Vitenskapskomiteen for mat og miljø
Norwegian Scientific Committee for Food and Environment

Klimaendringer og virkninger på hovedøkosystem skog

Et norsk sammendrag basert på VKM Report 2022:15
Impacts of climate change on the boreal forest ecosystem

Tittel: *Klimaendringer og virkninger på hovedøkosystem skog*

Vitenskapelig uttalelse fra faggruppen for fremmede organismer og handel med truede arter (CITES) i Vitenskapskomiteen for mat og miljø
06.09.2022

ISBN: 978-82-8259-404-2

ISSN: 2535-4019

Vitenskapskomiteen for mat og miljø (VKM)
Postboks 222 Skøyen
0213 Oslo
Norway
Phone: +47 21 62 28 00
Email: vkm@vkm.no
vkm.no

Omslagsbilde: Julia Naglestad, julia@b13.no

Sitering: VKM, Kyrre Kausrud, Vigdis Vandvik, Daniel Flø, Sonya R. Geange, Stein J. Hegland, Jo S. Hermansen, Lars R. Hole, Rolf A. Ims, Håvard Kauserud, Lawrence R. Kirkendall, Jenni Nordén, Line Nybakken, Mikael Ohlson, Olav Skarpaas, Micael Wendell, Hugo de Boer, Katrine Eldegard, Kjetil Hindar, Johanna Järnegren, Paal Krokene, Inger Måren, Anders Nielsen, Erlend B. Nilsen, Eli Rueness, Eva B. Thorstad, Gaute Velle (2022). Klimaendringer og virkninger på hovedøkosystem skog. Et norsk sammendrag basert på *VKM Report 2022:15 Impacts of climate change on the boreal forest ecosystem*. Vitenskapelig uttalelse fra faggruppen for fremmede organismer og handel med truede arter (CITES) i Vitenskapskomiteen for mat og miljø.

VKM Report 2022:15, ISBN: 978-82-8259-390-8, ISSN: 2535-4019.
Vitenskapskomiteen for mat og miljø (VKM), Oslo, Norway

Innhold

Klimaendringer og virkninger på hovedøkosystem skog

Del 1- bakgrunn 6

Denne utgaven 6

Rammer for rapporten 6

Oppdrag 7

Sammendrag 8

Endring i klimasone 8

Hovedfunn 8

Økologisk tilstand i skog og naturmangfoldloven 10

Norges skoger og den boreale klimasonen 14

Historiske forandringer i klima og menneskelig påvirkning 17

Biologisk mangfold 18

Karbonlagring 18

Klimaendringer globalt og i Norge 18

Temperaturendring i Norge 20

Endring i nedbør 20

Endring i klimasone 22

Endring i ekstremverdier 24

Endring i vekstsesong 25

Innhold, forts.

Del 2 - effekter av klimaendringer på skog i Norge 25

Brann, storm, flom, hete og tørke 25

Jordvannsunderskudd og tørke 26

Storm og vind 26

Brann 26

Oppsummering av effekter på økologisk tilstand 28

Skadegjørende organismer og utbrudd 28

Insekter og insektsbårne sykdommer på trær 29

Soppsykdommer 29

Dyresykdommer og zoonoser 29

Oppsummering av effekter på økologisk tilstand 30

Habitatbyggende treslag: vekstforhold og dynamikk 30

Gran 30

Furu 31

Bjørk 32

Oppsummering av effekter på økologisk tilstand 32

Annen flora, fauna og sopp 32

Under- og kantvegetasjonen 32

Konsekvenser for økologisk tilstand i skogen 34

Dyrelivet 34

Konsekvenser for økologisk tilstand i skogen 38

Nedbrytere og næringssirkulasjon 39

Karbongjødsling 41
Oppsummering av effekter på økologisk tilstand 42
Endringer i økologiske interaksjoner 42
Oppsummering av effekter på økologisk tilstand 43
Del 3 - konsekvenser for tilstandsegenskaper, miljømål og sårbarhet 44
Klimaendringer og økologisk tilstand i skog 44
Oppsummering av effekter på de sju egenskapene for økologisk tilstand 47
Nasjonale miljømål, rødlistearter og naturtyper 53
Del 4 - Kunnskapshull, usikkerhet og metoder 58
Usikkerhet og kunnskapshull 58
Kunnskapshull 58
Usikkerhet 58
Metode, litteratur og data 60
Del 5 62
Appendiks I: Forkortelser 62
Appendiks II: FNs klimapanels sjette hovedrapport (IPCC AR6) og denne rapporten 64
Appendiks III: Senere tilkommet litteratur 65

Del 1- bakgrunn

Denne utgaven

Den 29. april 2022 overleverte VKM rapporten *Impacts of climate change on the boreal forest ecosystem*[1] (VKM Report 2022:15) til Miljødirektoratet som svar på oppdraget som er beskrevet under. I prosessen ble det bestemt at rapporten også skulle utgis i en forkortet versjon på norsk. Dette er denne utgaven. I tillegg til å forkorte og sette søkelys på de mest sentrale temaene har vi tatt sikte på å gjøre den mer lesbar, blant annet med forklarende tekst der det har blitt ansett mest nyttig for leserne. Hovedrapporten henviser også kontinuerlig til referanselisten på nær 1200 artikler, som av plass- og lesbarhetshensyn ikke er gjengitt i sin helhet her. I stedet er det henvist til de relevante delene i hovedrapporten i fotnotene i denne norske versjonen, slik at primærkildene lett kan spores.

Del 1 i den norske versjonen beskriver bakgrunnen for oppdraget, Del 2 oppsummerer kunnskapsgrunnlaget om klimaendringer i Norge og effekter på arter og økosystemfunksjoner i boreal skog, Del 3 oppsummerer konsekvensene klimaendringer forventes å få for egenskapene ved økologisk tilstand i norsk skog, nasjonale miljømål, skogens motstandskraft og sårbarhet som etterspurt i oppdraget, mens Del 4 oppsummerer kunnskapshull og metodikk.

Rammer for rapporten

Klimaendringer vil påvirke naturmangfold og økosystemfunksjoner og -tjenester i skogen. På oppdrag fra Miljødirektoratet laget Norsk institutt for naturforskning (NINA) ved Forsgren m.fl. i 2015 en rapport[2] som sammenstilte kunnskapen om virkninger av klimaendringer på norsk natur, fra artsnivå til naturtyper og økosystemer. I denne var skog ett av mange økosystemer som ble behandlet. I 2017 laget Nybø m.fl.[3] en rapport hvor de presenterer et fagsystem basert på sju egenskaper for å beskrive økologisk tilstandi forhold til god referansetilstand i økosystem. Disse egenskapene inkluderer strukturelle og funksjonelle sider ved økosystemene. Systemet for økologisk tilstand skal gi grunnlag for å sette forvaltningsmål på tvers av ulike samfunnsinteresser, og vil være en viktig del av grunnlaget for forvaltning av norsk natur framover.

Skog produserer en rekke naturgoder og viktige økosystemtjenester, og det er formulert en rekke målsettinger over et bredt spekter av politiske områder som styrer bruk og vern av skog. Kunnskapsgrunnlaget for hvilke faktorer som kan bidra til at økosystemer er motstandsdyktige og robuste i møte med klimaendringer, er i rask utvikling. Miljødirektoratet har sett et behov for en oppdatert gjennomgang av kunnskapsgrunnlaget for virkninger av klimaendringer på hovedøkosystem skog i Norge, koblet opp mot fagsystemet omtalt av Nybø m.fl.

Oppdraget fokuserer på biologisk mangfold og på økologisk tilstand i skog – og hvordan klimaendringer vil påvirke muligheter for å nå miljømål om at økosystemene skal ha god tilstand (Miljømål 1.1) og at ingen arter og naturtyper skal utryddes og utviklingen til truede og nær truede arter og naturtyper skal bedres (Miljømål 1.2).

Hensikten med kunnskapsinnhentingen er også å belyse hvordan klimaendringene vil

1 VKM, Kausrud K, Vandvik V, m.fl. 2022 Impacts of climate change on the boreal forest ecosystem. VKM Report 2022:15 https://vkm.no/risikovurderinger/allevurderinger/

2 Forsgren E. m.fl. 2015. Klimaendringenes påvirkning på naturmangfoldet i Norge. NINA Rapport 1210. https://brage.nina.no/nina-xmlui/bitstream/handle/11250/2366200/ninarapport1210.pdf?sequence=3&isAllowed=y

3 Nybø S. & Evju M. (red) 2017. Fagsystem for fastsetting av god økologisk tilstand. Forslag fra et ekspertråd. Ekspertrådet for økologisk tilstand, 247 s. https://www.regjeringen.no/contentassets/7c4be071791f439b83fa035c03cdfc82/fagsystem-for-fastsetting-av-god-okologisk-tilstand_2017.pdf

påvirke økosystemtjenestene fra skog og dessuten å gi kunnskap som kan bidra til å formulere nye strategier for å tilpasse seg klimaendringene i lys av den internasjonale videreutviklingen av kunnskapsgrunnlag og rammeverk for økologisk tilstand.

Oppdrag

Oppdraget er å fremskaffe en oversikt over kunnskapsstatus om hvordan skogen i Norge vil utvikle seg i et klima i endring. Skog i denne sammenheng defineres som tresatt areal på fastmark. Dette omfatter typene T4 Fastmarksskogsmark og T30 Flomskogsmark i NiN (Naturtyper i Norge –se Boks 1).

Rapporten fra Nybø m.fl. i 2017 omtaler sju egenskaper som beskriver økologisk tilstand i et økosystem. Det skal gjøres en sammenstilling av kunnskap om hvordan klimaendringer vil påvirke disse syv egenskapene i norske skogøkosystemer. Ved behov for å avgrense oppdraget, skal det fokuseres på fire av egenskapene:

Nr 3: Funksjonelle grupper – funksjonell sammensetning innen trofiske nivåer.

Nr 4: Funksjonelt viktige arter, habitat byggende arter og biofysiske strukturer (i oppdraget kan biofysiske strukturer nedprioriteres).

Nr 5: Landskapsøkologiske mønstre.

Nr 6: Biologisk mangfold – representert ved økosystemenes genetiske mangfold, artssammensetning og artsutskifting.

Det skal gjøres en gjennomgang av hvordan klimafaktorer (eks. temperatur, nedbør, vind, ekstremvær) og andre påvirkningsfaktorer som kan relateres til klimaendringer (eks. skade- og sykdomsorganismer, etablering/ økt spredning av skadelige fremmede arter) direkte og indirekte forventes å påvirke disse egenskapene i norske skogøkosystemer.

I den grad det eksisterer relevant kunnskap om forskjeller i virkningene for ulike treslag, bestandsalder eller geografiske regioner ber Miljødirektoratet om at disse blir belyst.

I den grad det er mulig skal det også gjøres en overordnet omtale hva slags betydning de forventede effektene kan ha for truete og nær truete naturtyper eller naturtyper med sentrale økosystemfunksjoner i skog, med utgangspunkt i listen i vedlegg 1. Vedlegg 1 gir en oversikt over naturtyper i skog iht. kartleggingsinstruksen til Miljødirektoratet, men oppdragstaker skal selv vurdere på hvilket kategoriseringsnivå vurderingene kan gjøres (innenfor NiN systemet).

Det skal tas utgangspunkt i klimaframskrivninger fra Norsk klimaservicesenter basert på utslippsscenarier fra IPCC, og resultater relateres til disse. I den grad det er kunnskap om terskelverdier for når klimaendringene kan eller vil utløse endringer i biologisk mangfold eller de andre egenskapene, skal det redegjøres for disse.

Videre skal det foretas en sammenstilling av faktorer som kan bidra til motstandsdyktighet og motstandskraft mot klimaendringer koblet opp mot de samme sju egenskapene fra Nybø m.fl. 2017. Det skal også gjøres en overordnet vurdering av sårbarheten for klimaendringer i norske skogøkosystemer med hensyn på å nå de nasjonale miljømålene 1.1 og 1.2.

Det skal gjøres en gjennomgang av kunnskapsmangler, med en vurdering av hvilke kunnskapshull som bør prioriteres høyest i årene som kommer.

Sammendrag

Endring i klimasone

De pågående klimaendringene vil utsette norske skoger for forandringer i klimaforhold ulikt noe annet vi kjenner fra historisk tid. Innenfor spektret av framtidsscenarioer som er vurdert som sannsynlige og relevante for denne rapporten, vil mye av de boreale skogene vi kjenner i dag innen ca. 2070-2090 være utsatt for klima som likner mest på områder dominert av varmekjære lauvtrær eller steppe i dag. I scenarioer som forutsetter lite utslippsreduksjon eller sterk klimarespons, gjelder dette det aller meste av det globale borealskogsbeltet (taigaen), inkludert Norge.

Viktige endringer inkluderer mer nedbør per år, spesielt på Vestlandet og om vinteren, men også flere tørre perioder, spesielt på Østlandet og om sommeren. Økt gjennomsnittstemperatur gir lengre vekstsesong, men også flere hetebølger og økt fordampning, med økt sannsynlighet for tørkeperioder.

Endringene som er vurdert i denne rapporten vil skje frem til 2100, dvs. 78 år frem i tid. Dette er kortere enn tiden fra planting til planlagt hogst, og langt kortere enn den naturlige levetiden til de fleste norske skogtrær. Den normale skogsuksesjonen vil derfor ikke kunne holde tritt med de raske endringene.

Gjennomgripende økologiske endringer

Klimaendringene gjør at den norske skogen er i en endringsperiode uten kjent sidestykke. Frem til midten av århundret er klimaendringene i stor grad forsinkede responser på utslipp som allerede er et faktum. Klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser vil medføre endringer i primærproduksjon, i vekst og dødelighet for planter, dyr og andre skoglevende organismer, i artssammensetning og næringssykluser i skogen, og i næringsnettenes struktur. Når de habitatsbyggende treslagene gran, furu og bjørk utsettes for klimaforhold de ikke er tilpasset, øker faren for store, negative effekter på skogøkosystemets funksjon.

Hovedfunn

1. **De pågående klimaendringene vil utsette norske skoger for klimaforhold som er uten sidestykke i historisk tid.**
2. **Klimaendringene vil medføre moderate økologiske endringer i norske skogøkosystemer på kort sikt (fram til 2050), og mer gjennomgripende og negative endringer på lang sikt (til 2100).**
3. **Mens økt gjennomsnittstemperatur og nedbør kan ha enkelte positive effekter, vil ekstremvær og klimarelaterte forstyrrelser ha store og tiltagende negative effekter på skogøkosystemet.**
4. **Klimaendringene vil medføre økt sannsynlighet for sykdom, fremmede arter, skade, og kaskadeeffekter i skogen.**
5. **En mangfoldig skog og sammenhengende arealer gir større motstandskraft mot de negative effektene av klimaendringene.**
6. **Siden ulike faktorer påvirker skogens motstandskraft mot klimaendringer, finnes det handlingsrom til å forsinke og redusere uønskede effekter og fremme stabiliserende prosesser.**

Siden forskjellige faktorer påvirker motstandskraft finnes det handlingsrom for å legge til rette for at uønskede effekter forsinkes og reduseres mens stabiliserende prosesser fremmes. Ikke bare omfanget av klimaendringene, men også hvor raskt endringene de forårsaker skjer, er avgjørende for hvor dramatiske effektene på biologisk mangfold og økologisk tilstand blir. Kunnskapen om effekter av klimaendringene på biologisk mangfold, økologisk tilstand og tilbakekoplinger til klimasystemet, er nødvendigvis basert på data fra fortiden. Det gjør det krevende å forutsi konsekvensene av klimaendringene. Det er derfor stor sannsynlighet for uventede utfordringer når det gjelder å nå målene som ligger til grunn for rapporten.

Mer ekstremvær, sykdom og skade vil gjøre skogen mer sårbar

Allerede frem mot 2050 vil klimaendringer føre til moderate, men klare endringer i norske skogøkosystemer. Mot 2100 blir endringene stadig mer gjennomgripende. Varmere klima har allerede ført til forflytning av arter nordover og oppover i fjellet, og dette forventes å fortsette i økende tempo. Mange arter, inkludert flere av de viktigste treslagene, vil fortsette å dra nytte av høyere gjennomsnittstemperatur og lengre vekstsesong, frem til et visst punkt. For eksempel forventer vi økt tilvekst hos de viktigste treslagene på arealer der tilgang på vann og næringsstoffer tillater det, særlig i nordlige og alpine områder. Det gir økt produktivitet og næringsomsetning, og økt ressurstilgang for skoglevende planteetere, nedbrytere, og andre funksjonelle grupper, noe som kan slå positivt ut på økologisk tilstand og evne til å levere økosystemtjenester i enkelte områder.

Høyere gjennomsnittstemperatur medfører også økende hyppighet av ekstreme påvirkninger, der utslagene overstiger trivsels- og tålegrensene til ulike skogsarter. Økt forekomst og intensitet av ekstreme påvirkninger (tørkestress, uventet frost eller varme for årstiden, skogbrann eller vindfall), sammen med sykdommer og skadegjørere, vil gi økt dødelighet blant de dominerende treslagene og andre nøkkelgrupper, med påfølgende negative konsekvenser for mange skoglevende arter og funksjoner i skogøkosystemet. Det vil igjen kunne medføre redusert produktivitet, tap av biologisk mangfold, negativ utvikling i økologisk tilstand og i skogens evne til å levere viktige økosystemfunksjoner, og økt sårbarhet.

Artenes samspill endrer seg

Skogen er et komplekst system hvor alle trofiske nivåer påvirkes av klimaendringene. Fordi forskjellige planter, dyr og mikroorganismer ikke påvirkes av de samme klimafaktorene, og ikke reagerer på samme tidsskala, oppstår forsinkelser og kaskadeeffekter. Slike variasjoner i responser over tid forstyrrer samspillet mellom arter som er gjensidig avhengig av hverandre og funksjoner i skogens næringsnett, og vil derfor kunne forstyrre økosystemet som helhet - med stor sannsynlighet for uforutsigbare effekter og hendelser. Med tiltagende klimaendringer vil de positive effektene generelt forventes å avta og de negative effektene tilta.

Klimaendringene gir økt sannsynlighet for sykdom, etablering av fremmede arter, utbrudd av skadegjørende insekter, og kaskadeeffekter i skogen. Mildere og våtere vintre gir lengre vekstsesong, men også bedre overlevelse for mange parasitter, sykdomsbærere og sykdomsfremkallende organismer. Dette inkluderer arter som tidligere har vært begrenset av lav vinteroverlevelse i Norge, men som i økende grad kan spre seg inn i nye områder hvor vertsorganismenes motstandskraft er svekket av klimarelaterte stressfaktorer som tørke og hetebølger. Det vil føre til økt dødelighet hos de viktige boreale treslagene. En rekke funksjonelt viktige dyre- og plantearter, som er tilpasset et borealt klima med lange og stabilt kalde vintre, forventes derfor å gå tilbake, mens nye skadegjørere vil etablere seg stadig raskere.

Norsk topografi gir fordeler og ulemper i møte med klimaendringene

Forflytningen av arter nordover og oppover i fjellet forventes å fortsette i økende tempo, men det kuperte norske landskapet bidrar til at arter ikke trenger å spre seg veldig langt for å følge sin klimasone, ettersom de kan flytte seg opp i terrenget. På kort sikt gir dette motstandskraft mot klimaendringer. Den store variasjonen i topografi og lokalt klima i det norske landskapet reduserer også sannsynligheten for at branner, insektutbrudd, tørke og stormfellinger kan spre seg over store områder i skoglandskapet, men kan gi høy lokal variasjon i risiko.

Topografi kan også skape barrierer der for eksempel øst-vestgående daler kan hindre videre migrasjon nordover, og på lengre sikt kan topografi bidra til å fragmentere populasjoner og dermed gi større sårbarhet. Slike naturgitte topografiske utfordringer forsterkes av fragmentering som skyldes nedbygging, skogsdrift, og annen arealbruk.

Sammenhengende habitat og arealer gir større motstandskraft

En lokal brann, et sykdomsutbrudd eller et tilfeldig dårlig år kan utrydde en art lokalt i et lite område. Når habitater henger sammen, vil slike ledige habitater raskt rekoloniseres og populasjonen som helhet bestå. Men økt fragmentering og økt sannsynlighet for lokale forstyrrelser, øker sannsynligheten for at en art taper terreng fortere enn den kan rekolonisere dem, og forsvinner fra landskapet som helhet. Fragmentering gjør derfor arter og biologisk mangfold mer sårbart for klimaendringer, siden økt forekomst av ekstremvær, brann, insektutbrudd, og andre forstyrrelser kan gjøre hver enkelt lokale populasjon mer utsatt.

Flere og sammenhengende verneområder og klimatilpasset artssammensetning kan også gjøre det lettere for arter å bevege seg langs klimatiske gradienter, ettersom klimasonene som artene er tilpasset beveger seg oppover og nordover. Det vil redusere sannsynligheten for at arter forsvinner fullstendig, og dermed gjøre skogen mer robust, og gi bedre økologisk tilstand. På sikt gir derfor sammenhengende skogarealer og korridorer skogen og artene i den bedre muligheter til å respondere på klima- og miljøendringer.

Artsrike lokaliteter i sørlige, lavtliggende og tørkeutsatte strøk hvor boreal, grandominert skog forventes å bli svekket og forsvinne først, vil være viktige kilder til mangfold og fungere som spredningsbroer gjennom landskapet så lenge de består. I regioner hvor borealt klima forventes å vedvare, vil det være viktig med lokaliteter som både kan ta imot migrerende arter sørfra og som kan fungere som stabile tilfluktssteder (refugier) for boreale arter.

Mangfoldig skog har større motstandskraft

Skogens økosystem er mer robust mot raske klimaendringer, inkludert forstyrrelser som brann, temperaturstress, skade og sykdom, når skogen består av et mangfold av treslag, inkludert ulike lauvtrær, og når skogen inneholder flere aldersklasser, høyt biologisk mangfold, og fullstendige næringsnett. Blandede bestander er mindre utsatt for forstyrrelser enn bestander av ett enkelt treslag og én aldersgruppe. Rene og jevnaldrende bestander av gran utpeker seg som klart mest sårbare. Blandede bestander huser høyere biologisk mangfold, noe som gjør bestanden, og på større skala skogen som økosystem, mer robust og resistent mot klimaendringer.

Siden det ikke er mulig å vite akkurat hvordan fremtidens klima blir, vil et mangfold av nøkkelarter øke sannsynligheten for at noen av artene vil være tilpasset fremtidige klimatiske forhold. Skoger med høyt mangfold forventes derfor å være i bedre stand til å opprettholde et fungerende skogdekke og habitater for skogslevende planter, dyr og mikroorganismer etter hvert som klimaet endres. Robuste skogøkosystemer med god økologisk tilstand vil også være bedre i stand til å levere økosystemtjenester, for eksempel sikre karbonlagring og unngå karbonlekkasje til atmosfæren.

Det mangler fremdeles kunnskap om hvordan skogen blir mest mulig robust mot klimaendringer

Hvilke blandinger av treslag, varianter (provenienser) og aldersklasser som gir mest biologisk mangfold, resistens mot sykdom og skade, og over tid best økologisk tilstand varierer antakelig mellom lokaliteter og regioner. Nøyaktig hvilke sammensetninger som gir best effekt avhenger av flere faktorer som er kun delvis kjent og dette reflekteres i kunnskapshull.

Økologisk tilstand i skog og naturmangfoldloven

Forvaltning av natur og naturmangfold er i Norge forankret i Naturmangfoldloven. Naturmangfoldloven (§4) beskriver som mål at «mangfoldet av naturtyper ivaretas innenfor deres naturlige utbredelsesområde og med det artsmangfoldet og de økologiske prosessene som kjennetegner den enkelte naturtype». Målet er også at «økosystemers funksjoner,

struktur og produktivitet ivaretas så langt det anses rimelig». Forvaltningsmålet for arter (§5) fastslår at «artene og deres genetiske mangfold ivaretas på lang sikt og at artene forekommer i levedyktige bestander i sine naturlige utbredelsesområder», noe som inkluderer artenes økologiske funksjonsområder og de økologiske betingelser de er avhengige av. Loven definerer videre "økologisk tilstand" som «Status og utvikling for funksjoner, struktur og produktivitet i en naturtypes lokaliteter sett i lys av aktuelle påvirkningsfaktorer» (§3). Begrepet "økologisk tilstand" er dermed sentralt både for å beskrive og forstå i hvilken grad forvaltningsmålene i loven er oppnådd, for å analysere påvirkninger, og for å komme fram til forvaltningstiltak.

I 2016 opprettet Klima- og miljødepartementet Ekspertråd for økologisk tilstand, som fikk i oppdrag å foreslå «naturvitenskapelige indikatorer og kriterier for økologisk tilstand". Ekspertrådets rapport (Nybø m.fl.) definerte "god økologisk tilstand" ved at "økosystemenes struktur, funksjon og produktivitet ikke avviker vesentlig fra referansetilstanden, definert som intakte økosystemer". Rapporten diskuterer inngående hva som kjennetegner "intakte økosystemer", både med hensyn på økosystemfunksjoner, biologisk mangfold, og grad av menneskelig påvirkning. Ekspertrådet viser til at menneskelig påvirkning ikke i seg selv forringer økologisk tilstand, og at det finnes semi-naturlige naturtyper som er betinget av ekstensive menneskelige aktiviteter som beitebruk eller slått. Ekspertrådet la fram et generelt rammeverk som beskriver og kvantifiserer økologisk tilstand gjennom sju generelle egenskaper (se Boks 2), og foreslo deretter et fagsystem med spesifikk referansetilstand og indikatorer for hvert hovedøkosystem. Disse sju egenskapene dekker ulike aspekter av økosystemer, men ekspertrådet fastslår også at de neppe kan sies å dekke alt som er viktig og relevant ved økosystemers tilstand.

For hovedøkosystem skog (skogsmark og tresatt areal i NiN, se Boks 1) legger fagsystemet il grunn en referansetilstand med naturlig skogdynamikk der naturgitte forstyrrelser og suksesjonsprosesser knyttet til lokalt klima, terreng, jordsmonn og treslagenes økologi former skogens struktur, produktivitet, substrater og tilhørende økosystemprosesser. Videre legges det til grunn klima som for normalperioden 1961–1990 og stedegne arter tilpasset dette etter naturlig innvandring etter siste istid. Eventuell menneskelig påvirkning er minimal, uten vesentlig påvirkning på skogøkosystemenes struktur eller funksjon. Denne referansetilstanden kan karakteriseres som urskog eller lite påvirket naturskog. Ekspertrådet beskriver aktuelle påvirkningsfaktorer(«drivere») og en rekke indikatorer for økologisk tilstand i skog.

Boks 1: Hovedøkosystem skog i klassifiseringssystemet Natur i Norge

Det norske beskrivelsessystemet for naturtyper Natur i Norge (NiN) definerer skog gjennom begrepene tresatt areal og skogsmark.

Tresatt areal defineres som «et sammenhengende område med trær (vedplanter som er eller kan bli > 5 m høye), der arealandelen innenfor kroneperiferien er større enn 10%». Skogsmark defineres som «naturlig mark sterkt preget av langvarig innflytelse fra trær og som ved et gitt tidspunkt er tresatt eller som i nær fortid har vært og i nær framtid forventes igjen å være tresatt».

NiN deler deretter skog inn i flere hovedtyper, med koder basert på lokale komplekse miljøgradienter. Noen av de viktigste er fastmarksskogsmark (T4), flomskogsmark (T30) og treplantasje (T38).

Se metodekapitlet her, og 3.1.2 og 5.3 i hovedrapporten.

Framstad m.fl. utga i 2021 den første vurderingen av økologisk tilstand for skog i Norge basert på dette rammeverket, en vurdering som omfattet indikatorer og seks av sju egenskaper.[4] Rapporten viser at den økologiske tilstanden til norsk skog samlet sett lå klart lavere enn grenseverdien for god økologisk tilstand, og at dette spesielt skyldes at indikatorene for trofisk struktur og funksjon (Egenskap 2 og 4) samt biologisk mangfold lokalt og på landskapsnivå (Egenskap 5 og 6), alle var under grenseverdien for god økologisk tilstand. Tilstandsverdiene for Egenskap 1: primærproduksjon og Egenskap 7: abiotiske forhold lå over grenseverdien, men dette er også de to indikatorene som ble vurdert som dårlig egnet eller upresise for å vurdere skogøkosytem publisert av Nybø m.fl. (2017). Det var ikke noen indikatorer tilgjengelig for Egenskap 3: Funksjonell sammensetning innen trofiske nivåer. Rapporten konkluderte med at påvirkningsfaktorer knyttet til arealbruk og inngrep, inkludert intensivt skogbruk, jakt og teknisk infrastruktur, er viktige årsaksfaktorer knyttet til lavt økologisk tilstandsnivå i norsk skog. Sju av indikatorene ble i rapporten sett på som knyttet til klimaendringer, med en samlet tilstandsverdi på 0,67. Økning i temperatur og lengde på vekstsesongen siden ca. 1990 ble antatt å være viktigst, selv om rapporten i begrenset grad så effektene av disse påvirkningene på indikatorene som ble benyttet i 2020. Rapporten fastslo også at det var stor usikkerhet i indikatorene og behov for bedre kunnskapsgrunnlag. Rapporten påpekte også at tiltagende klimaendringer forventes å forverre økologisk tilstand i norsk skog ytterligere i fremtiden, noe som forsterker behovet for nye forvaltningsstrategier.

4 Framstad m.fl. 2021 Vurdering av økologisk tilstand for skog i Norge i 2020. NINA Rapport 2000. https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2021/juni-2021/vurdering-av-okologisk-tilstand-for-skog-i-norge-i-2020/

Boks 2: De sju egenskapene og økologisk tilstand i skog

God økologisk tilstand skog defineres ved at økosystemenes struktur, funksjon og produktivitet ikke avviker vesentlig fra referansetilstanden, med naturlig dynamikk knyttet til klima, terreng, jordsmonn og treslagenes økologi. Det legges til grunn et klima for normalperioden 1961–1990 og et artsinventar av stedegne arter tilpasset dette. God økologisk tilstand er gitt ved at struktur, funksjon og produktivitet ikke viser større avvik fra naturskog enn at denne kan gjenopprettes ved skogens egne prosesser i løpet av én tregenerasjon, og innebærer altså at økosystemet enten er intakt, så robust at den menneskeskapte påvirkningen ikke endrer tilstanden vesentlig (resistens), eller ved at økosystemets egne interne prosesser lett kan gjenopprette denne tilstanden (resiliens). (Se Nybø m.fl. 2017 og 3.1.1 i hovedrapporten.)

Følgende egenskaper kjennetegner et skogøkosystem i god økologisk tilstand:

1. **Primærproduksjon** i skog er i hovedsak styrt av klima, voksestedets produksjonsevne (bonitet) og suksesjonsfase. Den er i hovedsak knyttet til tresjiktet, men naturskog har også et sammenhengende feltsjikt. Avvik fra vil kunne gi seg utslag i lavere primærproduksjon ved nedbygging eller overbeite, men også høyere primærproduksjon enn i naturskog ved intensiv skogsdrift.

2. **Biomasse i trofiske nivåer** vil være dominert av biomassen i levende, i hovedsak eldre trær. Alle trofiske nivåer, inkludert planteetere, rovdyr, og nedbrytere, er til stede. Biomassen av ulike nedbryterorganismer i jord og død ved vil være betydelig. Påvirkning kan medføre at trofiske struktur forskyves og trofiske kjeder og kretsløp blir forkortet.

3. **Funksjonelle grupper:** I naturlig borealskog er gran, furu og boreale løvtrær dominerende blant primærprodusentene, med areal av edelløvtrær i sør og innslag av ulike plantearter i felt- og busksjikt. Det vil være et stort og variert samfunn av nedbrytere i jord og død ved. Regelmessige bestandssvingninger hos smågnagere og moderate bestander av hjortedyr karakteriserer primærkonsumentene. Invertebrater har sentrale roller innen pollinering, frøspredning og populasjonskontroll av øvrige arter. Avvik vil særlig kunne vise seg i grupper av sopp og invertebrater og ved endringer i treslagssammensetning og tilhørende mykorrhiza, samt reduserte bestand av rovdyr og hjortedyr.

4. **Funksjonelt viktige arter og biofysiske strukturer:** De funksjonelt viktigste treslagene i skog skaper et omfattende tredimensjonalt habitat og stor biomasse som kan utnyttes av andre arter. En nøkkelfunksjon er trærnes mulighet til å gjennomføre et fullt livsløp som gir opphav til store/gamle trær og store mengder variert død ved som habitat og substrat for svært mange arter. Avvik vil kunne vise seg ved endringer i treslags- og alderssammensetning for dominerende skogstrær, i mykorrhizasamfunn og nedbrytersamfunn, og ved redusert mengde og kvalitet av gamle/store trær og død ved.

5. **Landskapsøkologiske mønstre:** Naturgitte forstyrrelser og suksesjon vil gi en sammensetning av skoglandskapet med stor andel gammel skog, unge suksesjonsstadier preget av brann, ras, flom eller annen forstyrrelse, og et mønster av ulike suksesjonsfaser. Stedegne arter vil være godt tilpasset og ha nok egnet habitat og spredningsmuligheter til å opprettholde livskraftige bestander. Avvik vil særlig vise seg ved endring i aldersklasser av trær, mer skjematiske landskapsmønstre i tid og rom, og fordeling av dominerende treslag. Særlig kan gammel skog ha mye mindre og mer fragmentert areal.

6. **Biologisk mangfold:** Artssammensetning og genetisk mangfold vil være tilpasset naturskogens forstyrrelser og suksesjonsforløp. Mange arter vil være knyttet til nøkkelressurser som store/gamle trær og grov død ved i ulike nedbrytningsstadier. Endringer i artssamfunn og bestandsnivå vil følge av de fleste typer av påvirkninger. Dette vil endre forskjellen mellom artsdiversitet på ulike lokaliteter og kan gi en homogenisering av artsinventaret der generalister overtar på bekostning av spesialister.

7. **Abiotiske forhold:** Naturgitte forstyrrelser og suksesjon vil gi lokale endringer i fysiske strukturer av trær og død ved, så vel som en viss naturlig forsuring og karbonakkumulering ettersom skogen blir eldre, en prosess som vil reverseres ved skogbrann. Naturskog har store karbonlagre, hvorav 80% finnes under bakken. Disse kan reduseres ved ulike typer drift og inngrep.

Arbeidet med rammeverket for økologisk tilstand har så langt forholdt seg til pågående overvåkning og eksisterende indikatorer som er tilgjengelige for den norske forvaltningen. Det er imidlertid ikke nødvendigvis slik at den overvåkningen vi har i dag gir de dataene som er best egnet til å følge med på hvordan økologisk tilstand i naturen endrer seg. Spesielt vil klimaendringene utsette arter og økosystemer for nye påkjenninger. Miljødirektoratet bestilte denne rapporten som et bidrag til et bedre kunnskapsgrunnlag om hvordan norsk skog vil påvirkes av klimaendringene fram mot år 2100, og hvilke konsekvenser disse endringene i skogen vil ha for økologisk tilstand, nasjonale mål for biologisk mangfold, og skogens motstandskraft mot klimaendringer, ekstremvær og relaterte forstyrrelser. Rapporten kan leses som en horisont-scanning over kunnskap fra den vitenskapelige litteraturen om hvordan skogen og skogøkosystemet vil påvirkes av klimaendringene i fremtiden, og dermed hvordan klimaendringene vil påvirke skogens evne til å levere viktige økosystemtjenester som trevirke og materialer, karbonlagring, klimaregulering, og motstandskraft mot klimaendringer og andre forstyrrelser. Rapporten kan også brukes til å se på hvilke variabler som kan inngå i en mer omfattende økosystembasert overvåkning om man vil dokumentere endringer i slike økosystemfunksjoner og underliggende årsaksforhold.

I denne rapporten kartlegger vi et bredt spekter av klimarelaterte effekter på arter og økologiske funksjoner i boreale skoger. Vi grupperer de økologiske funksjonene med hensyn på de sju egenskapene ved god økologisk tilstand (se Boks 2). Rapporten skiller seg fra Framstad m.fl (2021) ved at vi ser på et bredere tilfang av arter og økologiske funksjoner, og at vi baserer oss på vitenskapelig litteratur, ikke overvåkningsdata. Vi oppsummerer dermed kunnskapsgrunnlaget for hvordan klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser kvalitativt vil påvirke et bredt spekter av arter og funksjoner i skogen.

Norges skoger og den boreale klimasonen

De boreale skogene[5] dekker nesten 19 millioner km² og utgjør verdens største vegetasjonssone som strekker seg i et bredt belte rundt den nordlige halvkule gjennom Nord-Europa, Asia og Amerika (figur 1). Til sammen utgjør de boreale skogene omtrent en tredjedel av verdens skogareal, og mer enn 10 prosent av det totale landarealet.

Økosystemet disse skogene danner er formet av klimaet[6], og vegetasjonssonene som domineres av boreal skog betegnes ofte med fellesnevneren "boreal sone" (se Boks 3).

Den boreale skogen er globalt dominert av bartrær i slektene gran, furu, lerk og edelgran, men enkelte lauvtrær spiller også viktige roller, ikke minst bjørk, og i mange områder selje, or, rogn og osp. Busk, felt og bunnsjiktet varierer, men er ofte dominert av lyng og stedvis urter, og moser. Mot nord tynnes skogen ut og glir over i tundra, mens sørover øker innslagene av varmekjære lauvtrær som eik, alm, bøk og lønn ettersom den boreale skogen blir hemiboreal og etter hvert temperertlauvskog der det er nok regn, mens den boreale skogen tynnes ut og blir til gressletter og steppe der det er for tørt for temperert skog[7].

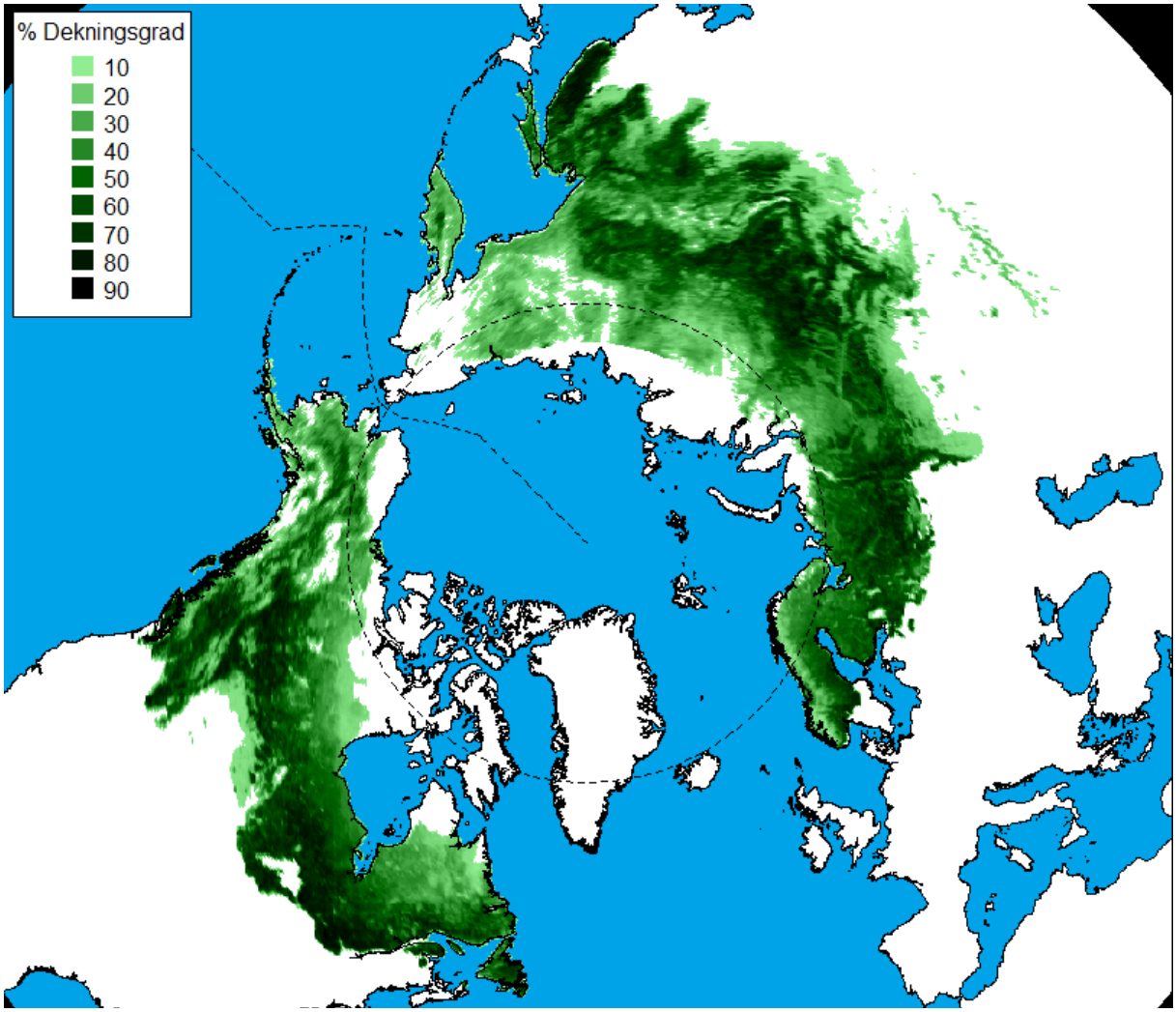
På grunn av sin unge geologiske alder og nordlige beliggenhet er den boreale sonen artsfattig sammenliknet med for eksempel tropisk regnskog, men den inneholder likevel et rikt spekter av arter i et komplekst samspill tilpasset sitt miljø. Fugl utgjør en stor del av diversiteten av virveldyr, men beitedyrene og predatorene som finnes har stor påvirkning på økosystemet. En stor andel av plantene er vindpollinerte, men pollinerende insekter spiller likevel en viktig rolle. Vedlevende insekter og nedbrytere av

5 Et annet ord som ofte brukes om de boreale skogene er det russiske ordet taiga, som igjen kommer fra et mongolsk ord for (ugjennomtrengelig) skog.
6 Se kap. 2.1.1 Delineation of the biome
7 Se kap. 2.1.2 Origin, biota, and habitat-forming communities

alle slag, fra insekter til bakterier og sopp, er sentrale i næringssyklus og økosystemfunksjon.

I Norge er det aller meste av skogen av boreal type, og omtrent 37 prosent av landarealet er skogdekket. I global sammenheng er den norske boreale skogen litt atypisk med relativt milde vintre og lite permafrost, noe som skyldes nærheten til Atlanterhavets varme havstrømmer. Den geografiske beliggenheten samt et variert landskap med fjell og fjorder medfører også at vi har stor variasjon i temperatur- og fuktighetsforhold over korte avstander. En hovedtrend er overgangen fra kjølig oseanisk klima på Sør- og Vestlandet via tundra i høyfjellet til mer kontinentalt borealt klima med tørrere somre innover i innlandet, og lavere temperatur jo lengre oppover og nordover man kommer. Slike gradienter gjenspeiles i skogenes artssammensetning. I lavereliggende strøk i sør og sørvest domineres de naturlige skogene av lauvtrær som eik, svartor og ask, mens i høyereliggende områder og mot nord og øst tar granskog og furuskog over. Nordover og mot tregrensa er bjørk det klart vanligste treslaget, og i de to nordligste fylkene er store arealer karakterisert av åpen og småvokst bjørkeskog[8].

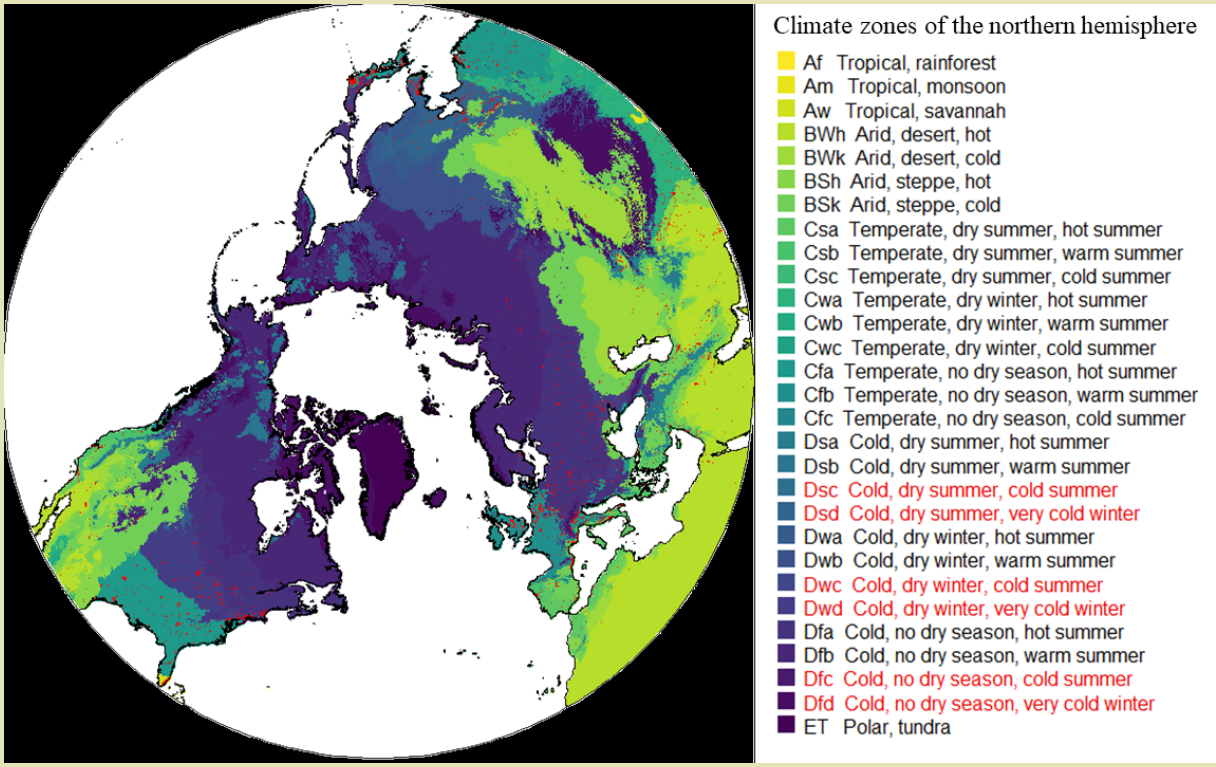
8 Se kap. 2.3 The Norwegian boreal forests past and present og spesielt kap. 2.3.2 Variability and bioclimatic gradients



Figur 1: Utbredelsen av boreal skog (taiga) globalt. Fargetonen angir tredekningsgrad i prosent.

Boks 3: Klimasonene

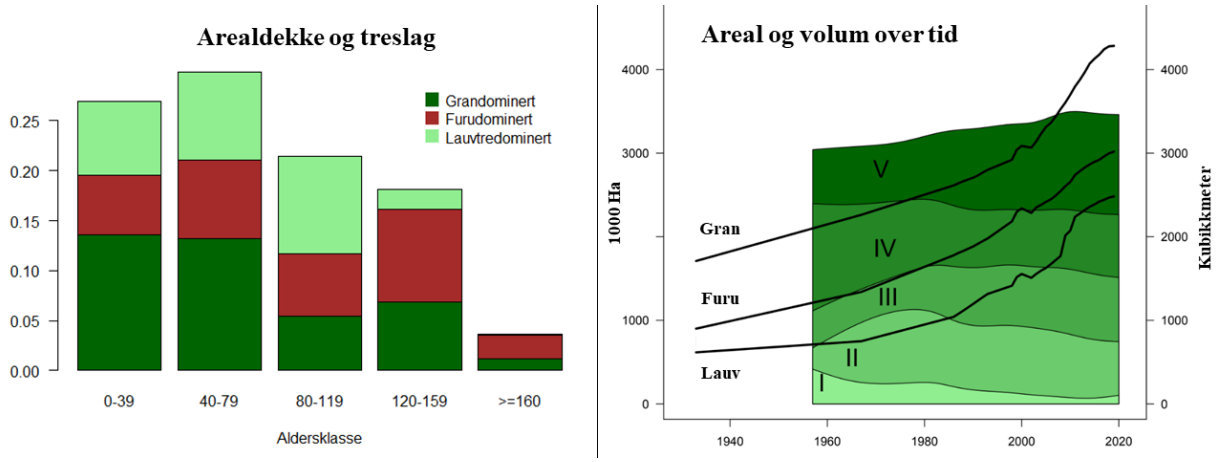
Köppens klimaklassifisering er et av de mest brukte systemene for å kombinere temperatur og nedbør i samsvar med vegetasjonstyper. Systemet deler klimaet inn i fem soner, med typer og undertyper, hver representert ved en bokstavkode på to til fire bokstaver. Boreal skog finnes i mye av sone D der sommeren varer under tre måneder, og minst én måned har en gjennomsnittstemperatur over 10 °C, mens vinteren hvor frost kan forekomme varer seks til åtte måneder hvorav minst én i gjennomsnitt er under frysepunktet. Siden den boreale klimasonen ligger langt mot nord og over store landmasser (hovedsakelig mellom 45°N og 70°N), varierer daglengden sterkt gjennom året og den er dominert av kontinentale klimatyper med store variasjoner i temperaturer gjennom året, men med moderate nedbørsmengder. Inntil nylig har størstedelen av arealet også vært preget av permafrost. I Norge er det meste av innlandet sone D, boreal, det meste av kysten oseanisk (klasse C), og mens høyfjell, vidde og Svalbard er arktisk (E). Kartet under viser klimasonene på den nordlige halvkule.



Historiske forandringer i klima og menneskelig påvirkning

De første skogene etablerte seg i Norge kort tid etter istidens slutt, for ca. 9500-10000 år siden. Skogen bredte seg gradvis nordover og oppover i terrenget etter hvert som planterog andre organismer dannet nødvendig jordsmonn, og tregrensene nådde sitt høyeste nivå under varmetiden for 6500-7000 år siden. Regional nedkjøling av klimaet sammen med økende menneskelig påvirkning, førte til lavere tregrense og reduksjon i skogsareal fram mot moderne tid. Kommersiell hogst i norske skoger har en lang historie. Trevirke og mastetømmer ble eksportert til Island og England fra før år 1000, mens tømmereksporten til England og Nederland tok av fra 1300-tallet. Senere i middelalderen økte omfanget av tømmerhogst til brensel og bygningsformål, mens skogrydding til beite og landbruk økte i takt med befolkningsveksten. Sagbruk drevet av vannkraft og økende eksport fra 1500-tallet av, førte til at uttaket fra norske skoger økte, og på slutten av 1800-tallet var norsk skog blitt uthogd og småvokst. Landskogstakseringen[9] ble derfor igangsatt for å få kunnskap og kontroll over de nasjonale skogressursene. Bestandsskogbruket med flatehogst var et av flere tiltak (f.eks. grøfting, markberedning, planting, gjødsling, fjerning av lauvtrær) for å øke tilveksten. Bestandsskogbruket ble gradvis utviklet i England og Tyskland fra 1700-tallet, ble tatt i utstrakt bruk i Norge i mellomkrigstiden, og ble den absolutt dominerende metoden i skogbruket fra 1950-tallet til i dag. Et aktivt bestandsskogbruk har ført til økende tetthet og tilvekst i norsk skog utover 1900-tallet, og til store arealer dominert av jevnaldrende bestander av gran eller furu (figur 2). Mindre enn 5 prosent av det norske skogarealet består i dag av skog som er eldre enn 160 år, og arealet med gammel skog og urskog minker, særlig på arealer med høy bonitet[10]. Det har medført en betydelig reduksjon i død ved, som er et viktig habitat for mange skoglevende arter.

9 Den norske Landsskogtakseringen ble etablert i 1919, da skogene i Norge var i en dårlig tilstand. Den er verdens eldste nasjonalt systematiske taksering av skog, og siden den første gjennomføringen på 1920-tallet har hele landet blitt taksert ca. ti ganger via observasjoner på rundt 13 000 prøveflater. Landsskogtakseringen er nå en avdeling under Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO).
10 Bonitet: i skogbruket et uttrykk for markas evne til å produsere trevirke. Jo høyere bonitet, desto raskere forventes trær plantet der å nå høstbare størrelser.



Figur 2: Andel arealdekke for ulike treslag, hogstklasser og alderskategorier. Til venstre arealdekke for aldersklasser og treslag estimert i 2020. Til høyre utviklingen i volum under bark for gran, furu og lauvtre 1933-2020, og areal dekket av ulike hogstklasser 1957-202. Data fra Landskogtakseringen via SSB (2022).

Biologisk mangfold

Over halvparten av de 43705 artene som er naturlig forekommende i Norge har tilknytning til skog. Tilsvarende utgjør skogsarter 48 prosent av artene på den norske rødlista for arter (1330 av 2752 arter, inkludert 387 sopper, 167 lav, 232 biller og 137 fluer). Fire av fem av disse rødlistede artene (84 prosent) er knyttet til gammelskog. Per januar 2022 er 5,2 prosent av det norske skogsarealet omfattet av vern, men dette er ikke jevnt fordelt på bonitet. Bare 3,8 prosent av den mest produktive skogen er vernet, mot 8,4 prosent av den mindre produktive skogen.

Karbonlagring

Det boreale barskogbeltet lagrer ca. 25 prosent av alt karbonet forbundet med landbaserte økosystemer globalt, og spiller derfor en viktig rolle i klimasystemet. Opptil 80 prosent av karbonlagrene i disse økosystemene finnes under bakken, og karbonrike jordsmonn er derfor typiske for boreal skog. Dette har sammenheng med sein nedbrytning i kalde, sure og fuktige jordtyper med surt og tungt nedbrytbart strø, særlig fra barnåler og eviggrønne lyngblader.

I tillegg kommer komplekse underjordiske næringsnett bestående av røtter, sopp, bakterier og andre jordlevende organismer som til sammen holder godt på karbonet i jorda. Sopprotsopper (mykorrhiza) er særlig viktige for karbonlagringen under bakken. Karbonlagrene i jordsmonnet av den boreale skogen blir akkumulert sakte, og kan uten forstyrringer bli svært gamle (f.eks. er alder opptil 2500 år dokumentert på 1 m dyp i Sverige).

Klimaendringer globalt og i Norge

Klimaendringer refererer til langsiktige endringer i hvor ofte ulike typer vær forekommer, og varierer som et resultat av samspillet mellom flere kjente mekanismer. Solaktiviteten har sykluser på omtrent 11 år og jordens bane rundt sola varierer over flere tusen år. Vulkanutbrudd er mindre forutsigbare, og slipper ut både drivhusgasser og partikler som blokkerer sola, mens biologiske og geologiske prosesser påvirker hvor mye sollys som reflekteres fra jordens overflate (albedo) og mengden drivhusgasser i atmosfæren. Til sammen resulterer disse mekanismene i naturlige klimavariasjoner som er forholdsvis godt forstått.

Foto: Hannah Schønhaug

Som følge av industrialiseringen har imidlertid menneskelig aktivitet drevet globale klimaendringer siden 1800-tallet. Forbrenning av fossilt karbon fører til akkumulering og økning i konsentrasjonen av CO^2 og andre klimagasser i atmosfæren. Disse gassene fanger opp og omdirigerer varmestråling som er på vei ut i verdensrommet, noe som øker temperaturen i atmosfæren og ved jordoverflaten.

Ifølge FNs klimapanels sjette hovedrapport (2021-2022)[11] har menneskelig aktivitet allerede forårsaket +1,0 °C [0,8 - 1,2][12] global oppvarming sammenliknet med førindustrielle nivåer, og det siste tiåret (2011-2020) er det varmeste som hittil er registrert. Oppvarmingen forventes å nå +1,5 °C [1,2 - 1,9] innen 2040 uansett hvilket scenario (RCP/SSP)[13] for videre utslipp av klimagasser som følges fremover. Dette skyldes at endringene de nærmeste tiårene i stor grad avhenger av utslipp som allerede er gjort. Utslipp og klimapolitikk de kommende årene vil avgjøre hvorvidt klimaendringene stabiliserer seg ved en gjennomsnittlig global temperaturøkning på +1,3°C etter år 2040 (optimistisk scenario) eller fortsetter å øke til +5,7°C eller mer (pessimistisk scenario) mot slutten av århundret.

Globale endringer påvirker ikke klimaet på samme måte overalt på kloden. Generelt er oppvarmingen sterkest over land og størst i Arktis. Siden den boreale skogen befinner seg på høye breddegrader med stort sett kontinentalt klima, forventes den derfor å oppleve den største temperaturøkningen av alle skogbiomer i løpet av det 21. århundre; minst halvannen gang det globale gjennomsnittet. I 2020 ble det rapportert om årlige gjennomsnittstemperaturer som oversteg +6 °C i visse områder av Sibir og +4,3 °C over normalen for 1981-2010 hvis man ser på gjennomsnittet for hele sibirsk Arktis (den forrige rekorden var +2,5 °C over årlig gjennomsnitt i 2016). Den årlige middeltemperaturen over den boreale sonen anslås allerede å ha økt med 1–1,5°C, til tross for stor variasjon mellom områder og mellom år. Den forventede økningen i nedbør er betydelig mindre enn det forventede vanntapet fra økt fordampning[14]. Dette er av stor betydning for vegetasjonsøkologien (se figur 3).

11 Se del 4 i denne norske utgaven og kap. 7 Relation to the IPCC Sixth Assessment Report (2021-2022) i hovedrapporten for bakgrunn og sammenlikning med IPCC AR6 https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/

12 Gjennomgående i rapporten henviser firkantklammer til usikkerhetsintervaller, slik at A [B - C] betyr en estimert verdi A som forventes med stor sikkerhet å ligge mellom B og C

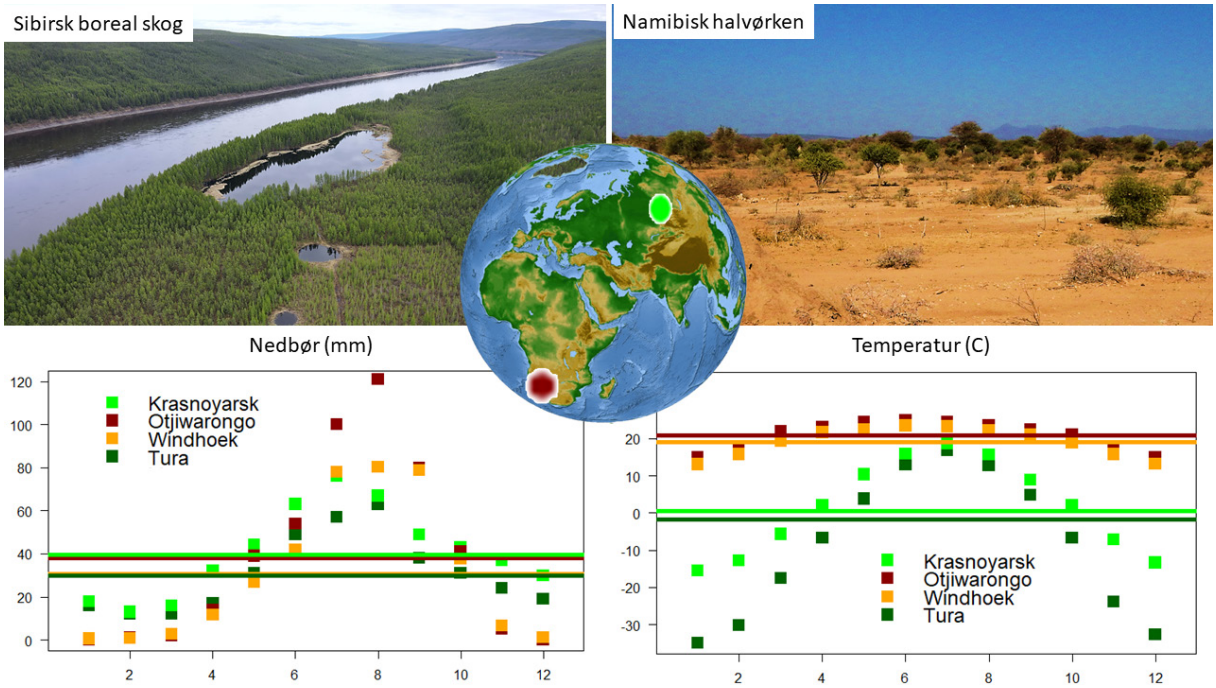
13 Se kap. 3.2.1 Scenario selection

14 Se kap. 2.2 Global climate change and the boreal zone

Boks 4: Forstyrrelsesdynamikk i boreal skog

Brann er en av de viktigste naturlige forstyrrelsesfaktorene i boreal skog, særlig i tørre og kontinentale strøk over historisk tid. Den tykke barken til furutrær gir større mulighet for å overleve branner i underskogen, og det finnes arter i den boreale skogen som er avhengige av brann for å overleve, enten ved at de har en livssyklus som avhenger av selve brannen, og/eller at de utnytter åpne og relativt næringsrike nybrente områder. I Norge har brann historisk sett vært relativt sjelden, slik at andre forstyrrelsesfaktorer som vindfelling og utbrudd av insekter, for eksempel barkbiller og bjørkemålere, har vært viktigere. Både brann, vindfellinger og utbrudd av sykdom og insekter er sterkt påvirket av vær og klima.

Hvor ofte forstyrrelser forekommer, og på hvilken skala, er viktig for å forme artssammensetningen og de landskapsøkologiske faktorene i økosystemet. Enkeltstående vindfall gir viktig tilfang av død ved som er nødvendig for mange arters overlevelse, mens store branner kan gi utskifting av hele artssamfunn over mange år. Likevekten mellom forstyrrelse og gjenvekst bestemmer til slutt hva slags økosystem man ender opp med.



Figur 3: Effekten av temperatur. Den tett skogkledde, myrlendte sibirske taigaen som preger Sibir (her representert ved klimaprofiler for byene Krasnoyarsk og Tura) og halvørkenen med tørre busklandskap som preger Namibia (her representert ved klimaprofiler for byene Windhoek og Otjiwarongo) opplever svært lik samlet årlig nedbør (nederst til venstre), men svært forskjellig temperatur (nederst til høyre). Årlige gjennomsnittsverdier vises med horisontale linjer, månedlige gjennomsnittsverdier som fargede punkter. Månedsnummer for Namibia er forskjøvet med seks måneder for å vise samme årstid for sør og nord. (Data: https://en.climate-data.org/ Foto: Alberto Arzac, Siberian Federal University, og Hannah Schønhaug, ARCRA).

Temperaturendring i Norge

Mens de vestlige delene av Norge er sterkt påvirket av havet, er de østlige og nordlige delene av landet tørrere og mer kontinentale. Oppvarmingen forventes derfor for alle klimascenarioer å være størst for kontinentale deler av Nord-Norge og minst for Vest-Norge.

Årsmiddeltemperaturen for Norge i perioden 1971 - 2000 var ca. +1 °C, men varierte fra +6 °C på kysten av Vestlandet til lavere enn –4 °C i høyfjellet. Den har deretter steget rundt én grad fram til 2020, og forventes å stige mellom 2,7°C og 4,5 °C[15]. Om man ser på 80 prosent-intervallet for prediksjoner rundt de mest aktuelle scenarioene (RCP4.5 og RCP8.5) utvides området til å ligge mellom 1,6°C og 6,0 °C. I tillegg kommer den naturlige variasjonen fra år til år og frekvensen av ekstremverdier (tørke og hetebølger)(se figur 4a og 4b). Økningen i temperatur vil være sterkere lenger bort fra kysten og lenger nord, og sterkere om vinteren enn om sommeren.

Endring i nedbør

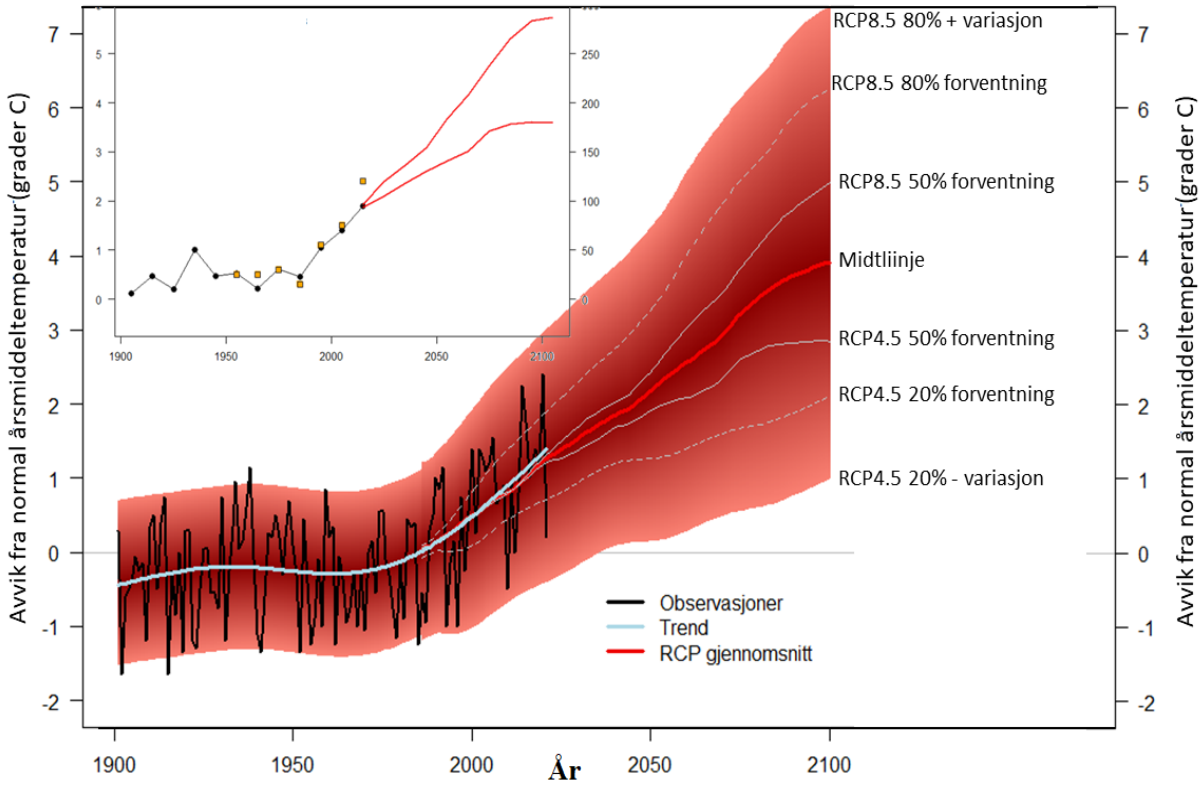
Gjennomsnittlig årlig nedbør for Norge var i perioden 1971 - 2000 på ca. 1600 mm. Den årlige nedbøren har økt med ca. 18 prosent siden 1900, og økningen har vært størst om våren og minst om sommeren. De videre endringene i årlig nedbør forventes å være mindre avhengig av utslippsscenarioer enn temperaturendringene,

15 Se også https://klimaservicesenter.no/kss/vrdata/normaler

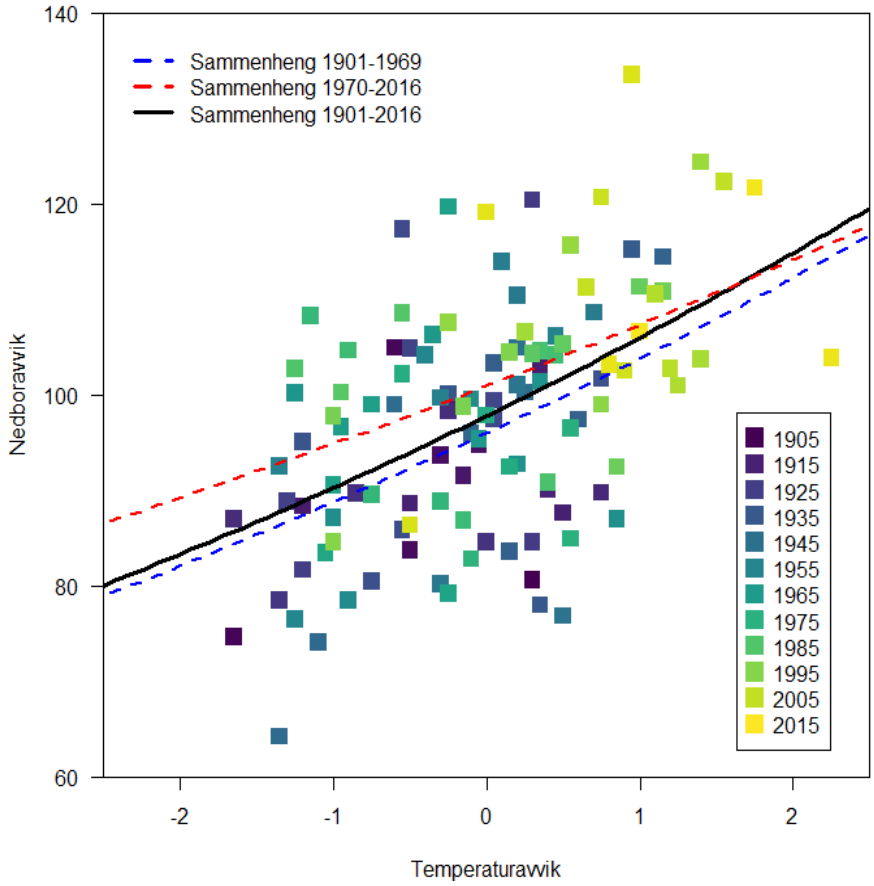
og prediksjonsintervallene for RCP4.5 og RCP8.5 overlapper i stor grad. Sammenhengen mellom årsmiddeltemperatur og nedbør er konsistent og sterk (figur 4c), og den nåværende trenden for nedbørsendring er brattere enn forutsett og variasjonen mellom år er stor (se figur 5). En dobling av antall dager per år med mye nedbør er også forventet, og foreløpige analyser tyder på at maksimal nedbørintensitet (nedbør som forekommer over noen timer) kan øke med mer enn 30 prosent over de neste 50 årene.

De observerte klimaendringene har generelt ført til økt nedbør og avrenning vinter og vår og tidligere snøsmelting. Den økte nedbøren fra 1980 til i dag har ikke blitt reflektert i en tilsvarende økning i avrenning om sommeren og høsten, mest sannsynlig fordi den tilsvarende økningen i temperatur også har ført til økt fordampning. Disse trendene ventes å fortsette og forsterkes, med mest økning i regn og avrenning om vinteren og våren, og særlig på Vestlandet. Derimot forventes avrenningen å avta om sommeren pga. tidligere snøsmelting og høyere fordampning, særlig i innlandet. Med andre ord forventes større frekvens av vårflommer, særlig i vest, og av sommertørke, særlig i øst.[16]

16 Se kap. 4.1.2 Intensification of the water cycle



Figur 4: Temperaturutvikling i Norge over tid. 1900-2021: Svart linje er årsmiddeltemperatur målt som avvik fra 1970-2000 normalen, med en lys trendlinje. Det røde området viser spennet 90 prosent av mellomårsvariasjonen faller innenfor. 2022-2100: De heltrukne lyse linjene viser midtpunktet for modeller under RCP4.5 og RCP8.5, mens de stiplede linjene viser verdiene 80 prosent av prediksjonene faller mellom. Rødt felt viser mellomårsvariasjon utover disse.



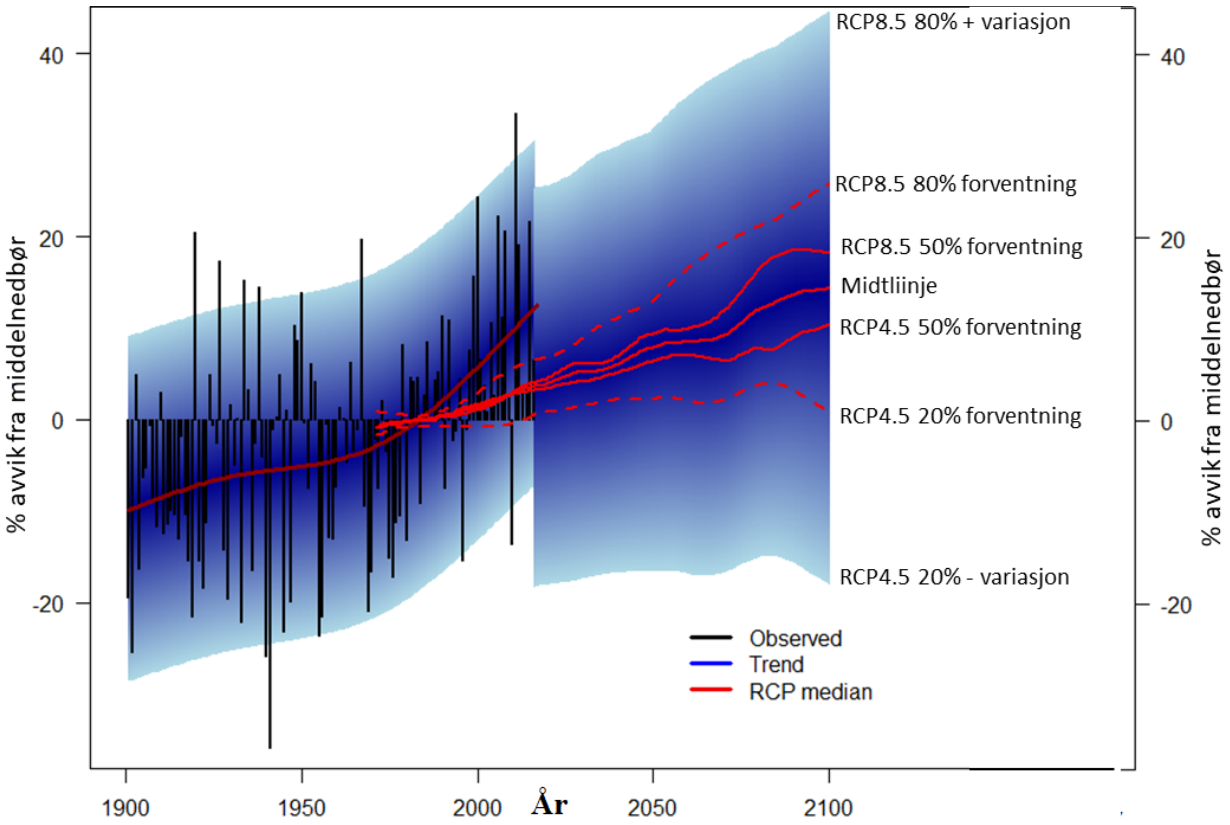
Figur 4b: Historisk sammenheng mellom avvik i årsmiddeltemperatur og årsnedbør som prosent av normalen. Sammenhengen mellom varme og våte eller tørre og kalde år holder både sent og tidlig i dataperioden.

Endring i klimasone

For å se hvordan forventede endringer i temperatur og nedbør vil påvirke fordelingen av vegetasjonssoner, er det beregnet hvordan klimasonene vil fordele seg under ulike fremtidsscenarioer (figur 6). De nyeste tilgjengelige analysene[17] tyder på at scenarioer som RCP8.5 som innebærer 4,5°C oppvarming i Norge, vil medføre at nærmest hele dagens arktiske/alpine sone i Fennoskandia vil få borealt klima innen år 2100. Boreal skog vil ikke kunne etablere seg på så kort tid, og artene som hører til i den arktiske/alpine sonen vil mangle områder å forflytte seg til. Under slike fremtidsscenarioer vil også det aller meste av dagens boreale sone i Fennoskandia (og hele det sirkumpolare taiga/boreale skogbeltet) slutte å ha borealt klima.

Hastigheten på klimaendringene medfører lite tid for skogsuksesjon og artsskifter, og det forventes derfor at økende mengder boreal skog vil befinne seg utenfor sin nåværende klimasone. I Fennoskandia forventes bare en liten rest av dagens boreale belte å ha borealt klima i 2090 under en slik fremtid.

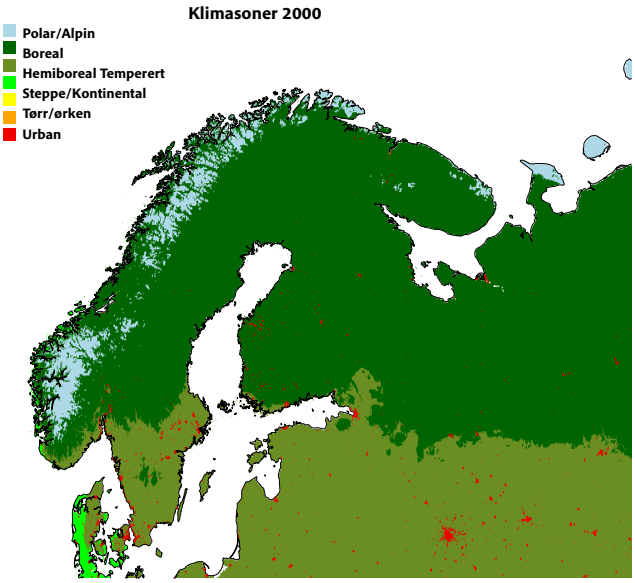
17 Se kap. 4.1.8 Climate zones

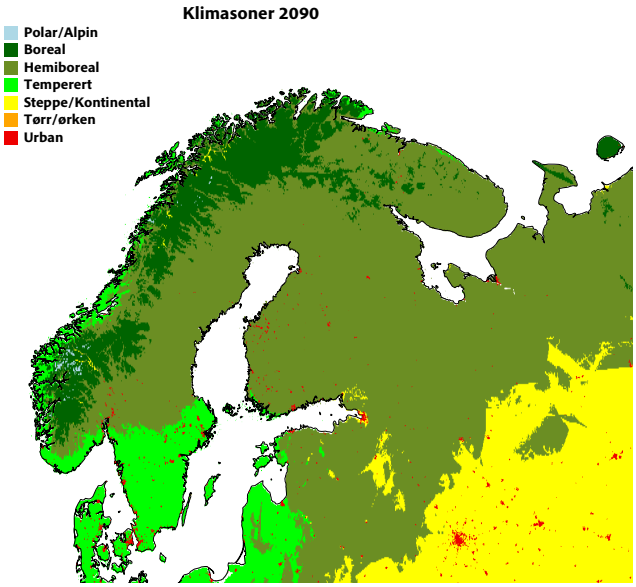


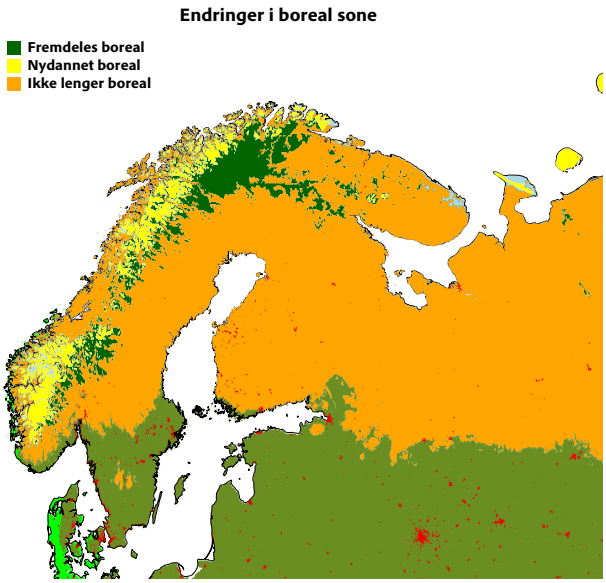
Figur 5: Nedbørsutvikling i Norge. 1900-2021: Svart linje er årsmiddelnedbør målt som avvik fra 1970-2000 normalen, med en dyprød trendlinje. Det blå området viser spennet 90 prosent av mellomårsvariasjonen faller innenfor. 2022-2100: De heltrukne røde linjene viser midtpunktet for RCP4.5 og RCP8.5 prediksjoner, mens de stiplede røde linjene viser verdiene 80 prosent av RCP8.5 RCP4.5 prediksjonene faller mellom. Blått felt viser mellomårsvariasjon rundt disse. Grå linje "Temperaturtrend" viser utvikling av nedbør forventet fra temperatur midtlinje basert på det historiske forholdet mellom nedbør og temperatur (se figur 4b)..

Endring i ekstremverdier

Litt forenklet kan man si at klima er gjennomsnittet over tid mens været hele tiden varierer rundt dette gjennomsnittet. Når klimaendringene forskyver gjennomsnittet litt kan det imidlertid gjøre en stor forskjell på hvor ofte været tilfeldigvis overskrider biologiske eller fysiologiske tålegrenser (se boks 5 og figur 4). Denne effekten forsterkes av at klimaendringene generelt sett ikke bare forskyver gjennomsnittet været varierer rundt, men også øker variasjonsbredden. Så kraftigere svingninger i været rundt et forskjøvet gjennomsnitt fører til flere ekstreme utslag når det gjelder temperatur, nedbør og alle faktorene disse berører.







Figur 6: Endring i boreal klimasone. (a) Forenklet kart over dagens klimasoner. (b) Kart over forventede klimasoner ca. 2090 (RCP8.5). (c) Forskjellene i utbredelse av klimasone for boreal skog. Gul farge viser alpin/tundra som varmes opp til boreal, mens oransje viser boreal sone som endres til hemiboreal, temperert eller steppe, dvs. ikke klimatyper som huser boreal skog i dag. Mørkegrønn viser områder med boreal skog i dag som fortsetter å egne seg for denne skogtypen også i 2090.

Del 2 - effekter av klimaendringer på skog i Norge

I denne delen av rapporten oppsummeres kunnskap fra den vitenskapelige litteraturen om sannsynlige effekter av klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser (se Boks 4) på fysisk miljø, planter, sopp, dyr, mikroorganismer, og økosystemprosesser i norsk skog frem mot år 2100. På slutten av hvert delkapittel kommer et avsnitt som knytter de beskrevne endringene til de sju egenskapene i fagsystemet for økologisk tilstand. For metodisk tilnærming, se kapittel 5.

Brann, storm, flom, hete og tørke

Endring i vekstsesong

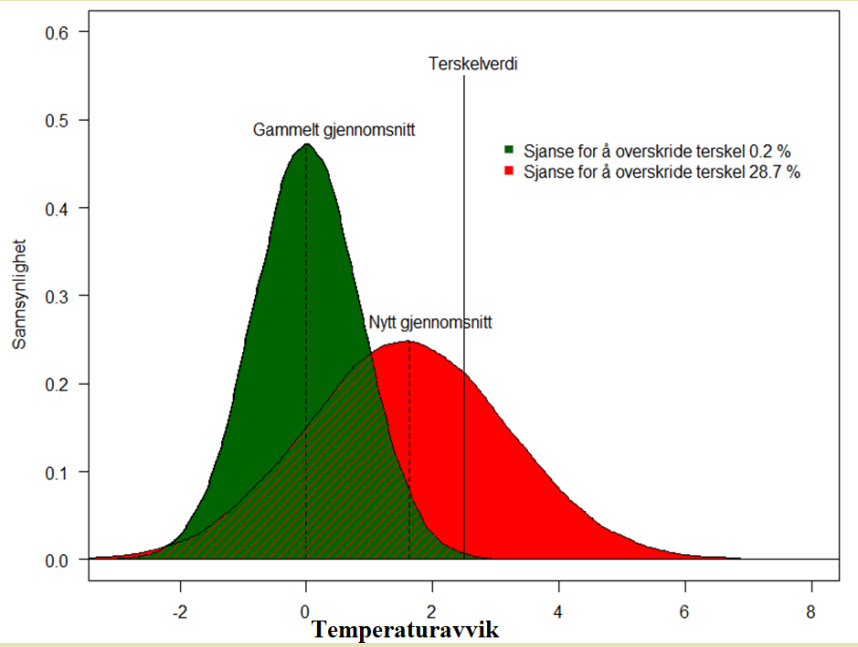
Klimaoppvarming forårsaker generelt lengre vekstsesong (definert som antall dager med gjennomsnittlig lufttemperatur over 5°C), spesielt langs kysten. I perioden 1981 til 2015 økte lengden på den norske vekstsesongen under tregrensen med om lag to uker i gjennomsnitt.

De største økningene skjedde i områdene med kortest sesonglengde i utgangspunktet.[18] Langs kysten er vekstsesongen beregnet å øke med én til to måneder innen 2031–2060, og med to til tre måneder mot slutten av århundret. Arealet med

18 Se kap. 4.1.4 Duration of the growing season og NIBIO 2021 Statistikk for vekstsesongen i perioden 1981–2015 https://www.nibio.no/tema/jord/jordkartlegging/jordsmonnkart/statistikk-for-vekstsesongen-i-perioden-1981--2015-copy

Boks 5: Middelverdi, ekstremer og sannsynlighet

Prinsippskisse av forholdet mellom endringer i gjennomsnitt og sannsynligheten for ekstremvær -dvs. overskridelse av en biologisk terskelverdi hvor for eksempel tørkeskade eller varmestress.



vekstsesong på mer enn seks måneder vil da ha økt med om lag 105 000 km² innen 2031–2060 og med 165 000 km² innen slutten av århundret. Faktorer som solinnstråling og daglengde endres imidlertid ikke, så nettoresultatet med hensyn til samsvar mellom temperatur og sollys vil være ulikt noe vi kjenner i dag.[19]

Jordvannsunderskudd og tørke

Økt årsnedbør gir ikke nødvendigvis økt vanntilgang om sommeren, og ikke jevnt fordelt over hele landet. Perioder med lav elveføring om sommeren i sørøstlige deler av Norge 1930–2004 har blitt forklart av høye temperaturer som gir tidligere snøsmelting i høyereliggende strøk og høyere fordampning i lavlandet sent på våren og sommeren. I Nord-Europa generelt er høyere temperatur forventet å gi stadig oftere uttørking, forsterket av tidligere snøsmelting som gir mindre vannmagasinering utover sen vår og sommer, og størst vannmangel om sommeren. Fremtidige anslag indikerer økende vannmangel for planter mot slutten av århundret, spesielt under de mer alvorlige scenarioene for klimaendringer (nærmere RCP8.5). Merk at tørkestress er sterkt avhengig av temperatur og kan oppstå selv uten endringer i årsnedbør (se figur 3). Andre studier viser også at vi kan forvente mer alvorlige jordvannsunderskudd, lavere grunnvannstand og lengre tørkeperioder i fremtiden, hovedsakelig sør og øst i Norge.[20]

Storm og vind

Det har ikke vært noen klar trend i hyppigheten av stormer i nordvest-Europa siden 1880. Historiske vindforhold i Norge er vanskelig å analysere, dels fordi vindobservasjoner er sterkt påvirket av lokale forhold og dels fordi målesteder og målemetoder har endret seg over tid. Følgelig brukes ofte modellerte vindhastigheter beregnet fra numeriske atmosfæriske modeller i stedet for direkte vindmålinger. I komplekst terreng trengs modeller med svært høy oppløsning for en realistisk beskrivelse av lokale vindretninger og hastigheter. Vindprognosene indikerer kun små endringer i gjennomsnittsverdier, men økende hastighet hos de sterkeste vindene. Det er en svak tendens til økende vind om vinteren og avtagende vind om sommeren, og det anslås en sterkere økning for den høyeste andelen vindstyrke. Dette kan tolkes som at de sterkeste stormhendelsene vil være sterkere i fremtiden, spesielt om vinteren, mens gjennomsnittlig vindstyrke er nær uendret, basert på regionale klimafremskrivninger.[21]

Brann

Brann er en naturlig prosess i boreal skog, men hyppigheten og omfanget av skogbrannene øker som et resultat av globale klimaendringer. Globalt brenner millionalls hektar boreal skog hvert år, og på verdensbasis øker både antallet branner og brannflatenes størrelse i takt med den pågående temperaturøkningen.[22]Denne sammenhengen mellom temperaturøkning og brann i boreal skog er også bekreftet gjennom paleoøkologiske undersøkelser der brannfrekvensen er blitt dokumentert over tusenvis av år med svært skiftende klima. Sammenhengene er likevel langt mer kompliserte enn et enkelt positivt forhold mellom temperatur og brann.[23] Også nedbør, sesongvariasjon og artssammensetningen i skogen er av avgjørende betydning for både frekvens, intensitet og spredning av brann. Dette gir sterk lokal variasjon i brannfare for Norge med dets skarpe klimagradienter og den variasjonen i skogstruktur og artssammensetning som følger av det. En økning i nedbørsmengde[24] vil kunne redusere forekomsten og omfanget av skogbrann i noen områder på tross av økende temperaturer, og endringer i artssammensetning til suksessivt mer lauvskog[25] vil også kunne redusere brannforekomsten.

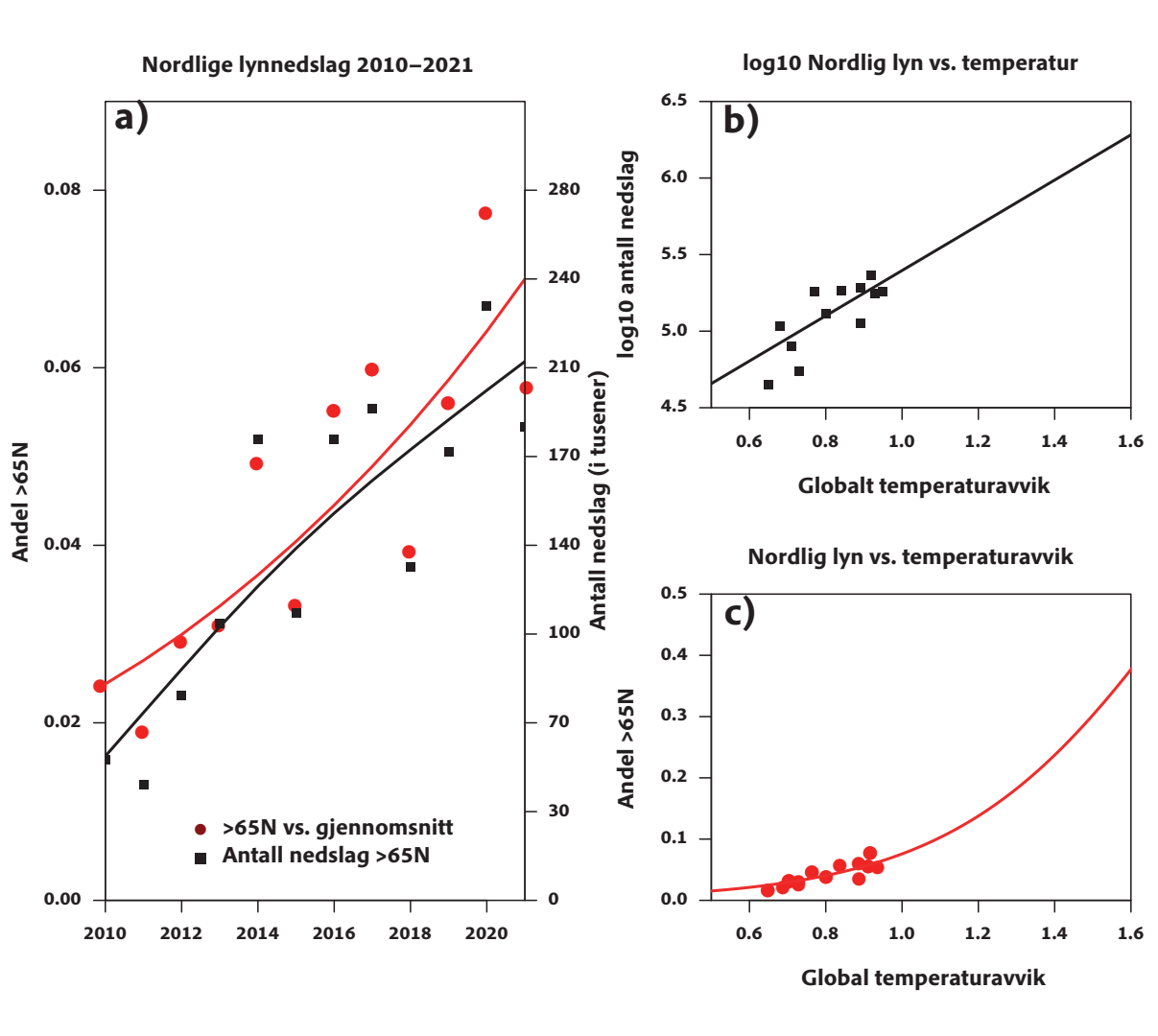
For å vurdere hvorvidt de klare sammenhengene mellom temperatur og skogbrann i resten av det boreale beltet også gjelder for Norge, med vårt oseaniske klima, oppstykkede terreng og

19 Se kap. 4.1.4 Duration of the growing season
20 Se kap. 4.1.2 Intensification of the water cycle og kap. 4.1.5 Soil water deficit and drought
21 Se kap. 4.1.6 Storms and winds
22 Se kap. 2.1.3 Disturbance regimes
23 Se kap. 2.3.2 Variability and bioclimatic gradients
24 Se kap. 4.1.2.1 Precipitation and evapotranspiration
25 Se kap. 4.4.1 Forest plant communities

Boks 6: Lynnedslag og klima

Et fenomen ukjent for de fleste er at antallet lynnedslag per kvadratkilometer per år avtar eksponentielt etter hvert som man nærmer seg polene. Men denne effekten avtar med økende oppvarming, og nye analyser viser at "beskyttelsen" norske breddegrader har hatt mot lynnedslag allerede har avtatt og kan forventes å eksponentielt nærme seg det globale gjennomsnittet.

Estimater gjort av VKM for denne rapporten antyder at områdene nord for 65 grader nord vil gå fra å ha ca. 5 % av det globalt forventede til å ha ca. 8 % nå og rundt 50 % ved den globale oppvarmingen som forventes innen 2050.



dertil hørende tradisjonelt lave årlige brannareal, foretok VKM en statistisk analyse av tilgjengelige data.[26] På årsbasis viser disse analysene at det vil forekomme brann over større skogarealer i fremtiden enn i dag. Her vil vi spesielt peke på den økte mellomårsvariasjonen i forekomst av brann. Dette fordi modelleringsresultatene harmonerer godt med klimascenarioene, som også peker mot stor variasjon mellom år med tanke på både temperatur og nedbør.[27] I fremtiden vil for eksempel svært tørre somre med tørkestresset og døende granskog[28] kunne resultere i høyintensive og storskala skogbranner, mens svært våte somre i kombinasjon med økende lauvtredekning vil kunne gi mindre omfang og lavere intensitet i skogbrannene enn det vi ser i dag. Lynaktiviteten på høyere breddegrader forventes å fortsette å øke og bli mer lik det globale gjennomsnittet (se Boks 6. Dette var ikke med i de statistiske analysene, men styrker konklusjonen om at brannaktiviteten forventes å øke og at det dermed vil kreves større ressurser til brannkontroll for å unngå nedbrenning av større områder utsatt skog.

Oppsummering av effekter på økologisk tilstand

Forstyrrelser som brann, storm, flom og tørke vil kunne påvirke økologisk tilstand i skogen og derved flere av de sju egenskapene som brukes i fagsystemet for økologisk tilstand. Brann vil for eksempel gi økt pH og bidra til å frigjøre næringsstoffer i jorda, og kan også føre til tap av økosystemets karbonlagre både fra trærne og fra jordsmonnet (Egenskap 7).[29] Den økte næringstilgangen kan gi økt primærproduksjon (Egenskap 1) og et skifte i funksjonell sammensetning mot et større innslag av pionérarter (Egenskap 3).[30] Flere og mer intensive branner vil kunne resultere i færre gamle trær og på lang sikt mindre grov død ved. Det kan føre til at funksjonelt viktige arter og biofysiske strukturer går tapt (Egenskap 4) og til redusert biologisk mangfold, spesielt av arter knyttet til gammel skog (Egenskap 6).[31] På landskapsnivå kan dette gi seg utslag i endrede forhold for spredning av arter, og habitatbruk. Utslagene vil særlig gjøre seg gjeldende gjennom skogsfragmentering og homogenisering fordi særegne habitater og gammel skog går tapt. Resultatet er endret eller redusert biologisk mangfold på landskapsnivå. (Egenskap 5, 6).[32]

Skadegjørende organismer og utbrudd

Generelt kan man anta at klimaendringer vil føre til mer sykdommer på planter og til en viss grad på dyr i Norge. Det kan ha flere årsaker. Når klimaet endrer seg raskt utsettes skogområder for vær og andre forhold som planter og dyr er dårlig tilpasset. Økende grad av stress og suboptimale forhold (ofte kalt klimagjeld) svekker organismer og gjør dem mer mottakelige for sykdom og parasitter. Dyr kan til en viss grad redusere klimagjeld med migrasjon til leveområder de er bedre tilpasset, mens trær må holde ut forholdene der de står. Insekter og sykdommer som gjør skade på skog har ofte god spredningsevne og kan dra nytte av svekkede verter.

Mildere vintre med mindre ekstrem kulde og frost tillater etablering av flere arter av skadegjørere som hittil ikke har vært særlig til stede i norsk natur.[33] Lengre vekstsesong tillater også en del insekter å gjennomgå flere generasjoner med populasjonsvekst per år. Tørrere og varmere somre gir flere stressede trær med dårlig forsvarsevne mot f.eks. barkbiller. Dette forventes å føre til hyppigere og mer omfattende utbrudd av stedegne insekter og sykdomsfremkallende organismer (patogener) som gjør skade på skog, og øke det totale arealet hvor fremmede arter kan etablere levedyktige bestander. Lokale

26 Se kap. 4.1.7.1 Climate change impact on fire occurrence in Norway
27 Se kap. 4.1.1 Temperature: median and extremes
28 Se kap. 4.2.1.2 Norway spruce (Picea abies)
29 Se kap. 5.1.7 Characteristic 7: Abiotic factors
30 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity og kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels

31 Se kap. 5.1.4 Characteristic 4: Functionally important species, habitat-building species, and biophysical structures og kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange
32 Se kap. 5.1.5 Characteristic 5: Landscape ecological patterns og kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange
33 Se kap. 4.3 Pests, pathogens, parasites

utbrudd kan til en viss grad kontrolleres av tilsvarende klimarelaterte økninger i parasitt- eller rovdyrbestander, blandede skogtreslag, og begrenset gjenvekst av gran. For mange virvelløse dyr forventes økte gjennomsnittstemperaturer å føre til raskere populasjonsvekst, siden vekstrate og antall generasjoner per år ofte henger sammen med temperatur hos vekselvarme dyr.

Insekter og insektsbårne sykdommer på trær

Eruptive insekter, som kan forårsake store utbrudd og beite intensivt på trær og busker i skogen, er de insektene vi har mest kunnskap om i tilknytning til klimaendringer.[34] Det er spesielt forventet at klimaendringer vil gi hyppigere utbrudd av barkbiller gjennom mer tørkestress og stormfelling av skog. Slike insektutbrudd vil dermed kunne få større påvirkning på skogdynamikken, spesielt i granskogens sørlige utbredelsesområde, som etter hvert vil kunne ligge i Sør-Norge. Ved økende stormfelling kan noen barkbillearter også få bedre ressurstilgang, noe som vil øke potensialet for populasjonsvekst påfølgende år. Det finnes indikasjoner på at utbrudd av barkbillearter som lever av furu også kan bli vanligere som følge av klimaendringer. Forventede klimaendringer kan også føre til at amerikanske tredrepende barkbiller fra slekten Dendroctonus lettere får fotfeste i Norge, dersom de skulle bli introdusert. Utbruddene til lauvetere som fjellbjørkemåler og liten frostmåler[35] har allerede blitt kraftigere i Nord-Norge (Troms og Finnmark), noe som kan skyldes at mildere vintre øker overlevelsen av egg. Flere andre arter, som for eksempel rød furubarveps, er forventet å øke utbredelsen sin nordover og oppover i høyden og medføre større utbrudd.

Soppsykdommer

Skader forårsaket av sopp som angriper trær vil sannsynligvis øke i norske skoger i takt med klimaendringene.[36] Noen viktige soppsykdommer på trær favoriseres av mildere vintre, lengre og varmere sommersesonger og økning i stormfrekvens eller stormstyrke. Disse inkluderer blant andre fururotkjuke og granrotkjuke (arter av Heterobasidion), almesyke (Ophiostoma ulmi og O. novo-ulmi), og askeskuddsyke (Hymenoscyphus fraxineus). Flere sykdomsfremkallende sopp spres via sporer eller rotkontakter. Økt stormaktivitet og mindre tele i bakken vil føre til økt belastning på røttene og slik gjøre det lettere for soppene å spre seg ved rotkontakt. Et mildere klima med lengre vekstsesong vil også forlenge perioden for sporespredning.

Mikroorganismer i slekten Phytophthora, som forårsaker sykdom på trær, vokser best ved høyere jordtemperaturer. Det forventes derfor at fremtidig temperaturøkning vil kunne føre til at enkelte av disse artene får økt forekomst og skadepotensial i lauvskoger, avhengig av regionale endringer i temperatur, nedbør og hyppighet og alvorlighetsgrad av ekstreme værhendelser.[37]

Dyresykdommer og zoonoser

Forekomsten og utbredelsen av dyresykdommer (inkludert zoonoser) er klimafølsomme, noe som skyldes effekter på selve patogenet, dets vert(er) eller vektor(er). Dermed forventes utbredelse og epidemiologi å endre seg med klimaforholdene. Dette gjelder ikke minst i nordlige områder som har hatt relativt lave sykdomsbyrder sammenlignet med tropiske områder, men som nå opplever de største oppvarmingstrendene. Det er en generell mangel på kunnskap om mulige patogener som påvirker pattedyr, fugler, insekter og andre dyr, så rapporten sier lite om effekter av klimaendringer på dyresykdommer.[38]

Zoonoser, det vil si sykdommer som smitter fra dyr til mennesker, er blitt mer studert enn rene dyresykdommer, noe som skyldes deres betydning for folkehelse. I denne litteraturgjennomgangen finner vi spesielt at sykdommer relatert til flått, som borrelia og

34 Se kap. 2.3.6 Native and alien pests and pathogens og kap. 4.3.1 Invasive bark beetles (Curculionidae, Scolytinae)
35 Se kap. 2.3.6 Native and alien pests and pathogens
36 Se kap. 2.3.6 Native and alien pests and pathogens og kap. 4.3.3 Invasive and endemic fungal tree pathogens

37 Se kap. 2.3.6 Native and alien pests and pathogens og kap. 4.3.3 Invasive and endemic fungal tree pathogens
38 Men se kap. 4.3.5 Wildlife diseases

TBE, har økt i utbredelse i takt med at klima- og vegetasjonsendringer har gitt bedre levekår for flått i store deler av norske skogområder.

En fersk metastudie antydet noen generelle forhold som forventes å gjelde for hele det boreale skogbeltet. Studien fant at sannsynligheten for soppsykdom økte kraftig under kalde avvik i varmt klima, mens forekomsten av bakterielle sykdommer økte kraftig under varme avvik i kjølig klima. Videre fant studien at oppvarming forventes å ha flere positive effekter for innvollsormer enn andre parasitter. Virusinfeksjoner viste seg å være relativt sett lite knyttet til klimaendringer, mens vektorbårne virus kan være unntak da de følger responsen til vektorene og vertene deres.

Oppsummering av effekter på økologisk tilstand

Insekt-, skadedyr- og sykdomsangrep, særlig dersom det skjer i stor skala, vil kunne påvirke økologisk tilstand i skogen ved å påvirke flere av de sju egenskapene., som brukes i fagsystemet for økologisk tilstand. Utbrudd kan gi skogdød og oppblomstring av andre skadegjørere og nedbrytere, noe som gir endring i trofisk struktur (Egenskap 2) og i nedbrytersamfunn (Egenskap 3).[39] Generelt kan man forvente redusert produktivitet, i alle fall på kort sikt (Egenskap 1), og reduksjon i biologisk mangfold knyttet til gammel skog (Egenskap 6).[40] Økt næringstilgang som følge av at døde trær brytes ned, kan gi økt primærproduksjon (Egenskap 1) og et skifte i funksjonell sammensetning mot et større innslag av pionérarter (Egenskap 3).[41] På landskapsnivå kan større og hyppigere utbrudd gi seg utslag i endrede migrasjonsruter og skogsfragmenter, homogenisering dersom særegne habitatbyggende arter (e.g., treslag, som ask), habitater, eller gammel skog går tapt, og dermed endrede eller reduserte muligheter for opprettholdelse av biologisk mangfold på landskapsnivå (Egenskap 5, 6).[42]

Habitatbyggende treslag: vekstforhold og dynamikk

Gran

Gran er et dominerende treslag i østre og midtre deler av Norge og utgjør omtrent 43 prosent av det stående volumet i norsk skog. I Midt-Norge danner grana kystskog, mens den på Østlandet ofte danner tregrense opp mot fjellet. Det europeiske skogbruket er tilpasset og svært avhengig av grantømmer, og treslaget har derfor blitt plantet langt utenfor dets naturlige utbredelse. Dette gjelder til en viss grad også i Norge, der naturlige furu- og lauvskoger og lyngheier mange steder har blitt erstattet med plantet gran. Grana er et skyggetolerant treslag, som trives best på næringsrik, djup og fuktig jord. På grunn av det grunne rotsystemet er den ganske storm- og tørkeutsatt. Det relativt mørke, kjølige og fuktige miljøet i granskogen er viktig for mange lav-, sopp- og fuglearter.[43]

Granas produktivitet begrenses i dag både av lave forsommertemperaturer i det meste av landet og i Sørøst-Norge av tilgangen på nedbør. Proveniensforsøk har vist at grana i Norge starter våren opp til tre uker tidligere nå enn for 30 år siden, selv om det er store forskjeller mellom provenienser. Tidligere knoppsprett gir et vekstforsprang, men øker samtidig sannsynligheten for frostskader. Siden generasjonstiden for trær er lang, forventes at fenologiske forskjeller vil ha mye å si for hvilke populasjoner som klarer seg best ved klimaendringer. Samtidig ser det ut til at grana har en mulighet for raskere tilpasning gjennom en såkalt epigenetisk effekt, ettersom klimaet ved frømodning påvirker f.eks. tidspunkt for knoppsprett for de framtidige plantene.

39 Se kap. 5.1.2 Characteristic 2: Distribution of biomass between different trophic levels og kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels
40 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity og kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange
41 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity og kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic level

42 Se kap. 5.1.5 Characteristic 5: Landscape ecological patterns og kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange
43 Se kap. 4.2.1 Trees and forest stands

Temperatur er en begrensende faktor både for blomstring og frømodning, slik at vi kan forvente bedre rekruttering av gran i nordlige og høyereliggende strøk framover. Videre viser både eksperimenter og retrospektive studier (ved hjelp av årringer) fra boreale skoger at veksten av gran øker i tradisjonelt kalde og fuktige områder som følge av temperaturøkning. I varmere og tørrere deler av utbredelsesområdet er imidlertid forsommertørke en begrensende faktor, som framover forventes å forårsake stress, med påfølgende skader og deretter redusert konkurranseevne mot andre arter. Dette støttes av modellbaserte studier, der en bruker dagens kunnskap om vekstkrav sammen med framtidige klimascenarioer for å si noe om framtidas vekst. Både finske, svenske og norske analyser tyder på at veksten av gran vil øke i den nord-boreale sonen, men at veksten i sørlige deler av Norden vil avta fram mot 2100, først og fremst på grunn av redusert vanntilgang.[44]

Blant de dominerende, norske treslagene er grana mest utsatt for stormfellinger, og omfanget av vindskader har økt de siste tiårene. Dette kommer delvis av at skogen stadig blir tettere og eldre, men også av at røttene har dårligere feste om vinteren på grunn av mindre frost og mer nedbør. År med mindre nedbør enn normalt eller ekstrem tørke er også forventet å ramme gran spesielt hardt. Død forårsaket av akutt tørke alene er mest vanlig for små trær, men tørre somre har vist seg å kunne hemme vanntransport betydelig, og dermed stresse også større trær slik at de blir mer utsatte for f.eks. skadeinsekter i flere påfølgende år.[45]

Furu

Furu er et vanlig treslag over hele landet, inkludert i kyststrøk, i tregrensa mot fjellet og mot nord. Den utgjør omtrent 31 prosent av det stående volumet i norsk skog. Furu kan vokse på nesten all slags jord, og fra veldig tørre til våte forhold. I østre og sentrale deler av landet blir den imidlertid ofte utkonkurrert av gran på næringsrike og fuktige marker. På grunn av det solide rotsystemet står furua godt mot vind, og kan vokse på skrinne jordsmonn. Den tjukke barken og høye krona gjør større trær godt rustet mot brann. Furua er en viktig matkilde for mange skoglevende dyr.[46]

Klimaeffekter er mindre studert enn for gran, men også boreal furu har startet våren tidligere de siste tiårene, spesielt i nord. Effekten av høyere temperatur ser ut til å være sterkere i kontinentalt enn i oseanisk klima. Hos furu forventer en også økt sannsynligheten for vårfrost, med stor variasjon mellom provenienser.[47] Blomstringen er ikke sterkt begrenset av temperatur, men mer vellykket frømodning vil sannsynligvis øke rekrutteringen av furu i nordlige og høyereliggende strøk. Artens vandring mot nord og oppover i fjellet vil sannsynligvis også lettes når permafrosten tiner. Videre viser både årringstudier av eldre trær og eksperimenter med små trær at furua øker veksten når temperaturen øker. I tråd med dette, viser framtidsscenarioer laget i de ulike nordiske landene en forventning om at tilveksten for treslaget vil fortsette å øke, spesielt i de nordlige delene av utbredelsesområdet. Studier fra kystområdene i Norge tyder imidlertid på at spesielt varme år ikke gir noen positiv effekt på vekst i dette klimaet, noe som kan være et resultat av at milde og våte vintre som nevnt over ikke gir noen positive effekter på lengden av vekstsesongen. Furu regnes som en tørkeresistent art, men selv moderat tørre somre har vist seg å ha klar negativ effekt på veksten når de inntreffer flere år på rad. De negative klimaeffektene på furu skyldes likevel først og fremst at arten taper i konkurranse med andre arter. Furuas dype rotsystem gir god motstand mot vindfellinger.[48]

44 Se kap. 4.2.1 Trees and forest stands, kap. 4.4.1 Forest plant communities og kap. 4.5 Time lags, asynchrony, cascades, and feedbacks
45 Se kap. 4.3.1 Invasive bark beetles (Curculionidae, Scolytinae), kap. 4.3.2 Invasive jewel beetles (Buprestidae) and long-horned beetles (Cerambycidae), kap. 4.3.3 Invasive and endemic fungal tree pathogens og kap. 4.3.4 Other plant diseases

46 Se kap 4.2.1 Trees and forest stands
47 Proveniens (lat.: pro-venire = komme fra, stamme fra) beskriver en plantes opprinnelse eller avstamning. Særlig relevant ved skogsplanting mhp. stedlig klima og jordsmonn.
48 Se kap. 4.3.1 Invasive bark beetles (Curculionidae, Scolytinae), kap. 4.3.2 Invasive jewel beetles (Buprestidae) and long-horned beetles (Cerambycidae), kap. 4.3.3 Invasive and endemic fungal tree pathogens og kap. 4.3.4 Other plant diseases

Bjørk

I Norge har vi to naturlige bjørkearter som vokser seg til trær: Hengebjørk og dunbjørk (heretter bare omtalt samlet som «bjørk»). Målt i antall trær er bjørk det vanligste treet i Norge (41 prosent av alle skogstrær), og utgjør omtrent 31 prosent av det stående volumet i norsk skog. Bjørka finnes over hele landet fra polar tregrense i nord og alpin tregrense i sør til kyststrøk i Viken. I skogen finnes den vanligst som enkelttrær eller små grupper i blanding med gran. Bjørka opptrer imidlertid også som et sein-suksesjonstreslag i Vest- og Nord-Norge. Deler av fjellbjørkeskogen er rik på næring, og kan ha høy diversitet av planter, moser, lav, insekter og fugler. Bjørka utnyttes i Norge stort sett kommersielt til ved, og det foregår lite tilsiktet planting eller skjøtsel av bjørkeskog.[49]

Studier av knoppsprett i proveniensforsøk viser at bjørk har startet våren nesten tre uker tidligere de siste tiårene, og at dunbjørk har reagert sterkere enn hengebjørk på økte temperaturer. Dunbjørk forventes derfor å øke både vekst og utbredelse opp mot fjellet og nordover i framtida, delvis også på grunn av redusert menneskelig påvirkning i disse områdene. Den er en vanlig lyskrevende pionérart, og etablerer seg raskt på nye, åpne områder. I Sør-Norge antar vi at dagens skoggrense mot fjellet ligger omtrent 100 m under det klimatiske potensialet. I Nord-Norge er effekten av menneskelig aktivitet mindre, selv om noen områder er sterkt påvirket av reinbeite. Hengebjørka er imidlertid sensitiv for sommertørke og vil kunne begrenses av dette på noen jordtyper og i noen regioner.[50]

Oppsummering av effekter på økologisk tilstand

Trærne er de viktigste primærprodusentene i skogen, og effekter av klimaendringer på treslagene vil derfor påvirke skogens primærproduksjon direkte (Egenskap 1).[51] I tillegg vil endrede vekstforhold og overlevelse for treslagene i seg selv føre til en endring i funksjonelt viktige arter og biofysiske strukturer (Egenskap 4).[52] Fordi trær utgjør et viktige habitater, mat og struktur for andre arter (Egenskap 4), vil endringer i strukturen og artssammensetningen av treslagene også påvirke struktur og sammensetning på andre trofiske nivåer i næringsnettet (Egenskap 2, 3).[53] Endringer i treslag og tredekke kan også påvirke karbon-, nærings- og vannkretsløp i skogen, og ha betydning for snøforhold og mikroklima (Egenskap 7).[54]

Annen flora, fauna og sopp

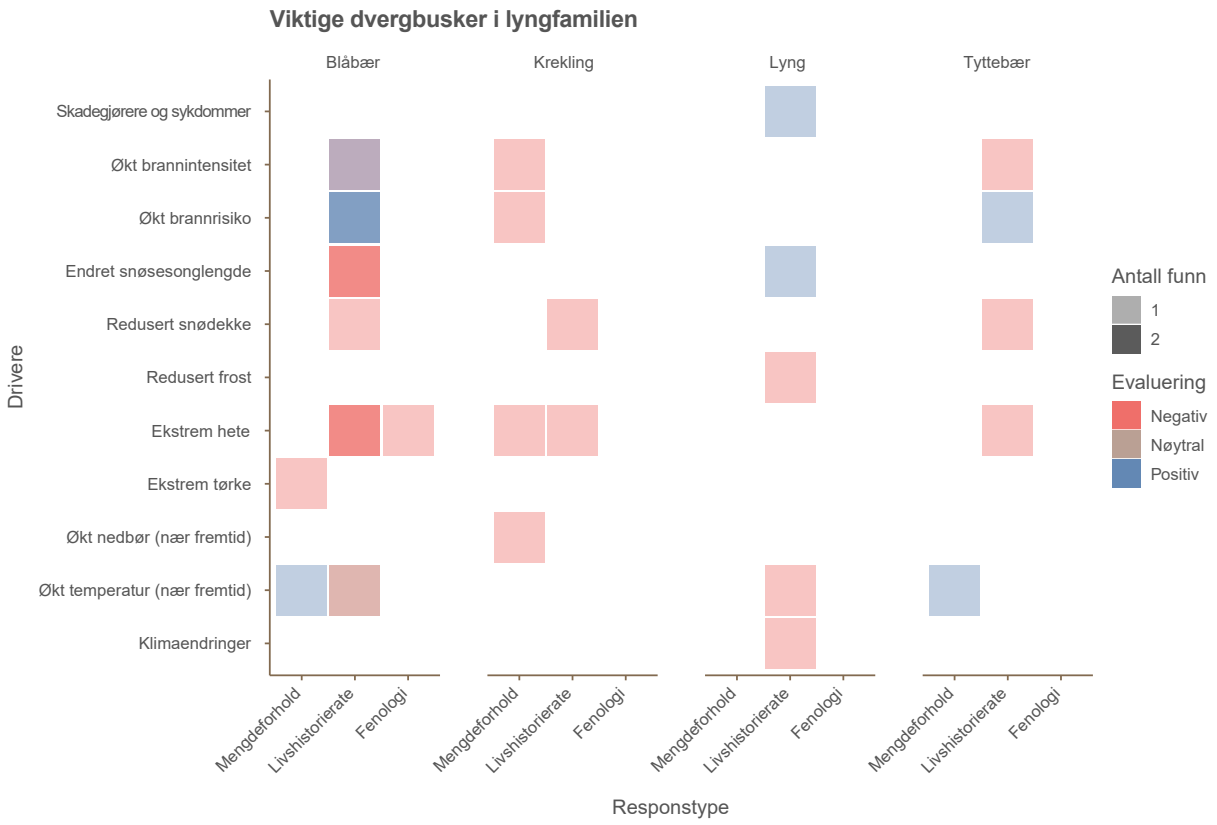
Under- og kantvegetasjonen

I tillegg til de dominerende habitatbyggende treslagene som definerer den boreale skogen, inneholder den mange andre økologisk viktige arter og artsgrupper som responderer på klimaendringer. Noen plantegrupper, som arter fra lyngfamilien (blåbær, tyttebær og krekling mfl.), spiller en stor økologisk rolle fordi de er dominante og strukturerende i undervegetasjonen i skogen, og bidrar med en betydelig andel av primærproduksjonen. Disse artene danner habitat og bidrar med mat og andre ressurser for andre viktige organismer, blant annet pollinatorer, fruktetere og beitedyr som insekter, fugler og pattedyr.[55]

Et stort flertall av effektene av klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser på lyngartene er negative (Figur 7). Særlig blåbærplanter kan

49 Se kap. 4.2.1 Trees and forest stands
50 Se kap 4.1.1 Temperature: median and extremes, kap. 4.1.2 Intensification of the water cycle, kap. 4.3 Pests, pathogens, and parasites og kap. 4.5 Time lags, asynchrony, cascades, and feedbacks

51 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity og kap. 5.1.4 Characteristic 4: Functionally important species, habitat-building species, and biophysical structures
52 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity og kap. 5.1.4 Characteristic 4: Functionally important species, habitat-building species, and biophysical structures
53 Se kap. 5.1.2 Characteristic 2: Distribution of biomass between different trophic levels, kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels og kap. 5.1.4 Characteristic 4: Functionally important species, habitat-building species, and biophysical structures
54 Se kap. 5.1.7 Characteristic 7: Abiotic factors
55 Se kap. 4.2.2 Ericaceous dwarf shrubs



Figur 7: Oppsummering av effekter av ulike klimarelaterte påvirkningsfaktorer på viktige lyngarter i norsk skog, basert på funn fra faglitteraturen. Kolonnen Lyng refererer til funn for lyngartene samlet sett. Drivere viser til de klimarelaterte påvirkningsfaktorene. Responstype viser til hvordan den enkelte lyngarten er påvirket (mengdeforhold refererer til endring biomasse eller dekningsgrad; livshistorierate til parametere som vekst, reproduksjon eller overlevelse; fenologi til periode for bladsetting, blomstring, fruktmodning). Antall funn = antall funn i forskningslitteraturen. Evaluering = om hver enkelt respons påvirkes positivt, nøytralt, eller negativt av den aktuelle driveren.

rammes av økt dødelighet når vintrene blir varmere og snødekket blir redusert. Kortere snødekke og varmere vår kan også øke sjansen for frostskader på blomstene. Varmere vekstsesong har vist å kunne øke veksten til både blåbær og tyttebær, men kan samtidig redusere danningen av blomsterknopper. Tørkeeffekter kan også gi redusert vekst og reproduksjon hos blåbær, men forventes å ha mindre effekt på tyttebær og krekling. Den samlede effekten av en del forventede klimaendringer, som mindre snø og varmere temperaturer både vinter og sommer, kan redusere både blomstring og bærproduksjon vesentlig, spesielt hos blåbær. Dette kan ha store ringvirkninger på andre organismer (se over). Det er verdt å understreke at planter fra lyngfamilien er ganske hardføre ovenfor ulike former for forstyrrelser, i tillegg til å være lengelevende. Det er derfor usikkert hvorvidt klimaendringseffektene vil slå negativt ut på plantepopulasjonene på kort sikt.[56]

De såkalte ROS-artene, rogn, osp og selje (ev. andre Salix sp.), finner vi ofte i kanter og lysninger, og selv om de ikke er så tallrike som lyngartene så spiller de på tilsvarende måte en sentral økologisk rolle i den boreale skogens næringsnett. Vi vet ganske lite om effektene av klimaendringer på disse treslagene, men kan regne med at de responderer ganske ensartet

56 Se kap. 4.2.2 Ericaceous dwarf shrubs og kap. 4.2.3 Other understory plants

som gruppe og på samme måte som bjørk, siden de har nokså like miljøkrav. Noen studier peker på at ROS-artene har vunnet terreng nordover i Europa og at de framover vil tape terreng sørover i Europa. Om bestandene til ROS-artene i tiden framover vil være i stand til å ekspandere like fort nordover som de taper terreng i sør er likevel usikkert og noe som kan medføre et redusert utbredelsesområde.[57]

Det tredje funksjonelt viktige laget av undervegetasjon som vi har sett på i denne rapporten er moser og lav. Disse er også karakterarter for boreal skog, og spesielt moser opptrer ofte med stor biomasse på skogbunnen, men også som epifytter på trær og stein i den boreale skogen. Moser er spesielt sensitive for varmere temperaturer og mindre fuktighet, og spesielt kombinasjonen av disse kan skape problemer for overlevelse, vekst og reproduksjon. Noen arter ser ut til å nyte godt av lengre vekstsesong, og store og rasktvoksende arter som etasjemose og kystkransmose har, for eksempel, doblet sin biomasse i granskog siste 30 år. En del varmekjære lav ser ut til å ha fått en økning mange steder, mens mer kuldetolerante arter av lav ser ut til å være i tilbakegang. Fjerning av gamle trær og død ved gjennom skogbruk kan svekke muligheter for lav til å spre seg nordover og oppover i høyden for å kompensere for dårlige forhold sørover og lavere ned. Både lav og moser har sein gjenvekst og økt brannfrekvens kan derfor påvirke mange bestander i disse organismegruppene negativt.[58]

Konsekvenser for økologisk tilstand i skogen

Endrede vekstforhold og overlevelse for under- og kantvegetasjon vil påvirke primærproduksjonen (Egenskap 1) og i tillegg innebære endringer i funksjonelt viktige arter og biofysiske strukturer (Egenskap 4), som vil påvirke mangfold og sammensetning, spesielt for virvelløse dyr og smågnagere (Egenskap 3, 6).[59] Særlig lyng er en viktig funksjonell gruppe i underskogen, og effekter av klimaendringer på mengden lyng, lyngens blomstring og fruktproduksjon, eller sesongvariasjon (Figur 7) vil påvirke tilgang av mat og habitat for fugler, smågnagere og insekter (Egenskap 4, 2, 3), og vil gjennom interaksjoner med mykorrhiza antakelig påvirke karbonkretsløpet i skogen (Egenskap 7).[60]

Dyrelivet

Dyr kan bli direkte påvirket av klimaendringer gjennom effekter på fysiologiske reaksjoner, men kanskje enda viktigere er de indirekte effektene som påvirker mattilgangen eller antall fiender i form av andre dyr som konsumerer og parasitterer på dem, ev. utbredelsen av sykdommer.

Mange insekter har en vesentlig del av sin livssyklus i boreal skog. En stor andel av skoglevende insekter konsumerer levende og dødt plantemateriale i skogen, og spiller sentrale roller i skogens næringsnett gjennom å bidra til nedbryting og omsetting av næringsstoffer (se Nedbrytere) og ved å være mat for andre organismer. Insekter, som er ektoterme (vekselvarme) organismer, nyter generelt sett godt av økende temperaturer i kjølig klima, og klimaoppvarming er derfor forventet å kunne øke biomassen og artsmangfoldet til mange grupper av skoglevende insekter. Klimaoppvarming vil også kunne redusere generasjonstiden, noe som kan tillate flere generasjoner i samme sesong, samt øke reproduksjonen, overlevelsen og spredningspotensialet til mange arter. Økt nedbør kan derimot være negativt for en del insektarter, og det er derfor å forvente at

57 Se kap. 4.2.1 Trees and forest stands
58 Se kap. 4.2.4 Bryophytes and lichens

59 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity, kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels, kap. 5.1.4 Characteristic 4: Functionally important species, habitat-building species, and biophysical structures og kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange
60 Se kap. 5.1.2 Characteristic 2: Distribution of biomass between different trophic levels, kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels, kap. 5.1.4 Characteristic 4: Functionally important species, habitat-building species, and biophysical structures og kap. 5.1.7 Characteristic 7: Abiotic factors

Foto: Stein Joar Hegland

klimaendringer vil skape både vinnere og tapere også hos insektene. Planteetende insekter som lever av trær i den boreale skogen, viser stor variasjon i populasjonsdynamikk. En del slike insekter vil kunne gå fra å være ganske anonyme til å bli arter som gir utbrudd og skader på skogøkosystemene, men utfallet her er usikkert fordi det avhenger av samspill mellom mange arter i skogens næringsnett og miljøet ellers.[61]

Den mest karakteristiske gruppen av pollinerende insekter i boreale områder er humler, som ofte har bol i skog og søker næring av masseblomstrende planter i kant- og undervegetasjonen i skog, slik som selje og ulike arter i lyngfamilien. Humler er tilpasset et ganske kjølig klima og Norge har relativt sett den største andelen av humlearter av noe land i verden (35 av flere enn 250 humlearter i verden finnes i Norge). Varmere klima forventes å påvirke en del arter, og metastudier tyder på at humlearter på den nordlige halvkule flytter

61 Se kap. 4.2.6 Birds, kap. 4.2.7 Bats, kap. 4.2.8 Rodents and lagomorphs og kap. 4.2.9 Large herbivores

seg oppover i høyden og nordover som respons på klimaendringene. Denne forflytningen skjer generelt sett ikke like fort som tap av utbredelse i sør og i lavlandet. I Norge ser man indikasjoner på at klimaendringer fører til en økning i mangfold av humlearter i fjellet kombinert med tap av arter i lavlandet. Studier fra Sverige peker i samme retning. Fordi man mangler lange tidsserier for insekter, er det fortsatt mye som er ukjent om klimaendringenes påvirkning på humler og andre pollinerende insekter. Småskala forstyrrelser og økt habitatmangfold kan være positivt for mangfoldet av pollinerende insekter, og hvordan klimaendringer vil påvirke leveområdene for pollinerende insekter er et viktig forskningsspørsmål.[62]

Fugler utgjør 70 prosent av virveldyrartene i den boreale skogen, og bruker skogen som område for reir, matsøk og beskyttelse, i deler av eller hele året. Fugleartene i den boreale skogen fyller mange ulike nisjer. Omtrent fire av fem fuglearter spiser insekter, men frøspisere og rovfugl er også viktige grupper. Klimaendringer forventes derfor å påvirke ulike grupper av fugler forskjellig, fordi økt temperatur, tørke, forandret frukttilgang med mer kan ha svært forskjellig effekt avhengig av fuglenes diett. Mange skogsfugler er allerede i tilbakegang på grunn av habitattap og habitatfragmentering som følge av skogbruk og utbygging. I Sverige og Finland har en funnet at sørlige arter flytter nordover og at nordlige arter får redusert sine leveområder fordi de ikke flytter like fort nordover som sørlige arter. Mange nordlige arter har også fått redusert bestandsstørrelse, muligens som følge av et varmere klima. Det er kjent at trekkfugler har begynt å ankomme hekkeplassene og starte hekkingen tidligere. Likevel har viktige matressurser i en del tilfeller fått en raskere utvikling om våren enn det trekkfuglene har klart å tilpasse seg til – noe som fører til et misforhold (desynkronisering) mellom fuglene og byttedyrene som de avhenger av. Av mulige klimavinnere finner vi hakkespetter, som kan få bedre vilkår på grunn av økt mengde død ved som følge av økende bestandsvolumer og økt dødelighet blant en del trær i en periode.[63] Varmere vekstsesong har vist seg å påvirke tetthet og kyllingproduksjon hos storfugl og lirype, enten direkte eller gjennom endret tilgang på for eksempel insektlarver eller blåbær. Funn så langt tyder likevel ikke på at det er misforhold i tilgangen på insekter om våren og kyllingutvikling for skogshøns, slik en har sett for en del trekkfugler i boreale områder. Økt parasitt- og sykdomsbyrde på fuglebestander er en uttalt trussel som følger av klimaendringer, men det er mangelfull kunnskap om hva som er de største farene og hva som kan gjøres.[64]

Alle de elleve flaggermusartene som finnes i Norge er insektetende og avhengige av skog for viktige deler av sin livssyklus. Generelt forventes det at mange flaggermusarter vil bevege seg nordover som resultat av klimaendringer, og habitatspesialister ser ut til å ha større sannsynlighet for å dø ut lokalt og globalt enn generalister. For eksempel kan endringene i skogøkosystemet som er knyttet til klima være for raske til at flaggermusarter som er avhengige av gammelskog, greier å tilpasse seg. (Dette er et fellestrekk for arter tilknyttet gammelskog.) Klimaendringer forventes å påvirke utbredelsen til flaggermusarter og føre til endringer i deres fenologi, dvs. tidspunkter for fødsel, dvalevarighet og tidsmessig misforhold med fødetilgjengelighet. Klimaeffekter som påvirker flaggermus direkte, inkluderer knapphet på vann og endringer av mikroklimatiske forhold i oppholdssteder, som kan påvirke avgjørende stadier i livssyklusen, som reproduksjon og dvale.[65]

Gnagere og haredyr er viktige konsumenter av mange planter og utgjør selv en viktig matressurs for rovdyr. Mange smågnagerarter har syklisk populasjonsdynamikk og kan i toppår ha en vesentlig påvirkning på strukturen og

62 Se kap. 4.2.9 Large hervibores

63 Såkalt nemoralisering av skogen, dvs. at skogen blir mer lik den lauvtredominerte blandingsskogen man finner sør for den boreale sonen, dvs. i nemoral, hemiboreal og temperert sone.
64 Se kap. 4.2.6 Birds
65 Se kap. 4.2.7 Bats og kap. 4.5.2 Synchrony and interactions between trophic levels

sammensetningen av økosystemene de lever i. Bever er et eksempel på en art som kan regnes som en økosystemingeniør i skogområder med vassdrag. Man kunne forvente at nettopp bever blir påvirket av endringer i nedbør, men studier av klimaendringseffekter på bever tyder på at det er vinter- og vårtemperaturer som påvirker den mest. Økte temperaturer ser nemlig ut til å redusere både kroppsvekt og reproduksjon hos bever, og overlevelse ser ut til å være høyest i år med lite variasjon i nedbør. Effekten av temperatur virker sannsynligvis gjennom redusert plantekvalitet, som er en kjent klimaindusert effekt på mange beitedyr (se også om hjortevilt under). Haren kan også bli påvirket av slike plantekvalitetseffekter, men er i tillegg kjent for å kunne få kamuflasjeproblemer. Den sesongbaserte endringen i pelsfarge fra hvit til brun er i stor grad styrt av daglengde og det er vist at kortere snøsesong har medført økt predasjon på hare med påfølgende bestandsnedgang.[66]

Endringer i snøforhold som følge av klimaendringer, med kortere snøsesong og mer ustabilt snødekke, kan påvirke overlevelsen til gnagere, og redusert vinteroverlevelse har vist seg å dempe syklisiteten og svingningene i bestandene. Det er kjent at sterke populasjonssvingninger er mye mindre vanlig sør for den klimatiske nordgrensa, Limes Norrlandicus,[67] og når denne grensa flytter seg nordover som følge av klimaendringer forventes det å påvirke mange arter. Klatremus, som er den vanligste arten i boreal skog, er en art som også har vist reduserte tettheter etter varme somre. Det er tegn som tyder på at gråsidemus har mistet sin periodiske bestandssvingninger (syklisitet), men det er uvisst hvorvidt dette skyldes arealbruksendringer eller klimaendringer, og mange arter har etter en periode rundt årtusenskiftet med dempede svingninger gjenvunnet noe av syklisiteten det siste tiåret. Effektene av klimaendringer på gnagersykluser er derfor fortsatt uavklart, men siden klima opplagt spiller en stor rolle er det sannsynlig at effektene er store. Dessuten er nemoraliseringen[68] av skogen forventet å føre til en økning i antallet gnagerarter som er altetere eller frøetere, og som har en mer stabil populasjonsdynamikk.[69]

Skoglevende store beitedyr som elg, hjort og rådyr har fått et kraftig oppsving i sine bestander med økt utbredelse og antall etter at de nærmest var utryddet i Norge på starten av 1900-tallet.[70] Villsvinet ser nå også ut til å gjøre sin gjeninntreden i norske skoger. Alle disse klovdyrartene har, spesielt sammen, mulighet til å påvirke sammensetningen og strukturen til skogen gjennom sin direkte beiting på planter, men også gjennom omsetting og omfordeling av energi og næring i landskaper og økosystemer. Reinen har i Norge ofte blitt presset ut av skogområdene, og siden det er den mest kuldetilpassede av hjorteviltartene kan man også forvente at den vil oppleve mest negative konsekvenser av varmere og fuktigere klima. Elgen er den mest typiske boreale arten og har det siste århundret utvidet utbredelsesområdet sitt både nordover og sørover i Europa. I Norge og Sverige finner man dessuten at kroppsvekt både hos voksne og kalver av elg blir redusert med varmere og tidligere start av vekstsesongen. Jaktstatistikk for Norge peker mot redusert utbytte i sør og økt avskyting i nord, og stemmer overens med påvirkning som følge av klimaendringer som man har funnet for nordamerikanske elgbestander. Elgbestandenes respons på klimaendringer er sannsynligvis en blanding av direkte effekter på fysiologien til den kuldetolerante elgen, og indirekte effekter via redusert plantekvalitet om våren og økt parasittbelastning, som nå er mer lik den man ser lenger sør i Europa. Hjorten

66 Se kap. 4.2.7 Bats og kap. 4.2.8 Rodents and lagomorphs
67 Norrlandsgränsen eller Limes Norrlandicus er en overgangssone hvor sørlig hemiboreal/nemoral blandingsskog har pleid å gå over til nordlig boreal sone. Dette gjenspeiles i naturforhold for vegetasjon, artsmangfold, jordsmonn, bosetting, jordbruk m.m. Limes Norrlandicus går fra Østersjøen til søndre Värmland og gjennom Østfold.

68 Dvs. at skogen blir mer lik den lauvtredominerte blandingsskogen man finner sør for den boreale sonen, dvs. i nemoral, hemiboreal og temperert sone.
69 Se kap. 4.2.7 Bats
70 Se kap 2.3.5 Key organisms in the Norwegian boreal forests og kap. 4.2.7 Bats

Foto: Stein Joar Hegland

opplever noen av de samme effektene av tidligere og varmere vår med reduserte kroppsvekter som elg, men vil generelt sett ha en fordel av mer "nemoralt" klima i vekstsesongen samt kortere vintre. En av de største utfordringene for hjorten i forbindelse med klimaendringer er uforutsigbare snømengder, og store snømengder kan gjøre store innhogg i enkelte årskull. Snø er også en utfordring for rådyr, men ellers er rådyr, som hjort, en mulig klimavinner i norske skoger. I Nord-Amerika øker bestandene av mindre hjortedyr i områdene der elgen taper, og i Europa ser vi at alle de sørlige artene av klovdyr i norske skoger – hjort, rådyr og villsvin – får økt sin utbredelse mot nord.

Hjort og rådyr er mulige klimavinnere fordi de er tilpasset et mer sørlig klima enn de boreal-arktiske artene rein og elg. Endringer i snømengde, f.eks. gjennom kraftigere snøfall som blir liggende utover vinteren, er likevel en faktor som kan virke negativt for hjort og rådyr og påvirke overlevelse, spesielt av unge dyr, men også voksne, f.eks. hannhjort som har brukt opp fettlagrene gjennom brunsten på høsten.

Store rovpattedyr utgjør en karakteristisk gruppe med brunbjørn, ulv, gaupe, jerv og rødrev som de viktigste artene i norsk skog.[71] Rødreven er den eneste av disse artene med stor utbredelse og bestandsstørrelse. Klimaendringer forventes å være vanskelige å spore i arter på toppen av næringskjeden, fordi effektene av de enkelte påvirkningsfaktorene ofte ikke vil vise seg direkte, men gjennom summen av ulike påvirkningsfaktorer. Dessuten er mange store rovdyr først og fremst påvirket av forvaltningsregimer og det er spesielt fremtredende for de største rovdyra i Norge. Det er likevel forventet at arter som har en mer sørlig utbredelse, slik som rødrev og gaupe, vil kunne dra fordel av 0nemoraliseringen som skyldes klimaendringer – noe litteraturen indikerer allerede er i ferd med å skje.

Konsekvenser for økologisk tilstand i skogen

Klimaendringer kan ha direkte effekter på dyrelivet, men også påvirke dyr indirekte

71 Se kap. 4.2.8 Rodents and lagomorphs

gjennom effekter på plantelivet og dermed tilgang på mat og habitat. Selv om vi kan si at klimaeffekter på dyrelivet helt klart vil påvirke økologisk tilstand gjennom flere av de sju egenskapene, som brukes i fagsystem for økologisk tilstand, er det vanskelig å peke på generelle mønstre. Vi vil se endringer i trofisk struktur og funksjonell sammensetning (Egenskap 2, 3).[72] Generelt kan vi forvente oppblomstring i mange grupper av planteetende og nedbrytende insekter og andre virvelløse dyr, noe som kan gi bedre mattilgang for fugler og andre insektetere. Det er imidlertid uklart om økt mattilgang vil gi positive utslag for disse artene, eller om andre klimaeffekter – eller andre påvirkninger — vil kansellere ut denne effekten. Netto resultat for trofisk struktur, funksjonell sammensetning og biologisk mangfold (Egenskap 2, 3, 6)[73] er derfor usikkert. Samtidig vil vi se en generell endring av dyresamfunn mot arter som er tilpasset nemoral/hemiboreal sone. Det vil gi endringer i landskapsøkologiske mønstre (Egenskap 5) og biologisk mangfold, nærmere bestemt økning i generalister og varmekjære arter. Det vil også føre til tap av spesialister og spesielt arter og funksjoner som er knyttet til alpine systemer eller andre naturtyper, som vil bli sjeldnere under fremtidens klima (Egenskap 6).[74]

Nedbrytere og næringssirkulasjon

Farten på næringssirkulasjonen i skogen henger nært sammen med primærproduksjonen, som igjen avhenger av klimaet. I boreale områder er næringssirkulasjonen treg på grunn av kort vekstsesong, lave jordtemperaturer og langsom aktivitet hos nedbryterne. Dette gir lav nedbrytningshastighet og næringstilgang, og samtidig høy akkumulering av karbon i jorda. Når temperaturen øker forventes raskere primærproduksjon og nedbrytning og dermed raskere sirkulering av karbon og næringsstoffer (figur 8). Samtidig kan imidlertid milde vintre med stadig smelting og frysing motvirke denne trenden noen steder i den boreale sona. En forventer også at økt hyppighet av større forstyrrelser som flom, styrtregn, storm, brann og store insektangrep kan føre til lekkasje av næringsstoffer.

Samlet sett tyder forskning fra boreale områder på at økte temperaturer vil gi redusert innhold av fosfor og økt innhold av nitrogen i strø. Dette kan gi følgeeffekter på nedbryterne, som påvirkes sterkt av strøets næringssammensetning. Når det gjelder effekter av tørke, finnes det få studier fra boreale skoger. Resultater fra tempererte skoger tyder på at stadig veksling mellom tørke og væte kan gi økt nedbrytning på grunn av stadige endringer i jordstrukturen. Samtidig kan slike endringer redusere mengden nedbrytere, som igjen kan ha en reduserende effekt på nedbrytningen. Den samlede effekten på næringssirkulasjonen forventes følgelig å variere fra sted til sted.

I boreal skog er en stor andel av insekt- og soppartene knyttet til død ved. Disse vedlevende eller saproxyliske artene trenger død ved i en eller flere stadier under livssyklusen, som mat, husly, eller substrat for vekst og reproduksjon (2.3.5, 4.2.9). Tilstedeværelsen og bestandsstørrelsen til saproxyliske arter påvirkes av mengden og den romlige og tidsmessige fordelingen av død ved. Økt tilvekst av trær forventes å gi større volumer av død ved, men høyere temperaturer øker også nedbrytningshastigheten og reduserer dermed habitatets egnethet for mange saproxyliske arter. Varmere somre med hyppigere tørkeperioder, kombinert med hyppigere vindbyger, kan øke frekvensen av naturlige forstyrrelser som skaper død ved, som branner, insekt- og sykdomsutbrudd og vindfelling fra stormer. Forsterkede svingninger i vinternedbør og temperatur om vinteren forventes også å øke bruddskader på trær som følge av snø og is,

72 Se kap. 5.1.5 Characteristic 5: Landscape ecological patterns og kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels
73 Se kap. 5.1.2 Characteristic 2: Distribution of biomass between different trophic levels, kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels og kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange
74 Se kap. 5.1.5 Characteristic 5: Landscape ecological patterns og kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange

Rødrandkjuke (Fomitopsis pinicola). Foto: Jenni Nordén

noe som kan øke mengden død ved ytterligere. Over tid kan også variasjonen av død ved øke dersom andelen av lauvtrær øker i det som i dag er barskog (nemoralisering). Dette kan øke antallet økologiske nisjer og mangfoldet av arter, og påvirke artsinteraksjoner.

Arter som er spesielt tilpasset lave temperaturer, lave nivåer av næringsstoffer eller saktevoksende trær, kan tape i konkurranse med arter som klarer å vokse og utnytte ressurser raskt i et endret klima. For eksempel er rødrandkjuke (Fomitopsis pinicola) en effektiv og viktig nedbryter - særlig av bartrær- som også kan fungere som patogen og drepe svekkete trær. Rester av brunråte, som rødrandkjuke forårsaker, er en viktig og stabil komponent av boreal skogsjord. Rødrandkjuke er vanlig i boreal skog og kan bli enda mer vanlig når klimaendringer direkte (f.eks. storm) eller indirekte (f.eks. barkbilleangrep) skaper mye døende eller død ved i løpet av kort tid. Imidlertid er den langsiktige utviklingen i død ved under klimaendringer usikker. Rødrandkjuke deler nisje med flere rødlistearter som i et endret klima kan tape resurser i konkurranse enn rødrandkjuke.

Saproxylinsekter vil bli påvirket av endringer som skyldes klima i trekvalitet og -kvantitet ettersom forekomsten og samfunnsstrukturen deres er sterkt knyttet til abiotiske forhold. Det forventes en endring mot flere lauvtrær og større mengder død ved, spesielt i sørlige deler av landet. En studie av eiketilknyttede biller i Sør-Norge fant en positiv sammenheng mellom temperatur og artsrikdommen til eikespesialistbiller med nordlig utbredelse. I denne studien var generalister relativt upåvirket av klimaendringer; økte sommertemperaturer kan derfor se ut til å favorisere et fåtall spesialister. Imidlertid forventes et større antall spesialister å bli negativt påvirket av endringer i nedbør og av endringer som medfører at naturtypen de lever i skifter karakter.

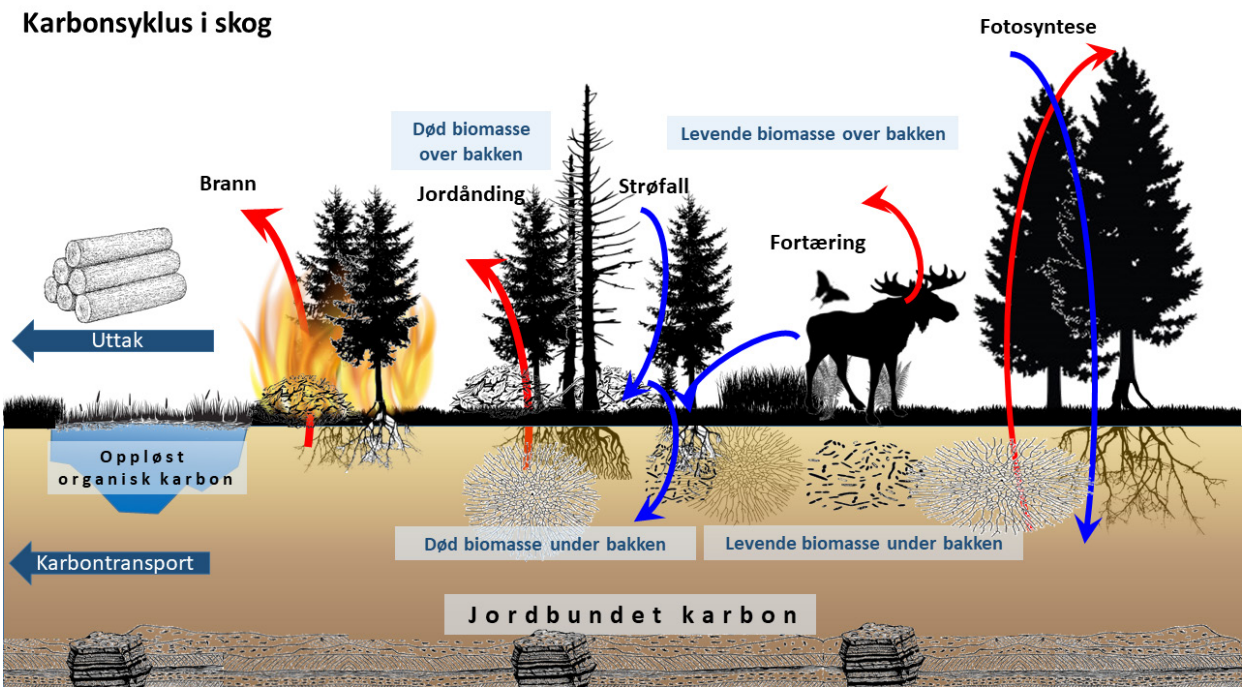
Sopp er de viktigste nedbryterne av dødt organisk materiale, som døde blader og andre deler av planter samt død ved. Sopp har derfor en avgjørende rolle i frigjøringen av karbon tilbake til atmosfæren. Saproxyliske sopparter har utviklet en rekke kjemikalier for nedbryting av komponenter av plantecellevegg som cellulose, hemicellulose og lignin. Disse

komplekse molekylene utgjør mesteparten av biomassen i skogøkosystemer, og soppenes nedbrytinghastighet er derfor av avgjørende betydning for karbondynamikken i skogsystemer, så vel som for den globale karbonsyklusen. Hvordan temperatur, nedbør og andre klimavariabler påvirker fordeling og funksjon av boreale nedbrytersopper, er lite studert. Enda mindre kjent er hvordan nedbrytning av døde soppmycel – i seg selv et stort lager av organisk karbon – påvirkes av endrende klima og endrende nedbrytersamfunn av sopp og bakterier.

Sjeldne, spesialiserte sopparter kjennetegnes gjerne av smale nisjer og begrenset spredningsevne. Tilstrekkelig areal og kobling mellom egnede habitater vil være nødvendig hvis spesialiserte sopparter skal kunne klare å forflytte seg og «spore» endrede miljøforhold som følge av klimaendringer.

Karbongjødsling

Økende CO^2-konsentrasjon i atmosfæren kan påvirke planter direkte ved å tillate økt fotosyntese, en effekt kalt karbongjødsling. Nettoeffekten av karbongjødsling er vanskelig å fastslå og varierer med både CO^2-konsentrasjon, planteart, alder og tilstand hos planten, samt andre miljøvariabler som næringstilgang og vanntilgang. For boreale systemer ser det ut til at karbongjødsling kan gi raskere vekst hos unge trær der de har tilstrekkelig vann, lys og næringsstoffer (nitrogen og fosfor er ofte begrensende), i alle fall opp til et visst punkt og i fravær av fotosyntetisk akklimatisering til høyere karbondioksidnivå. Karbongjødsling ser derimot ikke ut til å påvirke veksten hos eldre trær, i alle fall ikke i positiv retning. Videre er rask vekst hos trær også forbundet med høyere dødelighet hos voksne trær, særlig dersom rask vekst kombineres med vannmangel. Modelleringsstudier basert på bøk og sølvgran



Figur 8: Hovedtrekk i skogens karbonsyklus. Mesteparten av karbonet er bundet under bakken, og likevekten mellom atmosfærisk karbon og de andre reservoarene påvirkes blant annet av temperatur og arealbruk.

antyder et vippepunkt mellom år 2035–2060 der tidlige gevinster i netto primærproduktivitet som følge av karbongjødsling blir til tap på grunn av en kombinasjon av de nevnte faktorene. Det virker derfor sannsynlig at karbongjødsling primært vil føre til økt produktivitet hos unge planter i den grad begrensende næringsstoffer og tilgjengelig vann tillater, samt til økt sirkulasjonshastighet i næringssyklusen og høyere dødelighet i modne trær. Det er derfor ikke støtte i faglitteraturen for å anta at karbongjødsling vil føre til økt karbonlagring i boreal skog.[75]

Oppsummering av effekter på økologisk tilstand

Klimaendringene, både direkte effekter og indirekte effekter gjennom endringene på plante- og dyrelivet, vil påvirke økologisk tilstand i skogen gjennom å endre nedbrytersamfunnene og deres funksjoner. Generelt vil vi forvente økt aktivitet i nedbrytersamfunnene (Egenskap 2, 3) og raskere næringssykluser gjennom økosystemene (Egenskap 7).[76] Dette kan føre til reduserte karbonlagre i jord og økt biomasse over bakken (Egenskap 1, 7).[77] Vi vil generelt sett forvente økning i generalister og reduksjon i spesialister på denne tidsskalaen, med tap av biologisk mangfold som resultat (Egenskap 3, 6).[78]

Endringer i økologiske interaksjoner

Hvordan klimaendringer påvirker skogøkosystemet er ikke bare en konsekvens av påvirkningen på enkeltarter eller grupper av arter, men minst like mye en konsekvens av det som skjer mellom artene i det vi kaller økologiske samfunn. I de økologiske samfunnene kan responsen til en art eller artsgruppe få konsekvenser for andre arter gjennom samspillet artene har seg imellom. Noen eksempler er allerede gitt i gjennomgangen av de ulike plante-, dyre- og soppgruppene (se over). Et interessant eksempel på slike samspillseffekter er når klimaendringer fører til store utbrudd av insekter, for eksempel målerlarver som spiser opp bladverket på bjørkeskogen i Nord-Norge. Slike utbrudd har vist seg å resultere i nedgang i kvist- og lauvbeitere som rein og rype, og til økning i grasbeitende gnagere. Dette skjer sannsynligvis fordi mattilgangen endres. Endringer i antall sommerfugllarver tidlig på sesongen er også en utfordring for alle arter av fugl og parasitter som lever av disse. Det vil igjen kunne føre til en økning i antallet av disse insektene så lenge predasjonstrykket går ned. Dette er et eksempel på manglendesynkronisering mellom organismegrupper (eng. phenological mismatch).

Det er forventet at effekter av klimaendringer på dominerende planter kan få store konsekvenser for planteetende dyr. Et eksempel på dette er økningen i store mosearter, f.eks. etasjemose, som ser ut til å påvirke konkurranseforholdene på skogbunnen og gi mindre av de små moseartene. Slike endringer i plantesamfunnene kan igjen påvirke de gnagerartene som utnytter slike småvokste mosearter. Det er også kjent at mange dyr er avhengige av bær fra lyngplanter eller frø fra bartrær, og klimaendringer vil derfor kunne få konsekvenser for alt fra bjørn til trost, hønsefugl, smågnagere og insekter. Ved økende tørkestress og redusert snødekke kan blant annet tyttebær og krekling få en fordel framfor blåbær. Færre blåbærblomster om våren kan bety redusert mattilgang for humledronninger, mens flere tyttebærblomster kan være en fordel for mer varmekjære solitære bier. Kunnskapen rundt slike samspillseffekter er ofte mangelfull fordi de er vanskelige å studere, da det krever lange tidsserier for mange arter på både fin og grov økologisk skala. Et eksempel som man fortsatt vet lite om er "mismatch"-hypotesen mellom blomsterplanter og pollinatorer om at endringer i fenologi (se Boks 7) eller utbredelse til de gjensidig

75 Se kap. 4.4.6 Ecological stoichiometry: nutrient cycling and CO^2 fertilization
76 Se kap. 5.1.2 Characteristic 2: Distribution of biomass between different trophic levels, kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels og kap. 5.1.7 Characteristic 7: Abiotic factors
77 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity og kap. 5.1.7 Characteristic 7: Abiotic factors
78 Se kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels og kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange

Boks 7: Fenologi, eller synkronisering av livshistoriestrategier

De fleste arter tilpasser livsløpshendelser som parringstid, frøsetting, spiring, dvale, egglegging, migrasjon osv. til årstidene. Tegn som daglengde, temperatur og kombinasjoner av disse virker som signaler på at det er på tide å sette i gang neste stadium, om det så er å fly sørover for vinteren eller begynne å spire om våren. Forskjellige arter reagerer gjerne ulikt når for eksempel temperatur endrer seg i forhold til daglengde. Det betyr at synkroniseringen mellom de forskjellige livsløpshendelsene endrer seg (på engelsk kalt fenologisk mismatch).

For eksempel kan varmeperioder tidlig om våren "lokke" en del pattedyr, planter og insekter til å avslutte dvalen for tidlig, mens det ennå er stor sannsynlighet for nattefrost senere på våren, og dermed risikerer de å fryse i hjel eller gå tomme for energi før sesongen er i gang. I andre tilfeller kan sesongen for pollinerende insekter og blomstring hos plantene som trenger dem skje til forskjellig tid. Migrasjon og modning av frukt og frø hos matplanter kan også komme i utakt (bli desynkronisert), eller synkronisere bedre. Når det gjelder skadeinsekter kan skiftende synkronisering både avbryte utbrudd og gjøre dem større eller mer sannsynlige, avhengig av hvilke arter som er involvert, hvor og når.

I sum er derfor fenologiske endringer en kompliserende faktor som gjør det vanskelig å generalisere når man skal spå hvilke effekter selv tilsynelatende moderate endringer i temperatur har i et komplisert økosystem.

avhengige pollinerende insektene og viktige blomsterarter, kan få negative konsekvenser for disse gjensidig avhengige artene. For eksempel er masseblomstrende blåbær spesielt viktig for humledronninger om våren. Klimaendringer kan føre til både tidligere og mindre blomstring gjennom både temperatureffekter og redusert snødekke. Det gjenstår å finne ut om dette videre vil kunne påvirke bestandene av Norges humlearter, som ofte avhenger av den boreale skogen for mat og bolig.

Oppsummering av effekter på økologisk tilstand

Eksemplene over viser at interaksjoner mellom organismer vil ha konsekvenser for hvordan klimaendringene påvirker økologisk tilstand i skogen, men det er vanskelig å peke på generelle mønstre.[79] Den samlede effekten av klimaendringene kan kompliseres og forsterkes av at arter og organismegrupper responderer på forskjellige klimafaktorer. Det kan gi asynkroni i klimaresponser mellom arter og trofiske nivåer i form av trofiske kaskader, selv om bare ett nivå i næringsnettet skulle påvirkes av klimaendringene.[80] Generelt kan man forvente at klimaendringer vil ha negative effekter på økologiske interaksjoner, siden tilpassede samfunn og næringsnett brytes opp, noe som kan føre til redusert funksjon, redusert mangfold og redusert stabilitet eller motstandskraft. Tiltagende klimaendringer utover det som et flertall av artene og interaksjonene i skogen er tilpasset, vil medføre økende sannsynlighet for uventede tap av biologisk mangfold, funksjoner og økosystemtjenester i skogene våre i fremtiden. Samlet sett forventer vi derfor at de negative effektene vil bli mer fremtredende og de positive vil avta etter hvert som klimaendringene øker.

79 Se kap. 5.1 The ecological condition of Norwegian boreal forests in a changing climate
80 Se kap. 4.5 Time lags, asynchrony, cascades, and feedback

Del 3 - konsekvenser for tilstandsegenskaper, miljømål og sårbarhet

Denne delen oppsummerer kunnskapsgrunnlaget om effekter av klimaendringer på norsk skog, som beskrevet i Del 2, inn mot problemstillingene spesifisert i oppdraget, beskrevet i Del 1. Del 3 oppsummerer derfor konsekvenser for økologisk tilstand i skog på overordnet nivå, samt en vurdering av konsekvenser for hver av de sju egenskapene definert av fagsystemet beskrevet av Nybø m.fl. (se Del 1). Videre oppsummeres konsekvensene for nasjonale miljømål, rødlista arter og naturtyper, og implikasjoner for resiliens, motstandskraft og sårbarhet som kan ha relevans for skogforvaltning og klimaskadebegrensning.

Klimaendringer og økologisk tilstand i skog

Som illustrert i teksten ovenfor vil klimaendringene og klimarelaterte faktorer påvirke de ulike organismegruppene i skogene våre og samspillet mellom dem. Klimaendringene er i seg selv komplekse, og innebærer både endringer i gjennomsnittsverdier av for eksempel temperatur og nedbør, endringer i variabilitet mellom år, og endringer i hyppigheten og alvorlighetsgraden av ekstremer og klimarelaterte forstyrrelser. For å gi en helhetlig oversikt over hvordan klimaendringene vil påvirke den økologiske tilstanden i norsk skog på kort og på lang sikt, sammenstilte og klassifiserte vi informasjon fra den vitenskapelige litteraturen.[81] Vi klassifiserte funn fra forskningslitteraturen ut fra (i) den biologiske responsen som var målt (eksempel: vekst, overlevelse, reproduksjon, endret geografisk utbredelse, karbonbindingsrate), (ii) hvilken art eller funksjonell gruppe som var studert (eksempel: gran, elg, gnagere, vegetasjon, insektsamfunn, hele økosystemet), (iii) om arten var fremmed eller stedegen, (iv) relevans for de sju egenskapene for økologisk tilstand, og (v) hvilken klimaendring eller klimarelaterte forstyrrelser som var studert (eksempel: oppvarming, økt nedbør, brann, tørke, ekstremnedbør, skadegjørerutbrudd). For hvert enkelt funn i forskningslitteraturen registrerte vi også om det ble rapportert positive (økende overlevelse, utbredelse, reproduksjon, rekruttering, produksjon eller andre vitale rater), negative (økende dødelighet, redusert reproduksjon osv.) eller nøytrale (ingen klare utslag i noen retning) virkninger av klimaendringen(e) på de(n) biologiske responsen(e) som ble målt.

For å vurdere hvordan alle disse virkningene samlet påvirker den økologisk tilstanden i skogen etter fagsystemet for økologisk tilstand trenger vi kunnskap om referanseverdier og grenseverdier for hver enkelt av de biologiske responsene kildene våre rapporterer på. Denne kunnskapen er bare tilgjengelig for et lite antall indikatorer (se Framstad m.fl. 2021). Vår oppsummering er derfor en sammenstilling av virkninger av de ulike klimaendringene og klimarelaterte forstyrrelsene på de ulike biologiske responsene i seg selv, tematisk organisert med hensyn på egenskaper ved god økologisk tilstand. Disse oppsummeringene peker på likheter og forskjeller i responser på klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser, noe som gir grunnlag for å trekke mer generelle slutninger med hensyn på virkningene av ulike drivere og responser hos ulike artsgrupper, funksjoner, og egenskaper i skogøkosystemet.

Når vi sammenligner alle virkningene av klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser

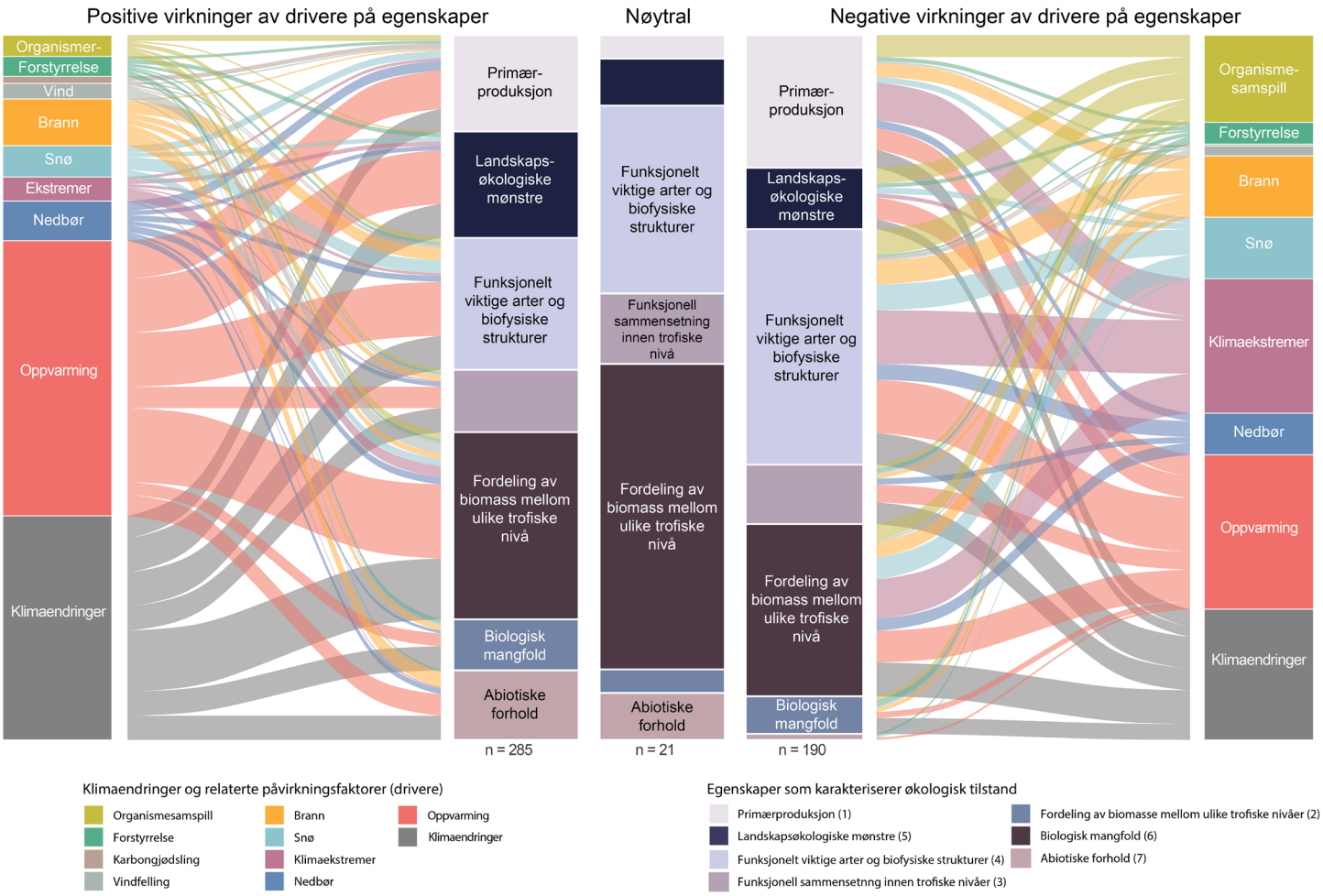
81 Se kap. 5.1 The ecological condition of Norwegian boreal forests in a changing climate

av relevans for økologisk tilstand i boreal skog, finner vi slående forskjeller i de viktigste driverne bak positive og negative responser i (figur 9).[82] I Norge har temperatur og vekstsesong pleid å være begrensende faktorer, så litteraturen rapporterer ofte om positive virkninger av varmere klima og andre gradvise endringer av middelverdier for mange arter og økosystemfunksjoner opp til et visst punkt. Vi ser for eksempel at høyere temperaturer i vekstsesongen kan føre til økt vekst og populasjonsstørrelse hos mange planter (Egenskap 1, 4) og hos dyrene og mikroorganismene som lever av dem (Egenskap 2, 3), og til økt av utbredelse av sørlige arter oppover i terrenget og nordover i landet (Egenskap 5).[83] Vi fant relativt få studier som rapporterte positive effekter av klimarelaterte forstyrrelser, som for eksempel raskere næringskretsløp som respons på økt frekvens og intensitet av skogbranner (Egenskap 7).[84] De negative virkningene av klimaendringer er hovedsakelig forårsaket av økende forekomstav ekstreme hendelser som overskrider biologiske terskelverdier for hva organismene trives med eller tolererer. Det inkluderer tørke, ekstreme temperaturer, fryse-tine-sykluser og frost, og klimarelaterte forstyrrelser som brann, snø og vind (figur 9).[85] Disse ekstremene og forstyrrelsene fører til redusert primærproduksjon (Egenskap 1) via redusert plantevekst og økt dødelighet i skogen, tap av mange funksjonelt viktige arter (Egenskap 4) og endringer i biomassefordeling mellom trofiske nivåer (Egenskap 4). Økt brannrisiko og brannintensitet har også overveiende negative effekter, spesielt på primærproduksjon og funksjonelt viktige arter (Egenskap 1, 4). Flertallet av de negative effektene handler om økt dødelighet, redusert populasjonsstørrelse og redusert geografisk utbredelse, særlig hos arter med nordlig utbredelse. Vi fant også negative effekter av at samspill og tilbakekoblinger mellom arter ble brutt opp.

Disse resultatene antyder at gradvise klimaendringer, som oppvarming eller økt nedbør, vil ha betydelige og viktige konsekvenser for skogene våre, inkludert strukturelle, funksjonelle og biologiske endringer. Mindre endringer i temperatur- og nedbørsgjennomsnitt vil sannsynligvis ikke innebære trusler mot skogøkosystemet, men kan tvert imot gi en netto økning i tilvekst og økt biologisk mangfold for enkelte organismegrupper på kort sikt (positive effekter, figur 9, jfr.).[86] De positive effektene vil imidlertid motvirkes av den økte hyppigheten og alvorlighetsgraden av ekstremvær og et bredt spekter av klimarelaterte forstyrrelser (negative effekter, figur 9).[87] Ekstremvær og forstyrrelser vil overveiende ha negative effekter på skogens tilvekst og artsmangfold, og vil i tillegg føre til tap av økosystemfunksjoner og motstandskraft (resiliens). Det generelle bildet kompliseres av at det kan være til dels betydelige forsinkelser i artenes responser på klimaendringer, og av komplekse koblinger mellom artene, for eksempel mellom planter og planteetere, eller mellom sykdomsfremkallende organismer og deres verter.[88]

Skadegjørere og sykdomsfremkallende organismer som påvirker skogens økologiske tilstand negativt, vil sannsynligvis få økende betydning i fremtiden,[89] i likhet med endringer i planteetere og andre trofiske interaksjoner. Ekstremvær og -forstyrrelser er vanskelige å forutsi i detalj, men kan sees som "terskeleffekter" som opptrer oftere jo mer gjennomsnittsverdiene for temperatur og nedbør endrer seg.[90] Ettersom effektene på økosystemnivå kompliseres og forsterkes av forsinkede klimaresponser, asynkroni mellom arter og trofiske nivåer, og trofiske kaskader,[91] vil tiltagende klimaendringer totalt sett medføre økende sannsynlighet for uventet tap av biologiske mangfold, funksjoner og økosystemtjenester i skogene våre. Samlet sett forventer vi at de negative effektene vil bli sterkere og de positive vil bli svakere etter hvert som klimaendringene øker.

82 Se kap. 5.6 Biodiversity goals
83 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity og kap. 5.1.5. Characteristic 5: Landscape ecological patterns
84 Se kap. 5.1.7 Characteristic 7: Abiotic factors
85 Se kap. 5.6 Biodiversity goals
86 Se kap. 5.6 Biodiversity goals og kap. 5.1 The ecological condition of Norwegian boreal forests in a changing climat
87 Se kap. 4.1 Climate change in Norway
88 Se kap. 4.5 Time lags, asynchrony, cascades, and feedbacks
89 Se kap. 5.2 The role of pests, pathogens, and diseases
90 Se kap. 4.1 Climate change in Norways
91 Se kap. 4.5 Time lags, asynchrony, cascades, and feedbacks



Figur 9: En kunnskapsoppsummering av funn av positive (venstre), negative (høyre) og nøytrale (midt) virkninger av klimarelaterte forstyrrelser på biologiske responser av relevans for økologisk tilstand i norsk boreal skog. Økologisk tilstand er representert ved de sju økosystemegenskapene som beskrevet i fagsystemet (se Boks 2). Klimaendringer er aggregert i ni hovedklasser som gjenspeiler gradvise klimaendringer (endret nedbør, oppvarming, og i tillegg studier som henviser til 'klimaendring' generelt, da disse som oftest er studier av gradvise klimaendringer), klimarelaterte ekstremer (snø, brann, vind, andre forstyrrelser) samt økt forekomst av skadegjørere og endringer i samspill mellom organismer. Høyden til hver boks innenfor de respektive søylene representerer den relative mengden data i den vitenskapelige litteraturen knyttet til positive eller negative effekter av hver enkelt driver, og hver enkelt egenskap. Tallene under hvert søylediagram for egenskaper reflekterer antall funn av positive, nøytrale, og negative årsakssammenhenger i litteraturen. Fremmede arter er ikke inkludert i figuren. Se[92] og begynnelsen av kapitlet for detaljer.

92 Se kap. 5.1 The ecological condition of Norwegian boreal forests in a changing climate og kap. 5.6 Biodiversity goals

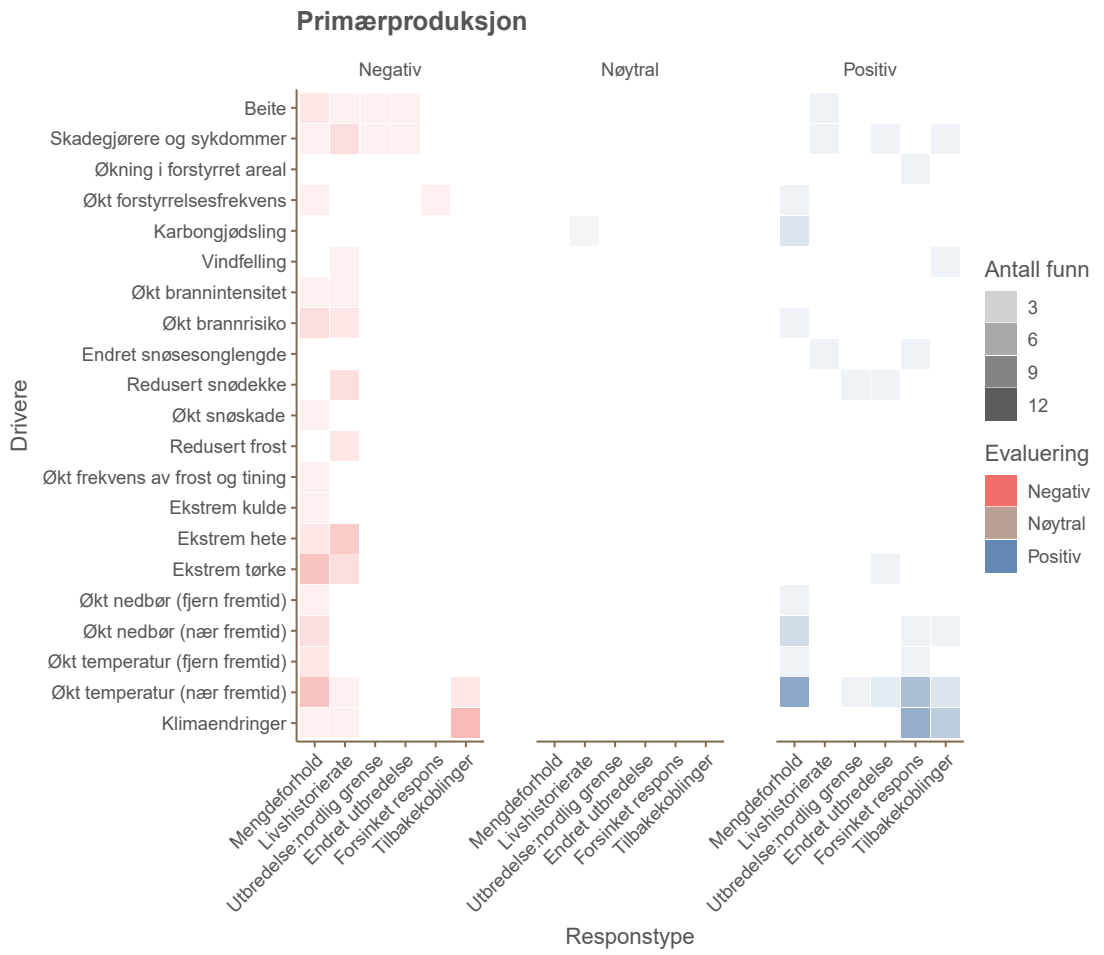
Oppsummering av effekter på de sju egenskapene for økologisk tilstand

Her oppsummerer vi effektene av klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser på hver av de sju egenskapene i fagsystemet for økologisk tilstand. For hver av figurene nedenfor oppsummeres antall positive, nøytrale, og negative årsakssammenhenger ('funn') som er dokumentert i den vitenskapelige litteraturen som ligger til grunn for denne rapporten. I figurene rapporterer vi på hvordan ulike klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser påvirker ulike biologiske responstyper av relevans for den enkelte egenskapen. Drivere er kodet slik at økt påvirkning generelt gir høyere verdier (mer nedbør, høyere temperatur, flere eller mer intense forstyrrelser), og responser er kodet slik at positive verdier generelt gir økt vekst, populasjon eller funksjon (økt vekst, flere individer, høyere biologiske rater). Positive årsakssammenhenger betyr derfor at økning i den klimatiske driveren gir økt verdi av den biologiske responsen, mens negative betyr at økning i den klimatiske driveren gir redusert verdi av den biologiske responsen, og nøytrale årsakssammenhenger betyr at ingen sammenheng er påvist. Merk at økning i en biologisk respons ikke nødvendigvis er det samme som bedre økologisk tilstand; både økt og redusert primærproduksjon kan for eksempel gi redusert økologisk tilstand, avhengig av skogstype og lokale forhold i utgangspunktet. For å kunne vurdere konsekvenser for økologisk tilstand trenger vi referanse- og grenseverdier samt data fra norsk skog – dette er ikke tilgjengelig for de aller fleste relevante biologiske responsene vi fant i litteraturen. Resultatene av denne sammenstillingen av data vil dermed kunne si noe om hvordan ulike egenskaper ved økologisk påvirkes av ulike typer klimaendringer, men ikke alene kunne brukes til å tallfeste økologisk tilstand i norsk skog nå, eller i fremtiden.

Egenskap 1 - primærproduksjon [93]

Klimaendringene vil påvirke skogens primærproduksjon på komplekse måter (Figur 10). Fram mot 2050 vil høyere gjennomsnittstemperatur og økt lengde på vekstsesongen sannsynligvis øke veksten hos trær og undervegetasjon. Imidlertid vil disse positive effektene til en viss grad motvirkes av økt sannsynlighet for ekstremvær (tørke, ekstrem varme og varme perioder om vinteren), forstyrrelser (brann og ev vind), og utbrudd av skadedyr og sykdommer. Effektene av CO^2-gjødsling er komplekse, og eventuelle positive effekter vil hovedsaklig gjelde for unge planter. På lengre sikt (frem til 2100) forventes klimaoppvarmingen å nå nivåer hvor veksten og utbredelsen til de dominerende boreale trærne (furu, gran og bjørk) vil reduseres over det meste av dagens boreale sone i Norge. De negative effektene av ekstremvær, forstyrrelser, skadedyr, sykdommer og planteetere vil tilta. Det vil føre til betydelig reduksjon i vekst og overlevelse i tresjikt og undervegetasjon og ha negativ innvirkning på produktivitet og på treslagenes evne til å spre seg til mer klimatisk gunstige strøk. Netto effekt på primærproduksjonen vil sannsynligvis variere over tid og mellom arter og områder. Granskog vil sannsynligvis oppleve de største negative konsekvensene av brann, selv om furuskog har høyere brannrisiko, mens varmekjær lauvskog vil være mindre utsatt.[94] Det finnes ingen klare spådommer for endring i vindfelling, noe som skyldes usikre framskrivinger for hvordan klimaendringene vil påvirke hyppighet og vindstyrke i stormer.

93 Se kap. 5.1.1 Characteristic 1: Primary productivity
94 Se kap. 4.1.7.1 Climate change impact on fire occurrence in Norway



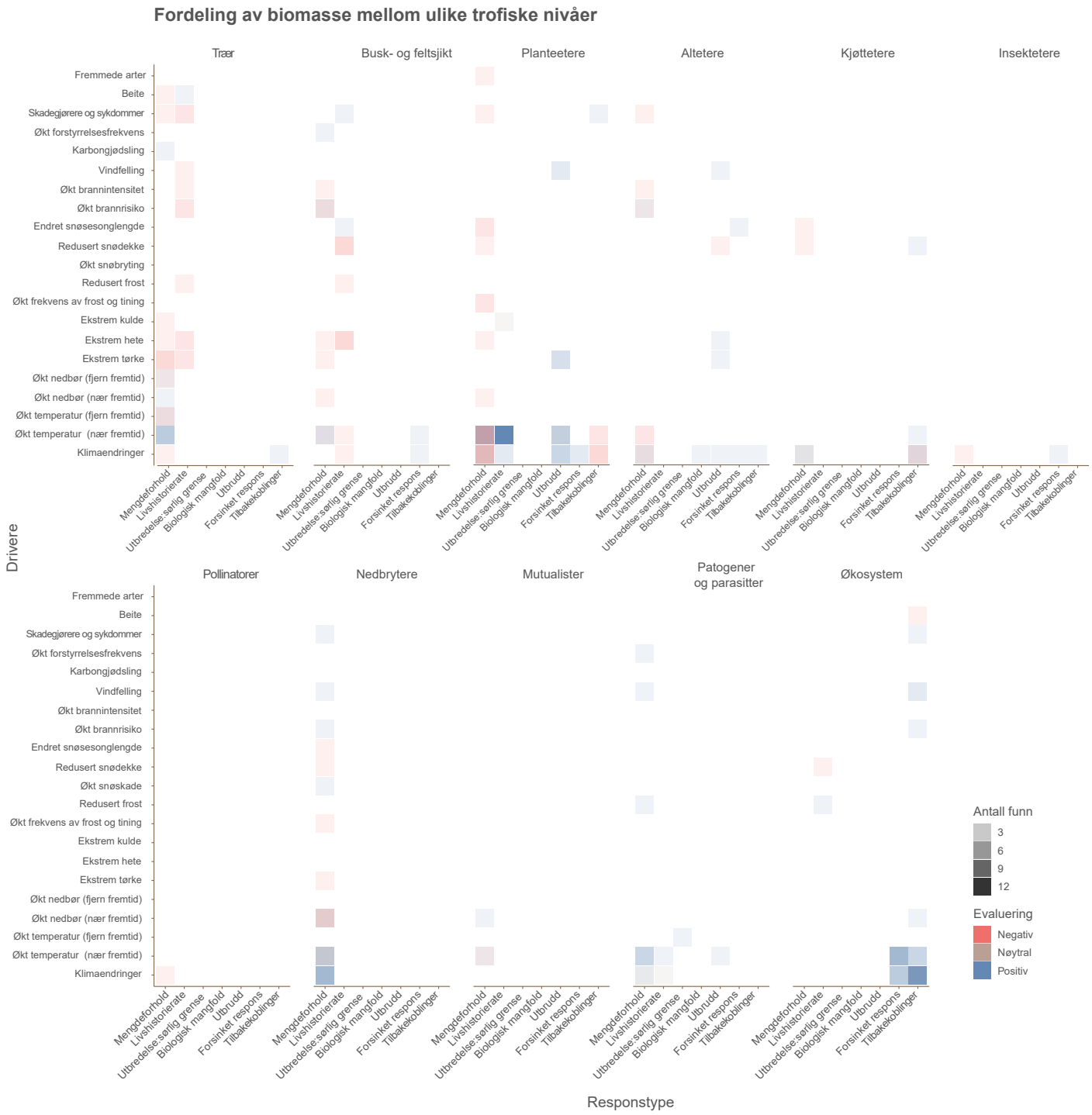
Figur 10: Oppsummering av hvordan ulike klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser (drivere) vil påvirke primærproduksjonen i norsk boreal skog. Funnene refererer til alle primærprodusenter i skogen, inkludert tresjikt, busksjikt, feltsjikt, og bunnsjikt. Negative, nøytrale eller positive effekter er oppsummert for ulike typer av responser. Effektene av enkelte klimadrivere vurderes både på kort sikt (frem til 2050, nær fremtid) og lang sikt (2100, fjern fremtid). Figuren inkluderer ikke studier av fremmede arter. Responstypene 'forsinket respons' og 'tilbakekoblinger' er ulike komplekse responser og interaksjoner som kan involvere flere trofiske nivåer.

Egenskap 2 - Fordelingen av biomasse mellom trofiske nivåer[95]

Klimaendringene endrer den trofiske strukturen i de boreale skogene. På lengre sikt vil vi kunne se en trofisk omstrukturering av den boreale skogens økosystemer, med en nedgang i arter med spesialiserte tilpasninger og livssykluser, inkludert planteetere, pollinatorer, nedbrytere, smågnagere, fugler, flaggermus og rovdyr.

Nedgangen i spesialister vil ledsages av en økning i mange generalister, inkludert en del virvelløse planteetere, skadegjørere og sykdommer (Figur 11). Trofisk omstrukturering kan forsterkes og påskyndes av ekstremvær (tørke, ekstrem varme, varmeperioder på vinteren), forstyrrelser (brann, vind), skadedyr og sykdommer: Tilbakekoblinger og trofiske kaskader øker variasjonen og usikkerheten.

95 Se kap. 5.1.2 Characteristic 2: Distribution of biomass between different trophic levels



Figur 11: Oppsummering av hvordan ulike klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser (drivere) vil påvirke ulike trofiske nivåer i norsk boreal skog. Negative, nøytrale eller positive virkninger av den enkelte driveren på ulike funksjonelle grupper av arter innen hvert trofisk nivå er oppsummert for ulike typer av responser. Virkningene av enkelte klimadrivere vurderes både på kort sikt (frem til 2050, nær fremtid) og langsiktig (2100, fjern fremtid). Responstypen 'forsinket respons' og 'tilbakekoblinger' er ulike komplekse interaksjoner som kan involvere flere trofiske nivåer. Figuren inkluderer ikke informasjon fra studier av fremmede arter.

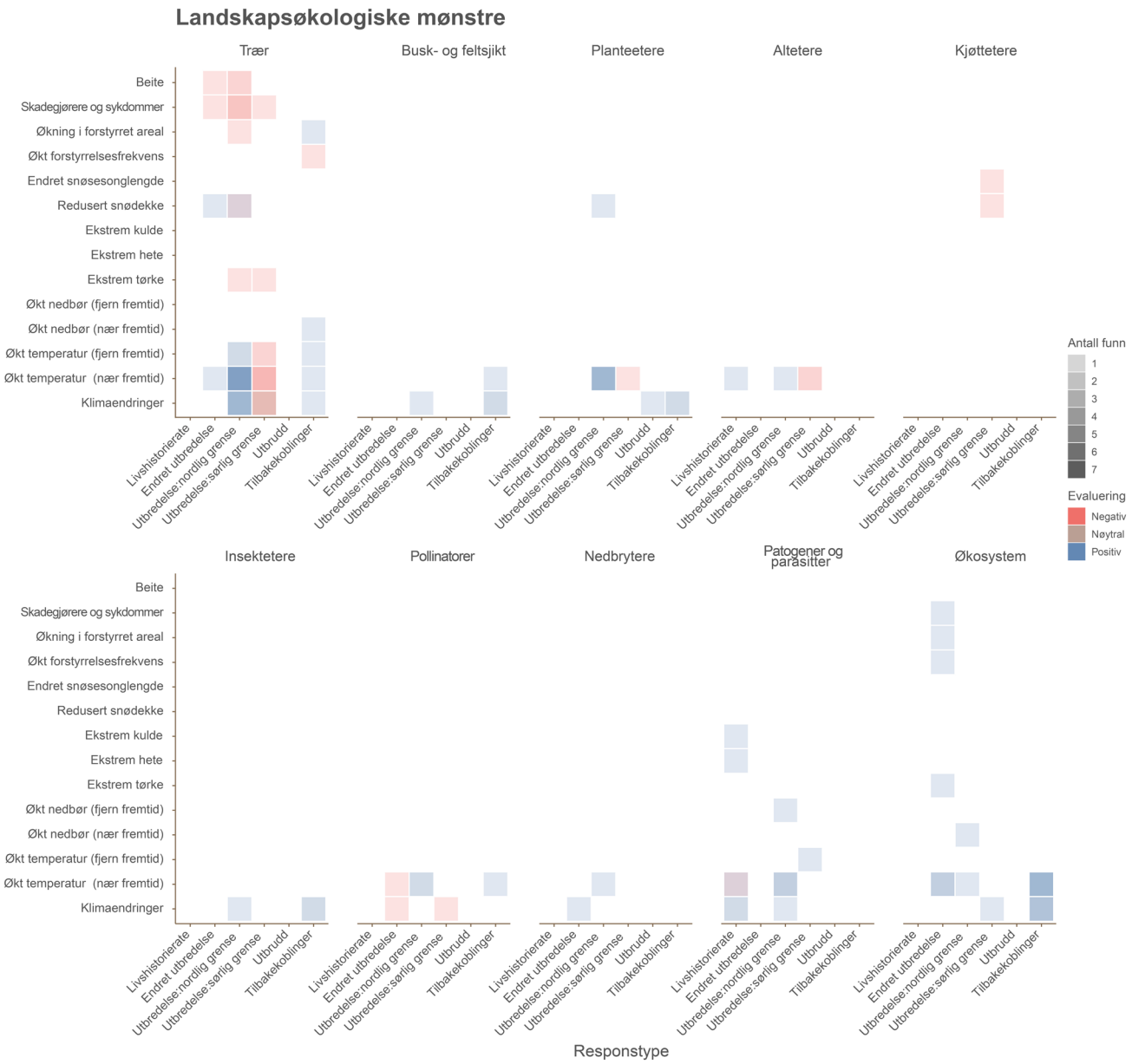
Egenskap 3 - Funksjonell sammensetning innen trofiske nivåer[96]
For mange organismegrupper forventer vi at boreale arter vil erstattes av arter som er tilpasset et varmere klima. Det vil generelt føre til raskere karbonopptak og karbonsyklus i skogøkosystemene. Betydelige og asynkrone forsinkelser i artenes respons på klimaendringene kan skape misforhold, for eksempel mellom planter og pollinatorer eller fugler og insekter. Misforholdet kan forårsake kaskader, redusert motstandskraft og økt sårbarhet i skogøkosystemet etter hvert som klimaendringene tiltar (se responstypene økosystem, forsinket respons, og tilbakekoblinger i Figur 10-11). Den forventede økningen i nedbør vil være betydelig mindre enn vanntapet fra økt fordampning, som til slutt forventes å resultere i mer tørketilpassede økosystemer. I Norge vil dette særlig være relevant i tørrere strøk av landet, og i +3°C-scenarioet kan vi få et klima som vil favorisere steppe eller tørr hei-vegetasjon i noen deler av dagens boreale barskogssone.

Egenskap 4 - Funksjonelt viktige arter, habitatbyggende arter og biofysiske strukturer[97]
På kort sikt vil oppvarmingen sannsynligvis ha positive effekter på boreale treslag, men effekten vil trolig bli redusert eller reversert etter hvert som oppvarmingen tiltar (se Figur 10). Negative effekter av ekstremvær og biotiske og abiotiske forstyrrelser vil øke over tid, noe som kan føre til at klimaendringer i sum vil redusere skogvekst og overlevelse på lengre sikt. I undervegetasjonen kan lyng få redusert overlevelse som følge av mindre snødekke, mens mange moser og lav vil bli skadelidende på grunn av høyere temperaturer eller kraftigere branner. Mange boreale fugler og gnagere er dårlig tilpasset et varmere klima, mens oppvarmingen kan være positiv for virvelløse planteetere og klovdyr tilpasset mer sørlige forhold (se Figur 11). Det vil kunne bli færre små rovdyr på grunn av kaskadeeffekter som følge av reduserte smågnagerbestander og opphør av bestandssykluser. Effekter av oppvarming og ekstremvær på planter kan føre til endret sammensetning av saprofytt- og nedbrytersamfunn, men kunnskapen om dette er begrenset.

Egenskap 5 - Landskapsøkologiske mønstre[98]
Skogbruk og kompleks topografi gjør at norsk boreal skog er romlig fragmentert, til tross for den høye andelen av skogdekke i Norge (37 prosent). Når klimaet blir varmere forventer vi at boreale arter vil spre seg oppover i terrenget og nordover i landet, og tape terreng i sørligere og lavereliggende strøk. Slike endringer i utbredelser er godt dokumentert, blant annet for trær, fugler, flaggermus, klovdyr, gnagere, humler, møll, andre virvelløse grupper, virus og sopp (Figur 12). Imidlertid holder disse forflytningene generelt sett ikke tritt med klimaet, og klimarelaterte forstyrrelser, skadedyr og sykdommer kan hemme spredningsevnen til enkelte treslag. Klimaendringer vil videre favorisere skadedyr og andre arter som kjennetegnes ved plutselige populasjonsutbrudd, og dette vil kunne påvirke trær og skogsamfunn negativt. Lauvtrær og pionérarter, og i enkelte naturtyper furu, vil sannsynligvis få økt utbredelse. Imidlertid er spredningen av de bedre tilpassede artene begrenset av at tilgjengelig habitat er dominert av etablerte skogtyper på de tidsskalaene vi her snakker om (figur 14 og 15). Viktige faktorer som begrenser etableringen av trær og bremser utvidelsen av utbredelsesområdene inkluderer planteetere som spiser unge planter, mangel på spredningsveier i landskapet, og klimarelaterte brudd i synkronien mellom mutualistiske eller symbiotiske arter, som f.eks. planter og pollinatorer eller mykorrhizasopp.

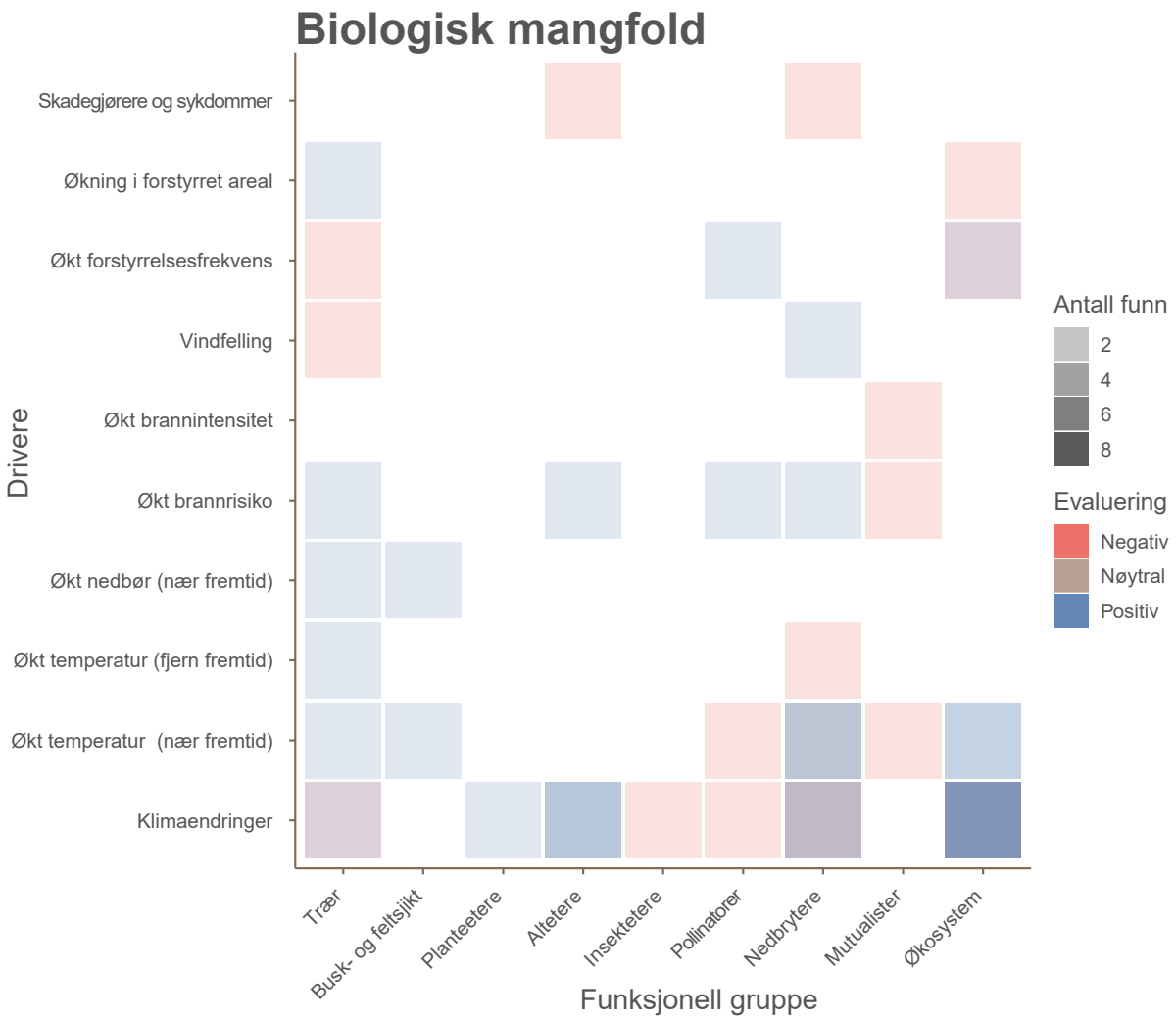
Egenskap 6 - Biologisk mangfold[99] I et varmere og våtere klima forventer vi økt mangfold av trær, undervegetasjon, små pattedyr og andre virveldyr, organismer knyttet til død ved og andre skogsinsekter, jordlevende virvelløse dyr og soppsamfunn. Det skyldes at nemorale skoger har et større mangfold innen disse taksonomiske gruppene enn boreale skoger. Imidlertid kan denne 'nemoraliseringen' føre til tap av spesialisert boreal biota, som insektetende flaggermus, pollinerende insekter, mutualistiske sopp, og andre spesialiserte nordlige arter. Økt forekomst av skadedyr og sykdommer kan føre til tap av biologisk mangfold blant trær, fugler og flaggermus. Arter som er avhengige av modne skoger, inkludert insektetende

96 Se kap. 5.1.3 Characteristic 3: Functional composition within trophic levels
97 Se kap. 5.1.4 Characteristic 4: Functionally important species, habitat-building species, and biophysical structures
98 Se kap. 5.1.5 Characteristic 5: Landscape ecological patterns
99 Se kap. 5.1.6 Characteristic 6: Biological diversity–genetic diversity of ecosystems, species composition and species exchange



Figur 12: Oppsummering av hvordan ulike klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser (drivere) vil påvirke landskapsøkologiske mønstre i norsk boreal skog. Negative, nøytrale eller positive effekter er oppsummert for ulike typer av responser. Effektene av enkelte klimadrivere vurderes både på kort sikt (frem til 2050, nær fremtid) og langsiktig (2100, fjern fremtid). Responstypen 'tilbakekoblinger' beskriver komplekse interaksjoner som kan involvere flere trofiske nivåer. Figuren inkluderer ikke informasjon om fremmede arter.

flaggermus, fugler og gnagere som hamstrer mat, og insekter og sopper knyttet til død ved, kan oppleve negative effekter av forstyrrelser og klimaendringer. Kunnskapen om effekter av klimaendringer på biologisk mangfold i skogen er begrenset, spesielt med tanke på det høye biologiske mangfoldet og de mange spesialiserte organismegruppene som finnes her. Merk at selv om mange studier av virkninger av klimaendringer på biologisk mangfold i boreal skog refererer til 'klimaendringer' generisk, og ikke til de spesifikke driverne, så beskriver de oftest effekter av gradvis oppvarming (Figur 13). Modeller av utbredelsen til viktige skogstrær legger vekt på spennet mellom klimanisjer og mulighet for spredning og etablering (figur 14 og figur 15, og boks 8).



Figur 13: Oppsummering av hvordan ulike klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser (drivere) vil påvirke biologisk mangfold i ulike funksjonelle grupper av planter, dyr og sopp i norsk boreal skog. Økosystem refererer til studier som beskriver effekter på flere organismegrupper samtidig. Effektene av enkelte klimadrivere vurderes både på kort sikt (frem til 2050, nær fremtid) og langsiktig (2100, fjern fremtid). Figuren inkluderer ikke informasjon om fremmede arter.

Egenskap 7 - Abiotiske forhold[100]

Klimaendringene forventes generelt å øke hastigheten i økosystemets næringssyklus (se 'økosystem'-responsene i figur 10-12). Vi forventer økt tilførsel av lettere nedbrytbart og mer næringsrikt bladstrø, og mer effektive nedbrytersamfunn og raskere nedbrytning i varmere jordtyper. Det vil føre til reduserte karbonlagre og økt karbonutslipp til atmosfæren. Endringer i jordas mikrobielle samfunn og mindre tele i bakken, økt jordrespirasjon og redusert karbonlagring i jorda er andre sannsynlige konsekvenser av klimaendringer. Klimarelaterte forstyrrelser kan gi ytterligere karbontap fra økosystemet. Tørke kan føre til omdisponering av biomasse og fosfor fra blader til røtter, og økning i regn-på-snø-hendelser kan øke utvasking av næringsstoffer. Økt sannsynlighet for brann som følge av

100 Se kap. 5.1.7 Characteristic 7: Abiotic factors

klimaendringer kan påvirke jord og økosystemets karbon- og næringskretsløp via tilbakekobling fra kaskadeeffekter som starter med skader i tresjiktet.

Nasjonale miljømål, rødlistearter og naturtyper[101]

Arbeidet med økologisk tilstand legger grunnlag for å vurdere utviklingen opp mot det nasjonale miljømålet 1.1.[102] Ettersom litteraturen indikerer at klimaet med all sannsynlighet vil fortsette å endre seg raskt de neste årtiene som respons på utslipp som allerede er gjort, og at store deler av Norge ligger på breddegrader som endrer seg raskere enn det globale snittet, er det uunngåelig at skogen i Norge påvirkes av klimaendringer.

På kort sikt forventes økningen i gjennomsnittlig temperatur og nedbør å ha en del positive effekter på den økologiske tilstanden i norske boreale skoger, inkludert økt primærproduksjon, økt forekomst av enkelte funksjonelt viktige arter, og utvidede utbredelsesområder for mange arter oppover i høyden og nordover (Figur 17). Samtidig vil økning i hyppigheten og alvorlighetsgraden av ekstremvær (inkludert tørke-, varme- og frosthendeleser) og klimarelaterte forstyrrelser (brann, vind, snø, skadegjørerutbrudd) sannsynligvis ha negative konsekvenser for skogens økologiske tilstand (Figur 17). Nærmere bestemt vil ekstreme klimautslag, forstyrrelser, sykdom og skade sannsynligvis føre til redusert primærproduksjon via redusert plantevekst og økt dødelighet, tap av mange funksjonelt viktige arter, og endringer i trofisk struktur i skogen. Økt brannrisiko og brannintensitet som følge av klimaendringer vil også øke næringsomsetningen, men har ellers overveiende negative effekter, spesielt for biologisk mangfold.

De negative konsekvensene vil sannsynligvis bli sterkere over tid frem mot 2100, og vil ikke være like sterke for alle arter, habitat og naturtyper. Gradvise klimaendringer er neppe noen umiddelbar trussel mot det boreale skogøkosystemet struktur, funksjon, mangfold og økosystemtjenester. Tvert imot kan vi på kort sikt forvente en netto økning i skogens produktivitet. Disse positive effektene vil imidlertid oppveies av hyppigere og alvorligere utslag av ekstremvær og andre klimarelaterte forstyrrelser (som brann, tørkestress, vindfelling, sykdom og skadedyrutbrudd) som i økende grad fører til overveiende negative konsekvenser som tap av produktivitet, motstandskraft, og økosystemtjenester. Usikkerhet knyttet til den samlede effekten av klimaendringer på skogens biologiske mangfold og økosystemfunksjoner forsterkes imidlertid av begrenset kunnskap om hvordan klimapåvirkninger samhandler med tidsforsinkelser, asynkroni, trofiske interaksjoner og økologiske kaskader.

Sannsynlighet for negative effekter er størst i sårbare områder, dvs. i naturtyper der mange av de funksjonelt viktige gruppene slik som habitatbyggende treslag er dårlig tilpasset stressfaktorene ved det kommende klimaet på stedet. For eksempel er gran-dominerte naturtyper i sør og øst særlig utsatt for klimastress og funksjonstap, mens furudominerte naturtyper langs kysten kan være mer truet av furuvednematode eller andre sykdomsutbrudd, og bjørkeskog i nord kan være spesielt utsatt for økte utbrudd av målere. Våtmarks og elvekant -naturtyper risikerer påvirkning fra sesongendring i snøsmelting og lengre tørkeperiode om sommeren, og mer flom om våren på Vestlandet, osv. Se videre kapitlet om resiliens og sårbarhet under.[103]

Sett i sammenheng med det nasjonale miljømålet 1.2,[104] er klimaendringer for tiden identifisert som en trussel mot kun 38 av 2083 skogtilknyttede arter på den norske rødlista for arter. Et felles tema for disse 38 artene er at klimaendringer er én av flere trusler, at den spesifikke klimadriveren ikke er gitt, og at de norske bestandene utgjør en mindre andel av de respektive artenes globale utbredelse. Vi vet ikke om disse artene er truet over hele deres område. Risikoen øker fordi egnede habitater for mange av de truete skogsartene er fragmenterte, enten fordi habitatet er sjeldent

101 Se kap. 5.6 Biodiversity goals
102 Norges nasjonale miljømål 1.1: "Økosystemene skal ha god tilstand og levere økosystemtjenester"

103 Se også kap. 5 Results II: Implications and consequences for the ecological condition of boreal forests in Norway og Appendix I
104 Norges nasjonale miljømål 1.2: "Ingen arter og naturtyper skal utryddes og utviklingen til truede og nær truede arter og naturtyper skal bedres"

eller som følge av arealbruk som fører til tap eller forringelse av habitater. I tillegg forventes generelt en reduksjon i sørgrensen av utbredelsesområder for alle boreale arter, inkludert trær. Redusert utbredelsesområde kan føre til lokal utryddelse av boreale og nordlige arter som foreløpig ikke er klassifisert som klimapåvirket eller rødlistet.

Imidlertid er 60 prosent av alle terrestriske arter registrert i Norge tilknyttet skog, og 84 prosent av de truede artene i skog er tilknyttet gammelskog.[105] Etter hvert som større deler av Norge er utenfor boreal klimasone, må det påregnes økende klimagjeld for naturtyper med både gammel og ung skog som befinner seg utenfor sin klimasone. Her opplever skogen økende hyppighet av forstyrrelser og episoder med stress. Et sentralt tema er derfor hastigheten klimaendringene skjer med. Der hvor gradvise klimaendringer historisk har ført til skogsuksesjon og landskapsøkologiske endringer i noenlunde takt med klimaendringene, gir hastigheten til de pågående endringene skogen liten sjanse til å tilpasse seg. De pågående klimaendringene er uten kjent presedens når det gjelder størrelsesorden og hastighet.

Denne rapporten behandler tidsrommet frem til år 2100. Tidsrommet tilsvarer en normal rotasjonslengde for norsk gran. Hele spektret av endringer vil derfor påvirke trær som allerede er plantet. I et skogsperspektiv er alt dette svært kort, og det gir liten mulighet til naturlig artsutskifting, treslagsskifte og forflytning gjennom terrenget. Fragmentering av landskapet med veier, jordbruksareal, treplantasjer og tettbebyggelse påvirker prosessen ytterligere.

Mange arter er avhengige av å ha et ferdig dannet habitat å spre seg til. Derfor er deres egen spredningsevne ikke nødvendigvis den begrensende faktoren for hvorvidt de klarer å holde takt med klimaendringene; den tregeste delen av et system bestemmer mulighetene for alle som er avhengige av den. Et tydelig eksempel er artene tilknyttet grove læger i gammel gran- eller furuskog: Fra ung furuskog koloniserer et nytt område, tar det opp mot 400 år for et ungt furutre å bli gammelt og grovt, for så å dø, og deretter 100 år til å delvis råtne til det stadiet den er en såkalt "kelofuru" som er et nødvendig habitat for enkelte andre arter. Disse 500 årene er langt forbi tidshorisonten til endringene som er beskrevet i denne rapporten.

Resiliens, sårbarhet og skadebegrensning[106]

Den varierte topografien i Norge deler opp skoglandskapet, og gjør det mindre sannsynlig at forstyrrelser og ekstreme hendelser som skadedyrutbrudd, tørke, stormer og skogbranner får ensartede effekter over svært store områder. De sterke geografiske klimagradientene og den komplekse topografien innebærer at arter ikke alltid trenger å flytte over lange avstander for å finne forhold som er innenfor deres klimatiske tålegrenser. Dette innebærer imidlertid også at lokale habitater og økosystemer kan bli fortrengt relativt raskt, noe som øker sannsynligheten for at kuldetilpassede arter kan «gå tom for habitat» etter hvert som klimaendringene tiltar. Slik er Norges varierte topografi både en fordel og en ulempe: En fordel på den måten at mange arter ikke trenger å bevege seg geografisk langt for å nå kjøligere, høyereliggende, habitat, men en ulempe på den måten at topper kan bli "øyer" fragmentert av lavereliggende barrierer mot videre spredning (Boks 8).

Endringer er generelt vanskelige å forutsi på grunn av ukjente tidsforsinkelser i responsene til hver enkelt art, og fordi de helhetlige effektene på organismesamfunnet kompliseres av at mange av artene er gjensidig avhengige av hverandres spredningshastighet.

Generelt forventes de boreale skogene å være minst motstandsdyktig mot klimaendringer nær den boreale sonens bioklimatiske yttergrenser. Det betyr at overgangssonen mot tundra og nemoral og hemiboreal skog sannsynligvis er områdene som først vil oppleve

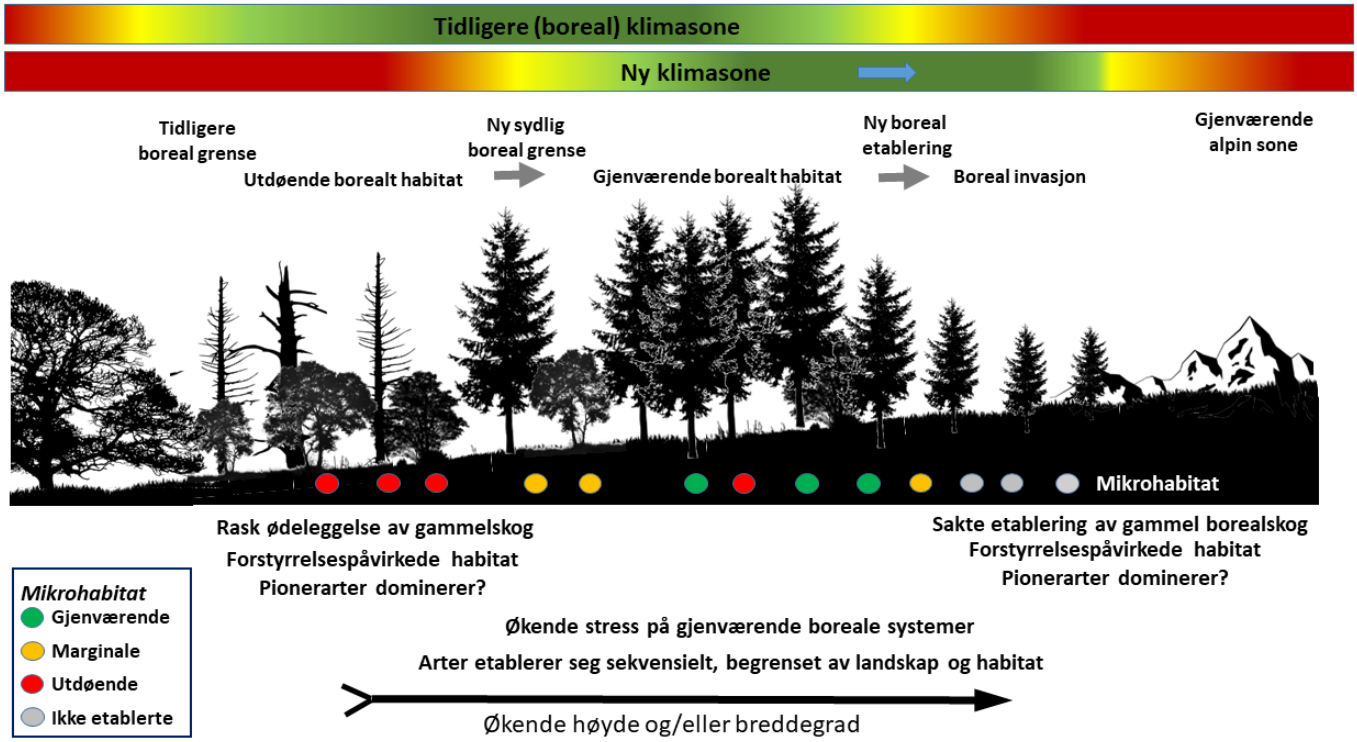
105 https://www.artsdatabanken.no/rodlisteforarter2021/fordypning/statusfortruaarteriskog

106 Se kap. 5.4 Factors that confer resilience, resistance, and vulnerability to climate change og kap. 5.5 Vulnerability of managed and natural forests to climate change

Boks 8: Migrasjon og biologisk mangfold

Gammelskoghabitat ødelegges eller blir ubeboelig for artene som er avhengige av det etter hvert som den øvre temperaturgrensen deres kryper nordover, men gammel skog bruker nødvendigvis lang tid på å etablere seg i nye områder som åpner seg innover alpin sone og tundra. Arter som tilhører temperatursårbar gammelskog er derfor eksepsjonelt sårbare i en slik periode med rask endring.

Klimaet endrer seg så fort og mye at bevaring de neste hundre årene konseptuelt er å forvalte en varig forandring. Utfordringen er å forvalte slik at minst mulig diversitet og funksjon går tapt, og nye systemer med høy diversitet, ønsket funksjon og motstandskraft kan etablere seg. Det nasjonale miljømål 1.2 kan være umulig å nå om tolket bokstavelig, men man kan måtte se norsk strategi som ledd i en større helhet som også inkluderer de inkommende systemene som migrerer inn sørfra, og hva slags hjelp våre stedegne arter kan trenge for å overleve i gamle habitat og etablere seg i nye frem til klimaet stabiliserer seg en gang i fremtiden.



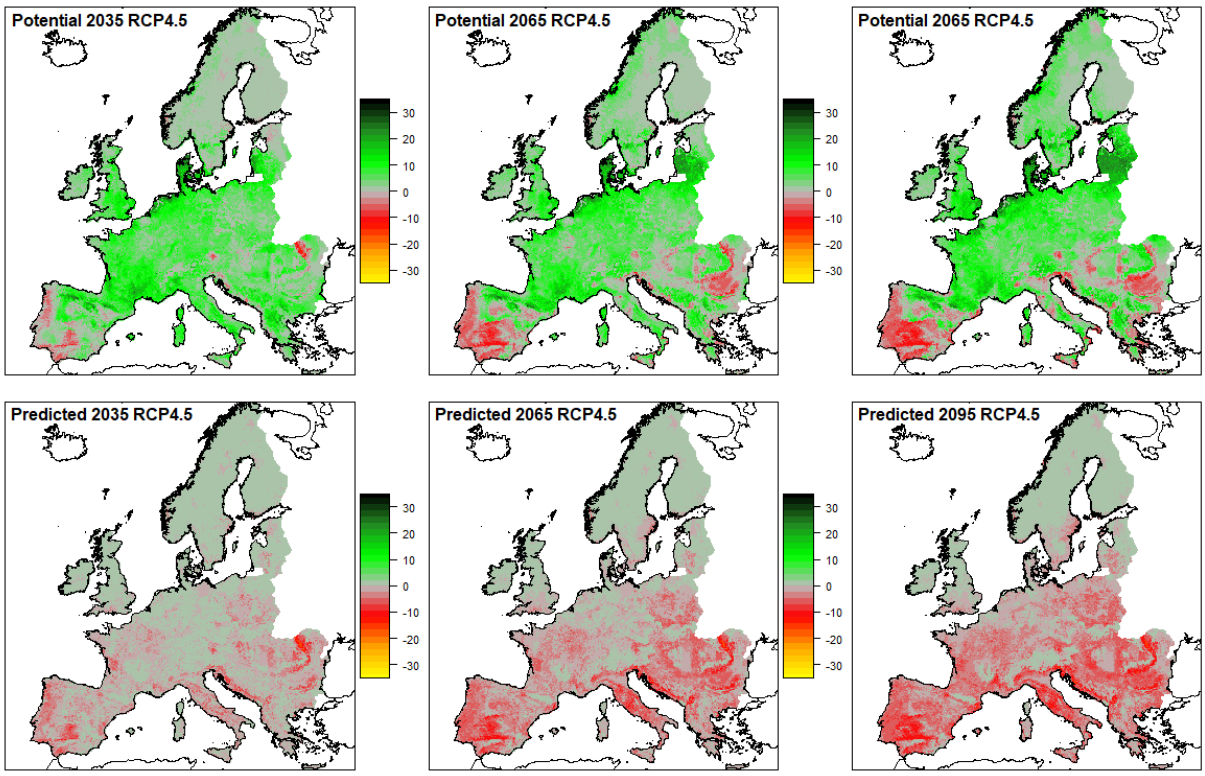
størst endringsrate. De gjennomgripende vegetasjonsendringene som følge av omfattende bestandsutbrudd av målere i overgangssonen bjørkeskog–arktisk tundra i Øst-Finnmark siden år 2000, er i tråd med disse forventningene.

Eldre grantrær er relativt motstandsdyktige mot tørke under dagens klimaforhold i Norge. Økt dødelighet er imidlertid observert, og forventes å fortsette å øke som følge av ekstreme hendelser. Gran som vokser på enkelte jordtyper er spesielt utsatt for tørke. Eldre furu er ansett som svært motstandsdyktig mot tørke under norske forhold, selv om ekstreme tørkeår kan begrense rekruttering og etablering og flere tørre år på rad begrenser

vekst. De funksjonelt viktige lyngartene er sårbare for en rekke aspekter ved klimaendringer, spesielt redusert snødekke og frosttørke i løpet av vinteren. Redusert produktivitet av særlig blåbærlyng forventes å få kaskadevirkninger i næringsnettet, fordi flere boreale gnagere, hønsefugl og klovdyr er avhengige av denne arten.

I et varmere klima forventes hyppigere og mer ekstreme tørkehendelser, økt brannfrekvens og flere brente områder. Furu og lauvtrær er mer motstandsdyktige mot brann enn gran, og det er vanskelig å forutsi om norsk skog vil være mer sårbar, mindre sårbar eller motstandsdyktig mot brann i fremtiden. Gran er utsatt for vindfelling på grunn av det grunne rotsystemet, særlig dersom rotforankringen svekkes som følge av redusert tele om vinteren, i kombinasjon med en tendens til å danne tette bestander. Furu har dypere rotforankring og anses å være relativt motstandsdyktig. Granskog kan derfor være mer sårbar og mindre motstandsdyktig enn furu- og lauvskog mot en økning i hyppighet eller styrke av ekstremvær.

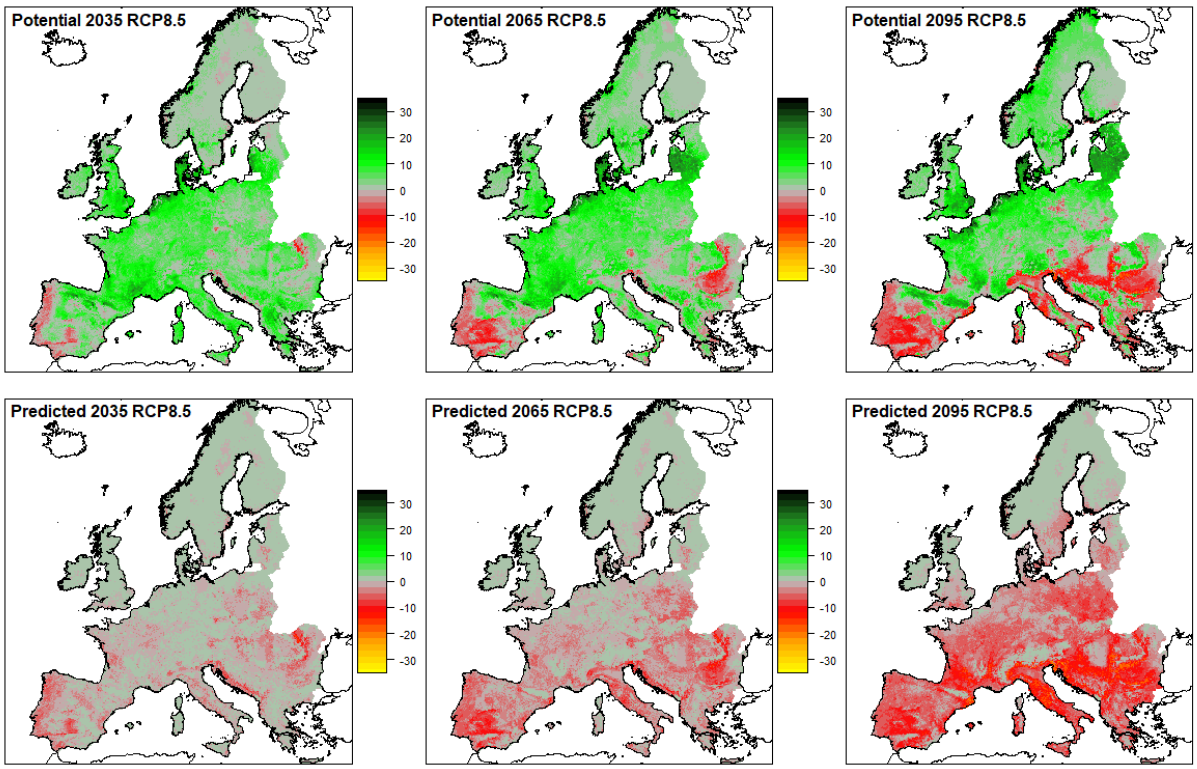
Landskapsfragmentering er også en viktig faktor når det gjelder skogsarters mulighet til å følge sine klimasoner. Uten korridorer sørover/nordover og lavere/høyere i terrenget, har få arter mulighet til å endre sin utbredelse. Naturlig spredning er neppe i stand til å kompensere for endringene alene, men jo mindre mulighet arter har for å spre seg gjennom ufragmentert terreng, desto større blir tapet av arter og biologisk mangfold. Dessuten er arter som er spredt over mange små,



Figur 14: Artsrikdom hos 67 vanlige Europeiske skogstrær (se 4.2.1.1). Forskjellen på modeller som tar kun klima og modeller som tar klima + landskapsøkologiske prosesser som spredning og jordsmonn med i betraktningen. Venstre kolonne viser antall arter skogstrær som finnes i et utsnitt av Fennoskandia og Europa øverst, og maksimalt potensielt mangfold hvis alle arter fantes der klimatiske forhold tillater det under. Høyre kolonner viser det samme for et RCP4.5 type fremtidsscenario, med potensielt mangfold nederst, og øverst forventet mangfold når artenes mulighet til å faktisk spre seg gjennom landskapet hurtig nok til å følge sine klimasoner er tatt med i betraktning (NA angir område uten data).

isolerte, habitater sårbare, fordi hver enkelt sub-populasjon er liten og utsatt for tilfeldigheter som utraderer den lokalt. En art med sammenhengende habitat kan raskt rekolonisere områder der en liten sub-populasjon har gått til grunne, men jo mer isolert habitatene er fra hverandre, desto større er sannsynligheten for at arten taper terreng fortere enn den kan rekolonisere det, og slik utryddes over større områder. Jo oftere lokale forstyrrelser utraderer en sub-populasjon, desto sterkere blir denne effekten. Siden en sentral effekt av klimaendringene er økt forekomst av forstyrrelser som kan utradere sub-populasjoner, blir verdien av sammenhengende habitater for å opprettholde biologisk mangfold større ved klimaendringer.

De fleste barskoger i Norge drives for tømmerproduksjon, selv om graden av menneskelig påvirkning er svært varierende. Skogforvaltningen påvirker i stor grad hvor robust skogen er mot forstyrrelser. Funksjonelt og strukturelt mangfold øker skogens motstandskraft mot tørke og utbrudd av skadegjørere. Tette og homogene skoger er mer sårbare for stormer, snøbelastning og angrep av skadedyr enn åpne og heterogene skoger (med hensyn til trærnes alder, størrelse og artssammensetning) som er formet av naturlige prosesser. Åpne og heterogene skoger er bedre i stand til å ivareta viktige funksjoner som primærproduksjon og karbonlagring.



Figur 15: Forskjellen på modeller som tar kun klima og modeller som tar klima + landskapsøkologiske prosesser som spredning og jordsmonn med i betraktningen. Venstre kolonne viser antall arter skogtrær som finnes i et utsnitt av Fennoskandia og Europa øverst, og maksimalt potensielt mangfold hvis alle arter fantes der klimatiske forhold tillater det under. Høyre kolonner viser det samme for et RCP8.5 type fremtidsscenario, med potensielt mangfold nederst, og øverst forventet mangfold når artenes mulighet til å faktisk spre seg gjennom landskapet hurtig nok til å følge sine klimasoner er tatt med i betraktning (NA angir område uten data).

Del 4 - Kunnskapshull, usikkerhet og metoder

Usikkerhet og kunnskapshull[107]

Kunnskapshull

Mange studier, både fra Norge og internasjonalt, har vurdert effekter av klimaendringer på skog, både på kort og lang sikt. Kunnskapsgrunnlaget varierer mellom ulike kombinasjoner av klimaendringer og organismegrupper (Figur 16). Generelt finner vi mest kunnskap om virkninger på utbredelse, mengde (abundans) og demografi av dominerende arter, særlig overlevelse, vekst og rekruttering hos økonomisk viktige treslag. Det er mindre kunnskap om effekter av klimaendringer på biologisk mangfold, biotiske interaksjoner og økosystemfunksjoner. Få forsknings- og overvåkningsprogrammer har en konsistent dekning av de sju egenskapene som brukes for å karakterisere og overvåke økologisk tilstand. Framstad m.fl. konkluderer at "det er behov for å videreutvikle systemet for å vurdere økologisk tilstand, dels ved supplering av indikatorsettet for å få en mer balansert dekning av økosystemets egenskaper, og dels for å forbedre og kvalitetssikre fastsatte referanse- og grenseverdier for indikatorene". Vi finner ikke grunnlag for å bestride dette, ettersom eksisterende indikatorer under fagsystemet for økologisk tilstand langt fra dekker alle de sentrale egenskapene til den boreale skogen i Norge, uten å suppleres med bredere kunnskap.

Der er stor usikkerhet rundt utviklingen av sentrale økosystemtjenester under gjeldende klimaprognoser, som skogens evne til å lagre karbon. Dette skyldes mangel på kunnskap om hvordan klimaendringer, og spesielt endringer i ekstremvær, påvirker balansen mellom prosesser i primærprodusenter (dvergbusker og trær), konsument-, nedbryter - og symbiontsamfunn. Til sammen kontrollerer disse prosessene økosystemets karbonopptak og -utslipp, og ukjente vippepunkter kan avgjøre om skogen i fremtiden blir en kilde eller et sluk for klimagasser.

Noen organismegrupper er tydelig understudert. Det gjelder blant annet insekter og mer generelt jordlevende organismer, spesielt med tanke på deres viktige økologiske roller i norske skogøkosystemer. Videre er det kunnskaphull om i hvilken grad det pågående globale tapet av biologisk mangfold og biomasse forekommer også i norske skoger. Det mangler også viktig kunnskap om dyre- og plantesykdommer som ikke rammer mennesker eller økonomisk viktige arter. Sopp som fører til sykdom i planter er mer studert enn bakterier (inkludert fytoplasmas), vannsopp (oomycetes), nematoder og virus.

Modeller som forutser skogens utvikling under klimaendringer lider ofte av at de er parametrisert for de klimaforholdene trær vokser under, og i begrenset grad inkluderer vippepunkter og ikke-lineære responser som trer i kraft når temperatur og andre forhold øker utenfor dataområdet for slike drivere. Modellene inkluderer heller ikke interaksjoner med andre organismegrupper. Selv om modellene er nyttige til sitt bruk og fungerer innenfor sine forutsetninger, må de brukes med omhu for å gi informasjon av verdi for skogsystemet

Usikkerhet

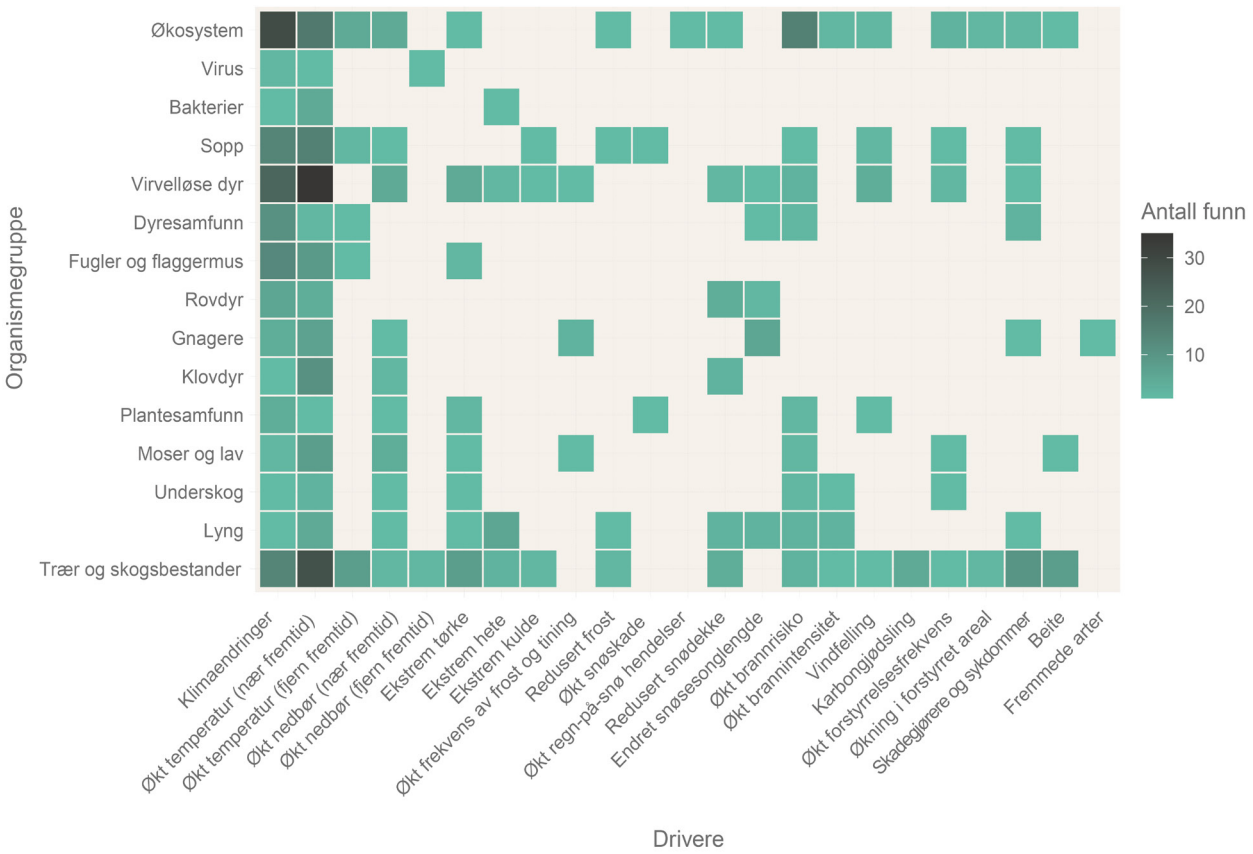
Av praktiske årsaker er det en generell mangel på kunnskap om økologiske endringsprosesser på de tidsskalaene som denne rapporten omhandler. Vi er allerede i en situasjon hvor konsentrasjonen av CO^2 og andre drivhusgasser er høyere enn noe punkt i historien vi har å sammenlikne med, og den globale gjennomsnittstemperaturen er høyere enn på noe punkt i skriftlig historie. Det ser ikke ut til at det har forekommet lengre perioder med høyere global gjennomsnittstemperatur siden

107 Se kap. 6 Data gaps and uncertainties

moderne mennesker spredte seg ut fra Afrika for 70 000 -100 000 år siden. Det sier seg derfor selv at det er risikabelt å ekstrapolere responsen til noe så komplekst som økosystemer under fundamentalt nye forhold, og man kan ikke se bort fra muligheten for uforutsette responser.

Fra et risikoperspektiv må det også understrekes at det er viktige usikkerheter i klimafremskrivingene. Ulike scenarioer for utslipp tar for seg forskjellige grader av menneskelig påvirkning i de kommende tiårene, men selv om moderne globale klimamodeller har vist seg å være pålitelige innenfor rammene de har testet under, er det også et underkommunisert faktum at en del tilbakevirkningsmekanismer ikke er godt integrert i rammeverket. En årsak er det rent praktiske -modellene er store og komplekse, og ukjente faktorer med lang responstid stiller ennå umulige krav til regnekapasitet. Derfor er en del forsterkende tilbakevirkningsmekanismer, som metan fra permafrost og sedimenter, tap av skogdekke, økt jordrespirasjon og effekter av skydekkeendringer kilder til usikkerhet som ikke bør underkommuniseres. Klimaresponsen angitt for hvert utslippsscenario må derfor tolkes med en vid usikkerhetssone.

Nedskalering av globale modeller til å se hva de betyr for lokale forhold spesifikt, legger til et nytt lag med usikkerhet drevet av regionale forskjeller. Vi har her forsøkt å illustrere dette perspektivet i



Figur 16. Kunnskapsgrunnlaget bak denne rapporten, gitt som antall funn i litteraturen av en påvirkning av en spesifikk klimaendring eller klimarelatert forstyrrelse (drivere) på en organismegruppe. Merk at hver celle kan inkludere informasjon om et bredt spekter av biologiske responser (som f.eks. endringer i vekst, demografiske rater, biologisk mangfold eller funksjon), og det totale antallet funn per celle inkluderer både positive, negative og nøytrale effekter. En vitenskapelig artikkel kan også inneholde informasjon om ett eller flere funn. Tomme celler (eller lavt antall funn) indikerer kunnskapshull i den gjennomgåtte litteraturen.

figurene for temperatur og nedbør, men har manglet data for å gi en fullgod presentasjon. Risikoen for uforutsette og vanskelig reversible endringer øker naturlig nok jo lengre konsentrasjonene av drivhusgasser stiger inn i ukjent område.

Sårbarhet og vippepunkter eksisterer også på større skala ettersom behovet for økosystemtjenester formes av den usikre globale økologiske og sosioøkonomiske utviklingen.

Metode, litteratur og data[108]

VKM har tatt utgangspunkt i Fagsystemet for økologisk tilstand, og særlig fokusert på påvirkninger på funksjonelt viktige grupper og arter, landskapsøkologiske mønstre, og biologisk mangfold. Det overordnede målet har vært å gi oppdatert og nyttig vitenskapelig informasjon til forvaltningen og andre interessenter. Rapporten vurderer også egenskaper tilknyttet motstandskraft og sårbarhet mot klimaendringer i tilknytning til å nå nasjonale miljømål og opprettholde god økologisk tilstand.

Rapportarbeidet ble ledet av en arbeidsgruppe med bred kompetanse innen skogøkologi, klimaendringer, og økologiske effekter av klimaendringer. Gruppen vurderte effekter av klimaendringer på de sju egenskapene beskrevet i Fagsystemet for økologisk tilstand for å dekke nøkkelaspekter ved økologisk tilstand: (1) primærproduksjon, (2) fordeling av biomasse på tvers av trofiske nivåer, (3) funksjonell sammensetning innenfor trofiske nivåer, (4) funksjonelt viktige arter og biofysiske strukturer, (5) landskapsøkologiske mønstre, (6) biologisk mangfold og (7) abiotiske faktorer.

Vurderingen bygger på klimaframskrivinger fra Norsk klimaservicesenter (KSS), som gir detaljerte klimaprojeksjoner for Norge basert på de globale modellene og utslippsscenarioene som brukes av FNs klimapanel (IPCC), samt historiske data. KSS-projeksjonsdataene løper til år 2100, og dette utgjør rapportens tidshorisont.

FNs klimapanel og Norsk klimaservicesenter gir ulike klimaprojeksjoner avhengig av hvilke scenarioer for fortsatte utslipp av klimagasser som vurderes. Med bakgrunn i føre-var-prinsippet og gjeldende utslippsbaner, så vi bort fra både de mest optimistiske og de mest pessimistiske scenarioene. Gitt usikkerheten om hvilket klimautfall en gitt konsentrasjon av drivhusgasser vil føre til, vurderte vi spennet mellom scenarioene RCP4.5 og RCP8.5 i IPCCs femte hovedrapport som et "sannsynlighetsspektrum".

Arbeidsgruppen gjennomgikk internasjonal faglitteratur og forvaltningsrapporter, og supplerte med egne analyser og visualiseringer hvor data var tilgjengelig for å dekke kunnskapshull. Ekspertkunnskap ble brukt til å identifisere relevant litteratur (nyere publikasjoner ble prioritert framfor eldre, og geografisk nære og lignende systemer ble prioritert framfor mer fjerntliggende eller ulike systemer) og til å finne studier som rapporterer bevisbyrde, og er åpne om usikkerheter og kunnskapshull. Relevante funksjonelle grupper av organismer ble identifisert i prosessen med å samle data. Effekter på sjeldne og truede arter og habitater ble vurdert ved å analysere informasjonen i de nasjonale rødlistene utarbeidet av Artsdatabanken.

Arbeidsgruppen identifiserte over 1000 vitenskapelige artikler som rapporterte på effekter av en eller flere klimafaktorer på eller flere biologiske responser av relevans for økologisk tilstand i norsk boreal skog. Artiklene rapporterte resultater både fra eksperimenter, klimagradientstudier, modellstudier, og meta-analyser av flere studier. Selv om vi prioriterte nordiske studier inkluderte vi også studier fra andre områder sirkumborealt, dersom de var relevante.

Vi klassifiserte hvert studie basert på (i) den biologiske responsen som var målt (eksempel: vekst, overlevelse, endret utbredelse), (ii) art eller funksjonell gruppe (eksempel: gran, elg, gnagere, insektsamfunn), (iii) om arten var fremmed eller stedegen, (iv) relevans for de sju egenskapene for økologisk tilstand, (v) klimaendring eller klimarelatert forstyrrelser (eksempel: oppvarming, økt nedbør, brann, tørke, ekstremnedbør, brann, skadegjørerutbrudd) og noterte om den rapporterte biologiske responsen på en gitt klimaeffekt var positiv eller negativ (vi brukte en tosidig Likert skala, fra -5 [svært negativ] til +5 [svært positiv], og kodet klimadrivere og responser

108 Se kap. 3 Materials and Methods

Figur 17. Oppsummering av de negative, nøytrale eller positive effektene av ulike klimaendringer og klimarelaterte forstyrrelser (drivere) på ulike organismegrupper og hele økosystemet i norsk boreal skog. Effektene av enkelte klimadrivere vurderes både på kort sikt (frem til 2050, nær fremtid) og langsiktig (2100, fjern fremtid). Figuren inkluderer ikke informasjon fra fremmede arter.

slik at positive verdier reflekterte henholdsvis økte absoluttverdier av driveren og økt størrelse, populasjon eller funksjonsnivå i responsen). Vi vurderte også kunnskapsgrunnlaget for hver enkelt respons (vi vurderte om dette var veletablert kunnskap, etablert, men med svak empirisk støtte, usikker, eller ukjent). Dette ga et datasett med 290 rader (eller 'responser') og i alt 496 observerte årsakssamenhenger (art eller funksjonell gruppe x responstype x klimaendring). Detaljer finnes i den engelske rapporten.[109]

Responsene vi fant i litteraturen inkluderte informasjon for et bredt spekter av funksjonelle grupper av arter, spesielt primærprodusenter (trær, dvergbusker, urter, graminoider, moser og lav), men også planteetere (klovdyr, gnagere, fugler, virvelløse planteetere), insektetere (fugler og flaggermus), rovdyr (fugler, mustelider, rev, ulv og bjørn), sopp, virus og virvelløse dyr, bakterier. Funnene inkluderte endringer i biomasse eller mengde (biomasse, vekst og tetthet), fenologi, demografiske rater (rekruttering, dødelighet), geografisk utbredelse, og populasjonsutbrudd (Figur 17). I tillegg var det en del responser på økosystemnivå, som endringer i produktivitet og næringssykluser.

Et bredt spekter av klimafaktorer og klimarelaterte forstyrrelser påvirker arter og økosystemet i skogen (Figur 17). Vi fant flest studier som dokumenterte effekt av økt temperatur (167 funn), etterfulgt av generelle klimaendringer (135 funn). Langt færre omhandlet virkninger av endringer i nedbør, vi fant for eksempel bare 26 studier av effekten av økt nedbør. Vi fant også studier av klimaekstremer. Oftere dokumenterte ekstremer inkluderte tørke- og hetebølger (21 og 12 funn), vindfelling (10 funn) og økt brannrisiko og brannintensitet (33 og 7 funn). Få studier rapporterte virkninger av kuldeekstremer (4 funn), frost-tine-sykluser (5 tilfeller), snøskaderisiko (2 funn), økte regn-på-snø-hendelser (1 funn) og udefinerte klimarelaterte forstyrrelser (13 funn). Det var også eksempler på effekter av klimarelaterte abiotiske faktorer, som redusert snødekke (17 funn), redusert frost (5 funn), endret varighet av snøsesongen (13 funn) og CO^2-gjødsling (5 funn). Det var videre eksempler på koblinger av klimaendringer til skadedyr og sykdommer (19 funn), fremmede arter (1 funn) og planteetere (10 funn).

109 Se kap. 3.3 Literature review and knowledge synthesis

Del 5

Appendiks I: Forkortelser

Term	Forklaring
Albedo	En overflates evne til å reflektere sollys som lys i stedet for varme. Lyse overflater returnerer en stor del av solstrålene tilbake til atmosfæren (høy albedo) og bidrar dermed mindre til oppvarming enn mørke overflater som absorberer strålene fra solen (lav albedo) og utstråler varme.
Biodiversitet, biologisk mangfold	Mål på antall forskjellige arter, eller genotyper innenfor en art, eller forekomsten av arter eller genotyper innenfor en romlig enhet (alfa-diversitet) eller på tvers av romlige enheter (beta-diversitet). Omfatter også mangfold av naturtyper, naturtyper og økosystemer.
Biom	Et stort naturlig forekommende samfunn av flora, fauna og sopp som okkuperer et viktig habitat, for eksempel boreal skog eller tundra.
Biotisk	Assosiert med, eller avledet fra, levende organismer.
Boreal	Den boreale klimasonen er definert av kalde vintre med noe snødekke, en kort sommer og lav til moderat årlig nedbør. Den boreale skogen er den dominerende landdekketypen. Begrepet "subarktisk" brukes noen ganger om hverandre, men her bruker vi "boreal" konsekvent.
Boreonemoral	Økotonen, eller overgangssonen, mellom de boreale skogene dominert av bartrær og nemoral, også kalt tempererte, skogsoner dominert av løvtrær.
Gjennomsnitt	Gjennom hele rapporten, med mindre annet er oppgitt, er gjennomsnittgitt med det relevante konfidensområdet i parentes (f.eks. 25 [15,30]).
Gradient	Kontinuerlig variabel som uttrykker gradvis variasjon i en observerbar karakteristikk, for eksempel klima (klimagradient).

Term	Forklaring
Kaskadeeffekter	I økologi er kaskadeeffekter sekundære (indirekte) effekter utløst av endringer hos én nøkkelart. Trofiske kaskader oppstår når en slik endring på ett trofisk nivå fører til endringer i andre trofiske nivåer. Trofiske kaskader kan være ovenfra og ned, for eksempel når fjerning av rovdyr frigjør planteetende populasjoner som igjen beiter ned matplantene sine, nedenfra og opp for eksempel når endret primærproduksjon påvirker alle høyere trofiske nivåer.
Klimagjeld	I hvilken grad et plante- eller dyresamfunn ennå ikke er tilpasset nyere klimaendringer; i hvilken grad endringer i biologisk mangfold henger etter dagens klimaendringer. Tregheten til langlivede organismer som trær vedvarer til tross for stadig mer ugunstig klima gjør skogøkosystemer utsatt for klimagjeld.
Klimapådriv, klimapådrag	Den fysiske prosessen med å påvirke klimaet gjennom en eller annen mekanisme, ofte kalt en driver eller påvirkningsfaktor. Eksempler inkluderer: variasjoner i solstråling, vulkanutbrudd, skiftende albedo og endrede nivåer av klimagasser i atmosfæren. Vanligvis definert som økningen i varmeenergi per kvadratmeter, eller som et visst nettobidrag til økning i global middeltemperatur.
Nedskalering	Prosedyrene for å anvende store klimamodeller i finere tids- og romlig skala, og dermed kunne vurdere lokale variabler som høyde, eksponering, landdekke etc. for å gjøre mer finkornede spådommer og analyser.
Økosystem	Et område med alle organismer, og prosessene som regulerer biotiske relasjoner mellom organismer, så vel som mellom organismer og det abiotiske miljøet (enten det er naturlig eller formet av menneskelige aktiviteter).

Appendiks II: FNs klimapanels sjette hovedrapport (IPCC AR6) og denne rapporten

FNs klimapanels (IPCC) sjette hovedrapport (AR6) består av tre delrapporter:

- Det naturvitenskapelige grunnlaget (WGI) – publisert i 2021 i tide til å bli integrert i denne rapporten.
- Virkninger, klimatilpasning og sårbarhet (WGII) – publisert februar og mars 2022 akkurat da denne rapporten ble ferdigstilt, ikke i tide for å bli innarbeidet, men i tide for å bli vurdert for konsistens. Derfor er funnene av AR6 WGII som er mest relevante for norske skoger oppsummert i kapittel 7 i hovedrapporten. Det viser seg at AR6 WGII og denne rapporten har kommet til svært like og konsistente konklusjoner når det gjelder klimaeffekter på boreal skog. Hovedforskjellene dreier seg om større fokus på norsk boreal skog i denne rapporten, og mer rom for teoretiske og globale betraktninger i IPCC AR6.
- Utslippsreduksjon, opptak og virkemidler (WGIII) – publiseres sent i 2022, etter at denne rapporten var ferdig og blir derfor ikke videre behandlet her. Dens fokus faller da også hovedsakelig utenfor denne rapportens temaområde.

Merk at AR6 introduserer Shared Socioeconomic Pathway (SSP) som nomenklatur for fremtidige scenarioer for klimagassutslipp. Det er et mer fleksibelt system for inkludering av sosioøkonomiske effekter og tilbakemeldinger, og ment å erstatte Representative Concentration Pathway (RCP)-systemet introdusert av IPCC AR5 i 2014. Imidlertid er praktisk talt alle tilgjengelige studier og data basert på RCP-scenarioene, så vi referer fortsatt til RCP-scenarioene gjennomgående. For en grov konvertering bør man vurdere RCP8.5 som innarbeidet i SSP5.8.5, og RCP4.5 som innarbeidet i SSP2.4.5.

Appendiks III: Senere tilkommet litteratur

Klimaendringene og de økologiske endringene de forårsaker skjer raskt og globalt. Det er derfor også et felt med mye pågående internasjonal forskning. Bare siden hovedrapporten kom ut (april 2022) til nå (august 2022) har det tilkommet nye studier publisert i sentrale tidsskrift. Dette appendikset nevner artikler som arbeidsgruppen har notert seg som spesielt relevante i tiden mellom hovedrapporten og den norske utgaven, men ikke i tide til å inkludere resultatene i den fagfellevurderte delen av rapporten. De nevnes derfor her som et etterskrift av interesse for vurdering av rapportens prediktive verdi.

De europeiske hetebølgene og tørken sommeren 2022 har demonstrert sammenhengen mellom temperatur og funksjonell tørke, selv om de av naturlige årsaker ennå ikke har rukket å bli en del av den vitenskapelige litteraturen. Imidlertid tyder foreløpige analyser på at hetebølgene kommer sammen med EU-rekord i brannareal og tørke for skoger og avling.[1]

En stor del av Norge ligger nord for polarsirkelen, og inkludert områder som forventes å beholde et borealt klima og kunne være et refugium for det boreale biomet. Imidlertid viser en studie publisert av Rantanen m.fl. i Nature at Arktis i løpet av de siste 43 årene har varmet opp nesten fire ganger raskere enn kloden, noe som er høyere enn generelt rapportert i litteraturen.[2] Det firedoble oppvarmingsforholdet over 1979–2021 er et ekstremt sjeldent utfall i klimamodellsimuleringer, noe som indikerer at det observerte oppvarmingsforholdet enten har vært en ekstremt usannsynlig hendelse, eller at klimamodellene har en systematisk tendens til å undervurdere forsterkningen. Hvis forsterkningen er enda sterkere enn antatt kan dette blant annet ha følger for det boreale biomets muligheter til å opprettholdes i mange områder hvor hovedrapporten angir dette som plausibelt, og er et eksempel på usikkerhetene diskutert i Del 4.

En potensielt viktig studie fra det kanadiske borealskogbeltet påpeker at effektene av hyppige lavintensitetstørker i stor grad har blitt oversett i den boreale skogen.[3] Det viser seg at hyppige lavintensive tørketider generelt hadde sterkere effekter på borealskogdødeligheten enn intensiteten til de tørreste forholdene. Totalt sett var dødeligheten i skoger dominert av skyggetolerante bartrær sterkt påvirket av hyppige tørre forhold med lav intensitet. Dette antyder eksistensen av terskler for tørketoleranse og skogdekke over tid. Blandingsskog med signifikant innslag av lauvtrær var imidlertid tolerante mot gjentatt lavintensitets tørkestress. Resultatene fremhever viktigheten av å vurdere ikke bare ekstremhendelser, men også gjentatte forstyrrelser av lav intensitet. På lang sikt kan skogens respons på tørre forhold brått endre seg, noe som fører til uforholdsmessig dødelighet utløst av akkumulert stress. Dette er i samsvar med rapporten men sannsynliggjør tilstedeværelsen av ennå dårlig kjente vippepunkt.

Feng m.fl. publiserte nylig en studie som viser at mer mangfoldige plantesamfunn ofte har høyere primærproduktivitet på tvers av eksperimentelle og naturlige systemer.[4] Dette skyldes antakelig komplementaritet mellom ulike arter, som mer effektivt kan bruke ressurser sammen, og større sannsynlighet for at mer produktive arter er til stede. Dette inkluderer data fra 255 skogplantasjer hvor man ser at flerartsplantinger i gjennomsnitt har høyere og tykkere trær og større overjordisk biomasseakkumulering enn monokulturer. Denne effekten skyldtes hovedsakelig komplementaritet mellom arter, og viser derfor størst fordel av å pare arter med forskjellige egenskaper. Dette er forenlig med rapporterte funn om motstandskraft i skog.

To studier av hhv. Cabon m.fl. og Anderegg m.fl. ser på vekst og mortalitet i skog under klimaendringer og konkluderer tydelig med at

vi ikke kan regne med at økende karbonopptak av skog drevet av karbongjødsling og lengre vekstsesong skal bidra til å kompensere for utslipp, da nettoeffekten ser ut til å utveies av redusert vekst pga. tørke og varmestress og økt dødelighet som følge av forstyrrelser som brann og utbrudd.[5,6] De understreker viktigheten av 2020-2030 tallet for vippepunkter for skogbiomer og fremtidig klimautvikling.

En ny studie som benytter satellittdata på det boreale skogbeltet som helhet finner en økt vekst ("forgrønning") i kalde tynt bevokste områder med høyt jordnitrogen og moderat sommeroppvarming, mens tap av vekst ("bruning") først og fremst skjedde i de klimatisk varmeste marginene av både det boreale skogbiomet, spesielt i tettvokste skogområder der somrene ble varmere og tørrere.[7] Disse makroøkologiske trendene reflekterer endringer i vegetasjonsproduktivitet, dødelighet og rekruttering, og er som forventet utfra det rapporterte forholdet mellom positive og negative effekter.

Det er med andre ord arbeidsgruppens inntrykk at litteratur tilkommet etter at arbeidet med hovedrapporten utkom styrker og utfyller konklusjonene i denne.

1 The Guardian, publisert tirsdag 26. juli 2022, lest på nett 15. August 2022 på https://www.theguardian.com/environment/ng-interactive/2022/jul/26/how-europe-has-been-hit-by-record-fire-damage-and-temperatures

2 Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3

3 Sánchez-Pinillos, Martina, et al. "Sequential droughts: A silent trigger of boreal forest mortality." *Global Change Biology* 28.2 (2022): 542-556.

4 Feng, Yuhao, et al. "Multispecies forest plantations outyield monocultures across a broad range of conditions." *Science* 376.6595 (2022): 865-868

5 Cabon, Antoine, et al. "Cross-biome synthesis of source versus sink limits to tree growth." *Science* 376.6594 (2022): 758-761.

6 Anderegg, William RL, et al. "Future climate risks from stress, insects and fire across US forests." *Ecology Letters* (2022).

7 Berner, Logan T., and Scott J. Goetz. "Satellite observations document trends consistent with a boreal forest biome shift." *Global change biology* 28.10 (2022): 3275-3292.

Vitenskapskomiteen for mat og miljø

Norwegian Scientific Committee for Food and Environment

Vitenskapskomiteen for mat og miljø (VKM)
4404 Nydalen
N – 0403 Oslo, Norge
Telefon: +47 21 62 28 00
E-post: vkm@vkm.no