



Tema

Kulstofkredsløbet i Arktis



Kulstofkredsløbet i Arktis

Af Torben Røjle Christensen¹, Svend Erik Nielsen³,
Marie Frost Arndal¹ og Katrine Raundrup²

¹ Aarhus Universitet, Department of Ecoscience.

² Grønlands Naturinstitut, Nuuk.

³ Frederiksborg Gymnasium og HF

© Forfatterne. Aarhus Universitet.

Layout: Trine Sejthen

Omslagsfoto: Lars H Hansen

Alle rettigheder forbeholdes.

www.gem.dk

Bogen er udviklet med støtte fra:
Novo Nordisk Fonden, NNF20OC0062439.



Læs mere om kulstofkredsløbet her



Tema

Kulstofkredsløbet i Arktis

Indhold

1 Jordens kulstofindhold	4
2 Arktisk tundra med og uden permafrost	6
Permafrost	9
Ingen plantearter er afhængige af permafrost.	9
3 Kulstofkredsløbet i områder med permafrost	10
Metanfrigivelse fra permafrost	11
4 Øget kulstofomsætning i en varmere fremtid	14

Jordens kulstofindhold

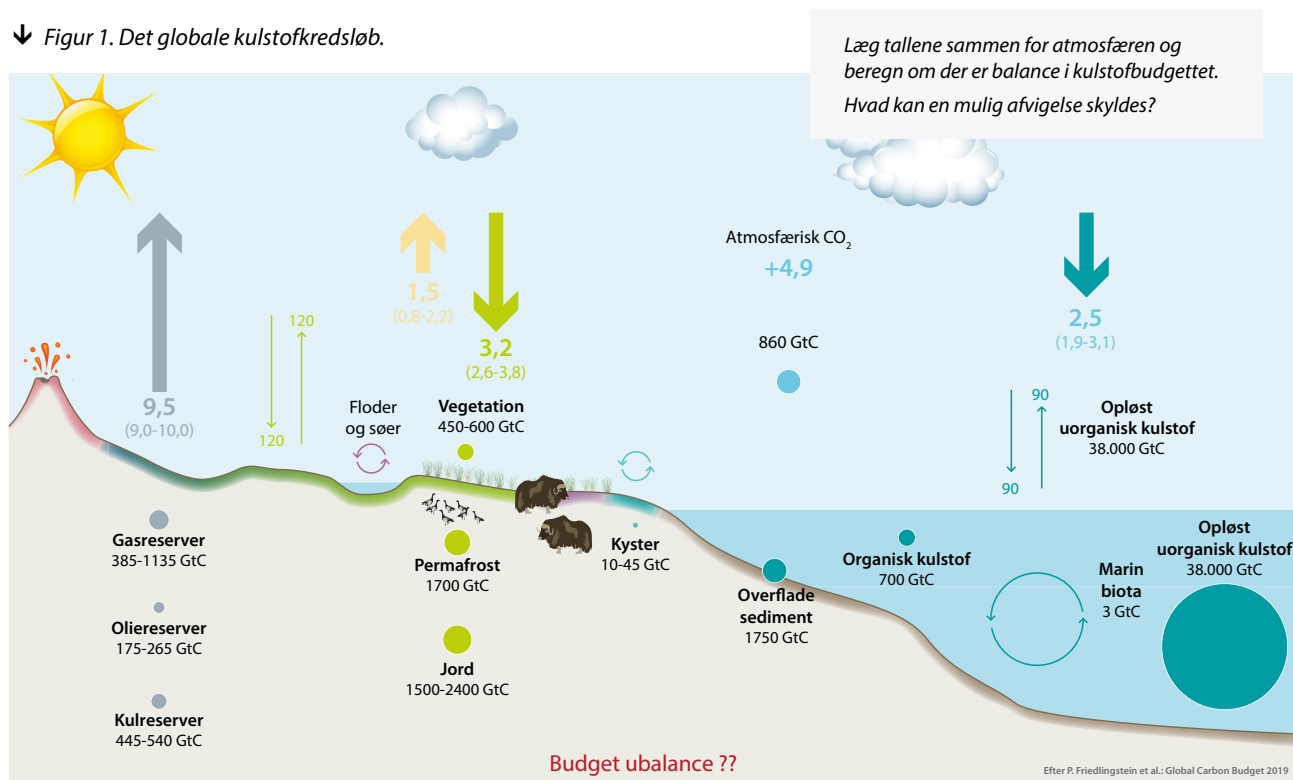
Kulstof (C) findes i alle dele af jordsystemet, dvs. i luften, vandet og i alt det levende. Variationer i kulstoffets kredsløb har i store dele af Jordens udviklingshistorie spillet sammen med variationer i klima og været ansvarlig for livsbetingelserne på Jorden.

Helt overordnet drives kulstofkredsløbet af to modsatte biologiske processer, nemlig fotosyntese og respiration. Ved fotosyntese optager planter kuldioxid (CO_2) fra atmosfæren og omdanner den til sukkerstoffer. Respiration, omdannelse og nedbrydning af organiske kulstofforbindelser frigiver primært CO_2 men også metan (CH_4) til atmosfæ-

ren. Hvis organiske kulstofforbindelser nedbrydes ved tilstedeværelsen af ilt (O_2), så udledes der CO_2 . Hvis organiske kulstofforbindelser nedbrydes uden tilstedeværelsen af ilt, så udledes der CH_4 .

På verdensplan er der bundet ca. 600 Gt kulstof i levende organismer, og langt det meste findes i planter. Kulstof kommer ind i økosystemerne som CO_2 gennem fotosyntese, det vil sige målt som brutto økosystemproduktion (BØP) og akkumuleres i økosystemet. Omkring halvdelen af BØP respireres af planter (dvs. planterne bruger sukkerstofferne, der blev dannet ved fotosyntese til vækst og vedligeholdelse) og vender tilbage til atmosfæren (figur 1).

↓ Figur 1. Det globale kulstofkredsløb.



Menneskeskabte strømninger 2009-2018 gennemsnitlig GtC pr. år



Fossil CO_2 E_{FF}



Landoptagelse S_{LAND}



Ændring af arealanvendelsen E_{LUC}



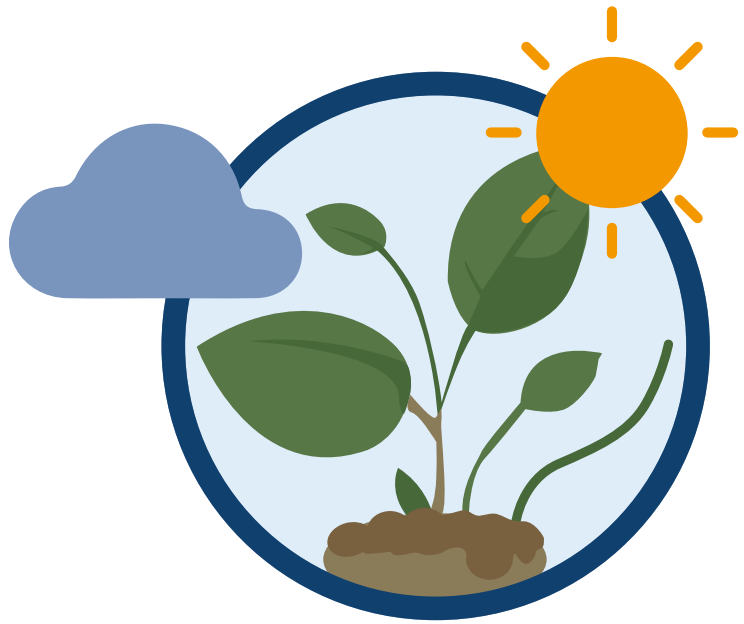
Havets optagelse S_{OCEAN}

+ Atmosfærisk stigning G_{ATM}

■ Budget ubalance B_{IM}

↑ Kulstofcyklus GtC per år

● Beholdning GtC



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 CO₂. Fotosyntese: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2$.

Via respiration fra levende planter selv frigives ca. 60 Gt kulstof til atmosfæren i form af CO₂. Respiration: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Gennem nedbrydning af dødt organisk materiale bliver der årligt frigivet ca. 60 Gt hovedsageligt i form af CO₂, men også en mindre del som CH₄ 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 kalk-bjergarter og opbygning af koraller i oceanerne meget for kulstofkredsløbet i det lange tidsperspektiv.

Generelt kan man om forvitringsprocesser[?] sige, at de er langsomme og virker over millioner af år. Omvendt kan f.eks. vulkanudbrud på få dage fremkalde en høj udledning af CO₂. Den vulkanske aktivitet er dog meget skiftende, og der kan derfor også være betydelige variationer i udledningen.

Netto-kulstofbalancen i terrestriske[?] økosystemer kaldes netto-økosystem-produktionen (NØP), og er en dynamisk balance (figur 2). Den er defineret som forskellen mellem to store modsatrettede 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 det, som planterne laver, mens den heterotrofe[?] respiration laves af dyr og mikroorganismer.

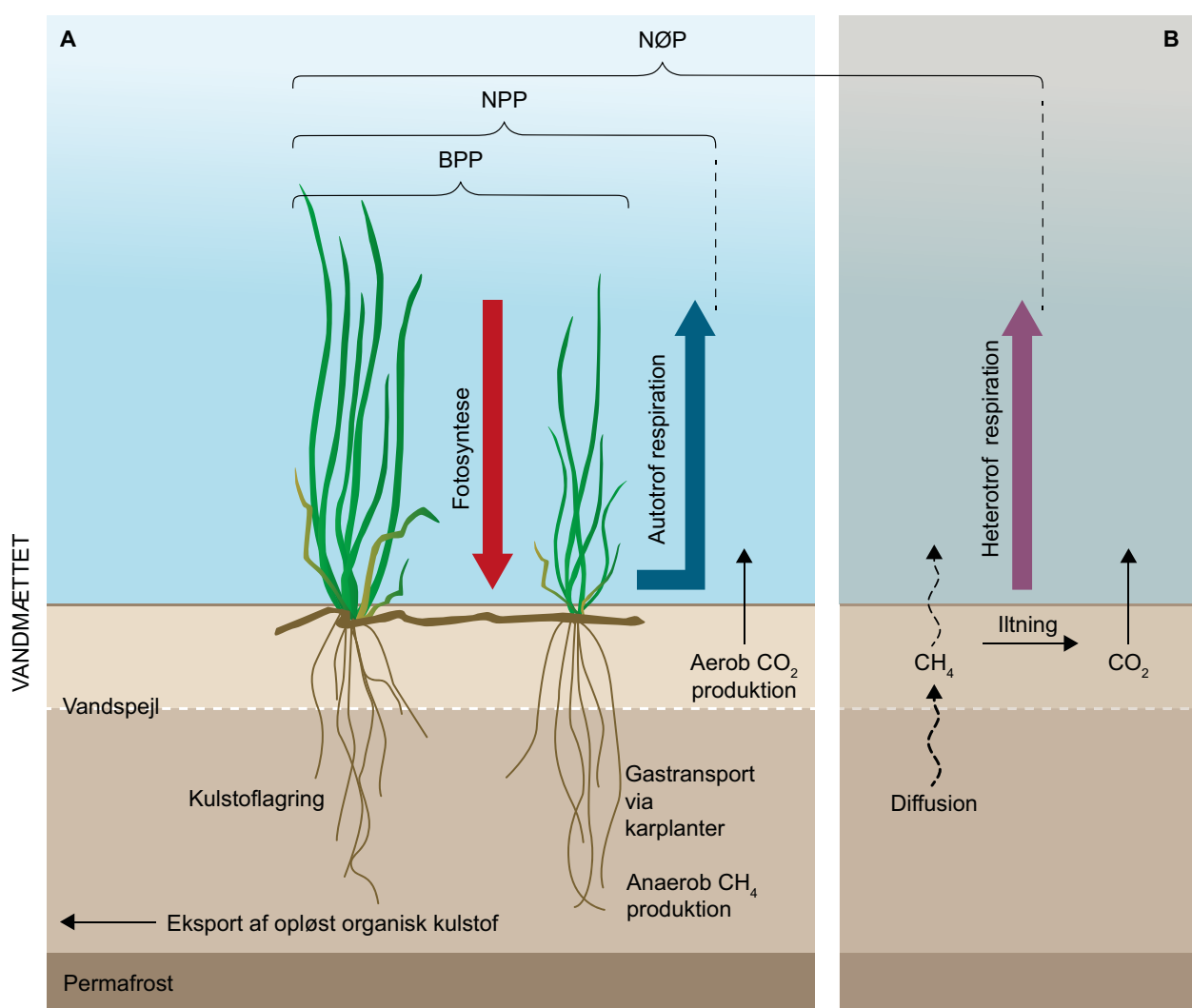
Normalt vil man inden for biologi opfatte en positiv NØP som et tegn på akkumulering af kulstof i økosystemet, men inden for økosystem kulstofkredsløbs-studier tager man udgangspunkt i atmosfæren. Det betyder, at når økosystemet optager mere kulstof fra atmosfæren, end det frigiver, så er NØP negativ.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

Arktisk tundra med og uden permafrost

Den arktiske tundra er karakteriseret ved at være skovløse områder med en relativ lav mængde nedbør og permafrost. Når jorden er permanent frosset kalder man den permafrost. Tundraens øverste jordlag tør om sommeren og fryser om vinteren. Denne del af jorden kaldes for aktivlaget. Tundra findes primært på den nordlige halvkugle nord for den 50. breddegrad. I tundrajorde med permafrost er det aktive lag kun frostfrit 2-3 måneder om året. 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 af organisk materiale, fordi temperaturen året rundt under frysepunktet (figur 2).

↓ 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 laver, mens den heterotrofe respiration laves af dyr og mikroorganismer



På grund af den langsomme nedbrydning under lave temperaturer, rummer de arktiske tundra-områder meget store depoter af kulstof (figur 3). De lave temperaturer medfører, at den biomasse, der er dannet gennem vækstsæsonen f.eks. grene, blade og rødder, kun i ringe grad nedbrydes af mikroorganismer i jorden. Tundrajorde kommer dermed til at spille en central og meget vigtig rolle, 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, des bedre er den til at holde på kulstof.

Store planteædere som moskusokser påvirker kulstofkredsløbet i Arktis ved at græsse og trampe rundt i vegetationen på tundraen. Foto: Lars H Hansen.



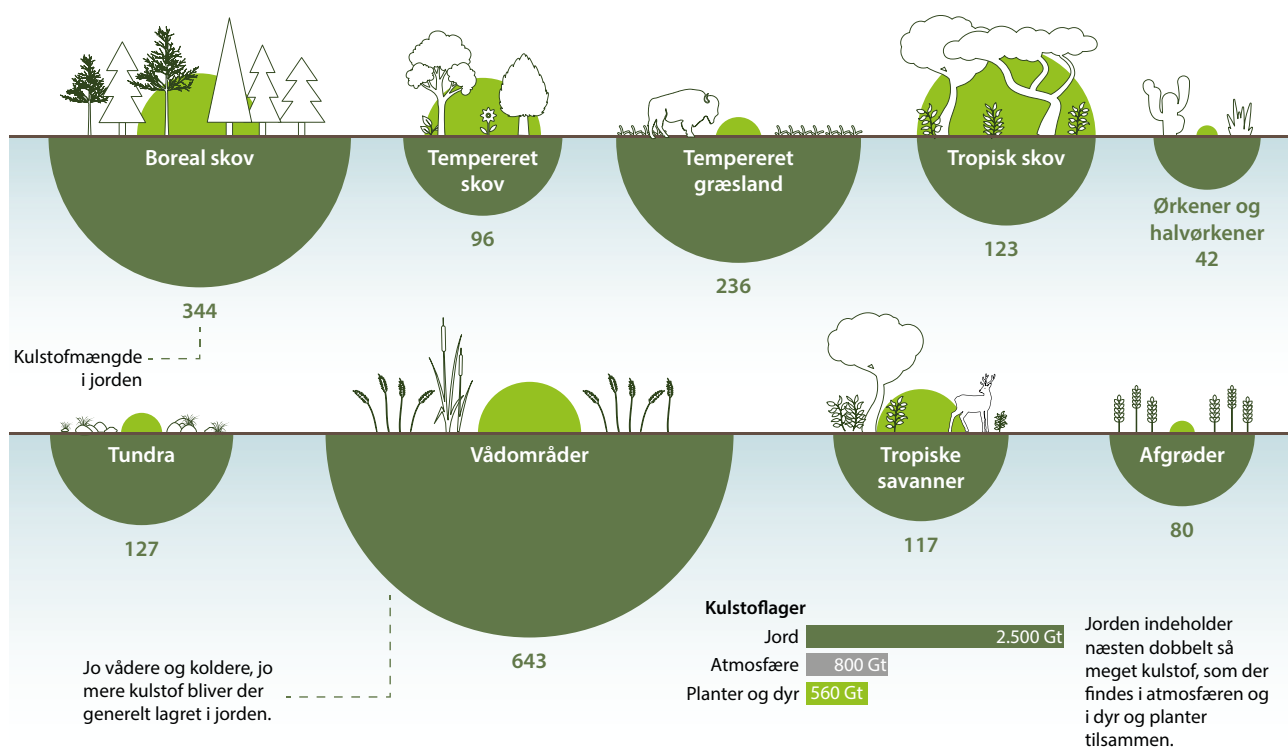
I tundraområder med planterne kantlyng og rype-lyng findes hovedparten af kulstofpuljen i de øverste jordlag, mens kulstoffet er mere jævnt fordelt i jordbundsprøver fra våde kærømråder. I Zackenberg indeholder de fugtige kærømråder og nærliggende områder med pil i gennemsnit 12 kg C/m^2 i de øverste 50 cm af jorden, mens rypelyng- og kantlyngsområderne indeholder det halve. Yderligere beregninger viser, at de øverste 50 cm af tundraen i gennemsnit indeholder 50-100 ton C/ha. Det 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.

Den tørre tundra er karakteriseret ved, at der er store mængder ilt tilgængeligt. 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 medfører de vandmættede våde tundrajorde, at ilt kun langsomt trænger ned i jordlaget. Desuden tager det længere tid at varme jorden op. Vand er længere tid om at blive varmet op end fjeld og tør jord. Samlet set betyder det, at omsætningen af det døde organiske materiale går langsommere, og at en væsentlig del af omsætningen foregår uden ilt, altså anaerob. Resultatet bliver, at de såkaldte metanogene mikroorganismer nedbryder det organiske materiale under anaerobe forhold, og derfor dannes der metan. 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.

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.

Kulstoflagring i verdens økosystemer (ton/ha)



Fra: IPCC; NASA

Permafrost

Den del af jordlaget som ikke tør hvert år, kaldes for permafrost og dækker 55 mio. km² eller ca. 25 % af alle landarealer på den nordlige halvkugle. I arktiske egne med kontinuerlig (Uafbrudt) permafrost kan permafrostlaget være flere hundrede meter dybt. Permafrostlaget indeholder store mængder af organisk materiale som følge af opsamling af dødt organisk materiale gennem flere tusinde år (figur 1).

Permafrost medfører specielle levevilkår for planter 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. Tilstedeværelsen af permafrost har en stærk indflydelse på, hvilken type vegetation der findes i de forskellige økosystemer. 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.

Permafrostens fysiske påvirkning kan bl.a. medføre udtørring af jorden i nedbørsfattige perioder, hvor der ikke er kontakt med grundvand. Helt modsat er situationen i perioden efter snesmeltning, hvor jorden ofte er overmættet og ikke kan indeholde mere vand, 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 forskningsstationen 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 de permafrosne jorde som følge af ændringer af klimaet. Temperatur, vegetation og vandgennemstrømning ændres og skaber eksponering, så solen kan skinne på den frosne jord. De såkaldte termokarstområder med jordsammenstyrtninger til følge kan derefter dannes.

↓ *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 Sheel.*



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 permafrost-områder har sået tvivl om, hvorvidt permafrostområder stadig optager atmosfærisk CO_2 eller måske er skiftet til, at have rollen som kilde og dermed tilfører atmosfæren CO_2 . Hovedparten af studierne, både de eksperimentelle og også de model-baserede studier, angiver dog på nuværende tidspunkt, at permafrost-områder optager mere CO_2 , end de frigiver. Denne balance er dog sårbar, og hvis de klimatiske forhold ændres til fordel for heterotrofisk CO_2 respiration, så kan permafrostområderne 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 fotosynteseraten og dermed den organiske produktion af kulstof er høj. Altså optager tundraen på dette tidspunkt mere CO_2 , end den frigiver, men på dage med overskyet vejr eller sne kan denne balance flyttes 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 dele af de arktiske økosystemer også dette forhold. Det drejer sig om forskellige planteædere, som lemminger, gæs, rensdyr og moskusokser, som



↓ En række automatiske kamre måler kontinuerligt CO_2 - og metanudveksling. Foto: Charlotte Sigsgaard

direkte påvirker vegetationen fysisk ved græsning. Balancen mellem fotosyntese og respiration, og dermed mellem optag og frigivelse af CO_2 , CH_4 og vand bliver derfor påvirket. 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 ved intensiv græsning.

En årsvariation i CO_2 -koncentrationen i atmosfæren ses tydeligt i 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.

Metanfrigivelse fra permafrost.

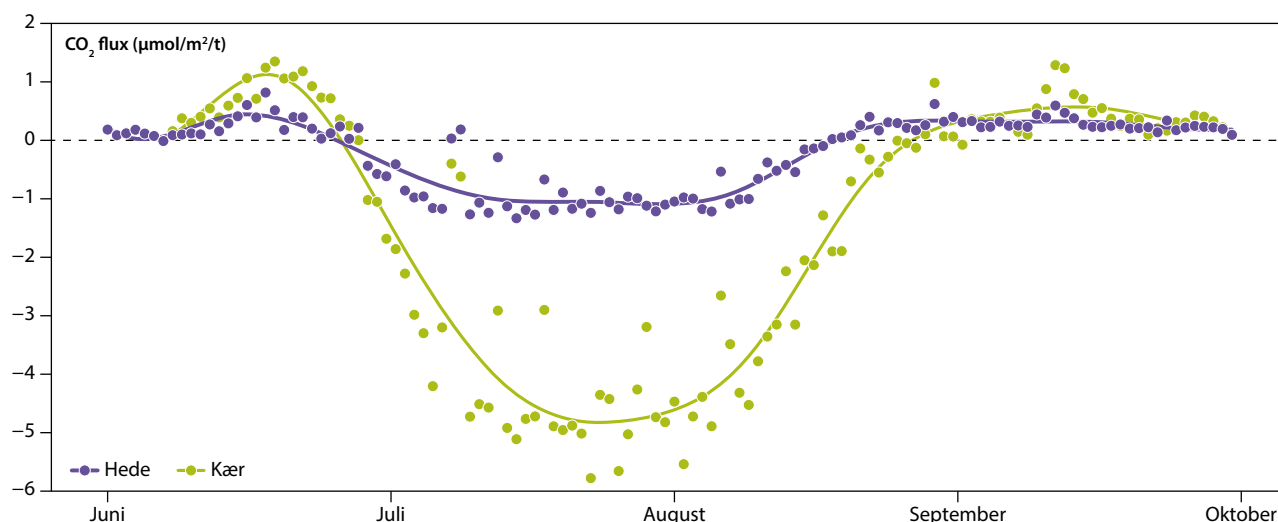
Mængdemæssigt er CO_2 den drivhusgas, som spiller den største rolle for kulstofskiftet mellem økosystemer og atmosfæren. Men også en anden drivhusgas er kraftig involveret i kulstofkredsløbet og den heterotrofiske respiration, nemlig metan. I klimasammenhæng er metan en væsentlig mere potent [?] drivhusgas end CO_2 per gram, fordi den "fanger" omkring 25 gange mere varme i atmosfæren end CO_2 . Metans levetid i atmosfæren er 8-12 år i gennemsnit og er dermed væsentlig mindre end CO_2 , som bliver i atmosfæren i århundreder.

Metanproduktionen i arktisk terrestriske økosystemer og den naturlige frigivelse af denne kraftfulde drivhusgas til atmosfæren har tiltrukket sig en stærk naturvidenskabelig interesse i forbindelse med klimændringerne. Områder med permafrost har længe været kendt som en betydningsfuld bidragsyder til

atmosfærisk metanproduktion. Metanen dannes ved 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 forbrug af metan. Mens metan produceres i iltfrie jorde, så oxideres [?] forbindelsen i ilttrige jorde. Denne iltning sker ved 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, og det medfører, at der opstår anaerobe forhold i det stillestående vand. I disse anaerobe omgivelser dannes metan ved den mikrobielle proces metanogenese. Metandannelse følger et komplekst 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

↓ Figur 4 viser CO_2 balancen for to målestationer i Zackenberg-dalen i 2016. En af stationerne står i et hedeområde (lilla prikker og streg), mens den anden står i et vådområde (kær; grønne prikker og streg). Prikkerne viser gennemsnitsværdier for udledning (positiv) og optag (negativ) for hver dag i feltsæsonen. De to kurver viser både et sæsonmønster i udledning og optag, og at der er stor forskel i vegetationens primærproduktivitet og respiration i de to områder.





↑ Stænglerne hos polar-kærulder hule og fungerer som "skorstene" for udslip af metan til atmosfæren.

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 langt sigt 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 Zackenberg-dalen har en gennemsnitstemperatur omkring eller under -20°C i en stor del af vinteren. Det kan derfor være svært at forstå, at der i nogle år i oktober-november siver betydelige mængder drivhusgasser ud fra tundraen og op i atmosfæren, selvom den højarktiske 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 højarktiske sommer. Målingerne har undret forskerne, fordi de enzymatiske processer [?] i mikroorganismene 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. Metan-lageret 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, 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 samlet flere data.

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

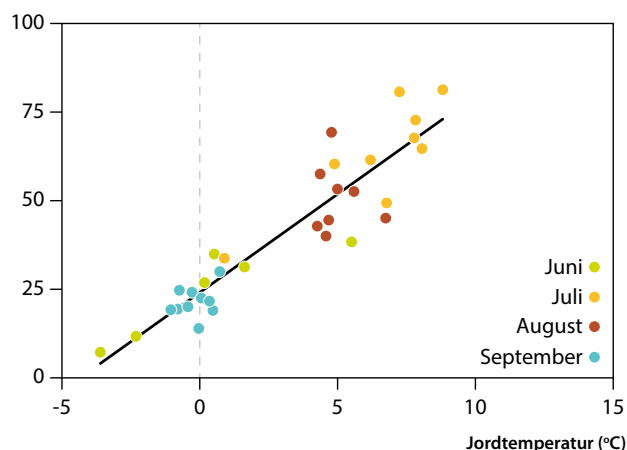
Øget kulstofomsætning i fremtiden?

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 borekerner 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 tøbrud[?] om foråret (der i Zackenberg først kommer i maj-juni) 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 -18°C .

Økosystemrespiration ($\text{g C m}^{-2} \text{ måned}^{-1}$)



→ Figur 6 viser den samlede økosystemrespiration (NØP) i relation til temperaturen nede i jorden. Selv ved temperaturer under frysepunktet sker der en produktion af CO_2 .



TAG MED I RYGSÆKKEN:

1. Store mængder kulstof i arktiske økosystemer er lagret i jorden.
2. Udvekslingen af CO_2 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, og kan frigive mængder af CO_2 og metan til atmosfæren.
4. I våde arktiske tundrajorde produceres metan som en del af den anaerobe respiration. Dette metan udgør en vigtig global kilde til atmosfæren.
5. Metanfrigivelse fra Arktis forventes at stige med opvarmningen 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 kunne forudsige fremtiden bedre.