

# SAMFUNNSØKONOMEN

Arent Skjæveland  
FINANSPOLITIKKEN

Michael Hoel  
SKOGBRUK OG KLIMA

Leiv Opstad, Hans Bonesrønning,  
Lars Fallan  
MATEMATIKKBAKGRUNN OG  
STUDIERESULTATER

Nina Alexandersen, Terje P. Hagen og  
Oddvar Kaarbøe  
ETTERSØRSEL ETTER PRIVATE  
HELSEFORSIKRINGER

Siri Valseth  
LIKVIDITET I  
STATSOBLIGASJONSMARKEDET

Lars Erik Borge, Knut Løyland,  
Ole Henning Nyhus  
HYTTEKOMMUNENES ØKONOMI

Vidar Ringstad  
FATTIGDOM I RIKE LAND





MICHAEL HOEL  
Økonomisk institutt, UiO

# Klimavirkninger av skogbruk<sup>1</sup>

Økt årlig hogst av skog vil innebære at mindre karbon blir lagret i skogen. Isolert sett er dette negativt for klimautviklingen. Økt hogst kan imidlertid ha indirekte virkninger ved at biomasse erstatter fossil energi, samt sement og stål i bygninger. Totalvirkningen kan derfor på lang sikt kanskje være gunstig for klima. Men selv om totalvirkningen av økt hogst skulle være gunstig for klima, tilsier dette likevel ikke nødvendigvis at en gjennom ulike typer virkemidler bør søke å oppnå økt hogst. Dersom bruken av fossile brensler allerede i tilstrekkelig sterk grad er regulert gjennom avgifter eller kvoter, bør en tvert imot bruke virkemidler som fremmer vern heller enn hogst av skogen.

## SKOG OG KLIMA

Skogen er et viktig lager for karbon. I følge FAO (2010) inneholder skogene i verden om lag 600 milliarder tonn karbon, mot om lag 850 milliarder tonn karbon som finnes i atmosfæren. I Norge er karbonlageret i samlet norsk skog på om lag 450 millioner tonn karbon.<sup>2</sup> Netto tilvekst i 2014 var 6,9 millioner tonn karbon, eller 25,4 millioner tonn CO<sub>2</sub>.<sup>3</sup> Dette er et betydelig tall når en sammenligner med norske utslipp på om lag 44 millioner tonn CO<sub>2</sub> i 2014.<sup>4</sup>

Den årlige hogsten i Norge utgjør bare ca 40% av brutto tilvekst (Miljødirektoratet, 2011). Dette viser at det er mulig å øke hogsten for å bruke biomassen til å lage bioenergi eller bygningsmaterialer for varig lagring i bygninger. I Miljødirektoratet (2010) diskuteres for eksempel muligheten for å øke hogsten med 50 prosent for slike formål. Det er også flere store industrielle aktører i Norge som arbeider med planer om storskala produksjon av biodrivstoff fra trevirke.

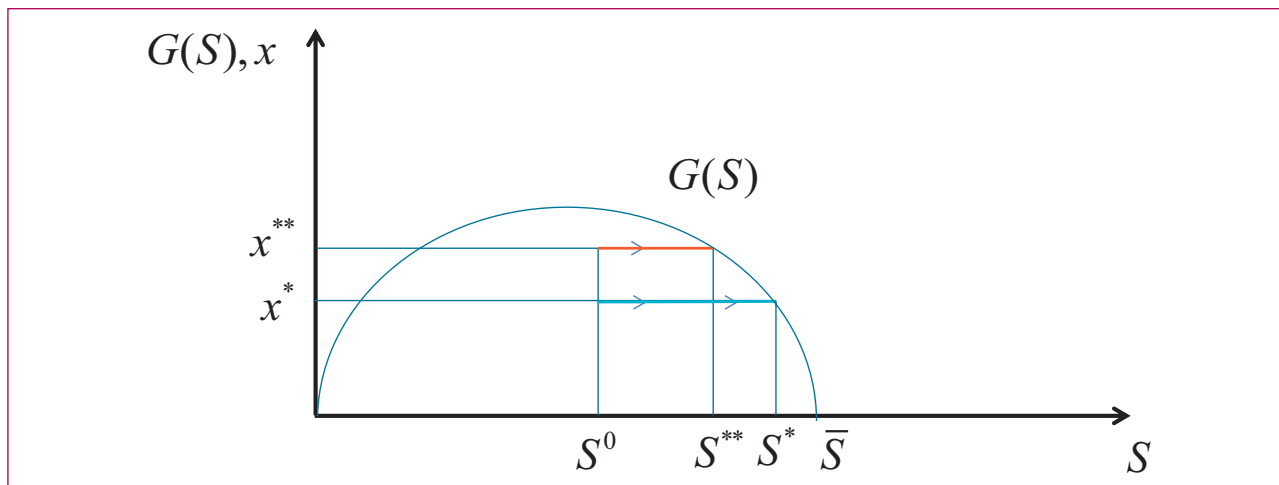
Hvilken betydning har skogbruk for klima? På den ene siden er det riktig at produkter fra skogbruk er fornybare: Utslipp av CO<sub>2</sub> fra biobrensel eller på noe sikt nedbryting av trevirke oppveies av tilveksten i skogen, slik at netto tilførsel av karbon til atmosfæren blir null. På den annen side er det også riktig at høyere konstant hogst innebærer permanent mindre karbon lagret i skogen, og derfor etterhvert mer karbon i atmosfæren. Et siste moment er at produkter

<sup>1</sup> Takk til Bjart Holtmark og anonym konsulent for nyttige innspill.

<sup>2</sup> I følge Miljødirektoratet (2011) var karbonlageret ca. 400 millioner tonn i 2008, men har vokst med ca. 7 millioner tonn per år siden da.

<sup>3</sup> SSB; det oppgitte tallet er for «Opptak og utslipp fra skog og arealer i Norge»

<sup>4</sup> Inkludert alle klimagasser var norske utslipp på 54 millioner tonn CO<sub>2</sub>-ekvivalenter i 2014.



Figur 1 Volum og tilvekst av skog

fra skogbruk kan erstatte fossil energi, samt sement og stål i bygninger, og dermed bidra til lavere utslipp av klimagasser. Formålet med denne artikkelen er blant annet å diskutere disse momentene i mer detalj, samt å se hva momentene eventuelt impliserer vedrørende virkemiddelbruk rettet mot skogbruk.

#### DIREKTE KLIMAVIRKNINGER AV SKOGBRUK

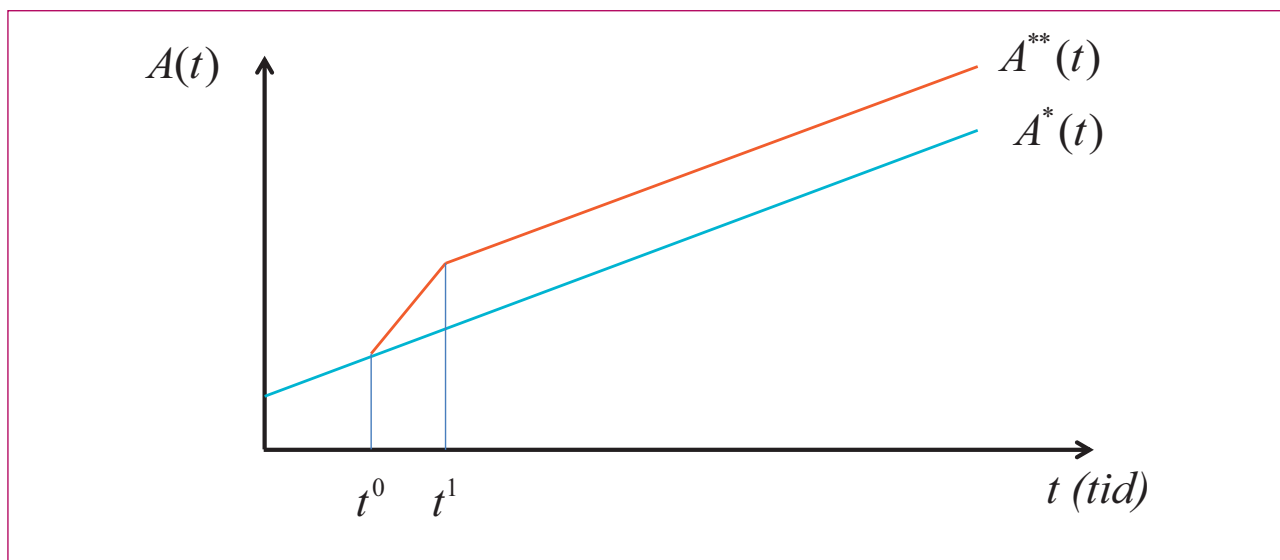
Så lenge en bare ser på de direkte virkningene av skogbruk, er det en rekke studier som viser at økt hensyn til klima tilsier lavere hogst. Viktige bidrag her er van Kooten et al. (1995) og Asante and Armstrong (2012). En svakhet ved førstnevnte arbeid er at det i liten grad tas hensyn til ulik dynamikk av karbonet fra ulike deler av hogsten. En svakhet ved sistnevnte arbeid er at analysen har et begrenset tidsperspektiv. I Hoel et al. (2014) er disse svakhetene unngått, og også her er resultatet at dersom skogsdrift er lønnsomt når en ser bort fra klimahensyn, vil hensynet til klima trekke i retning av mindre hogst. Det vises også at dersom hensynet til klima tillegges nok vekt kan det være samfunnsøkonomisk lønnsomt med hogst selv om null hogst er det mest lønnsomme når en ser bort fra hensynet til klima. Dette resultatet betinger at en betydelig del av hogsten brukes til bygninger og andre konstruksjoner med lang levetid. I resten av denne artikkelen ser jeg imidlertid bare på tilfellet hvor hogst er lønnsomt når en ser bort fra klimahensyn.

For å forklare hvorfor økt hogst isolert sett er negativt for klimaet, har jeg vist sammenhengen mellom skogens karbonlager og størrelsen på den årlige hogsten i figur 1. Her

er skogens samlede volum ( $S$ ) målt langs den horisontale akse, mens brutto og netto tilvekst av skogen er målt langs den vertikale akse. En svært forenklet beskrivelse av skogens tilvekst er at brutto tilvekst er gitt ved den biologiske vekstkurven  $G(S)$ . Uten hogst innebærer denne kurven at uansett hvor stor skogen initialt er, vil den vokse helt til volumet blir  $\bar{S}$  (siden  $G(S) > 0$  for  $S < \bar{S}$  og  $G(S) = 0$  for  $S = \bar{S}$ ). Dersom skogens volum i dag er  $S^0$  og vi har konstant årlig hogst lik  $x^*$  vil skogen vokse over tid til volumet blir  $S^*$ . Netto tilvekst er hele tiden lik den vertikale avstanden mellom  $G(S)$  og  $x^*$ . Dersom den årlige hogsten i stedet er  $x^{**}$  blir netto tilvekst lavere, lik den vertikale avstanden mellom  $G(S)$  og  $x^{**}$ . Det langsiktige volumet av skogen blir også lavere, lik  $S^{**}$ , mens det langsiktige nivået ble  $S^*$  når hogsten var  $x^*$ . Siden karbonlageret i skogen er større jo større skogens volum er, innebærer økt årlig hogst en reduksjon i det langsiktige karbonlageret i skogen. En betydelig del av det reduserte karbonlageret i skogen vil over tid havne som karbon i atmosfæren. Denne tilførselen til atmosfæren vil forekomme umiddelbart dersom biomassen fra skogen brukes som biobrensel, og gjennom nedbryting over et noe lengre tidsrom for materialer i møbler, bygninger etc. Hoel et al. (2014) gir en nærmere beskrivelse av tidshorizonten for karbontilførselen til atmosfæren for ulike deler av hogsten.

Virkningene av økt hogst på karbonmengden i atmosfæren er illustrert i figur 2. Her er tid målt langs den horisontale akse mens mengden av karbon i atmosfæren er målt langs den vertikale. Anta at utviklingen av karbon i atmosfæren er gitt ved  $A^*(t)$  ved «lav årlig hogst» ( $x^*$  i figur 1). Anta videre at vi øker den årlige hogsten på tidspunkt  $t^0$  (til





Figur 2 Direkte virkning av økt hogst på karbon i atmosfæren

$x^{**}$  i figur 1). Da får vi en ganske rask økning av karbon i atmosfæren siden nettotilveksten i skogen avtar. Som forklart i forbindelse med figur 1 vil vi uansett størrelsen på hogsten etterhvert få null nettobidrag av karbon til/fra skogen. I figur 2 har jeg antatt at vi får en økt vekst av karbon i atmosfæren fra  $t^0$  til  $t^1$ , og deretter samme vekst som før siden det blir null nettobidrag fra skogen etter  $t^1$ . (Overgangen mellom  $t^0$  og  $t^1$  vil selvsagt i virkeligheten være mer glatt enn hva den kantete figuren antyder, men hovedbildet endres ikke av dette.) Vi får derfor en permanent (og etterhvert kontant) økning i karbonmengden i atmosfæren, fra  $A^*(t)$  til  $A^{**}(t)$ .

#### INDIREKTE KLIMAVIRKNINGER AV SKOGBRUK

I rapporten «Vern eller bruk av skog som klimatiltak» (Miljødirektoratet, 2016) drøftes klimavirkningene av å drive skog versus å verne skogen. Som forklart over kan en ut fra et klimaperspektiv argumentere for at vern av skog er bedre enn hogst, siden karbonet som blir lagret i skogens biomasse blir høyere jo mindre hogst det er. Og jo mer karbon som er lagret i skogen jo mindre karbon blir det i atmosfæren, men de negative klimavirkningene dette gir.

##### *Gunstige indirekte virkninger*

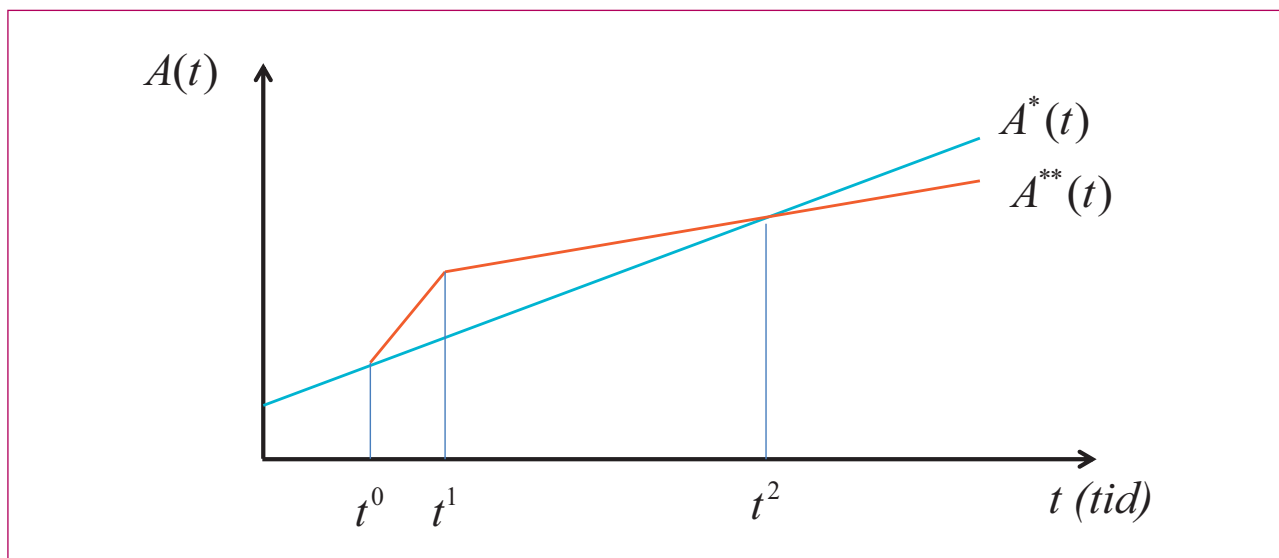
Overnevnte rapport bestrider ikke at skogbruk isolert sett er negativt for klimaet grunnet reduksjonen i skogens karbonlager som hogsten medfører. Men rapporten argumenterer for at skogbruket har en indirekte positiv virkning på klimaet: Det argumenteres for at skogprodukter erstatter

produkter som gir fossile utslipp. Eksempelene som gis er bla. at byggematerialer fra skog kan erstatte stål, aluminium og betong, som krever mer energi enn skogsdrift; og selvsagt bioenergi som kan erstatte fossil energi. Det er neppe tvil om at skogbruk har en indirekte virkning av denne typen. Rapporten argumenterer med at den indirekte effekten (lavere utslipp av klimagasser) mer enn oppveier den negative direkte effekten skogbruk har på klima.

I figur 2 har jeg sett bort fra de indirekte virkningene omtalt over og i Miljødirektoratet (2016). De indirekte virkningene tilsier at den økte hogsten, som er permanent, gir en permanent lavere vekst i karbonmengden i atmosfæren. Brattheten på kurven  $A(t)$  går altså ned som følge av økt hogst, slik at bildet blir som i figur 3 i stedet for som i figur 2. Her er det antatt at det i perioden mellom  $t^0$  og  $t^1$  blir økt vekst av karbon i atmosfæren pga den økte hogsten (akkurat som i figur 2). Etter  $t^1$  antas imidlertid de indirekte virkningene å dominere: Andre utslipp av karbon går så mye ned at veksten av karbon i atmosfæren blir lavere som følge av økt hogst. I figuren er det antatt at den lavere veksten av karbon i atmosfæren som følge av økt hogst på lang sikt (etter  $t^2$  i figur 3) innebærer et lavere nivå av karbon i atmosfæren.

##### *Kort versus lang sikt*

Miljødirektoratet (2016) mener at figur 3 gir et riktig bilde av virkningen av økt hogst. Videre argumenteres det for at det er den langsiktige mengden av karbon i atmosfæren som er viktig for klima. At det er de samlede akkumulerte



Figur 3 Total virkning av økt hogst på karbon i atmosfæren

utslippene som er av betydning for klima (langsiktig nivå på  $A(t)$  i figurene) kan bla. begrunnes med følgende sitat fra Allen et al (2009): «the relationship between cumulative emissions and peak warming is remarkably insensitive to the emission pathway (timing of emissions or peak emission rate). Hence policy targets based on limiting cumulative emissions of carbon dioxide are likely to be more robust to scientific uncertainty than emission-rate or concentration targets.»

Merk at det i sitatet vises til «peak warming», dvs. den maksimale oppvarmingen en får som følge av utslipp. Denne maksimale temperaturøkningen er helt klart av stor betydning for kostnadene og ulempene knyttet til klimaendring. Det er imidlertid også av betydning hvor raskt temperaturendringen finner sted. En rask temperaturøkning vil ganske sikkert gi større ulemper for mennesker og økosystemer enn en langsommere oppvarming, selv om «peak warming» er lik. Oppvarmingen i årene mellom  $t^0$  og  $t^2$  i figur 3 vil være raskere under  $A^{**}(t)$ -scenariet enn under  $A^*(t)$ -scenariet.

Lengden på tidsrommet  $t^2 - t^0$  vil avhenge av styrken på den indirekte effekten, altså hvor mye bruken av fossil energi går ned når tilbudet av skogprodukter. Også andre forhold er viktige, bla. hvor produktiv skogen og hva hogsten brukes til. Holtmark (2015) tar utgangspunkt i en middels produktiv norsk granskog og finner da at tidsrommet  $t^2 - t^0$  er over 100 år og at det også kan være vesentlig lenger.

Økt hogst vil altså bidra til raskere klimaendring på kort sikt, selv om den langsiktige klimaendringen kan bli mindre. Det er derfor ikke opplagt at  $A^{**}(t)$ -scenariet fra et klimamessig synspunkt alt i alt er bedre enn  $A^*(t)$ -scenariet.

#### *Hva hvis utslipp fra fossile brensler uansett gå mot null?*

Det er ikke opplagt at figur 3 gir en riktigere beskrivelse enn figur 2. Et optimistisk syn på fremtidig klimapolitikk i verden vil innebære at  $\text{CO}_2$ -utslipp gradvis går mot null uansett omfanget av hogst. Når utslippene går mot null vil mengden av karbon i atmosfæren gå mot en positiv konstant som er høyere jo høyere tidligere utslipp har vært (ca. 25% av alt karbon sluppet ut i atmosfæren vil grovt regnet forbli der «for alltid», se f.eks Archer (2005) og Joos et al. (2013)). I stedet for den stadig stigende kurven for  $A^*(t)$ -scenariet i figur 2 får vi derfor en kurve som etter hvert flater ut. Hvis vi får en slik utflating uten utstrakt bruk av CCS betyr dette at bruk av fossile brensler går mot null. I så fall er det ingen fossile brensler igjen som skogprodukter kan erstatte, og de indirekte virkningene omtalt over må nødvendigvis gå mot null. Vi får derfor en figur som ligner på figur 2 bortsett fra at begge kurvene etter hvert flater ut. I dette tilfellet vil derfor kurvene muligens aldri krysse hverandre. I så fall vil økt hogst være ubetinget ugunstig for klimautviklingen.

#### *Storstilt bruk av CCS i fremtiden?*

Det kan også tenkes at vi fårorstilt bruk av CCS i fremtiden slik at  $\text{CO}_2$ -utslipp gradvis går mot null samtidig som det er en betydelig bruk av fossile brensler. I så fall kan økt

hogst og økt bruk av skogprodukter erstatte fossile brensler, slik at dette kombinert med CCS kan gi avtagende karbon i atmosfæren. Da blir situasjonen som i figur 3, bortsett fra at kurven for  $A^*(t)$  nå etter hvert blir horisontal mens kurven for  $A^{**}(t)$  etter hvert blir fallende.

#### *Bør vi av klimahensyn oppmuntre til økt hogst?*

For å oppsummere drøftingen over: Det er ikke opplagt at økt hogst er gunstig for klimautviklingen, selv om vi tar hensyn til de gunstige indirekte virkningene. Jeg vil i resten av artikkelen likevel anta at dette er tilfelle. Jeg ser altså på en situasjon hvor økt hogst isolert sett er ugunstig for klima, men gunstig for klima når de indirekte virkningene (lavere bruk av fossile brensler) tas hensyn til. I følge Miljødirektoratet (2016) gir dette en god beskrivelse av virkeligheten. Gitt dette utgangspunktet reiser det seg et opplagt spørsmål: Når økt hogst har en gunstig virkning på klima, bør vi da gjennom virkemidler rettet mot skogbruket oppmuntre til økt hogst? Ved første øyekast kunne en kanskje tro at svaret er et ubetinget ja. Jeg skal vise at dette ikke er tilfelle.

#### VIRKEMIDLER

For å drøfte om en bør bruke virkemidler som oppmuntrer til økt hogst, er det nyttig først å se på en beslektet problemstilling. Kull og gass gir begge utslipp av  $\text{CO}_2$ , men gass mindre enn kull (per enhet energi). Videre kan det godt tenkes at subsidier av bruk eller produksjon av gass vil gi så mye mindre bruk av kull at samlede utslipp går ned. Forhåpentligvis vil ingen likevel mene at subsidier til gass er en del av en god klimapolitikk. Standard prinsipper for optimal virkemiddelbruk tilsier at både kull og gass bør avgiftsbelegges, men med lavere avgift (per enhet energi) på gass enn på kull. Avgiften per enhet  $\text{CO}_2$  bør være lik for kull og gass, og avgiftsnivået bør settes i samsvar med ambisjonsnivået for klimapolitikken. Virkemiddelbruken rettet mot gass gir isolert sett mindre bruk av gass, men det er ikke opplagt i hvilken retning bruken av gass endres som følge av den samlede virkemiddelbruken rettet mot gass og kull. Om bruken av gass går opp eller ned er imidlertid klimamessig irrelevant; poenget er at klimamålene nås til så lave kostnader som mulig med denne virkemiddelbruken.

Analogien til skog er rett frem: Den direkte virkningen av økt hogst er negativt for klimaet (pga. lavere karbonopptak i skogen). Virkemiddelbruken i skogbruket bør derfor bidra til at det blir mindre hogst enn hva som er lønnsomt

når en ser bort fra klimahensyn.<sup>5</sup> Med riktig bruk av virkemidler også mot all bruk av fossile brensler kan det likevel være slik at mer hogst blir lønnsom enn dersom en overhodet ikke hadde noen klimapolitikk.

#### NEST-BEST KLIMAPOLITIKK

Hva hvis en av en eller annen grunn ikke avgiftsbelegger bruken av fossile brensler så mye som en burde gitt klimamålene en har? Igjen er det nyttig å starte med analogien med kull og gass. Hvis avgiften på bruk av kull er for lav, bør da avgiften på gassen økes for å kompensere for dette? Eller bør avgiften på gass være lavere enn i en først-best-situasjon? Bør en kanskje t.o.m. subsidiere bruken av gass for å få ned bruken av kull? Svarene på disse spørsmålene er gitt i en enkel modell i appendikset, som bygger på Hoel (2012).

Hovedresultatet er som følger: La  $p$  være karbonprisen som skal til for å nå et kvantitativt utslippsmål, og la  $t_x$  og  $t_y$  være avgiften på hhv kull og gass (per enhet energi). Utslipp per enhet energi er hhv  $a_x$  og  $a_y$  for kull og gass, hvor  $0 < a_y < a_x$ . Først-best optimum er da gitt ved  $t_x = a_x p$  og  $t_y = a_y p$ . Anta imidlertid  $t_x$  av en eller annen grunn er eksogent gitt og lavere enn  $a_x p$ . Hva er da optimal  $t_y$ ? Svaret på dette er

$$t_y = a_y p - (a_x p - t_x) \Delta \quad (1)$$

hvor  $\Delta$  (som antas positiv) måler hvor mye kullbruken reduseres som følge av en enhet økt bruk av gass (alt i energienheter). Vi ser umiddelbart at dersom avgiften på kull er satt lik den optimale avgiften  $a_x p$ , skal også avgiften på gass være lik først-best nivået. Videre ser vi at dersom  $t_x < a_x p$  skal også  $t_y < a_y p$ .

Ligning (1) kan også skrives som

$$t_y = [a_y - a_x \Delta] p + t_x \Delta \quad (2)$$

Anta først at siste ledd er lik null. Da er  $t_y$  positiv eller negativ avhengig av om hakeparentesen er positiv eller negativ. Hakeparentesen måler den totale virkningen på klimagassutslipp av økt bruk av gass, dvs. inkludert den indirekte virkningen gjennom påvirkningen av kullbruken.

<sup>5</sup> Optimale klimapolitiske virkemidler rettet mot skogbruk er omtalt i bla. Tahvonen (1995) og Hoel og Sletten (2016). Merk at optimal virkemiddelbruk rettet mot skogbruk bør ta hensyn til at ulike produkter fra skogen (biobrensel, materialer til ulike formål, etc.) har ulik dynamikk knyttet til karbontilførsel til atmosfæren.

Hvis denne totalvirkningen er negativ blir  $t_y < 0$ , dvs. at bruken av gass bør subsidieres (forutsatt at  $t_x = 0$ ). Dette resultatet blir modifisert dersom  $t_x > 0$ : For en tilstrekkelig høy verdi av  $t_x$  blir  $t_y > 0$  uansett hvor stor tallverdi den negative hakeparentesen har.

Tolkningen av det siste leddet i (2) er som følger. Når kull er avgiftsbelagt med  $t_x$  per enhet, betyr dette at brukernes verdsetting på marginen er  $t_x$  større enn marginalkostnaden (eller importprisen). Et tiltak som reduserer kullbruken med en enhet gir et samfunnsmessig tap (utenom klimavirkningen) lik differensen mellom verdsettingen og kostnaden, dvs. lik  $t_x$ . Dette samfunnsmessige tapet er en del av den indirekte kostnaden knyttet til økt gassbruk, og skal derfor inngå i avgiften for gass.

Tilbake til skogen. Samme prinsipp som over gjelder: Dersom (2) gir en negativ verdi av  $t_y$  bør vi bruke virkemidler som oppmuntrer til hogst utover hva en ville fått uten virkemidler rettet mot skogbruket. Er derimot  $t_y$  positiv bør vi bruke virkemidler som gir mer vern av skogen enn vi ville fått uten virkemidler rettet mot skogbruket. Det er rimelig å tolke resonnementene i Miljødirektoratet (2016) som at de mener hakeparentesen i (2) er negativ. Selv om dette er tilfelle kan det likevel være riktig å bruke virkemidler som fremmer vern av skogen fremfor hogst, siden andre ledd i (2) kan være positiv. I Norge er dette leddet helt klart positivt, da de aktuelle produktene som erstattes av skog typisk er enten avgiftsbelagt eller regulert gjennom kvoter.

## KONKLUSJON

Økt hogst av skog vil innebære at mindre karbon blir lagret i skogen. Isolert sett er dette negativt for klimautviklingen. Økt hogst kan imidlertid ha indirekte virkninger i form av lavere bruk av fossile brensler som bla. påpekt i Miljødirektoratet (2016). Totalvirkningen kan alt i alt være gunstig for klima, men som omtalt i avsnitt 2 er ikke dette opplagt. Økt hogst gir i første omgang en lang periode med økt akkumulasjon av  $\text{CO}_2$  i atmosfæren, selv om man har indirekte virkninger på bruken av fossil energi. Dermed får man i denne perioden en raskere oppvarming, noe som kan være negativt. Og selv om totalvirkningen av økt hogst skulle være gunstig for klima, tilsier dette likevel ikke nødvendigvis at en gjennom ulike typer virkemidler bør søke å oppnå økt hogst. Dersom bruken av fossile brensler allerede i tilstrekkelig sterk grad er regulert gjennom avgifter eller kvoter, bør en tvert imot bruke virkemidler som fremmer vern heller enn hogst av skogen.

## APPENDIKS

Landets inntekt er gitt ved  $F(x, y, z)$  hvor  $x, y, z$  er mengden brukt av tre innsatsfaktorer; alle andre innsatsfaktorer antas konstant. Funksjonen  $F$  antas konkav i sine argumenter, og det antas videre at de to kryssderiverte  $F_{xy}$  og  $F_{xz}$  er negative (forklart under). Utslipp av  $\text{CO}_2$  er gitt ved  $a_x x + a_y y$ . I fravær av klimamål maksimeres landets inntekt ved kombinasjonen  $(x, y, z)$  som gir  $F_x = F_y = F_z = 0$ . Anta imidlertid at en har et kvantitativt utslippsmål som sier at samlede utslipp  $a_x x + a_y y$  ikke skal oversige et måltall  $M$ . Gitt denne utslippsranken maksimeres inntekten ved kombinasjonen  $(x, y, z)$  som gir

$$F_x - a_x p = F_y - a_y p = F_z = 0 \quad (3)$$

hvor  $p$  er skyggeprisen (Lagragemultiplikatoren) til betingelsen  $a_x x + a_y y \leq M$ . Denne vil være høyere jo lavere  $M$  er.

Anta innsatsfaktorene  $x$  og  $y$  avgiftsbelegges med hhv.  $t_x$  og  $t_y$  per enhet. Da vil markedsaktørene maksimere inntekt minus avgifter slik at vi får

$$F_x - t_x = F_y - t_y = F_z = 0 \quad (4)$$

og vi ser umiddelbart at samfunnsøkonomisk optimum oppnås for  $t_x = a_x p$  og  $t_y = a_y p$ .

Anta nå at  $t_x$  er eksogent gitt og lavere enn  $a_x p$ . Da følger det av ligningen  $F_x(x, y, z) = t_x$  at vi kan skrive  $x$  som funksjon av  $(y, z, t_x)$  dvs  $x = x(y, z, t_x)$ . Det er rett frem å vise at denne funksjonen er avtagende i  $y$  og  $z$  pga forutsetningen om at de to kryssderiverte  $F_{xy}$  og  $F_{xz}$  er negative. Det samfunnsøkonomiske optimaliseringsproblemet er nå å maksimere  $F(x(y, z, t_x), y, z)$  mhp  $y$  og  $z$  gitt betingelsen  $a_x x(y, z, t_x) + a_y y \leq M$ . Vi er spesielt interessert i hva dette betyr for  $y$  (variabelen  $z$  er bare med for å sikre at det er mulig å tilfredsstillende skranken  $a_x x(y, z, t_x) + a_y y \leq M$  uansett verdien på  $M$ ). Rett frem regning gir betingelsen

$$(F_y - p a_y) - (F_x - p a_x) \Delta = 0 \quad (5)$$

$$\text{hvor } \Delta \equiv - \frac{\partial x(y, z, t_x)}{\partial y}$$

Sammen med (4) gir dette (2).

## REFERANSER.

- Allen, M. R., D. J. Frame, C. Huntingford, C. D. Jones, J. A. Lowe, M. Meinshausen and N. Meinshausen (2009), Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature* 458(7242), 1163-1166.
- Archer, D. (2005), Fate of fossil fuel CO<sub>2</sub> in geologic time. *Journal of Geophysical Research* 110, C09S05.
- Asante, P., Armstrong GW (2012), Optimal forest harvest age considering carbon sequestration in multiple carbon pools: A comparative analysis. *Journal of Forest Economics* 18, 145-156.
- FAO (2010), Global Forest Resources Assessment 2010. <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>
- Hoel, M. (2012), Second-best climate policy. Memorandum 04/2012 from Department of Economics, University of Oslo. ([www.sv.uio.no/econ/english/research/memorandum/2012/mem0042012.html](http://www.sv.uio.no/econ/english/research/memorandum/2012/mem0042012.html))
- Hoel, M. and Sletten, T. M. (2016), Climate and forests: The tradeoff between forests as a source for producing bioenergy and as a carbon sink. *Resource and Energy Economics* 43, 112-129.
- Hoel, M., Holtsmark, B., Holtsmark, K. (2014), Faustmann and the climate. *Journal of Forest Economics* 20, 192-210.
- Holtsmark, B. (2015), A comparison of the global warming effects of wood fuels and fossil fuels taking albedo into account. *GCB Bioenergy* 7, 984-997. doi:10.1111/gcbb.12200
- Joos, F., Roth, R., Fuglestedt, J. S., Peters, G. P., Enting, I. G., von Bloh, W., Weaver, A. J. (2013), Carbon dioxide and climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics: a multi-model analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13(5), 2793-2825. doi:10.5194/acp-13-2793-2013.
- Miljødirektoratet (2010): Klimakur 2020. [http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Publikasjoner/2010/April/Tiltak\\_og\\_virkemidler\\_for\\_a\\_redusere\\_utslipp\\_av\\_fluorerte\\_klimagasser\\_\\_En\\_rapport\\_fra\\_Klimakur\\_2020\\_\\_Klima\\_og\\_forurensningsdirektoratet/](http://www.miljodirektoratet.no/no/Publikasjoner/Publikasjoner/2010/April/Tiltak_og_virkemidler_for_a_redusere_utslipp_av_fluorerte_klimagasser__En_rapport_fra_Klimakur_2020__Klima_og_forurensningsdirektoratet/)
- Miljødirektoratet (2011): Skog som biomasseressurs. <http://www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/2762/ta2762.pdf>
- Miljødirektoratet (2016): Vern eller bruk av skog som klimatiltak. <http://www.miljodirektoratet.no/no/Nyheter/Nyheter/2016/Mai-2016/Vern-eller-bruk-av-skog-som-klimatiltak/>
- Tahvonen, O. (1995), Net national emissions, CO<sub>2</sub> taxation and the role of forestry. *Resource and Energy Economics* 17, 307-315.
- van Kooten, CG., CS Binkley, G Delcourt (1995), Effect of Carbon Taxes and Subsidies on Optimal Forest Rotation Age and Supply of Carbon Services. *American Journal of Agricultural Economics* 77, 365-374.



[twitter.com/Samfunnsokonom](https://twitter.com/Samfunnsokonom)



[facebook.com/samfunnsokonomene](https://facebook.com/samfunnsokonomene)

