

TØMMERPRODUKSJON, KARBONFANGST ELLER BEGGE DELER? HVA ER SAMFUNNSØKONOMISK OPTIMAL FORVALTNING AV NORGES SKOGER?

Per Kristian Rørstad, Forsker, Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU)¹

Tømmervolumet i norsk skoger passerer snart en milliard kubikkmeter. Volumet har vært stigende helt siden Landsskogtakseringen startet registreringene for mer enn hundre år siden. Nettobindingen i skogene tilsvarer nesten 50 prosent av Norges CO₂-utslipp. I tillegg til fangst og lagring av karbon, «produserer» skogene tømmer og en lang rekke andre økosystemtjenester slik som biologisk mangfold og rekreasjonsmuligheter. Selv om det er skogeierne som bestemmer forvaltningen av skogene, er det likevel fornuftig å diskutere hva som er best forvaltning av skogressursene sett fra samfunnets side. Den enkle samfunnsøkonomiske analysen som blir presentert nedenfor, tar utgangspunkt i dagens skogtilstand, og vi ser på tømmer og opptak av CO₂. Dagens verdi av opptak og lagring av CO₂ er langt høyere enn tømmerverdien. Dette trekker i retning av redusert hogst. Verdien av CO₂-lagring er forventet å stige mer enn tømmerprisene. Dette trekker i retning av ytterligere økt stående volum og lavere årlig hogst på lang sikt. Det siste er i liten grad avhengig av rentefoten.

INNLEDNING

I Hurdalsplattformen (Arbeiderpartiet og Senterpartiet, 2021) varsler regjeringspartiene en opptrapping i skogpolitikken: «En mer aktiv næringspolitikk skal gi nye arbeidsplasser ... og skog skal gis en særstilling» og «økt drift av den produktive skogen.» Samtidig skal «Gode avvegingar mellom aktivitet og miljøomsyn, mellom natur og klima og mellom bruk og vern ... stå sentralt i ein berekraftig skogpolitikk.»

Regjeringen ser ut til å prøve å finne en balanse mellom a) hogst og medfølgende arbeidsplasser i skogen og skogindustrien, b) fangst og lagring av karbon i skogene og c) beskyttelse av miljøverdier i skogen. Hvordan de tre hensynene skal prioriteres, går ikke klart frem av Hurdalsplattformen.

Det har de seneste ti årene vært debatt om klimaeffektene av å drive skogbruk. Er skogbruk bra eller dårlig for klimaet? Det har vært enighet om de grunnleggende biologiske og fysiske prosessene, men det har vært uenighet om det vi kan kalle tekniske detaljer. Trolig er det bred enighet om at det å hogge en skog vil gi økte utslipp og/eller redusert opptak i skog i flere tiår sammenlignet med det å ikke hogge skogen (Trømborg mfl., 2011). Uenigheten er knyttet blant annet til hvor «fort» skogen vokser og hvor stor den såkalte substitusjonseffekten er, dvs hvordan bruk av skogprodukter og skogbasert bioenergi reduserer utslippene av fossilt karbon. Holmgren (2021) kommer for eksempel til at det å slutte med hogst (i Sverige) vil øke nettoutslippene dramatisk. Dette er den

¹ Takk til Erik Trømborg, Andreas Brunner, redaktøren av tidsskriftet og en anonym fagfelle for nyttige innspill! Gjenværende feil og mangler er selvsagt forfatterens ansvar alene. Forskningen er finansiert av forskningsprosjektet Klimasmart skogbruk Norge (Norges forskningsråd prosjektnr. 302701) som er et samarbeid mellom NMBU, NIBIO, LUKE i Finland og Wageningen universitet i Nederland.

motsatte konklusjonen av den Holtmark (2012) kommer til. Han viser at økt hogst brukt til bioenergi vil gi en karbondjeld som varer i flere hundre år.

Resultatet til Holtmark (2012) må nødvendigvis bety at redusert hogst er bra for klimaet i svært lang tid fremover, og at det å slutte å hogge i ytterste konsekvens er det beste for klimaet hvis vi ser isolert på Norge. Det er flere mulige grunner til at ingen har tatt til orde for å redusere det generelle aktivitetsnivået i norsk skogbruk. Det ene er at det er privat eiendomsrett i Norge, og skogeierne har stor frihet til å velge hvordan skogbruket skal drives. Det andre er at skogsektoren skaper verdier og sysselsetting. Selv om klima er viktig, hadde debatten tjent på å ha et litt bredere perspektiv.

Målet med denne artikkelen er å presentere en enkel modell som kan brukes til å diskutere de grunnleggende sidene ved samfunnsøkonomisk optimal forvaltning av skogene i Norge. Det er ikke et mål å gi eksakte anvisninger om hvordan skog skal drives i Norge, men å gi retning for utviklingen og størrelsesordenen for nivået på hogst og stående volum i Norge.

EN ENKEL BIOØKONOMISK MODELL FOR NORSKE SKOGER

Hvordan et tre eller et skogbestand vokser, avhenger av en rekke faktorer som varierer over tid og sted. En detaljert modell for norske skoger vil derfor bli komplisert, kompleks og stor. Det finnes flere slike modeller for norske forhold (Hoen og Eid, 1990; Eid og Hobbestad, 2000; Gobakken mfl., 2008; Antón-Fernández og Astrup, 2019), men siden vi skal se på skogforvaltning på et overordnet nivå, trenger vi ikke en detaljert modell.

Det er vanlig å anta at skog følger en såkalt logistisk vekst og dermed har en sigmoid form når vi ser utviklingen i volum over tid. Dette betyr at tilveksten, dvs årlig økning i volum, øker i en viss periode før den når en topp og deretter avtar. Det siste skyldes i hovedsak det vi kan kalle en aldringseffekt. Det er mange andre faktorer som påvirker mortaliteten til det enkelte treet. Mange av disse er knyttet til konkurransen mellom trærne (Siipilehto mfl., 2020), men det er også eksterne faktorer som tørke, stormer og branner. Tørke vil svekker trærne og øker sannsynligheten for billeangrep. Sannsynligheten for mortalitet som følge av disse miljømessige faktorene øker med skogens alder, men disse faktorene har så langt ikke generelt vært viktige for veksten i skogene i Norge.

I motsetning til de mer detaljerte skogvekstmodellene nevnt ovenfor behandler den enkle modellen som er bruk her all skog likt. Vanligvis deles skogarealet inn etter for eksempel treslag, aldersklasse og produksjonsevne (bonitet). I tillegg kan skogene stratifiseres etter eier, administrative grenser og lignende. Modellen brukt her mangler disse dimensjonene, og resultatene kan ikke brukes til å si noe om hvor den faktiske hogsten eventuelt burde skje.

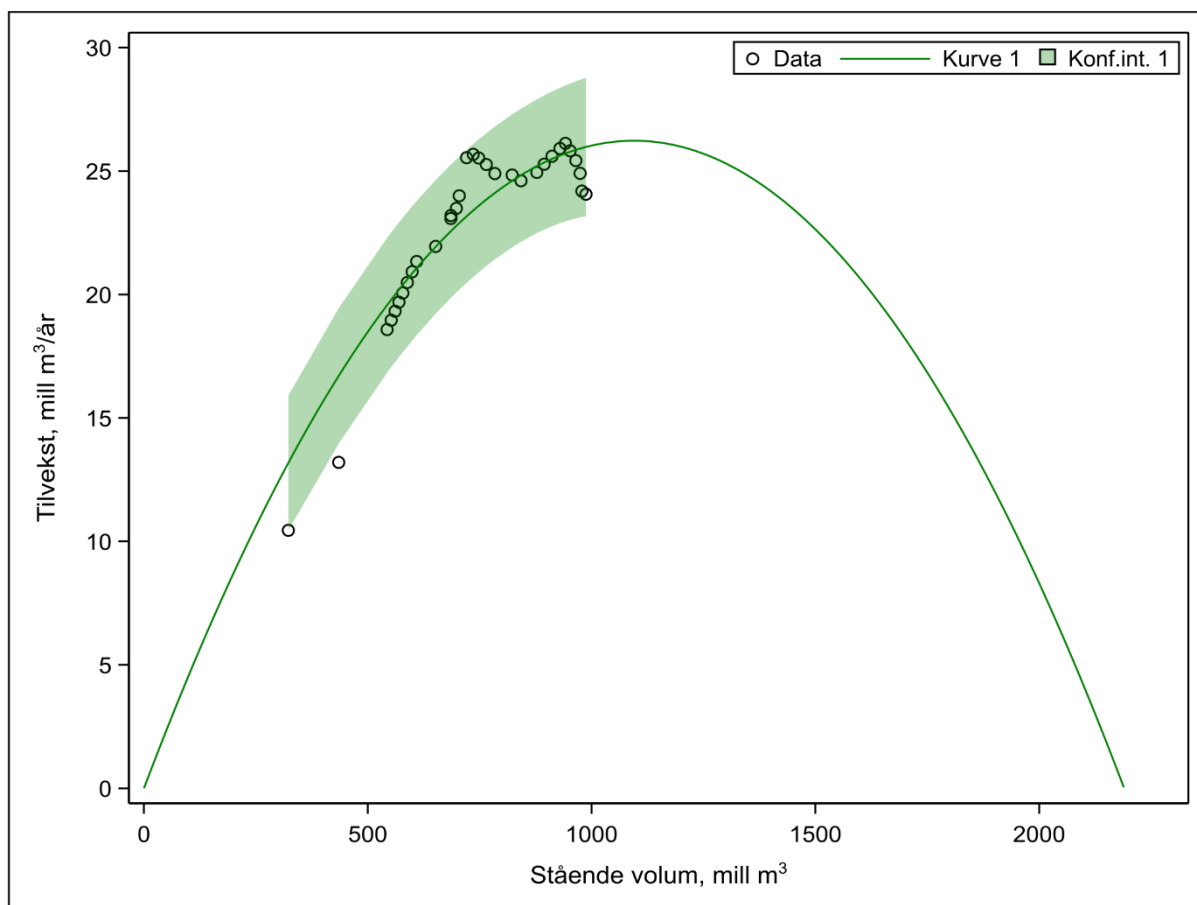
Som nevnt ovenfor antar vi som oftest at en enkelt skog følger logistisk vekst. Siden totalt stående volum og tilvekst i Norge er summen av alle bestand, er det rimelig å anta logistisk vekst også på aggregert nivå (Reed og Pearl, 1927). Det finnes ulike funksjonelle former som gir en logistisk vekst. Den enkleste er

$$F(X_t) = iX_t \left(1 - \frac{X_t}{K}\right) \quad [1]$$

hvor $F(X_t)$ er årlig bruttotilvekst av stående tømmer (mill m^3), X_t er stående volum tømmer i år t (mill m^3), i kan tolkes som ressursen iboende tilvekst og K som ressursens bæreevne (mill m^3), dvs. det maksimale volumet i skogene. Denne typen modeller finnes i de fleste lærebøker i ressursøkonomi, for eksempel Conrad og Clark (1987) og Fisher (2020). De er ofte bruk for fiskeressurser (Clark og Munro, 1975). Den er også blitt brukt tidligere på norsk skog (Hofstad, 1991) og i andre land (Limaei mfl. 2017).

Trærnes alder er ikke en variabel i modellen, men vi kan se på stående volum, X_t , (x-aksen i Figur 1) som en ikke-lineær indeks for gjennomsnittsalder. Hvis all skogen i Norge er ung, la oss si 10 år gammel omtrent som et juletre, vil det totale volumet være lite. Selv om det ville vært svært mange av disse jultrestore trærne, vil den samlede tilveksten være liten. Vi er nå helt til venstre i figuren. Når alle bestandene har nådd sin maksimale størrelse, er vi helt til høyre i figuren. Mellom disse to ekstremene vil vi kunne ha ulike kombinasjoner av bestandsaldre.

Basert på tall fra Landsskogtakseringen estimerer Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) årlig stående volum og tilvekst i skogene i Norge. SSB rapporterer disse tallene (SSB, 2021a). Vi skal bruke disse dataene som utgangspunkt for analysen her. Dataene dekker årene 1933, 1967 og alle år fra og med 1986 til og med 2020. Siden stående volum har økt i hele perioden, er punktene i Figur 1 i kronologisk rekkefølge. Grunnen til at stående volum har økt, er at hogsten i hele perioden har vært lavere enn bruttotilveksten.



Figur 1. Sammenhengen mellom bruttotilvekst og stående volum i norske skoger, estimert kurve og 95 prosent prediksjonsintervall.

Kilde: SSB (2021a) og egne beregninger.

Funksjonen ovenfor er en annengradsfunksjon, men for å estimere parameterne direkte er det brukt ikke-lineær regresjon (SAS Institute Inc, 2011). Tabell 1 viser parameterestimatene. Ingen av konfidensintervallene dekker 0, så vi kan konkludere at parameterne er signifikant forskjellig fra null på 1 prosent-nivå. Tabell 2 i vedlegget viser dekomponeringen av variansen. Den viser at hele regresjonen er signifikant, dvs gir et bedre resultat enn ett enkelt gjennomsnitt. Ut fra tallene kan vi beregne at roten av middelkvadratavviket (RMSE) er 1,3 mill m³, determinasjonskoeffisienten (R²) er over 0,99, og variasjonskoeffisient er på om lag seks prosent.

Tabell 1. Parameterestimer, standardfeil og konfidensintervall.

Parameter	Estimat	Standardfeil	99 % konfidensintervall	
<i>i (tilvekst)</i>	0,0479	0,00166	0,0433	0,0525
<i>K (bæreevne)</i>	2189,9	127,3	1839,8	2539,9

Det er viktig å påpeke at dataene dekker en lang periode, og at det har skjedd mye i norsk skogbruk i løpet av dette tidsrommet. Skogarealet har økt noe ved at arealer er blitt tilplantet langs kysten av Vestlandet og opp til Nordland for noen tiår siden. Dette er argumenter for å ta bort de to første observasjonene. Gjør vi det, vil *i* øke til så vidt over 0,05 og *K* bli redusert til 2048 mill m³. Dette ligger godt innenfor usikkerheten i modellen ovenfor og har ingen praktisk betydning.

For de senere årene inneholder registreringene også tall for skog over skoggrensa og skogen i Finnmark. Dette utgjør imidlertid så små volumer at dette ikke har praktisk betydning for analysene her. Vernede arealer (landskapsvernområder, naturreservater, nasjonalparker osv) inngår også i datagrunnlaget bruk. De forvaltes normalt med andre formål enn skogproduksjon. De utgjør ca 4 prosent av arealet og stående volum og ca 2 prosent av tilveksten i norske skoger (Svensson mfl., 2021).

VI KAN DOBLE STÅENDE VOLUM

Bæreevnen (*K*) er på nesten 2,2 milliard m³. Dette er det maksimale stående volumet vi kan ha i norske skoger i henhold til denne modellen, og det er mer enn dobbelt av dagens nivå. Det er grunn til å minne om at det er betydelig usikkerhet knyttet til dette. Et 99 prosent konfidensintervallet for *K* er [1840, 2540].

Modellen fanger opp mye av variasjonen i datamaterialet, men dataene dekker bare drøyt 30 prosent av det interessante området for stående volum [0: 2200]. Observasjonene er i tillegg tilsynelatende bare i den stigende delen av kurven. Det er imidlertid vanskelig å validere denne typen modeller, men det er mulig å sammenligne resultatene fra denne modellen med resultater fra andre modeller. Hofstad (1991) antok at *K* var 2000 mill m³, basert på hva som er påregnelig maksimalt tømmervolum pr arealenhet. Med de dataene han brukte fra Landsskogtakseringen ga det en iboende tilvekst på 0,04.

Norge har en klimaavtale med EU som også omfatter skogsektoren. Utviklingen i årlig hogst og stående volum frem til 2100 ble i den forbindelse beregnet av NIBIO (Antón-Fernández og Astrup, 2019). Dette er presentert i Klima- og miljøverndepartementet

(2020). Hvis vi bruker den samme avvirkningsbanen i modellen presentert ovenfor, får vi et avvik på omtrent 150 mill m³ i stående volum i 2100 – en forskjell på i størrelsesorden 8 prosent. Dette er godt innenfor den statistiske usikkerheten i modellen, jevnfør konfidensintervallet for K ovenfor.

Ifølge Svensson mfl. (2021) dekker skogene som inngår i registreringene for 2017 omtrent 121 910 km². Hvis vi fordeler bæreevnen jevnt utover dette arealet, får vi et gjennomsnittlig stående volum på nesten 180 m³/ha². Tallene fra rapporten viser at dagens hogstmodne skog (hogstklasse 5) har en tetthet på ca 120 m³/ha. Den skogen som er litt yngre (hogstklasse 4) og som nesten utelukkende er såkalt kulturskog, har en tetthet på 147 m³/ha. Dette er skog som ikke er fullt «utvokst» ennå. Det er derfor sannsynlig at det er mulig å nå 180 m³/ha i gjennomsnitt dersom vi lar skogen stå og vokse urørt lenge nok.

Toppunktet på kurvene er det vi kan kalle maksimalt langsiktig balansekvantum, dvs det høyeste volumet vi kan ta ut av skogen uten noen gang å måtte redusere det. Kurven er symmetrisk rundt toppunktet, dvs at det stående volum for toppunktet er $K/2$. Bruker vi dette inn i formelen for tilvekst, finner vi at maksimal tilvekst er $i*K/4$. Med andre ord er det langsiktige balansekvantumet omtrent 26 mill m³/år. Studier som har beregnet nasjonalt brutto balansekvantum har steget fra ca 15 mill m³/år på slutten av 90-tallet til nesten 20 mill m³/år for omtrent 10 år siden (Bergseng mfl., 2012; Hobbestad, 2002; Hoen mfl., 1998; Aalde og Gotaas, 1999). Siden hogsten har vært langt lavere enn tilveksten også det seneste tiåret, har balansekvantumet steget ytterligere. Denne enkle modellen treffer altså nokså bra på dette punktet.

SKOGEN PRODUSERER MANGE VARER OG TJENESTER

Skogen produserer en lang rekke økosystemtjenester utover tømmer. Felles for de fleste er at de ikke omsettes i markeder, men likevel har en verdi. Noen av disse tjenestene og verdiene vil i liten grad være påvirket av aktivitetsnivået i skogbruket eller stående volum. Andre vil være påvirket av aktivitet på liten/lokal skala – slik som en del rødlistede arter. Mange av disse artene er knyttet til gammel skog. Noe av dette er knyttet til mengden død ved, og særlig grov død ved, som er viktig for mange insekter, sopper, osv. Modellen fanger ikke eksplisitt opp slike ting, men jo lengre mot høyre vi er i figuren ovenfor, desto mer gammel skog og generelt mer død ved er det.

Hovedspørsmålet om forvaltningen av andre økosystemtjenestene utover tømmerproduksjon og karbonopptak, er hvor mye vern som er nødvendig for å sikre et ønsket nivå for disse tjenestene. I 2016 vedtok Stortinget et mål om 10 prosent skogvern i Norge. Dette skjedde i forbindelse med behandlingen av Stortingsmelding 14 (2015-2016) Natur for livet: «Stortinget ber regjeringen sette et mål om vern av både offentlig eid skog og frivillig vern av privateid skog til 10 pst. av skogarealet.» Om lag 4 prosent av skogarealet og stående volum er vernet i dag (Svensson mfl., 2021).

² ha = hektar = 10 000 m²

Dersom det arealet som vernes er jevnt fordelt i skogene, vil dette bety en tilsvarende reduksjon i bæreevnen for skog tilgjengelig for hogst. Den totale bæreevnen er en funksjon av egenskapene til arealet skogen vokser på – slik som næringstilgang og klima – og når vi verner arealer blir potensialet redusert hvis vi tar som forutsetning at det vernede arealet ikke kan brukes til tømmerproduksjon. Det vernede arealet vil fortsette å vokse til det når en likevekt, dvs bæreevnen for det vernede arealet.

Når det vernede arealet velges tilfeldig vil den iboende tilvekstraten, i , ikke bli påvirket. Dette betyr at 10 prosent skogvern vil redusere K med 10 prosent, noe som igjen vil redusere maksimalt langsiktig balansekvantum med 10 prosent, dvs en reduksjon på 2,6 mill m³/år. Det er vanskelig å se at dette vil utgjøre en viktig restriksjon for skogsektoren i Norge.

Skogeierne er gjennom skogbrukslovgivningen (Skogloven med forskrifter) pålagt å ta hensyn til blant annet miljøverdier og friluftsliv i utøvelsen av skogbruket. I tillegg har en del eiere andre mål for skogbruket i tillegg til tømmerproduksjon og inntekt. Dette gjelder kanskje særlig bynære kommuneskoger hvor det tilrettelegges for friluftslivet. Søgaard mfl. (2012) har gjort beregninger av arealet og volumet i norske skoger som er påvirket av ulike hensyn. De fant at litt over 30 prosent av arealet og om lag 15 prosent av volumet, er påvirket av slike lov- og selvpålagte miljøhensyn.

I den videre analysen vil vi bare se på tømmerproduksjon og opptak av CO₂ gjennom tilveksten i skogene. Det er likevel viktig å ha de andre økosystemtjenestene som et bakteppe.

EN ENKEL SAMFUNNSØKONOMISK ANALYSE

Hvordan skal vi sette opp den samfunnsøkonomiske analysen av forvaltningen av skog? Dette kan selvsagt gjøres på et utall måter, men Finansdepartementet (2021) har laget et rundskriv som «fastsetter prinsipper og krav som skal følges ved gjennomføringen av samfunnsøkonomiske analyser og andre økonomiske utredninger av statlige tiltak.» Rundskrivet sier blant annet at vi skal bruke priser og kostnader som reflekterer ressursens beste alternative bruk. Dette betyr at vi skal bruke markedspriser der dette finnes.

Rundskrivet forteller også hvilke diskonteringsrente vi skal bruke når vi skal sammenligne inntekter og utgifter som kommer på ulike tidspunkter: de første 40 årene skal vi bruke 4,0 prosent p.a., de neste 35 årene 3,0 prosent og etter 75 år skal vi bruke 2,0 prosent. Diskonteringsrenten er gitt som risikojustert realrente. Stern-rapporten (Stern, 2007) argumenterer for en enda lavere rentefot – ned mot 1 prosent. Som rundskrivet antyder, er det en sammenheng mellom avkastningskrav og tidshorisont. Derfor er også 1 prosent inkludert her siden vi også skal se skogen i et evighetsperspektiv.

Opptak og utslipp av CO₂ «måler» vi gjennom nettotilveksten i skogen. Eventuelle effekter av lagring i treprodukter og/eller at bruken av tømmer fortrenger fossilt karbon og dermed gir lavere utslipp, legger vi inn i tømmerverdien. Når det gjelder verdien av opptak og utslipp av karbon fra skog sier rundskrivet at «Analysene skal anvende en karbonpris som angis i årlig oppdaterte prisbaner fra Finansdepartementet.» Den gjeldende prisbanen blir publisert på regjeringens nettside (Regjeringen, 2021). For å

forenkle analysen, vil vi imidlertid anta en fast pris på CO₂. Hvilken betydning denne forenklingen har, vil bli diskutert kort avslutningsvis i artikkelen.

Rundskrivet sier ingen ting om mål for forvaltning av skog. Å sette mål er et politisk valg som et departement på generelt grunnlag ikke mener noe om. Vi står derfor fritt i vårt valg av forvaltning, og her skal vi maksimere nåverdien fra uttak av tømmer og opptak og lagring av karbon i skogene fra nå og til evig tid.

Optimeringsproblemet kan, når vi bruker kontinuerlig tid, formuleres som:

$$\text{Max } NV = \int_{t=0}^{\infty} [p_h h(t) + p_c \{F(X(t)) - h(t)\}] e^{-\rho t} dt \quad [2]$$

$$\dot{X} = F(X(t)) - h(t) \quad [3]$$

$$X(0) = \bar{X} \quad [4]$$

hvor NV er nåverdien, t er tidspunkt (år), p_h er netto tømmerverdi (kr/m³), $h(t)$ er avvirkning i år t (mill m³), p_c er verdien av CO₂-opptak i skogen (kr/m³), $F(X(t))$ er brutto-tilvekst (mill m³) som funksjon av stående volum, $X(t)$ (mill m³), og ρ er avkastningskravet³. \dot{X} er den deriverte av stående volum mht. tid, dvs. årlig nettotilvekst og kan brukes til å regne ut netto endring i lagret karbon og CO₂ i norske skoger. Ligning [4] sier at det stående volumet ved tidspunkt 0 er en gitt størrelse, dvs hvis vi starter optimeringen i dag er $X(0) \approx 1\,000$ mill m³, jf datapunktet lengst til høyre i Figur 1. Verdien av tømmeret kan omfatte også verdien av substitusjon av fossilt karbon og langvarig karbonlagring i bygningsmaterialet osv. Vi kommer tilbake til dette senere.

Hamiltonfunksjonen for dette optimeringsproblemet er gitt ved:

$$\tilde{H} = p_h h(t) + p_c \{F(X(t)) - h(t)\} + \mu(t) \{F(X(t)) - h(t)\} \quad [5]$$

Maksimumsprinsippet⁴ gir (Chiang, 1992):

$$\frac{\partial \tilde{H}}{\partial h} = p_h - p_c - \mu = 0 \Leftrightarrow \mu = p_h - p_c \quad [6]$$

$$\dot{\mu} = \rho\mu - \frac{\partial \tilde{H}}{\partial X} = \rho\mu - (p_c + \mu)F' \quad [7]$$

Kombinerer vi disse to får vi

$$\dot{\mu} = \rho(p_h - p_c) - p_h F' \quad [8]$$

I tillegg har vi at

$$\frac{\partial \tilde{H}}{\partial \mu} = \dot{X} = F(X) - h \quad [9]$$

³ Optimeringsproblemet er formulert i kontinuerlig tid, og vi bruker dermed også kontinuerlig diskontering. Rentekravet i rundskrivet fra Finansdepartementet er gitt som årlige renter, og vi skulle egentlig gjort et fratrekk for å korrigere for dette. Denne korrigeringen øker med økende rentefot, men ved 4 prosent p.a. er den under 0,1 prosentpoeng. Vi ser derfor bort fra dette her.

⁴ For å gjøre notasjonen letter, er tid droppet i funksjonsuttrykkene for $X(t)$, $h(t)$ og $\mu(t)$. F' betyr $F(X(t))$ derivert med hensyn på $X(t)$.

I vårt oppsett har vi antatt at prisene er konstante. Dette betyr at μ er konstant (ligning [6]), og dermed er $\dot{\mu}=0$. Optimalitetsbetingelsen kan nå skrives som

$$F' = \rho \left(1 - \frac{p_c}{p_h} \right) \quad [10]$$

Dette definerer implisitt et optimalt stående volum som ligger fast. Den eneste måten å oppfylle det at stående volum er konstant, er å sørge for at nettotilveksten er lik null. Med andre ord, vi må hogge like mye som bruttotilveksten ($h^* = F(X^*)$). Hvis tilvekstfunksjonen er som antatt ovenfor, er optimalt stående volum gitt ved:

$$X^* = \frac{K}{2} \left(1 + \frac{\rho}{i} \left(\frac{p_c}{p_h} - 1 \right) \right) \quad [11]$$

Prisene/verdiene i modellen er antatt å være uavhengige av hogstnivå og stående volum. De norske tømmermarkedene er små, og import og eksport gjør at de nordiske markedene er integrerte (Hänninen mfl., 2007; Nyrud, 2002; Riis, 1996; Ronnila og Toppinen, 2000; Størdal og Baardsen, 2002; Størdal og Nyrud, 2003; Thorsen, 1998; Toivonen mfl., 2002). Effektene av å anta at høstingskostnaden (driftskostnadene i skogbruket) er avhengige av hvor mye som hogges og av stående volum, er vist i vedlegget.

HVA HVIS DET BARE ER TØMMER SOM HAR VERDI?

Dersom karbonopptak i skog ikke har noen verdi ($p_c = 0$), ser vi av ligning [8] at optimal stående volum er definert bare ved rentekravet, dvs $F' = \rho$. Dette gir følgende eksplisitte løsning for optimalt stående volum:

$$X^* = \frac{K}{2} \left(1 - \frac{\rho}{i} \right) \quad [12]$$

Rentekravet er vanligvis ikke-negativt, og dermed må $F' \geq 0$ og $X^* \leq K/2$. Vi skal med andre ord holde oss til venstre for toppunktet (Figur 1) dersom bare tømmer har verdi. Det følger også av denne betingelsen at jo høyere avkastningskrav vi har, jo lengre ned på kurven skal vi være. Eller sagt på en annen måte, et høyere avkastningskrav gir et lavere optimalt stående volum.

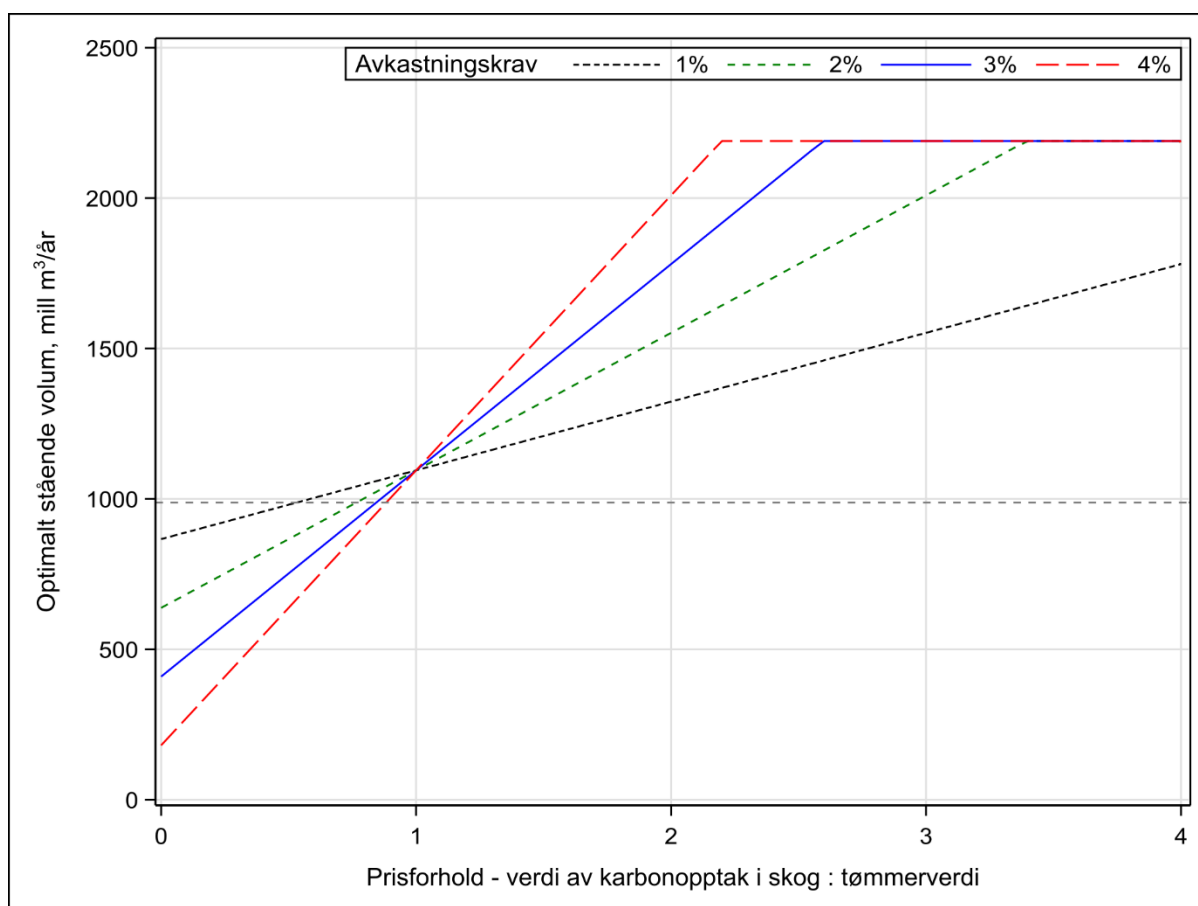
Optimalt stående volum synker med stigende avkastningskrav. Dette ser vi fra $\partial X^*/\partial \rho = -K/2i < 0$. Intuisjonen bak dette er at når rentekravet stiger, øker også kapitalkostnaden på stående kapital. Det vil derfor lønne seg å redusere stående volum. Dette betyr også at optimal årlig hogst reduseres når rentefoten øker. For ett enkelt skogbestand vil økonomisk hogstaldet synke med stigende rente (Amacher mfl., 2009; Hyytiäinen og Tahvonen, 2003), og det betyr en reduksjon i stående volum ved avvirkning. Dette vil gjelde for alle skoger, slik at totaleffekten blir slik som i modellen her.

Ovenfor definerte vi parameteren i som skogen iboende tilvekst. Det gir derfor mening at vi skal "likvidere" skogen når vårt krav til avkastning overgår den avkastning skogen kan gi, dvs når $\rho \geq i$. Det er ikke gjennomført systematiske lønnsomhetsvurderinger av skogbruket i Norge, men internrenta for bestandsskogbruk med planting ligger sannsynligvis godt under 5 prosent p.a.

NÅR OGSÅ KARBONBINDING HAR EN VERDI

Når både tømmer og karbonopptak har en verdi, er det forholdet mellom disse som avgjør optimal tilpasning. Vi ser at høyresiden i ligningen [10] skifter fra å være positivt til å være negativt når prisforholdet passerer 1, dvs når verdien av karbonopptak i skogen målt i kr/m³ tømmer blir større enn tømmerverdien. Når karbonopptak har en høyere verdi enn tømmer får vi en tilpasning langs kurven til høyre for toppunktet i Figur 1.

Dersom karbonlagring i skog har samme verdi som tømmeret, dvs at prisforholdet er lik 1, er det optimalt å maksimere den løpende produksjonen. Dette betyr at vi er i toppunktet i Figur 1. Fangst og lagring av karbon kan bare skje én gang uten at karbonet slippes ut igjen, mens tømmerproduksjon kan skje løpende. Siden målet vårt er å maksimere nåverdien med en uendelig tidshorisont, vil det å produsere mest mulig tømmer over tid være det mest lønnsomme.



Figur 2. Optimalt stående volume (mill m³) på det produktive skogarealet i Norge gitt ulike avkastningskrave prisforhold mellom karbonopptak i skog og tømmer. Horisontal stiplet linje er dagens stående volum.

Gjennomsnittlig tømmerpris levert bilvei har for de seneste fem årene vært 395 kr/m³ regnet i pengeverdien i 2020 (SSB, 2021b). Det finnes ikke offisiell statistikk for kostnadene for hogst og kjøring, men basert på tall i Vennesland mfl. (2013), kan vi anslå disse til 135 kr/m³. Dette gir et dekningsbidrag (rånetto) på 260 kr/m³. I tillegg bidrar trevirke til å redusere bruken av fossilt karbon, og denne effekten er omtrent 0,4 tonn CO₂-ekvivalenter/m³ tømmer (Leskinen mfl., 2018). I regjeringens prisbane (Regjeringen

2021) er kalkulasjonsprisen for «Opptak og utslipp fra skog- og arealbruk» litt over 600 kr/tonn CO₂-ekvivalenter frem mot 2030. Til sammen gir dette tømmer en verdi på rundt 500 kr/m³ (396 kr/m³ – 135 kr/m³ + 0,4 tonn CO₂/m³ * 600 kr/tonn CO₂ = 501 kr/m³).

Tilveksten i modellen er regnet i form av tømmer. Biomassen i stammen utgjør normalt omtrent halvparten av den totale biomassen. 50 prosent av tørrstoffet i trevirke er karbon, og egenvekten er i snitt rundt 400 kg tørrstoff/m³. Til sammen betyr dette at når stående volum øker med 1 m³, øker lagret mengde CO₂ med omtrent 1,5 tonn. Dette gir nettotilveksten en verdi på om lag 900 kr/m³ (= 1,5 tonn CO₂/m³ * 600 kr/tonn CO₂) i form av karbonfangt i skogen.

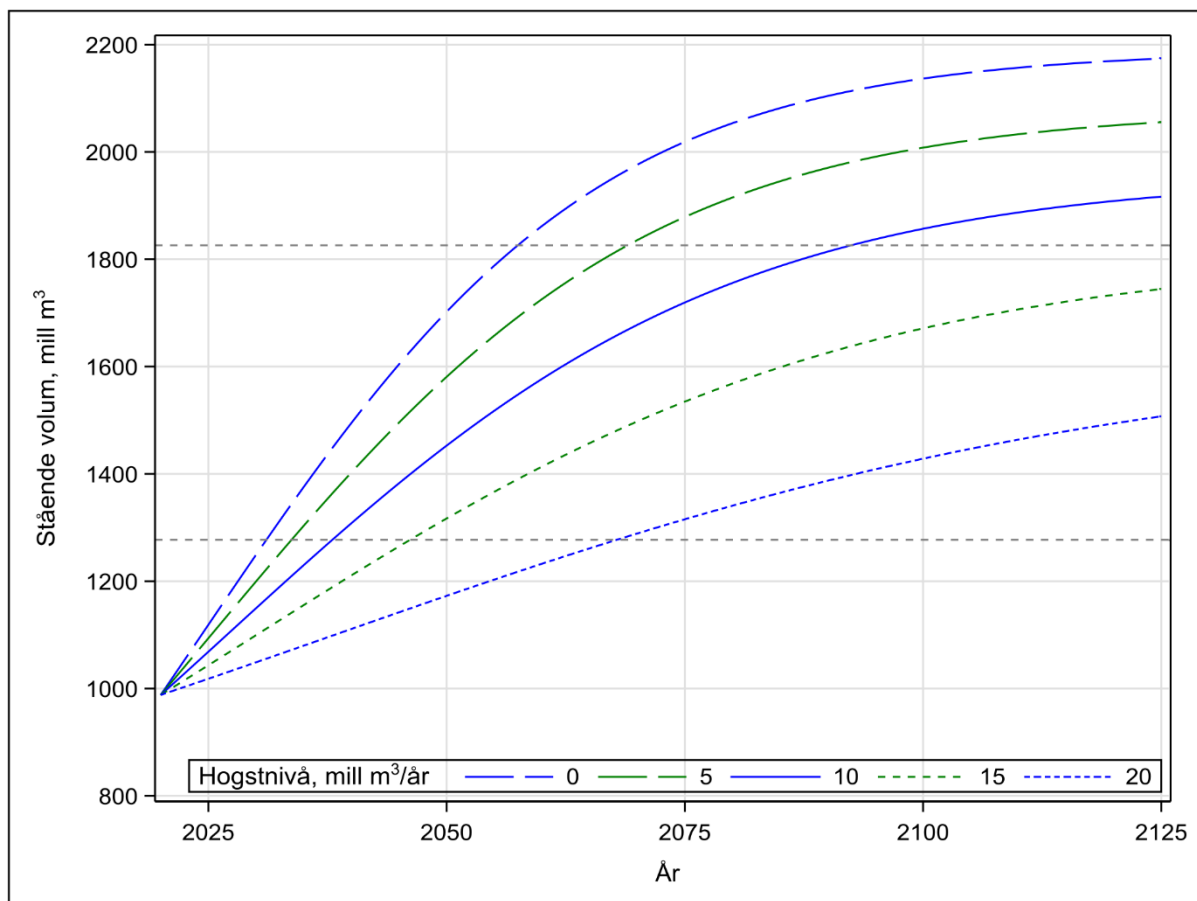
Forholdet mellom verdien av tilvekst i skogen for karbonfangt og verdien ved uttak av tømmer til materialer og substitusjon (p_c/p_h i ligning [10] og [11]) er med disse forutsetningene 1,8 (= 900 kr/m³/500 kr/m³). Dette prisforholdet gir et stående volum på 1278 mill m³ ved 1 prosent rentekrav og 1826 mill m³ ved 4 prosent i den langsiktige likevekten. Med andre ord er det optimalt å bygge opp volumet med mellom 29 og 84 prosent med dette prisforholdet. Det er usikkerhet knyttet til verdien av karbonlagring i skog og tømmer. Objektfunksjonen er lineær i prisene, noe som indikerer risikonøytralitet og at vi kan bruke forventningsverdier. Tilfeldige variasjoner i prisene er dermed ikke en utfordring.

Når Hamiltonfunksjonen er lineær i kontrollvariabelen – i vårt tilfelle hogst – har vi det som kalles bang-bang-kontroll⁵. Enkelt forklart betyr dette at vi skal hogge mest mulig eller minst mulig slik at vi raskest mulig kommer til likevekten. Grovt sett kan vi ut fra Figur 2 si at dersom karbonbinding er mer verdt enn tømmer, skal vi bygge opp stående volum, dvs hogge minst mulig til vi når optimalt nivå. Motsatt dersom prisforholdet er under 1 – vi skal hogge mest mulig.

SKOGEN VOKSER LANGSOMT

Nivået på hogsten vil avgjøre hvor lang tid det tar før vi når den langsiktige likevekten, som igjen avhenger av rentekravet og prisforholdet mellom karbonlagring og tømmer. Tar vi utgangspunkt i regneeksempelet ovenfor, kan vi lese ut av Figur 3 når vi når likevekten gitt ulike hogstnivåer og et avkastningskrav på henholdsvis 1 og 4 prosent.

⁵ Conrad og Clark (1987) kaller det “most rapid approach path” (MRAP).



Figur 3. Utvikling i stående volum, mill m³, ved ulike nivåer for fast årlig hogst. Den nederste horisontale stiplede linjen er den langsiktige likevekten ved 1 prosent avkastningskrav, mens den øvre er for 4 prosent. I begge tilfeller antas et prisforhold på 1,8.

Dersom vi slutter helt med skogbruk i Norge, vil vi nå likevektsnivået gitt av 1 prosent avkastning i 2031 og for 4 prosent i 2058. Hogger vi 10 mill m³/år når vi de tilsvarende likevektsnivåene i 2039 og 2101. Dersom hogsten ligger på 15 mill m³/år, som er i nærheten av referansenivået i klimaavtalen med EU (Klima- og miljøverndepartementet, 2020), når vi likevekten for 1 prosent i 2046 mens vi ikke når likevekten med 4 prosent krav til avkastning før langt uti neste århundre.

VERKTØYKASSA ER NESTEN TOM

På kort sikt vil det være kapasitetsbegrensninger for hogst og omsetting av tømmer i Norge. Over noen år ville det være mulig å bygge opp kapasiteten betydelig. Teknologien er allerede i bruk, så dette er i hovedsak et spørsmål om investeringer og opplæring. I den andre enden betyr minst mulig hogst i ytterste konsekvens ingen hogst. Modellen dekker imidlertid bare en liten del av økonomien – og bare en del av skogsektoren. Det å legge ned skogbruket i Norge fra en dag til den neste, vil medføre kostnader som ikke er inkludert i modellen. Det ville også være kostnader knyttet til å starte opp skogbruket etter noen år i dvale.

Norge er nettoeksportør av tømmer – både tømmer til sagbrukene og til treforedling. Det er derfor mulig å redusere hogsten uten at det nødvendigvis går utover industri-

produksjonen i Norge. Nettoeksporten av sagtømmer var i perioden 2015-2020 i gjennomsnitt 1,2 mill m³/år (SSB, 2021c). Siden sagtømmer utgjør omtrent halvparten av den totale hogsten i Norge, er det mulig å redusere hogsten med i alle fall 2,5-3 mill m³/år med små effekter for eksisterende skogindustri. Redusert norsk eksport vil føre til økt hogst i andre land. Denne økningen, ofte kalt karbonlekkasje, er beregnet til å være mellom 60 og 100 prosent av redusert norsk eksport (Kallio og Solberg, 2018). Vi holder oss imidlertid her primært til det nasjonale perspektivet.

Det er neppe politisk vilje eller ønske om å legge sterke restriksjoner på skogeierne når det gjelder hogst. Stortinget har fått sterk kritikk av Riksrevisjonen for blant annet å ikke følge opp målene om hogst i Norge (Riksrevisjonen, 2012). Det er likevel svært få virkemidler som har effekt på kort sikt og som ikke griper inn i privat eiendomsrett eller som er i strid med internasjonale avtaler som EØS- og WTO-avtalen.

For skogeierne er karbonlagring i stor grad en positiv eksternalitet. Dersom skogeierne møter de samme prisene som samfunnet, vil det i større grad være et sammenfall mellom det skogeierne gjør og det ønskede utfallet sett fra samfunnets side. En måte å få til dette på er å betale skogeieren for karbonopptak i skogen. Dette vil gi insentiver til å utsette hogsten, men vil ha liten virkning på gamle skog. For skogeieren vil verdien av karbonopptak vil være liten sammenlignet med tømmerverdien. Kapitalkostnaden ved å utsette hogsten vil derfor normalt være høyere enn ekstrainntekten fra karbonbinding. I unge skog vil karbonprising ha en effekt på hogstaldere, men ingen effekt på kort sikt. I praksis kan bang-bang-kontroll bety «vent og se» siden vi ikke har «kontroll.»

AVSLUTTENDE KOMMENTARER

Regjeringen Støre ønsker å øke aktiviteten i skogbruket, noe som innebærer økt hogst. Den sier også at den ønsker å balansere uttaket av tømmer mot klima og miljø. Den samfunnsøkonomiske analysen gjennomført ovenfor peker i retning av redusert fremfor økt hogst på kort sikt for å balansere hensynet mot klima når vi bruker konstante priser.

Modellen bygger på dagens struktur i skogene. På kort og lang sikt er det mange tiltak som kan øke produksjonspotensialet – både *i* og *K* i modellen ovenfor. Stortingsmelding 13 (2020–2021) Klimaplan for 2021–2030 inneholder vurdering av mange ulike tiltak, men det er bare redusert hogst (økt hogstaldere) og gjødsling av skog som har vesentlig effekt på kort sikt (2030).

Prisene er antatt å være konstante i modellen, noe som neppe stemmer. På (veldig) lang sikt kan det likevel tenkes at prisen på tømmer og verdien/prisen av CO₂-utslipp og -opptak stabiliseres. Som vist ovenfor, kan det ta lang tid før vi eventuelt når disse langsiktige likevektene, og det er på sin plass å diskutere hva som kan skje på litt kortere sikt.

Dersom verden mener alvor med å bli karbonnøytral på ett tidspunkt må mye fossilt karbon erstattes av fornybart karbon. Dette vil føre til økt pris på tømmer. Trømborg mfl. (2020) viser en realprisøkning på massevirke på rundt 25 prosent og rundt 7 prosent for sagtømmer fra 2020 til 2040 i et scenario for grønn omstilling i Norden. Effekten er med andre ord moderat.

De høye energiprisene – særlig strømprisen i Sør-Norge – vi har hatt i vinter forventes å vare i noen år. Dette vil gjøre bioenergi mer lønnsomt, og det vil kunne påvirke tømmerprisene. I stor grad er det de delene av trærne som ikke kan brukes til industriell foredling (cellulosemasse, papir, byggematerialer osv.) som blir brukt til energi. Økt etterspørsel etter bioenergi vil kunne føre til økt konkurranse om massevirket og dermed økt pris. Likevel, dette tømmeret utgjør om lag 30 prosent av den totale førstehåndsverdien av tømmer i Norge, og det skal mye til for at det skal gi en vesentlig økning i den gjennomsnittlige tømmerprisen.

I prisbanen fra regjeringen øker kalkulasjonsprisen for CO₂ med 8 prosent per år i perioden 2030-2040, 4 prosent i perioden 2040-2060 og 3 prosent i perioden 2060-2090. Det er viktig å understreke at dette er realprisendringer. Dette gjør at prisen i 2050 er omtrent tre ganger dagens pris og hele 14 ganger i 2100. Når prisen på CO₂ er høyere enn tømmerverdien og stiger mer enn avkastningskravet, vil det være lønnsomt å tømme skogen for trær raskest mulig for så å la den vokse opp igjen. Kostnaden vi må bære i dag for økt utslipp fra skogen, får vi igjen når ny skog vokser opp og verdien av fangst og lagring samtidig øker.

En slik politikk vil føre til store tap av miljøverdier slik som biologisk mangfold, og vil føre til en naturkrise også i Norge. Det er derfor usannsynlig at dette kan bli vedtatt skogpolitikk. Parisavtalen og Norges klimaavtale med EU gjør også en slik politikk vanskelig å selge – selv om det ligger muligheter til å kjøpe seg ut av forpliktelsene i avtalene.

I denne sammenhengen er det også naturlig å nevne EUs taksonomi for bærekraftige investeringer. Den skal gi bedrifter og investorer kriterier for hvilke aktiviteter som er miljømessig bærekraftige og de omfatter skogbruk. En hogst som reduserer opptak og lagring av karbon i skogene og samtidig har negative effekter på biologisk mangfold, vil bryte flere av kriteriene i taksonomien og dermed bli stemplet som ikke-bærekraftig. Det vil bli vanskelig å selge tømmer fra slik hogst i EU/EØS-området.

Dersom CO₂prisen stabiliserer seg etter 2100, dvs 8762 kr/tonn, er det åpenbart at vi bør slutte med skogbruk. Imidlertid, en så høy pris indikerer at vi ikke har klart å gjøre de systemendringene som skal til for å omstille oss til en grønn fremtid. Således er prisbanen fra regjeringen dyster lesing.

REFERANSER

Amacher, G. S., E. Koskela, og M. Ollikainen (2009). *Economics of forest resources*. The MIT Press.

Antón-Fernández, C. og R. Astrup (2019). *SiTree: single tree simulator*.

Arbeiderpartiet og Senterpartiet. (2021). Hurdalsplattformen - For en regjering utgått fra Arbeiderpartiet og Senterpartiet 2021-2025.

Bergseng, E., T. Eid, P.K. Rørstad og E. Trømborg (2012). Bioenergiressurser i skog – kartlegging av økonomisk potensial. Rapport, 32/2012. Norges vassdrags- og energidirektorat.

Chiang, A. C. (1992). *Elements of dynamic optimization*. New York: McGraw-Hill.

- Clark, C. W. og G. R. Munro (1975). The economics of fishing and modern capital theory: A simplified approach. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2 (2): 92-106.
- Conrad, J. M. og C. W. Clark (1987). *Natural resource economics : notes and problems*. Cambridge University Press.
- Eid, T. og K. Hobbelstad (2000). AVVIRK-2000: A Large-scale Forestry Scenario Model for Long-term Investment, Income and Harvest Analyses. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 15 (4): 472-482.
- Finansdepartementet. (2021: R-109/2021). Prinsipper og krav ved utarbeidelse av samfunnsøkonomiske analyser mv. Rundskriv R-109/2021.
- Fisher, A. C. (2020). *Lecture Notes on Resource and Environmental Economics*. Springer International Publishing.
- Gobakken, T., N. L. Lexerød og T. Eid (2008). T: A forest simulator for bioeconomic analyses based on models for individual trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23 (3): 250-265.
- Hobbelstad, K. (2002). Framtidig virkestilgang. Aktuelt fra skogforskningen, 7/02. Ås: Norsk institutt for skogforskning.
- Hoen, H. F. og T. Eid (1990). En modell for analyse av behandlingsalternativer for en skog ved bestandssimulering og lineær programmering. Rapport fra Norsk institutt for skogforskning 9/90.
- Hoen, H. F., T. Eid og P. Økseter (1998). Økonomiske konsekvenser av tiltak for et bærekraftig skogbruk. Resultater på landsbasis. *Rapport fra skogforskningen*, 8/98. Norsk institutt for skogforskning
- Hofstad, O. (1991). Optimal harvest and inventory of Norwegian forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 6 (1-4): 551-558.
- Holmgren, P. (2021). Time to dispel the forest carbon debt illusion: FutureVistas AB.
- Holtmark, B. (2012). Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climatic Change*, 112 (2): 415-428.
- Hyytiäinen, K. og O. Tahvonen (2003). Maximum Sustained Yield, Forest Rent or Faustmann: Does it Really Matter? *Scandinavian Journal of Forest Research*, 18 (5): 457-469.
- Hänninen, R., A. Toppinen og R. Toivonen (2007). Transmission of price changes in sawnwood and sawlog markets of the new and old EU member countries. *European Journal of Forest Research*, 126 (1): 111-120.
- Kallio, A. M. I. og B. Solberg (2018). Leakage of forest harvest changes in a small open economy: case Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33 (5): 502-510.
- Klima- og miljøverndepartementet. (2020). National Forestry Accounting Plan for Norway, including forest reference level for the first commitment period 2021-2025. Revised version 9 November 2020.
- Leskinen, P., G. Cardellini, S. González-García, E. Hurmekoski, R. Sathre, J. Seppälä, C. Smyth, T. Stern og P. J. Verkerk (2018). Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. From Science to Policy 7. European Forest Institute.
- Limaie, S. M., Lohmander, P. & Olsson, L. (2017). Dynamic growth models for continuous cover multi-species forestry in Iranian Caspian forests. *Journal of Forest Science*, 63 (11): 519-529.
- Nyrud, A. Q. (2002). Integration in the Norwegian pulpwood market: domestic prices versus external trade. *Journal of Forest Economics*, 8 (3): 213-225.

- Reed, L. J. og R. Pearl (1927). On the Summation of Logistic Curves. *Journal of the Royal Statistical Society*, 90 (4): 729-746.
- Regjeringen. (2021). *Karbonprisbaner for bruk i samfunnsøkonomiske analyser*. Tilgjengelig på: <https://www.regjeringen.no/no/tema/okonomi-og-budsjett/statlig-okonomistyring/karbonprisbaner-for-bruk-i-samfunnsokonomiske-analyser/id2878113/>.
- Riis, J. (1996). Forecasting Danish Timber Prices with an Error Correction Model. *Journal of Forest Economics*, 2: 257-271.
- Riksrevisjonen. (2012). Riksrevisjonens undersøkelse av bærekraftig forvaltning av norske skogressurser. Dokument 3:17 (2011-2012).
- Ronnala, M. og A. Toppinen (2000). Testing for oligopsony power in the Finnish wood market. *Journal of Forest Economics*, 6: 7-22.
- SAS Institute Inc. (2011). *SAS/STAT 9.3 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Siipilehto, J., M. Allen, U. Nilsson, A. Brunner, S. Huuskonen, S. Haikarainen, N. Subramanian, C. Anton-Fernandez, E. Holmstrom, K. Andreassen mfl. (2020). Stand-level mortality models for Nordic boreal forests. *Silva Fennica*, 54 (5).
- SSB. (2021a). Tabell 06289: Stående kubikkmasse under bark, og årlig tilvekst under bark, etter treslag (1 000 m³) 1933 - 2020. <https://www.ssb.no/statbank/table/06289>
- SSB. (2021b). Tabell 07413: Gjennomsnittspris, etter sortiment (kr per m³) 2006 - 2020. <https://www.ssb.no/statbank/table/07413>
- SSB. (2021c). Tabell 08801: Utenrikshandel med varer, etter import/eksport, år, varenummer og statistikkvariabel. <https://www.ssb.no/statbank/table/08801>
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Størdal, S. og S. Baardsen (2002). Estimating price taking behavior with mill-level data: the Norwegian sawlog market, 1974-1991. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, 32 (3): 401-411.
- Størdal, S. og A. Q. Nyrud (2003). Testing roundwood market efficiency using a multivariate cointegration estimator. *Forest Policy and Economics*, 5 (1): 57-68.
- Svensson, A., R. Eriksen, G. Hysten og A. Granhus (2021). Skogen i Norge. *NIBIO Rapport 7/142/2021*, 7/142/2021: Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO).
- Søgaard, G., R. Eriksen, R. Astrup og B.-H. Øyen (2012). Effekter av ulike miljøhensyn på tilgjengelig skogareal og volum i norske skoger. *Rapport 02/2012*. Ås: Norsk institutt for skog og landskap.
- Thorsen, B. J. (1998). Spatial integration in the Nordic timber market: Long-run equilibria and short-run dynamics. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 13 (4): 488-498.
- Toivonen, R., A. Toppinen og T. Tilli. (2002). Integration of roundwood markets in Austria, Finland and Sweden. *Forest Policy and Economics*, 4 (1): 33-42.
- Trømborg, E., H. K. Sjølie, E. Bergseng, T. F. Bolkesjø, O. Hofstad, P. K. Rørstad, B. Solberg, K. Sunde, mfl. (2011). Carbon cycle effects of different strategies for utilisation of forest resources - a review. Institutt for naturforvaltning, Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- Trømborg, E., E. O. Jåstad, T. F. Bolkesjø og P. K. Rørstad (2020). Prospects for the Norwegian Forest Sector: A Green Shift to Come? *Journal of Forest Economics*, 35: 305-336.
- Vennesland, B., A. E. Hole, L. Kjølsten og L. R. Gobakken (2013). *Prosjektrapport Klimatre : energiforbruk og kostnader - skog og bioenergi*. Rapport fra Skog og landskap, vol. 14/2013. Norsk institutt for skog og landskap.

Aalde, H. og P. Gotaas (1999). Klargjøring av avvirkningsmuligheter i norsk skogbruk: nasjonal rapport. *Rapport*, 10. Ås: Norwegian Institute of Land Inventory.

VEDLEGG

Optimeringsproblemet når hogstkostnaden er avhengig av hogstnivå og stående volum

Hvis vi antar at kostnadene ved hogst av tømmer er en funksjon av hogstnivå og stående volum, $C(h(t), X(t))$, kan Hamiltonfunksjonen skrives som:

$$\tilde{H} = p_h h(t) - C(h(t), X(t)) + p_c \{F(X(t)) - h(t)\} + \mu \{F(X(t)) - h(t)\} \quad [13]$$

Maksimumsprinsippet gir:

$$\frac{\partial \tilde{H}}{\partial h} = p_h - \frac{\partial C}{\partial h} - p_c - \mu = 0 \Leftrightarrow \mu = p_h - \frac{\partial C}{\partial h} - p_c \quad [14]$$

$$\dot{\mu} = \rho \mu - \frac{\partial \tilde{H}}{\partial X} = \rho \mu + \frac{\partial C}{\partial X} - (p_c + \mu) F' \quad [15]$$

Kombinerer vi disse to får vi

$$\dot{\mu} = \rho \left(p_h - \frac{\partial C}{\partial h} - p_c \right) + \frac{\partial C}{\partial X} - \left(p_h - \frac{\partial C}{\partial h} \right) F' \quad [16]$$

I en likevekt er $\dot{\mu}=0$, og vi kan skrive optimalitetsbetingelsen som:

$$F' = \rho \left(1 - \frac{p_c}{p_h - \frac{\partial C}{\partial h}} \right) + \frac{\frac{\partial C}{\partial X}}{p_h - \frac{\partial C}{\partial h}} \quad [17]$$

Dersom kostnadsfunksjonen er separabel i stående volum og hogst, vil marginalkostnaden i det første leddet ikke påvirkes av X . Hvis vi videre antar at marginalkostnaden er konstant, kan vi tolke det første leddet på tilsvarende måte som ovenfor. Brøken er verdien av karbonopptak i skogen delt på nettoverdien av tømmer (= pris minus driftskostnader).

Nevneren i det siste leddet er positiv. Dette betyr at fortegnet til det siste leddet er avhengig av hvordan hogstkostnadene endrer seg når stående volum endrer seg. Det vil være naturlig å tenke seg at kostnaden for hogst går ned når det stående volum øker, alt annet likt. Det betyr at det siste leddet har negativt fortegn, og det betyr at det optimale stående volumet i likevekten er større enn situasjonen vi så på ovenfor.

Variansdekomponering i den statistiske modellen

Tabell 2. Variansdekomponering.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Approx Pr > F
Model	2	16903.7	8451.8	5051.94	<.0001
Error	30	50.1897	1.6730		
Uncorrected Total	32	16953.9			