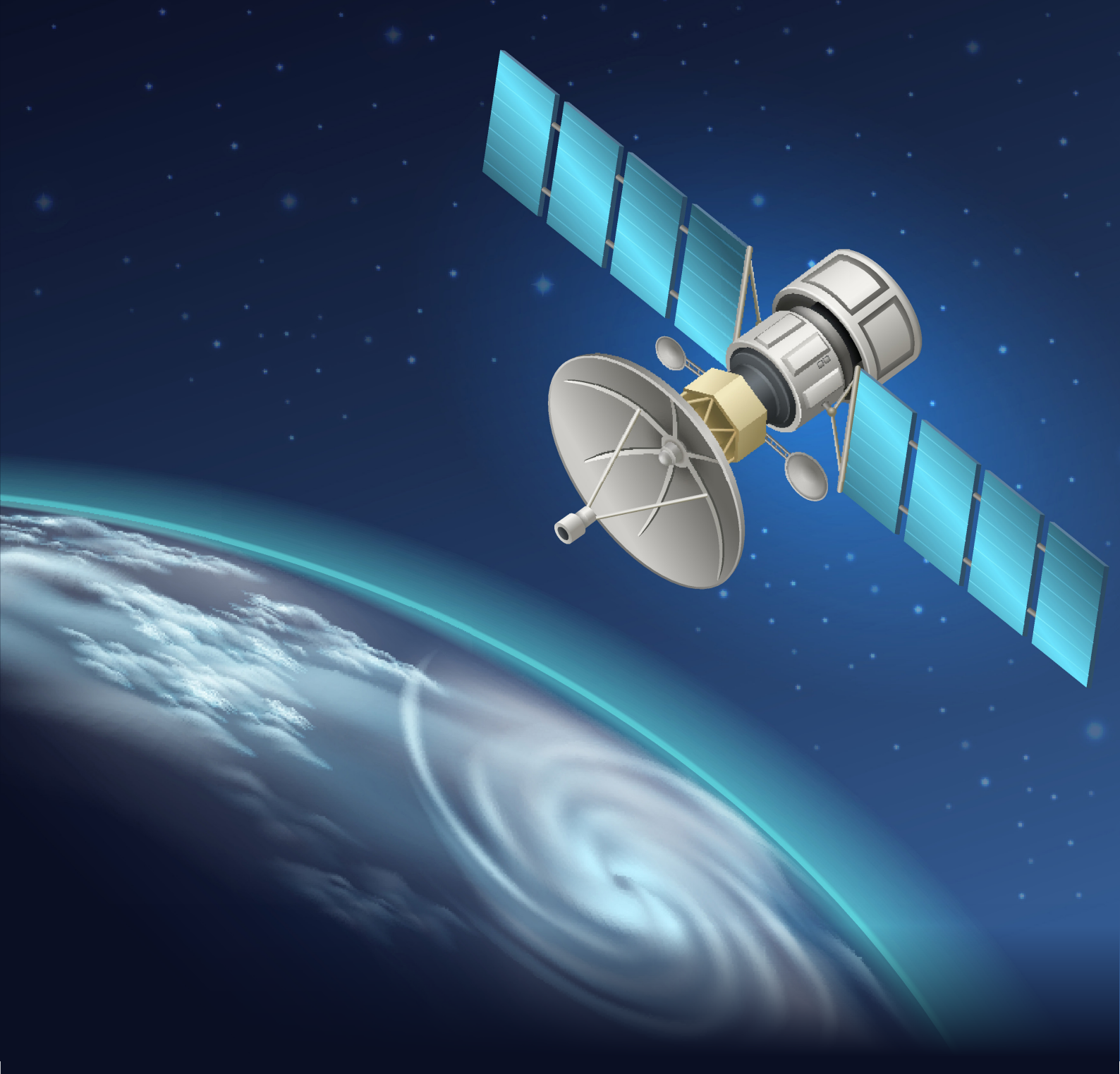




KORTLÆGNING AF INTERESSER OG POTENTIALER I FORBINDELSE MED SATELLITDATA TIL OVERVÅGNING AF DRIVHUSGASEMISSIONER

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 523

2023



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

KORTLÆGNING AF INTERESSER OG POTENTIALER I FORBINDELSE MED SATELLITDATA TIL OVERVÅGNING AF DRIVHUSGASEMISSIONER

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 523

2023

Ole-Kenneth Nielsen,
Kaj Mantzius Hansen
Camilla Geels

Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 523
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel:	Kortlægning af interesser og potentialer i forbindelse med satellitdata til overvågning af drivhusgasemissioner
Forfattere:	Ole-Kenneth Nielsen, Kaj Mantzius Hansen, Camilla Geels
Institution:	Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab
Udgiver:	Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL:	http://dce.au.dk
Udgivelsesår:	Februar 2023
Redaktion afsluttet:	December 2022
Faglig kommentering:	Marlene S. Plejdrup
Kvalitetssikring, DCE:	Vibeke Vestergaard Nielsen
Ekstern kommentering:	Uddannelses- og Forskningsstyrelsen & Danmarks Meteorologiske Institut. Kommentarerne findes her: http://dce2.au.dk/pub/komm/SR523_Komm.pdf
Finansiel støtte:	Uddannelses- og Forskningsstyrelsen & Danmarks Meteorologiske Institut
Bedes citeret:	Nielsen, O.-K., Mantzius Hansen, K. & Geels, C. 2023: Kortlægning af interesser og potentialer i forbindelse med satellitdata til overvågning af drivhusgasemissioner. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 34 s. - Videnskabelig rapport nr. 523. http://dce2.au.dk/pub/SR523.pdf
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Rapporten beskriver en kortlægning af interesser og potentialer i forbindelse med satellitdata til overvågning af drivhusgasemissioner. Der er givet en beskrivelse af nuværende og planlagte satellitmissioner med særlig fokus på CO ₂ M. Der er derudover lavet en beskrivelse af mulige scenarier for en eventuel fremtidig satsning på dette område.
Emneord:	Satellitdata, drivhusgasemissioner, Copernicus, CO ₂ M
Layout:	Ann-Katrine Holme Christoffersen
Foto forside:	COLOURBOX56968299
ISBN:	978-87-7156-737-3
ISSN (elektronisk):	2244-9981
Sideantal:	34
Internetversion:	Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som http://dce2.au.dk/pub/SR523.pdf

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	8
1 Status og udvikling i satellitbaserede tjenester	10
1.1 Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)	10
1.2 Copernicus Carbon Dioxide Monitoring mission	10
1.3 Planer for produkter og tjenester	12
2 Identifikation af relevante aktører og nationale behov	15
2.1 Nationale emissionsopgørelser	15
2.2 Forskningsmæssige interesser og kompetencer	18
2.3 Overvågnings- og verifikationsbehov	22
2.4 Muligheder for danske virksomheder, vidensinstitutioner og andre aktører til at udvikle kommercielle løsninger	24
3 Scenarier for fremtidige danske investeringer	25
3.1 Internationalt samarbejde	25
3.2 Udviklingsscenarier	27
4 Referencer	32

Forord

Denne rapport præsenterer resultatet af en kortlægning af interesser og potentialer i forbindelse med satellitdata til overvågning af drivhusgasemissioner. Rapporten består af tre hovedkapitler, der beskriver den nuværende status og fremtidige udvikling i satellitbaserede tjenester, identifikation af relevante aktører og nationale behov samt scenarier for fremtidige danske investeringer.

I arbejdet er der taget udgangspunkt i den workshop, der blev organiseret af Danmarks Meteorologiske Institut i marts 2022 om den kommende Copernicus CO₂-mission og muligheder og konsekvenser for Danmark (DMI, 2022). En af konklusionerne fra denne workshop var at gennemføre en kortlægning af kompetencer og behov, hvilket har været formålet med denne rapport.

I forbindelse med kortlægningen af nationale behov, er der taget kontakt til en række forskningsmiljøer, myndigheder, branche- og interesseorganisationer med henblik på at få deres input til hvilke muligheder, de ser for anvendelse af satellitbaserede tjenester til overvågning af drivhusgasemissioner. Følgende institutioner har bidraget til kortlægningen i form af skriftlig besvarelse af spørgsmål og/eller deltagelse i møder: Aarhus Universitet, Københavns Universitet, Danmarks Tekniske Universitet, Danmarks Meteorologiske Institut, Energistyrelsen, Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur, Uddannelses- og Forskningsstyrelsen, Klimarådet, SEGES, Dansk Industri, Dansk Gasteknisk Center, Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, og Landbrugsstyrelsen.

Forfatterne ønsker at takke de mange personer, der bidrog med input til rapporten. Ansvar for indholdet i denne rapport og de angivne konklusioner er alene forfatternes.

Sammenfatning

I dette projekt er der foretaget en kortlægning af interesser og behov i forbindelse med udnyttelse af satellitbaserede observationer af drivhusgasser.

Rapporten beskriver den nuværende status og udvikling i satellitbaserede tjenester, herunder arbejdet i CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) med særligt fokus på den kommende mission CO₂M. Der er også givet en kort beskrivelse af andre nuværende og planlagte satellitmissioner. CO₂M vil give mange nye muligheder på grund af den øgede ambition sammenlignet med tidligere og eksisterende satellitmissioner og er derfor en 'game-changer' i forhold til tidligere og eksisterende satellitmissioner.

Anvendelse af satellitdata til verifikation af nationale emissionsopgørelser er en metode, der er anerkendt af IPCC, men også identificeret som indeholdende en del udfordringer, herunder behovet for specialiserede modelleringskompetencer. For danske forhold er det største behov og potentiale for verifikation for de sektorer, hvor der er den største usikkerhed i beregningerne – for Danmark er det hovedsageligt metan- og lattergasemissioner samt kuldioxidemissioner fra arealanvendelse. Der findes internationale eksempler på anvendelse af atmosfæriske observationer som verifikation af nationale emissionsopgørelser, idet de eksempler, der er inkluderet i de officielle rapporter til FN's klimakonvention, er eksempler, hvor der er anvendt landbaserede observationer. Der er dog ingen danske eksempler. Der er dog eksempler på forskningsprojekter, hvor der er anvendt satellitdata til at verificere nationale emissionsopgørelser.

Der er som en del af projektet taget kontakt til en række forskellige interessenter med henblik på at få deres input til hvilke interesser og kompetencer, der er inden for anvendelse af satellitdata særligt med fokus på drivhusgasemissioner samt hvilke behov, der kan blive dækket på både kort og længere sigt ved anvendelse af satellitdata. Der har været mange tilbagemeldinger som hovedsageligt falder inden for tre kategorier: Forskningsinstitutioner, myndighedsinstitutioner samt branche/interesseorganisationer. Der er i nogle tilfælde overlap og nogle input reflekterer derfor både en forskningsinteresse og/eller en myndigheds- eller erhvervsinteresse. De mange inputs er syntetiseret i kapitel 2.

Kortlægningen af kompetencer, infrastruktur og forskningsmæssige interesser viser, at der er store eksisterende kompetencer med anvendelse af satellitdata generelt, men ingen erfaring specifikt med drivhusgasdata. Der påpeges, at der i Danmark generelt mangler kompetencer til at foretage invers modellering, og at det kan være relevant også at styrke kompetencer til bearbejdning og analyse af satellitdata. Endelig er det klart, at det vil være nødvendigt med landbaserede observationer i tillæg til satellitdata for at kunne udnytte satellitdata optimalt.

I forhold til kortlægningen af behov på kort og længere sigt, er der givet udtryk for en stor interesse i mulighederne for at anvende satellitdata til at verificere/forbedre de nationale emissionsopgørelser. Samtidig er der dog også en del usikkerhed omkring, hvor præcise data vil være eller sagt på en anden måde, hvor store usikkerheder, der er forbundet med de emissioner, der kan beregnes på baggrund af satellitobservationer. Der er derfor en skepsis om

hvorvidt data vil være tilstrækkeligt gode til f.eks. direkte at kunne anvendes i forbindelse med regulering. Det fremhæves dog, at der ses et stort potentiale i forhold til at anvende data til verificering af emissioner på nationalt plan, herunder også udviklingen i emissioner over tid, samt til at verificere effekten af målrettede virkemidler.

Med hensyn til kommercielle interesser så menes der at være et stort potentiale. Det vil dog kræve, at der er gennemsigtighed i de anvendte metoder og de usikkerheder, der er forbundet med estimerne.

Det er vigtigt, at det sikres, at en dansk indsats supplerer det arbejde, der foretages internationalt, og det vil være af stor værdi, hvis der kan være mere international koordinering, f.eks. i EU sammenhæng for at sikre at ressourcerne udnyttes optimalt. Et eksempel på dette kan være i planlægningen af landbaserede målestationer, hvor der med fordel kan koordineres på tværs af landegrænser for at sikre det bedst mulige design af målenetværket.

Der er på nuværende tidspunkt ikke tilstrækkelige kompetencer i Danmark til at kunne bidrage til det internationale arbejde indenfor invers modellering. Dette vil være nødvendigt for at opnå den tilstrækkelige forståelse af muligheder og begrænsninger i forhold til de danske omstændigheder.

Konsekvenserne af de specifikke omstændigheder for Danmark i forhold til skydække og vanddamp kan også nødvendiggøre, at der skal laves forbedringer i forhold til bearbejdning og analyse af satellitdata.

Baseret på kortlægningen i dette projekt vil det være vigtigt hurtigt at beslutte, om dette skal være et satsningsområde fremover. Hvis der ikke foretages en koordineret indsats, men det overlades til ad-hoc projektf finansiering og forskningsmiljøers deltagelse i internationale projekter, så vil der ikke ske den nødvendige opbygning af kompetencer. Danmark vil dermed være uden indflydelse på det fremtidige arbejde på europæisk plan og Danmark vil udelukkende have mulighed for at anvende services udviklet uden dansk input og uden hensyn til specielle danske forhold.

Hvis det besluttet at iværksætte en koordineret satsning på dette område for at kunne drage nytte af CO₂M og de detaljerede data, der forventes som resultat af denne mission, så vil det være nødvendigt at igangsætte en række initiativer for at opbygge kapacitet på følgende områder:

- Bearbejdning og analyse af drivhusgasdata fra satellitter
- Invers modellering
- Landbaserede observationer

Det vil være oplagt med tanke på den store eksisterende kompetence inden for satellitdata, at DMI udvidede med kompetencer specielt målrettet mod drivhusgasemissioner. For de landbaserede observationer, ville det være oplagt at prioritere at fortsætte under ICOS med etablering af en eller to atmosfæriske målestationer. Angående invers modellering skal der opbygges kapacitet fra bunden. Dette kan dog med fordel sammentænkes med eksisterende kompetencer inden for modellering af atmosfæriske processer.

Summary

This project has made a mapping of interests and needs associated with the use of satellite-based observations of greenhouse gases.

The report describes the current status and ongoing developments in satellite-based services including the work ongoing in CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) and in particular with a focus on the upcoming mission CO₂M. A short description of other current and planned satellite missions has also been included. CO₂M will allow many new opportunities due to the increased level of ambition compared to previous and current satellite missions. CO₂M is therefore considered a game-changer in comparison with previous and current satellite missions.

Use of satellite data to verify national greenhouse gas emissions inventories as a method is recognised by the IPCC. However, the IPCC also acknowledges a number of challenges including the need for specialised modelling competences. Under Danish circumstances, the largest need and potential for verification is for the sources that currently is associated with the largest uncertainties. These sources are generally methane and nitrous oxide and carbon dioxide from land use. There are international examples of the use of atmospheric observations being used to verify national emission inventories. However, the examples reported to the UNFCCC are using land-based observations for the inverse modelling and there are no Danish examples. There are examples of research projects having used satellite data to verify national emission estimates.

As a part of the project, contact has been made to a number of stakeholders with the aim of collecting their input on the interests and competences available related to the use of satellite data in particular with a focus on greenhouse gas emissions. Additionally, the potential needs both short and longer term that could be met using satellite data has been investigated. There have been many responses, which mainly fall within three categories: research institutions, governmental ministries and agencies, and business/interest organisations. In some cases, there is an overlap and some inputs therefore reflect both a research interest and/or a regulatory or business interest. The many inputs received are synthesised in Chapter 2.

The mapping of competences, infrastructure and research interests shows that there are significant existing competences within the field of using satellite data in general, but basically no experience specifically when it relates to greenhouse gases. It is emphasised that Denmark lacks competences within the field of inverse modelling and that it can be relevant to also enhance the competences within retrieval and analysis of satellite data specifically relating to greenhouse gas data. It is also clear, that it will be necessary with land-based observations in addition to satellite data to achieve the best results.

In relation to the mapping of short and long-term needs, the survey showed a large interest in the opportunities in using satellite data to verify and improve the national emission inventory. At the same time there is some uncertainty as to the precision of the estimates that can be derived or formulated in a different way, how large uncertainties are associated with the emission es-

timates derived based on satellite observations. There is therefore some scepticism as to whether the data will be of sufficient quality, e.g. to be used directly in relation to regulatory measures. It is emphasised that the potential of using data for verification of national emissions is considered to be great including to monitor changes in emissions over time and to verify the effect of individual targeted measures.

Regarding commercial interests, the survey shows that there is considered to be a large potential. However, this requires that the methodologies and uncertainties associated with the estimates are transparently described.

It is important that Danish work in this field is supplementing the work ongoing internationally and it would be very valuable with more international coordination, e.g. in the EU to ensure the optimal use of resources. One example of this could be the planning of land-based observations, where it would be advantageous to coordinate across national borders to ensure the best possible design on the measurement network.

Presently, the necessary competences are not available in Denmark to contribute to the international work on inverse modelling. This will be required to achieve an adequate understanding of the opportunities and limitations specifically pertaining to the Danish circumstances.

The consequences of the Danish specific circumstances related to cloud cover and water vapour in the atmosphere can also necessitate improvements related to the retrieval and analysis of the satellite data.

Based on the mapping in this project, it will be important to quickly decide whether this area should be prioritised in the future. If a coordinated effort is not made, it will not be possible to build the necessary competences. Reliance on ad-hoc projects and sporadic participation in international projects will not build the competences needed in the longer term. Without competences, Denmark will not be able to influence the planned future work at the European level and Denmark will therefore have to rely on services developed without any Danish input and without consideration for specific Danish circumstances.

If it is decided to launch a coordinated effort in this area to fully utilise the data from CO₂M, it will be necessary to start a number of initiatives in order to build capacity within the following areas:

- Retrieval and analysis of greenhouse gas data from satellites
- Inverse modelling
- Land-based observations

Considering the large existing competences within satellite data at DMI, it would be natural that these competences were enhanced to include specific competences related to greenhouse gas emissions. For the land-based observations, it would be obvious to prioritise continuing the work within ICOS with the establishment of one or two atmospheric measurement stations. For inverse modelling, the competences would have to be built from scratch. A build-up of these competences could be considered in connection with existing competences in Denmark within modelling of atmospheric processes.

1 Status og udvikling i satellitbaserede tjenester

1.1 Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)

CAMS er en af seks tjenester, der udgør Copernicus, Den Europæiske Unions jordobservationsprogram, som har til formål at observere vores planet og dens miljø til fordel for alle europæiske borgere. Copernicus tilbyder informationstjenester baseret på satellitjordobservation, in situ (ikke-satellit) observationer og modellering. CAMS er implementeret af European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) på vegne af Europa-Kommissionen. For at tilvejebringe alle de observationer, der er nødvendige for at producere CAMS-tjenesterne, samarbejder ECMWF med European Space Agency (ESA) og European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) samt mange andre organisationer, der leverer satellit- og in situ observationer.

1.2 Copernicus Carbon Dioxide Monitoring mission

To CO₂M-satellitter, som skal fungere som en konstellation i kredsløb i en periode på 7,5 år, med brændstof til at forlænge deres levetid til 12 år, er planlagt til at blive opsendt sekventielt i 2026. Satellitterne skal bevæge sig i en nærpolar, sol-synkron bane. De to CO₂-moniteringssatellitter vil hver indeholde et nær-infrarødt og to kortbølge-infrarødt spektrometre til at måle atmosfærisk CO₂ med høj rumlig opløsning. Disse målinger vil blive brugt af den nye CO₂ Monitoring and Verification Support Capacity (MVS), som ECMWF er ved at opbygge i samarbejde med EUMETSAT og ESA, og som har til formål at reducere usikkerheden i estimater af emissioner af CO₂ fra forbrænding af fossilt brændstof på lokale, nationale og regionale skalaer på længere sigt.

1.2.1 Formål

Det overordnede formål med CO₂-moniteringsmissionen er at give Den Europæiske Union en operationel kapacitet, der bidrager til den globale overvågning af menneskeskabte CO₂-emissioner.

Det primære mål med CO₂-moniteringsmissionen er at måle CO₂ koncentrationen i den samlede luftsøjle med den rumlige opløsning, nøjagtighed, tidsinterval og rumlige dækning, der kræves for at give det vigtigste input til MVS, hvis mål er:

1. At registrere hotspots, såsom storbyer og kraftværker.
2. At overvåge hotspot-emissioner for at vurdere reduktion / stigning.
3. At vurdere emissionsændringer mod lokale reduktionsmål for at overvåge virkningen af nationalt bestemte bidrag (Nationally Determined Contributions: NDCs).
4. At vurdere de nationale emissioner og ændringer i 5-årige tidstrin for at bidrage med information til den globale vurdering af fremdrift (global stocktake).

1.2.2 Instrumenter og målemetode

På hver satellit er der fire typer instrumenter. Udstrålingen fra toppen af atmosfæren vil blive målt ved hjælp af tre billeddannende spektrometre; et der måler i det nær-infrarøde spektrum (NIR: 747-773nm@0,1nm) og to der måler i det kortbølgede infrarøde spektrum (SWIR: SWIR-1: 1595-1675nm@0,3nm, SWIR-2: 1990-2095nm@0,35nm). CO₂M kræver dagslys og skyfrie forhold (se dog muligheden for korrektioner nedenfor).

Disse observationer suppleres med målinger i det synlige spektralområde (405-490 nm@0,6nm), som giver koncentrationer af nitrogendioxid (NO₂) i den samlede luftsøjle, der tjener som sporstof til at hjælpe med påvisningen af emissionsfaner fra fossile brændstoffer (f.eks. fra kulfyrede kraftværker og byer).

Lysspredning fra aerosoler vil påvirke nøjagtigheden af CO₂ målingerne. Ved at måle aerosolkoncentrationer med et Multiple-Angle Polarimeter (MAP) kan der korrigeres for aerosolkoncentrationen og dermed sikres at udregningen af CO₂ vil være af høj kvalitet selv over forurenede industriområder.

Som nævnt ovenfor vil tilstedeværelsen af skyer påvirke nøjagtigheden af CO₂-målingerne, og målinger med et tre-bånds Cloud Imager vil give den nødvendige information til at korrigere de udregnede CO₂-koncentrationer for tilstedeværelsen af skyer.

Målingerne bliver udført i et bånd af ca. 250 km bredde med en rummelige opløsning på ca. 2 km x 2 km. Med to satellitter vil hvert område i Europa overflyves ca. hver 3. dage. På grund af tilstedeværelsen af skyer vil antallet af mulige dage med CO₂-målinger være begrænset til 2-3 per måned, afhængig af de lokale meteorologiske forhold.

1.2.3 Output data

Resultater fra satellitter vil typisk være tilgængelige i flere forskellige former: De processerede måledata (niveau-1), afledte geofysiske variable (niveau-2), georefererede data (niveau-3) og bearbejdede produkter (niveau-4).

Instrumenterne på CO₂-moniteringsmissionen måler primært absorptionspektre i udvalgte bølgelængdebånd, som vil blive gjort tilgængelige som niveau-1 data.

Det primære geofysiske produkt (niveau-2 data) vil være den gennemsnitlige molfraktion af CO₂, betegnet XCO₂ (forholdet mellem koncentrationen af CO₂ og tør luft i den samlede luftsøjle). XCO₂ udregnes ved at kombinere niveau-1 produkterne med modeller, der beregner absorption og emission af stråling fra de forskellige atmosfæriske komponenter. Kravene til præcisionen og nøjagtigheden af XCO₂ til at kunne kvantificere antropogene emissioner er meget strenge og afhænger i høj grad af evnen til at bestemme lysspredningseffekterne i atmosfæren. I løbet af de seneste årtier er der i forbindelse med tidligere satellitmissioner blevet udviklet adskillige algoritmer til at beregne XCO₂ fra satellitmålinger. Alle algoritmer er baseret på at minimere forskellen mellem modellerede og observerede udstrålingspektre ved at justere modelparametre (som f.eks. variationen af CO₂-koncentrationen med højden i atmosfæren, overfladealbedoen, osv.). Til dette formål, bruges som nævnt absorptions- og emissionsstrålingsmodeller kombineret med inversionsalgoritmer, som (typisk iterativt) minimerer forskellen mellem den modellerede og den

observerede udstråling fra atmosfæren. Disse algoritmer kræver typisk også brug af (statiske og dynamiske) hjælpedata, f.eks. en digital højdemodel (DEM) og meteorologiske data.

Satellitterne måler vertikalt integrerede koncentrationer og ikke emissioner. For at estimere emissioner baseret på satellitdata kræver det modellering.

Det er på nuværende tidspunkt ikke klart hvilken algoritme, der vil blive anvendt i bearbejdningen af data fra CO₂M missionen, men flere af disse algoritmer bliver i øjeblikket benyttet til at levere XCO₂ og XCH₄ produkter af Copernicus Climate Change Service, som også ledes af ECMWF.

Den forventede geografiske opløsning og præcision på målinger er vist i Tabel 1.1 for de vigtigste outputs.

Tabel 1.1 Outputs med forventet rumlig opløsning og præcision.

Output	Rumlig opløsning	Præcision
CO ₂	4 km ²	0,7 ppm
CH ₄	4 km ²	10 ppb
NO ₂	4 km ²	1,5 *10 ¹⁵ molekyler pr. cm ²
Vegetation Solar Induced Fluorescence	4 km ²	0,7 mW m ⁻² sr ⁻¹ nm ⁻¹

CO₂M måler i modsætning til Sentinel 5 både CO₂ og CH₄ og i modsætning til eksisterende satellitmissioner, så har CO₂M mulighed for at estimere antropogene CO₂-emissioner og ikke blot totalemissioner. Målingerne af CO₂ og CH₄ vil i CO₂M blive udført med en hidtil uset kombination af dækning, detaljering og præcision, vil kunne dække kloden på få dage. Derudover vil CO₂M være i stand til at se individuelle kilder til CO₂ og CH₄, som f.eks. kraftværker (Copernicus, 2021).

1.2.4 Anvendelsesmuligheder

For at beregne antropogene CO₂-emissioner er der behov for at kombinere CO₂M satellitmålingerne med andre måledata, modeller og eksisterende viden om emissioner. Den atmosfæriske koncentration af CO₂ er meget variabel, hvilket bl.a. skyldes variationer i atmosfærisk transport, samt de naturlige kilder og dræn til CO₂.

1.3 Planer for produkter og tjenester

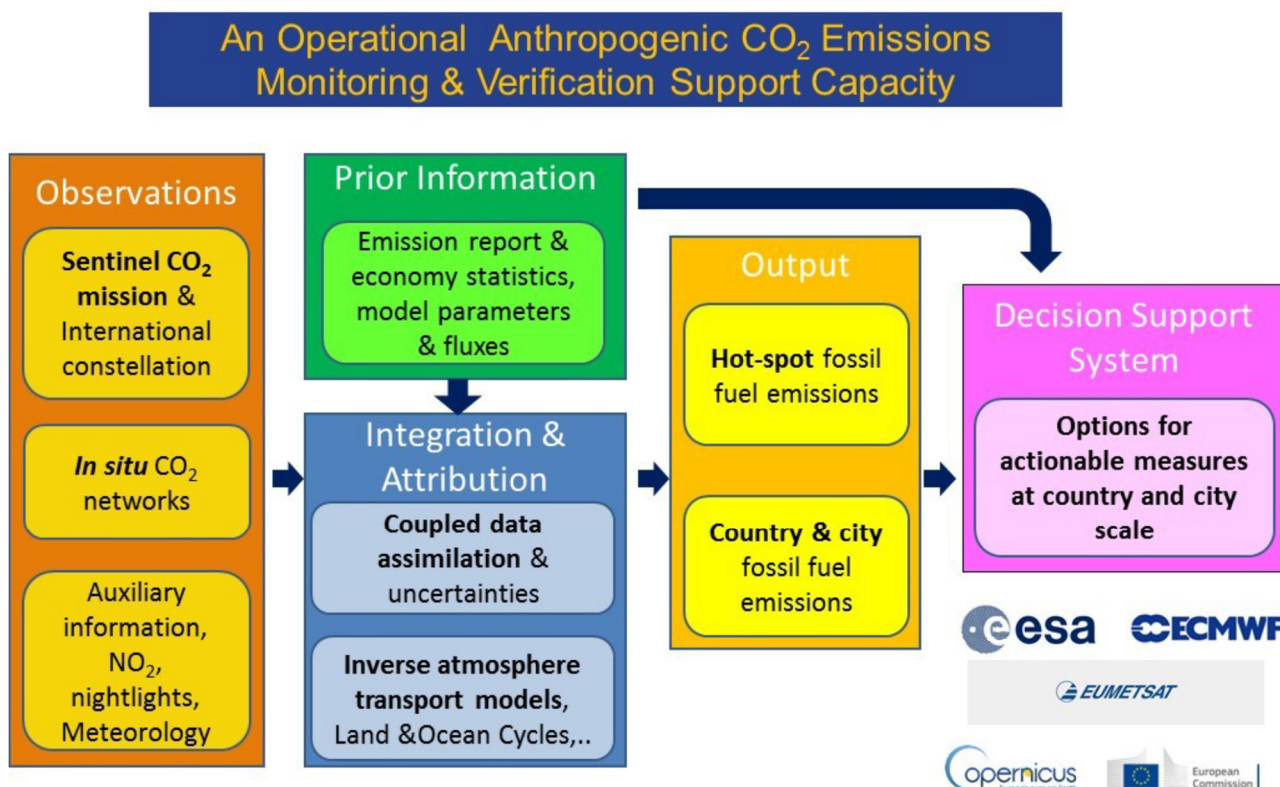
1.3.1 Copernicus Atmosphere Monitoring Service

CAMS har igennem en årrække i samarbejde med et team af førende europæiske videnskabelige og tekniske eksperter udarbejdet detaljerede analyser og strategier for hvilke elementer, der er nødvendige for at opbygge den nævnte Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring & Verification Support (MVS) Capacity (European, C., Joint Research, C., and Ciais, P, 2016; Pinty et al., 2017 and 2019; Janssens-Maenhout et al., 2020). For at opfylde formålene opstillet for denne MVS vil Niveau-2-dataene fra CO₂M-satellitterne blive kombineret med en lang række andre data og modeller for operationelt at lave inversioner af atmosfæren og levere kort over antropogene CO₂-emissioner.

Hverken jord- eller rumbaserede teknikker er i sig selv i stand til at levere den nødvendige information på den ønskede rumlige og tidsmæssige skala. Derfor vil MVS opbygge et system, der er i stand til at integrere en bred vifte af tilgængelige observationer, der er heterogene fordelt i tid og rum. Kernen i systemet er integrationskomponenten, der i vid udstrækning benytter den tilgængelige viden om jordsystemets opførsel (herunder de naturlige kilder og dræn til CO₂) og om de processer, der styrer emissioner fra fossile brændstoffer. Begge forhold indgår i komplekse modeller, for optimalt at kombinere forskellige informationskilder med det formål at generere menneskeskabte emissionsfelter der repræsenterer tidsmæssige og rumlige skalaer efter behov, samt generere et estimat over de tilhørende usikkerheder. Figur 1.1 viser en skitse af, hvilke data MVS vil benytte til beregningerne af antropogene CO₂-emissioner.

Det forventes, at CAMS gennem MVS-aktiviteterne løbende vil levere kort over estimerede globale CO₂-emissioner, herunder angivelse af de antropogene emissioner, både generelt men også med fokus på emissioner fra storbyer samt fra store punktkilder som f.eks. kraftværker. Det er på nuværende tidspunkt uklart præcist i hvilken form og med hvilken rummelig og tidslig opløsning produkterne vil blive leveret. Dog angives det i en videnskabelig artikel (Janssens-Maenhout et al., 2020) at man arbejder henimod at kunne lave globale CO₂-emissionsestimater med en rummelig opløsning i størrelsesordenen 0,05° x 0,05° (ca. 5,5 km x 5,5 km) med regelmæssige opdateringer.

Herudover er det indikeret, at CAMS vil levere beslutningsstøtteværktøjer til at understøtte CO₂-regulering på lokalt og nationalt niveau (figur 1.1). CAMS har kapaciteten til dette, da de allerede leverer beslutningsstøtteværktøjer til regulering af luftkvalitet.



Figur 1.1 Illustration af data-flowet og integrationskomponenten i beregning af CO₂-emissioner fra MVS. (Mejier, Y., 2022).

1.3.2 Andre satellitmissioner

Flere igangværende satellitmissioner udfører målinger, hvormed der kan estimeres CO₂- eller CH₄-indhold i atmosfæren. GOSAT TANSO-FTS fra JAXA-NIES-MOE, Japan, OCO-2 og OCO-3 fra NASA, USA og GHGSat-D-Claire fra GHGSat, Canada måler CO₂, Sentinel 5P fra ESA, Europa og GHGSat C1/C2 – Iris, Hugo fra GHGSat, Canada måler CH₄, mens GaoFen-5 GMI fra CHEOS, Kina og GOSAT-2 TANSO-FTS-2 FRA JAXA-NIES-MOE, Japan måler både CO₂ og CH₄. Disse satellitter forventes at stoppe målinger senest med udgangen af 2023.

Fremtidige satellitmissioner med mulighed for at måle CO₂ eller CH₄ inkluderer Copernicus-satelliten MetOp Sentinel-5 (kun CH₄), Europa, MethaneSAT (kun CH₄) fra EDF, USA, Microcarb (kun CO₂) fra CNES, Frankrig, Feng Yun 3G fra CMA-NMSC, Kina, Carbon Mapper fra Carbon Mapper LLC, USA, GeoCarb fra NASA, USA, GEOSAT-GW fra JAXA-NIES-MOE, Japan og MERLIN fra DLR, Tyskland og CNES, Frankrig.

På grund af forskelle i instrumentering og opsætning af satellitterne, er det ikke alle, der vil kunne måle CO₂ i samme detaljeringsgrad som CO₂M og dermed opfylde målene opsat af MVS. For eksempel vil GHGSat-D-Claire og GHGSat C1/C2 – Iris, Hugo, Sentinel 5P, MethaneSAT og MERLIN ikke kunne måle lokale emissioner og dermed benyttes til at kvantificere emissioner fra kraftværker. ESA estimerer, at det kun vil være OCO-3 og GOSAT-GW, der med sikkerhed vil kunne bruges til at måle emissioner fra byområder, mens resultater fra MicroCarb, Carbon Mapper og GeoCarb måske kan benyttes.

Det er derfor kun CO₂M-satelliten, der med sikkerhed kan opfylde alle MVS' behov for monitoring af antropogene CO₂-emissioner, mens Feng Yun 3G fra CMA-NMSC, Kina, GeoCarb fra NASA, USA og GEOSAT-GW fra JAXA-NIES-MOE, Japan muligvis vil kunne opfylde behovene. CO₂M giver derfor muligheder, som ingen af de eksisterende satellitmissioner kan indfri, og omtales derfor som en 'game-changer' i forhold til at kunne anvende satellitdata til at estimere / verificere emissioner (Copernicus, 2021).

2 Identifikation af relevante aktører og nationale behov

2.1 Nationale emissionsopgørelser

Alle lande har ratificeret FN's rammekonvention om klimaforandringer, og er dermed pålagt at skulle opgøre og rapportere opgørelser af deres drivhusgas-emissioner. Historisk set har kravene været meget forskellige for industrialiserede lande og udviklingslande, men i forbindelse med Parisaftalen blev kravene væsentligt ensrettet, så der i langt højere grad stilles de samme krav til opgørelse og rapportering for alle lande, der har ratificeret Parisaftalen¹.

Under Parisaftalen er alle lande blevet enige om reglerne for opgørelse og rapportering af emissioner af drivhusgasser (UNFCCC, 2018). Retningslinjerne for rapportering specificerer, at landene skal anvende retningslinjer udarbejdet af IPCC (IPCC, 2006) til at estimere og rapportere deres drivhusgas-emissioner. Der er også krav om, at landene identificerer de vigtigste kategorier i emissionsopgørelsen (key category analysis - KCA), samt at der estimeres usikkerheder for de enkelte kilder.

2.1.1 IPCC retningslinjer

IPCC angiver for hver emissionskilde forskellige metodetrin (Tiers), hvor Tier 1 er det mest simple, Tier 2 anvender en højere grad af nationale data og Tier 3 er baseret på detaljerede metoder omfattende målinger og modellering. Som udgangspunkt er anbefalingen, at der skal bruges Tier 2 eller 3 for kilder, der er identificeret som vigtige gennem KCA-processen. For alle lande består den samlede drivhusgasopgørelse af en blanding af alle Tiers, og dette er også tilfældet for den danske drivhusgasemissionsopgørelse.

IPCC (2006) angiver forskellige metoder til verificering af emissionsestimerne.

Usikkerheder

Der er af IPCC angivet to forskellige metoder til estimering af usikkerheder, som er benævnt henholdsvis Approach 1 og Approach 2 (IPCC, 2006). Approach 1 er den mest simple og anvender fejlophobningsmetoden, mens Approach 2 anvender Monte Carlo simulering. Begge metoder afhænger af, hvor godt usikkerheden er kendt på de variable, der indgår i emissionsberegningen.

Generelt er usikkerhederne for opgørelsen af CO₂-emissioner væsentligt lavere end for CH₄ og N₂O. Dette er dog kun for CO₂ relateret til forbrænding og kalcinering, da CO₂ fra arealanvendelse (Land Use, Land-Use Change and Forestry - LULUCF) er behæftet med betydelige usikkerheder. For CH₄ er de største usikkerheder relateret til emissioner fra lossepladser og gødningshåndtering. For N₂O er de største usikkerheder forbundet med emissioner fra handels- og husdyrgødning udbragt på jorde.

¹ 194 ud af 198 lande har ratificeret Parisaftalen pr. 26/10-2022. Undtagelserne er Eritrea, Iran, Libyen og Yemen.

Verifikationsmetoder

IPCC (2006) beskriver forskellige metoder til at verificere nationale emissionsopgørelser. Metoderne er opdelt i to kategorier; dels sammenligning af emissionsopgørelserne med andre uafhængige statistiske opgørelser af emissionerne eller sammenligning af estimater på forskelligt metodetrin, og dels sammenligning af de nationale emissionsopgørelser med atmosfæriske målinger. I forbindelse med denne kortlægning er fokus naturligt på IPCC's anbefalinger angående sammenligning med atmosfæriske observationer.

Styrken ved verifikation gennem atmosfæriske observationer er, at metoden er fuldstændig uafhængig af de metoder, der anvendes til nationale emissionsopgørelser. IPCC fremhæver dog også, at der kræves specialiseret modelleringskapacitet for at kunne udføre en verifikation, og at dette vil være ressourcekrævende. IPCC understreger også, at for at kunne fungere som verifikation, så skal usikkerhederne i de anvendte modeller være sammenlignelige eller mindre end usikkerhederne på de metoder, der anvendes til at beregne emissionerne i den nationale emissionsopgørelse.

IPCC fremhæver den store videnskabelige udvikling på området og fremhæver især potentialet for verifikation af emissioner af CH₄ og f-gasser. For CO₂ angiver IPCC, at det formentlig ikke er en prioritet, da usikkerheden i emissionsopgørelserne er meget lave for de vigtigste kilder. IPCC fremhæver dog også, at dette kan være anderledes i de tilfælde, hvor CO₂ fra arealanvendelse er dominerende. For N₂O angiver IPCC, at det ville være ønskværdigt at kunne anvende atmosfæriske observationer til verifikation, pga. den store usikkerhed forbundet med emissionsberegning for de vigtigste kilder. Samtidig vurderer IPCC, at det ikke er muligt at anvende atmosfæriske observationer til at verificere N₂O-emissioner pga. indflydelsen af naturlige kilder og den lange levetid i atmosfæren, hvilket betyder, at forholdet mellem det egentlige signal og støj i de atmosfæriske observationer bliver for lavt til at kunne anvendes.

2.1.2 Den danske emissionsopgørelse

Den danske emissionsopgørelse udarbejdes i henhold til internationalt vedtagne retningslinjer. Metoderne, der anvendes i emissionsopgørelsen skal være i overensstemmelse med IPCC. Forklaret meget forsimplet, så beregnes emissionerne som produktet af aktivitetsdata og emissionsfaktorer. I praksis er der dog i mange tilfælde tale om langt mere detaljerede beregningsmetoder. Som eksempel på en simpel metode kan angives N₂O-emissioner fra handelsgødning, hvor der anvendes mængden af kvælstof i handelsgødning, som ganges med en fast emissionsfaktor på 1 %, som er en IPCC standardemissionsfaktor. Et eksempel på en mere detaljeret beregning er CH₄-emissioner fra affaldsdeponier, hvor emissionen afhænger af mængden og typen af affald deponeret siden 1940, værdier for mængden af organisk nedbrydeligt affald i hver affaldstype samt halveringstiden af de enkelte affaldstyper og en række andre parametre. De anvendte metoder og data dokumenteres årligt i en dokumentationsrapport til UNFCCC (Nielsen et al., 2022). I forbindelse med mange emissionskilder anvendes der en blanding af nationale data og internationale standardværdier publiceret af IPCC. Især for emissioner fra biologiske processer er der stor variabilitet og deraf følgende større usikkerhed på emissionsestimatet.

Et andet eksempel er CO₂-emissioner fra dyrkning af organiske jorde (lavbundsjorde). Den nuværende beregningsmetode er meget simpel, idet arealet

med organiske jorde ganges med en emissionsfaktor for hhv. jorde med over 12 % kulstof og jorde med mellem 6 og 12 % kulstof. Der tages f.eks. ikke højde for vandstanden på arealerne. Der pågår pt. forskningsprojekter med henblik på at forbedre metoden. Et notat (Gyldenkerne, 2019) viste, at usikkerhederne på emissionsfaktorerne kunne være over 35 %, hvilket er betydeligt i sig selv, men for en så stor kilde som organiske jorde, er det meget væsentligt. Samlet set er dyrkning af organiske jorde en af de største kilder til den samlede usikkerhed for den nationale emissionsopgørelse.

I den danske emissionsopgørelse er de største usikkerheder forbundet med N₂O-emissionen fra handels- og husdyrgødning samt afgrøderester, CH₄-emissionen fra affaldsdeponier og CO₂-emissionen fra dyrkede organiske jorde. Den største del af CO₂-emissionen, der kommer fra forbrænding af fossile brændstoffer, er forbundet med en relativ lav usikkerhed (Nielsen et al., 2022). På europæisk plan er det også landbrug, LULUCF og affaldssektorerne, der er forbundet med de største usikkerheder (EEA, 2022).

Det vil generelt være de kategorier med størst usikkerhed, hvor der er behov for verificering af emissionsestimaterne og derigennem mulighed for identifikation af forbedringer. Det vil derfor hovedsageligt være CO₂ fra arealanvendelsessektoren (LULUCF) samt emissioner fra landbrugs- og affaldssektoren, hvor der kan forventes de største gevinster ved en uafhængig verificering, såfremt denne har en lavere usikkerhed end de beregnede estimater i emissionsopgørelsen.

I forbindelse med verificering af emissionsopgørelse med anvendelse af satellitdata, så er det kun muligt for CO₂ og CH₄, da N₂O ikke kan måles ved satellitmålinger. Under danske forhold vil det derfor være mest relevant at anvende satellitbaserede data til verificering af CO₂ fra LULUCF samt CH₄ fra landbrug og affaldsdeponier.

De mest usikre kilder er som nævnt typisk dem med stor variabilitet, og det er dermed også omkostningsfuldt at udarbejde nationale emissionsfaktorer, da det kræver et stort antal målinger for at kunne nå frem til en repræsentativ emissionsfaktor for Danmark. I den forbindelse ville satellitdata og modellering kunne bruges til at identificere de kilder med størst diskrepans og dermed kunne anvendes til bedre at målrette arbejdet med nationale emissionsfaktorer.

På globalt plan er det dog ikke alle lande, der har et veludviklet statistisk system som Danmark. Det er derfor muligt, at der for andre lande vil være en gevinst i forhold til identifikation af CO₂-hotspots samt verificering af de estimerede emissioner. I den forbindelse kunne det være oplagt at anvende data for Danmark til at kalibrere de modeller, der kan beregne emissioner baseret på satellitobservationer.

De nationale emissionsopgørelser udarbejdes og rapporteres af DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ved Aarhus Universitet (AU) på opdrag af Miljøministeriet og Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet. Arbejdet er omfattet af rammeaftalen mellem AU og Miljøministeriet. Samlet til emissionsopgørelsen var der i 2022 afsat 9,44 mio. kr. fordelt på 8,34 mio. til rådgivning og overvågning og 1,1 mio. til forskning (DCE, 2022). Dette dækker alle sektorer og emissionsopgørelser for både drivhusgasser og luftforurening.

2.1.3 Erfaringer med verifikation af nationale emissionsopgørelser

Der er ikke nogen lande, der på nuværende tidspunkt har anvendt satellitdata til at verificere deres nationale emissionsopgørelse. Der er dog eksempler på, at der er anvendt invers modellering baseret på landbaserede observationer. Det bedste eksempel på dette er Storbritannien, som igennem mange år har anvendt invers modellering som verifikationsmetode. Der anvendes målinger fra en række stationer især i Storbritannien og Irland, men også fra det europæiske kontinent, f.eks. Schweiz, Italien og Tyskland. Der måles samtlige drivhusgasser, dvs. CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆ og NF₃. For flere oplysninger henvises til Annex 6 i Storbritanniens dokumentationsrapport til UNFCCC (Brown et al., 2022).

Et Horizon 2020 projekt, VERIFY², har fokuseret på at udvikle et system til at støtte nationale emissionsopgørelser. Projektet fokuserede på CO₂, CH₄ og N₂O og anvendte både landbaserede og satellitbaserede observationer. Som en del af VERIFY projektet er det beskrevet, hvordan resultaterne kan linkes til CO₂M (Engelen, 2021).

2.2 Forskningsmæssige interesser og kompetencer

I forbindelse med denne kortlægning har der været kontakt til forskere ved Aarhus Universitet, Københavns Universitet og Danmarks Tekniske Universitet samt til Danmark Meteorologiske Institut (DMI). Dette kapitel præsenterer en syntese af de input og synspunkter, der er givet i forbindelse med interviews og skriftligt input.

De væsentligste konklusioner, der kan udledes er:

- Stort potentiale i at anvende satellitdata og invers modellering til verifikation af nationale emissionsopgørelser
- Vigtigt med overordnet koordinering for optimal udnyttelse af ressourcer
- Vigtigt at det drives af faste midler, da ad-hoc projektf finansiering ikke vil være et solidt grundlag. Forskningsprojekter kan dog spille en vigtig rolle i forbindelse med udvikling og løbende forbedringer
- Vigtigt at have et netværk af landbaserede målinger til at kunne understøtte/validere satellitbaserede emissionsestimater – der mangler atmosfæremålestationer i Danmark
- Vigtigt at fokusere på områder, hvor Danmark har særlige interesser og/eller kompetencer
- Nødvendigt med opbygning af kompetencer især i forbindelse med invers modellering

2.2.1 Eksisterende erfaringer med anvendelse af satellitdata

Mange danske forskningsinstitutioner anvender i dag satellitdata til forskellige forskningsformål. De fleste anvender data i forbindelse med identifikation af arealanvendelse samt f.eks. udbredelse af havis i det arktiske. Der er således stor erfaring med anvendelse af satellitdata, men der er på nuværende tidspunkt meget lille erfaring med at anvende satellitdata i forbindelse med drivhusgasemissioner. Der har de seneste år været arbejdet med brug af machine learning i fortolkning af satellitdata som synes meget perspektivrigt.

² <https://verify.lsce.ipsl.fr/>

Villumfonden har i 2021 finansieret et mindre forskningsprojekt ("A new approach for monitoring methane emissions from space"), som bl.a. vil se på at udvikle en atmosfæremodel, der kan modellere CH₄-observationerne.

2.2.2 Eksisterende kompetencer og infrastruktur i forbindelse med behandling, analyse og anvendelse af satellitdata

Der er således mange kompetencer i forbindelse med bearbejdning og analyse af satellitdata. DMI har i særdeleshed meget stor erfaring, når det kommer til nedhentning, bearbejdning og analyse af satellitdata.

Det er oplagt, at udnytte denne kompetence fremadrettet i forbindelse med anvendelse af data for drivhusgasemissioner. Det er muligt, at det vil kræve arbejde at tage højde for specielle danske forhold i forbindelse med bearbejdning af satellitdata. F.eks. er der ofte skydække i Danmark og stort indhold af vanddamp, som kan nødvendiggøre, at der skal udvikles forbedrede retrieval-funktioner (metoder til at analysere satellitobservationer), hvilket vil kræve en betydelig indsats.

2.2.3 Kendskab til CO₂M og muligheder for anvendelse af data herfra

Der er generelt et begrænset kendskab til CO₂M for de fleste forskningsmiljøer. Der er en forventning om, at data fra CO₂M vil være af højere kvalitet end de nuværende satellitmissioner, og der dermed er en større sandsynlighed for, at data vil kunne anvendes gennem invers modellering til at verificere emissioner beregnet ved hjælp af statistiske metoder.

Det betragtes som oplagt at forsøge at anvende data fra CO₂M i sammenhæng med landbaserede målinger af drivhusgasudveksling for at kunne skalere emissionsopgørelser fra f.eks. bedriftsniveau til regionalt niveau. Det vil være værdifuldt at forsøge at udbygge forskningen omkring satellitbaserede målinger (også spektrale) og emissionsberegninger/flux-målinger på jordoverfladen for på sigt at kunne bidrage til mere præcise data, som kan anvendes til at forbedre de nationale emissionsopgørelser.

Det blev også fremhævet, at det ikke er let at omsætte kolonnekoncentrationsmålinger fra satellitter (som CO₂M) til emissioner ved jordoverfladen, særligt ikke når det drejer sig om relativt lave emissioner (fra et stort areal). Det er klart lettere med store udledninger fra punktkilder, men dette er ikke så relevant for danske forhold. En integration mellem højopløselige spektrale satellitdata og atmosfæriske kolonnekoncentrationer, som f.eks. CO₂M, kunne være lovende, særligt hvis resultaterne kan verificeres gennem emissionsmålinger på overfladen.

2.2.4 Anvendelse af satellitdata i fremtiden målrettet emissioner af drivhusgasser

Som nævnt i afsnit 2.2.1, så er der ikke på nuværende tidspunkt erfaringer i Danmark med at analysere satellitdata for drivhusgasemissioner og ligeledes er der ikke noget forskningsmiljø, der har beskæftiget sig med invers modellering til at omregne satellitobservationerne til emissioner, som kan anvendes til verificering af emissionsestimater. Aarhus Universitet har erfaring med modellering af luftforurening (herunder data assimilering) og atmosfærisk CO₂, men ikke ved brug af inverse metoder. Det er derfor nødvendigt, at der

opbygges kompetencer inden for dette område, såfremt Danmark skal udnytte de muligheder, som data fra CO₂M giver.

Der er på baggrund af samtaler identificeret en række mulige anvendelser, hvor Danmark vil have særlige interesser, der ikke på nuværende tidspunkt er tilstrækkeligt internationalt fokus på. Disse er kort beskrevet separat nedenfor. Generelt er emissionerne af CO₂ fra store punktkilde velkendt, og emissionerne er forbundet med en meget lav usikkerhed typisk i størrelsesordenen 1-5 %. Dette skyldes de meget detaljerede data, der ligger til grund for emissionsestimerne baseret på rapporteringer under EU's kvotehandelssystem (EU ETS). Det er derfor ikke vurderingen, at identifikation af CO₂-hotspots vil være specielt anvendeligt i Danmark.

CH₄ fra landbrug

Landbrugssektoren bliver af flere fremhævet som et oplagt og interessant mål for Danmark på grund af landbrugssektorens store og stigende betydning for den samlede danske drivhusgasemission. Da der er væsentlige usikkerheder forbundet med emissionsopgørelsen for landbrugssektoren ville en uafhængig verifikation være yderst relevant.

Drivhusgasmålinger ved jordoverfladen, som dem der er tilgængelige i ICOS-regi, vil kun kunne foretages på få lokaliteter, og det er oplagt, at der inden for landbruget er behov for opgørelser på bedriftsniveau eller sågar på markniveau på årlig basis. En mere præcis anvendelse af satellitdata til opskalering af fluxmålinger på overfladen og i det hele taget til kortlægning af dyrkningsmønstres effekt på emissioner af alle relevante drivhusgasser vil derfor være værdifuldt.

CH₄ fra mindre punktkilder

Der er hovedsageligt blevet nævnt biogasanlæg som en relevant kilde, hvor anvendelse af satellitdata kan bruges til at verificere det nuværende emissionsniveau samt til at følge udviklingen i emissioner over tid. Det vil også være muligt hurtigt at identificere pludseligt opståede lækager.

CO₂ fra arealanvendelse

CO₂ fra arealanvendelse er interessant, da usikkerhederne i de nationale emissionsopgørelser generelt er høje. Der er tale om meget diffuse emissioner og betydningen af denne kilde er stigende i vigtighed efterhånden som emissionerne fra forbrænding af fossile brændstoffer falder.

Emissioner fra transport og lagring af CO₂

I forbindelse med målsætningen om CO₂-neutralitet vil det med stor sandsynlighed være nødvendigt at benytte CCS (Carbon Capture and Storage). Der er på nuværende tidspunkt begrænset metodemæssige retningslinjer fra IPCC (Nielsen, 2022), men det fremgår klart, at emissioner forbundet med fangsten, transport og lagring af CO₂ skal overvåges, dokumenteres og inkluderes i nationale emissionsopgørelser.

Anvendelse af satellitdata er i den forbindelse identificeret som en relevant mulighed at undersøge i forbindelse med retningslinjer for overvågning og dokumentation af eventuelle emissioner i forbindelse med fangst- og lagringsprocessen.

Vigtigheden af landbaserede målinger

I forbindelse med anvendelse af satellitdata til bestemmelse af drivhusgas-emissioner vil der være brug for landbaserede målinger til at validere modelberegningerne. Danmark er på nuværende tidspunkt medlem af ICOS (Integrated Carbon Observation System) sammen med 13 andre europæiske lande. ICOS i Danmark består af 10 målestationer, hvoraf de ni er målestationer i forbindelse med økosystemer (f.eks. skov eller landbrug), mens den sidste er en atmosfærestation i Grønland.

Hvis satellitdata fra CO₂M skal kunne anvendes til fulde i Danmark, så bør de landbaserede målinger styrkes herunder med en eller to atmosfæriske målestationer i Danmark. Et samarbejde med nabolande kan også undersøges i forhold til en optimal udnyttelse af ressourcerne. Ved at gøre det indenfor ICOS sikres den nødvendige præcision af målingerne.

Vigtigheden af et velfungerende netværk af målestationer er påpeget i en rapport fra EU Kommissionen (Pinty et al., 2019). Heri understreges det, at en af de største udfordringer i at kunne udnytte satellitdata til fulde er mangler i det nuværende in situ netværk. Det påpeges blandt andet, at der ikke er en stabil finansiering af de nuværende målenetværk som f.eks. ICOS, og at dette udgør en stor risiko for anvendelsen af satellitdata. Det angives også, at der er brug for flere målestationer ud over de nuværende i Europa, herunder målestationer ved byer og med kulstof-14 analyser.

2.2.5 Danmarks rolle i det internationale samarbejde

Der er på europæisk og globalt plan mange igangværende og planlagte satellitmissioner, se kapitel 1.3. Det er derfor i høj grad vigtigt at sikre, at der ikke igangsættes arbejde i Danmark, som allerede varetages af veletablerede forskningsmiljøer i udlandet.

Der ses et stort behov for, at Danmark indgår aktivt i det internationale samarbejde og især EU-samarbejde omkring forskning og overvågning, f.eks. i regi af ICOS. Der er derudover et stort behov for, at Danmark styrker de nationale kompetencer inden for modellering af drivhusgasemissioner, da disse kompetencer vil være nødvendige for at kunne anvende data fra CO₂M.

De emissionskilder, der især er interessante fra et dansk synspunkt er meget diffuse kilder eller små punktkilder med lave emissioner set med internationale øjne. Anvendeligheden af satellitdata vil derfor i høj grad afhænge af den geografiske opløsning samt af muligheden for at måle koncentrationer med så høj en præcision, at beregningen af emissionen på baggrund af satellitdata har så lav en usikkerhed, at det meningsfuldt kan danne grundlag for en verificering.

Sandsynligheden for at kunne anvende satellitdata direkte til at estimere emissioner fra landbrug på bedriftsniveau vurderes ikke til at være stor, da usikkerhederne vil være for store. Et potentiale vil være at verificere nationale emissioner og derigennem kunne identificere mulige systematiske over- eller underestimeringer i den nationale emissionsopgørelse, hvorefter et målrettet måleprogram kan igangsættes med henblik på at forbedre nationale emissionsfaktorer. Et andet potentiale er at anvende satellitdata til at overvåge udviklingen over tid. Dette vil f.eks. kunne dokumentere, at et givent emissionsreducerende tiltag er blevet implementeret og har en effekt.

2.2.6 Muligheder for kommercielle anvendelser af satellitdata

Der er på nuværende tidspunkt nogle firmaer, der sælger services baseret på analyse af satellitdata. Disse er dog præget af mangel på transparens i forhold til metode og usikkerheder, og giver derfor ikke noget godt grundlag at træffe beslutninger på. Der vil på sigt være mange kommercielle muligheder, hvis der udvikles værktøjer, hvor metoderne er videnskabeligt dokumenterede og transparente og hvor usikkerhederne er tilstrækkeligt lave til at kunne anvendes.

Af mulige kommercielle anvendelser er især en eventuel fremtidig regulering på CH₄-området blevet fremhævet. Dette vil dog kræve en meget høj opløsning af satellitdata, samt at der kan måles meget små koncentrationer. F.eks. indeholder EU-Kommissionens forslag til forordning om reduktion af metanemissioner i energisektoren et krav om at lækager på over 500 ppm skal detekteres og udbedres fra olie og gasanlæg (EU, 2021).

2.3 Overvågnings- og verifikationsbehov

I forbindelse med denne kortlægning har der været kontakt til en række myndigheder, hvoraf følgende har givet deres input enten skriftligt eller i forbindelse med interviews: Energistyrelsen, Landbrugsstyrelsen, Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur, Klimarådet, Uddannelses- og Forskningsstyrelsen og DMI. Dette kapitel præsenterer en syntese af de input og synspunkter, der er givet i forbindelse med møder og skriftligt input.

De væsentligste konklusioner, der kan udledes er:

- Yderst relevant med verifikation af de nationale emissionsopgørelser
 - Fokus på kilder med høj usikkerhed i de nuværende beregningsmetoder
 - Vigtigt, at usikkerheden på det fremkomne estimat er mindre end eller lig med usikkerheden på det eksisterende estimat
- Værdifuldt, hvis data kan anvendes på virksomhedsniveau
 - Skepsis omkring hvorvidt datakvaliteten vil være tilstrækkelig til, at det kan bruges til reguleringsformål
- Interessante muligheder for at anvende satellitdata til overvågning af lækage fra CO₂-lagre

Som en naturlig følge af det faktum, at der ikke tidligere har været nogle erfaringer med at anvende satellitdata til at kvantificere drivhusgasemissioner, så er der en del usikkerhed omkring, hvad satellitdata kan anvendes til.

Anvendeligheden af satellitdata afhænger meget af tre forhold; den geografiske opløsning, hvor små emissioner/fluxe, der kan måles samt usikkerhederne på den inverse modellering. Derudover er der nævnt to overordnede mulige anvendelser; dels anvendelse til verifikation af den nationale emissionsopgørelse og dels til beregning/verifikation på virksomhedsniveau. De to mulige anvendelser er beskrevet separat herunder.

2.3.1 Verifikation af nationale emissionsopgørelser

Fra flere sider blev det fremhævet, at det vil være værdifuldt med et uafhængigt estimat til at verificere de nationale emissionsestimater. De sektorer, der blev nævnt som mest relevante i forhold til en uafhængig verifikation er

CH₄-emissioner fra landbrugssektoren og biogasanlæg samt CO₂-emissioner/-optag fra arealanvendelsessektoren. Baseret på forfatterens kendskab til usikkerhederne i den nationale emissionsopgørelse, så er dette meget relevante kilder med generelt store usikkerheder. Der bør dog også nævnes CH₄-emissioner fra affaldsdeponier, hvor der også er meget store usikkerheder (Nielsen et al., 2022).

I flere omgange blev det bragt op, at der ville være et stort behov for verifikation af N₂O-emissioner, da usikkerhederne på emissionsestimaterne er høje. Det er dog ikke muligt at anvende satellitbaserede observationer til at verificere N₂O-emissioner, se kapitel 2.1.1. Ved anvendelse af landbaserede målinger og invers modellering vil det dog være muligt at verificere niveau og trend. Dette er blandt andet en del af den verifikation, som Storbritannien udfører som en del af deres nationale emissionsopgørelser.

En verificering på nationalt plan vil dels kunne bidrage til viden om afvigelser i det absolutte emissionsniveau og dels i forhold til emissionstrenden. Eventuelle betydelige afvigelser vil skulle undersøges nærmere og vil formentlig kræve, at der på den baggrund foretages målinger for at forbedre eksisterende standardemissionsfaktorer. Dermed vil en verificering med satellitbaserede data kunne bidrage med væsentlig input til en prioritering af mulige forbedringer, hvor der er den største diskrepans mellem de estimerede emissioner i den nationale emissionsopgørelse og de estimerede emissioner på baggrund af satellitdata og invers modellering.

2.3.2 Verifikation på virksomhedsniveau

Mulighederne for verifikation eller decideret beregning af emissioner på virksomhedsniveau eller bedriftsniveau blev nævnt af flere, men der er stor usikkerhed om hvorvidt, satellitdata vil have tilstrækkelig geografisk opløsning og præcision til at det kan anvendes, f.eks. som led i en målrettet regulering.

Der var forskellige meninger om hvorvidt, det vil være muligt at opnå et så pålideligt resultat, at det kan anvendes på virksomhedsniveau. Det blev dog nævnt, at der formentlig var større muligheder for at resultaterne kunne anvendes til at dokumentere ændringer, f.eks. i forbindelse med indførelse af specifikke virkemidler. Her kunne satellitdata kombineret med invers modellering anvendes til at dokumentere, at der faktisk har fundet en emissionsreduktion sted og bidrage med en verificering af effekten.

Der blev især blevet fremhævet fire områder; CH₄-emissioner fra landbrug, CH₄-emissioner fra biogasanlæg, CO₂-emissioner fra arealanvendelse samt CO₂-emissioner fra fangst og lagring af CO₂ (CCS – Carbon Capture and Storage). Angående emissioner fra biogasanlæg blev det især fremhævet, om der var potentiale til løbende at kunne følge udviklingen, da der ikke på nuværende tidspunkt er krav om, at anlæggene løbende skal måle og dokumentere deres lækagerater.

I forbindelse med eventuelt at opnå klimaneutralitet, så er det sandsynligt, at der vil være behov for at anvende CCS. Der er på nuværende tidspunkt ikke meget detaljerede retningslinjer fra IPCC (2006) til, hvordan overvågningen af CCS skal foregå. Der er beskrevet en række forskellige mulige metoder til overvågningen og her er satellitdata beskrevet som en mulighed. Anvendelsen af satellitdata til at overvåge lækager fra geologisk lagring af CO₂ beskrives som værende på forskningsstadiet, men dette er baseret på situationen i

starten af årtusindet, og det er derfor muligt at anvendelse af satellitdata kunne spille en rolle i forbindelse med udarbejdelse af overvågningsplaner, hvis der etableres CO₂-fangst og eller CO₂-lagring i Danmark.

2.4 Muligheder for danske virksomheder, vidensinstitutioner og andre aktører til at udvikle kommercielle løsninger

I forbindelse med denne kortlægning har der været kontakt til følgende organisationer: SEGES, Dansk Gasteknisk Center, Force Technology, Dansk Industri og Teknologisk Institut. Dette kapitel præsenterer en syntese af de input og synspunkter, der er givet i forbindelse med interviews og skriftligt input.

Der er ikke ved de gennemførte samtaler blevet beskrevet detaljerede muligheder for kommerciel udnyttelse af satellitdata for drivhusgasemissioner. Der er i dag flere mindre virksomheder, der tilbyder løsninger, men de er plaget af lav gennemsigthed i de anvendte metoder samt store usikkerheder på resultatet. Dette blev også fremhævet af flere forskere, se kapitel 2.2.6.

De vigtigste pointer, der er fremkommet er, at der skal være transparens i de anvendte metoder, og at metoderne skal være videnskabeligt funderet. Det er samtidig understreget, at det er meget vigtigt, at usikkerhederne kan og bliver estimeret, og at resultaterne kan leveres med en så lav usikkerhed, at de kan anvendes f.eks. i forbindelse med at dokumentere en virksomheds emissioner.

I betragtning af betydningen af CO₂M og den vægt som EU-Kommissionen lægger på anvendelse af satellitdata, så er der givet udtryk for, at det er vigtigt for Danmark at være en aktiv deltager både i forbindelse med anvendelse af satellitdata, men også i forhold til udvikling og instrumentering af satellitter, hvor flere danske virksomheder har kompetencer.

Der er derudover blevet noteret, at satellitdata også kan anvendes til at forbedre oplysninger om biomasse i form af plantedække og afgrødetyper samt oplysninger om jordens vådhed, hvilket er oplysninger, der kan være relevante i forbindelse med opgørelse af drivhusgasemissioner, og vil være af værdi for landmænd.

3 Scenarier for fremtidige danske investeringer

Der er på nuværende tidspunkt ikke noget formelt krav om, at der skal foretages uafhængig verifikation af nationale emissionsopgørelser, men det er en opfordring i forbindelse med rapporteringer til UNFCCC og er betragtet som god skik af IPCC (2006). Det står dog klart i forbindelse med denne kortlægning, at der er stor forskningsmæssig interesse for, at Danmark skal indgå aktivt i arbejdet med at udnytte satellitdata. Samtidig bliver der fra en række myndigheder udtrykt interesse for potentialet i at udnytte satellitdata til at verificere nationale emissionsopgørelser, kontrollere effekten af specifikke virkemidler samt verificere trenden i emissionerne.

Der er betydelig erfaring med at behandle satellitdata dog ikke med fokus på drivhusgaskoncentrationer og der er stort set ingen kompetencer inden for invers modellering for at omsætte de observerede kolonnekoncentrationer til emissioner ved jordoverfladen.

I forbindelse med den workshop, der blev organiseret af DMI i marts 2022 var det en anbefaling, at Danmark etablerede et netværk og opbyggede kompetencer med henblik på at kunne udnytte CO₂M (DMI, 2022) og fra internationale deltagere blev det understreget, at Danmark kan spille en vigtig rolle, hvis der satses på området.

Danmark har allerede en stærk position inden for rumbaseret grøn forskning (UFS, 2022), men som nævnt i kapitel 2.2, så har det hidtil været med fokus på andre områder end drivhusgasemissioner. Danmark vil derfor kunne udbygge positionen på et område, som det forventes vil være af stigende interesse internationalt både politisk og videnskabeligt.

3.1 Internationalt samarbejde

Anvendelse af satellitdata til overvågning af drivhusgasemissioner er åbenlyst et område, hvor det er vigtigt med internationalt samarbejde. Samtidig er der også specifikke nationale interesser og omstændigheder, der betyder, at det kan være væsentligt at arbejde med det på nationalt plan.

Der er en række internationale forskningsmiljøer, der arbejder med satellitdata for drivhusgasser og invers modellering. Danmark er dog ikke på nuværende tidspunkt en aktiv deltager i nogle af disse samarbejder, da der ikke er danske forskningsmiljøer, der har haft fokus på dette område.

Der har internationalt været stort fokus på anvendelse af satellitdata i forhold til CO₂-emissioner fra store punktkilder, men dette vurderes ikke relevant for danske forhold. Det vil derfor være oplagt at Danmarks rolle i et internationalt samarbejde i højere grad fokuseres på CH₄- og CO₂-emissioner fra arealanvendelse.

For at kunne udnytte satellitdata med en lav usikkerhed på det resulterende estimat, så er det nødvendigt med landbaserede målinger. Et studie fandt, at de estimerede emissioner for de britiske øer var 23-28 % højere, når der blev anvendt måledata fra flere stationer sammenlignet med et basisudgangspunkt og at usikkerhederne blev markant reduceret (Bergamaschi et al., 2022).

Figur 3.1 viser placeringer af atmosfære målestationer i Europa. Det ses, at der på nuværende tidspunkt ikke er nogen målestationer i Danmark. Ud over en hensigtsmæssig geografisk spredning af målestationer kan der være separate hensyn, som f.eks. at sikre, at der er målestationer i nærheden af større byområder.



Figur 3.1 Kort over atmosfæriske målestationer. Røde punkter (til venstre) indikerer ICOS målestationer med kontinuerte målinger af CO₂, CH₄ og N₂O, blå punkter (i midten) indikerer målestationer i nationale- eller forskningsnetværk, lilla punkter (til højre) indikerer ICOS stationer med målinger til bestemmelse af kulstof-14 i CO₂ (Pinty et al., 2019).

Et vigtigt element vil være dansk deltagelse i de forskellige internationale samarbejdsfora, herunder samarbejder med modellører og emissionsopgørelseseksperter. Der har været forskellige aktiviteter på dette område, f.eks. i regi af det europæiske miljøagentur, som i 2021 gennemførte en undersøgelse om udbredelsen af invers modellering som et værktøj til verifikation af nationale emissionsopgørelser (German et al., 2021). Af de medlemsstater, der deltog i undersøgelsen indikerede ingen, at der blev anvendt invers modellering og flertallet oplyste, at der ikke var nogen aktiviteter overhovedet indenfor invers modellering i deres land. Det vil være en væsentlig styrkelse, hvis Danmark på sigt kunne deltage med eksperter i invers modellering og ikke kun med eksperter i emissionsopgørelser.

Som nævnt i kapitel 1.3.1, så er der i regi af CAMS en række planer om at anvende CO₂M data blandt andet i form af globale CO₂-estimer samt beslutningsstøttewærktøjer. Som tidligere diskuteret så er det internationale fokus mest på CO₂ fra store punktkilder og byer, hvilket vurderes at være af mindre interesse for Danmark. De områder, der er blevet udpeget af mange aktører som de mest vigtige for Danmark, se kapitel 2.2 og 2.3 er derfor ikke førsteprioritet for de planlagte CAMS-aktiviteter. En eventuel dansk satsning vil dog skulle koordineres tæt med de aktiviteter, der planlægges i CAMS og det må forventes, at der kan opnås væsentlige og gensidige gevinster i forbindelse med løbende vidensudveksling og muligvis fælles modeludvikling.

Der er initiativer i gang i flere lande med henblik på at udnytte data fra CO₂M, f.eks. i Norge og Tyskland. I Norge er et roadmap under udvikling som forventes at være klar i foråret 2023. Nogle forhold vil være sammenlignelige i forhold til Danmark, f.eks. i forbindelse med mørke vintre og skydække, men Norge har væsentligt andre topografiske forhold og der er også forskel mellem de signifikante sektorer; f.eks. er landbrugssektoren meget lille i Norge.

I Tyskland har man besluttet at implementere et nationalt integreret drivhusgas overvågningssystem (Integriertes Treibhausgas-Monitoringsystem - ITMS). Formålet med dette program er at overvåge de tre vigtigste drivhus-

gasser (CO₂, CH₄ og N₂O) med henblik på at give input til de nationale emissionsopgørelser gennem identifikation af over- eller underestimeringer af kilder. Projektet ledes i forening af det tyske meteorologiske institut (DWD), den tyske miljøstyrelse (UBA) og Thünen-instituttet (DWD, 2022). ITMS samler kompetencer fra både myndigheder og forskningsinstitutioner og består af forskellige moduler, herunder et observationsmodul ledet af universiteterne i Bremen og Heidelberg og et modelleringsmodul ledet af DWD og Max Planck-instituttet i Jena. Resultaterne vil tilgå UBA, som er ansvarlig for de nationale emissionsopgørelser. Vigtige aspekter af ITMS er den høje rumlige og tidslige opløsning som vil komplementere CAMS, der mest har fokus på det europæiske og globale niveau (Mielke, 2022).

3.2 Udviklingsscenarier

Baseret på denne kortlægning står det klart, at der for at opnå det optimale udbytte af data fra CO₂M skal foretages en markant satsning i forhold til at opbygge kompetencer og forbedre den eksisterende infrastruktur. Dette omfatter specifikke kompetencer til at analysere og behandle drivhusgasdata fra satellitter, kompetencer inden for invers modellering for at kunne omsætte satellitmålingerne til emissionsestimerer samt yderligere infrastruktur i form af landbaserede atmosfæriske målestationer.

Det er klart, at dette vil kræve betydelige investeringer, og at dette kun vil kunne finde sted ved en samlet dansk satsning på området. Som påpeget i Pinty et al. (2019), så er et af de væsentligste nuværende problemer, at der i for høj udstrækning er tale om ad-hoc finansiering f.eks. gennem forskningsprojekter af kortere eller længere varighed. Dermed er det også klart, at opgaven ikke vil kunne løses gennem enkeltstående forskningsprojekter, da der vil være en løbende driftsudgift til alle de nødvendige elementer, som det ikke vil være muligt at dække gennem forskningsprojekter. Et aktuelt eksempel er, at Danmark risikerer at måtte stoppe de systematiske målinger af drivhusgasser og forlade det europæiske samarbejde ICOS på grund af manglende finansiering til at fortsætte arbejdet (Scheutz & Pilegaard, 2022).

Der findes også andre målenetværk, der fokuserer på atmosfæriske målinger af drivhusgasser, f.eks. TCCON (Total Carbon Column Observing Network), der har en række målestationer³, dog ikke i Danmark.

Anvendelse af satellitdata har åbenlyse fordele i de periodiske målinger ved satellitpassagen, som når et system er opbygget vil kunne anvendes til at detektere udvikling over tid i tillæg til et estimat for emissionen. I forhold til de metoder, der anvendes i de nationale emissionsopgørelser, så er de typisk baserede på statistiske data og emissionsfaktorer. Emissionsfaktorerne er typisk baseret på målinger enten i Danmark eller som grundlag for IPCC standard-emissionsfaktorer. For diffuse kilder er det typisk forbundet med store udgifter at foretage målinger i tilstrækkeligt omfang til at grundlaget er solidt nok til at det kan danne grundlag for nationale emissionsfaktorer. Her ville satellitdata, såfremt præcisionen er høj nok og usikkerhederne ved invers modellering lave nok, kunne bidrage signifikant til datagrundlaget og dermed til nøjagtigheden af de nationale emissionsopgørelser. Et eksempel på dette er som omtalt i kapitel 2.1.2 emissionsopgørelsen for organiske jorde, som er behæftet med store usikkerheder. Da det samtidig er en stor kilde til den sam-

³ <https://tccon-wiki.caltech.edu/Main/TCCONSites>

lede nationale emission, så vil det være en stor gevinst at kunne reducere usikkerheden på emissionsopgørelsen. En reduktion af usikkerheden vil kunne reducere risikoen for at over- eller underopfylde i forhold til reduktionsmålsætninger og vil dermed kunne bidrage til en mere omkostningseffektiv klimapolitik.

Baseret på de gennemførte interviews vurderes det, at der i realiteten kun er få muligheder; en meget simpel løsning, hvor der ikke opbygges nævneværdige kompetencer i Danmark og der kun satses på at være bruger af services udviklet i andre lande eller mere ambitiøse løsninger, hvor Danmark opbygger kompetencer og infrastruktur for at kunne bidrage til det internationale arbejde og opnå det maksimale udbytte med udgangspunkt i danske interesser. Disse scenarier er beskrevet nærmere nedenfor. Det er svært på nuværende tidspunkt præcist at differentiere mellem de to scenarier, der er angivet med højt og mellem ambitionsniveau, og en række fordele er sammenlignelige i de to scenarier dog med forskel i størrelsen på fordelene. Dette vil med fordel kunne afsøges nærmere i forbindelse med udarbejdelsen af et roadmap for den videre indsats.

3.2.1 Scenarie – højt ambitionsniveau

Der er som nævnt tre hovedpunkter, hvor der er identificeret behov for at udbygge kompetencerne i Danmark, hvis der ønskes en fuld udnyttelse af potentialerne i forbindelse med CO₂M. Det er 1) bearbejdning og analyse af satellitdata for drivhusgasemissioner, 2) invers modellering og 3) landbaserede observationer.

Dette scenarie vil medføre en kapacitetsopbygning med henblik på at evaluere/verificere de eksisterende nationale emissionsopgørelser, at kunne rådgive omkring effekten af gennemførte politikker og tiltag samt at overvåge udviklingen i drivhusgasemissioner fra både nationalt niveau og ned til virksomhedsniveau.

Dette scenarie svarer i store træk til det arbejde, der foregår i Tyskland og som er nærmere beskrevet i kapitel 3.1.

Det er ikke muligt i forbindelse med dette projekt at kvantificere de nødvendige investeringer i infrastruktur og kompetenceopbygning, men der vil formentlig være tale om væsentlige ressourcer, der skal investeres.

For bearbejdning af satellitdata vil det skulle undersøges nærmere i hvilket omfang særlige danske forhold gør det nødvendigt at forbedre metoderne. Det vil være en klar fordel, at der er danske kompetencer til at vurdere dette og til at gøre data tilgængelige med en vurdering af usikkerheden.

Som nævnt er der på nuværende tidspunkter ingen kompetencer inden for invers modellering i Danmark. Det vil derfor være nødvendigt med en betydelig satsning. Der kan i den forbindelse overvejes synergier med eksisterende nationale forskningsmiljøer inden for atmosfærisk modellering.

Da der ikke findes veletablerede forskningsmiljøer i Danmark på nuværende tidspunkt, så betyder det også, at Danmark ikke er en eftertragtet samarbejdspartner. En vigtig afledt effekt af et højt ambitionsniveau vil derfor være, at danske forskningsmiljøer vil kunne indgå i europæiske konsortier omkring forskningsansøgninger på dette område, som det må forventes vil blive højt

prioriteret i fremtiden. En opbygning af kompetencer vil derfor forventes at kunne medføre øget hjemtag af forskningsbevillinger til Danmark fra EU's forskningsprogrammer.

En væsentlig gevinst i forbindelse med et højambitionsscenario er tilstedeværelsen af viden i Danmark omkring alle led i processen. Det blev nævnt flere gange under kortlægningen, at det er vigtigt, at der er transparens omkring metoder og resultater samt en forståelig kommunikation af usikkerheder og begrænsninger. For at kunne kommunikere dette tydeligt, f.eks. til virksomheder og organisationer, er det nødvendigt at have en indgående forståelse, som er yderst vanskelig at tilegne sig uden at have deltaget i databehandlingen og modelleringen.

I forbindelse med landbaserede målestationer til at understøtte satellitdata og som input til invers modellering er der i Scheutz & Pilegaard (2022) estimeret en omkostning for etablering og drift af to atmosfæremålestationer i Danmark på 3 millioner kroner om året set som et gennemsnit over fem år. Det skal understreges, at der ud over fordelene ved at understøtte anvendelsen af satellitdata, også vil være andre forskningsmæssige gevinster ved etableringen af atmosfæriske målestationer i Danmark.

Med hensyn til tidslinjen forventes CO₂M at blive opsendt i slutningen af 2025 eller starten af 2026. Det betyder, at de første resultater vil kunne forventes om ca. 3-3½ år. Hvis resultaterne skal udnyttes snarest muligt efter, at de bliver tilgængelige vurderes det, at det vil være nødvendigt at træffe de nødvendige beslutninger i forhold til en sådan satsning i 2023, således at opbygningen af kompetencer kan starte i 2024. Dette er baseret på et skøn og erfaringer med den tid, der går før finansiering falder på plads og at der vil kunne allokeres ressourcer.

Arbejdet bør involvere både myndigheder og forskningsinstitutioner, f.eks. organiseret på en tilsvarende måde, som Tyskland har valgt at organisere arbejdet på med en overordnet styring samt forskellige moduler, der har fokus på specifikke aspekter.

Tabel 3.1 Oversigt over fordele og ulemper ved scenariet med højt ambitionsniveau.

Fordele	Ulemper
Danmark vil have alle nødvendige kompetencer for at kunne udnytte resultaterne fra CO ₂ M	Det vil kræve en betydelig investering at opbygge de nødvendige kompetencer og infrastruktur.
Resultaterne af CO ₂ M vil kunne anvendes til at verificere de danske nationale emissionsopgørelser	
Mulighed for at overvåge udviklingstendenser i emissionerne fra små punktkilder/landbrug	
Danske forskningsinstitutioner vil blive mere attraktive i forhold til internationalt samarbejde med deraf muligheder for større andel af forskningsbevillinger til Danmark	
Det vil være muligt at opbygge et dansk servicecenter for anvendelse af satellitdata til gavn for danske virksomheder	
En eller flere landbaserede atmosfæriske målestationer	
Mulighed for at anvende data til verificering af effekten af politikker og virkemidler til gavn for den politiske beslutningsproces	

3.2.2 Scenarie – mellem ambitionsniveau

Som nævnt kan det være svært at trække en markant skillelinje mellem scenarierne med højt og mellem ambitionsniveau. Der er dog her skitseret to muligheder for at reducere ambitionsniveauet i forhold til det skitserede scenarie med højt ambitionsniveau.

Det første scenarie (Option 1), der kan overvejes, er ikke at opbygge kompetencer til at nedhente og behandle satellitdata for drivhusgasser, men at overlade dette arbejde til andre i udlandet. Den anden mulighed (Option 2) kunne være at undlade danske målestationer.

Det vurderes ikke at give mening med et scenarie med satsning på behandling af satellitdata og /eller danske målestationer uden at have kompetencer til at udføre den inverse modellering.

En del af de fordele, der er skitseret under scenariet med højt ambitionsniveau vil stadig i større eller mindre omfang være gældende, og det er svært uden en mere detaljeret analyse at vurdere præcist, hvor meget mindre fordelene bliver ved de reducerede ambitionsniveauer sammenlignet med scenariet med højt ambitionsniveau.

Tabel 3.2 Oversigt over fordele og ulemper ved scenariet med mellem ambitionsniveau.

Fordele (option 1)	Ulemper (option 1)
Færre omkostninger.	Ingen muligheder for danske tilpasninger og dermed manglende transparens og viden om betydningen af dette.
Der opbygges kompetencer indenfor invers modellering.	
Fordele (option 2)	Ulemper (option 2)
Færre omkostninger.	Ingen danske målestationer til at levere input til satellitbehandling og modellering.
Der opbygges kompetencer indenfor invers modellering.	
Der opbygges kompetencer til behandling af satellitdata for drivhusgasser.	

3.2.3 Scenarie – lavt ambitionsniveau

Hvis der ikke er ønske om at opbygge danske kompetencer på området, så vil det være muligt for Danmark at gøre brug af de internationale services, der bliver udviklet.

Dette vil betyde, at der ikke skal foretages særlige investeringer i Danmark, men vil samtidig også betyde, at der vil være færre muligheder for danske forskere og virksomheder for at være med i udviklingen af metoder og services, og dermed vil de være et skridt bagud i forhold til kolleger / konkurrenter fra lande med en mere aktiv deltagelse i CO₂M. Dette vil også betyde, at Danmark ikke vil kunne forvente at indgå i mange forskningsprojekter inden for dette område, og dermed at Danmarks andel af EU's forskningsmidler til dette område vil være stærkt begrænset.

Dette vil betyde, at der ikke bliver gjort særlige tilpasninger til danske forhold. Det bliver også svært at anvende CO₂M data til verifikation af de nationale emissionsopgørelser, da den grundlæggende forståelse for, hvordan data er estimeret og hvilke usikkerheder, der er forbundet med estimerterne ikke vil være tilgængelig.

Tabel 3.3 Oversigt over fordele og ulemper ved scenariet med lavt ambitionsniveau.

Fordele	Ulemper
Intet behov for investeringer.	Manglende indsigt i estimerne fremkomst vil betyde dårligere muligheder for at anvende resultaterne til verifikation af de nationale emissionsopgørelser samt anvendelse af data for industrier og erhverv. Færre muligheder for Danmark i at deltage i internationale forskningsprojekter indenfor dette område.

4 Referencer

Bergamaschi, P., Segers, A., Brunner, D., Haussaire, J.-M., Henne, S., Ramonet, M., Arnold, T., Biermann, T., Chen, H., Conil, S., Delmotte, M., Forster, G., Frumau, A., Kubistin, D., Lan, X., Leuenberger, M., Lindauer, M., Lopez, M., Manca, G., Müller-Williams, J., O'Doherty, S., Scheeren, B., Steinbacher, M., Trisolino, P., Vítková, G., and Yver Kwok, C., 2022. High-resolution inverse modelling of European CH₄ emissions using the novel FLEXPART-COSMO TM5 4DVAR inverse modelling system, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 13243–13268. Available at:

<https://acp.copernicus.org/articles/22/13243/2022/> (25-11-2022).

Brown, P., Cardenas L, Choudrie, S., Del Vento, S., Karagianni, E., MacCarthy, J., Mullen, P., Passant, N., Richmond, B., Thistlethwaite, G., Thomson, A, & Wakeling, D., 2022. UK Greenhouse Gas Inventory, 1990 to 2020. Annual Report for Submission under the Framework Convention on Climate Change. Available at: <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022>

Copernicus, 2021. COP26: CAMS to help measure progress towards CO₂ goals. Available at:

<https://atmosphere.copernicus.eu/cop26-cams-help-measure-progress-towards-co2-goals> (08-12-2022).

DCE, 2022. Ydelsesaftale Luft, Emissioner og Risikovurdering. Available at: <https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Rammeaftale/ya-ler-2022-25.pdf> (08-12-2022).

DMI, 2022. Minutes from the Conference on the coming Copernicus CO₂-mission (CO₂M) and its potential impact in Denmark.

DWD, 2022. Integrated Greenhouse Gas Monitoring System. Available at:

https://www.dwd.de/EN/climate_environment/climatemonitoring/greenhousegas/greenhousegas_node.html (08-12-2022).

EEA, 2022. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2020 and inventory report 2022. Submission to the UNFCCC Secretariat.

EEA/PUBL/2022/023. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/annual-european-union-greenhouse-gas-1> (25-11-2022).

Engelen, R., 2021. Report on the future operational transition of the VERIFY observation-based GHG monitoring system. Available at:

https://verify.lsce.ipsl.fr/images/PublicDeliverables/VERIFY_D611_Report_on_the_future_operational_transition_of_the_VERIFY_observation-based_GHG_monitoring_system_v1.pdf (25-11-2022).

EU, 2021. Forslag til Europa-Parlamentets og Rådets Forordning om reduktion af metanemissioner i energisektoren og om ændring af forordning (EU) 2019/942. Available at:

[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/?uri=CELEX:52021PC0805R\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/?uri=CELEX:52021PC0805R(01)) (25-11-2022).

European, C., Joint Research, C., and Ciais, P.: Towards a European operational observing system to monitor fossil CO₂ emissions: final report from the expert group, Publications Office, 2016.

German, R., Matthews, B. & Ruysenaars, P., 2021. Inverse modelling as a tool to support national greenhouse gas monitoring in Europe. ETC / CME Eionet Report | 4/2021. December 2021. Available at: <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> (25-11-2022).

Gyldenkerne, 2019. Bestilling til AU vedr. fejl om udbredelse af organiske jorde af 28-08-2019. Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. 6. december 2019. Available at: https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2019/Genbestilling_vedr._fejl_i_udbredelsen_af_organiske_jorde.pdf

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. & Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> (25-11-2022).

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., Löschner, A., Marshall, J., Meijer, Y., Nakajima, M., Palmer, P. I., Peylin, P., Rayner, P., Scholze, M., Sierk, B., Tamminen, J. & Veefkind, P., 2020. Toward an Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring and Verification Support Capacity, Bulletin of the American Meteorological Society, 101, E1439-E1451, 10.1175/bams-d-19-0017.1, 2020.

Meijer, Y., 2022. Anthropogenic CO₂ Monitoring with the Copernicus CO₂M Mission. Presentation at the Conference on the coming Copernicus CO₂-mission (CO₂M) and its potential impact in Denmark. 29 March 2022.

Mielke, C., 2022. Personlig kommunikation med Dr. Christian Mielke, Umweltbundesamt Dessau.

Nielsen, O.-K. 2022. Indregning af Carbon Capture and Storage, Carbon Capture and Use og biokul i de nationale emissionsopgørelser. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 23 s. – Notat nr. 2022|15. Available at: https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2022/N2022_15.pdf

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrechtsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Baunbæk, L., & Hansen, M.G. 2022. Denmark's National Inventory Report 2022. Emission Inventories 1990-2020 -

Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 969 pp. Scientific Report No. 494. Available at: <http://dce2.au.dk/pub/SR494.pdf>

Pinty B., G. Janssens-Maenhout, M. Dowell, H. Zunker, T. Brunhes, P. Ciais, D. Dee, H. Denier van der Gon, H. Dolman, M. Drinkwater, R. Engelen, M. Heimann, K. Holmlund, R. Husband, A. Kentarchos, Y. Meijer, P. Palmer & M. Scholze, 2017. An Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring & Verification Support capacity - Baseline Requirements, Model Components and Functional Architecture, doi: 10.2760/39384, European Commission Joint Research Centre, EUR 28736 EN.

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 & H. Zunker, 2019. An Operational Anthropogenic CO₂ Emissions Monitoring & Verification Support Capacity – Needs and high level requirements for *in situ* measurements, doi: 10.2760/182790, European Commission Joint Research Centre, EUR 29817 EN.

Scheutz, C. & Pilegaard, K., 2022. Danmark risikerer at måtte stoppe de systematiske målinger af drivhusgasser i luften og forlade det europæiske samarbejde ICOS. Klima-, Energi- og Forsyningsudvalget 2022-23. KEF Alm.del - Bilag 13. Available at: <https://www.ft.dk/samling/20221/almdel/KEF/bilag/13/2634096.pdf> (25-11-2022).

UFS, 2022. Rumbaseret grøn forskning. Bibliometrisk analyse af Danmarks rumbaserede grønne forskning. September 2022. Available at: <https://ufm.dk/publikationer/2022/filer/rumbaseret-gron-forskning-bibliometrisk-analyse-af-danmarks-rumbaserede-gronne-forskning> (05-12-2022).

UNFCCC, 2018. Decision 18/CMA.1. Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/CMA2018_03a02E.pdf (25-11-2022).

KORTLÆGNING AF INTERESSER OG POTENTIALER I FORBINDELSE MED SATELLITDATA TIL OVERVÅGNING AF DRIVHUSGASEMISSIONER

Rapporten beskriver en kortlægning af interesser og potentialer i forbindelse med satellitdata til overvågning af drivhusgasemissioner. Der er givet en beskrivelse af nuværende og planlagte satellitmissioner med særlig fokus på CO₂M. Der er derudover lavet en beskrivelse af mulige scenarier for en eventuel fremtidig satsning på dette område.