

KULSTOF KREDSLØBET

Kap 3





INDHOLD

1	KULSTOFKREDSLØB	5
1.1	Jordens kulstofindhold	5
1.2	Arktisk tundra	7
1.3	Kulstofkredsløbet i områder med permafrost	9
1.4	Øget kulstofomsætning i fremtiden?	11



1 KULSTOFKREDSLØB

1.1 Jordens kulstofindhold

Variationer i kulstoffets kredsløb har i store dele af Jordens udviklingshistorie spillet sammen med variationen i klima og således været ansvarlig for livsbetingelserne på Jorden. Kulstoffet forekommer i alle dele af jordsystemet.

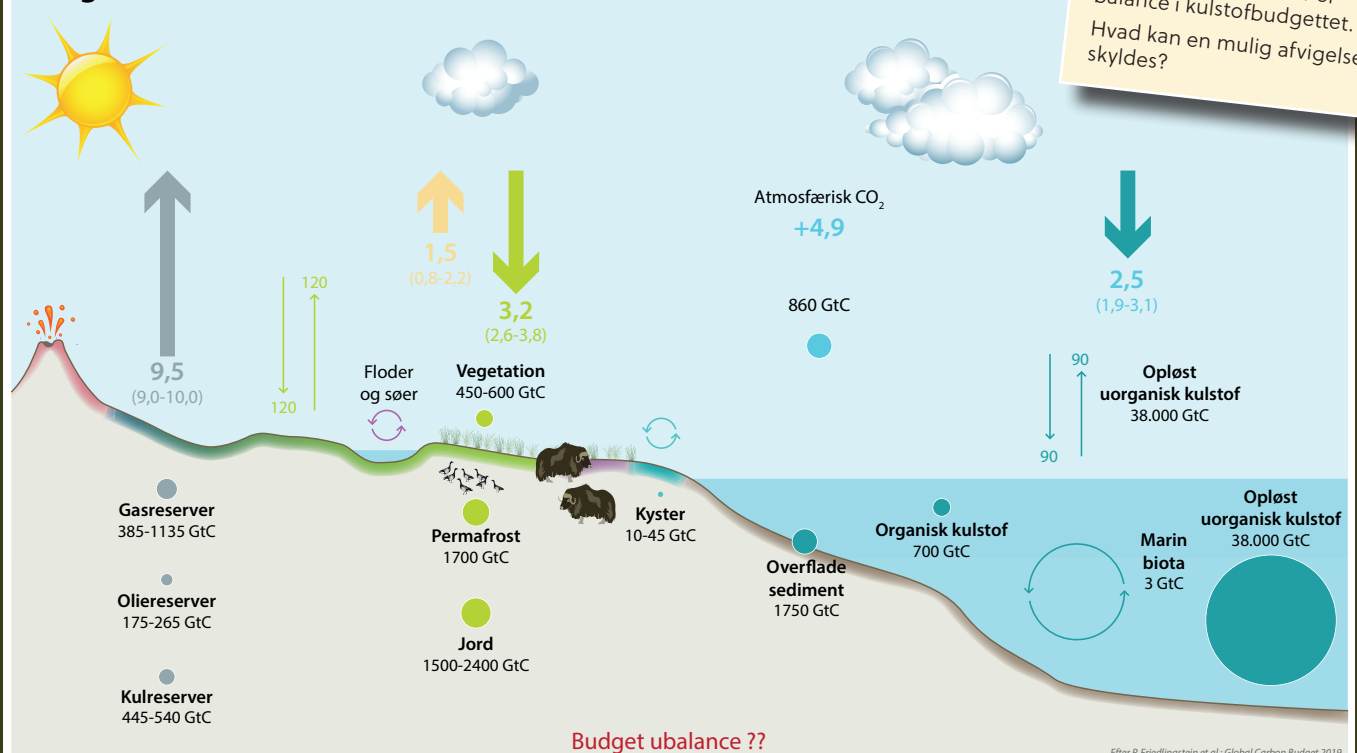
Helt overordnet drives kulstofkredsløbet af to modsatrettede biologiske processer, nemlig fotosyntese og respiration. Respiration, omdannelse og nedbrydning af organiske kulstof-forbindelse frigiver primært kuldioxid (CO_2) men også metan (CH_4) til atmosfæren.

Der er i øjeblikket bundet ca. 600 Gt kulstof i levende organismer på vores klode, langt den overvejende del i planter. Kulstof kommer ind i økosystemerne som CO_2 gennem fotosyntese, det vil sige målt som brutto økosystemproduktion (på engelsk: gross ecosystem product, GEP), og akkumuleres i økosystemet. Omtrent halvdelen af GEP respireres af planter for at understøtte vækst og vedligeholdelse og vender tilbage til atmosfæren (figur 1).

STORY
MAP

LÆS MERE OM KULSTOFKREDSLØBET HER

Det globale kulstofkredsløb



Efter P. Friedlingstein et al.: Global Carbon Budget 2019

Menneskeskabte strømninger 2009-2018 gennemsnitlig GtC pr. år



Figur 1 viser Jordens estimerede lagre af kulstof og den nuværende udveksling er vist med pile.

Der foregår følgende vigtige udvekslinger af kulstof med atmosfæren:

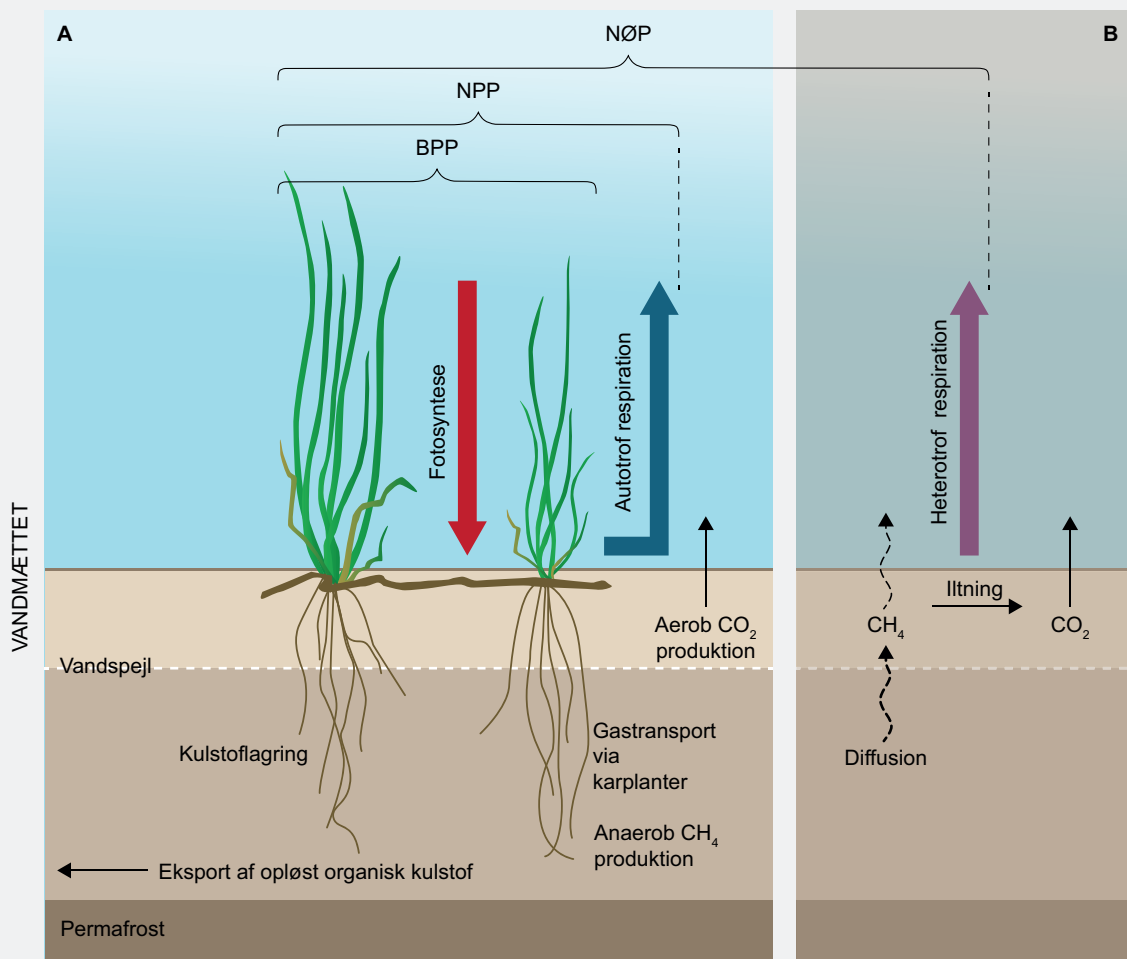
- Gennem fotosyntesen optager planterne på Jorden omkring 120 Gt kulstof årligt fra atmosfæren i form af CO_2 .
- Via respiration fra levende planter selv frigives ca. 60 Gt kulstof til atmosfæren i form af CO_2 .
- Gennem nedbrydning af dødt organiskmateriale bliver der årligt frigivet ca. 60 Gt primært i form af CO_2 , men en mindre del også som CH_4 til atmosfæren.
- Desuden er der i de øverste jordlag globalt oplagret op mod 2400 Gt kulstof i dødt organisk materiale. Afhængig af hvor dybt ned i den frosne jord man kigger, udgør tørv og dødt organisk kulstof i permafrost ca. 1700 Gt.

Desuden betyder forvitring af bjergarter, dannelse af kalkbjergarter og opbygning af koraller i oceanerne meget for kulstofkredsløbet i det lange tidsperspektiv. Generelt kan man om forvitningsprocesser sige, at de er langsomme, og virker over millioner af år. Omvendt kan f.eks. vulkanudbrud på få dage fremkalde en høj udledning af CO_2 . Den vulkanske

aktivitet er dog meget variabel og der kan derfor også være betydelige variationer i udledningen.

Netto-kulstofbalancen i terrestriske økosystemer kaldes netto-økossystem-produktionen (NØP), og er en dynamisk balance (figur 2). Den er defineret som forskellen mellem to store modsatte udvekslinger: brutto-primærproduktionen (BPP) og økosystemets samlede Respiration (R, planternes respiration og respirationen fra dyr og mikroorganismer): $\text{NØP} = \text{BPP} - \text{R}$. Den autotrofe respiration er den respiration som planterne foretager, mens den heterotrofe respiration foretages af dyr og mikroorganismer.

Normalt vil man inden for biologi opfatte en positiv NØP som et tegn på akkumulering af kulstof i økosystemet, men inden for økosystem kulstof-cyklus studier tager man udgangspunkt i atmosfæren. Det betyder, at når økosystemet optager mere kulstof fra atmosfæren, end det frigiver, så er NØP negativ. Om natten, hvor BPP er mindre end økosystemets respiration, vil NØP være positiv. Hver af komponenterne i NØP har forskellige relation til temperatur, fugtighed og lysforhold.



Figur 2. Kulstofkredsløbet i omgivelser med permafrost. Processerne: fotosyntese, autotrof respiration og heterotrof respiration er vist med pile. Netto-kulstofbalancen NØP, kaldes for økosystemets samlede netto produktivitet. NPP er økosystemets netto primærproduktion og BPP økosystemets brutto primærproduktion. I det aktive lag, som ikke er vandmættet foregår en bakteriel iltning af CH_4 til CO_2 som frigives til atmosfæren. Den autotrofe respiration, er den respiration som planterne foretager, mens den heterotrofe respiration foretages af dyr og mikroorganismer.

1.2 Arktisk tundra

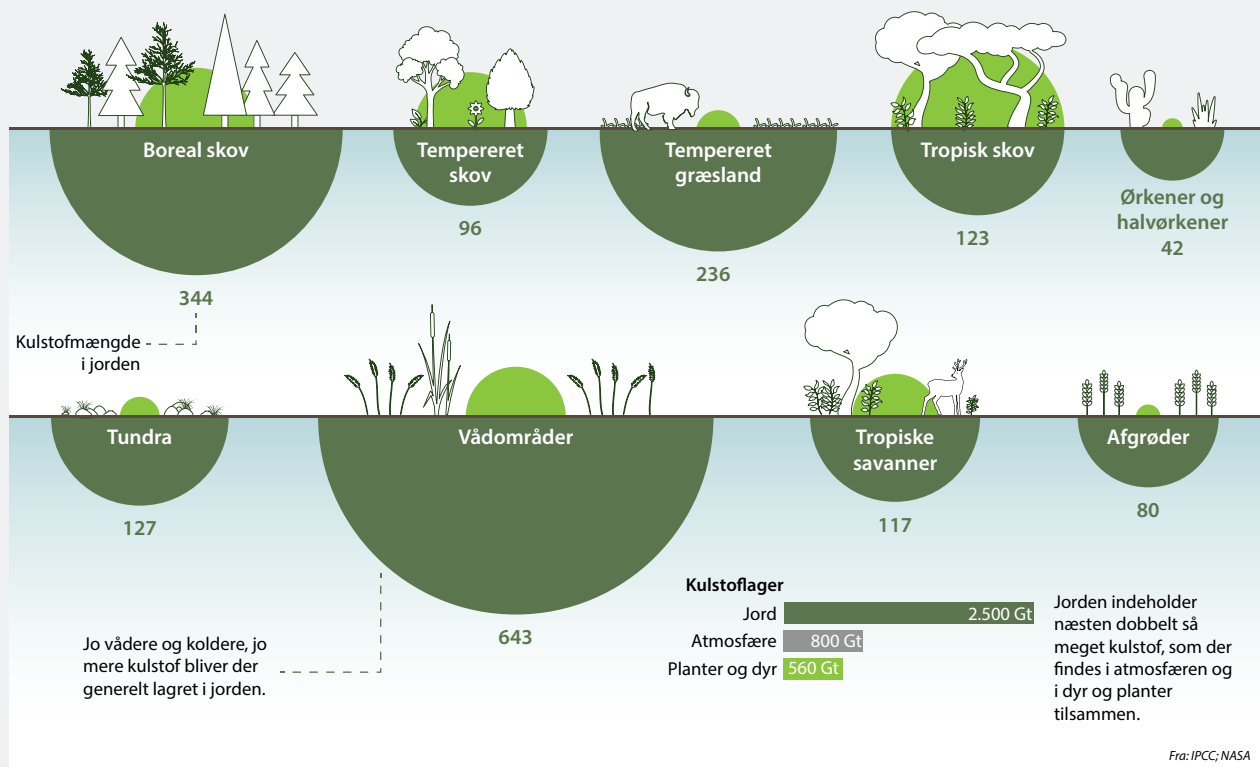
Den arktiske tundra er karakteriseret ved at være skovløse områder med en relativ lav mængde nedbør. Disse områder ligger primært på den nordlige halvkugle nord for den 50. breddegrad. Tundrajorde med permafrost har en frostfri periode på bare 2-3 måneder om året. Jorden her kan opdeles i forskellige lag, hvor det øverste lag er det såkaldte aktive lag. I det aktive lag nedbrydes og omdannes det organiske materiale. Det aktive lag opdeles i to jordzoner: en tør og en vandmættet. Under det aktive lag findes den egentlige permafrost, hvor der kun sker en lille omdannelse, fordi temperaturen året rundt under frysepunktet (figur 2).

På grund af den langsomme nedbrydning under lave temperaturer, rummer de arktiske tundraområder meget store depoter af kulstof (figur 3). Grunden til dette er, at den biomasse, der er dannet gennem vækstsæsonen f.eks. grene, blade og rødder, kun i ringe grad nedbrydes af mikroorganismer pga. de lave temperaturer, som findes i jorden. Tundrajorde kommer dermed til at spille en central og meget vigtig funktion som optager af CO₂.

Der er stor variation i indholdet af kulstof i jorden, og det skyldes et samspil mellem abiotiske faktorer som f.eks. nedbør, temperatur, ilt, næringsstoffer, jordtype, landskabsform, vegetationstype samt dræningstilstand. Generelt kan man sige, at jo koldere og vådere en jord er, jo bedre er den til at holde på kulstof.

I tundraområder med kantlyng og rypelyng findes hovedparten af kulstofpuljen i de øverste jordlag, mens kulstoffet er mere jævnt fordelt i jordbundsprøver fra våde kærømråder. I Zackenberg indeholder de fugtige kærømråder og nærliggende områder med pil i gennemsnit 12 kg C/m² i de øverste 50 cm af jorden, mens rypelyng- og kantlyngsområderne indeholder det halve. Yderligere beregninger viser, at kulstofindholdet i de øverste 50 cm af tundraen i gennemsnit er 50-100 ton/ha. Dette er langt den største pulje af kulstof, som indgår i kulstofkredsløbet i de arktiske økosystemer. Derfor kan selv små ændringer i disse puljer med tiden få stor betydning.

Kulstoflagring i verdens økosystemer (ton/ha)



Figur 3 viser hvor kulstof er oplagret i forskellige typer økosystemer i verden. Desuden vises forholdet mellem det overjordiske og underjordiske lager. De lysegrønne halvcirkler angiver mængden af kulstof i dyr og planter, de mørkegrønne halvcirkler angiver kulstoflagrene i jorden.

Den tørre tundra er karakteriseret ved, at tilgængeligheden af ilt er stor, og derfor kan der ske aerob nedbrydning af det organiske materiale i jorden. Ved denne omsætning af det organiske materiale sker der en produktion af CO_2 , som frigives til atmosfæren.

I modsætning til den tørre tundrajord, så bevirker de vand-mættede våde tundrajorde dels at ilt kun langsomt trænger ned i jordlaget og dels, at det tager længere tid at varme jorden op. Vand er længere tid om at blive varmet op end fjeld og tør jord. Det betyder alt i alt, at omsætningen af det døde organiske materiale går langsommere og at en væsentlig del af omsætningen foregår uden ilt, altså anaerobt. Resultatet bliver, at de såkaldte metanogene mikroorganismer nedbryder det organiske materiale under anaerobe (iltfrie) forhold, og derfor dannes der metan (CH_4). I jorden kan CH_4 omdannes til CO_2 af andre mikroorganismer, men hvis først CH_4 har forladt jordmiljøet, så sker denne nedbrydning kun langsomt.

1.2.1 Permafrost

Den del af jordlaget som ikke tør hvert år, kaldes for permafrost og dækker 55 mio. km^2 eller ca. 25 % af alle landarealer på den nordlige halvkugle. I arktiske egne med kontinuerlig permafrost kan dybden af permafrostlaget være op til flere hundrede meter. Permafrostlaget indeholder store mængder af organisk materiale som følge af pålejring af dødt organisk materiale gennem flere tusinde år (figur 1).

Permafrost frembringer specielle levevilkår for planterne og for hele økosystemet. Det aktive lag er særlig vigtigt, for det er her planterne kan gro. Dybden af det aktive lag er bestemt af luftens temperatur, snedække, vegetation, dybden af jordlaget og indhold af forskellige materialer. Den årlige variation i det aktive lags dybde er hovedsagelig bestemt af lufttemperaturen om sommeren. I områder med permafrost er vegetationen i stand til at klare betydelige variationer i dybden af det aktive lag, og nogle planter har f.eks. udviklet elastiske rødder som en tilpasningsmekanisme.

Ingen plantearter er afhængige af permafrost. Tilstedeværelsen af permafrost har dog en stærk indflydelse på, hvilken type vegetation der findes i de forskellige økosystemer, som er under indflydelse af permafrost.

Permafrostens fysiske påvirkning kan bl.a. medføre udtørring i nedbørsfattige perioder, hvor der ikke er kontakt med grundvand. Helt modsat er situationen i perioden efter snesmeltning, hvor jorden ofte er overmættet, fordi vandet ikke kan dræne ned i jorden. Permafrosten betyder derfor, at planterne udsættes for meget omskiftelige forhold i løbet af et år.

Permafrosten er derfor vigtig for den højarktiske natur. Midt på sommeren må man grave dybere og dybere for at nå ned til den permanent frosne jord i Nordøstgrønland. I midten af 1990'erne lå jordens frosne lag i ca. 50 cm dybde. Nu skal man næsten en meter ned for at finde den frosne jord.

Når permafrosten tør, skaber det umiddelbare forstyrrelser i landskabet, som har indflydelse på processerne i jorden og i vegetationen. Et eksempel på et højarktisk område med permafrost, som ændrer sig, kan man finde ved Zackenberg i Nordøstgrønland. I området har man oplevet pludselig optøning og såkaldt termokarst-erosionsformationer. Disse formationer dannes som resultat af en forstyrrelse af balancen i permafrosne jorde som følge af ændringer af klimaet. Temperatur, vegetation og vandgennemstrømning ændres og skaber eksponering af den frosne jord, og derved dannes termokarstområder med jordsammenstyrtninger til følge. Disse områder kan så med tiden fyldes med vand, som fryser om vinteren og derved arbejder, så jorden revner yderligere, og der dannes søer og damme.

Termokarst: når iskiler i jorden tør, kan smeltevand fremskynde yderligere smeltning. Jorden kollapser og skaber derved et netværk af små fordybninger, huller og kløfter. Foto: Maria Scheel.



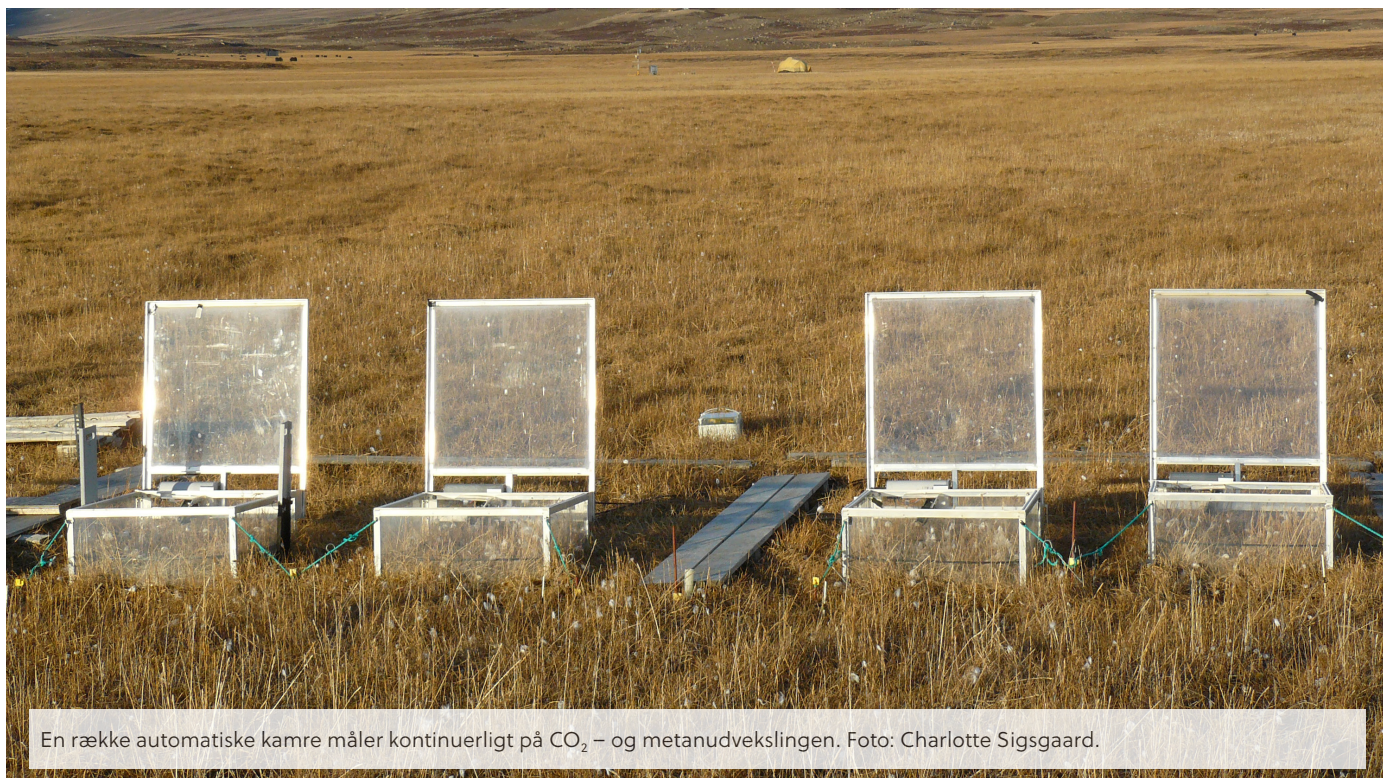
1.3 Kulstofkredsløbet i områder med permafrost

Kulstoflageret i permafrost er omkring dobbelt så stort som atmosfærens indhold af CO_2 (figur 1). Dette kulstoflager er i den grad påvirkelig overfor global opvarmning og permafrostens optøning.

Undersøgelser fra en række forskellige permafrostområder har sået tvivl om, hvorvidt permafrostområder stadig fungerer som optager af atmosfærisk CO_2 eller måske er skiftet til at have rollen som kilde og dermed tilføre atmosfæren CO_2 . Hovedparten af studierne, både de eksperimentelle og også de model-baserede, angiver på nuværende tidspunkt at permafrostområder optager mere CO_2 end de frigiver. Denne balance er dog sårbar og hvis de klimatiske forhold ændres til fordel for heterotrofisk respiration, så kan permafrostområder potentielt blive store kilder til frigivelse af CO_2 .

Balancen mellem frigivelse og optag af CO_2 og CH_4 er en meget væsentlig faktor for atmosfærens indhold af drivhusgasser. Denne balance er afhængig af den vegetationstype, som findes på lokaliteten. Almindeligvis vil forårets og sommerens lange dage med midnatssol betyde, at fotosyntesen og dermed den organiske produktion af kulstof er høj. Altså

optager tundraen på dette tidspunkt mere CO_2 end den frigiver, dog således at dage med overskyet vejr eller sne kan forrykke denne balance til fordel for respiration og CO_2 -frigivelse. Selvom balancen mellem optag og frigivelse af CO_2 er direkte afhængig af fotosyntese og respiration, som en naturlig konsekvens af udviklingen af plantedækket, så påvirker andre



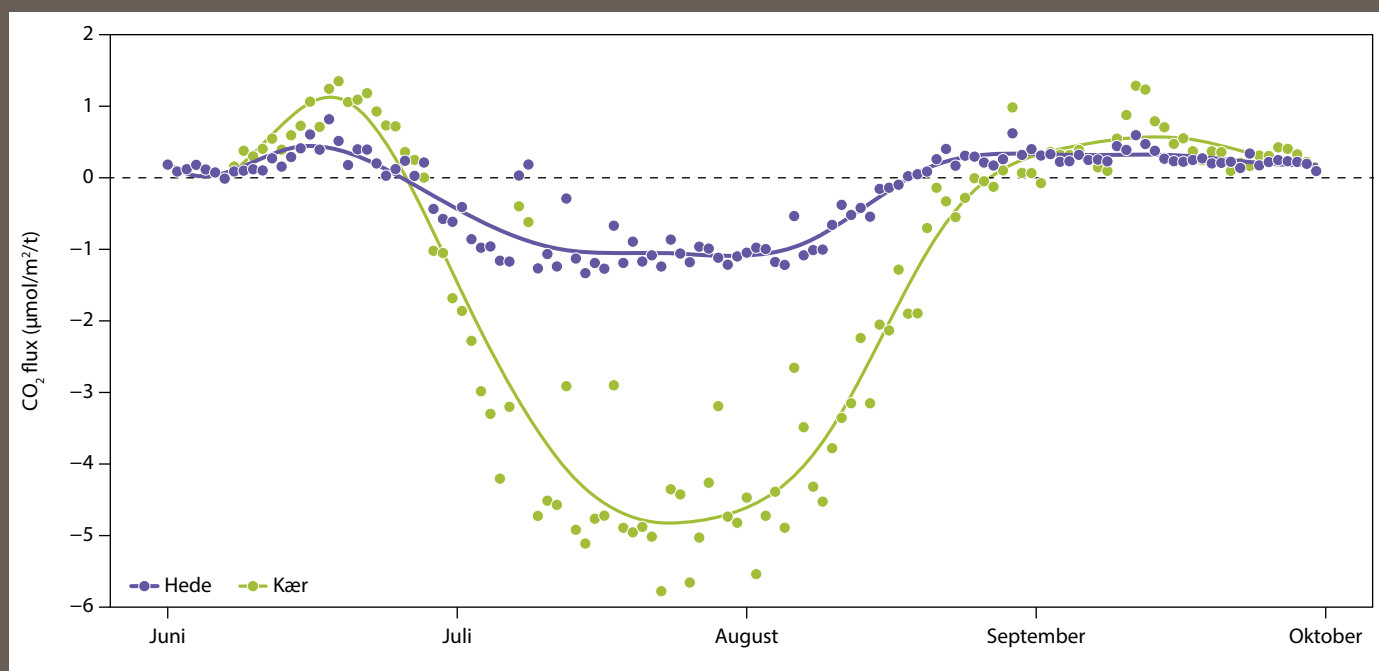
En række automatiske kamre måler kontinuerligt på CO_2 – og metanudvekslingen. Foto: Charlotte Sigsgaard.

dele af de arktiske økosystemer også dette forhold. Det drejer sig om forskellige planteædere, som lemminger, gæs, ryer og moskusokser, som påvirker vegetationen fysisk direkte ved græsning, således at balancen mellem fotosyntese og respiration, og dermed mellem optag og frigivelse af CO_2 , CH_4 og vand. Undersøgelser fra Zackenberg har vist at gæs og moskusokser i løbet af kort tid kan ændre et kærområde fra at være CO_2 -optagende til at blive CO_2 -frigivende, f.eks. ved intensiv græsning.

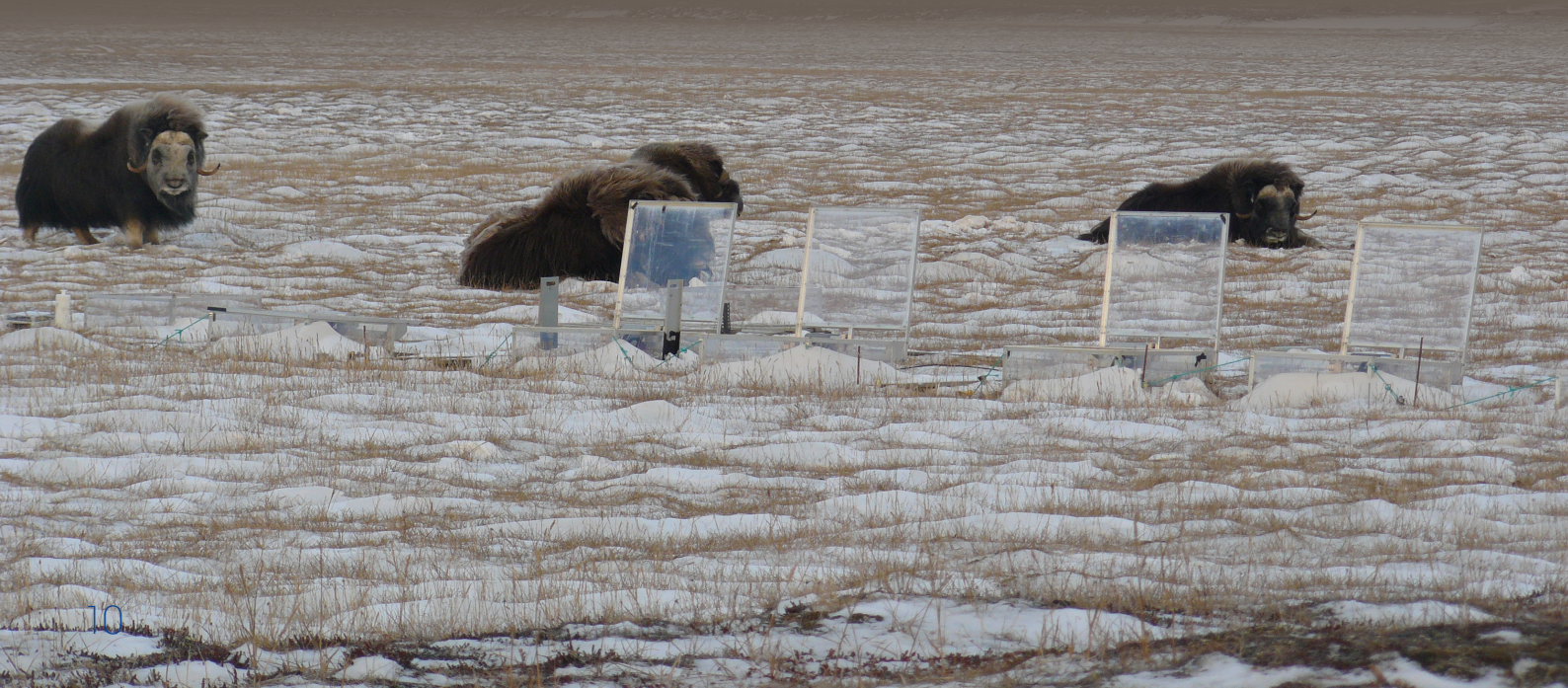
En årsvariation i CO_2 ses tydelig (figur 4). Om sommeren er der således et større optag af CO_2 end den mængde, der frigives. Modsat er det om efteråret og vinteren, hvor frigivelsen af CO_2 er større end optaget.

STORY
MAP

LÆS MERE OM PERMAFROST HER



Figur 4. viser CO_2 balancen for to målestationer i Zackenbergdalen i 2016. En af stationerne står i et hedeområde, mens den anden står i et vådområde (kær). Prikkerne viser gennemsnitsværdier for udledning (positiv flux) og optag (negativ flux) for hver dag i felt sæsonen. De to kurver tydeliggør både et sæsonmønster i udledning og optag, og at der er stor forskel i vegetationens primærproduktivitet og respiration i de to områder.



1.3.1 Metanavgivelse fra permafrost

Mængdemæssigt er CO_2 den drivhusgas, som spiller den største rolle for kulstofskiftet mellem økosystemer og atmosfæren. Men også en anden drivhusgas er kraftigt involveret i kulstofkredsløbet og den heterotrofiske respiration, nemlig metan (CH_4). I klimasammenhæng er metan en væsentlig mere potent drivhusgas end CO_2 per gram, fordi den "fanger" omkring 25 gange mere varme i atmosfæren end CO_2 .

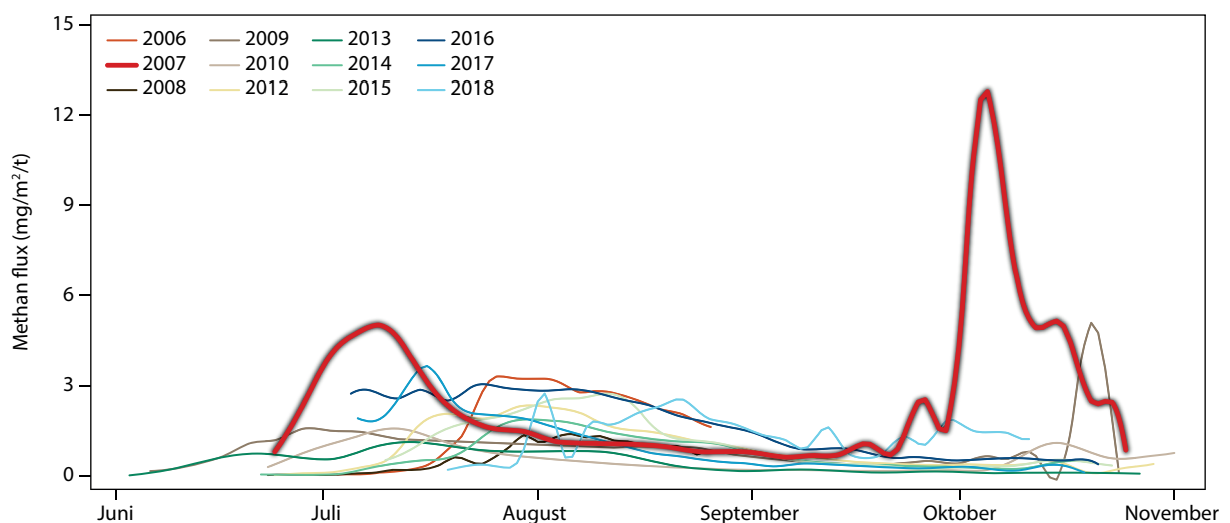
Metanproduktionen i terrestriske arktiske økosystemer og den naturlige frigivelse af denne kraftfulde drivhusgas til atmosfæren har tiltrukket sig en stærk naturvidenskabelig interesse i forbindelse med klimaændringerne. Områder med permafrost har længe været kendt som en signifikant bidragsyder til atmosfærisk metanproduktion via mikrobiel nedbrydning af det organiske materiale (dekomposition) under anaerobe forhold. Nettofrigivelsen af metan fra våde permafrost jorde er et resultat af transport og balance mellem produktion og konsumtion af metan. Mens metan produceres i iltfrie jorde, så oxideres forbindelsen i iltrige jorde. Denne iltning sker via mikrobielle processer og sker i tørre jorde med det resultat, at der optages metan fra atmosfæren. Mikrobiel metanoxidation i jorde kan repræsentere et terrestrisk dræn for atmosfærisk metan og processen kan i nogen udstrækning opveje balancen mellem metanproduktion og -fjernelse fra områder, hvor tørre tundralandskaber dominerer.

Ofte er permafrostområder kendetegnede ved at være våde, hvorved de anaerobe forhold opstår i det stillestående vand.

I disse iltfrie (anaerobe) omgivelser dannes metan ved den mikrobielle proces metanogenese. Metandannelse følger et kompleks sæt af økosystemprocesser, som begynder med den primære fermentation af organiske makromolekyler som amylose, proteiner og fedtstoffer til eddikesyre, alkohol, CO_2 og hydrogen. Den primære fermentation følges op af den sekundære fermentation af alkohol og karboxylsyre til acetat, hydrogen og kuldioxid, som fuldstændig kan omdannes til metan af de metandannende mikroorganismer.

Den anaerobe metanproduktion er mere påvirkelig over for temperaturændringer end den aerobe optagelse og oxidation. Mekanismen bag dette er ikke klart forstået, men konsekvensen for økosystemerne er klar og tydelig: fremtidig opvarmning af jorden uden andre ændringer som f.eks. ændring af nedbør, vil accelerere metanfrigivelsen (produktion af CH_4 > optagelsen af CH_4). På kort sigt betyder det at den opvarmning af jorden, der sker nu, vil resultere i en større metanfrigivelse. På den lange bane vil den indirekte effekt af opvarmningen af permafrost jorde derfor betyde ændringer i vandbalancen, vegetationen og i kulstofkredsløbet.

Resultater fra forskningsstation Zackenberg viser, at der i vinterperioden siver store mængder drivhusgasser ud af den frosne arktiske tundra. I nogle år er udsivningen højere om vinteren end om sommeren. Området omkring Zackenbergdalen er et af de koldeste i Arktis (med en gennemsnitstemperatur omkring eller under -20°C i en stor del af vinteren). Det kan derfor vække undren, at der i nogle år i oktober-november siver betydelige mængder drivhusgasser ud fra tundraen og op i



Figur 5 viser metanudvekslingen over felt sæsonen i Zackenbergdalen i perioden 2006-2019. Målingerne starter, når sneen smelter, og varer ind til felt sæsonens ophør i oktober-november. Mellem de enkelte år varierer metanfluxens størrelse og timing. Metanfluxen i 2007 er fremhævet her, fordi den meget tydeligt viser to toppe – en top cirka tre uger efter snesmelting, og en anden top i forbindelse med frysning af jorden i den tidlige vinter. Med pilene kan du skifte mellem graferne og årstal.



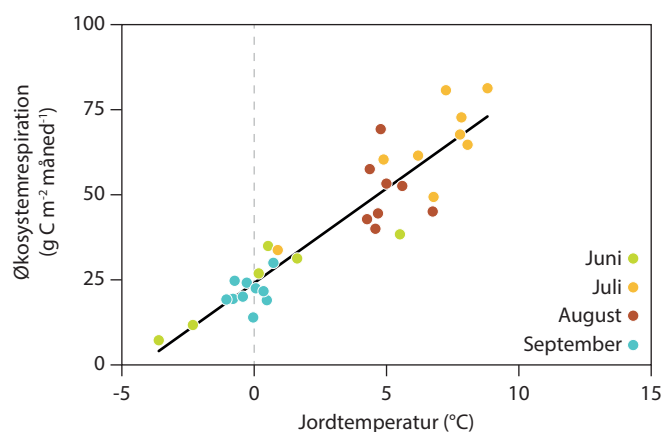
Polar-kæruld er almindelig i hele Grønland. Planten vokser bla. på våd tørvebund ved søer, damme og langs vandløb.

1.4 Øget kulstofomsætning i fremtiden?

Et centralt spørgsmål er stadig, hvordan balancen mellem optag og frigivelse af kulstof bliver i en fremtid med klimaændringer. På forskningsstation Zackenberg har man gennem længere tid forsøgt sig med at undersøge omsætningsprocesserne i jorden. Ved en generel opvarmning øges både fotosyntese- og respirationsprocesserne, mens ændrede nedbørsforhold også vil få en stor betydning. Ved Zackenberg er der således gennemført opvarmningsforsøg og eksperimenter, hvor man har tilført ekstra nedbør. Opvarmningen har vist en øget CO_2 frigivelse på mere end 30 % mens tilførsel af vand på nogle vegetationstyper også medfører øget frigivelse af CO_2 , uden at kulstofbindingen ved fotosyntese påvirkes. Dermed kan temperatur og nedbør både hver for sig og samlet påvirke kulstofregnskabet.

Forskerne har også indsamlet borekerner fra forskellige områder i tundraen ved Zackenberg forskningsstationen. Man har så løbende målt på frigivelsen af CO_2 fra frosne borekernerne under optøning. Disse målinger har vist, at når permafrostkernerne tør, frigiver de CO_2 på samme niveau som det aktive jordlag. Dermed kan tundraens permafrostlag frigive store mængder CO_2 under forårets og sommerens optøen. Umiddelbart efter tørbrud om foråret er CO_2 -frigivelsen overraskende høj. Det viser sig at etableringen af denne CO_2 -puls sker ved en produktion i løbet af vinteren foretaget af jordens mikroorganismer. Denne puls fanges i den frosne jord og frigives først, når jorden begynder at tø. Denne forårspuls er tydelig i figur 4. Eksperimenter viste samtidig at mikroorganismer fra Zackenberg har ca. 20 % af deres optimale aktivitet omkring frysepunktet og, at de er aktive ned til omkring -18 grader.

atmosfæren, selvom den arktiske tundra på det tidspunkt er ved at gå i vinterdvale. Det er forventeligt, at hovedparten af både produktionen og frigivelsen af CH_4 sker i løbet af planternes vækstsæson i den korte arktiske sommer. Målingerne har undret forskerne, da de enzymatiske processer i mikroorganismerne i jorden burde køre på et lavt niveau om vinteren. Hvad kan forklaringen være? Dels ser det ud til at nedbrydningsprocesser kan foregå ved selv meget lave temperaturer, og dels tyder det på, at metan presses ud af tundraen, når jorden fryser. Metanreservoiret fra den foregående sommerperiode udtømmes til atmosfæren i løbet af efteråret. En sådan pludselig stigning af metan om efteråret ser ud til at hænge direkte sammen med områder, hvor der forekommer permafrost. Selv efter at jorden er frosset helt til, stopper metanproduktionen ikke. Det ser ud til at metan presses ud af tundraen gennem stænglerne i polar kæruld (se foto til herover), som står som tilbage fra den netop afsluttede vækstsæson. Disse stængler er hule og fungerer som "skorstene" for udslip af metan til atmosfæren. Dette eksempel på pludselige og uventede udslip om vinteren viser, hvor dårligt vi stadig kender disse processer i Arktis. Man kan kun spå om, hvor mange andre overraskelser, der venter, når forskerne efterhånden får flere data.



TAG MED I RYGSÆKKEN:

- 1** Store mængder kulstof i arktiske økosystemer er lagret i jorden.
- 2** Udvekslingen af CO₂ mellem økosystemerne og atmosfæren er en følsom balance mellem fotosyntese og respiration.
- 3** Permafrost, konstant frosne jorde, indeholder også store mængder kulstof og er udsat for optøning i et varmere klima som kan frigive mængder af CO₂ og metan til atmosfæren.
- 4** I våde arktiske tundra jorde produceres metan som en del af respirationen. Denne metan udgør en vigtig global kilde til atmosfæren.
- 5** Metanudslip fra arktis forventes at stige med opvarmingen men udslippene er komplekse og bliver styret af både fysiske og biologiske processer.
- 6** Generelt er forståelsen af processerne som styrer mulige udslip af drivhusgasser fra arktiske jorde ikke fuldt beskrevet og forskningen arbejder på højtryk for at vi skal bedre kunne forudsige fremtiden.

LÆS MERE HER: