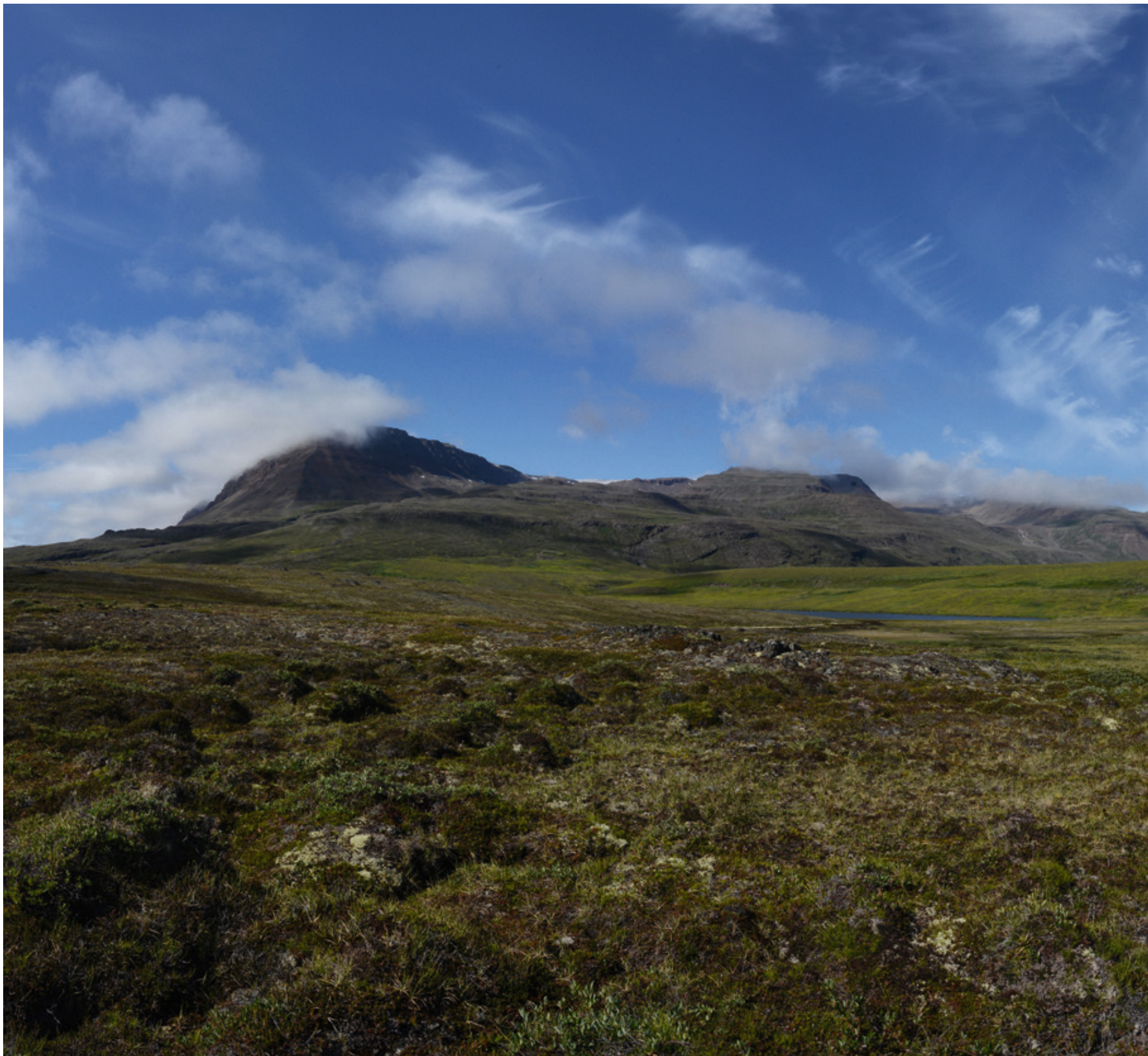




Planternes tilpasning | Plant adaptation





Planter – bindeled mellem jorden og atmosfæren

Mangfoldigheden af planter og farver, som både sommer og efterår pryder det grønlandske landskab, forundrer og glæder både fastboende og besøgende. Udover at dekorere landskabet er planterne også et bindeled mellem jordbunden, med dens pulje af næringsstoffer, og atmosfæren, med dens indhold af vigtige drivhusgasser, som fx vanddamp, kuldioxid og metan. Et vigtigt eksempel på planternes rolle er deres optag af kuldioxid fra atmosfæren, når de vokser. Derved binder planterne kulstof, som senere kan ophobes i jorden eller delvis frigives igen til atmosfæren, når planterester nedbrydes. Både planternes vækst og efterfølgende nedbrydning påvirkes af ændringer i klimaet, og balancen mellem vækst og nedbrydning har derfor fået stor bevågenhed – ikke mindst i Arktis.

Dette afsnit handler om planternes vækst og koblingen til klimasvingninger. Ny forskning viser, at fx planterøddernes rolle hidtil har været overset i denne sammenhæng. Hovedparten af planternes kulstof findes i rødderne, men nu viser det sig, at rødderne bliver ved med at vokse, selvom planten over jorden begynder at gøre klar til vinteren. Det betyder, at planterne binder mere kulstof, end man hidtil har regnet med. Det viser sig også, at en betydelig andel af det kvælstof, som planterne skal bruge for at kunne vokse, trækkes ud af atmosfæren ved hjælp af bakterier, som lever i samspil med vegetationen. Det sætter yderligere fart på plantevæksten. Som det ses på modstående side, varierer vegetationen betydeligt selv indenfor et lille område. Det er derfor nødvendigt at undersøge alle dominerende vegetationstyper, for at kunne udtale sig om klimaændringernes samlede effekt på hele landskabet.

Foregående sider: en typisk tundra i Vestgrønland med blandet vegetation. På modstående side ses tre dominerende vegetationstyper, som er koblet til særlige landskabsformer og ikke mindst til jordens vandindhold. En såkaldt afblæsningsflade (øverst) er udsat for vind og udtørring og har et ringe vegetationsdække. På skråningerne og mere i læ dominerer en lav hede-vegetation (nederst til venstre). I landskabets lavninger findes kær og sump med vandmættede forhold i jorden (nederst til højre).

Plants – linking the soil and the atmosphere

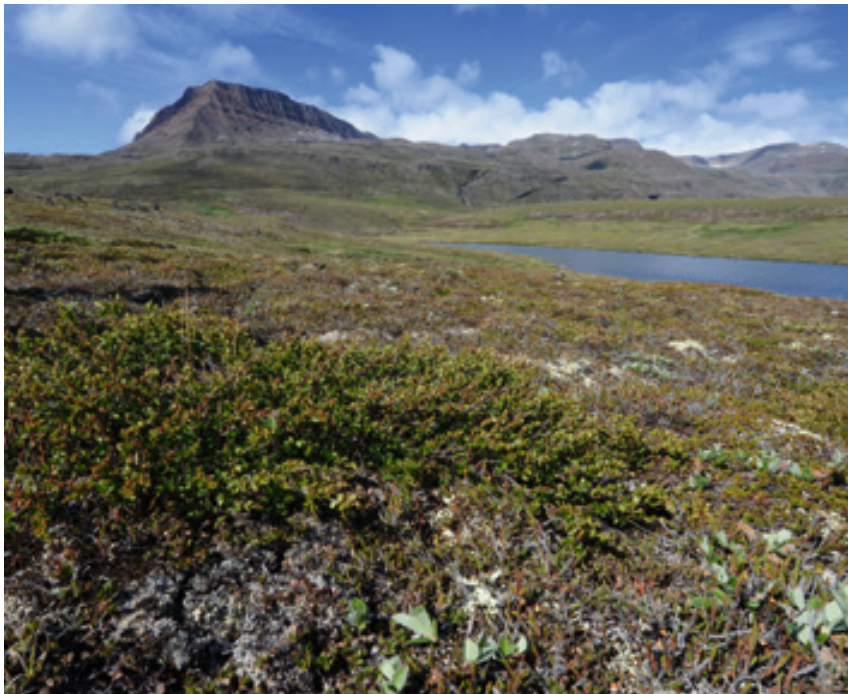
The variety of flowers and colors adorning the Greenlandic landscape during both spring and autumn amazes and delights numerous visitors. Besides decorating the landscape, plants are also a link between the soil, with its nutrient pool, and the atmosphere, which contains major greenhouse gases such as water vapor, carbon dioxide and methane. An example of the important role of plants is their uptake of atmospheric carbon dioxide during the growth phase. This process binds carbon in the plants, which can accumulate in the soil or be released to the atmosphere during plant decay. Both plant growth and decomposition are affected by climate change, and therefore the balance between the two has received much attention, not the least in the Arctic.

This chapter is about the growth of plants and the link to climate change. New research has shown that, in this context, plant roots have often been overlooked. While it is well-known that the majority of carbon in arctic plants is stored within the root zone, it now turns out that in the autumn, even when the ground is preparing for winter, the roots keep growing. This means that plants store more carbon than previously known. It now turns out that a significant part of the nitrogen necessary for plant growth is extracted from the atmosphere by bacteria living in close association with the vegetation. This accelerates plant growth even more. As shown on the opposite page, the vegetation varies considerably – even within a small area – making it important to examine all dominant vegetation types in order to assess the overall effect of climate change on the entire landscape.

Previous pages: typical tundra in West Greenland with mixed vegetation. The opposite page shows three dominating vegetation types, which are each linked to special landforms and not the least to the water content of the soil. An abraded surface (top image) is exposed to wind and desiccation and has a poor vegetation cover. On the slopes, where more shelter is provided, low heath vegetation dominates (lower left image). In the lowlands, more or less water-saturated fens and bogs are often found (lower right image).

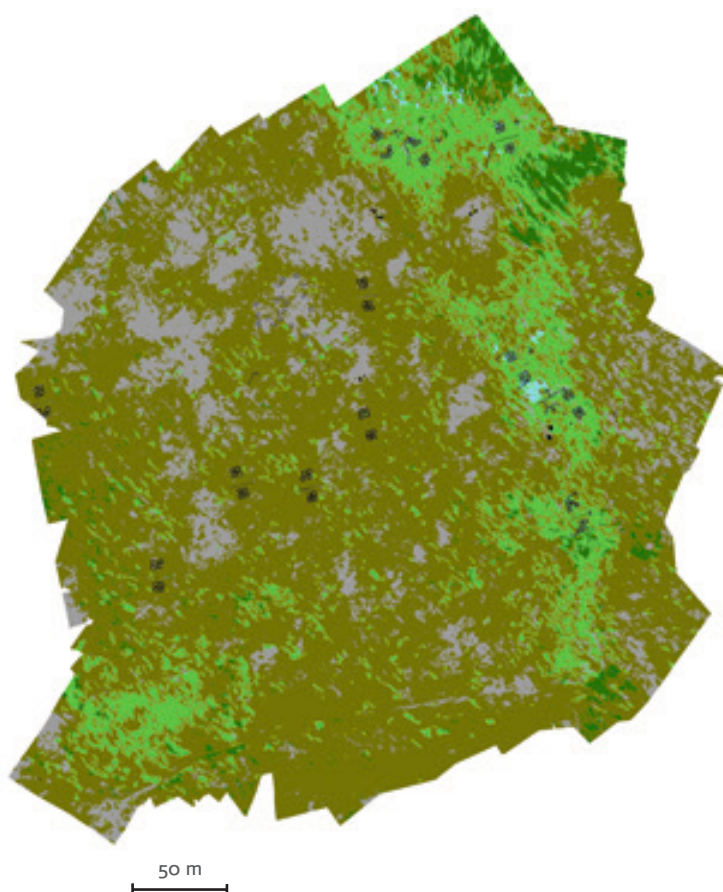


July| Blæsedalen, Disko



For at kunne opskalere observationer foretaget i et enkelt område og med udgangspunkt i en bestemt vegetationstype, er det vigtigt at kortlægge udbredelsen af de forskellige vegetationstyper. Udfordringen kan løses med droner. Billeder taget med en drone i 100 meters højde giver en detaljeringsgrad på nogle få cm på jordoverfladen. På modstående side vises et sammensat foto af en række overflyvninger. Det er efterfølgende blevet brugt til at bestemme fordelingen af vegetationstyper på baggrund af målinger af grønheden af vegetationen sammen med fugtigheden i det øverste jordlag. Analysen viser, at landskabet er domineret af hede (68%), mens de lidt mere ekstreme overfladetyper som afblæsningsflader og kær er væsentligt mindre repræsenteret. Analysen er en forudsætning for at kunne opstille et regnskab for landskabet, fx for mængden af metan som henholdsvis frigives fra kærområdet og optages på heden. I dette landskab er udbredelsen af kær så begrænset, at landskabet som helhed optager mere metan fra atmosfæren, end der frigives.

Before upscaling observations from a single area, and with a specific vegetation type as a starting point, it is important to map the distribution of the various vegetation types. This can be done by the use of drones. Images recorded by a drone 100 m above the surface show details of a scale of a few centimeters on the soil surface. The opposite page shows a photo composed of a number of flyovers done by drones. The photo has been used to classify the distribution of vegetation via several different measurements, including the greenness of the vegetation and the topsoil moisture. The analysis shows the landscape to be dominated by heathland, while the slightly more extreme surfaces, such as the abraded ones and the fens, cover significantly smaller areas. This analysis is a prerequisite to be able to draw up a landscape budget, e.g. the amount of methane released from the wetter fens and taken up in the drier areas dominated by heath. In this particular landscape, the extent of fens is so limited that the landscape as a whole takes up more methane than it releases.



Kort over fordelingen af vegetationen i Blæsedalen nær Arktisk Station på Disko. Fortolkningen er baseret på et sammensat billede (modstående side) optaget i cirka 100 meters højde. De mange snehegn ses tydeligt på billedet på modstående side, hvor gangbroerne i forsøgsfelterne fremstår som hvide firkanter. Luftfotografering med drone og billedbehandling er udført af Andreas Westergaard-Nielsen.

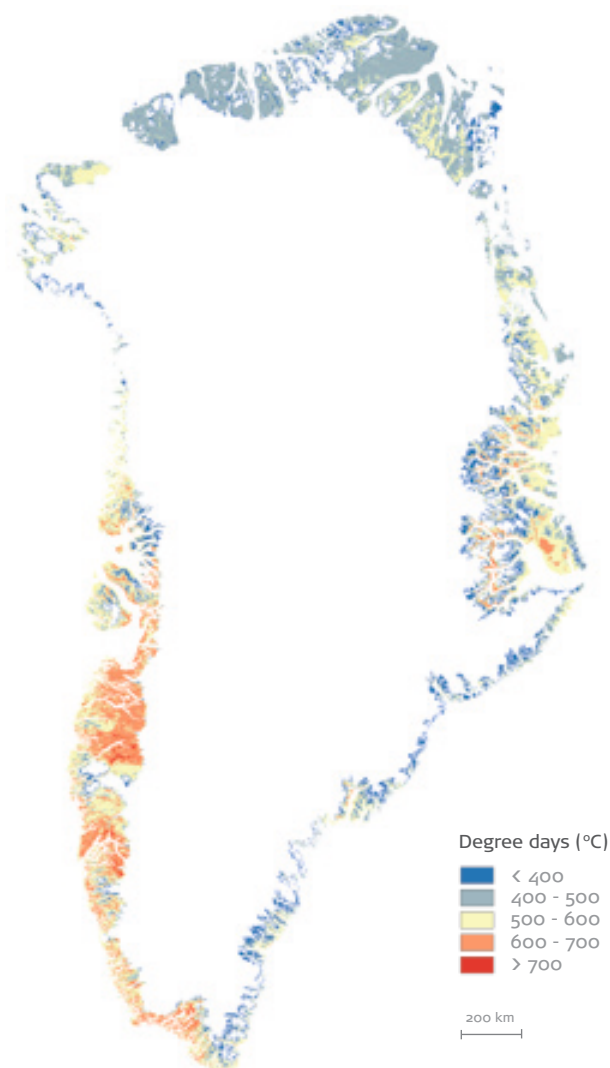
Map showing the distribution of vegetation in Blæsedalen near Arctic Station on Disko. The interpretation is based on a composed image (opposite page) taken circa 100 m above the surface. The snow fences are clearly seen on the image on the opposite page, where the boardwalks of the experimental plots appear as white squares. Arial photography with a drone and digital image processing is made by Andreas Westergaard-Nielsen.



50 m

Vegetationstyper på tværs af Grønland

Alle planter skal have lys, varme, vand, kuldioxid og næringsstoffer for at kunne vokse. På tværs af Grønland er der stor forskel på disse forhold. Mod nord er der på grund af midnatsol mere sollys end de fleste steder på den nordlige halvkugle. Med en samtidig øget mængde af CO₂ i atmosfæren og varmere lufttemperaturer i fremtiden skulle man tro, at der netop i Nordgrønland burde være udsigt til en markant øget plantevækst. Men nedbøren er lille og tilgængeligheden af næringsstoffer begrænset. Derfor er udbredte områder i Nordgrønland såkaldte "kolde ørkner". Selv med en markant øget opvarmning er det ikke forventeligt, at man her vil se en markant øget plantevækst.



Vegetation types across Greenland

Plants need light, heat, water, carbon dioxide and nutrients to grow. There are marked differences across Greenland in these conditions. To the north, due to the midnight sun, there is more sunlight during the growing season than most places within the Northern Hemisphere. With an increase in the amount of carbon dioxide in the atmosphere and warmer air temperatures in the future, one would think that the conditions for plant growth are likely to improve in North Greenland. But the precipitation is scarce and the availability of nutrients limited. Consequently, vast areas in North Greenland are considered "cold deserts". Therefore, despite of considerable warming, it is unlikely that there will be a markedly increased plant growth in the future.

Plantevækst er tæt koblet til den samlede varme (såkaldte varmesum), som er til rådighed i vækstsæsonen, såfremt der ellers er nok vand og næringsstoffer. Varmesummen udregnes som en sum af en middeltemperatur i den periode, hvor lufttemperaturen er over 5 grader. Varmesummen er et mål, der ofte anvendes i landbrugsmæssig sammenhæng, fordi det siger noget om, hvor meget energi der til rådighed for planterne til at vokse og blomstre og plantefrøene til at modne. Selvom lufttemperaturen i juli måned kan snige sig op på over 20 grader overalt i Grønland, så er vækstsæsonen mod nord kort (4-5 uger), og den samlede mængde varme, der skal sikre en plantevækst tilsvarende lille. I Sydgrønland er vækstsæsonen i gennemsnit 3 gange så lang. Kortet viser vækstsæsonens gennemsnitlige varmesum per år (målt i celsius) i perioden 2001-2017. Kortet er udarbejdet af Andreas Westergaard-Nielsen.

Plant growth is closely linked to the amount of heat received during the growing season (the so-called growing degree days), provided there are enough water and nutrients. The "growing degree days" is calculated as a sum of temperatures (in this case daily average temperature) in the period when the air temperature is above 5 °C. The "growing degree days" is a measure that is often used in an agricultural context because it tells us how much energy is available for plants to grow, to flower and for plant seeds to mature. Despite that the air temperature in July can rise up to more than 20 °C degrees everywhere in Greenland, the growing season to the north is short (4-5 weeks) and the corresponding amount of heat to enable plant growth is very small. In South Greenland, the growing season is on average 3 times longer compared to the north. The map shows the average growing degree days per year (in Celsius) in the period 2001-2017. The map has been made by Andreas Westergaard-Nielsen.



Surface vegetation types

- Barren ground / Bar jord eller klippe
- Abraded surface / Vegetationsfattig afblæsningsflade
- Wetland / Vådbundsområde
- Dry heath / Tør hede
- Moist heath / Fugtig hede
- Tall shrubs / Krat og buskhede

Kortet til højre viser fordelingen af vegetationstyper på tværs af Grønland. Klassifikationen er baseret på Landsat-8 satellitdata i en rumlig opløsning på 30 m, det vil sige at én satellitpixel er en repræsentation af 30 × 30 m af Jordens overflade, og repræsenterer et første bud på fordelingen af vegetationstyper i hele Grønland i så god opløsning. Først er der korrigeret for skydække, og derefter er vegetationstyper klassificeret ud fra planternes ændring i grønhed over en vækstsæson, biomasse, fugtighedsforhold samt terræninformationer som hældning og orientering. Sidst men ikke mindst er kortets fordeling af vegetationstyper blevet valideret ved hjælp af en lang række observationer i felten. I takt med flere observationer i fremtiden vil kortet blive revideret. Det lille kortudsnit på denne side viser et udsnit af vegetationskortet for Grønland, men kun for øen Disko i Vestgrønland. Her ses tydeligt variationen i vegetationen, som er knyttet til de grønne og fugtige dale og de mere tørre og vegetationsfattige bjergskråninger. Signaturforklaringen på vegetationstyper er den samme på udsnit og på kortet for hele Grønland. Kortmaterialet på dette sideopslag er udarbejdet af Andreas Westergaard-Nielsen.



The map to the right shows the distribution of vegetation types across Greenland. The classification is based on Landsat-8 satellite data with a spatial resolution of 30 m, meaning that one satellite pixel represents 30 × 30 m of the Earth's surface, and constitutes the first attempt to classify the distribution of vegetation types across Greenland at such a high resolution. Corrections have been made to take into account cloud cover and subsequently, vegetation types have been classified on the basis of the seasonal variation in vegetation greenness, plant biomass, humidity conditions and terrain information such as slope and orientation. Last but not least, the distribution of vegetation types has been validated against a very large number of field observations across Greenland. As more observations will become available in the future, the map will be revised. The small map on this page shows a detailed section of the vegetation map for Disko Island in West Greenland. It is clearly seen, that the distribution of vegetation types is associated with the green and moist valleys and the drier and vegetation-poor mountain slopes. The legend for vegetation types is the same for Disko Island as for the map of Greenland. Maps shown on this page have been prepared by Andreas Westergaard-Nielsen.

Plantevækst koblet til klimaet

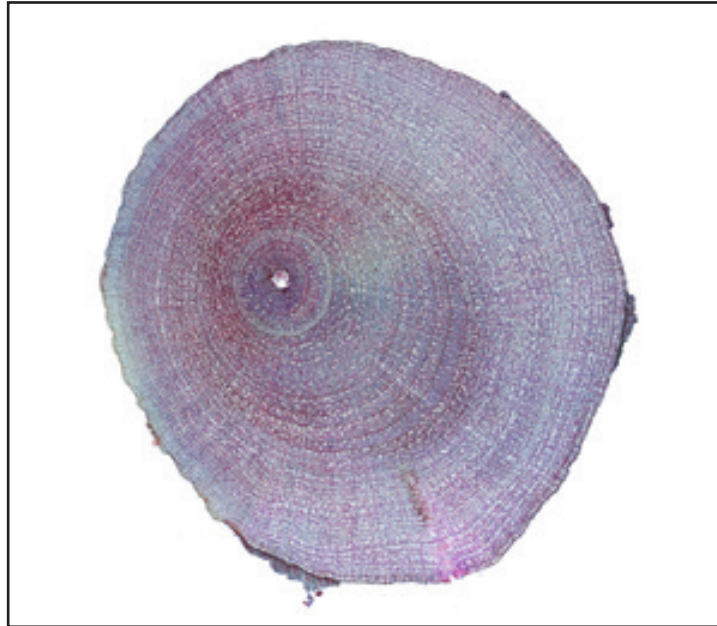
Analyse af tykkelsen af årlige vækstlag (årringe) i tværsnit af grene fra buske og træer kaldes dendrokronologi, og har længe været brugt til at undersøge plantevækst i forhold til fx varme og kolde år. Når der i dendrokronologi anvendes prøver udtaget fra levende planter, kender man jo af gode grunde alderen på det yderste vækstlag. Alle andre vækstlag kan derefter knyttes til et årstal ved at tælle tilbage fra det yderste vækstlag. De grønlandske buske, som pil og birk, vokser langsomt, og hvert vækstlag er kun omkring 0,1 mm tykt. Ved hjælp af mikroskopibilleder er det alligevel muligt at bestemme variationer i tykkelsen af de enkelte årringe og at sammenligne med klimaforhold de respektive år og dermed bestemme, hvordan klimaet påvirker, om et vækstlag bliver tykt eller tyndt.

Plant growth linked to the climate

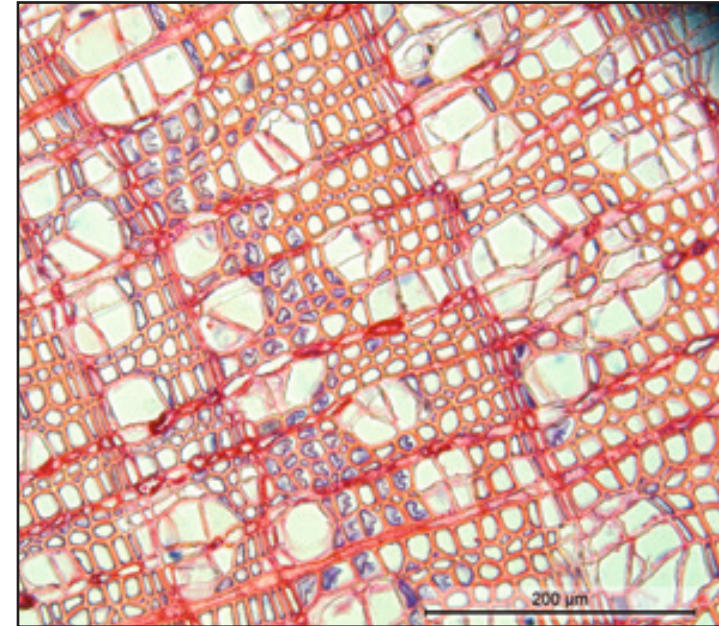
Analyzing annual plant growth by measuring the thickness of tree rings on cross sections of shrubs and trees is called dendrochronology. It is a method that has long been used to examine plant growth in relation to particular environmental conditions, e.g. warm vs. cold years. When samples from living plants are used in dendrochronology, the age of the outer layer is known. All other growth rings can thus be dated when counting down from the outer layer. Greenlandic shrubs, such as willow and birch, grow slowly, and each ring has a thickness of around 0.1 mm. However, via the use of microscopes it is possible to determine variations in the thickness of single growth rings, and hereby to compare results to the climate of the respective year, and thus to determine, how the climate influences the thickness of individual tree rings.



July | Brønlundhus, Peary Land



Til højre ses de enkelte planteceller i en stængel fra en arktisk pil (*Salix arctica*) indsamlet i Peary Land i det nordligste Grønland. Billedet er optaget efter en farvning, der fremhæver cellestrukturen. Samme plante ses i tværsnit (cirka 1 cm i diameter) på billedet til venstre (mikroskopibilleder er taget af Agata Buchwal). Hele planten ses på modstående side. Her er det tydeligt, at en i dette tilfælde mere end 55 år gammel plante kan vokse med få nye skud fra en gammel stængel. Forsidebilledet til dette kapitel er et tværsnit af en mere end 80 år gammel pil fra samme område.



The right image shows individual plant cells in a stem from an arctic willow (*Salix arctica*) sampled in Peary Land in the northernmost part of Greenland. The image has been made after staining the sample to enhance the contrast of the cell structure. A cross section with a diameter of about 1 cm of the same plant is seen on the left image (microscopic images taken by Agata Buchwal). The whole plant is seen on the opposite page. Here, it is obvious that an old plant, in this case more than 55 years old, can grow with just a few new shoots from an old stem. The front page photo of this chapter is a cross section of a more than 80 years old willow from the same area.

Man har længe vidst, at vejrforholdene om sommeren, fx vandmængde og temperatur, er vigtige for planterne i løbet af den korte vækstsæson i Grønland. Nye undersøgelser af dværg-birk (*Betula nana*) i Vestgrønland viser overraskende, at både vintrens og forårets temperaturer samt snemængder kan spille en tilsvarende vigtig rolle. Jo mere sne og jo varmere temperaturer om vinteren, jo mere vækst den følgende sommer. Det skyldes formentlig en kombination af mere isolerende sne, færre frostskafer, mere vand og en øget adgang til næringsstoffer om foråret. Denne kobling til vinterforhold er vigtig, fordi fremtidige klimaændringer (i form af øget nedbør og temperatur) forventes primært at komme til udtryk om vinteren.

It has long been known that the weather during the summer, e.g. water supply and temperature, is important for plants during the short growing season in Greenland. New research on dwarf birch (*Betula nana*) in West Greenland shows, surprisingly, that both winter and spring temperatures as well as the amount of snow, play important roles for plant growth: the more snow and the warmer winter temperatures, the more growth the following summer. The reason is probably a combination of more snow providing insulation, less frost damage, more water and an enhanced nutrient supply in the spring. This coupling to the winter conditions is important, since future climate change (such as increased precipitation and temperature) is primarily expected in the winter.

En lyng med kanter

Kantlyng (*Cassiope tetragona*) findes over det meste af Grønland og vokser typisk på steder med en vis mængde sne, formentlig som beskyttelse mod vinterens frost, fra Peary Land i Nordgrønland til det frodige Sydgrønland. Kantlyng er en stedsegrøn dværgbusk med karakteristiske kantede skud dannet af blade, der er grønne i 2-4 år. Den årlige vækst af kantlyng kan måles på en helt anden måde end ved hjælp af årringe. Kantlyng vokser ved årsskud, som adskiller sig fra forrige års vækst ved en vinter-markering i stænglen. Ved at skære planten op på langs, ses, i den tynde stængel, rækken af årlige skud adskilt af disse vinter-markeringer. Hvert årsskud kan derefter måles i form af længde, vægt eller næringsstofindhold. Hvert efterår sender planten dog næringsstoffer tilbage i rodnettet, hvilket medfører, at den kemiske sammensætning i det enkelte årsskud kan ændres med tiden.

I snehegnforsøg på Svalbard er kantlyng blevet indsamlet på læsiden af snehegnene. Her har sneen hver vinter i flere år haft en dybde på omkring 150 cm i forhold til kontrolfelter med gennemsnitligt 20 cm sne. Resultaterne viser, at kantlyng har en øget vækst om sommeren, hvis forholdene om vinteren har været mere gunstige – i dette tilfælde ved at der har været mere sne.



A heather with angles

The arctic white heather (*Cassiope tetragona*) is found in most places in Greenland, from Peary Land in North Greenland to the lush South Greenland, and typically grows on sites with a certain minimum amount of snow, presumably protecting it from winter frost. It is an evergreen dwarf shrub with characteristic, angular shoots formed by leaves that stay green for 2-4 years. The yearly growth of arctic white heather is measured in a different manner than the tree ring method. It grows through yearly shoots, separated from last year's shoots by a winter marking on the stem. When the plant is dissected lengthwise, the row of yearly shoots, separated by winter markings, appears in the thin stem. Annual shoots are thus analyzed by measuring the length, weight and/or nutrient content. Each autumn, the plant returns nutrients to the roots, so the chemical composition in each shoot can change over time.

In a snow fence experiment in Svalbard, arctic white heather has been sampled from the lee side of the snow fences. For several years, the snow on the lee side has had a thickness of around 150 cm, compared to an average of 20 cm in the control plots. The experiment reveals an increased summer growth of arctic white heather if winter conditions are more favorable – in this case meaning more snow.

Kantlyng (Cassiope tetragona) kan bruges i en ny metode til at studere årlig vækst (se modstående side). Planten danner hvert år et skud adskilt af en tydelig vinter-markering (foto; Claudia Baittinger).

Arctic white heather (Cassiope tetragona) is used in a new method to study annual growth (see opposite page). Each year, the plant produces a shoot which is separated from the shoot of last year by a winter mark (photo: Claudia Baittinger).



July | Disko

Ved samme snehegnforsøg på Svalbard er det desuden blevet undersøgt, om et øget snedække kan medføre ændringer i den pulje af kvælstof i jorden, som er tilgængelig for alle planter. Det viser sig, at den ekstra sne medfører, at jorden i starten af vækstsæsonen indeholder mere kvælstof, og at planterne er i stand til at udnytte denne ekstra kvælstofpulje. Det ses i et øget indhold af kvælstof i bladene af eksempelvis pil og i en øget fotosyntese i løbet af sommeren. Alt i alt ses en overraskende og positiv effekt i de undersøgte planter i vækstperioden. Den positive effekt skyldes en opvarmning af jorden om vinteren som følge af en isolerende effekt af et tykkere snedække. Opvarmningen skaber mere gunstige forhold for mikroorganismer, som nedbryder jordens organiske pulje om vinteren, og dermed øges den næringsstofpulje, der er tilgængelig for planterne, når vækstsæsonen begynder.

In the same snow fence experiment, it has been tested whether an increased snow cover causes changes in the pool of nitrogen in the soil which is available for plants. It turns out that the extra snow leads to a higher amount of nitrogen in the soil at the onset of the growing season, and that the plants are able to utilize this additional nitrogen. This can be observed from e.g. the increased nitrogen content in the leaves of the polar willow and an increased photosynthesis during summer. Altogether, the additional snow has a surprising, positive effect during the growing season in the examined plants. The positive effect is the result of soil warming during the winter, caused by the insulating effect of a thicker snow cover. The warming creates more favorable conditions for the microorganisms to decompose the organic matter in the soil during winter, and, as a result, increases the pool of nutrients available to the plants at the onset of the growing season.



August | Qajaa



July | Blæsedalen, Disko

Planter, der fryder øjet. Øverst: Grønlandsk blåklokke (Campanula gieseckiana) er en urt, som vokser i frodige og fugtige heder og krat. Til venstre: Grønlandsk fjeldsimmer også kaldet rypelyng (Dryas integrifolia) – en dværgbusk, der vokser i fjeldmark og på hede i tør jord.

Modstående side: Lodden trolldurt (Pedicularis hirsuta) – en halvsnylter på tør hede med blågrå pil (Salix glauca) i forgrunden og grønlandsk fjeldsimmer i baggrunden. Trolldurten er en halvsnylter, fordi den udnytter næring fra rødder af andre plantearter, men samtidig selv laver fotosyntese i de grønne blade.

Plants delighting the eye. Upper photo: Gieseck's bellflower (Campanula gieseckiana) is a herb growing in lush and moist heathland and scrubs. To the left: Entire-leaf mountain avens (Dryas integrifolia) – a shrub growing in fellfield and heath in dry soil.

Opposite page: Hairy lousewort (Pedicularis hirsuta) – a hemiparasite on a dry heath with grey-leaf willow (Salix glauca) in the foreground and mountain avens in the background. The hairy lousewort is hemiparasitic since it utilizes nutrients from the roots of other plant species, while still doing photosynthesis in its own leaves.



Løvfald og genbrug af ressourcer

Plantevækst er begrænset af adgang til ressourcer. I Arktis er det særligt vækstsæsonens længde og planternes adgang til kvælstof, som er begrænsende for væksten. Dertil kommer – som overalt på kloden – andre begrænsninger, fx adgang til fosfor og vand, som kan variere meget fra sted til sted.

Når solenergien i Arktis aftager i løbet af sensommeren, falder temperaturen. På samme tidspunkt begynder planterne at forberede sig på vinteren ved at sende cirka halvdelen af næringsstofferne fra bladene tilbage til stænglen og rødderne. Bladene mister deres grønne farve, og i de fleste tilfælde visner de og falder til jorden. Det er en effektiv metode til at beskytte sig mod vinteren og samtidig holde på en del af næringsstofferne. Ved løvfaldet taber planterne en del kulstof til jorden. Det er dog et mindre problem end tabet af næringsstoffer, da atmosfæren indeholder rigelige mængder af kulstof i form af kuldioxid, som er den primære kilde til kulstof ved næste års vækst.

Undersøgelser af, hvor hurtigt bladløvet kan nedbrydes, viser, at mere sne om vinteren kan øge nedbrydningen på grund af den højere temperatur ved jordoverfladen under sneen. En højere temperatur i jorden sætter jordens mikroorganismer i stand til hurtigere at nedbryde bladløvet. En højere temperatur om sommeren kan imidlertid medføre en udtørring af jordoverfladen, hvilket kan få den modsatte effekt på nedbrydningen af løvet.



August | Zackenberg

Ovenfor ses indsamling af løv fra pil. Bladene tørres, vejes og genplaceres i små net i feltforsøg med ekstra sne eller med opvarmning. Poserne indsamles de efterfølgende måneder og år, og indholdet vejes og analyseres for at bestemme den årstidsbestemte nedbrydning, og hvilken kemisk sammensætning løvet har.

Leaf fall and recycling of resources

Plant growth is limited by access to resources. In the Arctic in particular, the length of the growing season and the pool of nitrogen in the soil available to plants limits plant growth. Also, as everywhere else on the planet, other limitations, e.g. the supply of phosphorus and water, may vary significantly between sites.

As the solar energy declines during late arctic summer, the temperature falls. As the plants prepare for winter, they transfer about half of the nutrients from the leaves back to the stem and the roots. The leaves lose their green color, and in most cases they wither and fall to the ground. This is an efficient protection from the winter, while at the same time retaining a share of the nutrients. As the leaves are shed, the plants lose carbon to the soil. However, the loss of carbon is a minor problem compared to the loss of nutrients, since the atmosphere holds sufficient amounts of carbon dioxide, the primary source of carbon to fuel the growth in the coming year.

Research on the rate of leaf decay shows that more snow fall during winter can increase the decay of leaves due to higher soil surface temperatures beneath the snow. A higher temperature in the soil enables soil microorganisms to decompose the leaf litter at a higher rate. Contrastingly, a higher temperature during the summer can cause a desiccation of the soil surface, which can have the opposite effect on leaf decay.

The photo above shows the sampling of leaves from willow. The leaves are dried, weighed and placed in little mesh bags in field experiments with addition of snow or warming. The following months and years, the bags are gathered and the content weighed and analyzed to determine the season-specific decomposition, and the chemical composition of the leaves.

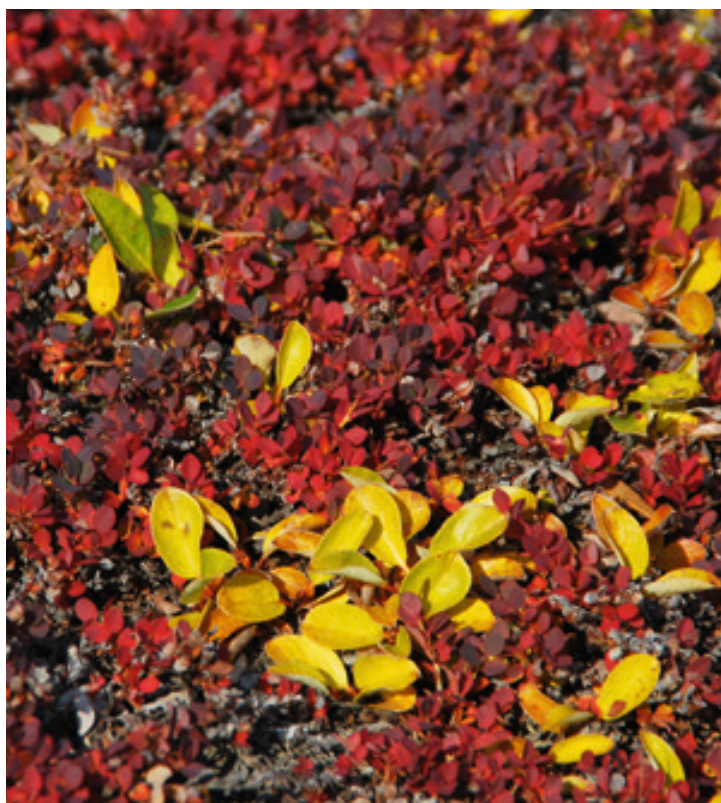


August | Zackenberg

Tundraen i efterårspragt. Her er det bjerg-melbærris (Arctostaphylos alpina), der dominerer med røde farver.

The tundra in autumn colors. Black bearberry (Arctostaphylos alpina) dominates with its red colors.

Mere sne i landskabet har også en anden effekt på planterne. Det skyldes, at det tager længere tid for den ekstra sne at smelte, hvilket forsinker starten af vækstsæsonen. I snehegnforsøg i Grønland og på Svalbard ses en forsinkelse på 1-2 uger, og det viser sig, at dette har betydning, både for, hvornår løvfaldet begynder, og hvornår det slutter. Det er måske overraskende, at aftagende lys i sensommeren ikke synes at være afgørende faktor for, hvornår løvfaldet starter om efteråret.



Der er stor forskel på, hvor nemt plantemateriale, fx blade, nedbrydes afhængigt af hvilken planteart, der er tale om. Materiale med et højt kvælstofindhold bliver typisk hurtigere nedbrudt. Af samme grund er der forskel på, hvor følsomme de enkelte plantesamfund er for klimaændringer, fx ved ændringer i snemængde. Disse forskelle mellem plantesamfund er vigtige at få yderligere belyst ved fremtidige undersøgelser.

Increased snow in the landscape also has another effect on the plants. It takes time to melt the extra amounts of snow which delays the onset of the growing season. In the snow fence experiments in Greenland and Svalbard, delays of 1-2 weeks have been observed. This delay influences both the start and the end of the leaf fall in plants. Perhaps surprisingly, the declining light during the late summer does not seem to be a crucial factor to the start of leaf fall for a range of plant species.



The speed of decomposition of plant material, e.g. leaves, depends on the plant species, and large variation can be seen. Plant material with a high content of nitrogen typically decomposes faster. Similarly, there is a difference in the sensitivity of different plants to climate change, e.g. changing snow amount. These differences are important future research topics.

Rødder – en overset størrelse

Rødder er langt mindre undersøgt end den del af vegetationen, som findes over jorden. Det på trods af at langt hovedparten af planternes biomasse i Arktis befinder sig under jordoverfladen, og at røddernes udbredelse er helt afgørende for, hvilken andel af næringsstoffer og vand i jorden, som er tilgængelig for planten.

For at undersøge rødderne er der i forsøgsfelter på Disko placeret gennemsnitlige plexiglasrør i jorden. Det gør det muligt at sænke en speciel rund scanner ned mellem rødderne. Ved hjælp af scanneren fås et detaljeret billede af fordelingen af små og store rødder. Billedet kan bruges til at bestemme rodtykkelse, rodlængde samt overfladearealet af rødderne. Ved at gentage scanningerne med jævne mellemrum, kan billederne også bruges til at beregne røddernes vækst og til at bestemme, hvornår de vokser. Analysen af de mange scanninger i en typisk våd tundrajord viser, at rødderne kan fordoble deres længde i løbet af én vækstsæson.

Der er også placeret rør i forsøg, hvor små drivhuse uden tag er blevet placeret oven på jorden. Her vil luften omkring planterne blive adskillige grader varmere end i omgivelserne, men det vil ikke nødvendigvis medføre en opvarmning i jorden under drivhuset. Dette er fx tilfældet i våde tundraområder, hvor jorden er næsten vandmættet og typisk gennemstrømmes af koldt vand, som modvirker en opvarmning. Alligevel ses en markant stigning både i antal rødder og i røddernes længde i forsøg med drivhuse i sådanne våde tundraområder. Det viser, at rodvæksten er mere styret af plantens generelle levevilkår over jorden (varme, lys og vanddamp) end blandt andet af temperaturen i jorden. Når planter vokser mere over jorden, vokser rodnettet derfor med, selvom forholdene i jorden kun ændres i ringe grad. Ganske overraskende viser det sig i alle felter, med eller uden drivhus, at rødderne vokser videre – også efter, at selve planten over jorden er holdt op med at vokse. Da næsten alle studier i Arktis tager udgangspunkt i plantevæksten over jorden, er vækst i rodzonen en overset størrelse i de nuværende modeller for koblingen mellem klima og plantevækst.

Roots – hidden and overlooked

Roots are far less often studied than the above ground vegetation. This is despite the fact that most of the plant biomass in the Arctic is actually found below the soil surface and that the spread of roots is crucial to the pool of nutrients and water available to plants.

To study the root systems of plants, transparent acrylic tubes have been inserted into the soil in experimental plots on Disko. Subsequently, a special round scanner can be lowered down the tube between the roots. The scanner produces a detailed image of the distribution of small and large roots which can be used to determine the thickness, the length and the overall surface area of the roots. Through frequently repeated scans, the images can be used to determine the growth of the roots and, not the least, determine when they grow. The analysis of frequent scans in a typical wet tundra soil shows that roots are able to double in length during one growing season.

Tubes have also been installed in experiments with small greenhouses with no roofs placed on top of the soil. The air around the plants inside the greenhouses will become several degrees warmer than the surrounding air, however this will not necessarily lead to a warming of the soil beneath the greenhouses. This is true for e.g. tundra areas with soil that is almost completely saturated with water, typically as a constant flow of cold water counteracts the warming. Still, marked increases in both the number and length of roots are seen in greenhouse experiments in such wet tundra areas. This reveals that the root growth appears to be more controlled by the above ground conditions (temperature, light and water vapor) than by e.g. the soil temperature. When a plant increases its biomass above ground, the roots grow too, even though soil conditions have changed only marginally. Surprisingly, it turns out that in all plots, with or without greenhouse, the roots keep on growing – also after the above ground part of the plant has stopped growing. Since almost all arctic studies focus on the plant growth occurring above ground, the root zone is overlooked in current models on the link between climate and plant growth.



Det store billede viser et tværsnit fra overfladen og ned til 50 cm taget i en naturlig, våd tundrajord midt i august 2014. På billedet kan der registreres 102 rødder med en samlet længde på 311 cm, en gennemsnitlig længde på 3 cm og en diameter på 0,6 mm. Den samlede overflade af rødderne er 59 cm², hvilket er den kontaktflade, planten har med jorden.

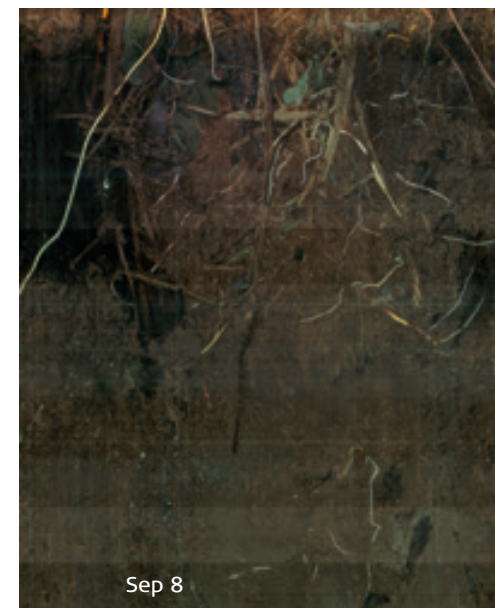
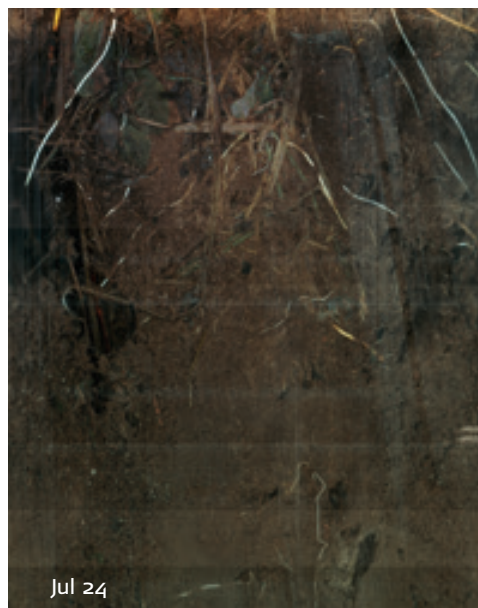
The large image shows a naturally wet tundra soil from the surface until a depth of 50 cm in mid-August 2014. On the image, 102 roots with a total length of 311 cm are recorded, the average length is 3 cm and the average diameter is 0.6 cm. The total surface area of the roots is 59 cm², which constitutes the plant's contact with the soil.



De fleste rødder findes i en dybde af 0-20 cm. Enkelte rødder trænger imidlertid helt ned til permafrosten. At nogle rødder søger så langt ned, giver mening, fordi det har vist sig, at permafrosten rummer overraskende store mængder af kvælstof, og at dele af denne kvælstofpulje frigives, hvor permafrosten tør. Derfor er der foretaget forsøg, hvor der er tilsat "mærket" kvælstof i toppen af permafrosten. Når den tilsatte kvælstof kan genfindes i de levende planter året efter, viser det, at næringsstoffer frigivet ved en permafrostoptøning, kan udnyttes af de planter, som har rødder på stor dybde.

Dette er vigtigt i relation til en optøning af permafrost, som forventes at give anledning til frigivelse af yderligere drivhusgasser. En samtidig frigivelse af kvælstof, som altså er tilgængelig for planter, vil så også betyde en øget plantevækst og dermed, at planterne kan binde mere kulstof fra atmosfæren. Denne kobling medfører, at en del af den kuldioxid, som i fremtiden vil frigives ved omsætning af organisk stof i permafrosten, delvist igen vil blive bundet i planter.

De tre mindre billeder er en tidsserie udtaget i 15-30 cm dybde d. 24. juli, 13. august og 8. september 2014. I den periode stiger antallet af rødder fra 23 til 38 og 48, og den samlede længde af rødderne stiger fra 50 til 86 og 104 cm. De mange tal illustrerer, at billeder kan bruges til at sætte tal på ændringer i rodbiomasse. Dette har været en ubekendt faktor i de fleste modeller vedrørende koblingen mellem økosystemer og klima. Billederne af rødderne er blevet bearbejdet af Ludovica D'Imperio og Marie Frost Arndal.



Most roots are found in the top 0-20 cm of the soil. But, a few roots penetrate all the way down to the permafrost. For roots to seek that deep makes sense, since the permafrost has proven to hold surprisingly high amounts of nitrogen, which can be released upon permafrost thaw. Therefore, experiments with addition of "labelled" nitrogen to the upper permafrost have been made. When the labelled nitrogen is found again in living plants the following year, it shows that nutrients released due to permafrost thaw are available for utilization by plants with deep roots.

This is an important phenomenon, as thawing of the permafrost is expected to cause a release of additional greenhouse gases. A simultaneous release of plant available nitrogen will also lead to increased plant growth and thus a higher plant fixation of atmospheric carbon. This coupling means that part of the carbon dioxide, which in the future will be released in the decomposition of organic matter in the permafrost, will be offset by carbon dioxide fixed again by plants.

The three smaller images represent a time series sampled at a depth of 15-30 cm on July 24, August 13 and September 8, 2014. During this period, the number of roots rises from 23 to 38 to 48 and the total length of the roots increases from 50 to 86 to 104 cm. All these numbers illustrate that images can be used to quantify the changes in root biomass, which have for long been unknown parameters in most models regarding the coupling between ecosystems and climate. Root images have been analyzed by Ludovica D'Imperio and Marie Frost Arndal.

Duften af en plante

Grønland dufter. Det opdager man, når man ligger på knæ i tundraen og indsamler jordprøver eller tæller blomsterknopper. "VOC'er" er en fællesbetegnelse for den gruppe af flygtige organiske forbindelser (på engelsk Volatile Organic Compounds), som frigives fra planter. Nogle af dem kender man rigtig godt, fx duften af kantlyng. Andre VOC'er kommer fra jorden og permafrosten, når den tør. Mængden af VOC'er er lille, og derfor kræver det specielt udstyr i felten og laboratoriet, når man skal bestemme koncentrationen af de mange og flygtige stoffer.

Ved at frigive disse duftstoffer kan planterne både tiltrække insekter, der er vigtige for planternes bestøvning, og holde skadegørende insekter på afstand. De reaktive stoffer påvirker imidlertid også drivhusgassernes levetid i atmosfæren samt dannelsen af små partikler (aerosoler) og skyer. VOC'ernes samlede betydning for klimaet er imidlertid ukendt, og derfor undersøges deres dannelse og frigivelse. Meget tyder på, at processen omkring frigivelse af VOC'er er mere temperaturfølsom end fx produktionen af kuldioxid og metan i jorden. Ved blot to graders opvarmning ses en fordobling af frigivelsen af visse VOC'er.

Detaljerede målinger af overfladetemperaturen på og omkring planter viser, at temperaturen her kan være mere end 20 grader varmere end i 2 meters højde, hvor lufttemperaturen traditionelt måles. Det er denne overfladetemperatur, der formentlig primært styrer frigivelsen af VOC'er. Modellering af fremtidige VOC-emissioner kræver derfor nye former for temperaturmålinger, ikke mindst når der er tale om en mørk og lav tundravegetation. Desuden frigives nogle VOC'er både dag og nat. Da de fleste tidligere målinger er foretaget om dagen, viser nye observationer, at man bør tage døgnvariationer med i betragtning, når man fremadrettet vil bestemme frigivelsen af VOC'er.

Undersøgelser af VOC'er i relation til løvfaldet er i gang både i Nordsverige og i Nordøstgrønland. Her ses en markant stigning i VOC-frigivelsen, når mængden af efterårets løv i forsøg øges, i særdeleshed hvis dette sker i kombination med opvarmning. Det antyder en hidtil ukendt klimakobling mellem øget plantevækst, mere løv om efteråret og den mikrobielle nedbrydning af løvfaldet samt VOC-frigivelsen.

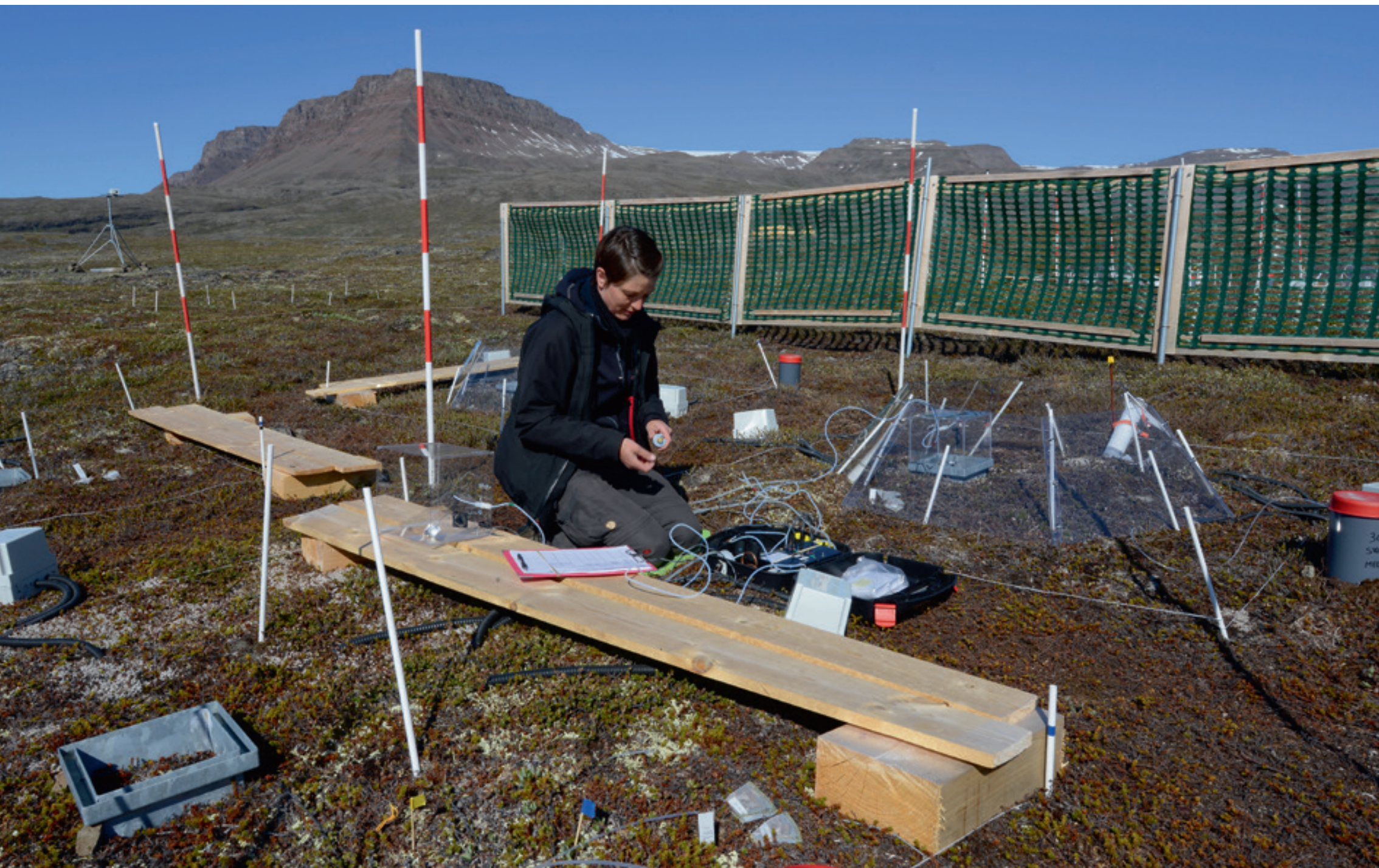
The scent of a plant

Greenland has its own scent. You realize that when you are on your knees in the tundra, sampling soil or counting flower buds. "VOCs" is the common name for the group of volatile organic compounds released from plants. Some of them are very familiar, e.g. the scent of white arctic heather. Other VOCs come from the soil or even from the permafrost when it thaws. The concentrations of VOCs are low, and special equipment in the field and in the laboratory is required, to measure the various volatile compounds.

By releasing these fragrances, the plants are able to attract insects important to the pollination or to keep herbivores at a distance. However, some reactive VOCs also affect the lifespan of greenhouse gases in the atmosphere, and they affect the formation of small particles (aerosols) which, in turn, trigger cloud formation. The total effect of the VOCs on the climate is unknown, which is why their formation and release are being studied. It turns out, that the process leading to the release of VOCs is more sensitive to temperature than e.g. the production of carbon dioxide and methane in the soil. A warming of just two degrees doubles the release of some VOCs.

Detailed temperature measurements around plant leaves (known as the canopy temperature) are found to be much higher (about 20 °C higher) than air temperatures measured at 2 m height, where measurements are traditionally made. Such temperature measurements may therefore not be appropriate for projecting future VOC emissions. Future modelling of VOC emissions therefore needs new types of temperature measurements, particularly when dark and low tundra vegetation types are present. Furthermore, some VOCs are released both day and night, and since most earlier measurements have been carried out in the daytime, new observations show that diurnal variation should be considered when VOCs are monitored.

Research on VOCs in relation to leaf fall is ongoing in both North Sweden and Northeast Greenland. Here, it has been observed that VOC emissions markedly increase in autumn, following an artificial increase in fallen foliage, in particular in combination with warming. This suggests a previously unknown climate link between increased plant growth, more autumn foliage, the microbial decomposition of leaf fall and the release of VOCs.



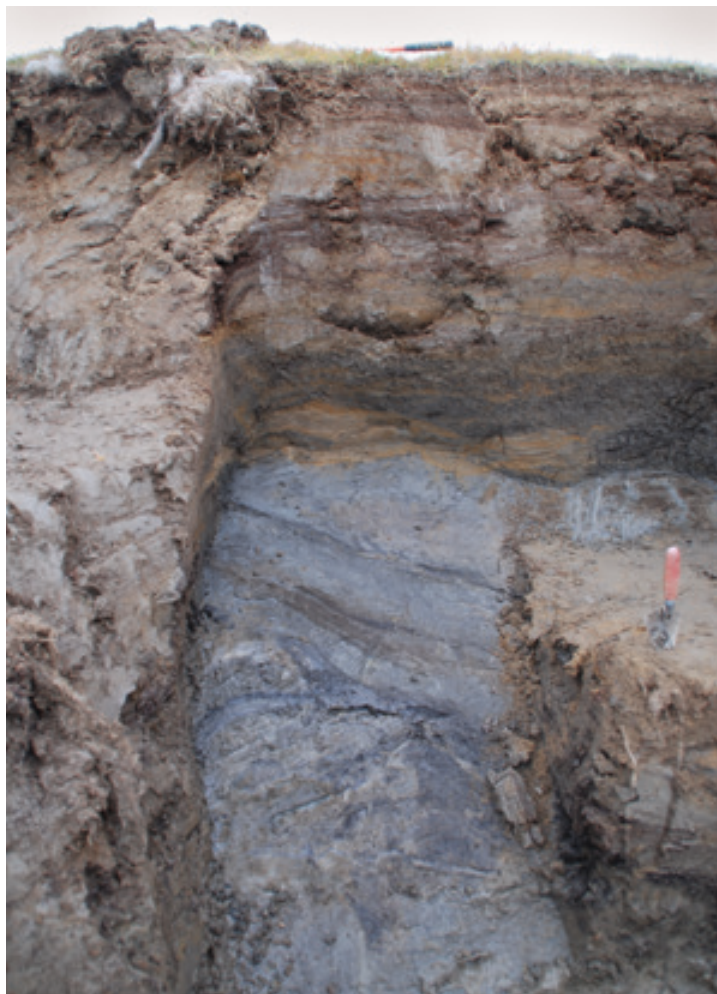
July | Blæsedalen, Disko

Her måles VOC-frigivelsen i et lukket, men gennemsigtigt kammer placeret over en ramme i jorden. Kammeret er kun placeret den korte tid, det tager at foretage en måling. Ved hjælp af en pumpe suges luften gennem en cylinder, som tilbageholder VOC'erne, mens luften sendes retur til kammeret. I laboratoriet analyseres cylindernes indhold af VOC'er. I dette tilfælde foregår undersøgelse indenfor et åbent kammer (svarende til et lille drivhus), som er placeret permanent og er en del af forsøgsdesignet.

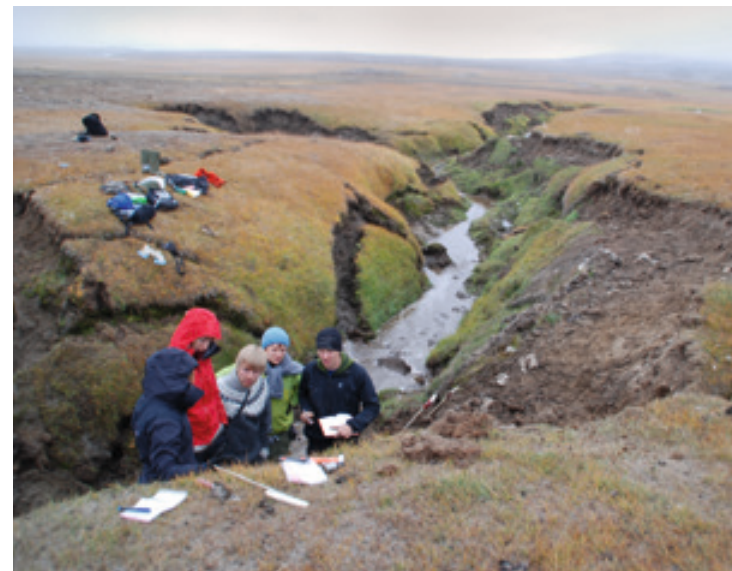
The release of VOCs is measured in a closed, transparent chamber placed over a frame installed in the soil. This chamber is only in place during the short time of the measurement. A pump sucks the air through a cartridge capable of capturing the VOCs, and the air is pumped back to the chamber. In the laboratory, the concentrations of the various VOCs are analyzed. In the picture above, the measurements are made within an open chamber (resembling a greenhouse), which is a permanent part of the experimental design.



VOC'er frigøres også under jordoverfladen. Inkubationer af jord- og permafrostprøver afslører langt mere komplekse interaktioner mellem planter og mikroorganismer end tidligere beskrevet. Disse interaktioner er ansvarlige for både en produktion og et forbrug af VOC'er. En undersøgelse baseret på permafrostprøver fra Vestgrønland demonstrerer, at der kan produceres betydelige mængder af ethanol og metanol samt mere end 300 andre organiske forbindelser ved optøning. Undersøgelsen viser også, at ikke-frosne jordlag over permafrostzonen kan forbruge VOC'er lige så hurtigt, som VOC'er frigøres fra den optøende permafrost. Derfor er den faktiske frigivelse af VOC'er til atmosfæren tæt knyttet til processer, der foregår, mens VOC'erne er på vej fra de dybere permafrostlag til atmosfæren. VOC'er kan sammenlignes med metan, som også kan produceres dybt i jordprofilen og knyttet til en optøet permafrost, men iltet før gasserne når overfladen alt afhængigt af jordens vandindhold og dermed adgang af ilt i jorden.



VOCs are also released from below the soil surface. Incubations of soil and permafrost samples reveal far more complex interactions between plant roots and microbes than previously described. These interactions are responsible for both the production and consumption of VOCs with depth. A study based on permafrost samples from West Greenland demonstrates, that substantial amounts of ethanol and methanol as well as more than 300 other VOCs can be produced upon permafrost thaw. However, it also revealed that unfrozen soil layers above the permafrost zone can consume the VOCs as fast as they are being released from the thawing permafrost. Therefore, the release of VOCs from thawing permafrost to the atmosphere is closely linked to processes occurring on the way from the deeper permafrost layers through the soil to the atmosphere. In that respect, VOCs can be compared to methane, which can also be produced deep in the soil profile, but can be oxidized before it reaches the surface, depending on the soil water content and aeration.



August | Zackenberg

Her udgraves og beskrives et jordprofil, hvor aktivlaget (med rødlig farver) tydeligt ses over den underliggende permafrost.

Here a soil profile has been made and described. The upper active layer in reddish colors is clearly seen above the permafrost.

Hvor kommer kvælstof fra?

Kvælstof regnes for en af de vigtigste begrænsende faktorer for vegetationen mange steder i Arktis. I modsætning til landområder mod syd er tilførslen fra menneskeskabte (fx via gødning) og naturlige kilder i Grønland meget begrænset. Hvor kommer kvælstof så fra? Først og fremmest er den tilgængelige mængde af kvælstof i en typisk tundrajord lille. Mere interessant er det, at den mængde, der tilføres, primært er knyttet til bakterier, som trives i fx fugtige kærømråder, og som er i stand til at binde kvælstof (N_2) fra atmosfæren ved såkaldt kvælstoffiksering. Atmosfæren er rig på kvælstof. Hvorfor er der så overhovedet tale om en kvælstofbegrænsning?

Svaret er, at atmosfærens kvælstof skal fikseres, før planterne kan bruge det. Ved kvælstoffiksering binder en række forskellige mikroorganismer, som f.eks. actinomyceter og cyanobakterier (tidligere kendt som blågrønalger, selvom de ikke er alger) atmosfærens indhold af kvælstof i en biologisk form, således at en efterfølgende nedbrydning fører til, at kvælstof bliver tilgængeligt for resten af økosystemet. Processen er knyttet til specielle mikroorganismer tæt koblet til bestemte planter og er fortsat genstand for intense undersøgelser, specielt i relation til hvor klimafølsom kvælstofbindingen er.

Nye målinger i både Nordsverige og Grønland viser, at den naturlige kvælstofbinding kan være overraskende stor, ikke mindst i det tidlige forår og om efteråret – altså uden for den primære vækstsæson. Disse undersøgelser tyder også på, at de kvælstoffikserende mikroorganismer koloniserer primært mosser, og at kvælstoffikseringen er særlig effektiv, når det er tilfældet. I feltforsøg med kunstig opvarmning på blot et par grader ses endvidere mere end en fordobling af kvælstofbindingen. Det viser, at et varmere klima kan føre til øget kvælstoffiksering, dog kun så længe, at der er fugt nok i jorden til at sikre optimale vækstforhold for mosser.



Where does the nitrogen come from?

Nitrogen is considered one of the most important limiting factors for vegetation growth in many arctic sites. In contrast to southern regions, the supply from anthropogenic (e.g. fertilizers) and natural sources of nitrogen in Greenland is very limited. But where does the nitrogen come from? First, the amount of nitrogen available for plants in a typical tundra soil is very small, but, and more interestingly, the amount supplied is primarily related to bacteria thriving in e.g. moist fens, and capable of fixing nitrogen (N_2) from the atmosphere through a process called nitrogen fixation. The atmosphere is abundant in nitrogen. So why is there a limitation of nitrogen at all?

The answer is that atmospheric nitrogen needs to be fixed before plants can use it. Through nitrogen fixation, a number of different microorganisms, such as actinomycetes and cyanobacteria (formerly known as blue-green algae, although they are not a type of algae) incorporate inorganic nitrogen from the atmosphere into an organic form. A subsequent decomposition can release nitrogen in biologically available forms to the remainder of the ecosystem. The fixation process is related to special microorganisms, which are closely linked to specific plants, and is still subject to intensive research, especially in relation to climate sensitivity of nitrogen fixation.

New measurements in both North Sweden and Greenland show that the process of natural nitrogen fixation can be surprisingly substantial, not the least in early spring and autumn – outside the primary growth season. These measurements also suggest that microbial nitrogen fixers are mainly found on mosses, where nitrogen fixation rates are particularly high. In field experiments with artificial warming of just a few degrees, more than a doubling of the nitrogen fixation has been seen. This shows that a warmer climate can lead to increased nitrogen fixation, however, only as long as the soil remains moist enough to ensure optimal growth conditions for the mosses.

Blad af mos (Tomentyphnum nitens indsamlet på Disko i Vestgrønland), hvor overfladen er koloniseret af cyanobakterier, som er i stand til at binde kvælstof direkte fra atmosfæren (foto: Kathrin Rousk og Pia Pedersen).

Leaf of moss (Tomentyphnum nitens sampled on Disko in West Greenland) where the surface is colonized by microorganisms capable of fixing nitrogen directly from the atmosphere (photo: Kathrin Rousk and Pia Pedersen).





August | Lyngmarksbræen, Disko

I områder nær iskapper, hvor gletsjerne er ved at smelte, og isfronten således rykker tilbage, sker der en naturlig kvælstofbinding. Dette sker, fordi kvælstofbindingen her er en forudsætning for en begyndende opbygning af næringsstofpuljen i jorden – og dermed for at et plantedække med tiden kan etablere sig. Der hvor isen smelter tilbage, dukker et goldt landskab op. Ikke mange hundrede meter væk fra fronten findes imidlertid områder, som for blot 10-20 år siden var dækket af is, men hvor der nu ses et veletableret mosdække. Lidt længere væk fra fronten dukker så de første spæde pilevækster frem. Det er på den måde, man kan forestille sig Grønland blev mere og mere grøn efter sidste istid. Det behøver således ikke at tage mange år, før et goldt landskab bliver grønt, hvis blot mosser og tilhørende cyanobakterier kan finde fodfæste. En vigtig forudsætning for dette er netop isen, der smelter og derfor giver rigelig adgang til vand det meste af sommeren.



In areas near ice caps with melting glaciers and thus a retreating glacier front, natural nitrogen fixation is especially interesting, since it is an essential process for building up the pool of nutrients in the soil – and thus a prerequisite for plants to become established. After ice retreat, a barren landscape appears, yet, only a few hundred meters away from the front, in areas which were ice-covered just 10-20 years ago, a well-established cover of mosses can often be found. A little further away from the ice front, the first small willows show up. This is how one can imagine Greenland to have looked like, turning greener after the most recent ice age. It does not have to take many years for a barren landscape to turn green, if mosses and cyanobacteria get a foothold. An important prerequisite for this is the melting ice, providing an ample supply of water during the summer.

Hvorfor ophobes kulstof i jorden?

I Arktis er både plantevæksten (via fotosyntese) og nedbrydningen af organisk stof til kuldioxid nedsat på grund af det kolde miljø. Når jorden modtager mere kulstof via plantevækst, end der nedbrydes, så forøges jordens pulje af kulstof. Det ses ved en jordbundsdannelse, og ved at jordens øverste lag med tiden bliver mørkere i takt med, at der ophobes kulstof. Når vandindholdet desuden er højt, er tilgangen af ilt mindre og nedbrydningen endnu langsommere, og puljen vokser derfor hurtigere. Den kan vokse så hurtigt, at den primært består af tørv. Grønland har kun været isfrit i omkring 10.000 år, og derfor er puljen af kulstof begrænset i forhold til meget ældre landskaber i fx Sibirien og Canada.

To andre vigtige processer kan bidrage yderligere til at begrave organisk stof i jorden. Den ene forekommer, når kulstof begravnes under sedimenter. De steder vil grænsen til permafrosten bevæge sig op og på den måde "fange" den pulje af organisk stof, der findes i de lag, som er blevet begravet. Det sker ganske enkelt ved, at de nye jordlag fryser og bliver en del af permafrosten. En anden måde at begrave kulstof på i Arktis sker i forbindelse med gentagne frys-tø processer. Disse medfører, at de enkelte jordlag krøller sammen, fordi jorden udvider sig og trækker sig sammen, når den henholdsvis fryser og tør. Det bevirker, at jordlag fysisk flyttes ned i jordprofilen – ved en proces som kaldes cryoturbation. En lignende proces kendes ved de frys-tø processer, som til stadighed bringer større sten op på marker på sydlige breddegrader. I Arktis er processen vidt udbredt, og den begraver betydelige mængder af organisk stof.

De seneste beregninger af kulstofpuljer i Arktis konkluderer i runde tal, at der findes knapt 500 milliarder ton kulstof i den øverste meter af jordsystemer med permafrost (svarende til et areal på omkring 18×10^6 km², eller en fjerdedel af de isfrie landområder på den nordlige halvkugle). Samlet set tyder det på, at den begravede pulje af kulstof i Arktis er dobbelt så stor som mængden af kulstof i atmosfæren. I Grønland findes der omkring 5-15 kg kulstof per kvadratmeter i den øverste meter af jorden (nogle steder dog betydeligt mere). I dele af Sibirien og Canada, hvor permafrosten er betydeligt ældre end i Grønland, er den gennemsnitlige mængde af kulstof mere end 50 kg kulstof per kvadratmeter i den øverste meter af jorden. I en klima-kontekst er det centrale spørgsmål, hvor stor en andel af denne pulje, som vil kunne omsættes og hvor hurtigt.

Why is carbon accumulated in the soil?

In the Arctic, plant growth (through photosynthesis) and decomposition of organic matter to carbon dioxide are reduced due to the cold environment. When the soil receives more carbon through plant growth than what is decomposed, the soil pool of carbon increases. This causes soil formation and a darkening of the upper soil layers following the accumulation of carbon. When the water content is high, the supply of oxygen is limited and the decomposition rates slow down. This causes the carbon pool to increase at an even higher rate. At very high rates, the carbon pools are primarily accumulated as peat. Greenland has only been ice-free for about 10,000 years, and therefore the pool of carbon is small compared to the much older landscapes in e.g. Siberia and Canada.

Two other important processes can contribute to the burial of organic matter in the soil. One is the burial of carbon under sediments. On these sites, the permafrost table will move up, and thus "capture" the pool of organic matter found in the buried layers. Another way to bury carbon in the Arctic is in the repeated freeze-thaw processes leading to a mixing of soil layers due to expansions and contractions of the soil caused by alternating freezing and thawing – in a process called cryoturbation. This means that soil layers are physically moved downwards into the soil profile. A similar process is known from more southern latitudes, where freeze-thaw processes continuously bring larger stones to the surface of fields. In the Arctic, the process is widespread, and it buries a surprisingly large amount of organic matter.

The latest calculations of carbon pools in the Arctic conclude that almost 500 billion tons of carbon are found in the top one meter of permafrost-affected soil systems (corresponding to an area of around 18×10^6 km² or a quarter of the ice-free land areas in the Northern Hemisphere). Altogether, this suggests that the buried pool of carbon in the Arctic is about two times larger than the amount of carbon in the atmosphere. In Greenland, 5-15 kg carbon per square meter is found in the upper one meter of soil (in some places considerably more). In parts of Siberia and Canada, where the landscape has been free of ice for a considerably longer period, the upper one meter of the soil holds often more than 50 kg carbon per square meter. In a climate context, the central question is how much and how fast will this soil carbon decompose.



July | Flakkerhuk, Disko



Det ville være skønt, hvis der kunne leveres et entydigt svar på, om Arktis som helhed bidrager til at binde eller frigive kulstof. Datagrundlaget er dog i dag ikke detaljeret nok til, at svaret kan blive entydigt. Det bedste bud er, at jord-plante systemet er i rimelig balance. Så på trods af, at der hvert år er stort optag og samtidig stor frigivelse af kuldioxid, og at begge størrelser varierer fra år til år, så synes der ikke at være grundlag for at sige, at Grønland bidrager positivt eller negativt til atmosfærens indhold af kuldioxid. Som vi skal vende tilbage til senere, gælder det også metan.

Som beskrevet i dette kapitel er svaret for fremtiden ligeledes usikkert. Det skyldes de mange koblede processer, der alle afhænger af lufttemperaturen, men også af hvor meget og hvordan nedbøren vil blive fordelt, hvor stor en andel af nedbøren, der vil komme som sne, hvilken andel af Arktis, der vil blive henholdsvis mere våd og mere tør, og andre forhold, som medvirker til at påvirke kulstofbalancen. Disse forhold er forbundet med meget stor usikkerhed og bør bidrage til den forsigtighed og ydmyghed, hvormed der skal konkluderes på de mange undersøgelser.

Øverste billede på modstående side viser tørvedannelsen i et kærområde. Tørven er tynd, men rig på mørkfarvet organisk stof og ligger på en lysfarvet mineraljord med et lille indhold af organisk stof. Knap halvdelen af det organiske stof er kulstof. Når tørvelaget er tyndt, skyldes det, at landskabet er ungt. Med tiden vil tørven blive tykkere, efterhånden som der akkumuleres mere organisk stof på grund af den langsomme nedbrydning i det kolde, våde miljø. Nedenunder ses en tør tundra. Her er puljen af organisk stof begrænset, fordi der er fri adgang for ilt og derfor sker en hurtigere nedbrydning af det organiske materiale. Omvendt ses en begravet, mørk stribe i profilet. Det er en gammel jordoverflade, der nu ligger under sand, som vinden har ført med sig.

It would be great if an obvious answer could be found to whether the Arctic as a whole contributes to the uptake or the release of carbon. However, today the data available is not sufficient to give a clear answer. The best guess is that the soil-plant system is in a reasonable balance. So despite the fact that each year there is a large uptake and at the same time a large release, and that both figures vary from year to year, there is not enough evidence to conclude, whether Greenland contributes positively or negatively to the atmospheric content of carbon dioxide. As we will see later, the same story is true for methane.

As described in this chapter, the answer for the future is likewise uncertain. This is due to the numerous linked processes, all dependent on air temperatures, but also on the amount and distribution of future precipitation, the percentage of the precipitation to fall as snow, which parts of the Arctic will be drier and which parts wetter and other parameters influencing the carbon balance. Those parameters are associated with a high degree of uncertainty and should be considered with caution when drawing conclusions from the research.

The upper photo on the opposite page shows the formation of peat in a fen. The peat layer is thin but rich in dark organic matter and overlying a light mineral soil with low organic matter content. About half of the organic matter in the peat layer is carbon. The layer is thin, because the landscape is young. With time, the peat will grow thicker when organic matter accumulates due to the slow decomposition of organic matter in the cold and wet environment. The photos below show a dry tundra site. Here, the pool of organic matter is small, because there is plenty of oxygen to ensure a fast decomposition of organic matter. Conversely, a darker layer is buried deeper in the profile. This is an old surface, which has been buried under windblown sand.

Når tundraen brænder

Grønland er ikke kendt for tundrabrand. Men i sensommeren 2017 opdagede forskere med speciale i satellitbilleder for første gang i mange år en større brand omkring 150 kilometer nordøst for Sisimiut på den grønlandske vestkyst. Billedet på modstående side blev optaget af satellitten Landsat 8. Det viser brandens omfang og nærhed til Indlandsisen. Helt uafhængigt af denne naturbrand, havde forskere to dage inden oprettet små forsøgsplot på øen Disko for at undersøge, hvordan en kontrolleret afbrænding kan påvirke frigivelsen af drivhusgasser. Mens naturbranden nær Sisimiut dækkede adskillige kvadratkilometer, dækkede de små forsøgsplot på Disko kun nogle få kvadratmeter. Disse er siden blevet brugt til at undersøge, hvordan planter og jordmiljøet påvirkes på kortere og længere sigt af en tundrabrand.

Det er uklart, hvor almindelige naturbrande er i Grønland, men det kan historiske satellitdata fra Grønland måske fortælle. Men naturbrande er almindelige i både Alaska, Canada og Rusland. Det er også uklart, hvad der udløste branden i 2017. Men mangel på lyn før antænding antyder, at menneskelig aktivitet kunne være årsagen til denne specifikke brand i Grønland. Lyn er kendt andre steder i Arktis for at være ansvarlige for tundrabrande.

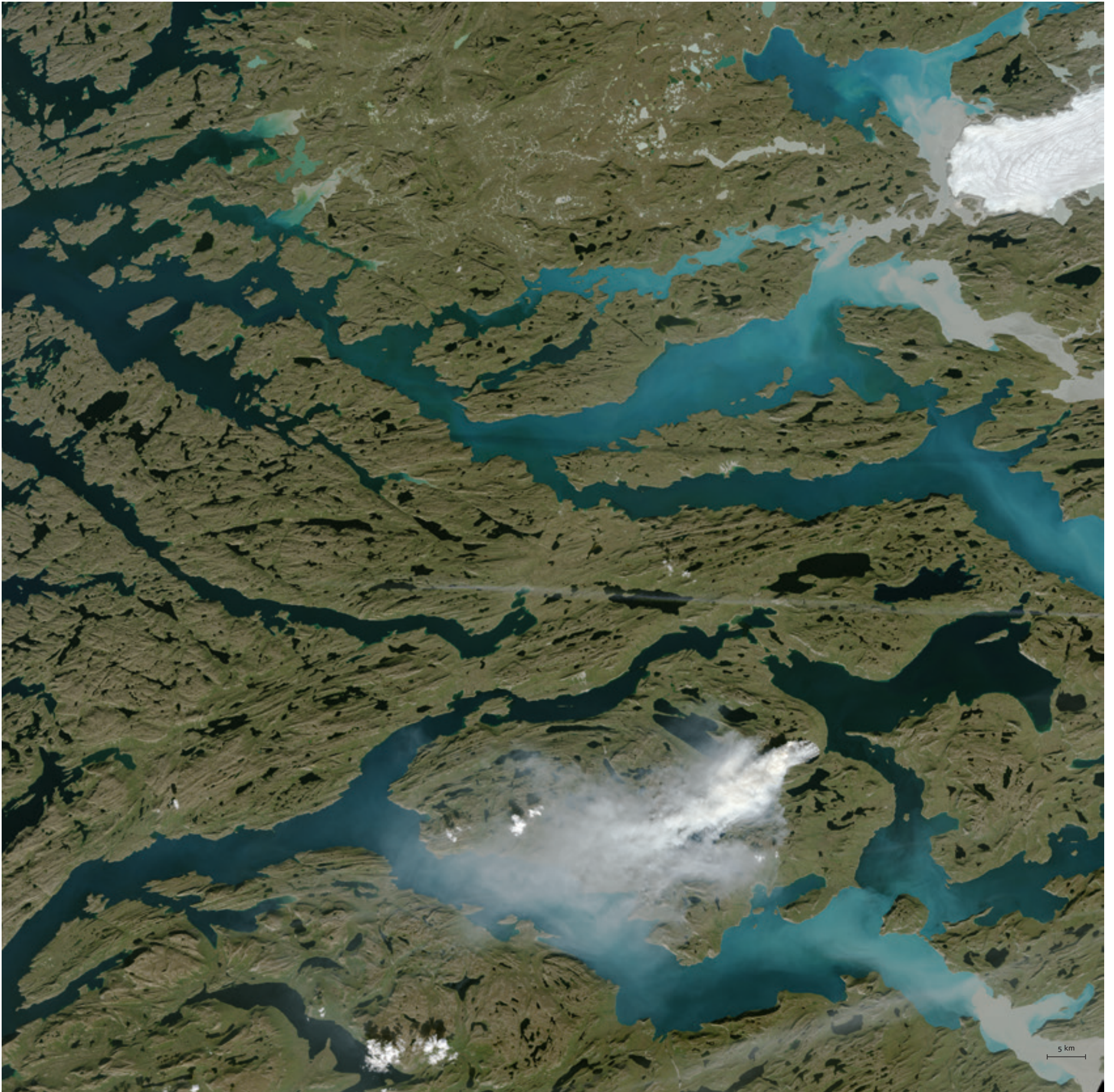
En tør sommer (som også var tilfældet i juni og juli 2017 i Sisimiut-området) i kombination med stærk vind og en brandbar biomasse i form af en vegetation er afgørende for brandintensiteten. En høj brandintensitet kan medføre at dybere jordlag (i visse tilfælde tørvelag) kan ulme i ugevis efter en forudgående overfladebrand. Jo højere temperatur, jo mere kvælstof vil der kunne frigives som gas. Et sådant tab af plantenæringsstof er særlig vigtigt for, hvor hurtigt vegetationen kan reetableres efter en tundrabrand. Det er sandsynligt, at både antallet og intensiteten af naturbrande i Grønland vil stige såfremt varmere og mere tørre somre bliver mere almindelige i fremtiden.

The tundra on fire

Greenland is not known for its tundra fire. But late summer 2017, remote sensing scientists noted the first major wildfire in years in an area about 150 kilometers northeast of Sisimiut on the west coast of Greenland. The image, on the next page is taken from Landsat 8, illustrates the scale of the fire in the vicinity of the Ice Sheet. Two days before this particular natural fire occurred, scientists actually already started to study the effect of such wildfires on soil-plant and greenhouse gas emissions at scientific sites at Disko Island. While the wildfire near Sisimiut covered several km², the test fire plot at Disko covered only a few square meters. This study site has been used since to explore the short- and long-term effects of the fire on soil-plant interactions and greenhouse gas exchange with the atmosphere.

It remains unclear how many wildfires can be found by analyzing historical satellite data from Greenland, but wild tundra fires are rather common in both Alaska, Canada and Russia. It also not clear what triggered the fires. But lack of lightning prior to ignition suggests that human activity could be the reason for this specific fire in Greenland. Lightning is known to be responsible for tundra fires in other areas in the Arctic.

A dry summer (which was also the case in June and July 2017 in the Sisimiut area) in combination with strong winds and biomass of flammable vegetation are crucial for the fire intensity. A high fire intensity can result in deeper soil layers and even peat layers to burn for weeks after an initial surface fire. The higher temperatures also increase the amount of nitrogen degassing, and thereby the availability of a plant nutrient, which is particularly important for how quickly vegetation can grow back after a tundra fire. The number and intensity of tundra fires in Greenland is expected to increase with projections of warmer and drier summers.



August | near Sisimiut



July | Blæsedalen, Disko

Et forsøgsplot på øen Disko for at undersøge hvordan kontrolleret afbrænding kan påvirke planter og jordmiljøet, herunder frigivelse af drivhusgasser.

An experimental plot to study the effects of wildfire on soil, plant and greenhouse gas emissions at Disko Island.

Brandforsøgene på Disko var planlagt med henblik på at re-præsentere en moderat tundrabrand med en temperatur på op til nogle få hundrede grader celsius i den indledende fase af branden og op til hundrede grader nogle få cm under jordoverfladen. Under en sådan brand frigøres kulstof som kuldioxid på grund af selve afbrænding af vegetation og delvis omsatte blade og grene på jordoverfladen. Men allerede den følgende sommer, spirede nye skud frem fra de dele af rodsystemet, som ikke blev ødelagt under brandforsøget, og efter fire år var brandfelterne tilsyneladende grønne igen. Dette er i tråd med undersøgelser fra Canada og Alaska, som viser, at den mængde kulstof, som frigives under selve branden, i store træk bindes igen i den vegetation, som etableres efter branden. I naturbrande med høj intensitet, hvor også tørvelag bliver brændt, er det kulstof akkumuleret over flere 100 år, som frigives som kuldioxid. Det tager derfor tilsvarende længere tid at binde den tabte kulstofpulje. Denne forsinkelse i at binde nyt kulstof er vigtig, fordi den er afgørende for den gennemsnitlige pulje af kulstof i jord og i planter i de områder, der i fremtiden kan blive udsat for mere hyppige og voldsomme naturbrande.

Målinger af drivhusgasudveksling ved brandforsøgene på Disko viser, at netto-kuldioxidbalancen kan påvirkes markant. Det gælder i særdeleshed ved selve afbrændingen af organisk stof men også på lidt længere sigt på grund af en nedsat fotosyntese (planternes kulstofbinding). Men målinger af både kuldioxid, metan og lattergas tyder midlertidigt på, at effekten af en brand er ret begrænset på lang sigt. Denne konklusion holder muligvis ikke i tilfælde af mere voldsomme brande. Desuden frigiver brande også sod – også kendt som "black carbon", som kan transporteres langt med vinden. Med en dominerende vestlig vind i Vestgrønland vil en del af sod fra brande kunne bidrage til en mørkere overflade på den grønlandske Indlandsis. Brande kan på den måde direkte påvirke, hvor meget energi Indlandsisen optager fra solen og medføre en øget afsmeltning. Det er forhold, der kræver en nærmere undersøgelse, hvis naturbrande bliver mere almindelige.

The experimental tundra fire at Disko Island was meant to represent a moderate tundra fire event, where the surface temperature reached a maximum of a few hundreds of degrees Celsius during the initial fire and less than hundred degrees a few centimeters below the ground surface. During the fire, carbon was released as carbon dioxide due to the burning of vegetation and part of the surface litter layer. However, it was noted that, already the following summer, the part of the root system, which was not destroyed during the fire, began to sprout, and that after four years the burned plots appeared green again. This is in line with studies from Canada and Alaska, that show, given enough time, the carbon released from tundra ecosystems during moderate wildfires will mostly recover through vegetation succession within years to decades. However, from high-severity fires, where peat layers are burned, carbon buried over several hundreds of years may take the equivalent numbers of years to recover. This recovering time is a critical factor, because it determines the average carbon storage in soil and plants in areas subject to an increasing frequency and/or intensity of tundra fires in the future.

Measurements of greenhouse gas exchange at the fire plots suggest that emissions can be strongly affected, not the least on a short term, due to the burned organic matter from the fire event itself, but also on a longer term, due to the reduced photosynthesis and corresponding carbon sequestration. But surprisingly, there appears to be only a limited effect of mild tundra fires on the longer term soil-atmosphere gas exchange of both carbon dioxide, methane and nitrous oxide. This conclusion may not hold for more severe fire events. Finally, fires emit also soot – known as black carbon, which will be redistributed over long distances via airborne transport in the atmosphere. With the dominating western wind in West Greenland, some of this material will contribute to a darker surface of the Greenland Ice sheet. The direct effect of such albedo changes and the associated increased glacial melt remains to be further investigated.