

Klimaøkologi – en integrasjon av klimatologi og økologi

Jane Uhd Jepsen, Ole Einar Tveito, Ketil Isaksen og Åshild Ønvik Pedersen

<https://doi.org/10.7557/ottar.8440>

I Arktis skjer oppvarmingen om lag tre ganger raskere enn det globale gjennomsnittet. Dette fører til endringer i de fysiske rammene for arktiske økosystemer hvis hastighet er uten historisk sidestykke. Å dokumentere og forstå konsekvensene for arktiske økosystemer er helt nødvendig for at politikk og adaptiv forvaltning kan gjennomføres med et solid kunnskapsgrunnlag. *Klimaøkologien* er et eget tverrfaglig forskningsfelt som innebærer et taktskifte i både økologisk og klimatologisk overvåking.

Hva er klimaøkologi?

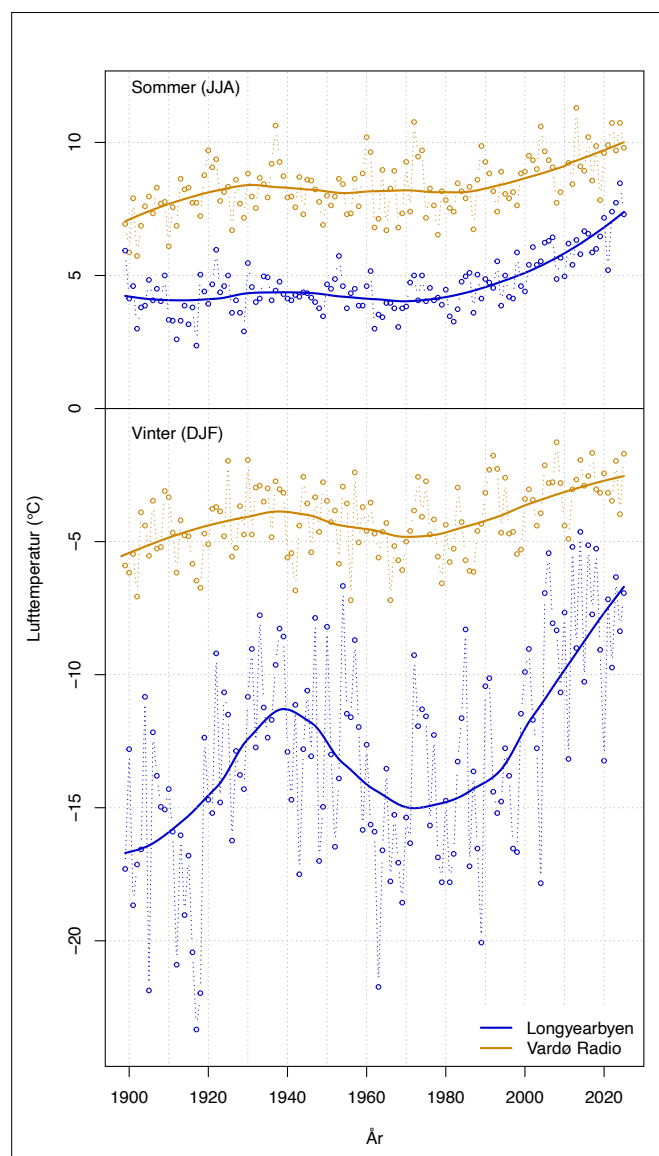
Klima og økosystemer er uløselig knyttet sammen. Klimaet former de fysiske forholdene for et økosystem, setter krav til hvilke tilpasninger som trengs hos arter som skal overleve og trives, og bestemmer rammene for arters samhandling med hverandre og miljøet. Tilsvarende påvirker økosystemer klimaet gjennom eksempelvis karbonlagring, klimagassutslipp og strålingsbalanse (albedo). Det er derfor ikke overraskende at *klimaøkologi* har oppstått som et eget tverrfaglig forskningsfelt. *Klimaøkologi kombinerer innsikt fra økologi og klimatologi for å forstå hvordan klimaendringer påvirker økosystemer, samt hvordan økologiske prosesser kan påvirke klimaet.* Ved å sette sammen data og metoder fra begge fagfelt kan klimaøkologien bidra til bedre forvaltning av naturressurser, gjennom sikrere og raskere dokumentasjon av effekter av klimaendringer på økologiske systemer.

Klimautvikling i Arktis

Klimaendringen skjer mye raskere i Arktis enn i andre deler av verden. Siden 1979 har oppvarmingen i Arktis vært omtrent tre ganger raskere enn det globale gjennomsnittet som følge av forsterkende tilbakekoblinger i klimasystemet. De største fysiske endringene i Arktis har skjedd i vinterhalvåret fra oktober til mai. I perioden 2005–2023 ble oppvarmingen i Arktis raskere på grunn av hyppigere og mer langvarige mildværshendelser om vinteren over det sentrale Polhavet.

Figur 1. Homogeniserte observasjonsserier for sommer- og vintertemperatur ved målestasjonene Svalbard Lufthavn (Nordenskiöld Land) og Vardø Radio (Varanger, Finnmark). De heltrukne linjene viser utjevnete langtidsverdier som tilsvarer ca. 30 år. Sommer (JJA) = juni, juli og august; vinter (DJF) = desember, januar og februar.

Vinterstormene knyttet til mildværhendelsene medfører økt transport av fuktig og varm luft som gir mer nedbør i Arktis.



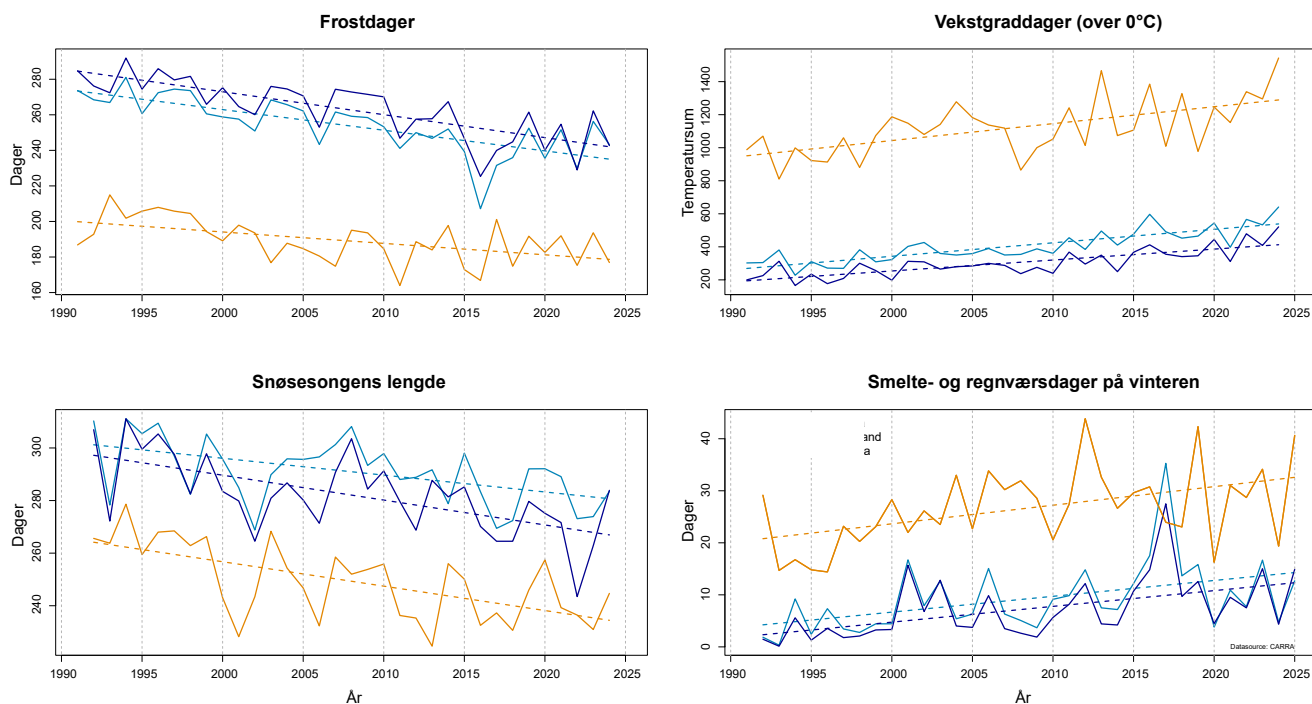
Permafrosten og resten av kryosfæren, den frosne del av jordoverflaten, har blitt betydelig varmet opp de siste tiårene. Sammenlignet med tidligere, må mindre energi tilføres for å starte tining og smelting av kryosfæren. Større andel av nedbøren kommer nå som regn i stedet for snø. Nyere beregninger fram mot 2100 indikerer en raskere oppvarming og større tap av havis og isbreer sammenlignet med tidligere fremskrivninger. De største endringene i Arktis har skjedd i den nordlige Barentsregionen, spesielt knyttet til lufttemperatur og havis. Her går oppvarmingen fem til syv ganger raskere enn det globale gjennomsnittet. Oppvarmingen ser ut til å være enda sterkere koblet til den store reduksjonen av havis enn det man har trodd basert på tidligere studier.

På fastlandet er Finnmark et av de områdene i Norge som har hatt den største temperaturøkningen. Oppvarmingen i COATs overvåkingsområder på Nordenskiöld Land og Brøggerhalvøya på Spitsbergen skjer dobbelt så fort som for Varanger i Finnmark (Figur 1). For året som helhet har lufttemperaturen for disse tre områdene i gjennomsnitt steget med hhv 1.13, 0.99 og 0.55 °C / tiår for perioden 1991–2024.

De siste tiårene har sommertemperaturen skutt i været. Igjen er økningen størst på Svalbard. Sommertemperaturen ved Svalbard lufthavn er nå ca. 3 grader høyere enn det «naturlige kjøleskapet»

på omkring 4 °C som dominerte på 1900-tallet. På Svalbard er sommeren 2024 hittil den varmeste og førte bl.a. til rekordstor bresmelting. I løpet av seks uker forsvant rundt 61,7 gigatonn med is fra breene på Svalbard. Det er nesten like mye is som hele Jostedalshreen, som er den største isbreen på det europeiske fastlandet. Svalbard og andre områder rundt Barentshavet mistet totalt over 100 gigatonn is i 2024. Dette gjorde regionen til en av de største bidragsyterne til global havnivåstigning i 2024. Det ble også målt rekordstor tinedybde i det aktive laget over permafrosten på Svalbard i 2024.

I tillegg til hyppigere mildværsperioder om vinteren, forandres også andre aspekter av vinterklima. Perioder med ekstremt lave temperaturer under -20–30°C opptrer sjeldnere. Vinterene blir kortere, og vekstsesongen (definert som perioden med døgntemperatur over 0°C) lenger. For Svalbard er vekstsesongen i gjennomsnitt blitt opptil 7 uker lengre for COAT sine studieområder på Brøggerhalvøya og Nordenskiöld Land, mens den på Varangerhalvøya har økt med tre uker siden 1991 (Figur 2). Antall dager med frost har blitt tilsvarende redusert og perioden med snødekke er kortere. Lengden på den gjennomsnittlige snødekte perioden har siden vinteren 1991/92 minket med rundt 30 dager på Brøggerhalvøya og Varangerhalvøya, og 20 dager på Nordenskiöld Land. Samtidig har antall hendelser med snøsmelting og nedbør som regn om vinteren økt, noe som fører



Figur 2. Klimautvikling 1991–2024 for de tre COAT regionene Brøggerhalvøya, Nordenskiöld Land på Svalbard og Varangerhalvøya i Finnmark. **a)** Gjennomsnittlig antall dager med frost (døgnmiddeltemperatur < 0°C). **b)** Regionalt gjennomsnitt av temperatursummen over 0°C. **c)** Regionalt gjennomsnitt av antall dager pr. vintersesong med snø. **d)** Gjennomsnittlig antall hendelser med samtidig nedbør og smelting i vinterperioden oktober til mai.

Datakilde: C3S CARRA



Figur 3. COATs værstasjon i Bergebydalen ved den lavarktiske tregrense (venstre) og på Jansonhaugen i høyarktiske Adventdalen (høyre). Foto: Nigel G. Yoccoz og Stein Tore Pedersen

til hyppigere etablering av is på eller i snølaget eller på bakkeoverflaten. Dette har en betydelig negativ effekt for dyreliv på eller under snødekket som mister tilgang på mat og levesteder.

Hvordan endrer norske arktiske økosystemer seg?

Med historisk raske klimaendringer endrer også de fysiske forholdene for økosystemer seg raskere enn noen gang før. I Norge består den lavarktiske sonen av de ytre deler av halvøyene nordøst i Finnmark fra Varangerhalvøya i øst til Magerøya i vest. Denne regionen er preget av åpen, treløs tundra, og økosystemet har klare lavarktiske trekk med en rekke arktiske arter av både planter og dyr. Det lavarktiske klima derimot er ikke lenger framherskende i regionen. Svalbard ligger i høyarktis, og tundraøkosystemet på Svalbard er fortsatt treløst med permafrost. Men det høyarktiske klimaet er langt på vei tapt. Tundraøkosystemet på vestsiden av Spitsbergen befinner seg i dag i et klima som temperaturmessig nærmer seg det som kjennetegnet lavarktiske områder i Øst-Finnmark rundt 1900 (Figur 1).

‘Tapet’ av hele klimasoner, har på kort tid skapt en ny og ukjent situasjon for våre arktiske tundraøkosystemer. Arter som lemen eller svalbardrein er gjennom evolusjonen tilpasset kulde og stabile tørre snøforhold. Hvordan klarer de å forholde seg til vintermildvær, ising på bakken, stadig kortere vinter med redusert snødekke, men også lengere og muligens en mer produktiv vekstsesong? Andre arter, slik som rype og hare, skifter fra hvit vinterdrakt til sommerdrakt bestemt av lys, ikke av temperatur. Hvordan klarer de seg når snøen kommer seinere om høsten og vinteren er kort, mens lysregimet er uendret? Blir de mer utsatt for rovdyr på grunn av tap av kamuflasje? Svar på

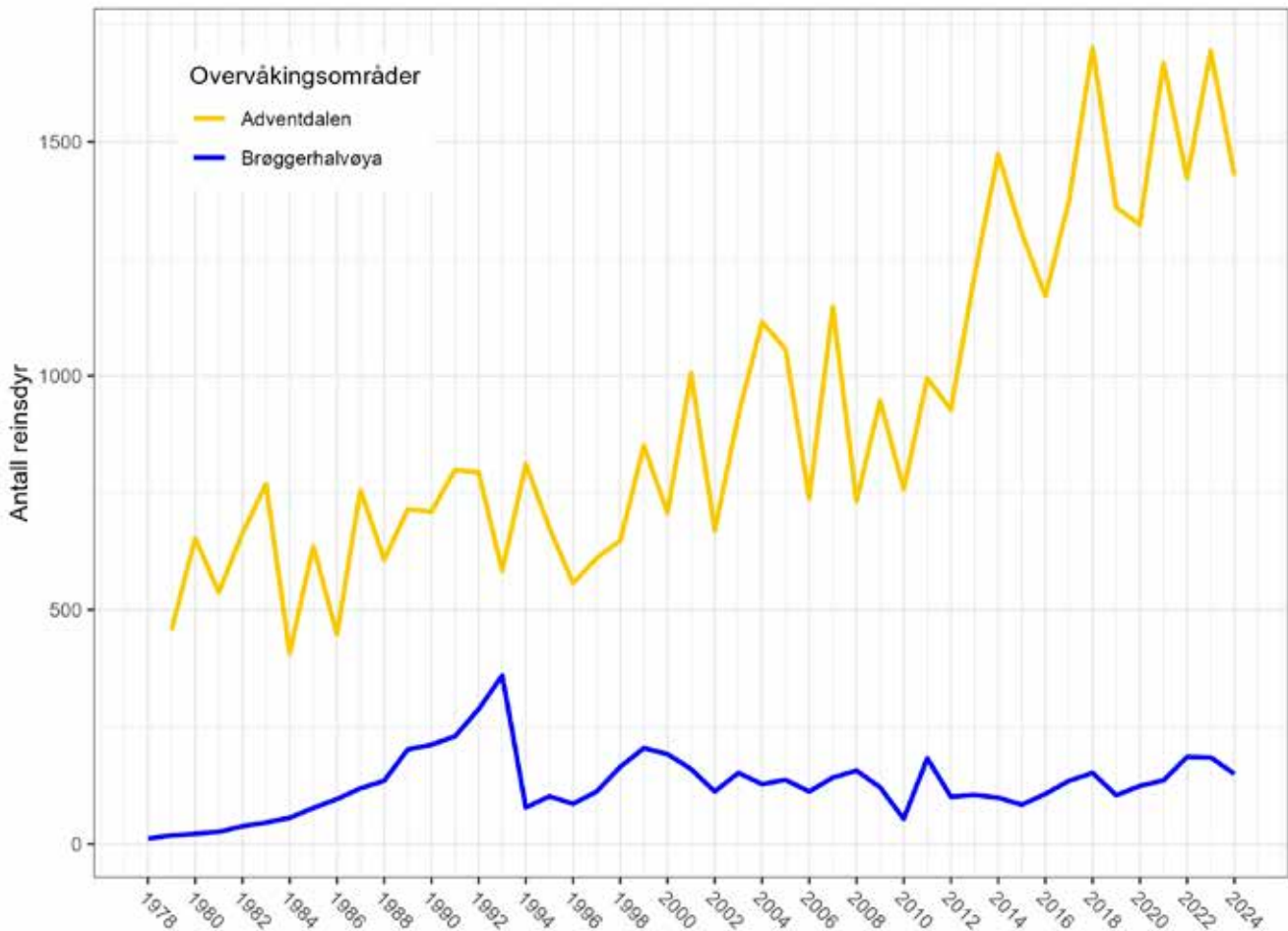
slike spørsmål står helt sentralt i COATs klima-økologiske overvåking.

For noen få år siden ble tilstanden til norske tundraøkosystemer, både i det lav- og det høyarktiske, vurdert som en del av det nasjonale *Fagsystem for vurdering av økologisk tilstand*. COATs forskere ledet og deltok i det vitenskapelige panelet og COAT leverte også data til de fleste økologiske og klimatologiske indikatorer som vurderingen var basert på. Panelet konkluderte da at klimaendringer overskygger alle andre påvirkningsfaktorer i arktiske tundraøkosystemer. På tross av betydelige endringer i det fysiske miljøet, var konklusjonen imidlertid at de økologiske konsekvensene foreløpig var begrensede, og først og fremst synlige i de deler av økosystemet som har sterkest kopling til klima, og mest i lavarktis. Vurderingen påpekte dog en rekke varsler om at større endringer er under utvikling, for eksempel en tydelig økende tilstedeværelse og dominans av boreale arter i lavarktisk tundra, en prosess kjent som ‘borealiserings’.

Hvordan integrere klimatologi og økologi i praksis?

Klimaøkologi krever først og fremst ekte, tverrfaglig samhandling mellom klimatologer og økologer. En viktig forutsetning for slik integrering er etablering av en samordnet forskningsinfrastruktur med tilstrekkelig og langsiktig driftsfinansiering. Dette inkluderer både teknologiske ressurser og organisatoriske strukturer som muliggjør effektiv datautveksling og samarbeid på tvers av fagfeltene.

Videre er det nødvendig med intensivert klimaovervåking i økologisk relevante gradienter, både i tid og rom. Dette innebærer å fokusere på klimasensitive (‘responsive’) komponenter i



Figur 4. Bestandsutvikling, antall reinsdyr, i to av de overvåkede bestandene i COAT, Adventdalen på Nordenskiöld Land (1979 til i dag) og Brøggerhalvøya (1978 -).

økosystemet og på områder der klimaendringer forventes å ha størst innvirkning på økosystemene. I tillegg må klimatologiske data samles inn på en skala som er relevant for økologiske prosesser. En av de største satsinger på ny infrastruktur i COAT er derfor utbygging av det eksisterende meteorologiske stasjonsnettverk både i den lavarktiske delen av Finnmark og i høyarktisk tundra på Svalbard (Figur 3). Dette for å sikre at nettverket av stasjoner dekker økologisk relevante klimagrader fra kyst til innland eller fra dalbunn til fjelltopp.

En annen nøkkelkomponent er utviklingen av klimaøkologiske variabler, som beskriver koblingen mellom klima og kjente økologiske mekanismer ('tilstandsvariabler'). Disse kan variere i kompleksitet, fra enkle mål som bakketemperatur eller snøsesongens lengde til mer avanserte tilstandsvariabler som integrerer økologiske mekanismer relatert til fenologi, populasjonsdynamikk og artsinteraksjoner. Snøstruktur, særlig forekomst av islag i snøprofilen i et omfang som påvirker beitedyrs tilgang på maten, er et eksempel på en kompleks tilstandsvariabel som krever tett integrasjon av økologisk forståelse og klimatologiske

data og modeller. I det følgende beskriver vi tre eksempler på hvordan økologi og klimatologi integreres i praksis i COATs overvåking herunder noen sentrale klimaøkologiske tilstandsvariabler.

Eksempel 1. Svalbardreinen: Motsatte bestandstrender fra varmere vær

Svalbardreinen lever i ytterkanten av villreinsens utbredelsesområde og den er en stedegen, plantespisende underart. Den har tilpasset seg sine arktiske leveområder i tusenvis av år. Reinen påvirker tundraen gjennom beiting, gjødsling og tråkk. Den har også en sentral rolle i næringsnettverket fordi døde rein gir tilgang på mat til åtselere om vinteren. Siden 1980 tallet har reinsdyrbestandene på Svalbard fordoblet seg (Figur 4).

Klimaendringene har ført til at den snøfrie sesongen i dag er lengre, noe som betyr lettere tilgang på mat. Dette gir gode vilkår for reinens tilvekst og oppbygging av energilagre før den møter vinteren, som er «flaskehalsen» i bestandsdynamikken. Kroppsvekta er avgjørende for svalbardreinsens reproduksjon og overlevelse. Kroppsvekta i sin tur er sterkt påvirket av tilgang til beite om vinteren,

og regnfulle vintre med islagte beiter, samt svært snørike vintre, gir lave vekter. Høye bestandstettheter øker konkurransen om maten på vinteren, og kan senke vekta ytterligere. Resultatet blir høy dødelighet, spesielt blant de yngste og eldste dyra, og få kalver påfølgende sommer. Dermed reduseres bestanden av reinsdyr.

Vinterregn og isingsepisoder opptrer over store landområder. Likevel finner vi at summen av de samme type klimapåvirkninger bidrar til ulike bestandstrender for bestander som lever langs kysten (Brøggerhalvøya) og på innlandet (Nordenskiöld Land). Forklaringen ligger i noen små, men viktige forskjeller i vær, klima og responser hos reinsdyrene.

På Brøggerhalvøya, ved den meteorologiske stasjonen i Ny-Ålesund, har den årlige mengde vinterregn vært betraktelig større enn ved stasjonen ved Svalbard lufthavn (Nordenskiöld Land). Dette har ført til hyppigere og mer omfattende isingsepisoder på Brøggerhalvøya. Derimot har økningen i sommertemperatur på Nordenskiöld Land vært større enn på Brøggerhalvøya. Fordi regnværsvintre har en negativ effekt på bestandsstørrelsen og varme somre en positiv effekt på planteveksten, vil netto påvirkning bestemmes av styrken på de ulike klimapåvirkninger. I COAT har vi vist at de lokale forskjellene i vær og klima bidrar til å forklare

de sprikende bestandstrendene mellom kyst og innland. Enkelt sagt så har den positive effekten fra sommeroppvarmingen kompensert for den negative effekten av vinteroppvarmingen på Nordenskiöld Land, mens det motsatte ser ut til å være tilfelle på Brøggerhalvøya. Dette har medført mer enn tredoblede bestander i overvåkingsområdene på Nordenskiöld Land, se figur 4.

Sentrale klima-økologiske tilstandsvariabler som overvåkes i COAT sine to kjerneområder på Svalbard:

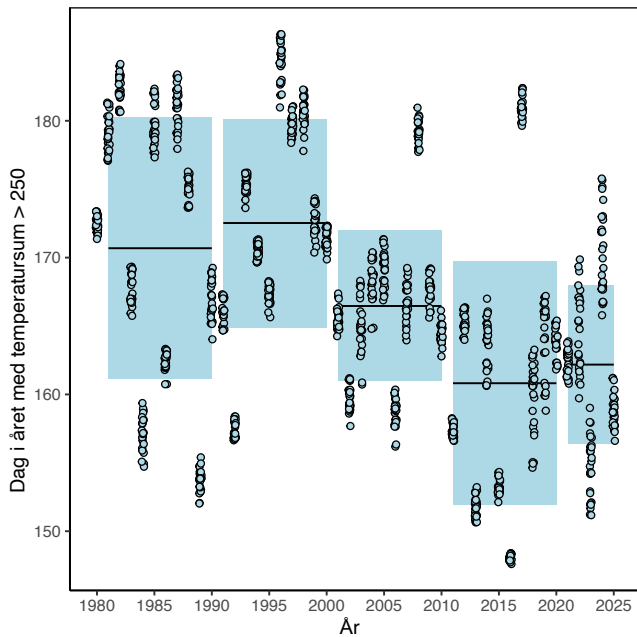
- Antall Svalbardrein fordelt på kjønn og alder.
- Kroppsvekt av simler og kalv i april.
- Snødybde, islag i snøpakken, tykkelse av bakkeis og bakketemperatur.
- Habitatbruk hos Svalbardrein.

Eksempel 2. Bjørkemålere: Rask ekspansjon i et mildere klima

Målere er en familie av sommerfugler. *Bjørkemålere* er en uformell samlebetegnelse på de vanligste målerartene som spiser bjørk, først og fremst fjellbjørkemåler (*Epirrita autumnata*), brun høstmåler (*Operophtera brumata*) og gul frostmåler (*Agriopsis aurantiaria*). I Nord-Norge er disse tre artene kjent som lauvmakk. Fjellbjørkemåleren er en stedegen art i den nordnorske



Figur 5. Svalbardrein. Foto: Åshild Ønvik Pedersen



Figur 6. Målt i laboratoriet trenger eggene til brun høstmåler en temperatursum på 250–300 grader før de klekkes. Den dagen i løpet av året denne temperaturen er oppnådd kan derfor være en nyttig klimaøkologisk tilstandsvariabel. Lengst øst i Finnmark, på grensen mellom bjørkeskog og lavarktisk tundra, oppnås en temperatursum av denne størrelsesorden stadig tidligere på sommeren. Figuren viser den dagen i løpet av året (dag 1=1. januar) der en temperatursum på 250 grader er oppnådd for 10 lokaliteter mellom Vadsø og Vardø. De vannrette streker og bokser viser gjennomsnitt og standardavvik for 10 års perioder (5 år for siste periode 2021–2025).

fjellbjørkeskogen, mens de to andre er sørlige og mer varmekjære arter som gradvis har spredd seg nordover og østover med et varmere klima. Målerlarvene klekkes fra overvintrende egg omtrent samtidig med knoppsprett hos bjørka om våren og spiser på bjørk, og mange andre arter av trær og busker, utover sommeren. Larvene forpupper seg i bakken midt på sommeren. De voksne målere svermer og parrer seg utover høsten, og legger egg til neste generasjons målere på bjørka før de dør. Utbrudd av bjørkemålere er den viktigste naturlige forstyrrelsesfaktoren i fjellbjørkeskogen i Fennoskandia, og spredningen av sørlige arter lenger nord har intensivert presset på bjørkeskogen. Økologiske og forvaltningsmessige problemstillinger knyttet til utbrudd og skogdød har derfor kommet stadig lenger opp på dagsordenen.

Utvikling og vekst hos målere er tett styrt av temperaturen i omgivelsene. I et mildere klima vil derfor bjørkemålerne kunne trives lenger nord og lenger inn på fjellet. Lave temperaturer på vinteren, helst ned mot -30 – -35°C , kan ta livet av de overvintrende eggene, men slike kuldeperioder blir stadig sjeldnere og dette legger til rette for utbrudd

i nye områder. Likeledes vil mildere temperaturer på seinvinteren og våren tillate eggene å klekke tidligere, se figur 6, og dermed gi larvene mulighet for å fullføre sin vekst i områder der vekstsesongen tidligere har vært for kort. Etableringen av brun høstmåler som utbruddsart i bjørkeskog og vierkratt helt nord til overgangen mellom skog og lavarktisk tundra, er ment å være en konsekvens av at historiske klimatiske begrensninger for arten ikke lenger er til stede.

Sentrale klima-økologiske tilstandsvariabler som overvåkes i COAT:

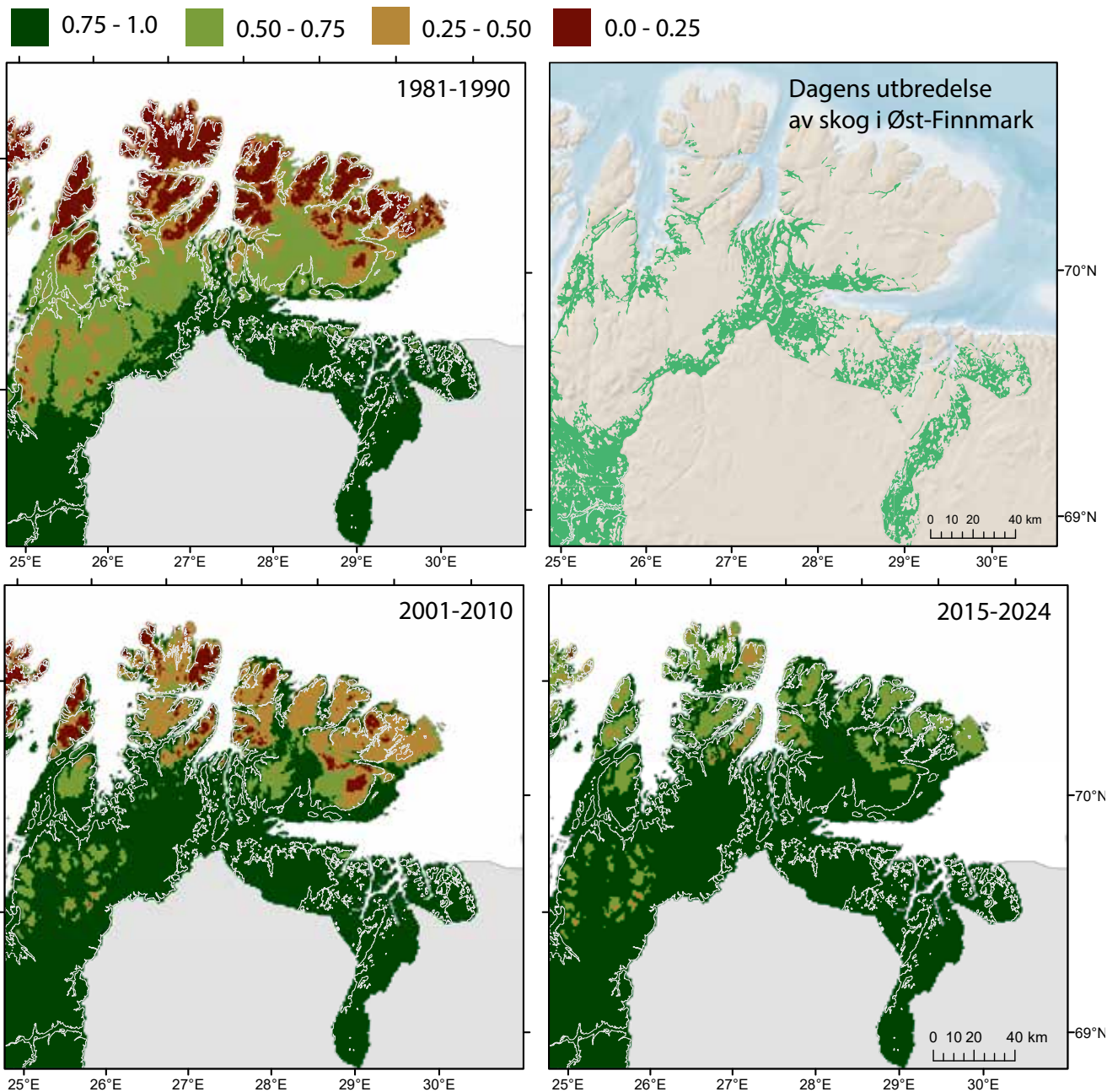
- Tetthet av bjørkemålere i bjørkeskog.
- Kronetap forårsaket av målerutbrudd i bjørkeskog målt fra satellitt.
- Skogskade og skogdød samt skogen gjenvekst etter målerutbrudd.
- Temperatur som bestemmer tidspunkt for løvsprett og klekking av målerlarver.
- Forekomst av ekstremkulde.

Eksempel 3. Klimagrenser for trevekst: Vær for vekst av trær langt over og nord for dagens skoggrense

Arktisk tundra og et polart klima er karakterisert ved at det er for kaldt for at trær kan vokse opp. Når klimaet endrer seg raskt vil det imidlertid utvikle seg en stadig større ulikhet mellom de områder der trær eller skog faktisk vokser, og de områder der det nåværende klima skulle tilsi at trær *kunne* vokse. Det skyldes at spredning av trær og busker lenger nord eller høyere opp på fjellet er en svært treg prosess, der en rekke andre forutsetninger, i tillegg til et gunstig klima over lang tid, må være oppfylt. Alpine og arktiske tregrenser er ofte sterkt påvirket av fysiske forstyrrelser (f.eks. snøskred eller vind), beite (f.eks. fra rein, sau eller insekter) og menneskelig aktivitet (f.eks. hogst). Likevel kan modeller for de fysiologiske (klimastyrte) grenser for trevekst gi en viktig illustrasjon av hvordan et økosystem kan forventes å utvikle seg fremover. Forskningen har utviklet stadig bedre klimaøkologiske beskrivelser av hvordan alpine og arktiske tregrenser er bestemt av klima. En av de beste globale beskrivelsene tar hensyn til både vekstsesongens lengde og sesongens gjennomsnittstemperatur. Vekstsesongen må nærmere bestemt ha minst 94 snøfrie dager med en gjennomsnittstemperatur over $0,9^{\circ}\text{C}$, og gjennomsnittstemperaturen over hele sesongen må være minst $6,4^{\circ}\text{C}$.

Slike beskrivelser av sammenhenger mellom økologi og klima, kan anvendes til å utvikle effektive klimaøkologiske tilstandsvariabler. I COAT har vi sett på hvor store områder i Finnmark som er varmere enn disse minimums kriterier og derfor, rent klimatisk, oppfyller kravet for vekst av trær. Vi

Andel år per tiår hvor de klimatiske kravene for vekst av trær er oppfylt



Figur 7. Kart over Øst-Finnmark, med Varangerhalvøya i sentrum, som viser andel år i løpet av et tiår som oppfyller de klimatiske kravene til vekst av trær. I det mørkegrønne arealet (0.75–1.0) er kravene oppfylt i mer enn 3 ut av 4 år. På 1980-tallet var det omtrent sammenfallende med dagens utbredelse av skog. Det seneste tiåret (2015–2024) har kravene vært oppfylt i de fleste årene i stort sett hele det lavarktiske området.

har også sett på hvordan dette har endret seg over tid. Konklusjonen er at det i Finnmark i dag knapt fins områder som ikke i de fleste årene oppfyller de klimatiske kravene til vekst av trær, selv høyt til fjells og nord for den nåværende lavarktiske skoggrensen i Øst-Finnmark, se figur 7.

Sentrale klima-økologiske tilstandsvariabler som overvåkes i COAT:

- Areal i Finnmark som oppfyller de klimatiske minstekravene for vekst av trær

- Individuelle trær's daglige vekst langs klimagrader

Litteratur:

- AMAP 2024. AMAP Arctic Climate Change Update 2024: Key Trends and Impacts. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway. x+122pp.
- Elvebakk, A. & Karlsen, S.R. 2022. Det arktiske Finnmark – ein bioklimatisk studie av område nord for den polare skoggrensa. *Blyttia* 80: 147–174.
- Isaksen, K., m.fl. 2022. Exceptional warming over the Barents area. *Scientific reports* 12, 9371. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>
- Pedersen, Å. Ø. m.fl. 2021. Norwegian Arctic Tundra: a Panel-based Assessment of Ecosystem Condition. Report Series 153. Norwegian Polar Institute, Tromsø.
- Pedersen, Å. Ø. m.fl. 2019. Svalbard reindeer (*Rangifer tarandus platyrhynchus*). A status report. Norwegian Polar Institute, Report Series 151.
- Schuler, T. V. m.fl. 2025. Svalbard's 2024 record summer: An early view of Arctic glacier meltdown? *PNAS* 122 (34) e2503806122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2503806122>
- Vindstad, O.P.L., Jepsen, J.U., Molvig, H. & Ims, R.A. 2022. A pioneering pest: the winter moth (*Operophtera brumata*) is expanding its out break range into low-arctic shrub tundra. *Arctic Science*. <https://doi.org/10.1139/as-2021-002>

Forfatterne:



Ole Einar Tveito er klimatolog og seniorforsker ved Meteorologisk institutt. Han jobber med dataanalyse og romlig modellering av historisk og fremtidig klima. Leder av klimaobservasjon i COAT.

E-post: ole.einar.tveito@met.no
<https://orcid.org/0000-0001-5237-028X>



Jane Uhd Jepsen er økolog og seniorforsker ved NINA. Hun arbeider med bestandsdynamikk hos bjørkemålere og effekter av beite, insektsutbrudd og klima på bjørkeskogsøkosystemet. Hun er regional leder for COAT Finnmark.

E-post: jane.jepsen@nina.no
<https://orcid.org/0000-0003-1517-1569>



Åshild Ønvik Pedersen er økolog og seniorforsker ved Norsk Polarinstitutt. Hun har ansvar for overvåkingsprogrammet for svalbardrein som omfatter bestandsdynamikk og romlig økologi med fokus på reinens responser til et endret landskap. Hun er regional leder for COAT

Svalbard og leder reinsdyrmodulen for Svalbard.
E-post: aashild.pedersen@npolar.no
<https://orcid.org/0000-0001-9388-7402>



Ketil Isaksen er seniorforsker ved Meteorologisk institutt. Han jobber med analyser av klimaendringer, spesielt mot permafrost og kryosfære og utvikling av nye produkter og tjenester til klimaovervåking.

E-post: ketil.isaksen@met.no
<https://orcid.org/0000-0003-2356-5330>