

# Kunnskapsstatus på metan

Rapport skrevet av CICERO Senter for klimaforskning på oppdrag av Miljødirektoratet

**Dato:** 11. april, 2018

**Forfattere:** Borgar Aamaas og Gunnar Myhre

**Kvalitetssikrer:** Terje Berntsen

M-1003 | 2018



## 1. Sammendrag

Vi har undersøkt kunnskapsutviklingen på klimaeffekten av metan siden FNs klimapanel lanserte den femte hovedrapporten i 2013. Blant de viktigste funnene er at metan absorberer kortbølget stråling i betydelig grad, noe som bidrar til å øke metans vektfaktorverdi med 14 %. Andre studier har undersøkt nøyere hvordan tilbakekoplinger mellom karbon og klima påvirker klimaeffekten av metanutslipp. FNs klimapanel estimerte den normaliserte vekt faktoren GWP(100) for metan til 28, men økte den til 34 når effekter fra karbonsyklusen ble inkludert. Denne tilleggseffekten er uavhengig av om utslippet er biologisk eller om metanet kommer fra fossile kilder. Med den nyeste kunnskapen og karbonsyklus inkludert har to studier estimert GWP(100) til å være 34 og 35.

FNs klimapanel skilte i 2013 mellom metanutslipp fra det raske og det sakte kretsløpet, altså mellom raske biologiske utslipp (på tidsskalaer opp til ca. 100 år) og andre utslipp, slik som fra fossile kilder (på tidsskalaer fra ca. 1000 år til millioner av år). Siden nedbrytning av metan fører til CO<sub>2</sub>, blir GWP(100)-verdien over livsløpet noe høyere for fossile utslipp og økes for disse utslippene fra 28 til 30. Denne forskjellen mellom fossile og biologiske utslipp av metan har i liten grad vært diskutert i forskningslitteraturen etter 2013. Vi har bare funnet én studie på vekt faktorer, og denne studien argumenterer for at den normaliserte vekt faktorverdien alltid er 2,75 høyere for fossile utslipp enn biologiske utslipp. Tallet 2,75 kommer fra forholdet mellom molekylvekten på CO<sub>2</sub> og molekylvekten for metan (44/16). Dette tallet gjelder for alle vekt faktorer og tidshorisonter. Vi ønsker å poengtere at de iboende usikkerhetene og endringene som er gjort i vekt faktorer mellom ulike hovedrapporter fra FNs klimapanel ofte gir større utslag enn differansen mellom vekt faktorverdiene for fossile og biologiske utslipp av metan.

Med de store usikkerhetene og oppdateringene som er gjort av vekt faktoren for metan gjennom de siste tiårene, samt at valg av tidshorisonter og valg av type vekt faktor har stor betydning, er vår vurdering at på nåværende tidspunkt er det viktigste i alle typer beregninger og kommunikasjon å være tydelig på valg av vekt faktor og hvilken kilde som er benyttet. En forskjell på 2 i vekt faktor for biologiske og fossile utslipp av metan slik FNs klimapanel (2013) anslår virker rimelig inntil ny vurdering kommer fra FNs klimapanel.

Den store usikkerheten for metan er at metanbudsjettet ikke er lukket, i den forstand at når man summerer opp beste estimat av enkeltkilder og sammenholder dette med det totale tapet og endringen i konsentrasjonen i atmosfæren, så er det betydelige avvik. Siden 2007 har metankonsentrasjonen i atmosfæren økt markert etter å ha vært nesten uendret siden 1990-tallet. Hvorfor dette har skjedd forstår vi ikke fullt ut. Noen studier finner at en økning i de biologiske utslippene er hovedårsaken, spesielt fra våtmarker i tropene. Andre studier argumenterer for at de fossile utslippene av metan også har økt. Det kan være sammensatte årsaker som har gitt økningen i metankonsentrasjonene, noe som bare mer forskning kan gi svaret på.

## 2. Innledning

Miljødirektoratet har bedt CICERO Senter for klimaforskning om en oppdatering av kunnskapsgrunnlaget for metan (CH<sub>4</sub>). De har tre spørsmål:

- Er det forskningsresultater etter AR5 som tilsier at det er en forskjell mellom metan fra biologiske prosesser og metan av fossil opprinnelse, og hva er det som utgjør denne forskjellen?
- Hvordan påvirker funnene i punktet over vektfaktorene for biologiske og fossile utslipp?
- Hva er kunnskapsstatus med hensyn til senere tids observerte økning i metankonsentrasjonen?

Vi svarer på disse tre spørsmålene i rekkefølge i avsnittene 4.1, 4.2 og 4.3.

## 3. Definisjoner

- Vektfaktor (emission metric): Hvor mye utslipp av en komponent påvirker strålingspådriv, temperatur eller andre klimaparametere ved en tidshorison per enhet utslipp. I normalisert form gir dette en vektning av klimaeffekten relativ til klimaeffekten av tilsvarende utslipp av CO<sub>2</sub>.
- GWP (Global Warming Potential): Vektfaktor som baserer seg på det akkumulerte strålingspådrivet. I normalisert form er dette den mest brukte vekt faktoren med en tidshorison på 100 år. Den absolutte formen forkortes til AGWP.
- GTP (Global Temperature change Potential): Vektfaktor som baserer seg på endring i global temperatur ved et gitt tidspunkt etter utslipp. I normalisert form vektetes dette mot temperaturresponsen ved samme tidspunkt for et tilsvarende utslipp av CO<sub>2</sub>.

## 4. Kunnskapsstatus på metan

### 4.1 Oppdatering på klimastatus av metan

#### 4.1.1 Status ved AR5

Vi vil først gjennomgå hva som var kunnskapsstatus på metan i 2013 da den femte hovedrapporten fra FNs klimapanel ble publisert. Dette inkluderer en kort gjennomgang av metansyklusen i atmosfæren og hvorfor metanutslipp fører til CO<sub>2</sub>.

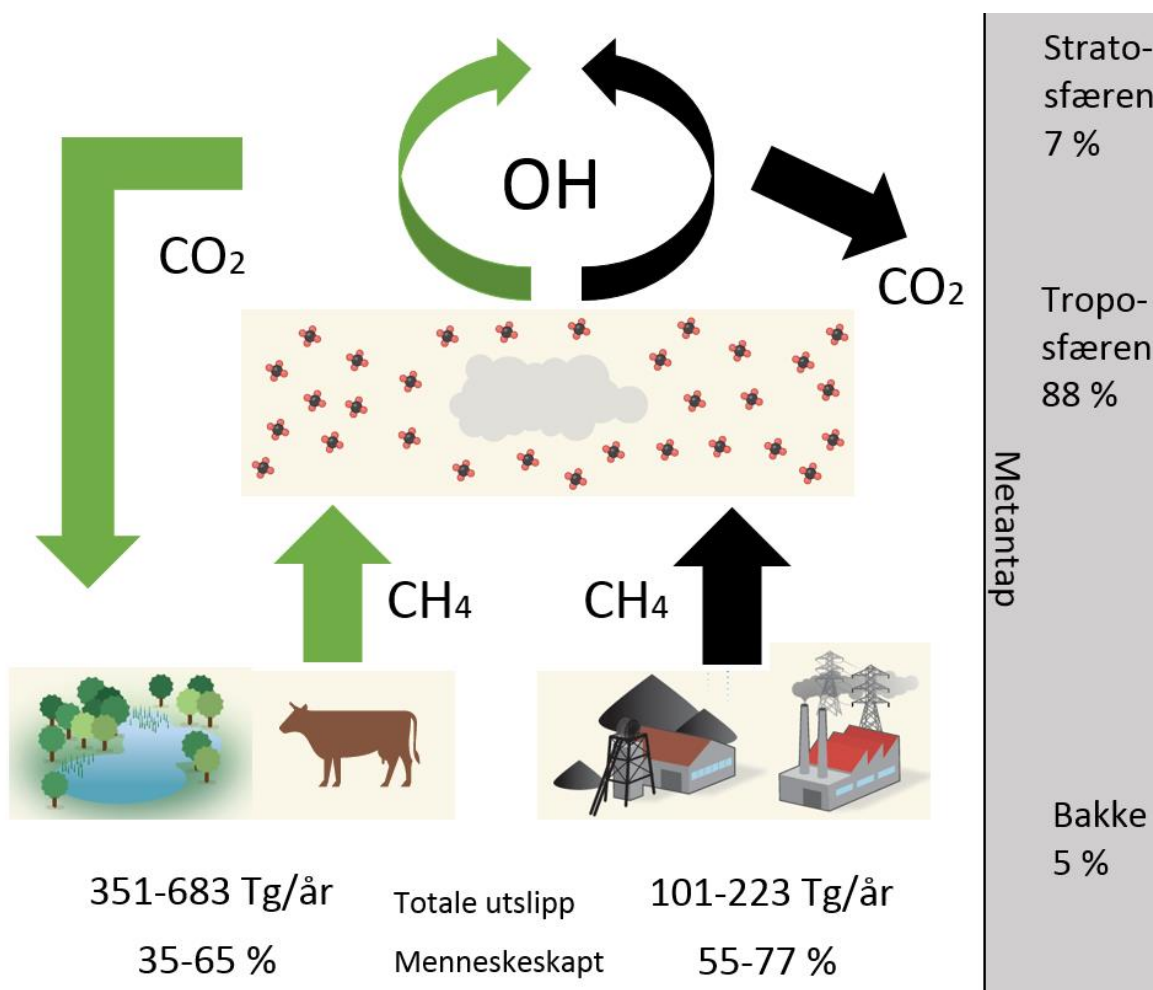
Metan er en drivhusgass med levetid på ca. 10 år i atmosfæren. Siden utslipp av metan har en positiv tilbakekopling på metans levetid, er den reelle levetiden ved en liten økning i metanutslipp 12,4 år (Myhre et al., 2013). Metans kretsløp består av både menneskeskapte og naturlige kilder, i tillegg til naturlige sluk (se figur 1). De menneskeskapte utslippene kan grovt sett deles inn i biologiske og fossile utslipp. Men det er en glidende overgang fra de raske biologiske syklusene (på tidsskalaer opp til ca. 100 år) til de lange fossile syklusene (på tidsskalaer på millioner av år). For eksempel hører de naturlige og menneskeskapte utslippene fra torv og permafrost (på tidsskalaer på noen tusen år) under biologiske, men klassifiseres som regel som fossile utslipp siden rotasjonstiden er mye lengre enn for de raske biologiske prosessene. Metan er en naturlig komponent i atmosfæren, hvor våtmarker, skog- og savannebranner og diverse andre naturlige kilder slipper ut metan. I tillegg fører produksjon og forbrenning av fossilt drivstoff, landbruk, avfall, og forbrenning av biomasse til metanutslipp. Ut fra vår nåværende forståelse kan vi ikke lukke metanbudsjettet, og det betyr at det er stor usikkerhet om hvor store de forskjellige utslippskildene

er. Ved å bruke to forskjellige måter for å kvantifisere de ulike kildene, «top-down» og «bottom-up», får vi ulike overslag. Om vi tar hensyn til begge metoder og kunnskapsgrunnlaget i 2013 (Ciais et al., 2013), er de totale utslippene fra biologiske prosesser i spennet 351-662 Tg CH<sub>4</sub> per år og fra fossile utslipp 109-223 Tg CH<sub>4</sub> per år. Disse tallene gjelder for summen av naturlige og menneskeskapt utslipp. De menneskeskapt utslippene står for 35-65 % av de biologiske utslippene og 55-77 % av de fossile utslippene. De fossile utslippene er ikke 100 % menneskeskapt siden noe metan kommer naturlig fra geologiske prosesser, hydrater og permafrost. Nyere forskning gir lignende overslag, og i figur 1 er spennene i overslagene noe større siden disse også inkluderer tall fra Saunio et al. (2016a). Metan fjernes naturlig gjennom tre ulike prosesser (Boucher et al., 2009). Det aller viktigste sluket er oksidering i troposfæren, i hovedsak ved OH (ca. 88 % av totalsluket) (se øvre del og høyre del av figur 1). Hvordan metan brytes ned til CO<sub>2</sub> er gitt i detalj med kjemiske ligninger i boks 1. I tillegg fjernes ca. 5 % av prosesser i jordsmonnet og 7 % omdannes i stratosfæren.

I et livsløpsperspektiv er det nødvendig å vite hvordan metan i atmosfæren brytes ned. En svært stor del av karbonatomene i metanmolekyler vil til slutt ende som karbonatomer i CO<sub>2</sub>-molekyler, men det er usikkert hvor mye. Boucher et al. (2009) anslår at alle metanmolekyler som splittes i stratosfæren til slutt lager CO<sub>2</sub>-molekyler. For prosessene i jordsmonnet gir de et spenn fra 0 til 100 % siden det her råder store usikkerheter. Mikrobiske prosesser vil første omdanne CH<sub>4</sub> til metylhydrogenperoksid og senere til formaldehyd. Noe av dette kan ende opp som organisk materiale, mens deler vil bli oksidert til CO<sub>2</sub>. Over lengre tidsskalaer (fra noen titalls år til noen hundre år), tidsskalaer i størrelsesorden som rotasjonstiden for karbon i jordsmonn, vil mye bli omdannet til CO<sub>2</sub>. Det er også usikkerheter for oksidering i troposfæren ved OH, hvor Boucher et al. (2009) anslår at mellom 50 og 100 % til slutt ender opp som CO<sub>2</sub>. Her er det flere veier med mange steg, hvor metan først kan omdannes til metylhydrogenperoksid, så til formaldehyd og videre til karbonmonoksid. Siden noe av disse stoffene deponeres på jordoverflaten eller vaskes ut av atmosfæren, vil ikke alt bli til CO<sub>2</sub>. Men materialet kan også frigis igjen fra jordsmonnet og havet som CO<sub>2</sub>. Det eksisterer lite litteratur på hvor mye av metanet som oksideres til CO<sub>2</sub>. Om vi bruker anslagene fra Boucher et al. (2009), får vi en nedre grense på 51 % og øvre grense på 100 %. Et overslag på 100 % betyr implisitt at vi ser bort fra at det tar tid fra metanutslippet til CO<sub>2</sub> dannes. Boucher et al. (2009) viser også at ved biologiske utslipp av metan fra drøvtyggere, rismarker og lignende kan vi tenke oss at det forhindrer utslipp av CO<sub>2</sub> siden dette kommer fra nytt organisk materiale som uansett hadde sluppet ut CO<sub>2</sub>. For eksempel spiser drøvtyggere gress som ellers kunne ha råtnet og frigitt karbon. Dette kan potensielt regnes med i vektfaktorverdier.

I den femte hovedrapporten fra FNs klimapanel (AR5) anslås strålingspådrivet til utslippene av metan til 0,97 Wm<sup>-2</sup>, mens for økningen i metankonsentrasjonen i atmosfæren er gitt til 0,48 Wm<sup>-2</sup> (Myhre et al., 2013). Forskjellen mellom disse to tallene ligger i at metanutslipp påvirker klimaet gjennom flere måter enn den direkte effekten og at andre typer utslipp også påvirker metankonsentrasjonen. Myhre et al. (2013) anslår at den normaliserte vektfaktoren GWP(100) for metan er 28. Men utslipp av metan påvirker karbonsyklusen på minst to måter helt uavhengig av hverandre, hvor den første gjelder for alle utslippskilder. GWP(100)-verdien økes til 34 om tilbakekoblinger mellom klima og karbon, altså at temperatur- og klimaendringer fra metanutslipp påvirker karbonkretsløpet, tas med i betraktning for metanresponsen. Den andre effekten er at metan oksideres til CO<sub>2</sub> (Boucher et al., 2009), noe som øker

GWP(100) fra 28 til 30 (Myhre et al., 2013). Denne ekstra effekten inkluderes stort sett bare for metanutslipp fra fossile kilder siden det er vanlig å bokføre biologisk CO<sub>2</sub> som karbonnøytralt. Dette grunngis med at biologiske utslipp av metan trolig kommer fra karbon som nylig ble lagret som en del av karbonsyklusen, med unntak av utslipp fra kilder som har en noe lengre rotasjonstid i karbonsyklusen slik som torv og permafrost. Siden det er usikkerheter i strålingspådrivet, hvor lenge utslippene av metan påvirker atmosfæren, indirekte effekter og hva som er den absolutte GWP verdien for CO<sub>2</sub> er det betydelige usikkerheter i GWP-verdien for metan. Myhre et al. (2013) anslår en usikkerhet på 30 % for GWP(100) og 40 % for GWP(20). Man bør også være klar over at GWP-verdien for metan har variert siden den første hovedrapporten fra FNs klimapanel ettersom forståelsen om prosessene har økt, med 21 som laveste GWP(100)-verdi (se tabell 1). Endringer i GWP skyldes både oppdateringer av AGWP for metan og AGWP for CO<sub>2</sub> siden GWP for metan er normalisert mot CO<sub>2</sub>.



Figur 1: En skjematisk fremstilling av metans naturlige og menneskeskapte utslippskilder og hvordan metanet brytes ned. De grønne pilene indikerer kretsløpet for metan fra biologiske utslipp som er en del av det raske karbonkretsløpet og de svarte pilene fossile utslipp av metan. CO<sub>2</sub> som dannes fra fossile utslipp av metan kan betraktes som annen fossil CO<sub>2</sub>, og dermed en del av det sakte karbonkretsløpet. For å gjøre figuren så enkel som mulig er det sakte karbonkretsløpet utelatt. Utslippsoverslag av metan er gitt for biologiske kilder til venstre og fossile kilder til høyre. Både naturlige og menneskeskapte utslipp er inkludert, hvor andelen menneskeskapte utslipp for disse kildene er gitt nederst i figuren. Det er et stort spenn i utslippsestimat siden metanbudsjettet ikke er lukket. Tallene presentert her kommer fra Ciais et al. (2013); Sauniois et al. (2016a). Til høyre vises hvor og hvor mye metan brytes ned basert på Boucher et al. (2009). Elementer fra figuren er tatt fra Allen (2016).

#### 4.1.2 Ny kunnskap siden AR5

Det er ingen vesentlige endringer på metansluk siden 2013, slik at funnene fra Boucher et al. (2009) om tapsprosessene står seg enda.

Siden den femte hovedrapporten fra FNs klimapanel har det kommet en rekke studier som ser på klimaeffekten av metan. GWP(100)-verdier fra disse forskjellige studiene er gitt i tabell 1. Vi vil først oppsummere denne nyere forskningen, og deretter gjennomgå nyere forskning på skillet mellom fossile og biologiske utslipp av metan.

Betydningen av tilbakekoplinger mellom karbon og klima for vektfactorer har blitt nøyere undersøkt av Gasser et al. (2017); Sterner and Johansson (2017). Dette er en annen effekt enn oksideringen av metan til CO<sub>2</sub> og må ikke blandes med diskusjonen om forskjeller mellom biologisk og fossilt metan. Bak GWP(100) i Myhre et al. (2013) på 28 ligger det en karbonsyklus for utslipp av CO<sub>2</sub>, men ikke for utslipp for metan. Gasser et al. (2017) påpeker at vanlig prosedyre må være enten å ta med karbonsyklus for begge eller ikke ta med for noen av gassene. Dermed finner Gasser et al. (2017) at vektfactorverdiene blir noe høyere når karbonsyklus for metan inkluderes, men at differansen er noe mindre enn vist av FNs klimapanel (Myhre et al., 2013), mens Sterner and Johansson (2017) estimerer en forskjell på linje med Myhre et al. (2013). Forskjellen mellom å ta med karbonsyklusen for både CO<sub>2</sub> og metan versus ikke å ta dem med i det hele tatt er enda mindre (Gasser et al., 2017). For eksempel for GWP(100) er økningen så liten at vektfactorverdien ikke endres. Vi kan dermed konkludere at de viktigste endringene fra Myhre et al. (2013) til Gasser et al. (2017) er oppdateringer av parameteriseringer og ny kunnskap om metan, noe som gir en GWP(100)-verdi på 34 uansett om karbonsyklus er med eller ikke.

En viktig bidragsyter til høyere vektfactorverdier for metan er funnene av Etminan et al. (2016) om at metan har et 25 % større strålingspådriv enn tidligere antatt. Hovedårsaken er at man har tatt hensyn til at metan absorberer også stråling i det kortbølgete spektret, altså solstråling, samt mindre oppdateringer i absorpsjonsdata. Siden metan har en del indirekte effekter, er den totale økningen for vektfactorverdier 14 % ifølge Etminan et al. (2016).

Det er få studier på fossilt i forhold til biologisk metan siden AR5. Muñoz and Schmidt (2016) argumenterer for at forskjellen i vektfactor mellom fossile og biologiske utslipp av metan er 2,75. Tallet 2,75 kommer fra forholdet mellom molekylvekten på CO<sub>2</sub> og molekylvekten for metan (44/16). Dette tallet gjelder for alle vektfactorer og tidshorisonter og Muñoz and Schmidt (2016) argumenterer med at det også er uavhengig av hvor mye av metanet som oksideres til CO<sub>2</sub>. Dette tallet er noe høyere enn i Boucher et al. (2009), da Boucher et al. (2009) vurderte at det ikke var alt av metan som ble brutt ned til CO<sub>2</sub>. Forskjellen er uansett liten og vi synes det er fornuftig å bruke forskjell på biologisk og fossilt metan utslipp slik som i IPCC (Myhre et al., 2013) inntil ny internasjonal vurdering gjøres. For vektfactorer betyr denne konstante forskjellen at differensieringen får større betydning når det er lave vektfactorverdier i utgangspunktet, slik som for GTP(500), enn for høye, slik som for GWP(20). Vi er ikke kjent med andre nyere studier på fossilt versus biologisk metan.

## 4.2 Vektfaktorer

Basert på de nye funnene beskrevet i 4.1 vil trolig vektfaktorverdiene for metan (se tabell 1) endres når sjettede hovedrapport fra FNs klimapanel skrives, men det vil også være avhengig av eventuelle nye funn i litteraturen de neste par årene. Disse endringene og de iboende usikkerhetene for GWP(100) og andre vektfaktorer er betydelige sammenlignet med forskjellen mellom vektfaktorer for biologiske og fossile utslipp av metan. Nye utregninger fra Gasser et al. (2017) basert på nyeste kunnskap om metan øker GWP(100)-verdien fra 28 til 34. Sterner and Johansson (2017) finner en verdi på 35 når tilbakekoplinger mellom karbon og klima er eksplisitt inkludert. En økning på 14 % fra vektfaktorverdier i Myhre et al. (2013) kan forklares med et sterkere strålingspådriv enn tidligere antatt. Til sammenligning viser Muñoz and Schmidt (2016) at forskjellen i vektfaktorverdi mellom biologiske utslipp og fossile utslipp av metan er 2,75, mot en avrundet forskjell på 2 for GWP(100) i Myhre et al. (2013). Denne differansen er relativt viktigere for vektfaktorer med lavere verdier, slik som GTP(100) og GTP(500). For eksempel estimerer Gasser et al. (2017) at GTP(100)-verdien for metan er 8. En forskjell på 2 har større relativ betydning om vektfaktoren er 8 sett opp mot 28. Forskjeller i vektfaktorer mellom utslipp av fossilt metan og biologisk metan har ellers ikke generert mye diskusjon i faglitteraturen de siste årene.

Med de store usikkerhetene og oppdateringene som er gjort av vektfaktoren for metan gjennom de siste tiårene, samt at valg av tidshorison og valg av type vektfaktor har stor betydning, er vår vurdering at på nåværende tidspunkt er det viktigste i alle typer beregninger og kommunikasjon å være tydelig på valg av vektfaktor og hvilken kilde som er benyttet. En forskjell på 2 i vektfaktor for biologiske og fossile utslipp av metan virker rimelig inntil ny vurdering kommer fra FNs klimapanel.

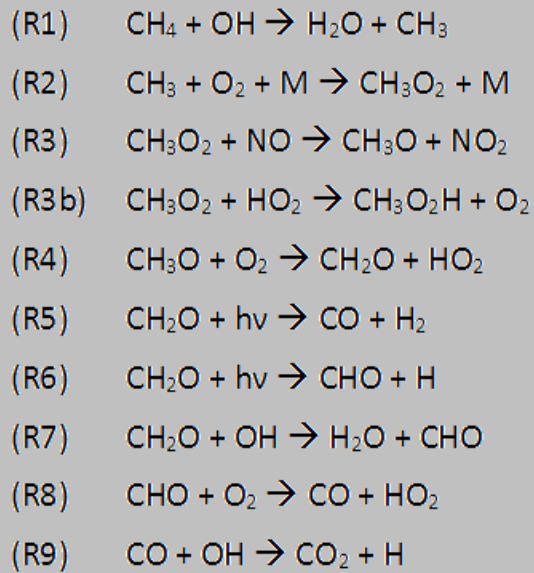
## 4.3 Økning siste 10 år og metanbudsjettet

En grunnleggende årsak til manglende forståelse av hvorfor metankonsentrasjonen i atmosfæren endrer seg er at det er usikkerhet knyttet til de enkelte utslippskildene og de samlede metanutslippene, samtidig som det er mange faktorer som sannsynligvis står bak endringene som har blitt observert (Saunio et al., 2016b). Fra 2007 har det vært en markert økning i konsentrasjonen av metan i atmosfæren, men det hersker stor usikkerhet om hvorfor. Fra 1990-tallet og frem til 2006 var metankonsentrasjonen nær konstant, noe som skyldes en balanse mellom utslippskilder og sluk (Nisbet et al., 2016). Forskningslitteraturen spriker i hvorfor økningen fra 2007 har skjedd. Noen studier diskuterer om mindre effektive sluk kan være en årsak, slik som en endring av OH-konsentrasjonen (f.eks. Dalsøren et al., 2016), men kommer frem til at dette ikke er en styrende faktor (Nisbet et al., 2016). Altså er det trolig at utslippene av metan har økt. En stor del av utslippene er naturlige eller fra biologiske prosesser, hvor man kan forvente store årlige variasjoner basert på sesongvariasjoner og internt variabilitet som El Nino, noe som gjør årsakssammenhengene enda mer komplekse. Men metan fra ulike utslippskilder kan skilles fra hverandre ved at isotopfordelingen varierer. Flere studier har sett på  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$  for metan i atmosfæren, som er et forholdstall mellom isotopene  $^{13}\text{C}$  og  $^{12}\text{C}$ . Metan fra olje og gassproduksjon, altså fossilt, har som regel mye av isotopen  $^{13}\text{C}$  i seg, mens metan fra biologiske prosesser slik som mikrobiell aktivitet har lite  $^{13}\text{C}$ . Basert på dette finner Nisbet et al. (2016) en økning for biologiske utslipp, spesielt fra våtmarker i tropene. De mener at de fossile utslippene av metan også kan ha økt noe, men ikke kan være den dominerende årsaken til økte metankonsentrasjoner. Schwietzke et al. (2016) kom frem til at utslippene fra fossile kilder ikke har økt og at det er biologiske utslipp som driver økning i metan det siste tiåret, men

at de totale fossile kildene er større enn tidligere antatt og dermed at biologiske kilder sannsynligvis er lavere. En annen studie (Worden et al., 2017) undersøkte brenning av biomasse og fant en reduksjon i utslippene fra dette siden 2006. For å få isotopverdiene til å gå opp argumenterer de for en økning i utslipp fra fossile kilder og biologiske kilder utenom brenning av biomasse. De ulike studiene er noe mer sikre på de totale metanutslippene, men usikkerhetene er langt større for hvor store de enkelte kildene er. Mer forskning er nødvendig for å fullt forstå hva som har skjedd med metan de siste årene (Saunio et al., 2016b). For det første må de naturlige kildene forstås bedre, hvor det i dag er stor forskjell om man sammenligner overslag basert på prosessmodellering og blandingsforhold i atmosfæren. For det andre må fordelingen mellom de ulike kildene og slukene kvantifiseres bedre. Dessuten må modelleringen av transport og kjemiske prosesser knyttet til nedbrytning av metan i atmosfæren videreutvikles.



## Vedlegg 1: Kjemiske ligninger



*Boks 1: Metan (CH<sub>4</sub>) brytes ned i atmosfæren til karbondioksid (CO<sub>2</sub>) via en rekke kjemiske reaksjoner. De mest sentrale ligningene som styrer dette er gitt her (Isaksen et al., 2011). Først oksideres CH<sub>4</sub> ved OH, deretter fortsetter prosessene ved hjelp av et luftmolekyl M (som regel N<sub>2</sub>). Sollys (hv) driver også de kjemiske prosessene. CH<sub>3</sub>O<sub>2</sub>H som dannes i R3b er vannløselig og kan felles ut med nedbør.*

## Vedlegg 2: GWP(100) for forskjellige studier

Tabell 1: GWP(100)-verdier fra hovedrapportene fra FNs klimapanel og fra relevante studier etter 2013. Felte for fossile utslipp er blankt for studier som ikke eksplisitt har gitt disse verdiene.

Studie	GWP(100)	
	Biologiske utslipp	Fossile utslipp
IPCC FAR (1990)	21	
IPCC SAR (1995)	21	
IPCC TAR (2001)	23	
IPCC AR4 (2007)	25	
IPCC AR5 (2013)	28	30
Muñoz and Schmidt (2016)	28	30,75
Etminan et al. (2016)	32	
Gasser et al. (2017)	34	
Sterner and Johansson (2017)	35	

## Referanser

- Allen, G. 2016. Rebalancing the global methane budget. *Nature* **538**, 46.
- Boucher, O., Friedlingstein, P., Collins, B. and Shine, K. P. 2009. The indirect global warming potential and global temperature change potential due to methane oxidation. *Environmental Research Letters* **4**, 044007.
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V. and co-authors 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* eds. Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen et al.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 465–570.
- Dalsøren, S. B., Myhre, C. L., Myhre, G., Gomez-Pelaez, A. J., Søvde, O. A. and co-authors 2016. Atmospheric methane evolution the last 40 years. *Atmos. Chem. Phys.* **16**, 3099-3126.
- Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E. J. and Shine, K. P. 2016. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters* **43**, 12,614-612,623.
- Gasser, T., Peters, G. P., Fuglestedt, J. S., Collins, W. J., Shindell, D. T. and co-authors 2017. Accounting for the climate–carbon feedback in emission metrics. *Earth Syst. Dynam.* **8**, 235-253.
- Isaksen, I. S. A., Gauss, M., Myhre, G., Walter Anthony, K. M. and Ruppel, C. 2011. Strong atmospheric chemistry feedback to climate warming from Arctic methane emissions. *Global Biogeochemical Cycles* **25**, GB2002.
- Muñoz, I. and Schmidt, J. H. 2016. Methane oxidation, biogenic carbon, and the IPCC’s emission metrics. Proposal for a consistent greenhouse-gas accounting. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **21**, 1069-1075.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, B., Fuglestedt, J. S. and co-authors 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* eds. Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen et al.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., Manning, M. R., Lowry, D., Fisher, R. E. and co-authors 2016. Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles* **30**, 1356-1370.
- Saunio, M., Bousquet, P., Poulter, B., Pregon, A., Ciais, P. and co-authors 2016a. The global methane budget 2000-2012. *Earth Syst. Sci. Data* **8**, 697-751.
- Saunio, M., Jackson, R. B., Bousquet, P., Poulter, B. and Canadell, J. G. 2016b. The growing role of methane in anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters* **11**, 120207.
- Schwietzke, S., Sherwood, O. A., Bruhwiler, L. M. P., Miller, J. B., Etiope, G. and co-authors 2016. Upward revision of global fossil fuel methane emissions based on isotope database. *Nature* **538**, 88.
- Sterner, E. O. and Johansson, D. J. A. 2017. The effect of climate–carbon cycle feedbacks on emission metrics. *Environmental Research Letters* **12**, 034019.
- Worden, J. R., Bloom, A. A., Pandey, S., Jiang, Z., Worden, H. M. and co-authors 2017. Reduced biomass burning emissions reconcile conflicting estimates of the post-2006 atmospheric methane budget. *Nature Communications* **8**, 2227.