg, P. O., and Wunch, D. (2017). The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products. *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 59–81. <https://doi.org/10.5194/amt-10-59-2017>
- Cusworth, D. H., Duren, R. M., Thorpe, A. K., Pandey, S., Maasakkers, J. D., Aben, I., Jervis, D., Varon, D. J., Randles, C. A., Ritesh, G., Omara, M., Schade, G. W., Dennison, P. E., Frankenberg, C., Gordon, D., Lopinto, E., Miller, C. E. (2021). Multisatellite imaging of a gas well blowout enables quantification of total methane emissions. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2020GL090864. <https://doi.org/10.1029/2020GL090864>
- Cusworth, D. H., Jacob, D. J., Varon, D. J., Chan Miller, C., Liu, X., Chance, K., Thorpe, A. K., Duren, R. M., Miller, C. E., Thompson, D. R., Frankenberg, C., Guanter, L., and Randles, C. A. (2019). Potential of next-generation imaging spectrometers to detect and quantify methane point sources from space. *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 5655–5668. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5655-2019>
- Daasvatn, L., Flugsrud, K., Høie, H., Rypdal, K. & Sandmo, T. (1992). Modell for beregning av nasjonale utslipp til luft. Dokumentasjon (Model for calculation of national air emissions. Documentation) (Interne notater 92/17). Statistics Norway (SSB-Statistisk sentralbyrå).
- Daasvatn, L., Flugsrud, K., Hunnes, O. K. & Rypdal, K. (1994). Beregning av regionaliserte utslipp til luft. Beskrivelse av modell og metoder for estimering (Calculation of emissions to air on a regional basis. Description of a model and estimation methods) (Notater 94/16). Statistics Norway (SSB-Statistisk sentralbyrå).
- de Gouw, J.A., Veeffkind, J. P., Roosenbrand, E., Dix, B., Lin, J.C., Landgraf, J., and Levelt, P.F., Daily Satellite Observations of Methane from Oil and Gas Production Regions in the United States (2020). *Sci. Rep.*, 10, 1379. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57678-4>
- Duren, R., Miller, C. (2012). Measuring the carbon emissions of megacities. *Nature Clim. Change*, 2, 560–562. <https://doi.org/10.1038/nclimate1629>
- Duren, R. M. (2021). Carbon Mapper: on-orbit performance predictions and airborne prototyping. American Geophysical Union Fall Meeting, New Orleans, 13–17 December 2021, A53F-05. <https://agu.confex.com/agu/fm21/meetingapp.cgi/Paper/985888> (last access: 16 February 2022)

- Ehret G, Bousquet P, Pierangelo C, Alpers M, Millet B, Abshire JB, Bovensmann H, Burrows JP, Chevallier F, Ciais P, Crevoisier C, Fix A, Flamant P, Frankenberg C, Gibert F, Heim B, Heimann M, Houweling S, Hubberten HW, Jöckel P, Law K, Löw A, Marshall J, Agusti-Panareda A, Payan S, Prigent C, Rairoux P, Sachs T, Scholze M, Wirth M. MERLIN (2017). A French-German Space Lidar Mission Dedicated to Atmospheric Methane. *Remote Sensing*, 9(10), 1052. <https://doi.org/10.3390/rs9101052>
- Ehret, T., De Truchis, A., Mazzolini, M., Morel, J.-M., D'aspremont, A., Lauvaux, T., Duren, R., Cusworth, D., and Facciolo, G. (2022). Global tracking and quantification of oil and gas methane emissions from recurrent sentinel-2 imagery. *Environ. Sci. Technol.*, 56, 10517–10529. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08575>
- Eldering, A., Kaki, S., Crisp, D., and Gunson, M.R. (2013). The OCO-3 Mission. The American Geophysical Union Fall Meeting: San Francisco, CA, USA 2013. A21G-0134.
- Eldering, A., Taylor, T. E., O'Dell, C. W., and Pavlick, R. (2019). The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 2341–2370. <https://doi.org/10.5194/amt-12-2341-2019>
- Engelen, R. (2023). Submission of information to the 1<sup>st</sup> Global Stocktake. Data products from prototype systems of the EU-funded CoCO2 project, 202302021641---CoCO2\_Leaflet4GST\_submission%20%281%29 (1).pdf
- ESA (2019). Copernicus CO<sub>2</sub> Monitoring Mission Requirements Document. EOP-SM/3088/YM-ym. [https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/CO2M\\_MRD\\_v2.0\\_Issued20190927.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/CO2M_MRD_v2.0_Issued20190927.pdf).
- Frankenberg, C., A. Butz, and G. C. Toon (2011). Disentangling chlorophyll fluorescence from atmospheric scattering effects in O<sub>2</sub> A-band spectra of reflected sun-light. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L03801, <https://doi.org/10.1029/2010GL045896>
- Frankenberg, C., Meirink, J. F., Bergamaschi, P., Goede, A. P. H., Heimann, M., Körner, S., Platt, U., van Weele, M., and Wagner, T. (2006). Satellite cartography of atmospheric methane from SCIAMACHY on board ENVISAT: Analysis of the years 2003 and 2004. *J. Geophys. Res.*, 111, D07303. <https://doi.org/10.1029/2005JD006235>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., Arneeth, A., Arora, V. K., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bittig, H. C., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Evans, W., Falk, S., Feely, R. A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Gloege, L., Grassi, G., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jain, A. K., Jersild, A., Kadono, K., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lindsay, K., Liu, J., Liu, Z., Marland, G., Mayot, N., McGrath, M. J., Metzl, N., Monacci, N. M., Munro, D. R., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pan, N., Pierrot, D., Pocock, K., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rodriguez, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Séférian, R., Shutler, J. D., Skjelvan, I., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Sweeney, C., Takao, S., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, X., Tian, H., Tilbrook, B., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Whitehead, C., Willstrand Wranne, A., Wright, R., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, J., and Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 4811–4900, <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>



- German, R., Matthews, B., Ruysenaars, P. (2021). Inverse modelling as a tool to support national greenhouse gas monitoring in Europe (ETC/CME Report 4/2021). <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cme/products/etc-cme-reports/etc-cme-report-4-2021-inverse-modelling-as-a-tool-to-support-national-greenhouse-gas-monitoring-in-europe>
- Gorroño, J., Varon, D. J., Irakulis-Loitxate, I., and Guanter, L. (2023). Understanding the potential of Sentinel-2 for monitoring methane point emissions. *Atmos. Meas. Tech.*, *16*, 89–107, <https://doi.org/10.5194/amt-16-89-2023>
- Green, R.O., et al., (2020). The Earth surface mineral dust source investigation: An Earth Science imaging spectroscopy mission. 2020 IEEE Aerospace Conference, 7-14 Mar. 2020, Big Sky, MT, USA. pp. 1-15. <https://doi.org/10.1109/AERO47225.2020.9172731>
- Guanter L, Kaufmann H, Segl K, Foerster S, Rogass C, Chabrilat S, Kuester T, Hollstein A, Rossner G, Chlebek C, Straif C, Fischer S, Schrader S, Storch T, Heiden U, Mueller A, Bachmann M, Mühle H, Müller R, Habermeyer M, Ohndorf A, Hill J, Buddenbaum H, Hostert P, Van der Linden S, Leitão PJ, Rabe A, Doerffer R, Krasemann H, Xi H, Mauser W, Hank T, Locherer M, Rast M, Staenz K, Sang B. (2015). The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. *Remote Sensing*, *7*(7), 8830-8857. <https://doi.org/10.3390/rs70708830>
- Hakkarainen, J., Ialongo, I., and Tamminen, J. (2016). Direct space-based observations of anthropogenic CO<sub>2</sub> emission areas from OCO-2. *Geophys. Res. Lett.*, *43*, 11,400–11,406. <https://doi.org/10.1002/2016GL070885>
- Hasekamp, O., Lorente, A., Hu, H., Butz, A., van de Brugh, J., and Landgraf, J. (2022). Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor methane retrieval, 2022-05-30. Available at: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-Methane-retrieval.pdf> (last accessed 03 January 2023)
- Hermansen, E. A.T., Sillmann, J., Vigo, I., and Whittlesey, S. (2021). The EU needs a demand-driven innovation policy for climate services. *Climate Services*, *24*, 100270. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2021.100270>
- Heymann, J., Reuter, M., Hilker, M., Buchwitz, M., Schneising, O., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Kuze, A., Suto, H., Deutscher, N. M., Dubey, M. K., Griffith, D. W. T., Hase, F., Kawakami, S., Kivi, R., Morino, I., Petri, C., Roehl, C., Schneider, M., Sherlock, V., Sussmann, R., Velasco, V. A., Warneke, T., and Wunch, D. (2015). Consistent satellite XCO<sub>2</sub> retrievals from SCIAMACHY and GOSAT using the BESD algorithm. *Atmos. Meas. Tech.*, *8*, 2961–2980. <https://doi.org/10.5194/amt-8-2961-2015>
- Hirabayashi, T. (2020). Contribution of JAXA's Earth Observation Missions to Water Cycle and Climate Studies, Disaster Mitigation, and Operational Applications, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-19165. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-19165>
- Irakulis-Loitxate, I., Guanter, L., Maasackers, J.D., Zavala-Araiza, D., and Aben, I. (2022). Satellites detect abatable super-emissions in one of the world's largest methane hotspot regions. *Environ. Sci. Technol.*, *56*, 2143–2152. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04873>
- Irakulis-Loitxate, I., Gorrone, J., Zavala-Araiza, D., and Guanter, L. (2022). Satellites detect a methane ultra-emission event from an offshore platform in the Gulf of Mexico. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, *9*, 522-525. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00225>

- IPCC (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Edited by: H.S. Eggleston, L. Buendika, K. Miwa, T. Ngara and K. Tanabe. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- IPCC (2019). 2019 refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Edited by: E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranje, B. Jamsranjav, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osakam Y. Pyrozhenko, P. Shermanau and S. Federici. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- Jacob, D. J., Turner, A. J., Maasakkers, J. D., Sheng, J., Sun, K., Liu, X., Chance, K., Aben, I., McKeever, J., and Frankenberg, C. (2016). Satellite observations of atmospheric methane and their value for quantifying methane emissions. *Atmos. Chem. Phys.*, *16*, 14371–14396. <https://doi.org/10.5194/acp-16-14371-2016>.
- Jacob, D. J., Varon, D. J., Cusworth, D. H., Dennison, P. E., Frankenberg, C., Gautam, R., Guanter, L., Kelley, J., McKeever, J., Ott, L. E., Poulter, B., Qu, Z., Thorpe, A. K., Worden, J. R., and Duren, R. M. (2022). Quantifying methane emissions from the global scale down to point sources using satellite observations of atmospheric methane. *Atmos. Chem. Phys.*, *22*, 9617–9646. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9617-2022>.
- Janssens-Maenhout, G., Pinty, B., Dowell, M., Zunker, H., Andersson, E., Balsamo, G., Bézy, J.-L., Brunhes, T., Bösch, H., Bojkov, B., Brunner, D., Buchwitz, M., Crisp, D., Ciais, P., Counet, P., Dee, D., Denier van der Gon, H., Dolman, H., Drinkwater, M. R., Dubovik, O., Engelen, R., Fehr, T., Fernandez, V., Heimann, M., Holmlund, K., Houweling, S., Husband, R., Juvvyns, O., Kentarchos, A., Landgraf, J., Lang, R., Löscher, A., Marshall, J., Meijer, Y., Nakajima, M., Palmer, P. I., Peylin, P., Rayner, P., Scholze, M., Sierk, B., Tamminen, J., & Veeffkind, P. (2020). Toward an Operational Anthropogenic CO<sub>2</sub> Emissions Monitoring and Verification Support Capacity, *Bulletin of the American Meteorological Society*, *101*(8), E1439-E1451. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0017.1>
- Jervis, D., McKeever, J., Durak, B. O. A., Sloan, J. J., Gains, D., Varon, D. J., Ramier, A., Strupler, M., and Tarrant, E. (2021). The GHGSat-D imaging spectrometer. *Atmos. Meas. Tech.*, *14*, 2127–2140. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2127-2021>
- Kaminski, T., Scholze, M., Rayner, P., Voßbeck, M., Buchwitz, M., Reuter, M., et al. (2022a). Assimilation of Atmospheric CO<sub>2</sub> Observations from Space Can Support National CO<sub>2</sub> Emission Inventories. *Environ. Res. Lett.*, *17*, 014015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3cea>
- Kaminski T, Scholze M, Rayner P, Houweling S, Voßbeck M, Silver J, Lama S, Buchwitz M, Reuter M, Knorr W, Chen HW, Kuhlmann G, Brunner D, Dellaert S, Denier van der Gon H, Super I, Löscher A and Meijer Y (2022b). Assessing the Impact of Atmospheric CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> Measurements From Space on Estimating City-Scale Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions in a Data Assimilation System. *Front. Remote Sens.*, *3*, 887456. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.887456>
- Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., and Hamazaki, T. (2009). Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring. *Appl. Opt.*, *48*, 6716–6733. <https://doi.org/10.1364/AO.48.006716>
- Kuze, A., Suto, H., Shiomi, K., Kawakami, S., Tanaka, M., Ueda, Y., Deguchi, A., Yoshida, J., Yamamoto, Y., Kataoka, F., Taylor, T. E., and Buijs, H. L. (2016). Update on GOSAT TANSO-FTS performance, operations, and data products after more than 6 years in space. *Atmos. Meas. Tech.*, *9*, 2445–2461. <https://doi.org/10.5194/amt-9-2445-2016>

- Kvingedal, E., Tornsjø, B., Holtskog, S., G., H. & Rypdal, K. (2000). Verification of the Norwegian Emission Inventory. Comparing emission intensity values with similar countries (TA-1736/00). Oslo: Norwegian Pollution Control Authority/Statistics Norway. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/klif2/publikasjoner/luft/1736/ta1736.pdf>
- Kylling, A., Stebel, K., Fjæraa, A.M., and Schneider (2021). Fjernmåling av metanutslipp ved bruk av Sentinel-5P: en mulighetsstudie (NILU rapport 09/2021; Miljødirektoratet M-1977|2021). Kjeller: NILU. <https://hdl.handle.net/11250/2756989>
- 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*, 375, 557–561, <https://doi.org/10.1126/science.abj4351>
- Liu, Y., and Yang, D.X. (2016). Advancements in theory of GHG observation from space. *Sci. Bull.*, 61(5), 349–352. <https://doi.org/10.1007/s11434-016-1022-1>
- Liu, M., van der A, R., van Weele, M., Eskes, H., Lu, X., Veeffkind, P., de Laat, J., Kong, H., Wang, J., Sun, J., Ding, J., Zhao, Y., and Weng, H. (2021). A new divergence method to quantify methane emissions using observations of Sentinel-5P TROPOMI. *Geophys. Res. Lett.*, 48, e2021GL094151. <https://doi.org/10.1029/2021GL094151>
- Loizzo, R., Guarini, R., Longo, F., Scopa, T., Formaro, R., Facchinetti, C., Varacalli, G., Prisma (2018). The Italian Hyperspectral Mission, *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, Spain, pp. 175-178, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518512>
- Lorente, A., Borsdorff, T., Butz, A., Hasekamp, O., van de Brugh, J., Schneider, A., Wu, L., Hase, F., Kivi, R., Wunch, D., Pollard, D. F., Shiomi, K., Deuscher, N. M., Velasco, V. A., Roehl, C. M., Wennberg, P. O., Warneke, T., and Landgraf, J. (2021). Methane retrieved from TROPOMI: improvement of the data product and validation of the first 2 years of measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 665–684. <https://doi.org/10.5194/amt-14-665-2021>
- Lorente, A., Borsdorff, T., Martinez-Velarte, M. C., and Landgraf, J. (2023). Accounting for surface reflectance spectral features in TROPOMI methane retrievals. *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 1597–160. <https://doi.org/10.5194/amt-16-1597-2023>
- Lorente, A., Borsdorff, T., Martinez-Velarte, M. C., Butz, A., Hasekamp, O. P., Wu, L., and Landgraf, J. (2022). Evaluation of the methane full-physics retrieval applied to TROPOMI ocean sun glint measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, 15, 6585–6603. <https://doi.org/10.5194/amt-15-6585-2022>
- Lu S, Landgraf J, Fu G, van Diedenhoven B, Wu L, Rusli SP and Hasekamp OP (2022). Simultaneous Retrieval of Trace Gases, Aerosols, and Cirrus Using RemoTAP—The Global Orbit Ensemble Study for the CO2M Mission. *Front. Remote Sens.*, 3, 914378. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.914378>
- Mazzini, A., Sciarra, A., Etiope, G. Sadavarte, P., Houweling, S., Pandey, S., and Husein, A. (2021). Relevant methane emission to the atmosphere from a geological gas manifestation. *Sci. Rep.*, 11, 4138, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83369-9>
- Maasackers, J. D., Jacob, D. J., Sulprizio, M. P., Scarpelli, T. R., Nesser, H., Sheng, J.-X., Zhang, Y., Hersher, M., Bloom, A. A., Bowman, K. W., Worden, J. R., Janssens-Maenhout, G., and Parker, R. J.

- (2019). Global distribution of methane emissions, emission trends, and OH concentrations and trends inferred from an inversion of GOSAT satellite data for 2010–2015. *Atmos. Chem. Phys.*, *19*, 7859–7881. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7859-2019>
- Maasakkers, J. D., Varon, D. J., Elfarsdóttir, A., McKeever, J., Jervis, D., Mahapatra, G., Pandey, S., Lorente, A., Borsdorff, T., Foorhuis, L. R., Schuit, B. J., Tol, P., van Kempen, T. A., van Hees, R., and Aben, I. (2022). Using satellites to uncover large methane emissions from landfills. *Sci. Adv.*, *8*, eabn9683. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn9683>
- Miller, S. M., Michalak, A. M., Yadav, V., and Tadić, J. M. (2018). Characterizing biospheric carbon balance using CO<sub>2</sub> observations from the OCO-2 satellite. *Atmos. Chem. Phys.*, *18*, 6785–6799, <https://doi.org/10.5194/acp-18-6785-2018>
- Mohr, C.W., Sjøgaard, G., Alfredsen, G., Fernández, C.A., Hobrak, K.T. and Sevillano, I. (2022). Framskrivninger for arealbrukssektoren (LULUCF) under FNs klimakonvensjon og EUs klimarammeverk. (NIBIO Rapport 8(124) 2022). Ås: NIBIO. <https://hdl.handle.net/11250/3023928>
- Myhre, C. Lund, Svendby, T., Hermansen, O., Lunder, C. R., Platt, S. M., Fiebig, M., Fjæraa, A.M., Hansen, G.H., Schmidbauer, N., Stebel, K. (2022). Monitoring of greenhouse gases and aerosols at Svalbard and Birkenes in 2021. Annual report. (NILU report 28/202214/2023. Kjeller: NILU. <https://hdl.handle.net/11250/3034362>
- Nassar R., Moeini O., Mastrogiacomo J.-P., O’Dell C.W., Nelson R.R., Kiel M., Chatterjee A., Eldering A., and Crisp D. (2022). Tracking CO<sub>2</sub> emission reductions from space: A case study at Europe’s largest fossil fuel power plant. *Front. Remote Sens.*, *3*, 1028240. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.1028240>
- Nikolov, S., Wührer, C., Kühl, C., Bode, M., Hupfer, W., and Lucarelli, S. (2019). MERLIN: design of an IPDA LIDAR instrument. *CEAS Space J.*, *11*, 437–457. <https://doi.org/10.1007/s12567-019-00267-7>
- NO EPA (2022). Greenhouse Gas Emissions 1990-2020, National Inventory Report (Norwegian Environmental Agency Report, M-2268 | 2022). <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2022/april/greenhouse-gas-emissions-1990--2020-national-inventory-report/>
- Noël, S., Reuter, M., Buchwitz, M., Borchardt, J., Hilker, M., Schneising, O., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Di Noia, A., Parker, R. J., Suto, H., Yoshida, Y., Buschmann, M., Deutscher, N. M., Feist, D. G., Griffith, D. W. T., Hase, F., Kivi, R., Liu, C., Morino, I., Notholt, J., Oh, Y.-S., Ohyama, H., Petri, C., Pollard, D. F., Rettinger, M., Roehl, C., Rousogonous, C., Sha, M. K., Shiomi, K., Strong, K., Sussmann, R., Té, Y., Velasco, V. A., Vrekoussis, M., and Warneke, T. (2022). Retrieval of greenhouse gases from GOSAT and GOSAT-2 using the FOCAL algorithm. *Atmos. Meas. Tech.*, *15*, 3401–3437. <https://doi.org/10.5194/amt-15-3401-2022>
- Pandey, S., Gautam, R., Houweling, S., van der Gon, H. D., Sadavarte, P., Borsdorff, T., Hasekamp, O., Landgraf, J., Tol, P., van Kempen, T., Hoogeveen, R., van Hees, R., Hamburg, S. P., Maasakkers, J. D., and Aben, I. (2019). Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, *116*, 26376–26381. <https://doi.org/10.1073/pnas.1908712116>
- Parker, R. J., Webb, A., Boesch, H., Somkuti, P., Barrio Guillo, R., Di Noia, A., Kalaitzi, N., Anand, J. S., Bergamaschi, P., Chevallier, F., Palmer, P. I., Feng, L., Deutscher, N. M., Feist, D. G., Griffith, D. W. T., Hase, F., Kivi, R., Morino, I., Notholt, J., Oh, Y.-S., Ohyama, H., Petri, C., Pollard, D. F., Roehl, C.,

- Sha, M. K., Shiomi, K., Strong, K., Sussmann, R., Té, Y., Velazco, V. A., Warneke, T., Wennberg, P. O., and Wunch, D. (2020). A decade of GOSAT Proxy satellite CH<sub>4</sub> observations. *Earth Syst. Sci. Data*, *12*, 3383–3412. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3383-2020>
- Peng, S., Lin, X., Thompson, R.L., Xi, Y., Hauglustaine, D., Lan, X., Poulter, B., Ramonet, M., Saunio, M., Yin, Y., Zhang, Z., Zheng, B., and Ciais, P. (2022). Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020. *Nature*, *612*, 477–482. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05447-w>
- Peters, G.P., Le Quéré, C., Andrew, R.M., Canadell, J.G., Friedlingstein, P., Ilyina, T., Jackson, R.B., Joos, F., Korsbakken, J.I., McKinley, E.A., Sitch, S., and Tans, P. (2017). Towards real-time verification of CO<sub>2</sub> emissions. *Nature Clim. Change*, *7*, 848–850. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0013-9>
- Petrescu, A. M. R., McGrath, M. J., Andrew, R. M., Peylin, P., Peters, G. P., Ciais, P., Broquet, G., Tubiello, F. N., Gerbig, C., Pongratz, J., Janssens-Maenhout, G., Grassi, G., Nabuurs, G.-J., Regnier, P., Lauerwald, R., Kuhnert, M., Balkovič, J., Schelhaas, M.-J., Denier van der Gon, H. A. C., Solazzo, E., Qiu, C., Pilli, R., Konovalov, I. B., Houghton, R. A., Günther, D., Perugini, L., Crippa, M., Ganzenmüller, R., Lujikx, I. T., Smith, P., Munassar, S., Thompson, R. L., Conchedda, G., Monteil, G., Scholze, M., Karstens, U., Brockmann, P., and Dolman, A. J. (2021). The consolidated European synthesis of CO<sub>2</sub> emissions and removals for the European Union and United Kingdom: 1990–2018. *Earth Syst. Sci. Data*, *13*, 2363–2406. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2363-2021>
- Pinty B., P. Ciais, D. Dee, H. Dolman, M. Dowell, R. Engelen, K. Holmlund, G. Janssens-Maenhout, Y. Meijer, P. Palmer, M. Scholze, H. Denier van der Gon, M. Heimann, O. Juvyns, A. Kentarchos and H. Zunker (2019). An Operational Anthropogenic CO<sub>2</sub> Emissions Monitoring & Verification Support Capacity – Needs and high level requirements for in situ measurements (EUR 29817 EN). European Commission Joint Research Centre. <https://doi.org/10.2760/182790>
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., and Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote Sens.*, *12*, 2291. <https://doi.org/10.3390/rs12142291>
- Rusli, S. P., Hasekamp, O., aan de Brugh, J., Fu, G., Meijer, Y., and Landgraf, J. (2021). Anthropogenic CO<sub>2</sub> monitoring satellite mission: the need for multi-angle polarimetric observations. *Atmos. Meas. Tech.*, *14*, 1167–1190. <https://doi.org/10.5194/amt-14-1167-2021>
- Pisso, I., Sollum, E., Grythe, H., Kristiansen, N. I., Cassiani, M., Eckhardt, S., Arnold, D., Morton, D., Thompson, R. L., Groot Zwaaftink, C. D., Evangeliou, N., Sodemann, H., Haimberger, L., Henne, S., Brunner, D., Burkhardt, J. F., Fouilloux, A., Brioude, J., Philipp, A., Seibert, P., and Stohl, A. (2019). The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 10.4. *Geosci. Model Dev.*, *12*, 4955–4997. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4955-2019>
- Rast, M., Nieke, J., Adams, J., Isola C., and Gascon, F. (2021). Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment (Chime). *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium*. pp. 108-111. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553319>
- Sadavarte, P., Pandey, S., Maasackers, J.D., Lorente, A., Borsdorff, T., Denier van der Gon, H., Houweling, S., and Aben, I. (2021). Methane emissions from superemitting coal mines in Australia quantified using TROPOMI satellite observations. *Environ. Sci. Technol.*, *55*, 16573–16580. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03976>

- Sánchez-García, E., Gorroño, J., Irakulis-Loitxate, I., Varon, D. J., and Guanter, L. (2022). Mapping methane plumes at very high spatial resolution with the WorldView-3 satellite. *Atmos. Meas. Tech.*, *15*, 1657–1674., <https://doi.org/10.5194/amt-15-1657-2022>
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N., Crevoisier, C., Crill, P. M., Covey, K., Curry, C. L., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M. I., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., Ishizawa, M., Ito, A., Janssens-Maenhout, G., Jensen, K. M., Joos, F., Kleinen, T., Krummel, P. B., Langenfelds, R. L., Laruelle, G. G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K. C., McNorton, J., Miller, P. A., Melton, J. R., Morino, I., Müller, J., Murguía-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O'Doherty, S., Parker, R. J., Peng, C., Peng, S., Peters, G. P., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W. J., Rosentreter, J. A., Segers, A., Simpson, I. J., Shi, H., Smith, S. J., Steele, L. P., Thornton, B. F., Tian, H., Tohjima, Y., Tubiello, F. N., Tsuruta, A., Viovy, N., Voulgarakis, A., Weber, T. S., van Weele, M., van der Werf, G. R., Weiss, R. F., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., Zhu, Q., and Zhuang, Q. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth Syst. Sci. Data*, *12*, 1561–1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Schimmel, D.S., and Poulter, B. (2022). The Earth in Living Color - NASA's Surface Biology and Geology Designated Observable. *2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)*, Big Sky, MT, USA. pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/AERO53065.2022.9843640>
- Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Heymann, J., Bovensmann, H., and Burrows, J. P. (2011). Long-term analysis of carbon dioxide and methane column-averaged mole fractions retrieved from SCIAMACHY. *Atmos. Chem. Phys.*, *11*, 2863–2880. <https://doi.org/10.5194/acp-11-2863-2011>
- Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Bovensmann, H., Burrows, J. P., Borsdorff, T., Deutscher, N. M., Feist, D. G., Griffith, D. W. T., Hase, F., Hermans, C., Iraci, L. T., Kivi, R., Landgraf, J., Morino, I., Notholt, J., Petri, C., Pollard, D. F., Roche, S., Shiomi, K., Strong, K., Sussmann, R., Velasco, V. A., Warneke, T., and Wunch, D. (2019). A scientific algorithm to simultaneously retrieve carbon monoxide and methane from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Atmos. Meas. Tech.*, *12*, 6771–6802. <https://doi.org/10.5194/amt-12-6771-2019>
- 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>
- Schneising, O., Buchwitz, M., Hachmeister, J., Vanselow, S., Reuter, M., Buschmann, M., Bovensmann, H., and Burrows, J. P. (2023). Advances in retrieving XCH<sub>4</sub> and XCO from Sentinel-5 Precursor: improvements in the scientific TROPOMI/WFMD algorithm. *Atmos. Meas. Tech.*, *16*, 669–694, <https://doi.org/10.5194/amt-16-669-2023>
- Schwandner, F. M., Verhulst, K., Eldering, A., Miller, C., Nguyen, H., Kahn, B., Oda, T., Rao, P., O'Dell, C., Crisp, D., Frankenberg, C., Gunson, M., and Pollock, H. (2017). Spaceborne detection of localized carbon dioxide sources. *Science*, *358*, eaam5782. <https://doi.org/10.1126/science.aam5782>
- Shen, L., Zavala-Araiza, D., Gautam, R., Omara, M., Scarpelli, T., Sheng, J., Sulprizio, M.P., Zhuang, J., Zhang, Y., Qu, Z. and Lu, X., Hamburg, S.P, Jacob, D.J. (2021). Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations. *Remote Sens. Environ.*, *260*, 112461. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112461>

- Shen, L., Gautam, R., Omara, M., Zavala-Araiza, D., Maasackers, J. D., Scarpelli, T. R., Lorente, A., Lyon, D., Sheng, J., Varon, D. J., Nesser, H., Qu, Z., Lu, X., Sulprizio, M. P., Hamburg, S. P., and Jacob, D. J. (2022). Satellite quantification of oil and natural gas methane emissions in the US and Canada including contributions from individual basins. *Atmos. Chem. Phys.*, *22*, 11203–11215. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11203-2022>
- Stebel, K., Kylling, K., Schneider, P., Ytre-Eide, M.A. (2022). Synergistic exploitation of the methane product from Sentinel-SP for applications in the Arctic – STEPS (NILU report 14/2022). Kjeller: NILU. <https://hdl.handle.net/11250/2998039>
- Suto, H., Kataoka, F., Kikuchi, N., Knuteson, R. O., Butz, A., Haun, M., Buijs, H., Shiomi, K., Imai, H., and Kuze, A. (2021). Thermal and near-infrared sensor for carbon observation Fourier transform spectrometer-2 (TANSO-FTS-2) on the Greenhouse gases Observing SATellite-2 (GOSAT-2) during its first year in orbit. *Atmos. Meas. Tech.*, *14*, 2013–2039. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2013-2021>
- Tarrasón, L., Schneider, P., Hamer, P., Stebel, K., Rouil, L., Colette, A., Fons Estéve, J., Lükewille, A., and Alberto Gonzalez Ortiz (2019). Links to Copernicus data and services. Status and recommendations (ETC/ATNI Report 11/2019), <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etc-atni-report-19-2019-links-to-copernicus-data-and-services-status-and-recommendations>
- Taylor, T. E., Eldering, A., Merrelli, A., Kiel, M., Somkuti, P., Cheng, C., Rosenberg, R., Fisher, B., Crisp, D., Basilio, R., Bennett, M., Cervantes, D., Chang, A., Dang, L., Frankenberg, C., Haemmerle, V. R., Keller, G. R., Kurosu, T., Laughner, J. L., Lee, R., Marchetti, Y., Nelson, R. R., O'Dell, C. W., Osterman, G., Pavlick, R., Roehl, C., Schneider, R., Spiers, G., To, C., Wells, C., Wennberg, P. O., Yelamanchili, A., and Yu, S. (2020). OCO-3 early mission operations and initial (vEarly) XCO<sub>2</sub> and SIF retrievals. *Remote Sens. Environ.*, *251*, 112032. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112032>
- Thompson, R. L. and Stohl, A. (2014). FLEXINVERT: an atmospheric Bayesian inversion framework for determining surface fluxes of trace species using an optimized grid. *Geosci. Model Dev.*, *7*, 2223–2242. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2223-2014>
- Thompson, R.L., Sasakawa, M., Machida, M., Aalto, T., Worthy, D., Lavric, J.V., Lund Myhre, C., and Stohl, A. (2017). Methane fluxes in the high northern latitudes for 2005-2013 estimated using a Bayesian atmospheric inversion. *Atmos. Chem. Phys.*, *17*, 3553-3572. <https://doi.org/10.5194/acp-17-3553-2017>
- Tollefson, J. (2018). US environmental group wins millions to develop methane-monitoring satellite. *Nature*, *556*, 283. doi: 10.1038/d41586-018-04478-6
- Tsuruta, A., Kivimäki, E., Lindqvist, H., Karppinen, T., Backman, L., Hakkarainen, J., Schneising, O., Buchwitz, M., Lan, X., Kivi, R., Chen, H., Buschmann, M., Herkommer, B., Notholt, J., Roehl, C., Té, Y., Wunch, D., Tamminen, J., Aalto, T. (2023). CH<sub>4</sub> Fluxes Derived from Assimilation of TROPOMI XCH<sub>4</sub> in CarbonTracker Europe-CH<sub>4</sub>: Evaluation of Seasonality and Spatial Distribution in the Northern High Latitudes. *Remote Sens.*, *15*, 1620. <https://doi.org/10.3390/rs15061620>
- 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. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5673-2018>

- Varon, D.J., McKeever, J., Jervis, D., Maasackers, J.D., Pandey, S., Houweling, S., Aben, I., Scarpelli, T., and Jacob, D.J. (2019). Satellite discovery of anomalously large methane point sources from oil/gas production. *Geophys. Res. Lett.*, *46*, 13507–13516. <https://doi.org/10.1029/2019GL083798>
- Varon, D. J. Jacob, D. J., Jervis, D., McKeever, J. (2020). Quantifying time-averaged methane emissions from individual coal mine vents with GHGSat-D satellite observations. *Environ. Sci. Technol.*, *54*, 10246–10253. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01213>
- Varon, D. J., Jervis, D., McKeever, J., Spence, I., Gains, D., and Jacob, D. J. (2021). High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations. *Atmos. Meas. Tech.*, *14*, 2771–2785. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2771-2021>
- Varon, D. J., Jacob, D. J., Sulprizio, M., Estrada, L. A., Downs, W. B., Shen, L., Hancock, S. E., Nesser, H., Qu, Z., Penn, E., Chen, Z., Lu, X., Lorente, A., Tewari, A., and Randles, C. A. (2022). Integrated Methane Inversion (IMI 1.0): a user-friendly, cloud-based facility for inferring high-resolution methane emissions from TROPOMI satellite observations. *Geosci. Model Dev.*, *15*, 5787–5805. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5787-2022>
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H. J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., Vink, R., Visser, H., and Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sens. Environ.*, *120*, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Veefkind, J. P., Serrano-Calvo, R., de Gouw, J., Dix, B., Schneising, O., Buchwitz, M., Barré, J., van der A, R. J., Liu, M., and Levelt, P. F. (2023). Widespread frequent methane emissions from the oil and gas industry in the Permian basin. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, *128*, e2022JD037479. <https://doi.org/10.1029/2022JD037479>
- Vojta, M., Plach, A., Thompson, R. L., and Stohl, A. (2022). A comprehensive evaluation of the use of Lagrangian particle dispersion models for inverse modeling of greenhouse gas emissions. *Geosci. Model Dev.*, *15*, 8295–8323. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-8295-2022>
- Wind, P., Rolstad Denby, B., and Gauss, M. (2020). Local fractions- a method for the calculation of local source contributions to air pollution, illustrated by examples using the EMEP MSC-W model (rv4\_33). *Geosci. Model Dev.*, *13*, 1623-1634, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1623-2020>
- Yang, D.X., Liu, Y., Cai, Z.N., Chen, X., Yao, L., and Lu, D.R. (2018). First global carbon dioxide maps produced from TanSat measurements. *Adv. Atmos. Sci.*, *35*, 621–623. <https://doi.org/10.1007/s00376-018-7312-6>
- Yang, D., Liu, Y., Boesch, H. Yao, L., Di Noia, A., Cai, Z., Lu, N., Lyu, D., Wang, M., Wang, J., Yin, Z., and Zheng, Y. (2021). A New TanSat XCO<sub>2</sub> Global Product towards Climate Studies. *Adv. Atmos. Sci.*, *38*, 8–11. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0297-y>
- Yang, D., Hakkarainen, J., Liu, Y., Ialongo, I., Cai, Z., and Tamminen, J. (2023). Detection of Anthropogenic CO<sub>2</sub> Emission Signatures with TanSat CO<sub>2</sub> and with Copernicus Sentinel-5 Precursor (S5P) NO<sub>2</sub> Measurements: First Results. *Adv. Atmos. Sci.*, *40*, 1–5. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2237-5>



- Yoshida, Y., Kikuchi, N., Morino, I., Uchino, O., Oshchepkov, S., Bril, A., Saeki, T., Schutgens, N., Toon, G. C., Wunch, D., Roehl, C. M., Wennberg, P. O., Griffith, D. W. T., Deutscher, N. M., Warneke, T., Notholt, J., Robinson, J., Sherlock, V., Connor, B., Rettinger, M., Sussmann, R., Ahonen, P., Heikkinen, P., Kyrö, E., Mendonca, J., Strong, K., Hase, F., Dohe, S., and Yokota, T. (2013). Improvement of the retrieval algorithm for GOSAT SWIR XCO<sub>2</sub> and XCH<sub>4</sub> and their validation using TCCON data. *Atmos. Meas. Tech.*, *6*, 1533–1547. <https://doi.org/10.5194/amt-6-1533-2013>
- Yu, X., Millet, D. B., Henze, D. K., Turner, A. J., Delgado, A. L., Bloom, A. A., and Sheng, J. (2023). A high-resolution satellite-based map of global methane emissions reveals missing wetland, fossil fuel, and monsoon sources. *Atmos. Chem. Phys.*, *23*, 3325–3346. <https://doi.org/10.5194/acp-23-3325-2023>
- Zimmer Jacobsen A., Jabot J., Holmengen N., Ekre T.H., Rasch M.K., Fluge Lillesund V., Haugland H., Seim T., Gutterød E.S. (2021). Klimagassregnskap for kommuner og fylker. Dokumentasjon av metode – versjon 6. Miljødirektoratet, Rapport M-989. <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2018/april-2018/klimagassstatistikk-for-kommuner/>
- Zhang, Z., Sherwin, E. D., Varon, D. J., and Brandt, A. R. (2022). Detecting and quantifying methane emissions from oil and gas production: algorithm development with ground-truth calibration based on Sentinel-2 satellite imagery. *Atmos. Meas. Tech.*, *15*, 7155–7169. <https://doi.org/10.5194/amt-15-7155-2022>
- Zhang, Y., Gautam, R., Pandey, S., Omara, M., Maasackers, J.D., Sadavarte, P., Lyon, D., Nesser, H., Sulprizio, M.P., Varon, D.J., Zhang, R., Houweling, S., Zavala-Araiza, D., Alvarez, R.A., Lorente, A., Hamburg, S.P., Aben, I., and Jacob, D.J. (2022). Quantifying methane emissions from the largest oil-producing basin in the United States from space. *Sci. Adv.* *6*, eaaz5120. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5120>

## Vedlegg A

### Enkelt overslag over utslipp som gir 1 ppm endring i XCO<sub>2</sub>

CO<sub>2</sub>M måler XCO<sub>2</sub> konsentrasjon i ppm. Det er ønskelig med et enkelt overslag for størrelse på CO<sub>2</sub> utslipp som gir en gitt endring i ppm.

La oss anta at CO<sub>2</sub>M på dag 1 måler XCO<sub>2</sub> på 400 ppm for en piksel. Neste dag måles 401 ppm for samme piksel. Atmosfærekolonnen inneholder rundt  $2.153076 \times 10^{29}$  molekyler/m<sup>2</sup>. 400 ppm CO<sub>2</sub> tilsvarer  $8.612304 \times 10^{25}$  molekyler/m<sup>2</sup> og 401 ppm CO<sub>2</sub> tilsvarer  $8.633834 \times 10^{25}$  molekyler/m<sup>2</sup>. Differansen er  $2.1530759 \times 10^{23}$  molekyler/m<sup>2</sup> eller 15.73 g/m<sup>2</sup>. Fordelt over 24 timer blir det økning på 0.655 g/hr/m<sup>2</sup>.

Årlige oversikter over norske CO<sub>2</sub>-kilder utgis av Miljødirektoratet for ulike samfunnsaktører<sup>69</sup>. I 2021 stod olje- og gassutvinning for 28.6% av de norske CO<sub>2</sub>-utslippene, industri stod for 27% og veitrafikk for 21%<sup>70</sup>. Den største enkeltkilden er raffineriet på Mongstad som slapp ut 1.997.740 tonn med CO<sub>2</sub> i 2021<sup>71</sup>. Det tilsvarer 228 t/hr. Fordelt over et CO<sub>2</sub>M piksel blir det  $228/(2000\text{m} \times 2000\text{m}) = 0.000057$  t/hr/m<sup>2</sup>=57.013 g/hr/m<sup>2</sup>.

Dersom der var ingen vind som transporterte vekk CO<sub>2</sub> vil derfor utslippsendringer fra dag 1 til dag 2 fra Mongstad kunne sees med CO<sub>2</sub>M. Dog, vinden transporterer og fordeler dette utover. Hvordan dette fordeles vil være avhengig av vindstyrke og krever modellberegninger for å gi presise anslag. Grovt sett kan man anta at signalet svekkes med en faktor 10-20 og mer fra vindstyrker over 5-10 m/s.

---

<sup>69</sup><https://www.norskeutslipp.no/no/Komponenter/Utslipp/Klimagasser-CO2-ekvivalenter/?ComponentType=utslipp&ComponentPageID=1166&SectorID=90>

<sup>70</sup> <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/klima/norske-utslipp-av-klimagasser/co2/>

<sup>71</sup> <https://www.norskeutslipp.no/no/Diverse/Virksomhet/?CompanyID=5440&ComponentPageID=180>

## Vedlegg B: Spørreundersøkelse

### Sammendrag av svarene til spørreundersøkelse for nyttiggjøring av CO2M data og tjenester i Norge

En spørreundersøkelse ble sendt rundt januar 2023 med formål å kartlegge behov og muligheter for nyttiggjøring av CO2M-data og tjenester i Norge.

Med hensyn til redelighet og åpenhet, har vi listet nedenfor navnet til de individer og organisasjonene som har svart på denne spørreundersøkelsen. Offentliggjøring av listen nedenfor er avklart med hver enkel ifølge personvern regelverket under General Data Protection Regulation (GDPR). Av samme grunn, har vi anonymisert svarene.

Vi fikk i alt elleve svar fra følgende ti institusjoner

1. Kystverket
2. Statistisk sentralbyrå (ssb)
3. Miljødirektoratet
4. Norsk institutt for bioøkonomi (NILBIO)
5. Kartverket
6. CICERO – Senter for klimaforskning
7. NORCE Norwegian Research Centre AS (2 svar)
8. NILU – Norsk institutt for luftforskning
9. Field Group AS
10. Meteorologisk Institutt (MET)

Svarene fra Kystverket, SSB, NILU og MET er gitt på vegne av institusjonen (koordinert svar) mens representantene fra Miljødirektoratet, NIBIO, Kartverket, CICERO, NORCE og Field Group AS har svart som individuelle eksperter. Om lag halvparten av svarene er fra forskningsinstitutter, et er fra næringslivet og resten fra statlig forvaltning.

Selv om antall svarene er få, er svarene fra relevante institusjoner i Norge med fokus på klimagassutslipp. Sammendrag av svarene presenteres under.

- **Erfaring med satellittdata**

Alle som svarer er kjent med Copernicus, men ikke alle bruker Copernicus produkter. To av respondentene bruker hverken satellittdata eller tjenestene fra Copernicus. Fem svarer at de bruker satellittdata fra Copernicus mens fire svarer at de benytter seg av både satellittdata og tjenestene fra Copernicus. Figur B.1 viser at det er bare en institusjon som bruker klimagass-data fra satellitter. Figur B.2 viser hvor mange som benytter seg av satellittdata til andre formål enn klimagassutslipp.

Respondentene oppgir å bruke satellittdata som følger:

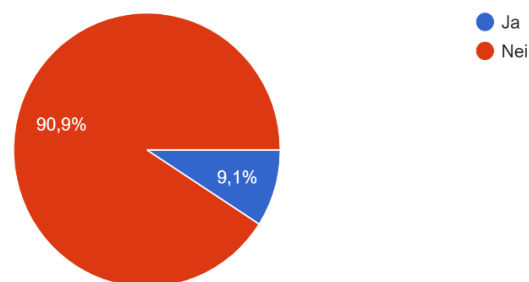
- **Klimagassmålinger** - Klimagassdata fra satellitter benyttes for å kartlegge klimagassflukser Det gjelder spesielt metan-målinger fra Sentinel-5P som benyttes separat og sammen med invers modellering.
- **Vegetasjonsmålinger** - Satellittdata brukes for å kartlegge treslag og andre kjennetegn til skogegenskaper. Spesielt brukes Sentinel-2 til å kartlegge skog og natur i Norge (som en av flere datakilder). I tillegg brukes Sentinel-2 til overvåking (endringsanalyse). Høy oppløselige

optiske data fra Sentinel-1 brukes i mindre grad og kommersielle satellittdata sporadisk (høy oppløselige optiske data). Videre brukes Sentinel-1 til måling av jordfuktighet, Sentinel-2 til kartlegging av vegetasjon og Sentinel-3 til vegetasjon og temperaturmålinger.

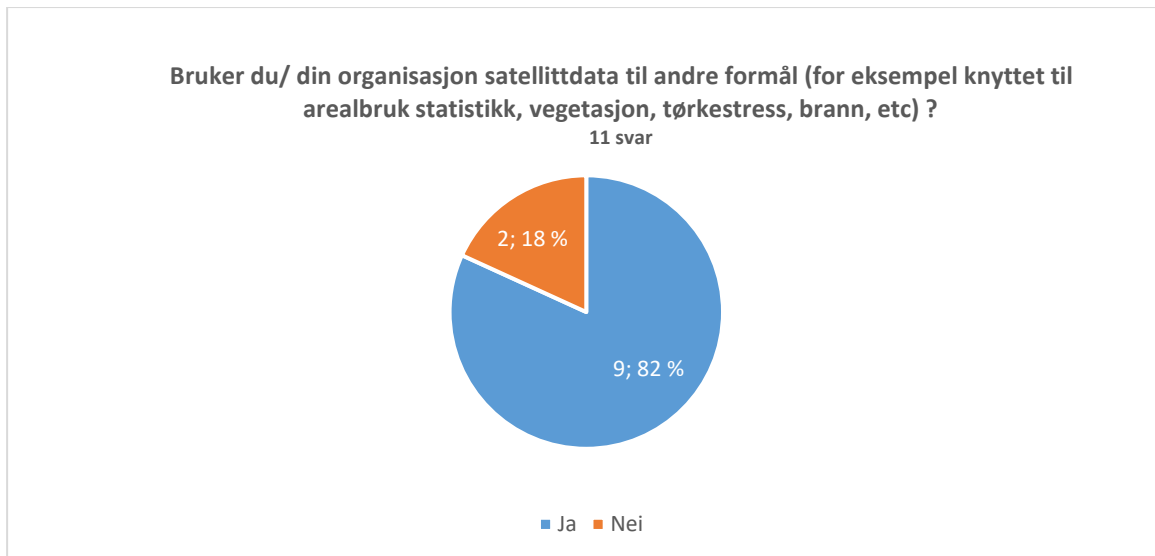
- **Land og geodesi** - Sentinel-1-2-3 benyttes for land- og geodesiformål, samt TOPEX/Poseidon, Jason-1,2,3, Envisat, CryoSat-2, Saral/AltiKa, Sentinel-3A/B, Sentinel-6MF og SWOT for altimetri.
- **Havfarge, sjøis** - Satellittdata benyttes for å fylle romlige hull i in-situ observasjoner.
- **Fartøy og olje på sjøen** - Satellittdata fra Copernicus og andre kilder benyttes for å detektere fartøy på sjø og olje på sjø.
- **Arealbruksstatistikk** –Copernicus satellittdata benyttes for arealbruk statistikk.
- **Industriovervåking** –Sentinel-2 data benyttes for industriovervåking samt Sentinel-5P (NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>), MODIS (diverse), Sentinel-3 og VIIRS (FRP).
- **Varsling av vær, hav, klima og luftkvalitet** – Satellittdata er viktig basis for varsling og overvåking av luftkvalitet, vær, klima og hav. Spesielt brukes det data fra S5P, S3, MODIS til overvåking av klima og luftkvalitet (NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, partikler, mm.).

Bruker du/din organisasjon klimagass data fra satellitter?

11 svar



Figur B.1: Svarene til spørsmål om ekspert/en institusjonen benytter seg av klimagassdata fra satellittmålinger.



*Figur B.2: Svarene til spørsmål om eksperten/institusjonen benytter seg av satellitt data til andre formål enn klimagass-utslipp.*

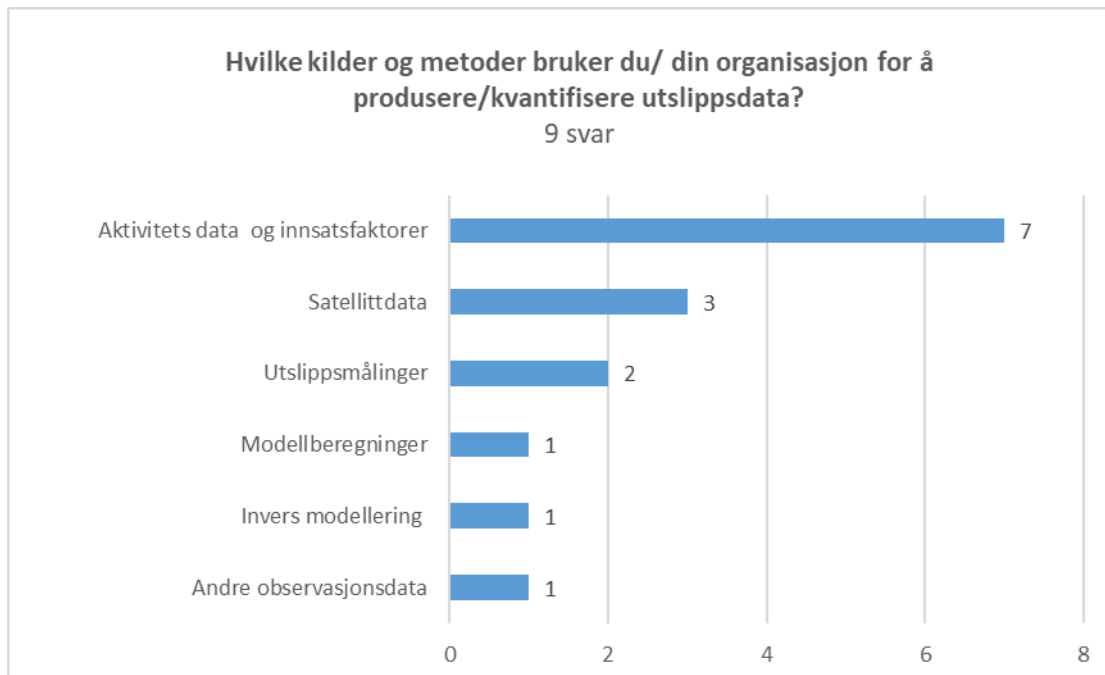
- **Kartlegging og verifisering av klimautslipp**

Syv av elleve svarte på den delen av spørreundersøkelsen som adresserte bruk eller produksjon av data til kartlegging eller verifisering av klimagassutslipp. Dette gjelder klimagassene CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, F-gasser og annen forurensning (NO<sub>2</sub>, PM10, PM2.5, SO<sub>2</sub>).

Fordeling per sektor er som følger

- Miljødirektoratet har ansvar for menneskeskapte utslipp fra alle sektorer, basert på informasjon fra NIBIO og SSB.
- NIBIO har ansvar for LULUCF.
- Kystverket har ansvar for sjøfart.
- SSB har ansvar for energi, industri og produktbruk, jordbruk og avfall.
- NILU har ansvar for å levere anslag for klimagassutslipp fra trafikk og oppvarming (vedfyring) fordelt på kommunenivå til Miljødirektoratet. I tillegg jobbes det med satellitt data for utarbeidelse av metanutslipp og av NO<sub>x</sub> utslipp fra kraftverk i Europa.

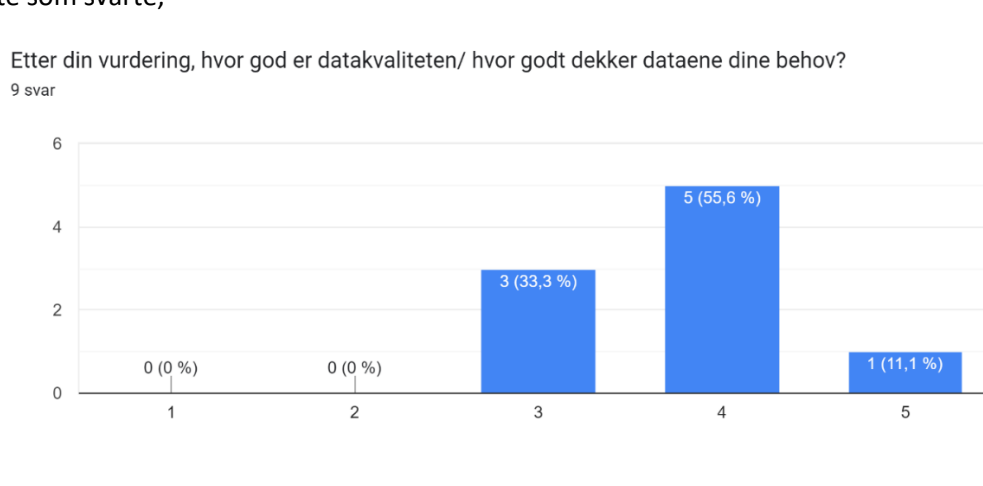
Metodene som benyttes til kartlegging av klimautslipp oppsummeres i Figur B.3. I hovedsak benyttes aktivitetsbaserte metoder basert på innsatsfaktorer til beregning/kvantifisering av utslippsdata. Satellittdata og utslippsmålinger brukes i mindre grad. Kun en respondent svarer at de benytter seg av invers modellering, mens en annen svarer at de benytter seg av andre modellberegninger.



*Figur B.3: Svarene til spørsmål om hvilke kilder og metoder bruker du/ din organisasjon for å produsere/kvantifisere utslippsdata?*

Tre svarer at de benytter seg flere ulike kilder og metoder for å verifisere utslippsdataene. Dette inkluderer bruk av bakkemålinger, fritt tilgjengelige data fra andre land og fra faglitteratur, sammenlikning med annen statistikk i SSB, RA/SA (energi) og revisjon (Se ssb.no "Om statistikken" for nærmere metodikkforståelse).

Figur B.4 viser hvordan kvaliteten av utslippsdataene vurderes av svarene. I en skala fra 1 til 5, hvor 1 er «meget dårlig kvalitet» mens 5 står for «meget god kvalitet», anses utslippsdatakvaliteten som god av de fleste som svarte,

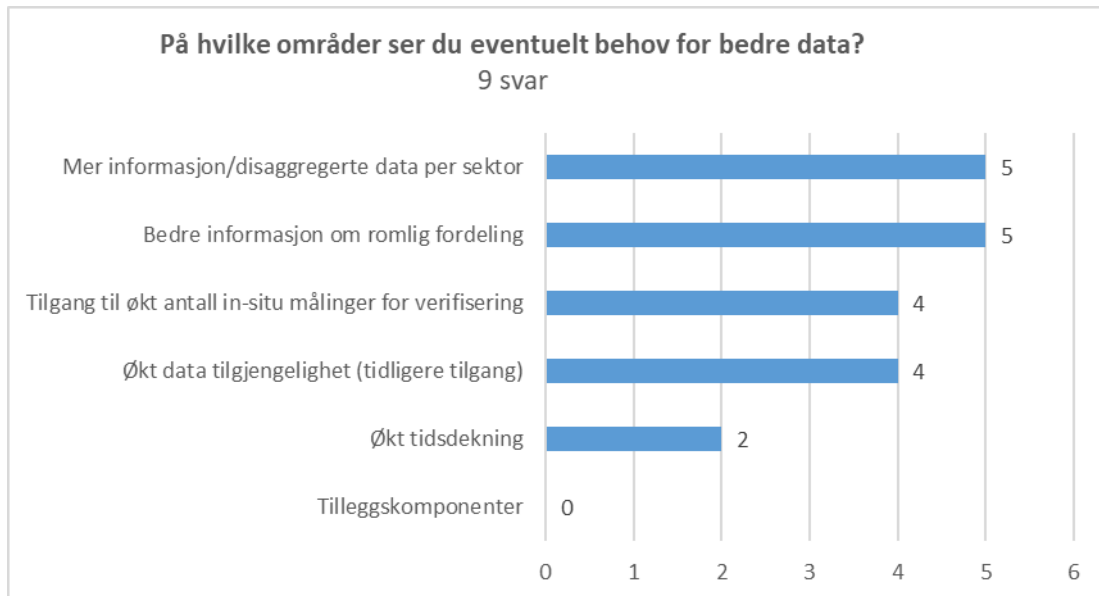


*Figur B.4: Svarene til spørsmål om hvor god er datakvaliteten av utslippsdataene gitt i en skala fra 1 til 5, hvor 1 er «meget dårlig kvalitet» mens 5 står for «meget god kvalitet».*

Områdene hvor kvalitet av klimautslippsdataene kan forbedres vises i figur B.5 under. Punktene:

- a. Bedre informasjon om romlig fordeling
- b. Mer informasjon om sektordata/ mer sektorvis disaggregering av data

er identifisert som viktige forbedringspunkter sammen med tidligere tilgang på data og økt data tilgjengelighet.



Figur B.5: Svarene til spørsmål om på hvilke områder kan kvalitet av klimautslippsdataene forbedres.

Tre organisasjoner svarer at de har erfaring med bruk av satellittdata for verifisering av utslippsdata. Det gjelder følgende områder

- 1) estimering av opptak av CO<sub>2</sub> i levende biomasse.
- 2) bruk av invers modellering med S5P for å estimere metanutslipp.
- 3) bruk av Sentinel-data for romlig- og tids-distribusjon av reaktive gasser.

- **Forventinger til CO<sub>2</sub>M**

Alle unntatt en respondent hadde allerede hørt om CO<sub>2</sub>M. Under er enkelte svar gitt på spørsmålet «Tror du data fra CO<sub>2</sub>M kan gi nyttig tilleggsinformasjon? I så fall på hvilken måte?»:

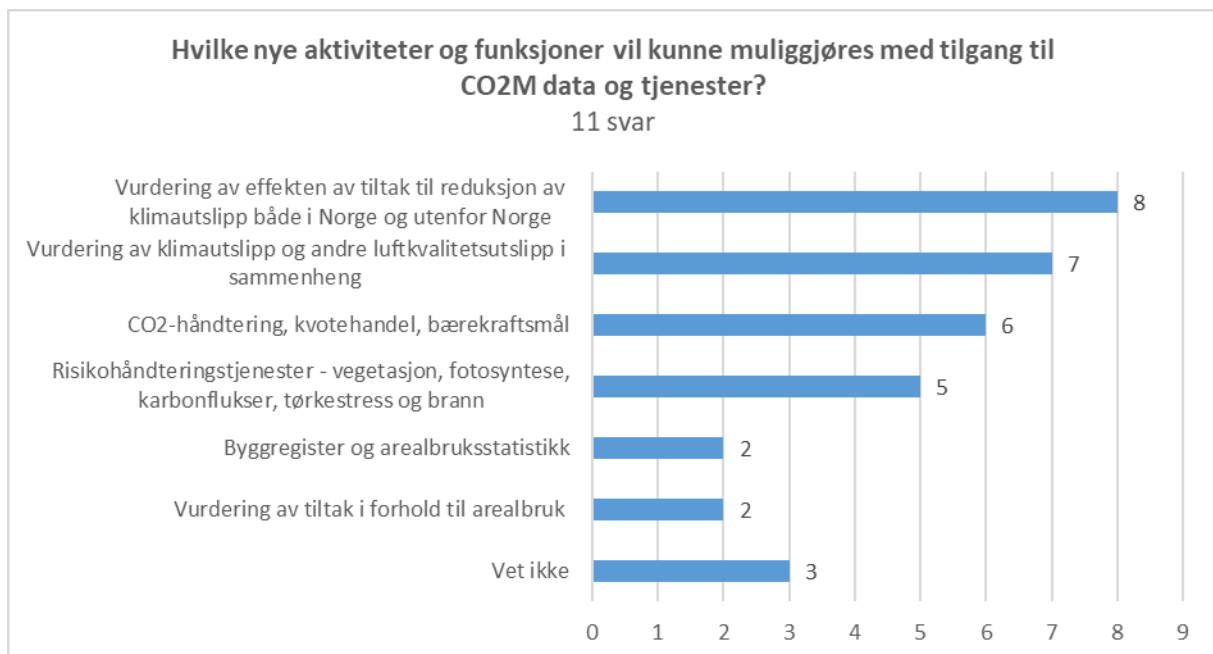
1. JA, Norge har gode data om store utslippskilder/punktkilder, som er der CO<sub>2</sub>M forventes å levere gode data. Tenker derfor at CO<sub>2</sub>M først og fremst vil gi data som kan brukes for å fange opp utslipp i land som ikke har like mye informasjon som vi har i Norge. Eventuelt identifisere store punktkilder globalt. Håper CO<sub>2</sub>M kan brukes globalt. Forventer ikke at den vil gi bedre data for Norge enn det vi har
2. JA, Mye er avhengig av framtidig metodeutvikling, men den kan i det minste bidra til verifisering av klimagassregnskapet, overvåking av punktkilder og sikker mye annet også.
3. Ikke på akkurat det jeg jobber med, men sikkert skal det bli nyttige til å verifisere utslipp.
4. Pga. Norges geografiske plassering, og topografi vil jeg anta at det blir lite tilleggsinformasjon for Norge. Vi har heller ikke veldig store utslippskilder i Norge. Data utenfor Norge vil ha nytteverdi.
5. JA, Jeg tror ikke CO<sub>2</sub>M er så relevant for oss siden vi ikke jobber med overvåking av utslipp.

6. JA, CO2M-data kan bidra til kalibrering av utslippsestimater fra store punktkilder, som byer og kraftverk. Kystverket arbeider med å estimere utslipp fra skip. Disse punktene er mobile og sannsynligvis for små til å fanges opp av CO2M. Vi ser likevel to mulige bruksområder: Utslipp fra skip i opplag (om de ligger på landstrøm eller bruker fossile energikilder) og utslipp fra havneområder utenfor byer (skip ved kai og aktiviteter i havneområdet som godshåndtering).
7. JA, Kvalitetssikring av beregnet utslipp, varsel om store punktutslipp, avdekning av overskridelser av utslippstillatelser.
8. JA, det skulle være veldig nyttig for invers modellering av CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>. Ellers også for høyoppløselig informasjon om luftkvalitet (NO<sub>2</sub>) og partikler
9. JA, Data på finere oppløsning enn før. Nyttig som innputt til og evaluering av jordsystem- og luftkvalitetsmodeller

På spørsmål om **hvilke nye aktiviteter og funksjoner som vil kunne muliggjøres med tilgang til CO2M data og tjenester** blir følgende aktiviteter trukket frem

- Vurdering av effekten av tiltak til reduksjon av klimautslipp både i Norge og utenfor Norge, CO<sub>2</sub>-håndtering, kvotehandel, bærekraftsmål.
- Vurdering av klimautslipp og andre luftkvalitetsutslipp i sammenheng - Luftkvalitet, punktkilder, diffuse utslipp.
- Risikohåndteringstjenester, vegetasjon, fotosyntese, karbonflukser, tørkestress og brann.
- Vurdering av tiltak i forhold til arealbruk, byggregister og arealbruk statistikk.

Svarene vises i Figur B. 6.



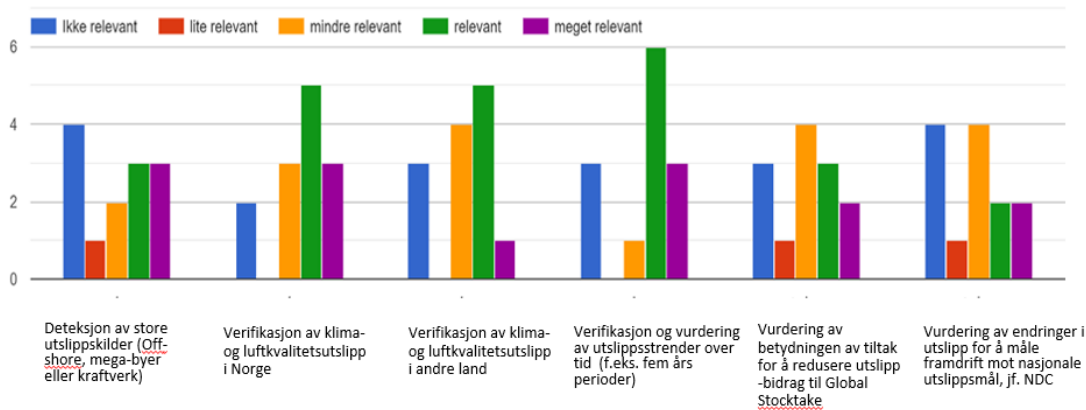
Figur B.6: Svarene til spørsmål om hvilke nye aktiviteter og funksjoner vil kunne muliggjøres med tilgang til CO2M data og tjenester.

På spørsmål om **hvilken bruk av dataene fra CO2M og CO2MVS som vil være mest relevant**, ble aktivitetene rangert som følger (se også detaljerte svar i Figur B.7)



1. Verifikasjon og vurdering av utslippsstrender over tid (f.eks. fem års perioder)
2. Verifikasjon av klima- og luftkvalitetsutslipp i Norge
3. Verifikasjon av klima- og luftkvalitetsutslipp i andre land
4. Deteksjon av store utslippskilder (off-shore, mega-byer eller kraftverk)
5. Vurdering av betydningen av tiltak for å redusere utslipp -bidrag til *Global Stocktake*
6. Vurdering av endringer i utslipp for å måle framdrift mot nasjonale utslippsmål, jf. NDC

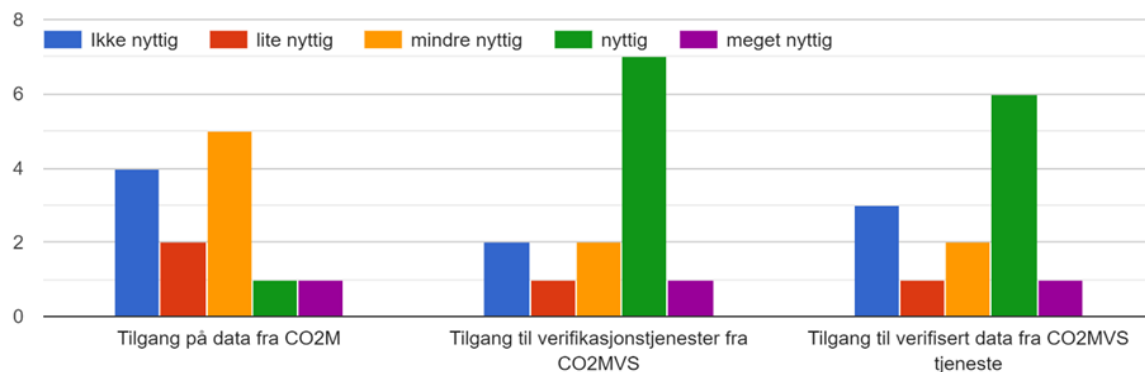
Ut fra det du vet om CO2M og CO2MVS, hvilken bruk av dataene vil være mest relevant for din organisasjon?



Figur B.7: Svarene til spørsmål om hvilken bruk av dataene vil være mest relevant for din organisasjon.

Tilgang til verifikasjonstjenester fra CO2MVS og verifiserte data fra denne tjenesten anses som nyttig av de fleste som svarte på spørreundersøkelsen, slik det vises i figuren nedenfor. Tilgang på data fra CO2M anses som mindre nyttig. Svarene vises i Figur B.8.

Ut fra det du vet om CO2M og CO2MVS, vurder hva vil være mest nyttig for deg/ din organisasjon?



Figur B.8: Svarene til spørsmål om hvilken tilgang til data og tjenester vil være mest relevant til de forskjellige institusjoner.

Det ble også stilt spørsmål om hvilke krav burde stilles til CO2M/CO2MVS data for at disse skal kunne brukes best mulig i Norge. Svarene omfattet krav til stabilitet, tidsoppløsning, romlig oppløsning,

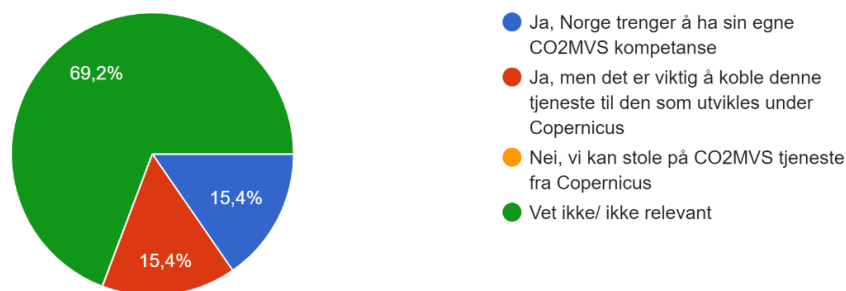
usikkerheter og meta-data beskrivelser. Det ble påpekt at datakvalitet/kvalitetskontroll er viktig, det samme som å beholde stabilitet av data med dekning over hele året, med god rom- og tidsoppløsning.

- **Nasjonal CO2MVS Datasenter**

Spørreundersøkelsen hadde en del spørsmål til slutt om etablering av en nasjonal klimautslippsovervåking og verifiseringstjeneste. Det er ikke klart for de som svarte om et slik er relevant, slik det kommer frem i sammendraget nedenfor. Ingen svarte av det var ikke nødvendig å utvikle et slik datasenter og stole på CO2MVS-tjenesten fra Copernicus, men nytte av et slik nasjonalt senter er muligens for tidlig å vurdere. Figur B.9 viser svarene.

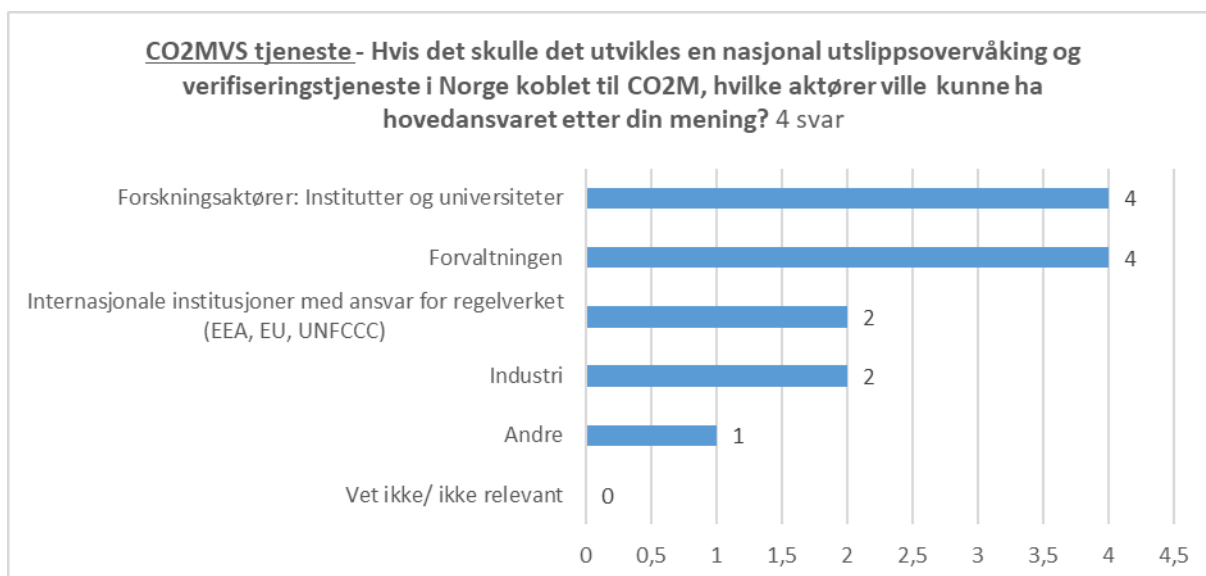
Ut fra det du vet om CO2M og CO2MVS, vil din organisasjon kunne dra nytte av etablering av en utslippsovervåking og verifiseringstjeneste i Norge koblet til CO2M?

13 svar



*Figur B.9: Svarene til spørsmål om nytte av etablering av en utslippsovervåking og verifiseringstjeneste i Norge koblet til CO2M.*

Skulle en slik tjeneste utvikles, ville forvaltningen, industri, forskningsinstitutter og universiteter i Norge kunne involveres og også internasjonale institusjoner med ansvar fra regelverket (EEA, EU, UNFCCC). Forvaltningen og forskningsaktører ville kunne ha hovedansvar for etablering av tjenesten. Svarene vises i Figur B.10.



Figur B.10: Svarene til spørsmål om hvilke aktører ville kunne ha hovedansvaret hvis det skulle det utvikles en nasjonal utslippsovervåking og verifiseringstjeneste i Norge.

Spørsmålene om organisering av et nasjonalt kompetansesenter for utslippsvalidering ble besvart av fire, og svarene tyder på at relevansen til en slik tjeneste er ikke avklart ennå.

Kvaliteten på CO2M og CO2MVS data må testes før en slik tjeneste kan utredes nasjonalt. Det gjenspeiles i et av forslagene til forstudier som trengs for nyttiggjøring av CO2M data, nemlig «å sørge for at vi har så bra som mulig bakkeobservasjoner» for validering av CO2M data.

## Vedlegg C: Liste over akronym

Akronym brukt i dokumentet er listet under.

Akronym	Fullt navn
3MI	Multi-view Multi-channel Multi-polarization Imager
ACGS	Atmospheric Carbon dioxide Grating Spectroradiometer
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
AVENGERS	Attributing and Verifying European and National Greenhouse gas and aerosol Emissions and Reconciliation with Statistical bottom-up estimates
CAMS	Copernicus Atmospheric Monitoring Service
CAPI	Cloud and Aerosol Polarization Imager
CCI	Climate Change Initiative
CEED	Center for Earth Evolution and Dynamics
CHE	CO <sub>2</sub> Human Emissions
CHIME	Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment
CICERO	Center for International Climate Research
CLIM	Cloud imager
CLRTAP	Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CO2M	CO <sub>2</sub> Monitoring
CO2MVS	CO <sub>2</sub> Monitoring and Verification Support
CO2IS/NO2IS	CO <sub>2</sub> og NO <sub>2</sub> Imaging Spectrometer
CoCO2	Prototype system for a Copernicus CO <sub>2</sub> service
COCCON	COllaborative Carbon Column Observing NetworkE
COM	European Commission
CRF	UNFCCC Common Report Format
DLR	German Aerospace Center
ECOMAP	Exploitation of ongoing and future COpernicus Missions for Atmospheric aPplications
EDGAR	Emissions Database for Global Atmospheric Research
EDT	Environmental Defense Fund
EEA	European Environment Agency
EIONET	European Environment Information and Observation Network
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
EMIT	Earth Surface Mineral Dust Source Investigation
EnMAP	Environmental Mapping and Analysis Program
ENVISAT	Environmental Satellite
EPS-SG	EUMETSAT Polarsystem second generation
ESA	European Space Agency
ETS	Emissions Trading System
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
EYE-CLIMA	Verifying Emissions of climate forcers
FAO	Food and Agriculture Organization

<b>Akronym</b>	<b>Fullt navn</b>
FAOSTAT	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
FN	De forente nasjoner
FOCAL	Fast atmOspheric traCe gAs retrieval
FRP	Fire radiative power
GeoCarb	Geostationary Carbon Cycle Observatory
GES DISC	Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center
GHG	Greenhouse Gas
GOSAT	Greenhouse Gases Observing SATellite
GOSAT-GW	Global Observing SATellite for Greenhouse Gases and Water cycle
GRASP	Generalized Retrieval of Atmosphere and Surface Properties
HSI	HyperSpectral Imager
IASI-NG	Infrared Atmospheric Sounder Interferometer-Next Generation
ICOS	Integrated Carbon Observation System
IM	Invers modellering
IPDA	Integrated Path Differential Absorption
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISS	International space station
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JPL	Jet Propulsion Laboratory
JRC	Joint Research Centre
KLD	Klima- og miljødepartementet
LULUCF	Land Use, Land-Use Change, and Forestry
MAP	Multi-angle polarimeter
MERLIN	METHane Remote sensing Lidar Mission
MET	Meteorologisk institutt
MetOp-SG	MetOp-Second Generation
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOE	Ministry of the Environment Japan
MSI	Multispectral Instrument
MWIR	Mid-wave infrared
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDC	Nationally Determined Contributions
NICFI	Norway's International Climate and Forest Initiative
NIES	National Institute for Environmental Studies
NILU	NILU – Norsk institutt for luftforskning
NIR	Near infrared
NIBIO	Norsk institutt for bioøkonomi
NoSA	Norwegian Space Agency
NZSA	New Zealand Space Agency
OCO	Orbiting Carbon Observatory
OGCI	Oil and Gas Climate Initiative
PARIS	Process attribution of regional emissions
PAUL	ICOS Cities Pilot Applications in Urban Landscapes

<b>Akronym</b>	<b>Fullt navn</b>
PRISMA	Hyperspectral Precursor of the Application Mission
QA/QC	Quality assurance/ quality control
REDD+	Reducing emissions from deforestation and forest degradation
ReGAME	Reliable global methane emissions estimates in a changing world
SBG	Surface Biology and Geology
SCIAMACHY	SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CartographHY
SIF	Solar induced fluorescence
SSB	Statistisk sentralbyrå
SWIR	Short wave infrared
TANSO-FTS	Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observations – Fourier Transform Spectrometer
TCCON	Total Carbon Column Observing Network
TIR	Thermal Infrared
TROPOMI	TROPOspheric Monitoring Instrument
TSOC	Tromsø Satellite Operations Center
UKSA	UK Space Agency
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UoL FP	University of Leicester Full 'Full Physics'
UVNS	Ultraviolet Visible Near-infrared Shortwave
VERIFY	Verifying greenhouse gas emissions
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
VNIR	Visible near infrared
VSWIR	Visible to shortwave infrared
WFM-DOAS	Weighting Function Modified DOAS
WMO	World Meteorological Organization

## Vedlegg D: Summary in English

***The CO<sub>2</sub> Monitoring satellites (CO<sub>2</sub>M), to be launched in 2025/2026, will together with the CO<sub>2</sub> Monitoring and Verification Support Capacity (CO<sub>2</sub>MVS), provide complementary CO<sub>2</sub> emission data for large industrial areas, megacities, small regions, countries and globally.***

***On assignment from the Norwegian Space Agency, NILU – Norwegian Institute for Air Research and CICERO Center for Climate Research have prepared a roadmap for how Norway can utilize and contribute to CO<sub>2</sub>M and CO<sub>2</sub>MVS within government, research and business.***

The aim of the climate convention is to avoid dangerous anthropogenic interference with the climate system. This includes limiting global greenhouse gas emissions. The emissions can be quantified both with bottom-up and top-down methods. Norway reports bottom-up greenhouse gas emissions to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Recent advances in satellite remote sensing make it possible to measure CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and other greenhouse gases from space with high precision, using so called top-down methods. The purpose of the CO<sub>2</sub> Monitoring (CO<sub>2</sub>M) satellite initiative is to provide the European Union with an operational capacity that can contribute to the monitoring of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. The CO<sub>2</sub>M satellites, to be launched in 2025/2026 as part of the Copernicus Expansion Missions, together with the data integration and user support system CO<sub>2</sub> emissions Monitoring and Verification Support Capacity (CO<sub>2</sub>MVS), will provide a new opportunity for top-down estimates CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions. Other measurement parameters include NO<sub>2</sub>, fluorescence, water vapor and aerosols. In addition to CO<sub>2</sub>M, the CO<sub>2</sub>MVS consists of a complementary ground-based network of CO<sub>2</sub> measurements, an operational data assimilation service for CO<sub>2</sub> emission calculations, and a decision support system. CO<sub>2</sub>M and CO<sub>2</sub>MVS are developed under the auspices of the European Space Agency (ESA), the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) and the EU's atmospheric service Copernicus Atmospheric Monitoring Service (CAMS). It is planned that CO<sub>2</sub>M, consisting of two to three satellites, will be operational from 2026 with a lifetime of a minimum of 12 years to cover at least two global stock takes, done every 5 years from 2023 according to the Paris Agreement.

The Norwegian national roadmap for CO<sub>2</sub>M describes how Norway can make use of data from CO<sub>2</sub>M and the capacity CO<sub>2</sub>MVS within government, research, and business.

Norwegian user needs have been identified through meetings with the participants in the project's reference group, a workshop, bilateral meetings, and a survey. Possible areas of use that have been identified include verification and improvement of national emissions estimates, better knowledge of emissions trends internationally, better knowledge of emissions at local level, and research and business activities.

In Norway, the Norwegian Environment Agency is responsible for Norway's reporting of national greenhouse gas emissions to the UNFCCC. The data and documents reported are prepared in collaboration with Statistics Norway (SSB) and the Norwegian Institute for Bioeconomy Research (NIBIO). One of the core purposes of CO2M is to obtain data for the verification and improvement of national emissions estimates. As of today, satellite and observational data are not used to verify the Norwegian emissions estimates, but the Norwegian Environment Agency, Statistics Norway and NIBIO have expressed interest in such use of CO2M data, especially if CO2M provides data of high quality in areas for which there is large uncertainty in the emissions estimates.

The Norwegian government, Norwegian Environmental Agency and environmental organizations can benefit from CO2M data as an additional source of information about other countries' emissions. The Norwegian government's climate and forest initiative uses satellite data to monitor land use changes and could be a potential user.

The Norwegian Environment Agency publishes annually municipality or city-level emission estimates. At the local level, there is greater uncertainty linked to certain emission sources, and improvement of the emission estimates may be useful for municipalities and county councils. However, it is more uncertain whether CO2M can provide sufficient data for this purpose, given the unique location (high latitude) and characteristics (small sources, geography, clouds) of Norway.

Perhaps the largest user of the CO2M data will be research bodies including universities, research institutes and research departments in companies. There are significant gaps in knowledge about both the carbon and methane cycles, and satellite data provide many new opportunities to fill some of these knowledge gaps. Today, only a few Norwegian actors use greenhouse gas observations from satellites directly in their research or operations. Enhanced research will likely have a positive feedback on the use of CO2M data and products by government, for example, by understanding better how the land carbon cycle responds to a changing climate.

In Europe, several countries use atmospheric measurements to verify parts of their national emissions estimates. The experience of these countries is that there is a need for scientific competence and extensive collaboration between researchers and users over a long period of time to be able to utilize observational data. The potential and challenges for using observation-based emission estimates are different for different greenhouse gases. The use of observation-based estimates is currently most widespread for F-gases, while some countries also apply methods for observation-based estimates for CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O.

The CO2MVS framework acts as a starting point for what kind of expertise needs to be developed in Norway to make use of the CO2M data and the CO2MVS, and where there are opportunities for Norwegian actors to contribute expertise. The power of the CO2M data products comes with its combination with other data and models. Hence, to utilize CO2M data effectively, all the elements of the CO2MVS are needed, albeit to a somewhat varying extent for different applications. Within each



part of the CO2MVS framework, there is a need for Norwegian expertise, both by contributing to delivering data and performing modelling, and to use the results.

This report starts with a brief introduction and continues with a description of the CO2M satellites, their instruments, and analysis of measurement data to quantify the amount of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> and aerosols. Furthermore, the CO2MVS infrastructure is described for connecting CO2M data to emissions and their quantification. The roadmap also presents other existing and future satellite-based measurements of greenhouse gases with possible relevance for Norway. An overview of Norwegian management and climate accounting at both national and municipal level is given next. An analysis of national user needs and development needs follows. The roadmap ends with recommendations for the way forward for Norway regarding CO2M and CO2MVS.

The recommendations include both pre-studies and studies after the satellites have been launched. It is desirable to improve the temporal and spatial resolution of input data used in the analysis of CO2M data. Both input data and CO2M data should be verified and validated against ground measurements. The coverage of CO2M data for Norway should be investigated. The potential benefit of CO2M data for Norwegian actors should be assessed and studies of synergy effects with other measurements or products should be carried out. Investigation of the information inverse models can provide about Norwegian land and seas emissions based on CO2M measurements is needed. There is a need to improve Norwegian-based inverse models to handle the influx of data from CO2M. The potential of CO2M and the CO2MVS to improve Norwegian greenhouse gas estimates should be investigated through case studies and the key components of the decision support system should be identified. Furthermore, alternative uses of CO2M data should be investigated. For communication of CO2M and the CO2MVS, graphic tools and information material should be prepared. Norwegian expertise should be maintained and developed through knowledge transfer through a meeting place for CO2M/CO2MVS.

## **NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning**

NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning er en uavhengig stiftelse etablert i 1969. NILUs forskning har som formål å øke forståelsen for prosesser og effekter knyttet til klimaendringer, atmosfærens sammensetning, luftkvalitet og miljøgifter. På bakgrunn av forskningen leverer NILU integrerte tjenester og produkter innenfor analyse, overvåkning og rådgivning. NILU er opptatt av å opplyse og gi råd til samfunnet om klimaendringer og forurensning og konsekvensene av dette.

*NILUs verdier: Integritet – Kompetanse – Samfunnsnytte*

*NILUs visjon: Forskning for en ren atmosfære*

NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning  
Postboks 100, 2027 KJELLER

E-post: [nilu@nilu.no](mailto:nilu@nilu.no)

<http://www.nilu.no>

ISBN: 978-82-425-3125-4

ISSN: 2464-3327