

Fjernmåling av metanutslipp ved bruk av Sentinel-5P: en mulighetsstudie

Arve Kylling, Kerstin Stebel, Ann Mari Fjæraa, Philipp Schneider



NILU rapport 09/2021	ISBN: 978-82-425-3037-0 ISSN: 2464-3327	TILGJENGELIGHET: A - Åpen
Miljødirektoratet M-1977 2021		
DATO 23.03.2021	ANSVARLIG SIGNATUR Ole-Anders Braathen, Viseadministrerende direktør (sign.)	ANTALL SIDER 33
TITTEL Fjernmåling av metanutslipp ved bruk av Sentinel-5P: en mulighetsstudie		PROSJEKTLEDER Arve Kylling
		NILU PROSJEKTNUMMER O-120140
FORFATTER(E) Arve Kylling, Kerstin Stebel, Ann Mari Fjæraa, Philipp Schneider		KVALITETSSIKRER Kjetil Tørseth
OPPDRAUGSGIVER Miljødirektoratet Postboks 5672, Torgarden, 7485 Trondheim		OPPDRAUGSGIVERS REF. 20047054 – 2020/13572 Kontaktperson: Tomas Holmern
REFERAT Rapporten beskriver hvilke muligheter Sentinel-5P kan gi med tanke på å utvikle produkter for årlige nasjonale dekningskart med arealestimater med vekt på klimagassen metan.		
NORSK TITTEL Fjernmåling av metanutslipp ved bruk av Sentinel-5P: en mulighetsstudie		
EMNEORD FjernmålingMetanKlimagasser		
ABSTRACT (på engelsk) The report describes the opportunities that Sentinel-5P may provide towards developing products for annual Norwegian coverage maps with area estimates for the methane greenhouse gas.		
PUBLISERINGSTYPE: Digitalt dokument (pdf)	FORSIDEBILDE: Kilde: NILU	

© NILU – Stiftelsen Norsk institutt for luftforskning

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

Forord

Satellitter spiller «en avgjørende rolle for å etablere faktagrunnlag for en kunnskapsbasert klima- og miljøpolitikk», Meld. St. 10 (2019-2020). Dette inkluderer satellittovervåking av atmosfærisk metan gjennom miljøovervåkningsprogrammet Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>) som Norge deltar i. Denne rapporten undersøker hvilke muligheter satellitten Sentinel-5P, som er en del av Copernicus, kan gi med tanke på å utvikle produkter for årlige nasjonale dekningskart med arealestimer med vekt på klimagassen metan.

NILU, 24. mars, 2021

Arve Kylling

Seniorforsker, avdeling for atmosfære og klima

Innhold

Forord.....	3
Sammendrag.....	5
1 Innledning.....	6
2 Metanprodukt fra satellitter.....	8
3 Produkt for deteksjon og estimering av metanutslipp	11
3.1 Våtmark (myr)	12
3.2 Områder i Arktis med permafrost.....	13
3.3 Olje- og gassvirksomhet på land og i havet	14
4 Bakkesannheter for validering	16
5 Eksempler på metodikk for deteksjon og estimering av metanutslipp	18
6 Anbefalinger	19
7 Referanser	21
Vedlegg A Månedskart av xCH₄.....	24

Sammendrag

Denne rapporten oppsummerer en undersøkelse av hvilke muligheter Sentinel-5P kan gi med tanke på å utvikle produkter for årlige nasjonale dekningskart med arealestimater med vekt på klimagassen metan.

Metan (CH₄) er den nest viktigste menneskeskapte drivhusgass etter CO₂. Konsentrasjonen av metan i atmosfæren har økt med omlag 150% siden 1750. Levetiden til metan i atmosfæren er på omtrent 12 år. Det vil si at en reduksjon av metanutslipp vil relativt raskt gi en nedgang av metan i atmosfæren og dermed en nedgang i menneskeskapt oppvarming.

Satellittmålinger av metan er krevende på grunn av svakt signal (tilbakespredt sol-stråling), spesielt gjelder dette havområder da disse reflekterer lite solstråling direkte tilbake til satellitt. Videre er norske forhold, som lav sol i vintermånedene, skydekke og varierende topografi, utfordrende for algoritmene som brukes til analyse av målingene. Validering av satellitt-målinger av metan gjøres ved sammenlikning av satellittdata mot data fra dedikerte bakkebaserte installasjoner. Flere studier viser at det er god overenstemmelse mellom satellitt- og bakkemålinger.

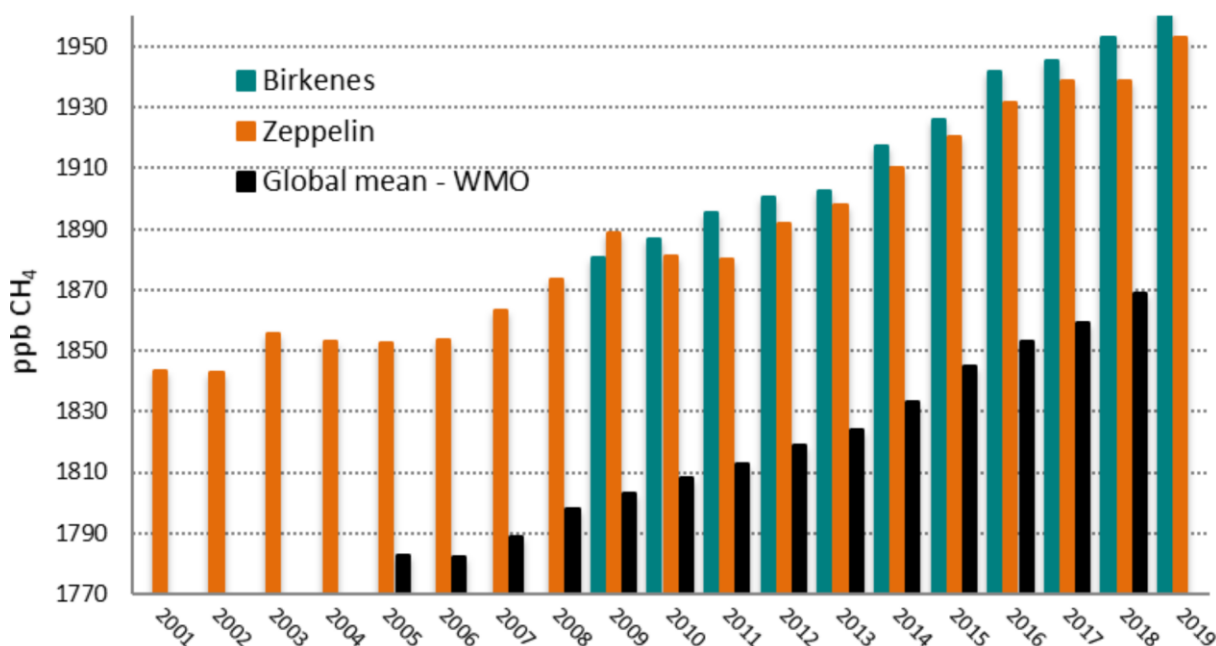
Mulighet for deteksjon av utslipp fra tre system er vurdert i denne rapporten: våtmark (myr), områder i Arktis med permafrost, og olje- og gassvirksomhet på land og i havet. Med følsomheten til Sentinel-S5P, vil det kun være mulig å observere store enkelt-utslipp i forbindelse med ulykker ved landbaserte olje- og gassvirksomhet gitt gunstige observasjonsforhold. Generering av årlige nasjonale dekningskart for metan vurderes som mulig.

Fjernmåling av metanutslipp ved bruk av Sentinel-5P: en mulighetsstudie

1 Innledning

Hovedformålet med prosjektet er å undersøke hvilke muligheter Sentinel-5P kan gi med tanke på å utvikle produkter for årlige nasjonale dekningskart med arealestimer med vekt på klimagassen metan.

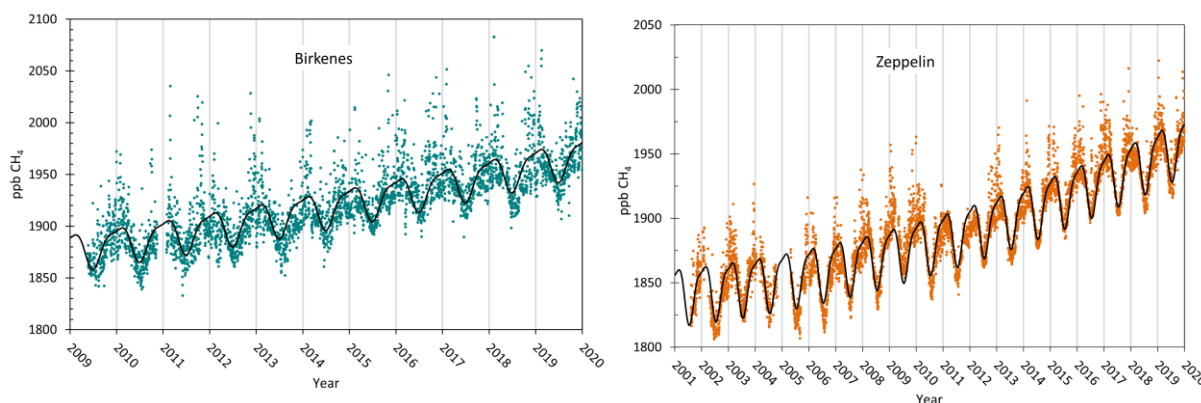
Metan (CH_4) er den nest viktigste menneskeskapte drivhusgassen etter CO_2 . Konsentrasjonen av metan i atmosfæren har økt med omlag 150% siden 1750 (Hartmann et al., 2013). Metan absorberer infrarød stråling sterkere enn CO_2 og har et globalt oppvarmingspotensial som er 34 høyere enn CO_2 . Myhre et al. (2013) estimerte at det globale strålingspådrivet for metan var omlag 18% (CO_2 bidro med 63%). Levetiden til metan i atmosfæren er på omtrent 12 år. Det vil si at en reduksjon av metanutslipp vil relativt raskt gi en nedgang av metan i atmosfæren og dermed en nedgang i menneskeskapt oppvarming.



Figur 1: Årsmiddel-verdier for metan globalt og målt på Birkenes, Agder, Norge og Zeppelin-observatoriet, Ny-Ålesund, Svalbard. Fra Myhre et al. (2020).

Estimat av nåværende årlige globalt CH_4 -utslipp varierer mellom 542 og 852 TgCH_4/yr (Ciais et al., 2013). Naturlige kilder for metan inkluderer våtmark, innsjøer og elver, dyr, branner, termitter, geologiske kilder, hydrater, og permafrost. Menneskeskapte kilder for metan er risdyrking, drøvtyggere, søppelfyllinger, biomassebrenning, og fossile drivstoff. Naturlige og menneskeskapte utslipp er omtrent like store. Årsmiddel-konsentrasjonen av metan for Birkenes, Zeppelin og det globale middel har økt jevnt siden 2005 som vist i Figur 1. Dagsverdier for Birkenes og Zeppelin, Figur 2, viser hvordan metan varierer med årstid og fra dag til dag (Myhre et al., 2020). Dataene i Figur 2 er punktmålinger. Som nevnt i Meld. St. 10 (2019-2020), spiller satellitter «en avgjørende rolle for å etablere faktagrunnlag for en kunnskapsbasert klima- og miljøpolitikk». Dette inkluderer

satellittovervåking av atmosfærisk metan gjennom miljøovervåkningsprogrammet Copernicus (<https://www.copernicus.eu/en>) som Norge deltar i. TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) på Copernicus Sentinel-5 Precursor (S5P) satellitten gjør målinger som muliggjør uthenting av mengden av metan i troposfæren. TROPOMI-S5P observerer hele kloden i løpet av et døgn og vil derfor kunne gi globale kart av for eksempel metan, om observasjonforholdene er gunstige. En rekke internasjonale og nasjonale prosjekt benytter data fra TROPOMI-S5P.



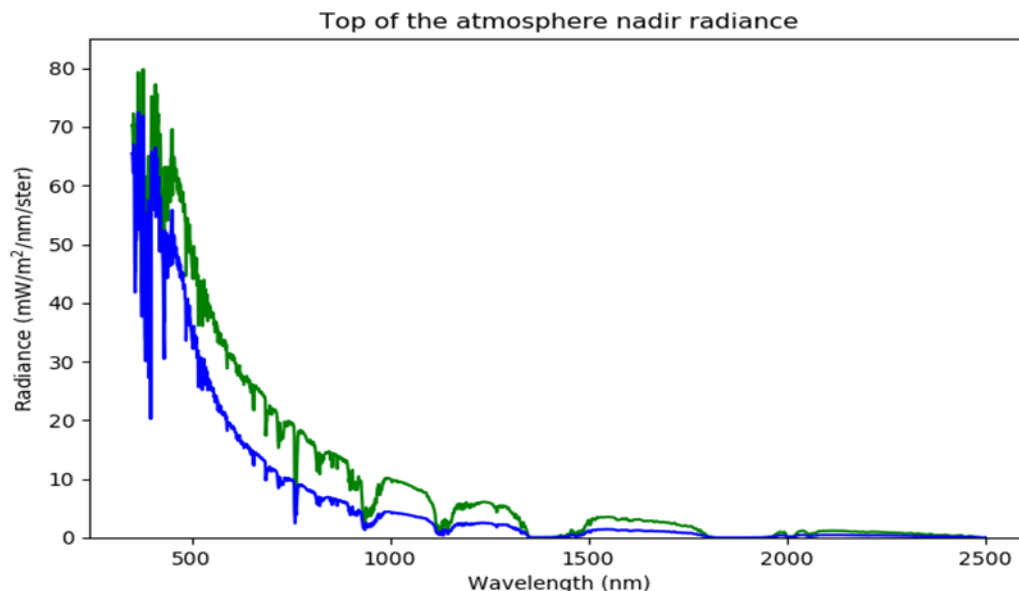
Figur 2: Daglige metankonsentrasjoner fra Birkenes, Agder, Norge og Zeppelin-observatoriet, Ny-Ålesund, Svalbard. Fra Myhre et al. (2020).

Av direkte relevans for satellitt-fjernmåling av metan nevnes det nasjonale prosjektet «SynergisTic Exploitation of the methane Product from Sentinel-5P for applications in the Arctic (STEPS)», finansiert av Norsk romsenter og ledet av NILU. Hovedmålet med STEPS er å undersøke hvorvidt synergistisk bruk av relevante observasjoner fra andre Sentinel-satellitter og maskinlæring kan tilføre verdi til Sentinel-5P CH₄-produkt over Norge og Arktis.

Rapporten gir først en oversikt over satellitt-instrument for metan-målinger og tilhørende metanprodukt inkludert produkt for deteksjon og estimering av metanutslipp, deretter diskuteres bakkesannheter for validering og metodikk for deteksjon og estimering av metanutslipp. Rapporten avsluttes med anbefalinger om bruk av metan-data til miljøforvaltning.

2 Metanprodukt fra satellitter

Atmosfærisk metan kan måles av satellitt-instrument i den kortbølgete infrarøde (SWIR) delen av solspekteret (absorpsjonsbånd rundt 1650 og 2300 nm) og i det termisk infrarøde området (TIR). TIR-målinger har lav følsomhet for metan i troposfæren (nederste delen av atmosfæren) og vil derfor ikke bli diskutert.



Figur 3: Reflektert solstråling som sees av et satellitt-instrument som ser rett ned på jorden, over hav (blå kurve) eller bakke (grønn kurve). Kurvene er beregnet med libRadtran-modellen (www.libradtran.org).

SWIR-type satellitt-instrument måler elektromagnetisk stråling, enten reflektert sollys for passive instrument eller tilbakespredt stråling fra aktive instrument (lidar). Denne strålingen tolkes av modeller som beskriver strålingsgangen gjennom atmosfæren og hvordan den er påvirket av metan. Eksempel på reflektert solstråling er gitt i Figur 3. Synlig lys ligger mellom 400-700 nm. Metan måles rundt 1650 og 2300 nm hvor mengden reflektert stråling er betydelig redusert. Den begrensede mengden med reflektert solstråling setter strenge krav til sensorens følsomhet, stabilitet og kalibrering. Vannoverflater og snødekte flater reflekterer svært lite solstråling i 1650-2300 nm bølgelengdeområdet og ekskluderes derfor ofte fra videre analyse. Krav til akseptable signal/støy-forhold gjør at metan heller ikke kan måles for lave solvinkler, dvs gjennom vintermånedene i Norge. Analyse for uthenting av metan krever også kjennskap til hvordan bakken reflekterer stråling. Algoritmene for uthenting av metan bruker egne databaser over bakkens tilbakespredning av stråling og hvordan den varierer med sted, solvinkel, observasjonsvinkel og årstid (Hu et al., 2016, Schneising et al., 2020, Lorente et al., 2021). Ideelt sett ønsker man at bakken er ensartet og jevn innenfor et målepiksel. Dette er sjelden tilfelle, og da spesielt ikke i fjellområder hvor både variasjon av overflatetype og topografi er betydelig både i tid og rom. Fjellområder filtreres derfor ofte ut av analyser av metan. I tillegg vil ikke satellitt-instrument se den delen av metankolonnen som ligger i eller under skyer, og piksler som er helt eller delvis dekket av skyer filtreres derfor ut. Summen av disse forhold gjør måling av metan fra satellitt utfordrende generelt, og spesielt over hav som reflekterer lite stråling i dette bølgelengdeområdet.

Satellitter måler som beskrevet over totalmengden av metan i en atmosfærekolonne. Utslipp av metan og andre sporgasser, beregnes ofte ved å kombinere satellittdata med atmosfæriske kjemi- og

transportmodeller, såkalt invers modellering (Bergamaschi et al., 2018). Globalt var bakgrunnsnivået til metan 1862.8 ppb mai 2019 og metan har økt med mer enn 150% siden år 1750 (Saunio et al. (2020), Global Carbon Project, <https://www.globalcarbonproject.org/>). På Birkenes i Sør-Norge og Zeppelin på Svalbard målte NILU i 2019 rekordhøye årlige middelerverdier på henholdsvis 1961.2 ppb og 1952.9 ppb (Myhre et al., 2020). Naturlige utslipp av metan er typisk små i forhold til bakgrunnsnivået, mens menneskeskapte utslipp varierer i størrelse og kan være betydelige i forbindelser med ulykker. For å kunne skille mellom utslipp og bakgrunnsnivå må satellitt-målinger av metan ha høy presisjon. Som vist i Figur 3, er den delen av solspekteret som brukes til metan-målinger relativt svakt, videre reflekterer vannoverflater SWIR dårlig. Det betyr at signalet som satellitt-instrumentet måler i utgangspunktet er lavt, som igjen setter høye krav til måle-følsomhet.

En oversikt over satellitt-instrument og metodikk for fjernmåling av metan er gitt av Crisp et al. (2018). En oversikt over eksisterende og framtidige passive og aktive (lidar) SWIR satellitt-instrument er gitt i tabell 1.

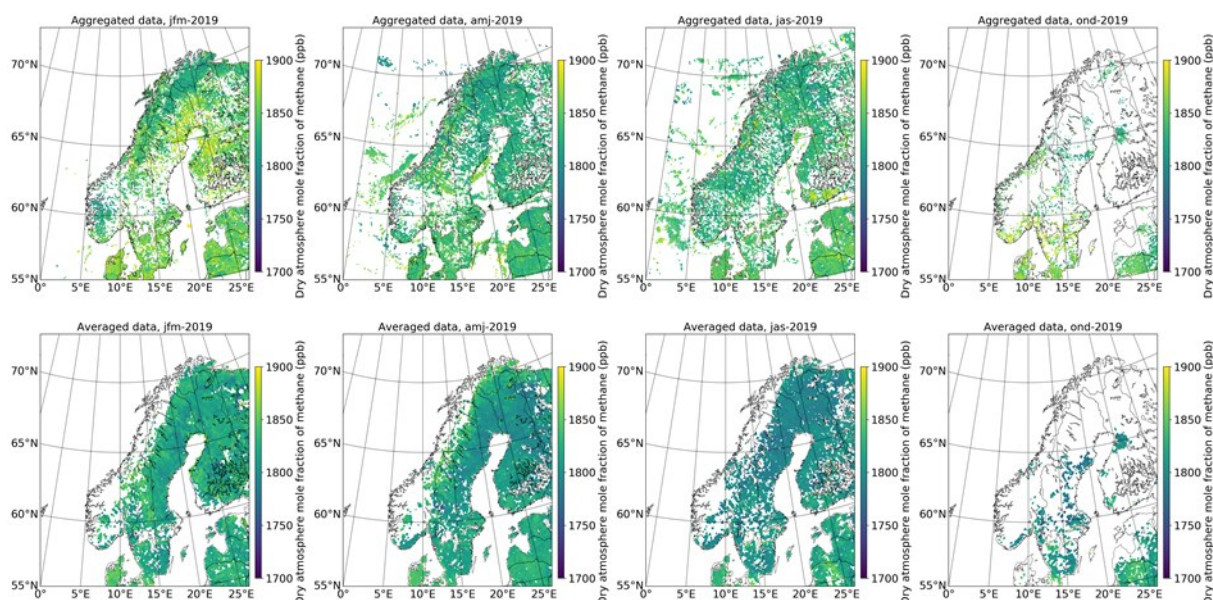
Tabell 1: SWIR satellitt-instrument for måling av atmosfærisk metan. Data fra Jacob et al (2016), <https://www.eumetsat.int/metop-sg>, <https://merlin.cnes.fr/en/MERLIN/index.htm>, www.methanesat.org og www.ghgsat.com. Merk at presisjon for MethanSAT er for 1x1 km² pikselstørrelse. ESA=European Space Agency, JAXA=Japan Aerospace Exploration Agency, CNES=Centre national d'études spatiales, DLR=Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, EDF=Environmental Defense Fund, NZSA=New Zealand Space Agency. Med unntak av satellittene fra GHGSat, er data fra alle instrument kostnadsfritt tilgjengelig for ikke-kommersielle brukere.

Instrument (operatør)	Måle-periode	Overflygings-tidspunkt	Piksel-størrelse (km ²)	Dekning	Presisjon
SCIAMACHY (ESA)	2003-2012	10:00	30 x 60	6 dager	1,5%
GOSAT (JAXA)	2009-	13:00	10 x 10	3 dager	0,7%
Claire, Iris, Hugo (GHGSat)	2016, 2020, 2021-		0.05 x 0.05	12 x 12 km ² grid	1-5%
TROPOMI-S5P (ESA)	2017-	13:30	7 x 7 5.5 x 7 (aug 2019)	1 dag	0,6%
GOSAT-2 (JAXA)	2018-	13:00	10 x 10	3 dager	0,4%
MethaneSAT (EDF, NZSA)	2022-		0.1 x 0.4	7-10 dager	0,1%
TROPOMI-S5 (ESA)	2023-		7 x 7	1 dag	0,6%
MERLIN, lidar (CNES,DLR)	2025-		punkt	28 dager	0,2%

Instrumentene i tabell 1 har forskjellige karakteristikk avhengig av formål. Alle instrumentene i tabell 1 går i lavbane (500-800 km høyde), dvs. de gjør flere omløp rundt jorden i løpet av et døgn og kommer tilbake til samme punkt etter 24 timer. TROPOMI-S5P har en bred sveip og dekker hele kloden i løpet av et døgn. Instrument med smalere sveip trenger flere døgn på å måle samme punkt på nytt, men har da gjerne bedre romlig oppløsning (for eksempel den framtidige MethaneSAT) og kan da bedre lokalisere punktkilder. Satellitter som GHGSat har mulighet for å gjennomføre

målrettede observasjoner. Det er et mangfold av instrument som tjener forskjellige formål, og ikke et instrument kan gi det komplette bilde.

En rekke forenklinger og tilnærmelser gjøres i dataanalysemodellene for å muliggjøre uthenting av metan-mengde. Disse forenklingene og tilnærmelsene i analysen av satellitt-dataene gjør at metan-produkt fra forskjellige kilder (Hu et al., 2016, Schneising et al., 2020) kan avvike fra hverandre. Et eksempel på xCH_4 ¹ for 2019 for Norden og omliggende områder er gitt i figur 4.



Figur 4: Kvartals tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for 2019. Øvre rad viser alle data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020), mens nedre rad viser middelerverdi av det operasjonelle SSP metan-produktet (Hu et al., 2016). Første kolonne er data for første kvartal, andre kolonne for andre kvartal osv. Hvite piksler viser manglende data. Månedsverdier for 2018 og 2019 er vist i Appendiks.

Det operasjonelle ESA produktet, heretter xCH_4 _Hu, har dårlig dekning over Norge. Dette skyldes at data innsamlet i fjellområder eller områder med store høydeforskjeller innenfor et piksel filtreres ut i analysekjeden. Videre analyseres ikke data over hav pga. lavt signal. Metan-produktet fra Schneising et al. (2020) har en annen tilnærming og analyserer data fra fjell- og havområder. Begge produktene har få målinger i vintermånedene. Dette skyldes både lav solvinkel, dvs. ikke noe eller lite sollys, og nærvær av skyer. Månedssdata for 2019, se Appendiks viser dette ytterligere. Det er videre en forskjell i nivået på de to produktene. Dette diskuteres senere i kapittel 4.

¹ Metan rapporteres ofte som den kolonne-midlete tørr-luft mol fraksjon av metan, xCH_4 , dvs. kolonnen av metan (antall molekyler per areal) dividert med tørr-luft kolonnen. Den romlige fordelingen av metan-kolonnen er dominert av topografi og bakketrykk-endringer. Metanendringer er relativt sett små i forhold til totalkolonnen, disse endringene sees lettere ved å bruke xCH_4 .

3 Produkt for deteksjon og estimering av metanutslipp

Deteksjon og estimering av individuelle metanutslipp er utfordrende av flere grunner. Det finnes både naturlige og menneskeskapte kilder til metan, inkludert både punktkilder og diffuse kilder som har forskjellig opphav (biogene, pyrogene, eller termogene). Atmosfærisk metan reduseres i all hovedsak via raske kjemiske reaksjoner som involverer hydroksyl (OH). OH har kort atmosfærisk levetid og varierer raskt i rom og tid. For kildekobling mangler vi gode observasjoner for å gi føring til modeller av våtmarksområder, menneskeskapte utslipp, og inversjonskjøringer (Saunos et al., 2020).

Varigheten og størrelsen av metanutslipp avgjør om de kan detekteres av satellittbårne instrument eller ikke. Et langvarig (flere dager) utslipp har større sjanse for å bli fanget opp av daglige satellittmålinger enn et kortvarig utslipp fordi satellitten ikke flyr over eller utslippet ikke kan sees pga. skyer. Videre må utslippet være av tilstrekkelig størrelse til at det kan sees over bakgrunnsnivået av metan gitt satellittinstrumentets følsomhet.

Det er også ulike målekrav for overvåkning av regionale eller globale bakgrunnsnivå kontra overvåkning av punktkilder. For overvåking av bakgrunnsnivå ønsker man å måle årlige utslipp på en regional skala med tilhørende kildekobling, det vil si gjentatte målinger av samme område med høy presisjon, mens for punktkilder ønsker man å oppdage større lekkasjer fra anlegg over et kort tidsrom. For sistnevnte er det ønskelig med høy romlig oppløsning og samtidig også høy tidsoppløsning.

Deteksjonsfølsomhet og utslippsfølsomhet for TROPOMI-S5P og MethaneSAT er gitt i tabell 2.

Tabell 2: Deteksjonsfølsomhet er målbar endring i metankonsentrasjon. Beregnet fra presisjon i tabell 1. Utslippsfølsomhet (t/h = tonn/time) er beregnet som i ligning 14, Jacob et al. (2016). Verdier for MethaneSAT er for en pikselstørrelse på 1 x 1 km².

	TROPOMI-S5P	MethaneSAT
Deteksjonsfølsomhet (ppb)	12	2
Utslippsfølsomhet (t/h)	3,7	0,1

Deteksjonsfølsomhet er definert som målbar endring i metankonsentrasjon. Deteksjonsfølsomheten for MethaneSAT er beregnet for en effektiv pikselstørrelse på 1 x 1 km² for å øke signal/støy-forholdet. En effektiv pikselstørrelse på 1 x 1 km² tilsvarer å midle over omlag 25 piksler med størrelse 0.1 x 0.4 km² og øker signal/støy-forholdet med omlag en faktor 5. Den gode presisjonen til MethaneSAT gir en langt lavere deteksjonsfølsomhet enn for TROPOMI-S5P. Utslippsfølsomhet beskriver hvor stort et punktutslipp av metan må være for å kunne detekteres. Beregning av den er gjort som i Jacob et al. (2016) og inkluderer informasjon om pikselstørrelse og vindhastighet (satt til 5 km/h). Utslippsfølsomhet øker med pikselstørrelse fordi utslippet da måles over et større område, og med vindhastighet fordi sterkere vind sprer utslippet raskere over et større område. En dobling av vindhastighet vil doble utslippsfølsomheten.

Satellittene måler konsentrasjonen av metan i en kolonne fra bakkenivå til toppen av atmosfæren. Punktutslipp av metan kan beregnes ved å kombinere målinger av metan med vindhastighet for området med utslipp. For dette trengs bakgrunnsmålinger som kan hentes fra enten tidligere målinger før utslipp eller samtidige oppvindsmålinger. Vindhastighet hentes typisk fra værvarslingsmodeller. Som nevnt over, avhenger utslippsfølsomheten blant annet av pikselstørrelse, presisjon og vindhastighet over utslippet. For TROPOMI-S5P med opprinnelig pikselstørrelse 7 x 7 km² rapporterer Jacob et. al (2016) en utslippsfølsomhet på 4,2 t/h. Med nåværende

pikselstørrelse på $7 \times 5,5 \text{ km}^2$ forbedres utslippsfølsomheten til 3,7 t/h, tabell 2. For MethaneSAT er utslippsfølsomheten beregnet til 0,1 t/h for en pikselstørrelse på $1 \times 1 \text{ km}^2$. Disse tallene er for enkeltmålinger. For langtids (et år) observasjoner av samme kilde har Jacob et al. (2016) estimert at et enkelt kontinuerlig kildeutslipp på 0,5 t/h kan detekteres av TROPOMI-S5P.

Muligheten for å detektere metanutslipp med satellitt fra våtmark, områder i Arktis med permafrost, og olje- og gassvirksomhet på land og i havet, er undersøkt. Resultatene er oppsummert i Tabell 3 og beskrevet i detalj under.

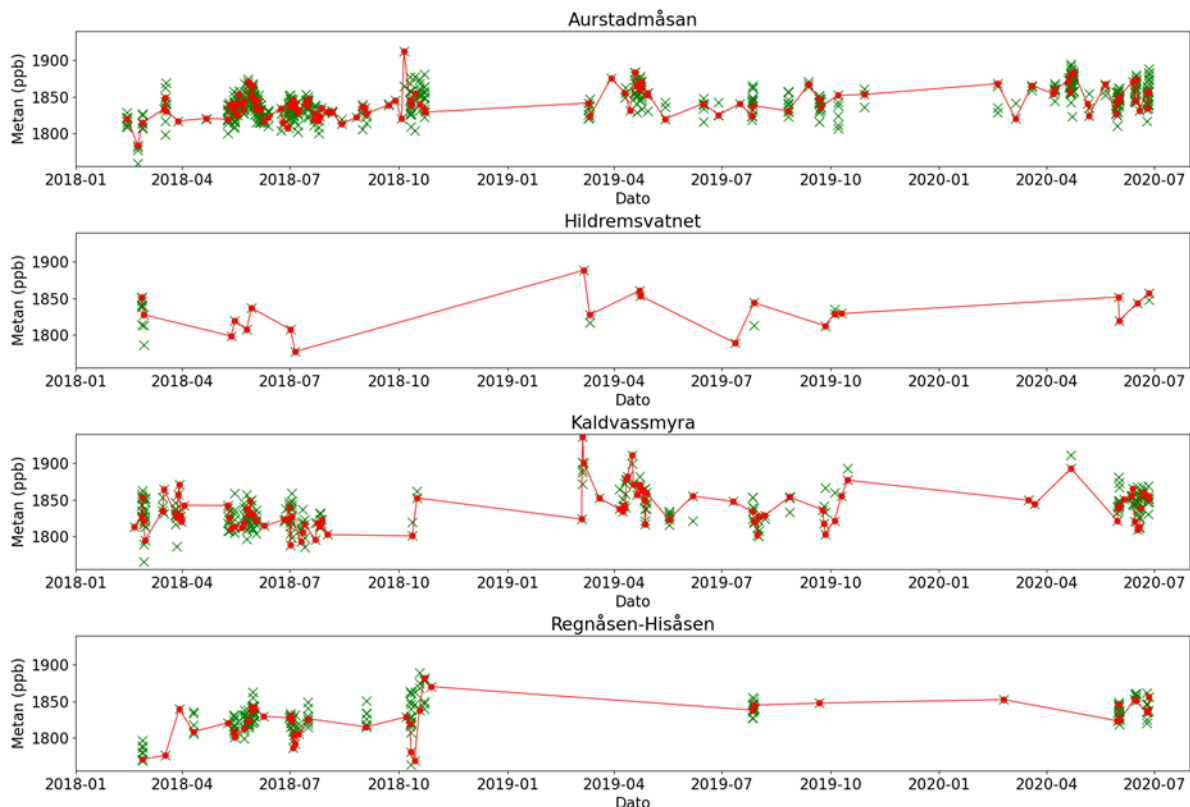
Tabell 3: Tabellen viser muligheten til å identifisere metan fra ulike system med TROPOMI-S5P og MethaneSAT. Med unntak av raden for ulykke forutsettes det kontinuerlige utslipp som diskutert i teksten.

	TROPOMI-S5P	MethaneSAT
Våtmark (myr)	Nei	Nei
Områder i Arktis med permafrost	Nei	Nei
Olje- og gassvirksomhet på land og i havet – kontinuerlige utslipp	Nei	Ja
Olje- og gassvirksomhet på land og i havet – ulykker	Ja	Ja

3.1 Våtmark (myr)

DMR (DMR, 2020) har rapportert utslipp av metan for Regnåsen-Hisåsen, Trysil. Utslippene er opp mot $60\text{--}70 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, men typisk lavere. For TROPOMI-S5P med pikselstørrelse på $7 \times 5,5 \text{ km}^2$ tilsvarer dette 0.13 t/h mens det for en MethaneSAT effektiv pikselstørrelse på $1 \times 1 \text{ km}^2$ tilsvarer 0.0035 t/h. Dette er langt under deteksjonsfølsomheten til begge instrumentene.

I IUP-Bremen metan-datasettet ble det søkt etter piksler som ligger innenfor en radius av 11 km fra følgende fire overvåkede myrområder i Norge: Regnåsen-Hisåsen, Aurstadmåsan, Kaldvassmyra og Hildremvatnet (DMR, 2020; Kyrkjeeide et al., 2018). Metankolonner for disse pikslene er vist for perioden januar 2018 – juni 2020 i Figur 3.



Figur 5: TROPOMI-S5P metan-kolonne for Aurstadmåsan, Hildremsvatnet, Kaldvassmyra og Regnåsen-Hisåsen. Metan-produktet er fra IUP-Bremen. Røde punkt viser data for piksel som er nærmest senter av myrområde. Grønne kryss viser data som er innenfor en radius av 11 km. Rød linje er kun for visuell hjelp og viser ikke data mellom punkt. Se ellers tekst for ytterligere beskrivelse.

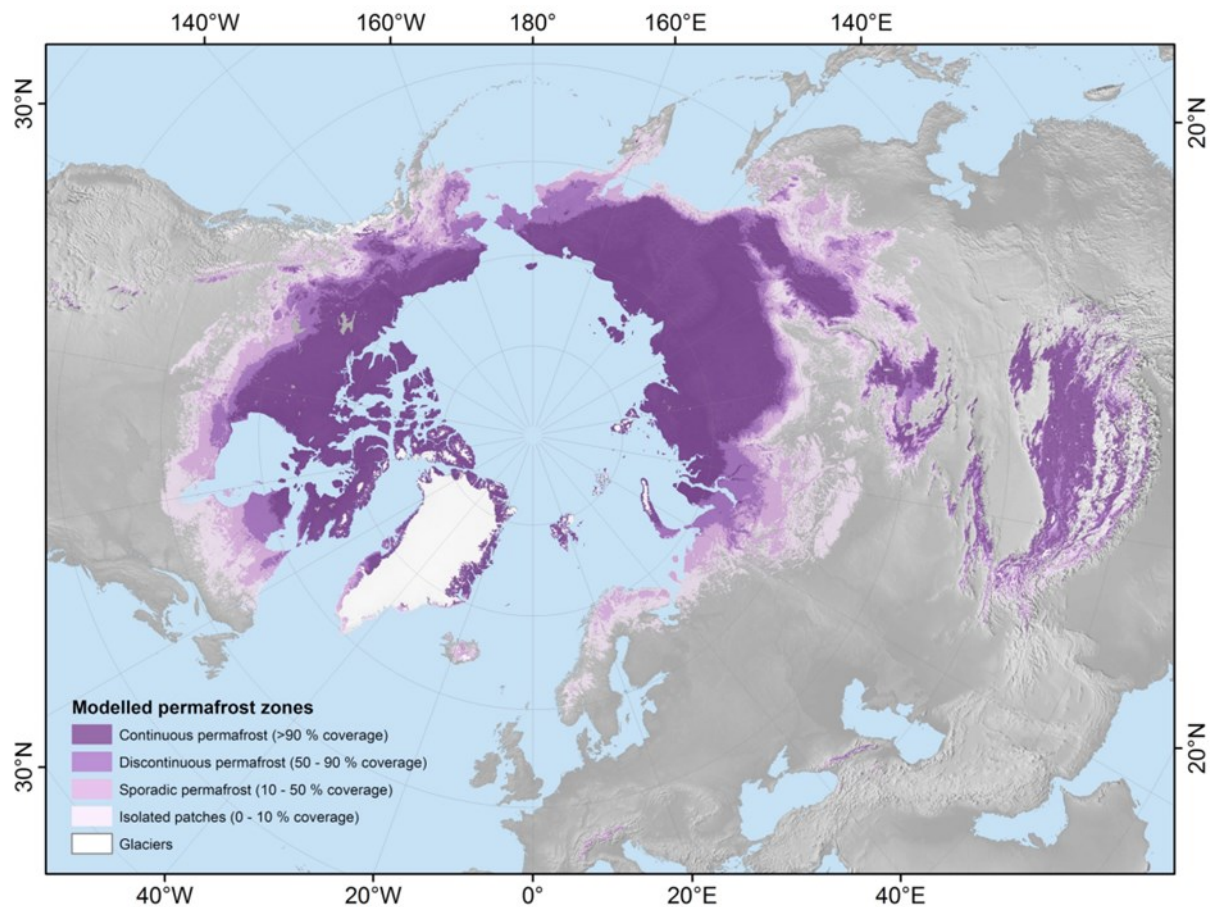
For et tidssteg viser de røde punktene data fra det enkelte satellittpikselet som er nærmest senter av myrområdet. De grønne kryssene er data fra samme tidssteg og alle satellittpiksler som er innenfor en radius på 11 km. Variasjonen for de grønne kryssene for et tidssteg viser variasjon av metan i nærheten av senter av myrområdet. Det er lange brudd i dataseriene. Spesielt er det lite data for Regnåsen-Hisåsen i 2019. Årsakene til dette vites ikke, men i tillegg til en krevende dataanalyse som forutsetter data av høy kvalitet (høyt signal/støy forhold), kan skyer virke inn.

Arealet myrområdene dekker er mindre enn et TROPOMI-S5P piksel. Dette vanskeliggjør estimering av metan-budsjett for disse myrområdene ved bruk av TROPOMI-S5P ytterligere. MethaneSAT har bedre romlig oppløsning som er i samme størrelsesorden som de ovennevnte myrområder (pikselstørrelse varierer med observasjonsvinkel). Det muliggjør adskilte observasjon av myr og omliggende områder og dermed mulighet for lokale dekningskart med forbehold om egnete observasjonsforhold (ikke skyer for eksempel). Det gjøres oppmerksom på at utslipp fra myr, som målt av DMR (DMR, 2020) er langt under utslippsfølsomheten til MethaneSAT.

3.2 Områder i Arktis med permafrost

Tining av permafrost er en kjent kilde for metan. Datasett for utbredelse av permafrost er tilgjengelig fra Obu et al. (2020). Dette er årlige kart med en horisontal oppløsning på 926.63 m. Datasettet er basert på satellitt-data og dekker den nordlige halvkulen fra 1997-2018. Utbredelsen av permafrost på den nordlige halvkule er vist i Figur 6. Obu et al. (2019) betegner forekomsten av permafrost på fastlands-Norge som sporadisk. Kartet viser at Svalbard har kontinuerlig permafrost. Det er estimert

at $13.9 \times 10^6 \text{ km}^2$ av den nordlige halvkule er dekket av permafrost (Obu et al., 2019). Saunio et al. (2020) antyder globale utslipp fra permafrost på opptil 1 Mt/yr. Hvis vi fordeler dette jevnt over all permafrost på den nordlige halvkule tilsvarer det utslipp på omlag 0.0003 t/h for et TROPOMI-S5P piksel og 8×10^{-6} t/h for MethaneSAT, dvs. langt under utslippsfølsomheten for begge.



Figur 6: Permafrost soner. Fra Obu et al. (2019).

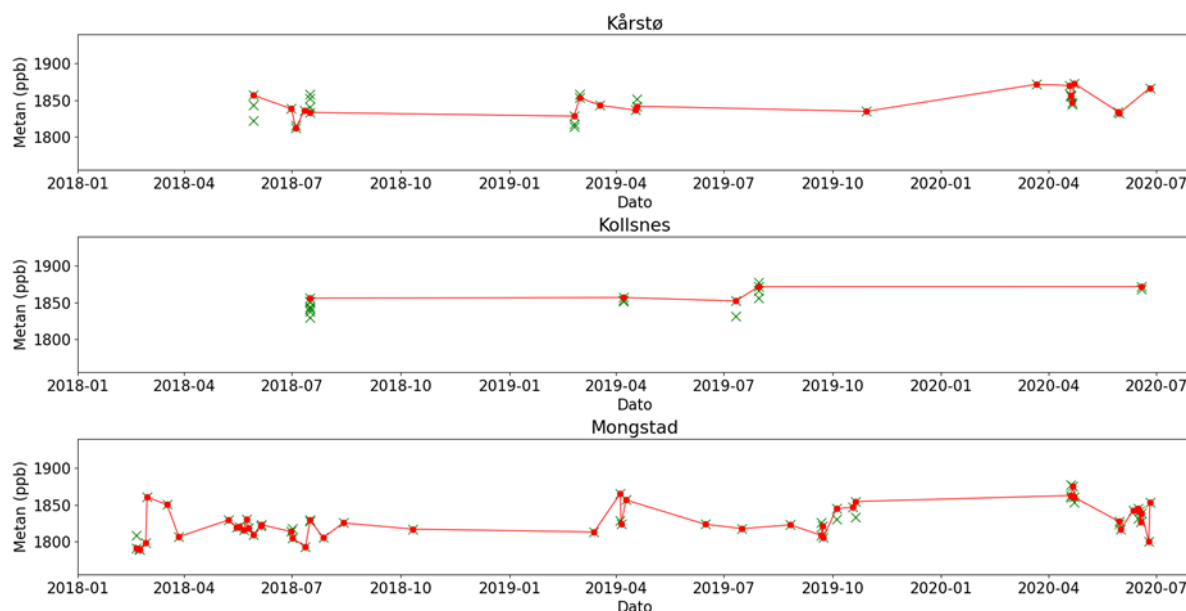
3.3 Olje- og gassvirksomhet på land og i havet

En grundig gjennomgang av målemetodikk for metan for norsk offshore-virksomhet er gitt av Brown et al. (2020). Kart over olje- og gassinstallasjoner på norsk sokkel samt norsk landbasert oljeindustri er vist i Figur 21. For 2019 er det estimert at Mongstad raffineriet slapp ut 1743,9 tonn metan². Under forutsetning av at dette slippes jevnt ut tilsvarer utslippet omlag 0,2 t/h. For å kunne detekteres av TROPOMI-S5P må utslippene per time være nesten 20 ganger større. For den framtidige MethaneSAT vil utslippene være innenfor deteksjonsfølsomheten. Det forutsetter dog analysemetoder for satellittdata som muliggjør uthenting av metankolonner i havnære områder. Petroleumsanleggene på Kårstø og Kollsnes har lavere estimerte utslipp enn Mongstad og disse vil ikke være målbare forutsatt jevne utslipp. Store lekkasjer vil kunne detekteres forutsatt at de er større enn deteksjonsfølsomheten, pågår mens satellitten passerer over og observasjonsforholdene er gunstige (ingen skyer).

2

<https://www.norskeutslipp.no/no/Komponenter/Utslipp/Metan/?ComponentType=utslipp&ComponentPageID=55#> og deretter «Utslipp per virksomhet».

Med en pikselstørrelse på $7 \times 5,5 \text{ km}^2$ vil de tre ovennevnte petroleumsanlegg bare dekke en del av et TROPOMI-S5P piksel. Vind vil også spille inn og spre utslipp som varer over lengre tid. Videre ligger de tre petroleumsanleggene ved sjø som vanskeliggjør dataanalyse pga. lavt signal/støy-forhold. I IUP-Bremen metan-datasettet ble det søkt etter piksler som ligger innenfor en radius av 25 km fra petroleumsanleggene. Metankolonner for disse pikslene for perioden januar 2018 – juni 2020 er vist i Figur 7.



Figur 7: Metan kolonne for Kårstø, Kollsnes og Mongstad. Metan-produktet er fra IUP-Bremen. Grønne punkt viser data for piksel som er nærmest industrianlegg. Røde kryss viser data som er innenfor en radius av 25 km. Rød linje er kun for visuell hjelp og viser ikke data mellom punkt. Se ellers tekst for ytterligere beskrivelse.

Der er få piksler hvor metan er detektert innenfor en radius av 25 km for de tre petroleumsanleggene. Kun et piksel er nærme nok til senter av petroleumsanlegget til å dekke dette (Kårstø, 24. februar, 2019). For Mongstad er samtlige piksler fra fastlandet til nordøst omlag 20-22 km unna. Manglende metan-kolonne for piksler over petroleumsanleggene skyldes beliggenhet (ved sjø) og skydekke.

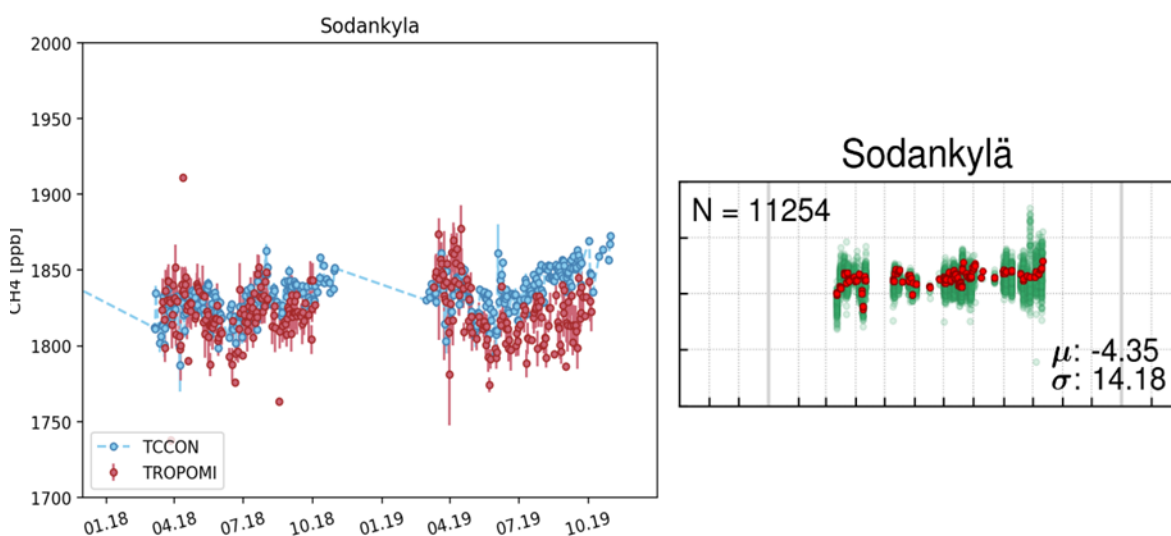
For olje- og gassvirksomhet i havet slapp Åsgard-feltet ut mest metan i 2019 med 1585,95 tonn. Dette er noe mindre enn Mongstad og vil med jevne utslipp ikke kunne detekteres av TROPOMI-S5P. Vanskeligheten med deteksjon av metan over hav gjør at ingen data presenteres.

4 Bakkesannheter for validering

TROPOMI-S5P måler kolonnen av metan mellom instrumentet og jordens overflate. For validering trengs uavhengige målinger av samme størrelse. Total Carbon Column Observing Network (TCCON) er et globalt nettverk av bakke-instrument for blant annet validering av sporgass-målinger fra satellitter (Wunch et al., 2011). Globalt er det totalt 24 TCCON-stasjoner hvorav en i Ny-Ålesund og en i Sodankylä, Finland. Ved sammenligning av satellitt- og bakkemålinger må man ta hensyn til at satellittmålinger representerer et middel over instrumentets måleområde for et piksel, mens bakkemålinger er punktmålinger på et gitt sted, og at målingene samlokaliseres i rom og tid.

TCCON målinger er per dags dato eneste etablerte valideringsmetode for satellitt-målinger av metan. TCCON benytter seg av et Fourier transformasjons spektrometer instrument som er store og ressurskrevende installasjoner installert i tilrettelagte bygg. Opparbeiding av nye målesteder for bakkesannheter krever således betydelige investeringer, og er derfor spesielt utfordrende i for eksempel Arktiske områder.

Begge satellitt-produkt for metan-kolonne fra TROPOMI-S5P, vist bl.a. i Figur 2, er blitt validert mot TCCON med generelt gode resultat (global bias på -1.30, 5.6 og -17.0 ppb for metan-produkt fra henholdsvis Schneising et al., 2019; og revidert og operasjonelt produkt fra Lorente et al., 2021).



Figur 8: Sammenligning av metankolonne fra TCCON og TROPOMI-S5P. Det venstre plottet viser data fra Lorente et al. (2021), mens det høyre viser data for 2018 fra Schneising et al. (2019). Merk at y-akse for høyre plott går fra 1600 til 2000 ppb.

Figur 8 viser eksempler på sammenligning mellom metan-kolonne fra TCCON og de to metan-produkt fra TROPOMI-S5P for Sodankylä. Merk at metan-produktet fra Lorente et al. (2021) er en forbedret versjon av de operasjonelle metan-produktet fra ESA. Det forbedrede metan-produktet har en bias på -10.9 ppb med standard avvik 19.1 ppb. Tilsvarende tall for det opprinnelige produktet er henholdsvis -39.4 ppb og 18.6 ppb (Lorente et al., 2021). Metan-produktet fra IUP-Bremen (Schneising et al., 2019) har en bias på -4.35 ppb og standard avvik på 14.18 ppb. Tallene er ikke helt sammenlignbare da Lorente et al. (2021) sammenligner middel av TROPOMI-S5P innenfor en radius av 300 km med TCCON, mens Schneising et al. (2019) sammenligner enkeltmålinger. Det er kjent at der er en albedo-avhengighet i det operasjonelle produktet (Schneising et al., 2019; Lorente et al., 2021). Albedo brukt under analyse av et piksel må være likest mulig det reelle albedo. Hvis ikke vil

metan-kolonnen ha et avvik fra riktig verdi. Det operasjonelle produktet bruker albedo-klimatologier. Disse kan avvike fra det reelle albedo som vist av Schneising et al. (2019) og Lorente et al. (2021) som begge brukte forbedrete albedo-modeller.

De fleste TCCON-stasjoner ligger på den nordlige halvkule, og der mangler stasjoner syd for 45°S. Der er få stasjoner som er representative for hav og ingen dekker nordlige havområder. Det begrensede antall bakkestasjoner gir føringer for under hvilke forhold sammenligninger kan gjøres, f.eks. albedo, solvinkler, overflatetype, topologi, skyforhold. Det bemerkes at metan-data fra IUP-Bremen gir god overensstemmelse med TCCON-målinger for stasjonene i Ny-Ålesund og Garmisch-Partenkirchen, Tyskland, som ligger i områder med krevende topografi. Det operasjonelle metan-produktet er ikke validert for disse stasjonene.

Alle målinger bør følge etablerte standarder og gjøre data åpent tilgjengelig. I Norge gjøres det in situ målinger av metan på bakkenivå på Birkenes og Zeppelin som en del av Integrated Carbon Observatory System (ICOS, <https://no.icos-cp.eu/>). ICOS er en europeisk forskningsinfrastruktur for standardiserte høykvalitetsmålinger av drivhusgasser. Disse og tilsvarende målinger, i motsetning til total-kolonne data, kan strengt tatt ikke brukes som bakkesannhet for satellitt-målinger da de måler en annen størrelse (mengde molekyler per volum målt ved bakken) enn den satellittinstrumentet måler (mengde molekyler integrert gjennom hele troposfæren). In situ målinger av metan er likevel sammenlignet med metan-kolonne fra TROPOMI-S5P av de Gouw et al. (2020). Regresjonsanalyse viste en lineær sammenheng mellom de to for målinger utført over Utah, USA. Men stigningstallet var mye lavere enn 1, dvs. store endringer på bakkenivå eller grenselaget (in situ målinger) gir mindre endringer i total-kolonnen (TROPOMI-S5P). Denne sammenhengen mellom in situ målinger og satellittmålinger kan brukes til sannsynliggjøring av satellittmålingene

TCCON er langsiktige målinger. Dedikerte kortvarige målekampanjer, som ofte inkluderer luftbårne instrument, kan også brukes til validering for forhold hvor TCCON-stasjoner ikke finnes. Flybårne målekampanjer kan tjene flere formål. For eksempel kan de brukes til 1) kartlegging av et utpekt område (myr, industri, osv.) ved å gjøre overflyvninger under gunstige (skyfrie) forhold; 2) årlige målinger av utpekt område for å se på årlige endringer; 3) validering av satellitt-målinger; 4) deteksjon av individuelle punktkilder med høy presisjon (Jongaramrungruang et al., 2019). Det sistnevnte ble gjort av Thorpe et al. (2020) som utførte over 229 flyvninger for deteksjon av metan fra lagringsfelt for gass i California. Kostnadene med flymålinger er betydelige og tilgangen til instrumentering og fly tilrettelagt for å fly med denne instrumenteringen, meget begrenset. En liste over framtidige kampanjer som dekker norske interesseområder er gitt i Tabell 4.

Tabell 4: Framtidige flykampanjer over norske interesseområder.

Navn	Tidsrom	Sted	Plattform	Kontakt
MAGIC2021	Aug-Sept 2021	Kiruna, Sverige	Fly, ballong	Cyril Crevoisier (cyril.crevoisier@lmd.polytechnique.fr , https://magic.aeris-data.fr/)
AVIRIS-NG	Pågående	-	Fly	https://avirisng.jpl.nasa.gov
HALO Arctic Circle Campaign	2025-2026	Sirkum-polar	Fly	Andreas Fix, DLR, Tyskland.

5 Eksempler på metodikk for deteksjon og estimering av metanutslipp

TROPOMI-S5P er det første satellitt-instrumentet med tilstrekkelig rom og tidsoppløsning til å detektere store punktkilder av metan (Jacob et al., 2016). Metan-data fra TROPOMI-S5P har, siden oppskytningen i 2017, blitt studert for å finne enkeltutslipp. For de fem største olje og gass-feltene i USA rapporterer Schneising et al. (2020) årlige metanutslipp på 3.18 ± 1.13 (Permian), 2.36 ± 0.88 (Appalachian), 1.37 ± 0.63 (Eagle Ford), 0.89 ± 0.56 (Bakken), og 2.74 ± 0.74 Mt/yr (Anadarko). For to av verdens største gassfelt, Galkynysh og Dauletabad i Turkmenistan, finner de et årlig utslipp på 3.26 ± 1.17 Mt/yr. Metan slippes også ut fra kullgruver, men som vist for gruvedrift i det øvre schlesiske kullbasseng, Polen, er disse knapt synlige i TROPOMI-S5P data og derfor nær instrumentets utslippsfølsomhet (Schneising et al., 2019). Forhøyede metanverdier ble funnet over områder for olje og gass produksjon i USA av de Gouw et al. (2020). De fant også at kolonne-målingene fra TROPOMI-S5P korrelerte med in situ målinger. Store enkeltutslipp fra gassutblåsninger er rapportert for Belmont, Ohio, USA (Pandey et al., 2019) og Eagle Ford Shale, Texas, USA (Cusworth et al., 2021). For Eagle Ford Shale hendelsen i november 2019, ble det estimert at $4,800 \pm 0,980$ kt med metan slapp ut. Mengden av metan som ble sluppet ut fra utblåsningen i Ohio, februar-mars 2018, (omtrent 60 kt) ble estimert til å være større enn for eksempel det årlige utslippet av metan fra den norske petroleumsvirksomheten til havs (12,8 kt i 2019). Alle disse studiene er for landbasert olje og gassindustri og videre er dette typisk store utslipp over større områder.

Som vist over er utslipp fra norsk petroleumsvirksomhet, myrområde og permafrost under deteksjonsfølsomheten til TROPOMI-S5P. Et klart unntak er mulige store uønskede industriutslipp som kan observeres. Videre er de aktuelle myrområder og industrianlegg små sammenlignet med TROPOMI-S5P pikselstørrelse. Det gjør det vanskelig å skille mellom naturlige utslipp og utslipp som skyldes endringer i habitat eller teknisk infrastruktur.

Årlige dekningskart for norske landområder kan lages ved å kombinere TROPOMI-S5P data med bakkemålinger. Den romlige dekning vil komme fra satellittmålinger, og variasjoner i tid kan tas fra in situ målinger av metan-konsentrasjon for forskjellige overflatetyper. Dekningskart kan så konstrueres ved å kombinere satellittmålinger av metan, bakkemålinger av metan og kart over landskapstyper. Utvikling av dekningskart vil kreve kobling og koordinering mellom forskjellige målinger/aktiviteter.

For endringskart og utslippsregnskap bemerkes det at endring i utslipp over tid er utfordrende å måle hvis man ikke har systematiske og vedvarende målinger. Videre er regionale målinger/metoder ikke egnet til å se individuelle metan punktkilder.

MethaneSAT vil kunne levere tilsvarende metanprodukt som TROPOMI-S5P, men med bedre romlig oppløsning, dog dårligere tidsoppløsning (tabell 1). MethaneSAT har bedre presisjon enn TROPOMI-S5P og derfor bedre følsomhet (tabell 2). Metanprodukt fra MethaneSAT vil potensielt gi en mer detaljert informasjon enn tilsvarende produkt basert på TROPOMI-S5P. Men dette kan ikke vites sikkert før MethaneSAT er i bane og man vet satellitten fungerer i henhold til spesifikasjonene.

Til slutt bemerkes det at nye metoder for metan-deteksjon av punktkilder er under utvikling, for eksempel ved bruk av Sentinel-2 og lignende (Cusworth et al., 2019; Varon et al., 2020). Disse metodene har dårligere følsomhet enn TROPOMI-S5P, men bedre romlig oppløsning.

6 Anbefalinger

Det er to metan-produkt basert på SWIR-data fra TROPOMI-S5P. Det nåværende operasjonelle produktet fra ESA har for dårlig dekning over norske interesseområder til å være av noen særlig nytte for de systemer som er beskrevet i denne rapporten. Det forventes at senere versjoner av det operasjonelle produktet vil ha bedre dekning. Lorente et al. (2021) har presentert et forbedret produkt og dette alternative produktet har langt bedre dekning og bedre overensstemmelse med bakkemålinger. Dekning over hav er begrenset pga. dårlig signal/støy-forhold. For vintermånedene oktober-februar er det få metan-målinger pga. lav sol.

Tabellen under viser mulige metan-produkter basert på Sentinel-5 av forvaltningsrelevans og vurdering av deres gjennomførbarhet. Videre vil produktene måtte valideres. For dekningskart vil det, i tillegg til eksisterende TCCON-målinger i Sodankylä, Finland, være ønskelig med flere kampanje-baserte valideringsmålinger for norske landskapstyper (fjellområder, innsjøer, osv.). Validering av uønskede utslipp gjøres best ved å måle metan-konsentrasjon ved utslipp mens dette pågår.

Tabell 5: Mulige Sentinel-5 metan-produkter av forvaltningsrelevans.

Produkt	Kommentarer	Gjennomførbarhet
Årlige nasjonale dekningskart - konsentrasjon	Kan lages for land og kobles mot kart av overflatetype for å gi konsentrasjon for forskjellige overflater. Vil være vektet mot måneder med høy sol og lite skyer. Over hav vil dekning være begrenset. Bør understøttes/utfylles av kjemi-transport-modeller som beskriver metan, f.eks Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS, https://atmosphere.copernicus.eu/)	Vurderes som mulig med nåværende TROPOMI-S5P metanprodukt fra IUP-Bremen.
Årlige nasjonale dekningskart - utslipp	Krever bakgrunnsverdier og tidsserier. Dårlig dekning over Norge gjør dette krevende. Vil inkludere bruk av kjemi-transport-modeller og/eller invers modellering ved bruk av atmosfære transportmodeller.	Vurderes som krevende over land og lite mulig over hav, gitt nåværende dekning.
Varsel om plutselige økninger fra punktkilder.	Krever bakgrunnsverdier. Nåværende data har dårlig dekning i rom og tid. Krever at satellitt flyr over mens utslipp pågår og at observasjonsforhold er gunstige (ikke skyer, ikke hav, høy sol). Videre må en operasjonell tjeneste være tilstede som fanger opp økning.	Vurderes som krevende over land og lite mulig over hav, gitt nåværende dekning.

Generering av bakgrunnskart krever lite datainfrastruktur. Opprettelse av en tjeneste for detektering av plutselige utslipp vil kreve oppbygging av datainfrastruktur for nedlasting og analyse av data, samt personale til å vurdere dataene.

Et instrument og en målemetodikk kan alene ikke gi et komplett bilde for metan over norske interesseområder. Det er derfor behov for flere utfyllende metoder for å måle metan, inkludert bakke-, satellitt- og luftbårne målinger. Under gis anbefalinger for nåværende og framtidige satellittbaserte metanmålinger.

1. Skyer vil alltid være en begrensning over norske interesseområder. På kort sikt anbefales det derfor å lage skydekningskart for norske interesseområder. Spesielt bør skydekke over aktuelle lokaliteter kvantifiseres. Dette kan gjøres ved for eksempel å bruke høyoppløselig skydata fra Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) instrumentet på Suomi-NPP satellitten som flyr i tandem med TROPOMI-S5P og brukes blant annet for å gi bilder av områder TROPOMI-S5P observerer. VIIRS ble skutt opp i 2011 og vil kunne gi god skystatistikk. En slik skystatistikk vil også være av stor nytte for satellittfjernmåling av andre sporgasser som feks. NO₂.
2. Avhengig av resultat for skystatistikk over norske interesseområder, punkt 1, anbefales det å se på muligheten for å utvikle landbasert dekningskart for metan basert på TROPOMI-S5P data koblet mot bakke-målt metan. Dekningskart vil gi informasjon om bakgrunnsnivået av metan for norske (land-)områder og vil kunne vise regionale mønstre og trender. Under utvikling av slike kart bør det undersøkes hvordan blant annet kjemi-transport-modeller, in situ målinger og kunnskap om kjente utslippskilder kan brukes for å tolke kartene. For validering av metan-produkt er TCCON-stasjoner best egnet, men disse er dyre og ressurskrevende installasjoner. For interesseområder kan enklere in situ målinger av metan-konsentrasjon i grenselaget brukes til sannsynliggjøring og utfylling av satelittmålinger.
3. På lengre sikt anbefales det å undersøke potensialet til MethaneSAT, som vil gi langt bedre romlig oppløsning og bedre presisjon, for å utvikle produkt for norske forhold (fjell-, fjord-, og havområder). Det bemerkes at metan-målinger over havområder er utfordrende, men videre utvikling av analysemetoder kan forbedre dette. En analysemetode inkluderer bruk av solglans-refleksjon fra havoverflaten. Denne metoden er krevende, men brukes allerede av GOSAT og planlegges tatt i bruk av MethaneSAT. Det bør vurderes om Norge skal delta i utviklingen av dataanalyse med et fokus på krevende norske forhold.

7 Referanser

- Bergamaschi, P., A. Danila, R. F. Weiss, P. Ciais, R. L. Thompson, D. Brunner, I. Levin, Y. Meijer, F. Chevallier, G. Janssens-Maenhout, H. Bovensmann, D. Crisp, S. Basu, E. Dlugokencky, R. Engelen, C. Gerbig, D. Günther, S. Hammer, S. Henne, S. Houweling, U. Karstens, E. Kort, M. Maione, A. J. Manning, J. Miller, S. Montzka, S. Pandey, W. Peters, P. Peylin, B. Pinty, M. Ramonet, S. Reimann, T. Röckmann, M. Schmidt, M. Strogies, J. Sussams, O. Tarasova, J. van Aardenne, A. T. Vermeulen, F. Vogel, Atmospheric monitoring and inverse modelling for verification of greenhouse gas inventories, EUR 29276 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-88938-7, doi:10.2760/759928, JRC111789.
- Brown, P. F., Saunier, S., Simon, M. and Cruz, B. H., Overview of methane detection and measurement technologies for offshore applications. Carbon Limits AS.
https://www.carbonlimits.no/wp-content/uploads/2020/08/Methane-measurement-technologies-offshore_for-website.pdf, 2020.
- Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P. Thornton, 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Crisp, D., et al., A constellation architecture for monitoring carbon dioxide and methane from space, White paper, Committee on Earth Observation Satellites,
https://ceos.org/document_management/Virtual_Constellations/ACC/Documents/CEOS_AC-VC_GHG_White_Paper_Version_1_20181009.pdf, 2018.
- Cusworth, D. H., Jacob, D. J., Varon, D. J., Chan Miller, C., Liu, X., Chance, K., et al. (2019). Potential of next-generation imaging spectrometers to detect and quantify methane point sources from space. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 5655–5668. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5655-2019>.
- Cusworth, D. H., Duren, R. M., Thorpe, A. K., Pandey, S., Maasackers, J. D., Aben, I., et al. (2021). Multisatellite imaging of a gas well blowout enables quantification of total methane emissions. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL090864. <https://doi.org/10.1029/2020GL090864>
- de Gouw, J.A., Veefkind, J.P., Roosenbrand, E. et al. Daily Satellite Observations of Methane from Oil and Gas Production Regions in the United States. *Sci. Rep.*, 10, 1379 (2020).
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-57678-4>.
- DMR Miljø og Geoteknikk AS, Statusrapport – Overvåking av klimagasser på myr, Avtale nr.: 18088061, 2020.
- Hartmann, D.L., A.M.G. Klein Tank, M. Rusticucci, L.V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F.J. Dentener, E.J. Dlugokencky, D.R. Easterling, A. Kaplan, B.J. Soden, P.W. Thorne, M. Wild and P.M. Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hu, H., Hasekamp, O., Butz, A., Galli, A., Landgraf, J., Aan de Brugh, J., Borsdorff, T., Scheepmaker, R., and Aben, I.: The operational methane retrieval algorithm for TROPOMI, *Atmos. Meas. Tech.*, 9, 5423–5440, <https://doi.org/10.5194/amt-9-5423-2016>, 2016.

- Jacob, D. J., Turner, A. J., Maasakkers, J. D., Sheng, J., Sun, K., Liu, X., Chance, K., Aben, I., McKeever, J., and Frankenberg, C.: 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>, 2016.
- Jongaramrungruang, S., Frankenberg, C., Matheou, G., Thorpe, A. K., Thompson, D. R., Kuai, L., and Duren, R. M.: Towards accurate methane point-source quantification from high-resolution 2-D plume imagery, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 6667–6681, <https://doi.org/10.5194/amt-12-6667-2019>, 2019.
- Kyrkjeeide, M.O., Lyngstad, A., Hamre, Ø. og Jokerud, M. 2018. Overvåking av restaureringstiltak i myr. Aurstadmåsan, Kaldvassmyra og Hildremvatnet. NINA rapport 1576. Norsk institutt for naturforskning.
- Lorente, A., Borsdorff, T., Butz, A., Hasekamp, O., aan de Brugh, J., Schneider, A., Wu, L., Hase, F., Kivi, R., Wunch, D., Pollard, D. F., Shiomi, K., Deutscher, N. M., Velasco, V. A., Roehl, C. M., Wennberg, P. O., Warneke, T., and Landgraf, J.: 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>, 2021.
- Meld. St. 10 (2019–2020) - Høytflyvende satellitter – jordnære formål En strategi for norsk romvirksomhet, <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/meld.-st.-10-20192020/id2682361/>
- Myhre, C. L., Svendby, T., Hermansen, O., Lunder, C., Platt, S. M., Fiebig, M., Fjæraa, A. M., Hansen, G., Schmidbauer, N., and Krognest, T., Monitoring of greenhouse gases and aerosols at Svalbard and Birkenes in 2019 - Annual report. Kjeller, NILU (Miljødirektoratet rapport, M-1797/2020) (NILU report, 16/2020), 2020.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestad, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H. H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääb, A., Leibman, M. O., Lewkowicz, A. G., Panda, S. K., Romanovsky, V., Way, R. G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J., and Zou, D.: Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale, *Earth-Sci. Rev.*, 193, 299–316, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>, 2019.
- Obu, J.; Westermann, S.; Barboux, C.; Bartsch, A.; Delaloye, R.; Grosse, G.; Heim, B.; Hugelius, G.; Irrgang, A.; Kääb, A.M.; Kroisleitner, C.; Matthes, H.; Nitze, I.; Pellet, C.; Seifert, F.M.; Strozzi, T.; Wegmüller, U.; Wieczorek, M.; Wiesmann, A. (2020): ESA Permafrost Climate Change Initiative (Permafrost_cci): Permafrost extent for the Northern Hemisphere, v2.0. Centre for Environmental Data Analysis, 02 November 2020. <https://dx.doi.org/10.5285/28e889210f884b469d7168fde4b4e54f>
- Pandey, S., Gautam, R., Houweling, S., van der Gon, H. D., Sadavarte, P., Borsdorff, T., et al. (2019). Satellite observations reveal extreme methane leakage from a natural gas well blowout. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116, 26376–26381. <https://doi.org/10.1073/pnas.1908712116>

- Saunio, 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.: The Global Methane Budget 2000–2017, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561–1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>, 2020.
- 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.: 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>, 2019.
- Schneising, O., Buchwitz, M., Reuter, M., Vanselow, S., Bovensmann, H., and Burrows, J. P.: 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>, 2020.
- Thorpe, A., Duren, R., Conley, S., Prasad, K., Bue, B.D., Yadav, V., Foster, K., Rafiq, T., Hopkins, F., Smith, M., Fischer, M., Thompson, D.M., Frankenberg, C., McCubbin, I., Eastwood, M.P., Green, R., & Miller, C.E. (2020). Methane emissions from underground gas storage in California. *Environmental Research Letters*, 15, 045005.
- Varon, D. J., Jervis, D., McKeever, J., Spence, I., Gains, D., and Jacob, D. J.: *High-frequency monitoring of anomalous methane point sources with multispectral Sentinel-2 satellite observations*, *Atmos. Meas. Tech. Discuss. [preprint]*, <https://doi.org/10.5194/amt-2020-477>, in review, 2020.
- Wunch, D., Toon, G. C., Blavier, J.-F. L., Washenfelder, R. A., Notholt, J., Connor, B. J., Griffith, D. W. T., Sherlock, V., and Wennberg, P. O.: The Total Carbon Column Observing Network, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369, 2087–2112, <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>, 2011a.

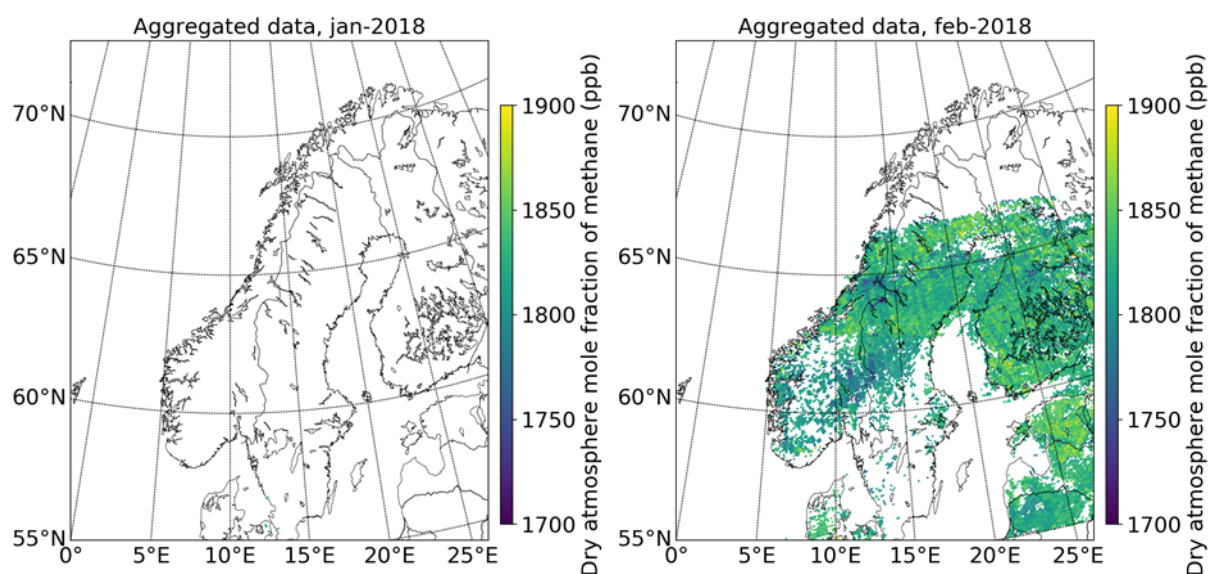
Vedlegg A

Månedskart av xCH₄

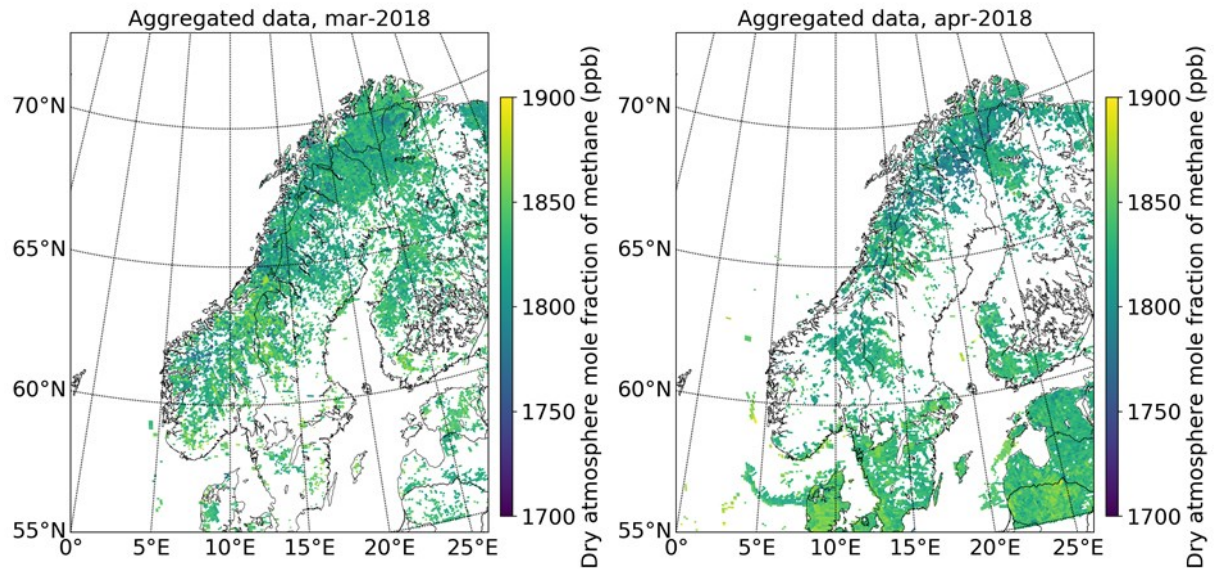
Vedlegg A - Månedskart av xCH₄

Månedssdata av xCH₄ for 2018 og 2019 er vist i Figur 9 - Figur 20. Variasjonene i dekningsgrad skyldes lav sol tidlig og sent på året, samt varierende skydekke. Der er eksempler på hot spotter, blant annet utaskjærs omkring 62°N, 5°E i mai og innenlands ved 65°N, 13°E og 66.5°N, 15°E i september, henholdsvis Figur 17 og Figur 19. Årsakene til de variasjoner og hot-spotter som sees kan være mange og det er ikke mulig å identifisere deres opphav uten videre analyse. En slik analyse må inneholde vurdering av usikkerheten til hvert målepunkt (f.eks. effekten av skyer i nærliggende piksler), videre må analysen inkludere blant annet kjemi-transport-modeller for å se på mønstre fra langtransportert metan, effekten av forskjellige kilde-scenarier, og ta hensyn til årlige variasjoner pga. av biologisk aktivitet. Data for desember vises ikke pga. ingen data for denne måneden.

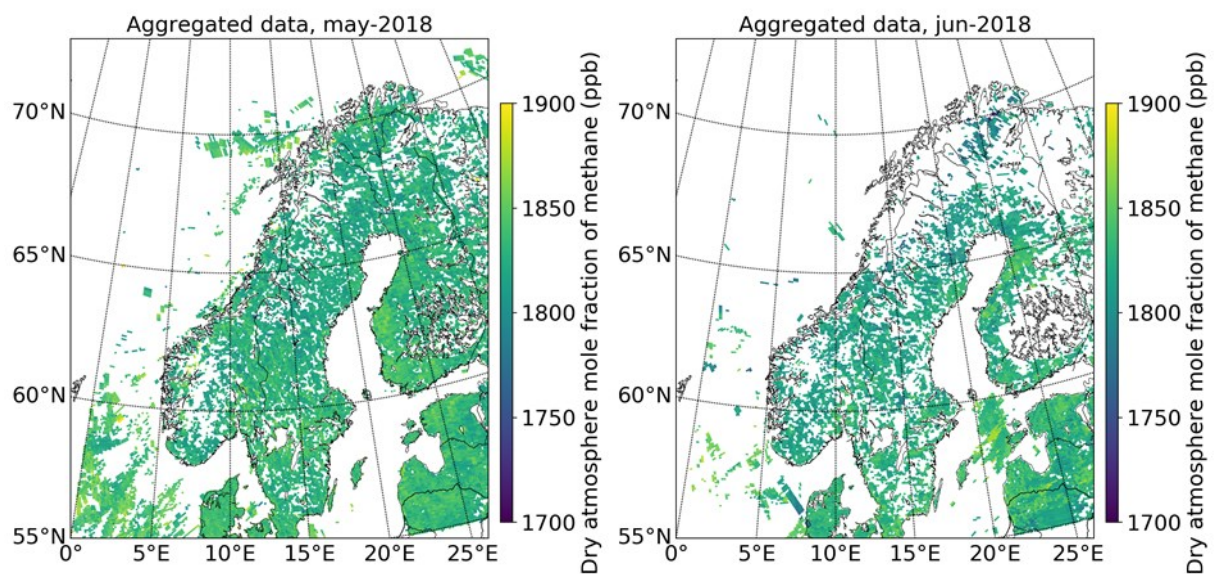
Figur 21 viser kart over olje og gass installasjoner på Norsk sokkel og norske landbaserte anlegg.



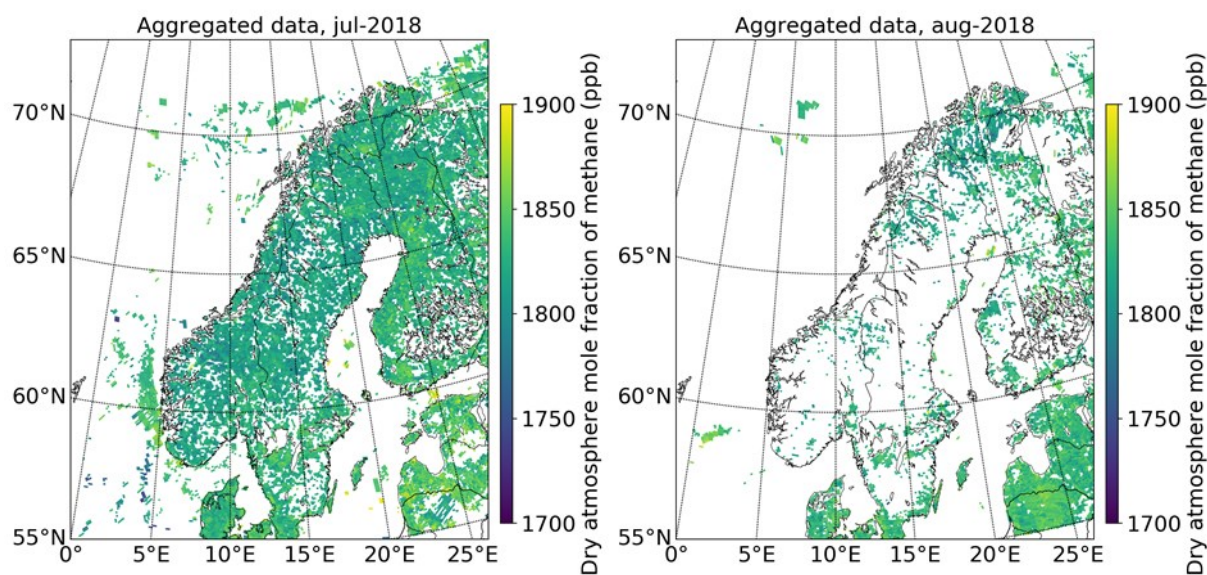
Figur 9: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH₄) for januar og februar 2018. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



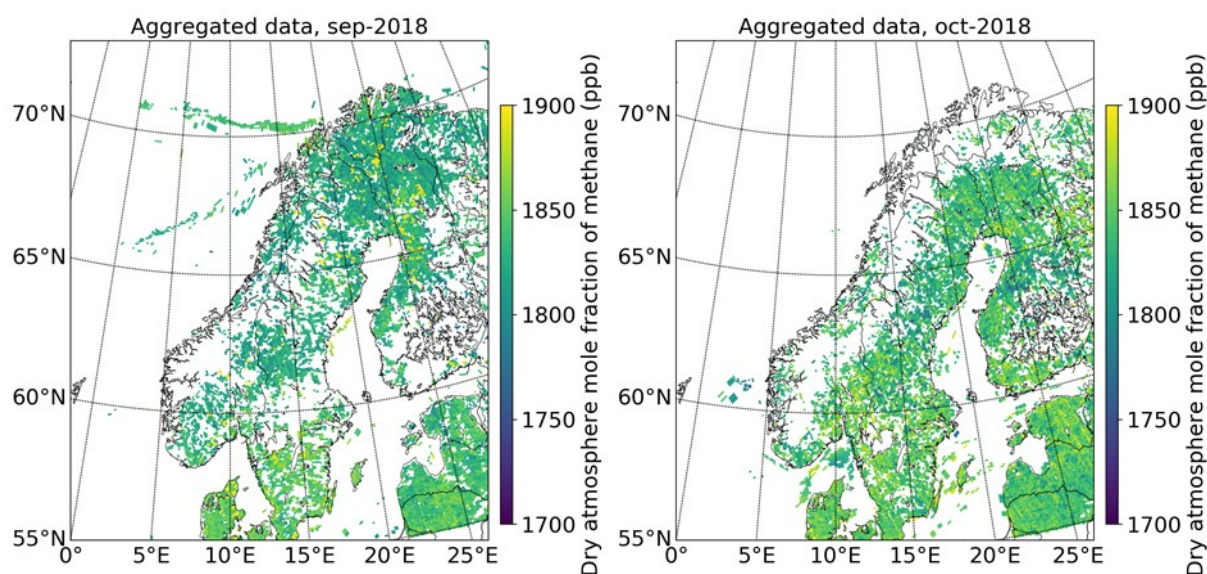
Figur 10: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for mark og april 2018. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



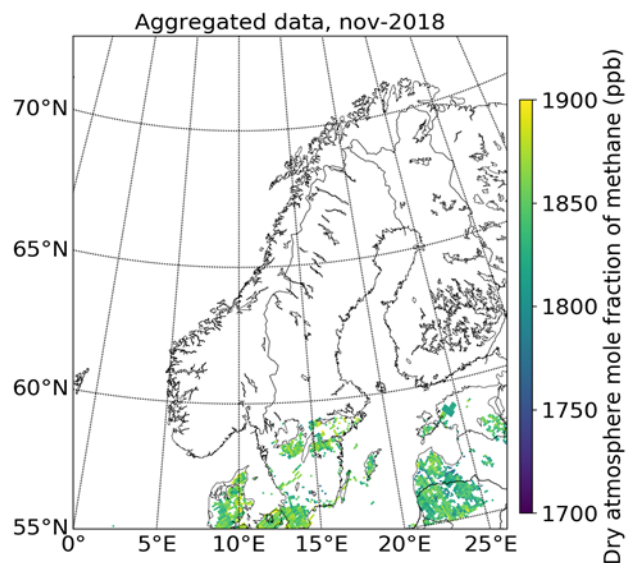
Figur 11: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for mai og juni 2018. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



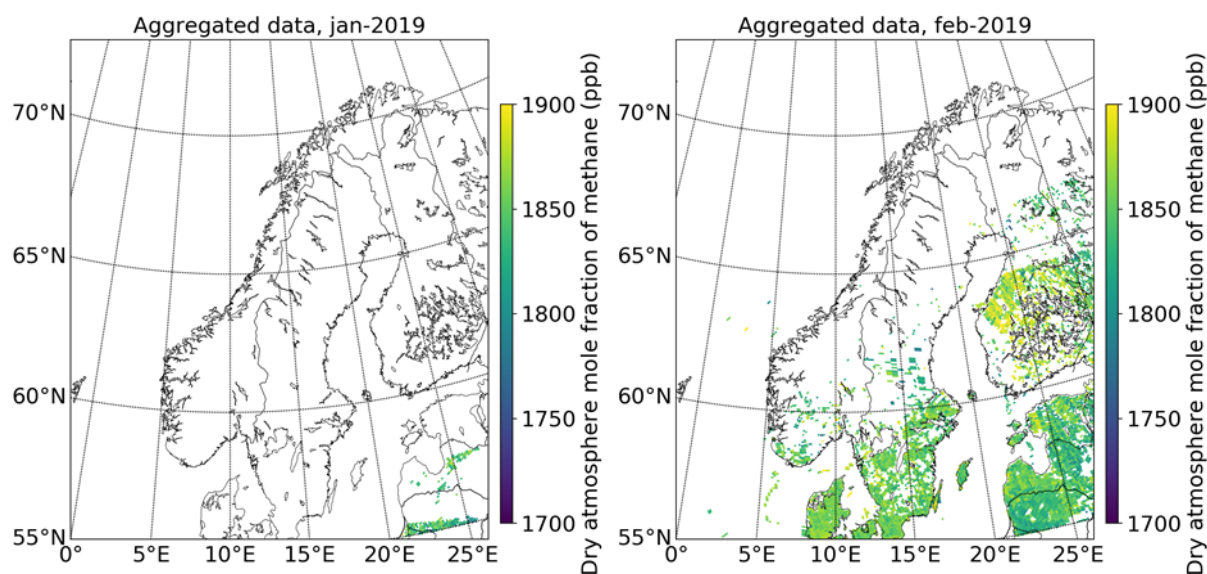
Figur 12: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for juli og august 2018. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



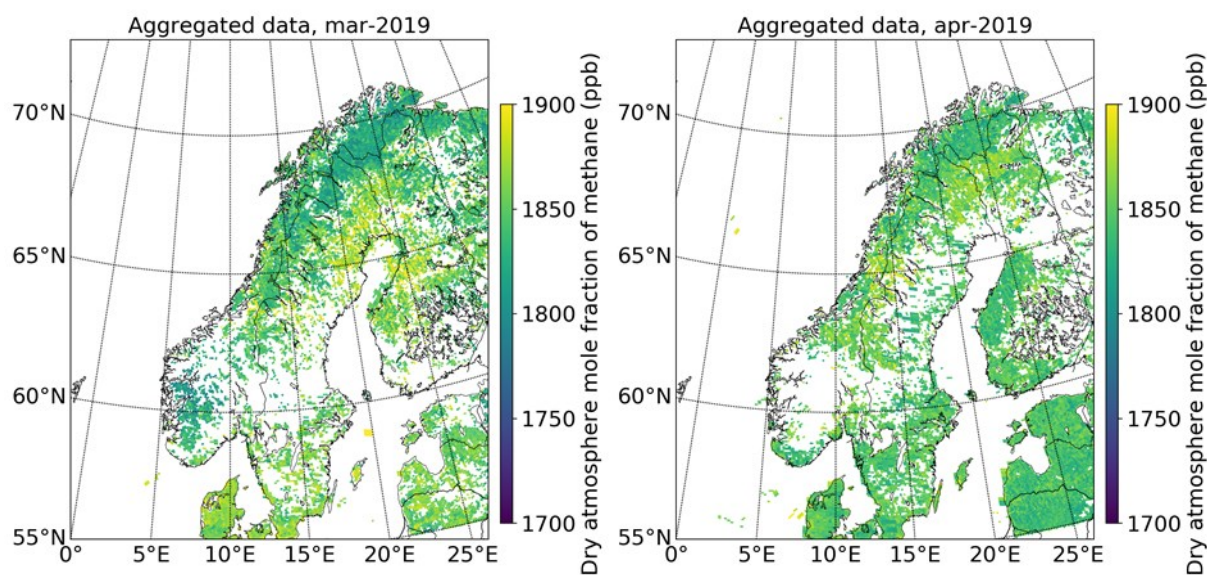
Figur 13: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for september og oktober 2018. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



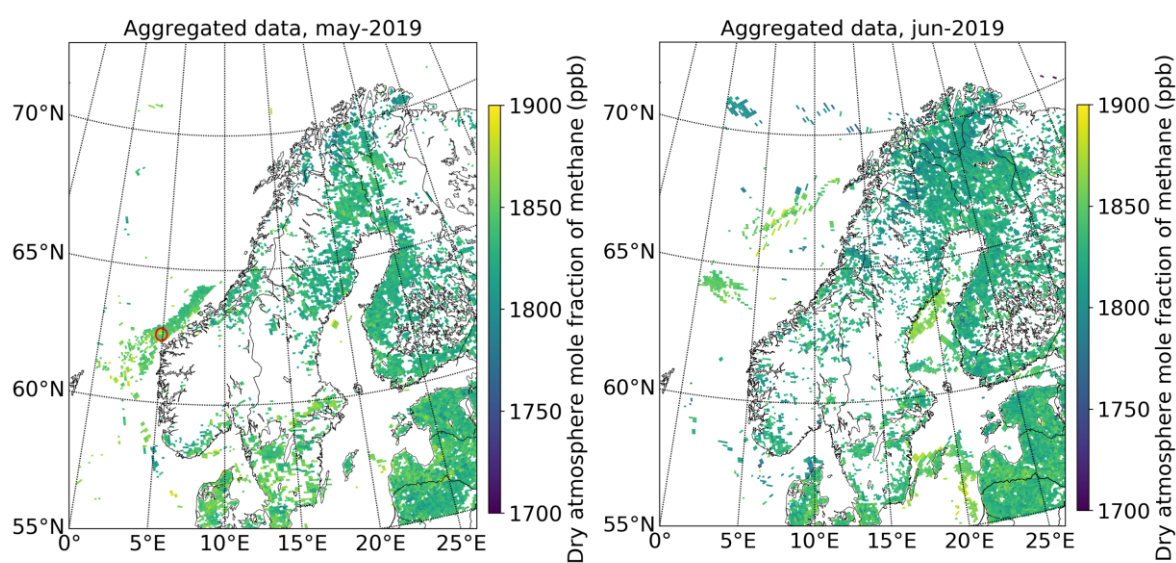
Figur 14: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for november 2018. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



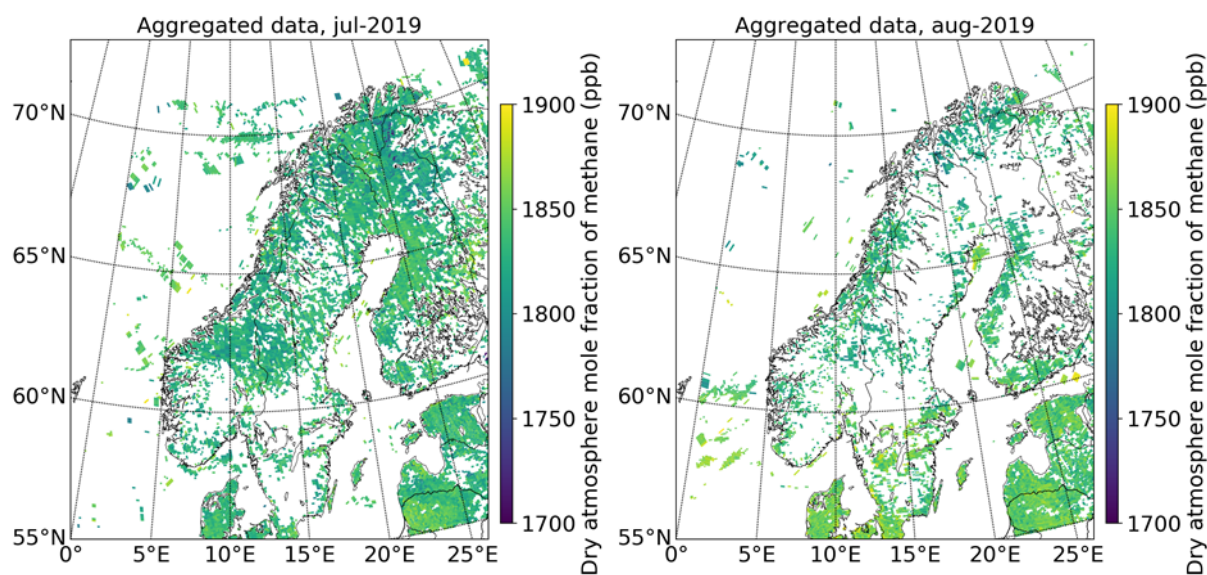
Figur 15: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for januar og februar 2019. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



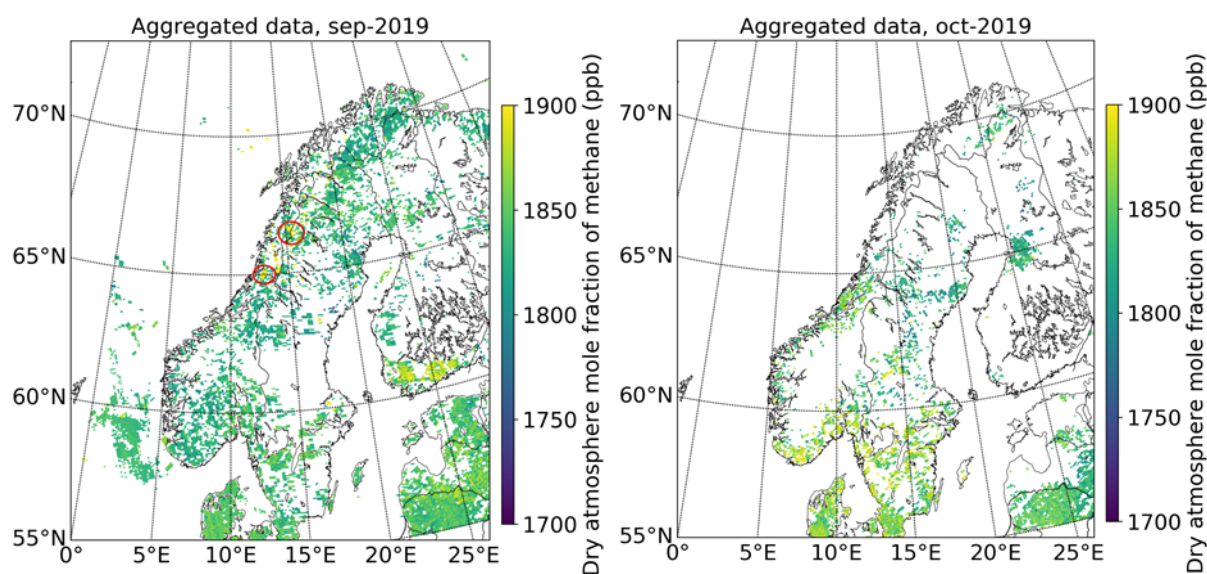
Figur 16: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for mars og april 2019. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



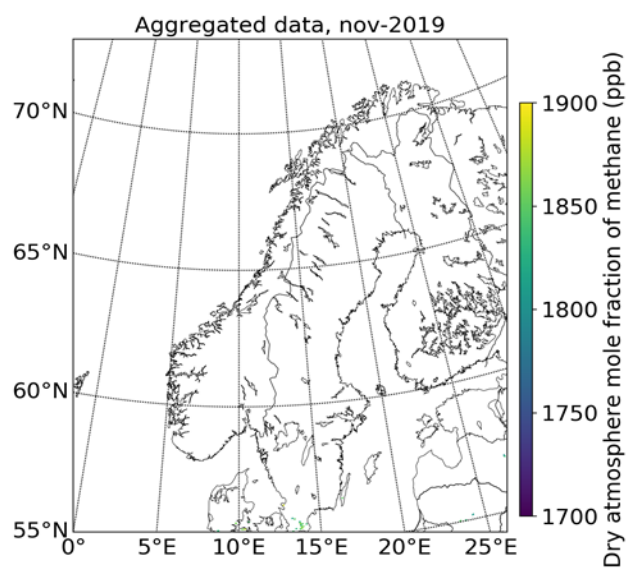
Figur 17: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for mai og juni 2019. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



Figur 18: : Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for juli og august 2019. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



Figur 19: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet (xCH_4) for september og oktober 2019. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



Figur 20: Månedlig tørr-luft metan kolonne tetthet ($\times\text{CH}_4$) for november 2019. Data analysert som beskrevet i Schneising et al. (2020).



Figur 21: Kart over olje og gass installasjoner på norsk sokkel og norske landbaserte anlegg. Blå firkanter viser undervannsinstallasjoner, sorte firkanter overflateinstallasjoner, grønne linjer viser oljerørledninger, og røde linjer gassrørledninger. Hentet fra https://factmaps.npd.no/factmaps/3_0/.

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, overvåking 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

<http://www.nilu.no>

ISBN: 978-82-425-3037-0

ISSN: 2464-3327