

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Førord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på en toårig mastergrad i samfunnsøkonomi ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB). Gjennom graden har jeg fordypet meg i miljø- og ressursøkonomi, og jeg vil gjerne takke for inspirerende forelesninger av både Eirik Romstad og Arild Angelsen, som har vært med på å forsterke min interesse for fagfeltet.

Videre vil jeg også rette en stor takk til min veileder Eirik Romstad for å ha hjulpet meg gjennom masteroppgaven med verdifulle tilbakemeldinger, gode diskusjoner og oppmuntring.

Masteroppgaven er skrevet med støtte fra Statistisk sentralbyrå. Jeg vil her spesielt få takke Bjart Holtsmark for inspirasjon og gode diskusjoner. En takk går også til Iulie Aslaksen og Per Arild Garnåsjordet for støtte underveis i prosessen.

Jeg vil også takke Erlend Gulbrandsen for gjennomlesing og tilbakemeldinger og Egil Reidar Osnes, Thomas Sæther, Tobias Lillekvelland og Ole Henrik Førland for diskusjoner rundt ulike tema.

Sist, men ikke minst vil jeg få takke min familie og mine venner for deres støtte, og Anne Cecilie Braarud for språkvask, oppmuntring og tålmodighet. Takk for at du alltid stiller opp for meg!

Alle eventuelle feil og mangler i oppgaven er mitt fulle og hele ansvar.

Oslo, August 2011

Erik Flaa

Sammendrag

Denne masteroppgaven sammenligner samfunnets optimale rotasjonstid for skogen med den private optimale rotasjonstiden for skogen. Dette blir i hovedsak gjort ved hjelp av enkle modeller. Skogen blir i dag avvirket når skogeier maksimerer sine inntekter, og det er som regel bare tømmerverdien som blir tatt hensyn til. Andre kollektive goder som ikke gir inntekt til skogeier blir ikke vektlagt. Som et resultat av dette kan produksjonen av kollektive goder i skogen bli for liten, og samfunnets optimale rotasjonstid er derfor nødvendigvis ikke lik den private optimale rotasjonstiden.

Et av skogens kollektive goder er at den tar opp karbon gjennom fotosyntesen, og i oppgaven er dette det eneste kollektive godet som er formelt analysert i modeller. Ved hjelp av enkle modeller tar oppgaven altså for seg den private optimale rotasjonstiden, som bare maksimerer tømmerinntekter, og samfunnets optimale rotasjonstid, som bare maksimerer tømmer og karbonverdier, og sammenligner disse. Da flere prognoser spår en økning i prisen på karbon fremover, tar oppgaven også for seg hvordan en endring i karbonprisen over tid spiller inn på den optimale rotasjonstiden. Oppgavens problemstillinger er derfor:

1. Hva er forskjellen mellom den private optimale rotasjonstiden og samfunnets optimale rotasjonstid?
2. Hvordan blir samfunnets optimale rotasjonstid påvirket av en endring i karbonprisen?

Oppgaven viser at samfunnets optimale rotasjonstid er lenger enn den private optimale rotasjonstiden ved konstante karbonpriser. Ved endrede karbonpriser over tid, vil effekten på samfunnets optimale rotasjonstid avhenge av endringen på prisen, diskonteringsrenta og skogens funksjon av tømmervolum over tid. Virkningene på rotasjonstidene ved ulike scenarioer er også illustrert grafisk. Her er det viktig å merke seg at disse kun er illustrative, og ikke kan brukes til å finne den eksakte optimale rotasjonstiden.

For å holde modellene enkle og intuitive, inneholder de en rekke forenklinger og forutsetninger. Disse vil spille inn på resultatet av de optimale rotasjonstidene, og er derfor viktige å være klar over. Modellene gir for eksempel bare den optimale rotasjonstiden gitt at

skogen blir avvirket. Selv om en modellen gir en optimal rotasjonstid, kan det derfor likevel hende at det lønner seg å ikke avvirke skogen.

Diskusjonsdelen tar for seg flere andre forutsetninger og forenklingers påvirkning på den optimale rotasjonstiden. I tillegg blir det sett på hvordan skogens andre goder, som for eksempel biologisk mangfold, rekreasjonstjenester og jakt, kan påvirke skogens optimale rotasjonstid.

Summary

This master thesis compares the private optimal rotation time for the forest with the social optimal rotation time for the forest. This is primarily done through simple models. Today the forest is harvested when the forest owner maximizes his or her revenue, and only the timber value is usually taken into account. Other public goods that do not provide revenues to the forest owner are not emphasized. As a result, production of the public goods of the forest will be too small, and the private optimal rotation time is thus not necessarily equal to the social optimal rotation period.

Carbon sequestration through the photosynthesis is one of the public goods from the forest. In this thesis this is the only public good that is formally treated in the models. Through simple models the thesis thus address the private optimal rotation time, which only maximizes the timber value, and the social optimal rotation time, which maximizes the timber value and the carbon sequestration, and compares the two. As several forecasts predict an increase in the price of carbon, the paper also addresses how changes in the carbon price over time affect the optimal rotation time. Thus, the research questions of the thesis are:

1. What is the difference between the private optimal rotation time and the social optimal rotation time?
2. How is the social optimal rotation time affected by a change in the price of carbon?

The thesis shows that the social optimal rotation time is longer than the private optimal rotation time at constant carbon prices. How changes in the price of carbon over time affect the social optimal rotation time, depends on the change in the carbon price, the discount rate, and the forest's function of timber volume over time. Graphs are included in the paper to illustrate the optimal rotation times at different scenarios, but it is important to note that these are only meant to be illustrative, and can not be used to find the exact optimal rotation time.

To keep models simple and intuitive, they include a number of simplifications and assumptions. These will affect the results of the optimal rotation times, and are therefore important to be aware of. The models for example only give the optimal rotation time given

that the forest is harvested. So even if a model gives an optimal rotation time, it might still be profitable not to harvest the forest.

The discussion chapter deals with several other assumptions' and simplifications' effect on the optimal rotation time. In addition, it examines how other benefits from the forest, such as biodiversity, recreational services and hunting might effect the optimal rotation time.

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iii
Summary	v
Innholdsfortegnelse	vii
Figuroversikt	ix
Tabelloversikt	x
1.0 Innledning	1
1.1 Problemstillinger	3
1.2 Modellmessig tilnærming	4
1.3 Oppbygging av oppgaven	4
2.0 Teori og tidligere arbeid	5
2.1 Netto nåverdi	5
2.2 Optimal rotasjonstid	7
2.2.1 Maximum Sustainable Yield	7
2.2.2 Optimal rotasjonstid for en periode	8
2.2.3 Faustmann	9
2.2.4 Hartman	10
2.2.5 Van-Kooten et al.	12
3.0 Modellformulering	14
3.1 Optimal rotasjonstid for en periode ved konstant karbonpris	16
3.2 Optimal rotasjonstid for alle fremtidige perioder ved konstant karbonpris	18
3.3 Optimal rotasjonstid for en periode ved endring i karbonpris	20
3.3.1 Nedgang i karbonprisen	22
3.3.2 Økning i karbonpris lik diskonteringen	24
3.3.3 Høyere økning i karbonpris enn diskontering	24
3.3.4 Økning i karbonpris lavere enn diskontering	24
3.4 Optimal rotasjonstid for alle fremtidige perioder ved endring i karbonpris	26
3.5 Oppsummering av modellene	29
4.0 Diskusjon	31
4.1 Forutsetning om at skogen blir avvirket	31
4.2 Diskonteringsrenta	32

4.3 Karbonlagring i byggematerialer.....	32
4.4 Pris på trevirke.....	33
4.5 Tynning	34
4.6 Antakelsen om proporsjonalitet mellom opptak av karbon og skogveksten	35
4.7 Usikkerhet	35
4.8 Påvirkningen på optimal rotasjonstid av andre goder fra skogen.....	36
4.8.1 Biologisk mangfold.....	36
4.8.2 Rekreasjonstjenester	36
4.8.3 Jakt.....	36
4.9 Dynamisk vs. statisk optimering	37
4.10 Oppsummering av diskusjon	38
5.0 Konklusjon.....	40
Vedlegg	43
6.0 Referanser	46

Figuroversikt

Figur 1: Skogens tømmervolum uttrykt som en funksjon av skogens alder.	7
Figur 2: Privat optimal rotasjonstid T^* og samfunnets optimale rotasjonstid T_K^* for en periode.	18
Figur 3: Privat optimal rotasjonstid T^* og samfunnets optimale rotasjonstid T_K^* for alle fremtidige perioder.	20
Figur 4: Privat optimal rotasjonstid (T^*) og samfunnets optimale rotasjonstid ved konstante karbonpriser (T_K^*) og ved endrede karbonpriser (T_K^{**}) for en periode	23
Figur 5: Privat optimal rotasjonstid (T^*) og samfunnets optimale rotasjonstid ved konstante karbonpriser (T_K^*) og ved endrede karbonpriser (T_K^{**}) for alle fremtidige perioder.	28
Figur 6: Netto nåverdi ved hogst av å avvirke i år T og netto nåverdi ved å ikke avvirke	31
Figur 7: Gjennomsnittlig tømmerpris i løpende kroneverdi og 2009-kroner (ssb.no 2011)	34
Figur 8: Statisk optimal pris (p) og utslipp av karbon (z) i periode 0 til 3.	38

Tabelloversikt

Tabell 1: Optimal rotasjonstid ved ulike scenarioer.....	29
Tabell 2: Påvirkning på samfunnets optimale rotasjonstid fra ulike faktorer.....	39

1.0 Innledning

”The scientific evidence is now overwhelming: climate change is a serious global threat, and it demands an urgent global response” (Stern 2007:VI). Klimaendringene som i hovedsak har oppstått som følge av økte klimagassutslipp, særlig CO₂, til atmosfæren er en global trussel som krever en sterk og hurtig respons. Utsagnet til Stern-rapporten og andre studier er med på å underbygge dette (Pachauri og Reisinger 2007). Om man ikke klarer å bremse klimaendringene, kan dette påvirke hele kloden og endre tilværelsen for mange hundre millioner mennesker. Spesielt mennesker fra U-land, som selv har bidratt lite til klimaendringene, står i fare for å bli utsatt for sult, vannmangel og flom.

Til tross for dystre spådommer fremmer Stern med sitt utsagn; ”There is still time to avoid the worst impacts of climate change, if we take strong action now.” (Stern 2007:VI) en tro om at det fortsatt er mulig å unngå de største ødeleggelsene – men man må handle nå. Kostnadene ved å vente eller ikke gjøre noe med problemet vil være langt større. Videre vil kostnadene også bli større om ikke politikere klarer å anvende økonomiske virkemidler på en effektiv måte, slik at utslippene reduseres når, hvordan og der det er billigst å gjøre det (Stern 2007).

Det å redusere utslipp fra avskogning blir sett på som en betydelig, billig og rask måte å redusere utslipp på. Betydelig fordi en femtedel av globale klimagassutslipp kommer fra avskogning og skogforringelse, billig fordi mye av avskogningen bare er marginalt lønnsom, og rask fordi det ikke er behov for noen ny teknologi for å sette i gang (Angelsen 2009). Norge har vært et foregangsland når det gjelder å sette i gang tiltak for å redusere avskogning verden over. De siste par årene har Norge sagt seg villig til å bruke flere milliarder norske kroner for å få redusert avskogningen i land som Indonesia, Brasil, Guyana og Tanzania. I alle disse landene er hogsten høyere enn tilveksten slik at skogen har et nettoutslipp av CO₂. Derimot har det ikke vært like mye oppmerksomhet rundt mindre hogst i land hvor man ikke har avskogning. Et tre som blir hogget vil slippe ut like mye karbon uavhengig av om det er avskogning eller ikke i landet. Forskjellen er at i land uten avskogning blir det som regel plantet et nytt tre eller det vil vokse opp et nytt tre naturlig for treet som blir hogd. Veldig enkelt kan man da si at dette nye treet vil ta opp igjen samme mengde karbon som det treet som ble hugget slapp ut. I land med avskogning vil derimot arealene med hogst som regel bli

gjort om til jordbruksareal eller til andre formål som gir raskere avkasting. Derfor er redusert avskogning et viktig klimatiltak – men kan det også være et klimatiltak å redusere hogsten i land uten avskogning?

Dette spørsmålet er særlig relevant i land med boreal skog, som den vi har i Norge. Boreal skog vokser sakte, og det kan ta 70-120 år etter at en hugger et tre før et nytt tre tar opp den samme mengden karbon som det hogde treet slapp ut. Det vil altså oppstå en karbondjeld etter hogst som det tar tid å betale tilbake.

I Klimakur 2020 (2010), en rapport utarbeidet på oppdrag fra Miljøverndepartementet, ble det lagt frem en vurdering av klimapolitikken i Norge og behovet for endrede virkemidler. Her blir det nevnt at redusert avvirkning kan gi høyere nettoopptak av karbon i skogen på kort sikt, men at dette også vil bety mindre tilgang på bioressurser som kan erstatte fossil energi (Klimakur 2010). Av mulige klimatiltak i skog var det økt avvirkning for å øke tilgangen på biomasse til bioenergi som ble sett på som det mest aktuelle. Noe av grunnen til dette kan skyldes reglene i Kyotoprotokollen.

I Kyotoprotokollens første forpliktelsesperiode (2008-2012) er det kun en liten del av skogens nettoopptak som kan inkluderes. Siden Norges nettoopptak av karbon ligger godt over dette, er det få insentiver for å sette i gang tiltak for å øke opptaket av karbon i norske skoger. I Kyotoprotokollen blir bioenergi behandlet som klimanøytralt, noe Searchinger et al. (2009) mener gir kraftige insentiver for høyere avvirkning i skogen i Annex 1 landene til bruk i bioenergi. Holtsmark (2010) er enig med Searchinger et al. (2009) som fremmer at en potensiell løsning på problemet vil være et system som priser alle karbonutslipp likt. I tillegg er det ytterligere et behov for en forbedring av regelverket for opptak av karbon i skog. Dette vil være med på å gjøre redusert hogst til et mer gjennomførbart klimatiltak også i land som Norge, som har et nettoopptak av karbon i skogen.

Etter publikasjonen av Klimakur 2020, har det vært en stor debatt om virkningen av økt avvirkning i skog for økt tilgang til biomasse for bruk til bioenergi. Holtsmark (2010) la frem en modell som viste en tilbakebetalingstid på 150-230 år før man begynte å høste gevinster av dette tiltaket, avhengig av hvordan biomassen anvendes. Holtsmarks beregninger støttes av en rapport fremlagt av Klima- og forurensningsdirektoratet i 2011 (Haugland et al. 2011).

Riktignok gikk ikke deres modell langt nok frem i tid til å kunne svare på hvilken tilbakebetalingstid som økt permanent avvirkning ville gi, men de mente at resultatet kunne være i samme størrelsesorden som Holtsmarks beregninger (Haugland et al. 2011).

Fortsatt er det en pågående debatt om økt avvirkning som klimatiltak, men det ser ut til å være en voksende enighet om at det vil ta tid før man oppnår ønskede resultater. Når man tar hensyn til at skogen tar opp og slipper ut karbon kan man heller stille seg spørsmålet om avvirkningen av skogen bør reduseres. Skogen blir avvirket når skogeier maksimerer sine inntekter, noe som betyr at karbonopptak ikke blir tatt hensyn til.

En skogeier vil avvirke skogen på det tidspunktet hvor han maksimerer sine inntekter fra den. Disse inntektene kommer i hovedsak fra tømmer, men skogeier kan også ha andre inntektskilder fra skogen som for eksempel fra jakt. Skogen har også andre goder å tilby som ikke gir inntekter til skogeier. Dette omfatter i hovedsak kollektive goder som rekreasjonstjenester, biologisk mangfold og opptak og lagring av karbon. Siden skogeier kun maksimerer verdiene av de godene som gir han inntekter, vil produksjonen av de andre godene bli for lav, noe som ofte er tilfelle med kollektive goder. Det er empirisk grunnlag for dette både internasjonalt (Polasky og Doremus 1998; Siry et al. 2005) og i Norge/Norden (Bergseng og Vatn 2009). Den private optimale rotasjonstiden for skogeier vil derfor ikke nødvendigvis være lik den optimale rotasjonstiden for samfunnet.

1.1 Problemstillinger

For å finne samfunnets optimale rotasjonstid for skogen bør altså alle skogens goder bli tatt hensyn til. For at ikke mine modeller skal bli for kompliserte vil jeg likevel kun konsentrere meg om verdiene fra tømmer og karbonopptak, og se på forskjellen mellom skogeiers private optimale rotasjonstid, som kun maksimerer tømmerverdiene, og samfunnets optimale rotasjonstid, som maksimerer tømmer- og karbonverdiene i skogen. Påvirkningen på optimal rotasjonstid fra skogens andre goder vil jeg igjen komme tilbake til i diskusjonen. Tidligere publikasjoner om optimale rotasjonstid hvor man tar hensyn til karbonopptak har som regel holdt karbonprisen over tid konstant (Olschewski og Benítez 2010; Van Kooten et al. 1995). Flere prognoser viser imidlertid at karbonprisen vil vokse fremover (Aune og Holtmark 2009; Klimakur 2009). Mine problemstillinger er derfor:

1. Hva er forskjellen mellom den private optimale rotasjonstiden og samfunnets optimale rotasjonstid?
2. Hvordan blir samfunnets optimale rotasjonstid påvirket av en endring i karbonprisen?

1.2 Modellmessig tilnærming

I det meste av litteraturen om optimal rotasjonstid handler det om å maksimere netto nåverdi av fremtidige inntekter og utgifter. Siden en inntekt på 1 NOK vil være mer verdt i dag enn en inntekt på 1 NOK om 50 år, må de fremtidige inntektene og utgiftene diskonteres for å gi dagens verdi. For å finne den private optimale rotasjonstiden må man da maksimere de diskonterte inntektene og utgiftene ved hogst, planting og eventuelle andre skogtiltak. I mine modeller vil jeg anta at skogeier i år 0 planter en skog på et areal, og deretter avvirker alle trærne på arealet samtidig (i år T), for så å plante nye trær på arealet osv. Skogens volum er gitt ved en funksjon $G(t)$, hvor G er volumet av stående tømmer i skogen i m^3 og t er alderen på skogen i antall år etter planting. Videre antar jeg at opptaket av karbon i denne skogen er proporsjonal med skogveksten. Kostnadene til planting og hogst har jeg satt til null. Dermed vil den private netto nåverdien bestå av en komponent, inntektene fra hogst, mens samfunnets netto nåverdi vil bestå av to komponenter, verdien av karbonopptaket og en hogstkomponent som viser inntektene ved hogst minus utgiften ved karbonutslippet. Modellen forutsetter at skogen avvirket.

1.3 Oppbygging av oppgaven

For å svare på mine problemstillinger vil jeg starte med å gå inn på teori og tidligere arbeid om optimal rotasjonstid i kapittel 2. Deretter vil jeg i kapittel 3 komme inn på antakelser og begrensninger av mine modeller, før jeg presenterer dem. Videre vil jeg i kapittel 4 diskutere resultatene fra modellene, og se på hvordan begrensningene og antakelsene i modellene vil spille inn på disse. Konklusjoner og avsluttende merknader kommer i kapittel 5.

2.0 Teori og tidligere arbeid

For at leser best skal kunne få en helhetlig forståelse av tema, ser jeg det nødvendig å først presentere litt om netto nåverdi ettersom dette spiller en sentral rolle i utregningen av optimal rotasjonstid.

2.1 Netto nåverdi

Netto nåverdi (NNV) beregninger blir ofte brukt for å estimere dagens verdi av prosjekter hvor inntekter og utgifter kommer i fremtiden. Formelen for NNV kan skrives som

$$NNV = -I + \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+\delta)^t} (B_t - K_t) \quad (2.1)$$

Hvor I er kostnadene ved den initielle investeringen, B_t er inntektene (benefits) i år t av prosjektet, K_t er kostnadene i år t av prosjektet og δ er diskonteringsrenta. Uttrykket etter plusstegnet gir altså den diskonterte strømmen av fremtidige inntekter og kostnader, eller dagens verdi av prosjektets fremtidige inntekter og utgifter. Valget av diskonteringsrenta vil ha stor betydning for netto nåverdiberegningene, særlig der inntekter og utgifter kommer langt frem i tid. For eksempel regner en med at mye av de forventede kostnadene ved karbonutslipp vil komme en del år inn i fremtiden, noe som betyr at en liten endring i diskonteringsrenta vil ha store betydninger for den sosiale kostnaden av karbon. Inntekter etter planting i skogbruket vil også først komme langt frem i tid. Den optimale rotasjonstiden vil altså bli sterkt påvirket av hvilke diskonteringsrente man bestemmer seg for.

I en finansiell netto nåverdi beregning vil man bruke den private diskonteringsrenta, mens i samfunnsøkonomiske netto nåverdiberegninger vil man bruke den sosiale diskonteringsrenta. Den private diskonteringsrenta vil være lik den sikre markedsrenta (pluss et sikkerhetstillegg). Dette er altså den sikre prosentvise avkastningen man kan få ved for eksempel å sette penger i banken.

Sammenlignet med den private diskonteringsrenta har det vært betraktelig mer diskusjon rundt den sosiale diskonteringsrenta. Det er i hovedsak to grunner til å diskontere fremtidig forbruk (Ramsey 1928 i Anthoff et al. 2009). For det første regner man med at man er rikere i

fremtiden, slik at en krone i dag er mer verdt enn en krone i fremtiden, og for det andre er man utålmodig. Dette leder til Ramsey-regelen

$$\delta = \rho + \eta g \quad (2.2)$$

Her er δ den sosiale diskonteringsrenta, ρ er raten for tidspreferanse, g er vekstraten i per capita forbruk og η er elastisiteten for grensenytten ved forbruk. Jo høyere ρ , jo mer verdsetter man nåtiden i forhold til fremtiden. η kan sees på som hvor mye ekstra nytte en ekstra krone gir, som da gjerne er avhengig av hvor rik man er. Det er en diskusjon rundt de to parameterne ρ og η , og om hvordan disse bør bestemmes. Mens Anthoff et al. (2009) mener at man kan bestemme ρ og η empirisk, hevder Stern (2007) at disse må bestemmes ut fra en etisk vurdering av forskeren. I denne oppgaven vil jeg ikke ta et standpunkt i forhold til hvordan ρ og η bør bestemmes, og heller ikke hva som er den korrekte diskonteringsrenta. I stedet vil jeg komme frem til en formel, slik at man ser hva som skjer med rotasjonstiden gitt ulike diskonteringsrenter ved å endre andre nøkkelparametere.

Når en skogeier maksimerer sine inntekter fra tømmeret vil han bruke den private diskonteringsrenta, mens ved utregning av samfunnets optimale rotasjonstid hvor man tar hensyn til opptak av karbon bør man anvende den sosiale diskonteringsrenta. Det vil i denne oppgaven derimot ikke skilles mellom den private og den sosiale diskonteringsrenta. Denne forenklingen blir gjort for kunne gjøre resultatene mer sammenlignbare. Hvordan denne forenklingen vil påvirke resultatene vil jeg komme tilbake til i avsnitt 4.2.

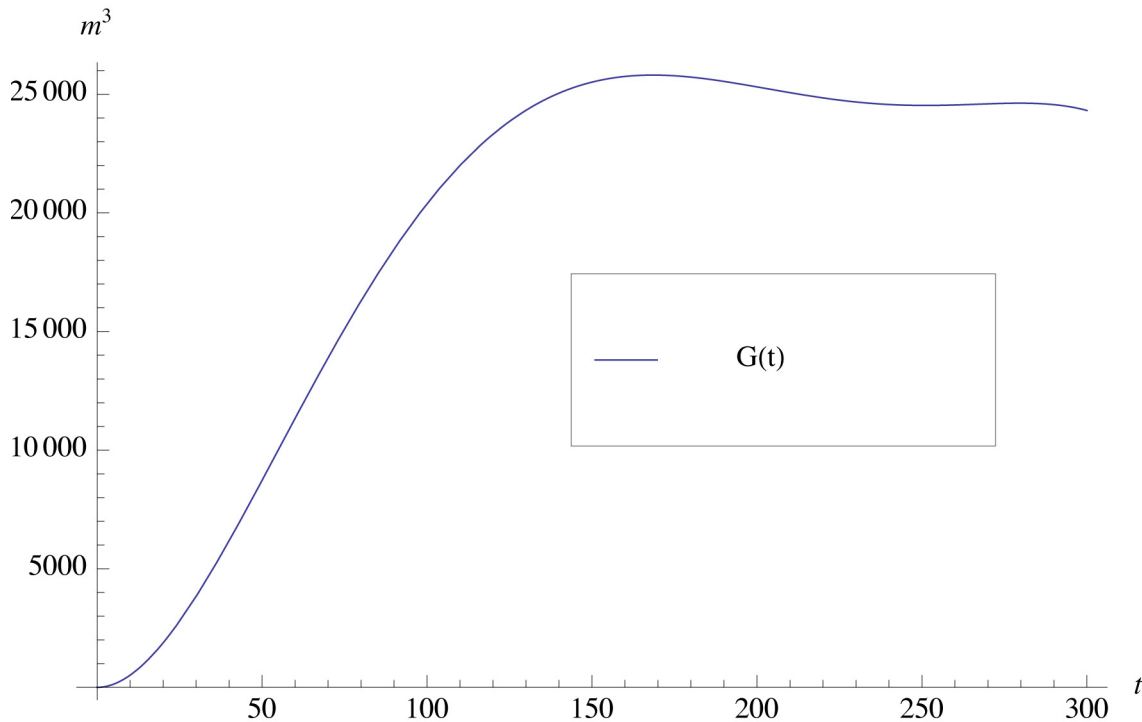
Spesielt i teoretiske resonnementer kan det være hensiktsmessig å betrakte tiden som en kontinuerlig variabel i stedet for en diskret variabel, da dette ofte gir mer håndterlige uttrykk. De fleste som tidligere har skrevet om optimal rotasjonstid har på grunn av dette brukt kontinuerlig tid, og jeg vil derfor også bruke det i denne oppgaven. I stedet for å bruke

$\frac{1}{(1+\delta)^t}$, vil jeg altså heller bruke $e^{-\delta t}$, slik at $NNV(T)$ vil se slik ut

$$NNV(T) = -I + \int_0^T e^{-\delta t} [B(t) - K(t)] \quad (2.3)$$

2.2 Optimal rotasjonstid

Jeg vil nå gå inn på problemet med å finne den optimale rotasjonstiden for en jevnaldret skog. Jeg antar at vi har en funksjon $G(t)$, hvor G er volumet av stående tømmer i skogen i m^3 og t er alderen på skogen i antall år siden planting. $G(t)$ antas å vokse raskt de første årene, men avta og etter hvert stoppe opp. I figur 1 er et eksempel på en forenklet versjon av skogens tømmervolum $G(t)$ siden planting i år null.



Figur 1: Skogens tømmervolum uttrykt som en funksjon av skogens alder.

Jeg vil starte med å se på den optimale rotasjonstiden for å maksimere tømmeret av skogen (Maximum Sustainable Yield).

2.2.1 Maximum Sustainable Yield

Maximum Sustainable Yield er ofte brukt av biologer for å regne ut den optimale rotasjonsalderen for skogen. Her er formålet å maksimere den gjennomsnittlige økningen i tømmervolumet. Man vil altså finne den hogstalderen som maksimerer trevolumet delt på hogstalderen. Hvis T er den alderen der skogen blir avvirket:

$$\text{Max} \frac{G(T)}{T}$$

Maksimeringsproblemet kan løses ved å derivere med hensyn på T og sette den deriverte lik null. Vi får da.

$$G'(T) = \frac{G(T)}{T} \quad (2.4)$$

Man skal altså hogge i alderen T hvor tilveksten er lik den gjennomsnittlige tilveksten. Dette kan også skrives som

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = \frac{1}{T} > 0 \quad (2.5)$$

Da $\frac{1}{T}$ er større enn null ser vi at man skal hogge før maksimal produksjon av trevirke, som finner sted når $\frac{G'(T)}{G(T)} = 0$.

I dette avsnittet har den optimale rotasjonstiden vært helt uavhengig av prisen på tømmer, diskontering og kostnader. Disse parameterne vil nå bli innført.

2.2.2 Optimal rotasjonstid for en periode

For å finne den optimale rotasjonstiden vil altså skogeier maksimere sin netto nåverdi av skogen. Hvis vi antar at skogeier vil maksimere netto nåverdien av en rotasjon hvor prisen på tømmer pr m^3 (p_t) er konstant, k er kostnader ved planting av skogen og δ er diskonteringsrenta vil uttrykket se slik ut

$$NNV(T) = p_t G(T) e^{-\delta T} - k \quad (2.6)$$

Inntektene ved hogst vil først komme etter T år, og er derfor diskontert, mens kostnadene ved planting skjer i år null og er derfor ikke diskontert. Ved maksimering av uttrykket ender man opp med

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta \quad (2.7)$$

Skogeier bør altså hogge skogen når den relative økningen i volum er lik diskonteringsrenta, se for eksempel Clark (2010). Dette kan også skrives som

$$G'(T) = \delta G(T) \quad (2.8)$$

Skogeier bør hogge skogen når den årlige økningen i verdien i skogen er lik verdiendringen skogeier får for å selge tømmeret og sette pengene i banken til renta δ . Så lenge $G'(T) > \delta G(T)$ vil man altså la skogen stå fordi man da får et større utbytte enn ved å hogge trærne og sette pengene i banken.

Her er netto nåverdien maksimert for en periode. Derimot viste Faustmann i 1849 at man burde inkludere alle fremtidige perioder, ikke bare tømmerinntekten fra en rotasjon.

2.2.3 Faustmann

I optimeringen for en periode hadde vi med i beregningen at en utsatt hogst hadde en alternativkostnad fordi man gikk glipp av rentene på de utsatte inntektene fra hogst. Videre utgjør utsatt hogst også en alternativkostnad ved at de neste periodene blir utsatt. En skogeier vil altså være interessert i å maksimere netto nåverdi for alle fremtidige perioder, og ikke bare for en periode. Maksimeringen av netto nåverdi for alle fremtidige perioder utledet Faustmann allerede i 1849. For å forenkle setter jeg kostnadene, k , til 0 og setter prisen på tømmer, p_t , til 1 pr m^3 . Netto nåverdien for skogen for alle fremtidige perioder kan da skrives som

$$\begin{aligned} NNV(T) &= G(T)e^{-\delta T} + G(T)e^{-2\delta T} + G(T)e^{-3\delta T} + \dots \\ &= \frac{G(T)e^{-\delta T}}{1 - e^{-\delta T}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Maksimering av dette uttrykket gir

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \quad (2.10)$$

(2.10) kan også skrives som

$$G'(T) = \delta G(T) + \delta G(T)(e^{-\delta T} + e^{-2\delta T} + e^{-3\delta T} + \dots) \quad (2.11)$$

Her ser vi rotasjonstiden er kortere enn hvis man bare maksimerer for en rotasjon. Hvis vi sammenligner med (2.8): $G'(T) = \delta G(T)$, ser vi at $\delta G(T)(e^{-\delta T} + e^{-2\delta T} + e^{-3\delta T} + \dots)$ har blitt lagt til. Dette kan kalles landverdien og sier hva bare jorda kan bli solgt for i år 0 (Clark 2010). Når man har med landverdien vil altså rotasjonstiden bli kortere.

Hvis diskonteringen går mot null får vi

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} = \frac{1}{T} \quad (2.12)$$

Noe som gir det samme uttrykket som i uttrykk (2.5): $\frac{G'(T)}{G(T)} = \frac{1}{T}$. Optimal rotasjonstid ved mine forenklinger og med en diskonteringsrente på 0 vil altså være lik optimal rotasjonstid ved Maximum Sustainable Yield.

Som nevnt tidligere i oppgaven har skogen flere goder enn kun inntektene fra tømmeret. Jeg vil nå komme inn på hvordan eksterne goder kan endre optimal rotasjonstid for skogen.

2.2.4 Hartman

Hartman (1976) undersøkte hvordan optimal rotasjonstid for skogen endret seg gitt at skogen hadde eksterne goder som for eksempel rekreasjonstjenester ved siden av verdien av tømmeret. Han tenkte seg at disse godene fulgte en funksjon, $F(t)$, som ble større ettersom skogen ble eldre, og etter hvert flatet ut.

En periode

Netto nåverdien av skogen for en periode vil da være

$$NNV(T) = G(T)e^{-\delta T} + \int_0^T F(t)e^{-\delta t} dt \quad (2.13)$$

Første delen av uttrykket til høyre for likhetstegnet er den diskonterte inntekten av å hogge og selge trærne i år T . Den andre delen av uttrykket etter likhetstegnet er den kontinuerlige diskonterte strømmen av eksterne goder fra skogen. Ved å maksimere uttrykket ender man med

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta - \frac{F(T)}{G(T)} \quad (2.14)$$

Uten eksterne effekter kan vi se at vi ender med (2.7): $\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta$. Med positive eksterne goder ser vi at skogen bør hogges når den relative veksten av skogvolumet er mindre enn diskonteringsrenta. Dermed vil den optimale rotasjonstiden være lenger når en tar hensyn til positive eksterne goder.

Alle fremtidige perioder

Hartman så også på den optimale rotasjonstiden med eksterne goder for alle fremtidige perioder. Utrykket som da skal maksimeres er:

$$\begin{aligned} NNV(T) &= G(T)(e^{-\delta T} + e^{-2\delta T} + e^{-3\delta T} + \dots) + \int_0^T F(t)e^{-\delta t} dt(1 + e^{-\delta T} + e^{-2\delta T} + \dots) \\ &= \frac{G(T)e^{-\delta T} + \int_0^T F(t)e^{-\delta t} dt}{1 - e^{-\delta T}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Maksimering av uttrykket gir

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta \left[\frac{1}{1 - e^{-\delta T}} + \frac{\int_0^T F(t)e^{-\delta t} dt}{G(T)(1 - e^{-\delta T})} \right] - \frac{F(T)}{G(T)} \quad (2.16)$$

Utenom parentesen er dette uttrykket likt det i (2.14): $\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta - \frac{F(T)}{G(T)}$. I parentesen

vil $\frac{1}{1 - e^{-\delta T}} > 1$ og $\frac{\int_0^T F(t)e^{-\delta t} dt}{G(T)(1 - e^{-\delta T})} > 0$ siden $G(T)$ og $\int_0^T F(t)e^{-\delta t} dt$ begge er positive. Dermed vil

parentesen være større enn 1 og optimal rotasjonstid vil da være kortere når man tar hensyn til alle fremtidige perioder enn når man bare tar hensyn til en periode. Hvis de eksterne godene er 0, ser vi også at vi ender opp med Faustmanns formel (2.10).

Et av de eksterne godene fra skogen er opptak av karbon. Van Kooten, Binkley og Delcourt (1995) så på effekten av karbonopptak på optimal rotasjonstid.

2.2.5 Van-Kooten et al.

Det er forskjellige syn på hvor mye karbon som blir tatt opp i skogen. Van Kooten et al. (1995) antar at karbonopptaket er proporsjonalt med skogveksten, og de bruker derfor ikke en ekstra funksjon for dette godet. Deres netto nåverdi av karbonopptaket i skogen over en periode, $NNV_K(T)$, ser da slik ut

$$NNV_K(T) = \int_0^T p_k \alpha G'(t) e^{-\delta t} dt \quad (2.17)$$

hvor p_k er prisen på karbon som blir fjernet fra atmosfæren, som er satt konstant, og α er antall tonn karbon skogen tar opp per m^3 av tømmer. I motsetning til Hartmanns formel er det ikke volumet eller alderen av skogen, men endringen av volumet i skogen som gir ”karboninntekter”, og derfor blir $G'(t)$ brukt (Van Kooten et al. 1995).

Videre er netto nåverdien av tømmeret gitt som tidligere av den diskonterte verdien av tømmeret som blir solgt i år T , men man må også trekke fra den diskonterte eksterne kostnaden av karbonet som blir sluppet ut. Netto nåverdi av hogsten over en periode, $NNV_H(T)$, er derfor

$$NNV_H(T) = p_t G(T) e^{-\delta T} - p_k \alpha (1 - \beta) G(T) e^{-\delta T} \quad (2.18)$$

Her er p_t , prisen på tømmer, antatt konstant, β er hvor stor del av det avvirkede tømmeret som lagrer karbonet over lang tid ved å bli brukt til bygninger osv. Netto nåverdi av opptak og utslipp av karbon, samt inntektene fra avvikning for alle fremtidige perioder blir derfor

$$NNV(T) = \frac{\int_0^T p_k \alpha G'(t) e^{-\delta t} dt + p_t G(T) e^{-\delta T} - p_k \alpha (1 - \beta) G(T) e^{-\delta T}}{1 - e^{-\delta T}} \quad (2.19)$$

Maksimering av netto nåverdien gir

$$\left[(p_t + p_k \alpha \beta) \frac{G'(T)}{G(T)} + \delta p_k \alpha \right] = \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \left[(p_t + p_k \alpha \beta) + \frac{\delta p_k \alpha}{G(T)} \int_0^T G(t) e^{-\delta t} dt \right] \quad (2.20)$$

Her er altså prisen på karbon antatt å være konstant, men som nevnt tidligere viser flere prognoser at denne prisen vil øke. Jeg vil derfor nå se på hvordan den optimale omløpstiden endres ved at prisen på karbon er en funksjon av tiden, $P(t)$, og sammenligne med resultatene ved en konstant karbonpris, og med den private optimale rotasjonstiden.

3.0 Modellformulering

Før jeg skal presentere mine modeller vil jeg først komme inn på noen antakelser og forenklinger jeg har gjort for å gjøre mine modeller mer intuitive og enklere å forstå. Disse forenklingene vil være med å spille inn på resultatene, noe som gjør det viktig å være klar over dem. Noen av antakelsenes forventede innvirkning på resultatet og generell diskusjon rundt disse vil jeg komme tilbake til i diskusjonen i kapittel 4. Mine modeller bygger videre på modellen til Van Kooten et al. (1995), som igjen bygger sin modell på Faustmann (1849) og Hartman (1976).

Jeg antar at skogeier i år 0 planter en skog på et areal, og deretter avvirker alle trærne på arealet samtidig (i år T), for så å plante nye trær på arealet osv. På hele dette arealet antar jeg at jorda har lik produksjonsevne eller bonitetsverdi, og denne bonitetsverdien vil holdes konstant for all fremtid. Volumet til den jevnaldrende skogen har en funksjon $G(t)$ (se figur 1), hvor G er volumet av stående tømmer i skogen i m^3 og t er alderen på skogen i antall år siden planting. $G(t)$ antas å vokse raskt de første årene, men avta og etter hvert stoppe opp. I likhet med Van Kooten et al. (1995) antar jeg at skogens karbonopptak er proporsjonal med skogveksten. Videre antar jeg at alt karboninnholdet i skogen slippes ut i atmosfæren ved hogst, slik at β fra modellen til Van Kooten et al. (1995) er satt lik 0. Jeg antar også at man ikke driver noen form for skogskjøtseltiltak som for eksempel tynning eller avstandsregulering. Jeg antar at prisen på trevirke, p_t , er konstant, og at denne prisen er uavhengig av alderen på trærne. Prisen på trevirke, p_t , er satt lik 1 for å bli kvitt denne parameteren i modellene. For at dette ikke skal endre resultatene har jeg derfor satt en karbonpris, p , som er relativ til prisen på trevirke.

$$p = \frac{\alpha \cdot p_k}{p_t} \quad (3.1)$$

Her er α antall tonn karbon skogen tar opp per m^3 av tømmer, p_k er prisen per tonn karbon og p_t er gjennomsnittlig markedspris på tømmer per m^3 . Kostnader til eventuelt planting og avvirkning av skogen er også satt til null, og utslipp av karbon fra maskiner etc. ved hogst er ikke tatt hensyn til. Jeg er klar over at det er vesentlige forenklinger i forhold til skogvekst og karbonbinding, men det gir analytisk enklere uttrykk å jobbe med. I kapittel 4 vil jeg så drøfte virkningene av disse forenklingene.

Som nevnt tidligere vil jeg når jeg snakker om den private optimale rotasjonstiden kun ta hensyn til inntekter fra tømmer, og når jeg snakker om samfunnets optimale rotasjonstid kun ta hensyn til verdiene fra tømmer og karbonopptak. Jeg vil likevel komme inn på hvordan andre goder fra skogen kan påvirke rotasjonstiden i kapittel 4.

For å se på effekten av en prisendring på karbon over tid vil jeg først utlede samfunnets optimale rotasjonstid med konstant karbonpris for en periode og i likhet med Van Kooten et al. (1995) for alle fremtidige perioder.¹ Deretter vil jeg se på optimal rotasjonstid hvor prisen på karbon er en funksjon av tid, $P(t)$, for en periode, og deretter for alle fremtidige perioder. Prisen på trevirke vil bli holdt konstant.

For å belyse hva som skjer med rotasjonstiden i forskjellige scenarier vil jeg også bruke grafer. Disse grafene er kun ment som en illustrasjon, og vil inneholde en rekke forenklinger. Informasjon om valg av funksjon og andre parametere for å lage grafene er i vedlegget. Ulike valg av diskonteringsrenta vil som nevnt tidligere gi store utslag på optimal rotasjonstid. Jeg vil ikke gå inn på hva som vil være en korrekt diskonteringsrente her da min intensjon kun er å vise hvordan den optimale rotasjonstiden endres gitt en diskonteringsrente. Jeg har da valgt diskonteringsrenta, δ , til å være lik 5 %. Igjen er det viktig å påpeke at jeg ikke vil si noe om hva som er den optimale rotasjonsalderen i antall år, men heller hvordan rotasjonsalderen blir påvirket. I grafene hvor jeg viser utslagene til en endring av karbonprisen over tid vil jeg bruke funksjonen

$$P(t) = pe^{zt} \quad (3.2)$$

hvor z er prosentvis årlig endring i prisen på karbon.

En meget viktig begrensning ved modellene er at den kun finner den optimale rotasjonstiden gitt at skogen blir avvirket. Selv om modellen kommer frem til en optimal rotasjonstid for skogen, er det fortsatt mulig at det kan lønne seg å aldri hogge den. Netto nåverdien av å hogge i år T kan altså være mindre enn nåverdien av den uendelige strømmen av diskonterte karbonopptak og utslipp.

¹ Da min modell er noe ulik modellen til Van Kooten et al. (1995), vil jeg også utlede denne.

3.1 Optimal rotasjonstid for en periode ved konstant karbonpris

Netto nåverdien av tømmeret som blir avvirket ved tiden T vil være

$$NNV_H(T) = G(T)e^{-\delta T} - pG(T)e^{-\delta T} \quad (3.3)$$

Netto nåverdien er altså lik den diskonterte verdien av tømmeret ved salg minus kostnaden av karbonet som blir sluppet ut ved forbrenning. I modellene antar jeg som nevnt tidligere at alt avvirket tømmer slipper ut all karbon umiddelbart. Med disse forenklingene kan p i netto nåverdien for tømmer, $NNV_H(T)$, sees på som en skatt som er proporsjonal med inntektene fra tømmeret. Chang (1982) og Johansson og Löfgren (1985) viste at en slik proporsjonal skatt vil endre lønnsomheten, men ikke ha noen innvirkning på den optimale rotasjonstiden hvis skatten ikke førte til endringer i prisen på tømmer. I denne modellen vil vi i tillegg til nåverdien for tømmeret ha med netto nåverdien av strømmen av inntekter gjennom at skogen tar opp karbon, og vi får derfor et annet resultat. Netto nåverdien av karbonet som blir tatt opp i skogen, $NNV_K(T)$, over en periode med lengde T vil være

$$NNV_K(T) = \int_0^T G'(t)pe^{-\delta t} dt \quad (3.4)$$

Ved delvis integrasjon

$$NNV_K(T) = pG(T)e^{-\delta T} + p\delta \int_0^T G(t)e^{-\delta t} dt \quad (3.5)$$

Netto nåverdien av tømmeret, samt opptak og utslipp av karbon vil være

$$NNV(T) = NNV_K(T) + NNV_H(T) = pG(T)e^{-\delta T} + p\delta \int_0^T G(t)e^{-\delta t} dt + G(T)e^{-\delta T} - pG(T)e^{-\delta T} \quad (3.6)$$

$$NNV(T) = G(T)e^{-\delta T} + p\delta \int_0^T G(t)e^{-\delta t} dt$$

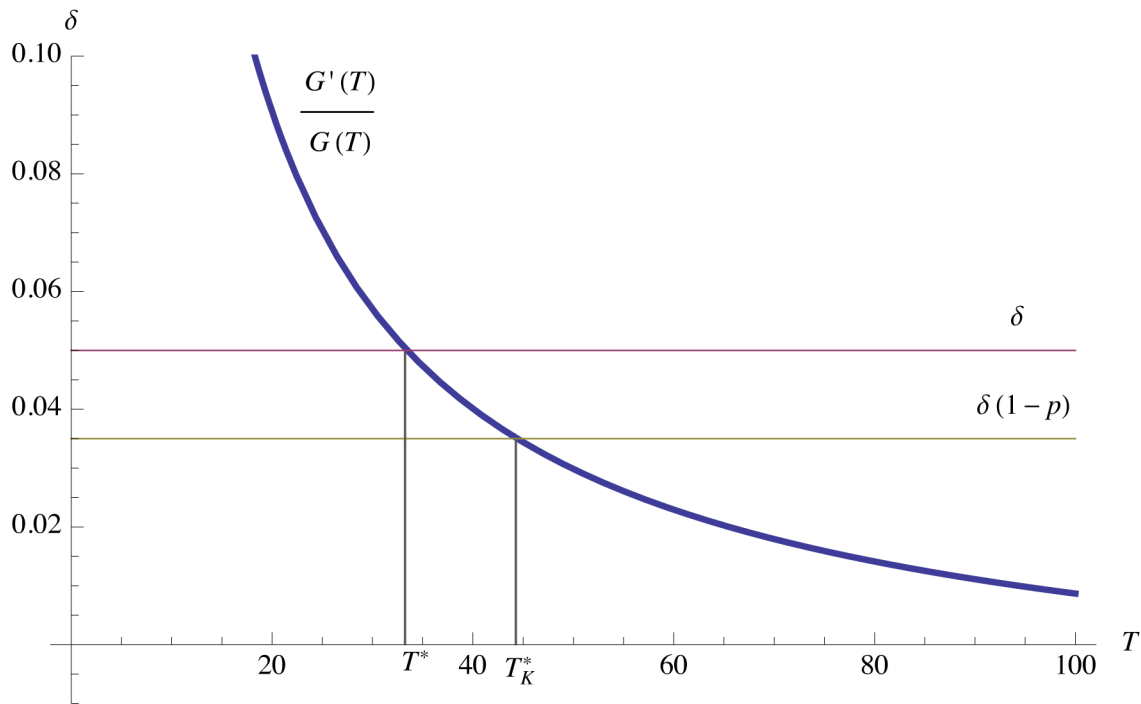
For å maksimere nåverdien deriverer vi $NNV(T)$ med hensyn på T og setter dette lik null.

$$NNV'(T) = G'(T)e^{-\delta T} - \delta G(T)e^{-\delta T} + p\delta G(T)e^{-\delta T} = 0 \quad (3.7)$$

som gir

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta(1-p) \quad (3.8)$$

Her ser vi at hvis $p=0$ vil den optimale rotasjonstiden bli lik den som ikke tar hensyn til karbon (2.7): $\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta$. Som nevnt tidligere vil den optimale rotasjonstiden bli lenger om man tar hensyn til opptak og utslipp av karbon. Dette kan vi også se fra figur 2, samfunnets optimale rotasjonstid som tar hensyn til karbon T_K^* er lengre enn skogeiers private optimale rotasjonstid T^* .



Figur 2: Privat optimal rotasjonstid T^* og samfunnets optimale rotasjonstid T_K^* for en periode.

$\frac{G'(T)}{G(T)}$	Skogens relative vekst
δ	En periode tømmerverdier
$\delta(1-p)$	En periode tømmerverdier og opptak og utslipp av karbon.

3.2 Optimal rotasjonstid for alle fremtidige perioder ved konstant karbonpris

Netto nåverdi for alle fremtidige perioder hvor man tar hensyn til karbon vil være

$$NNV(T) = \frac{NV_c + NV_H}{1 - e^{-\delta T}} = \frac{G(T)e^{-\delta T} + p\delta \int_0^T G(t)e^{-\delta t} dt}{1 - e^{-\delta T}} \quad (3.9)$$

Som tidligere for å maksimere nåverdien deriverer vi med hensyn på T og setter lik null

$$NNV'(T) = - \frac{e^{-\delta T} \delta (e^{-\delta T} G(T) + p\delta \int_0^T G(t)e^{-\delta t} dt)}{(1 - e^{-\delta T})^2} + \frac{-e^{-\delta T} \delta G(T) + e^{-\delta T} p\delta G(T) + e^{-\delta T} G'(T)}{1 - e^{-\delta T}} = 0 \quad (3.10)$$

som gir

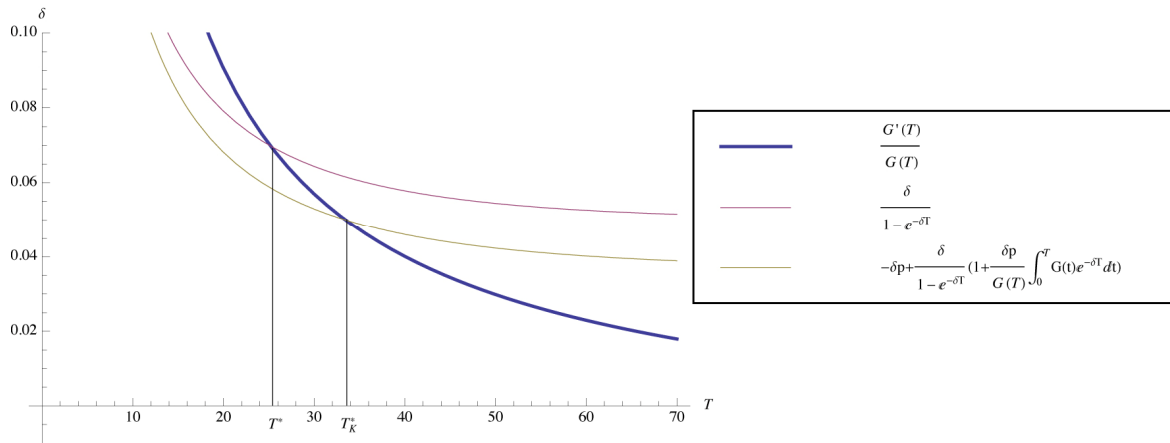
$$\frac{G'(T)}{G(T)} + \delta p = \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \left[1 + \frac{\delta p}{G(T)} \int_0^T G(t) e^{-\delta t} dt \right] \quad (3.11)$$

Fra uttrykket (2.20) til Van Kooten et al. (1995) ser vi at hvis man gjør forenklingene jeg presenterte tidligere vil man ende opp med dette uttrykket. (3.11) kan også skrives som

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = -\delta p + \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \left[1 + \frac{\delta p}{G(T)} \int_0^T G(t) e^{-\delta t} dt \right] \quad (3.12)$$

Her ser vi at hvis $p=0$ vil vi ende opp med Faustmanns formel (2.10): $\frac{G'(T)}{G(T)} = \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}}$. Fra

figur 3 ser vi igjen at samfunnets optimale rotasjonstid, som tar hensyn til karbon, T_K^* er lenger enn skogeiers optimale rotasjonstid, hvor man kun maksimerer tømmerinntektene T^* . Hvis vi sammenligner figur 3 med figur 2 ser vi også at rotasjonstidene når man tar hensyn til alle perioder er kortere enn hvis man bare maksimerer for en periode. Forklaringen på dette er den samme som i teorikapittelet, at man her også tar hensyn til landverdien.



Figur 3: Privat optimal rotasjonstid T^* og samfunnets optimale rotasjonstid T_K^* for alle fremtidige perioder.

$\frac{G'(T)}{G(T)}$	Skogens relative vekst
$\frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}}$	Faustmann (alle fremtidige perioder tømmerverdier)
$-\delta p + \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \left[1 + \frac{\delta p}{G(T)} \int_0^T G(t) e^{-\delta t} dt \right]$	Alle fremtidige perioder tømmerverdier og opptak og utslipp av karbon.

3.3 Optimal rotasjonstid for en periode ved endring i karbonpris

Jeg vil nå se på hvordan en endring i karbonprisen over tid vil påvirke den optimale rotasjonstiden. Som tidligere vil jeg først optimere for en periode og deretter for alle fremtidige perioder.

Netto nåverdien av karbonet som blir tatt opp i skogen over en periode med lengde T vil være

$$NNV_K(T) = \int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt \quad (3.13)$$

Netto nåverdien av tømmeret som blir avvirket ved tiden T vil være

$$NNV_H(T) = G(T)e^{-\delta T} - G(T)P(T)e^{-\delta T} \quad (3.14)$$

Netto nåverdien av tømmeret, samt opptak og utslipp av karbon vil være

$$NNV(T) = NNV_K(T) + NNV_H(T) = \int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt + G(T)e^{-\delta T} - G(T)P(T)e^{-\delta T} \quad (3.15)$$

Maksimerer netto nåverdien ved å derivere med hensyn på T og sette lik null. Dette forutsetter et globalt maksimum.

$$NNV'(T) = G'(T)e^{-\delta T} - \delta G(T)e^{-\delta T} + \delta G(T)P(T)e^{-\delta T} - G(T)P'(T)e^{-\delta T} = 0 \quad (3.16)$$

som gir

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta - \delta P(T) + P'(T) \quad (3.17)$$

eller

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta[1 - P(T)] + P'(T) \quad (3.18)$$

Her er det enkelt å se at hvis prisen på karbon endrer seg vil $P'(T) \neq 0$, og dermed ha en effekt på den optimale rotasjonstiden, men i tillegg vil også $P(T)$ ha en effekt. Dette gjør at effekten av en endring i karbonprisen ikke er så lett å få tak i som man kanskje først skulle tro når man ser uttrykket.

For å se hvordan samfunnets optimale rotasjonstid endrer seg når karbonprisen endrer seg over tid har jeg altså gått ut fra at $P(t) = pe^{zt}$. Hvor p er lik prisen i år null og z er årlig prosentvis endring. Videre vil jeg sammenligne samfunnets optimale rotasjonstid ved en prisendring på karbon over tid (T_K^{**}) med den private optimale rotasjonstiden (T^*) og samfunnets optimale rotasjonstid ved en konstant karbonpris (T_K^*). Fra (3.18) kan vi se at ved

en konstant karbonpris ($P(T) = pe^{0T} = p$ og $P'(T) = 0$), vil uttrykket bli likt som uttrykket i

$$(3.8): \frac{G'(T)}{G(T)} = \delta(1 - p).$$

Jeg vil nå se hva som skjer med samfunnets optimale rotasjonstid ved en nedgang i karbonprisen over tid ($z < 0$), ved en økning i karbonprisen over tid som er lik diskonteringsrenta ($z = \delta$), ved en økning i karbonprisen over tid som er høyere enn diskonteringsrenta ($z > \delta$), og til slutt ved en økning i karbonprisen over tid som er lavere enn diskonteringsrenta ($0 < z < \delta$). Jeg vil se på leddene i (3.17) for å forklare, og særlig se på størrelsen på $\delta P(T)$ eller δpe^{zT} i forhold til $P'(T)$ eller zpe^{zT} .

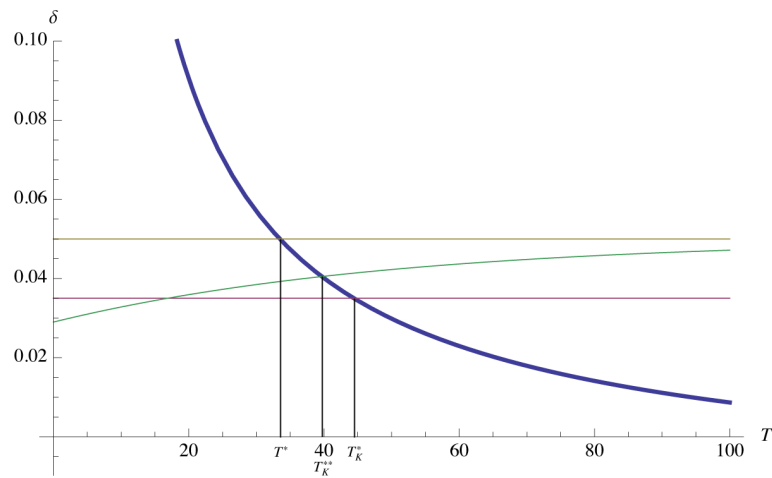
3.3.1 Nedgang i karbonprisen

Hvis prisen på karbon går ned ($z < 0 < \delta$) vil $\delta pe^{zT} > zpe^{zT}$, altså $\delta P(T) > P'(T)$, dermed vil samfunnets optimale rotasjonstid alltid være lengre enn den private optimale rotasjonstiden ($\delta - \delta P(T) + P'(T) < \delta$). Når T går mot uendelig vil høyresiden i (3.17) gå mot δ , og jo større prisnedgangen på karbon er jo raskere vil dette skje.

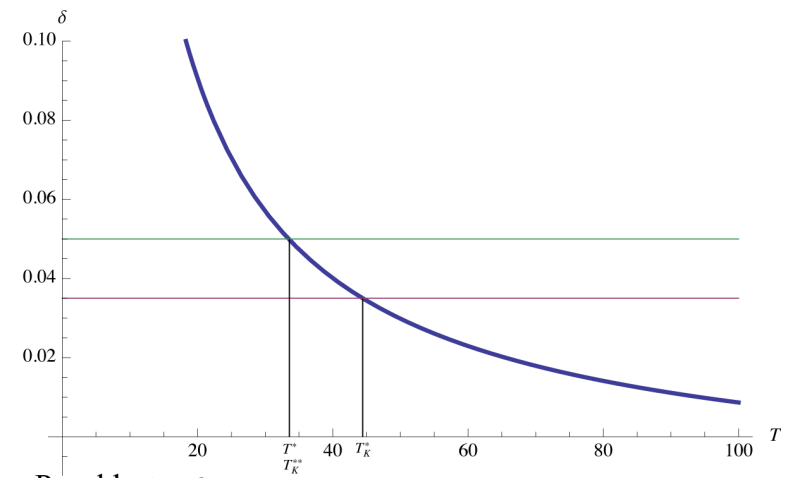
$$\lim_{T \rightarrow \infty} \delta - \delta P(T) + P'(T) \rightarrow \delta \quad (3.19)$$

Hvor lang rotasjonstiden blir i forhold til rotasjonstiden ved konstante karbonpriser kommer an på funksjonen for volumet av skogen $G(t)$, og størrelsene på diskonteringsrenta δ og prisøkningen z . Det er derfor vanskelig å gi et universelt svar på hvilken effekt en nedgang i karbonprisen vil ha på rotasjonstiden, men med en relativt liten T vil rotasjonstiden bli lengre enn ved en konstant pris, og ved en relativt høy T vil rotasjonstiden bli kortere enn ved en konstant pris. Hva som er en relativt lav og høy T vil avhenge av diskonteringsrenta og prisøkningen, men ved en gitt diskonteringsrente og prisøkning vil en hurtigvoksende skog som når tidlig "voksen alder" få en lengre rotasjonstid, mens en saktevoksende skog, som for eksempel den boreale skogen, vil få en kortere rotasjonstid.

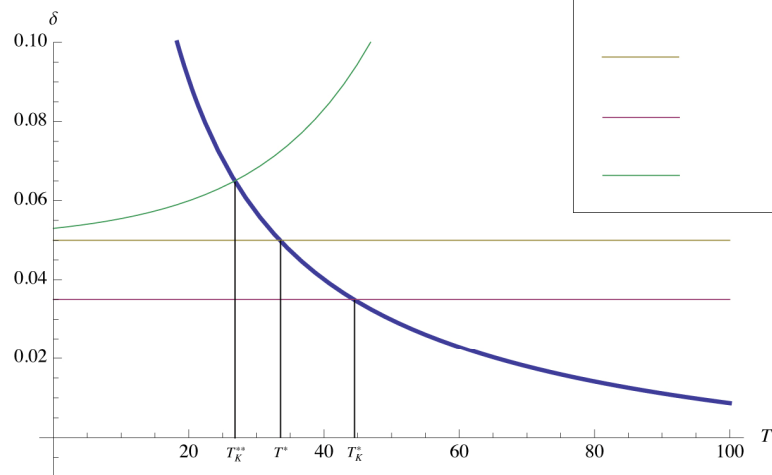
Figur 4 panel a på viser en nedgang i karbonprisen per år på 2 % ($z = -0,02$). Her ser vi at den optimale rotasjonstiden med nedgang i karbonprisen (T_K^{**}) er lenger enn den private optimale rotasjonstiden (T^*), men i dette tilfellet kortere enn ved en konstant karbonpris (T_K^*).



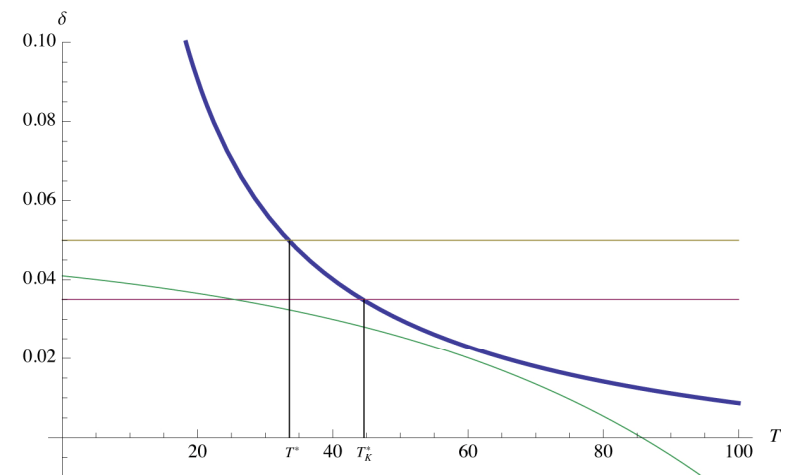
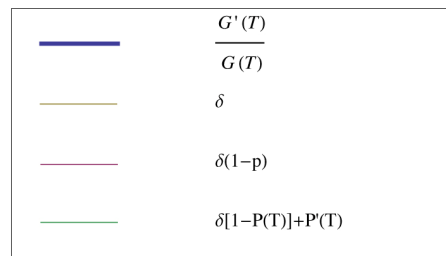
Panel a ($z < 0 < \delta$)



Panel b ($z = \delta$)



Panel c ($z > \delta$)



Panel d ($0 < z < \delta$)

Figur 4: Privat optimal rotasjonstid (T^*) og samfunnets optimale rotasjonstid ved konstante karbonpriser (T_K^*) og ved endrede karbonpriser (T_K^{**}) for en periode

3.3.2 Økning i karbonpris lik diskonteringen

Den eneste effekten karbonlagring har på rotasjonstiden i denne modellen, som altså forutsetter at skogen avvirknes, er gjennom diskonteringen. Skogen tar først opp karbon, og ved avvirkning slippes like mye karbon ut igjen. Hvis diskonteringsrenta hadde vært 0 og vi hadde hatt konstante karbonpriser, ville altså nåverdien av karbonet som blir tatt opp være lik nåverdien av karbonet som blir sluppet ut. Samme resultat blir det også hvis økningen i karbonprisen er lik diskonteringen. Dermed vil ikke opptak og utslipp av karbon ha noen effekt på den optimale rotasjonstiden, og den private og samfunnets optimale rotasjonstid vil være lik. Dette er som sagt forutsatt at skogen hogges. Siden $z = \delta$ vil $\delta pe^{zT} = zpe^{zT}$, altså $\delta P(T) = P'(T)$, og samfunnets optimale rotasjonstid med en økning i karbonprisen lik diskonteringen, blir derfor lik den private optimale rotasjonstiden (2.7). Dette kan vi også se på figur 4 panel b, der T_K^{**} nå er lik T^* .

3.3.3 Høyere økning i karbonpris enn diskontering

Hvis økningen i karbonprisen er større enn diskonteringen ($z > \delta$) vil $\delta pe^{zT} < zpe^{zT}$, altså $\delta P(T) < P'(T)$, og samfunnets optimale rotasjonstid vil derfor være kortere enn den private optimale rotasjonstiden. Siden modellen forutsetter avvirkning av skogen, kan det likevel være lønnsomt å la skogen stå. Særlig ved en sterkt økende karbonpris kan dette være tilfellet, se avsnitt 4.1.

3.3.4 Økning i karbonpris lavere enn diskontering

Hvis prisøkningen i karbonprisen er lavere enn diskonteringen ($0 < z < \delta$) vil $\delta pe^{zT} > zpe^{zT}$, altså $\delta P(T) > P'(T)$, og samfunnets optimale rotasjonstid vil derfor være lengre enn den private optimale rotasjonstiden.

Hvor lang rotasjonstiden blir i forhold til rotasjonstiden ved konstante karbonpriser kommer an på funksjonen for volumet av skogen $G(t)$, og størrelsene på diskonteringsrenta δ og prisøkningen z . Effekten her er motsatt av effekten ved en nedgang i karbonprisen. Med en relativt liten T vil rotasjonstiden bli kortere enn ved en konstant pris, og ved en relativt høy T vil rotasjonstiden bli lengre enn ved en konstant pris. Hva som er en relativt lav og høy T vil som tidligere avhenge av diskonteringsrenta og prisøkningen, men ved en gitt diskonteringsrente og prisøkning vil en hurtigvoksende skog som når tidlig ”voksen alder” få

en kortere rotasjonstid, mens en saktevoksende skog, som for eksempel den boreale skogen, vil få en lenger rotasjonstid. På figur 4 panel d ser vi at $\frac{G'(T)}{G(T)}$ og $\delta[1-P(T)]+P'(T)$ ikke krysser. I dette tilfellet vil det alltid være lønnsomt å utsette hogsten.

Når økningen i karbonprisen er lavere enn diskonteringen er det viktig å legge merke til at $\delta[1-P(T)]+P'(T)$ nå er konkav og ikke konveks som ved de andre optimale

rotasjonstidene. Man bør derfor være klar over at selv om $\delta[1-P(T)]+P'(T)$ og $\frac{G'(T)}{G(T)}$

krysser, så kan de krysse igjen. Dermed kan netto nåverdien etter at den først har avtatt begynne å vokse igjen, og den største netto nåverdien kan komme etter at grafene har krysset. Et eksempel på dette kan vi se i figur 5 panel d.

3.4 Optimal rotasjonstid for alle fremtidige perioder ved endring i karbonpris

For å finne den optimale rotasjonstiden med en endring i karbonprisen over flere perioder, vil jeg igjen starte med å sette opp netto nåverdien av tømmeret, samt opptak og utslipp av karbon.

$$NNV(T) = \frac{NNV_K(T) + NNV_H(T)}{1 - e^{-\delta T}} = \frac{\int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt + G(T)e^{-\delta T} - G(T)P(T)e^{-\delta T}}{1 - e^{-\delta T}} \quad (3.20)$$

Deriverer på T og setter lik null

$$NNV'(T) = - \frac{e^{-\delta T} \delta \left[e^{-\delta T} G(T) + \int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt - e^{-\delta T} G(T)P(T) \right]}{(1 - e^{-\delta T})^2} \quad (3.21)$$

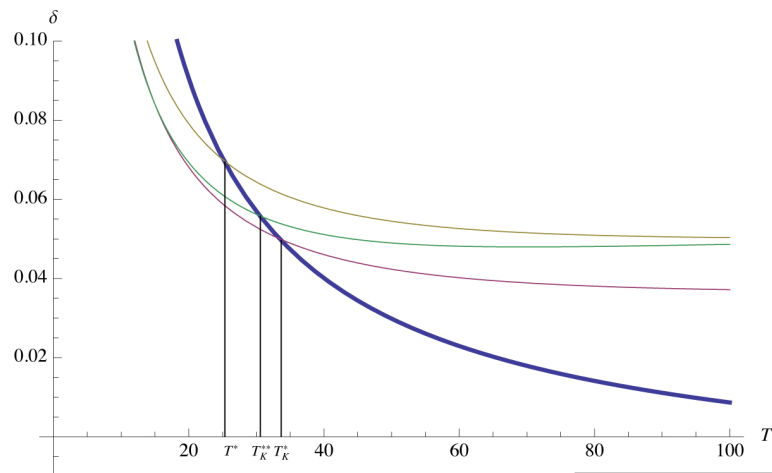
$$+ \frac{e^{-\delta T} G'(T) - e^{-\delta T} \delta G(T) + e^{-\delta T} \delta G(T)P(T) - e^{-\delta T} G(T)P'(T)}{1 - e^{-\delta T}}$$

som gir (se vedlegg for utregning)

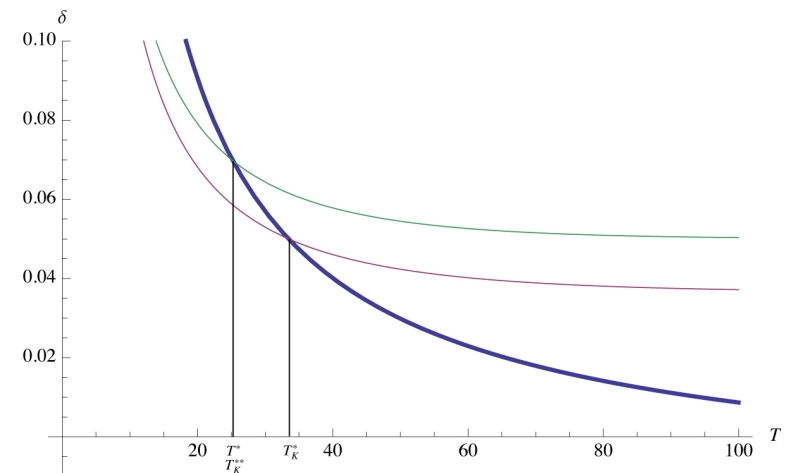
$$\frac{G'(T)}{G(T)} = P'(T) + \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \left[1 - P(T) + \frac{\int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt}{G(T)} \right] \quad (3.22)$$

Når man tar hensyn til alle fremtidige perioder, vil rotasjonstiden bli noe kortere enn ved bare å ta hensyn til en periode. Figur 5 på side 29 viser samfunnets optimale rotasjonstid ved ulike endringer i karbonprisen, sammen med den private optimale rotasjonstiden og samfunnets optimale rotasjonstid med konstant karbonpris. Effekten av de ulike endringene i karbonprisen sammenlignet med den private optimale rotasjonstiden (Faustmann) og samfunnets optimale rotasjonstid vil være lik effekten under en periode. Dette kan vi også se på figurene. Selv om figurene for flere perioder ikke gir samme rotasjonstider (alle er kortere ved flere perioder) som for en periode, ser vi at rekkefølgen mellom samfunnets optimale rotasjonstid med ulike endringer i karbonprisen, den private optimale rotasjonstiden

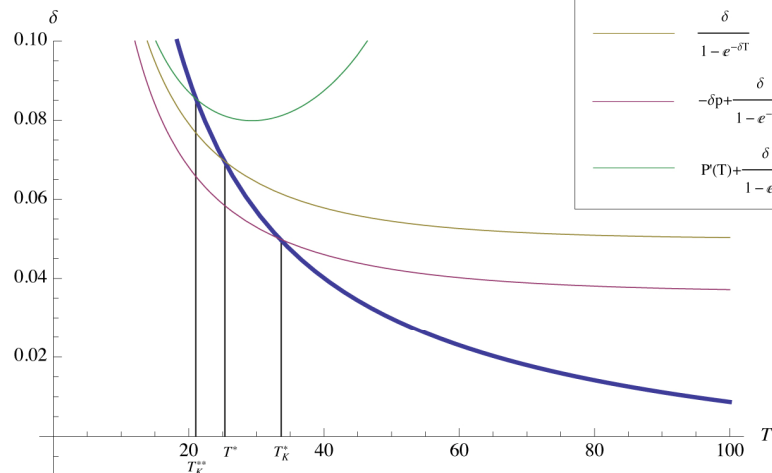
(Faustmann), og samfunnets optimale rotasjonstid ved konstant karbonpris er den samme. På figur 5 panel d ser vi at grafene krysser to ganger. Endringen i netto nåverdien vil være negativ i tiden mellom de to skjæringene, men siden den samlede positive endringen etter den andre skjæringen er større enn den samlede negative endringen mellom skjæringene, vil det lønne seg å alltid utsette hogsten.



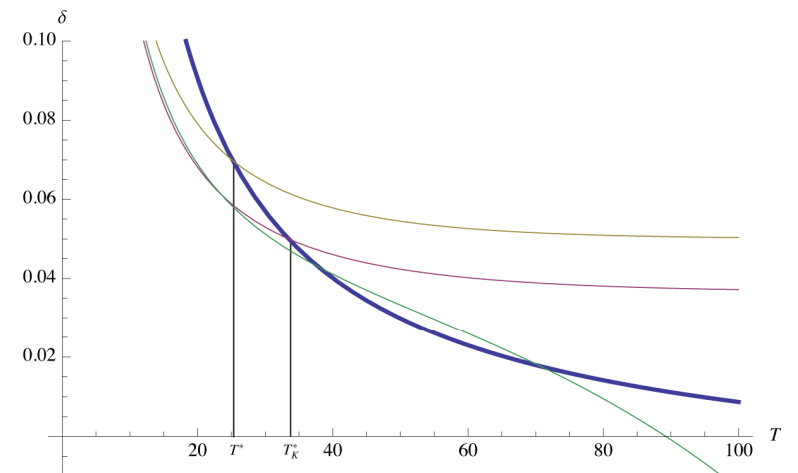
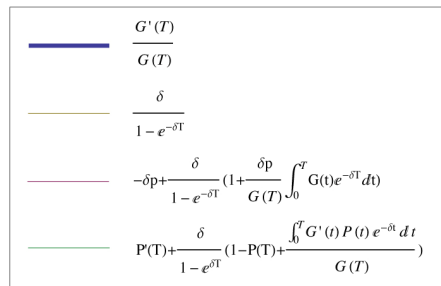
Panel a ($z < 0 < \delta$)



Panel b ($z = \delta$)



Panel c ($z > \delta$)



Panel d ($0 < z < \delta$)

Figur 5: Privat optimal rotasjonstid (T^*) og samfunnets optimale rotasjonstid ved konstante karbonpriser (T_K^*) og ved endrede karbonpriser (T_K^{**}) for alle fremtidige perioder.

3.5 Oppsummering av modellene

I modellene gikk jeg først gjennom de ulike scenarioene for en periode og deretter for alle fremtidige perioder. Ut fra resultatene kan vi se at effektene av de ulike scenarioene ga samme virkninger for en som for alle perioder, men den optimale rotasjonstiden for alle perioder var kortere fordi man der også tar hensyn til landverdien. Selv om det er store likheter mellom resultatene i modellene for en og for alle perioder, finner jeg det likevel hensiktsmessig å presentere modellene i begge tidsperspektiv da modellene for en periode gir en mer intuitiv forståelse, mens modellene for alle perioder ligger nærmere virkeligheten. Under følger en oversikt over resultatene fra modellene.

Tabell 1: Optimal rotasjonstid ved ulike scenarioer.

	En periode	Alle fremtidige perioder
Privat optimal rotasjonstid	$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta$	$\frac{G'(T)}{G(T)} = \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}}$
Samfunnets optimale rotasjonstid ved konstant karbonpris	$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta(1 - p)$	$\frac{G'(T)}{G(T)} = -\delta p + \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \left[1 + \frac{\delta p}{G(T)} \int_0^T G(t) e^{-\delta t} dt \right]$
Samfunnets optimale rotasjonstid ved endring i karbonprisen over tid	$\frac{G'(T)}{G(T)} = \delta[1 - P(T)] + P'(T)$	$\frac{G'(T)}{G(T)} = P'(T) + \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \left[1 - P(T) + \frac{\int_0^T G'(t) P(t) e^{-\delta t} dt}{G(T)} \right]$

Som vi har sett ut fra modellene vil altså samfunnets optimale rotasjonstid, som tar hensyn til karbon og tømmer, være lenger enn den private optimale rotasjonstiden, som kun tar hensyn til tømmeret, ved en konstant karbonpris. En endring i karbonprisen over tid vil gi en effekt på samfunnets optimale rotasjonstid som er avhengig av prisendringen, diskonteringsrenta og funksjonen av volumet for skogen. Jeg vil her nevne noen av de mest interessante funnene fra modellene. Resultatene gjelder for både en periode og alle fremtidige perioder. Igjen er det viktig å være klar over at modellen forutsetter at skogen blir avvirket.

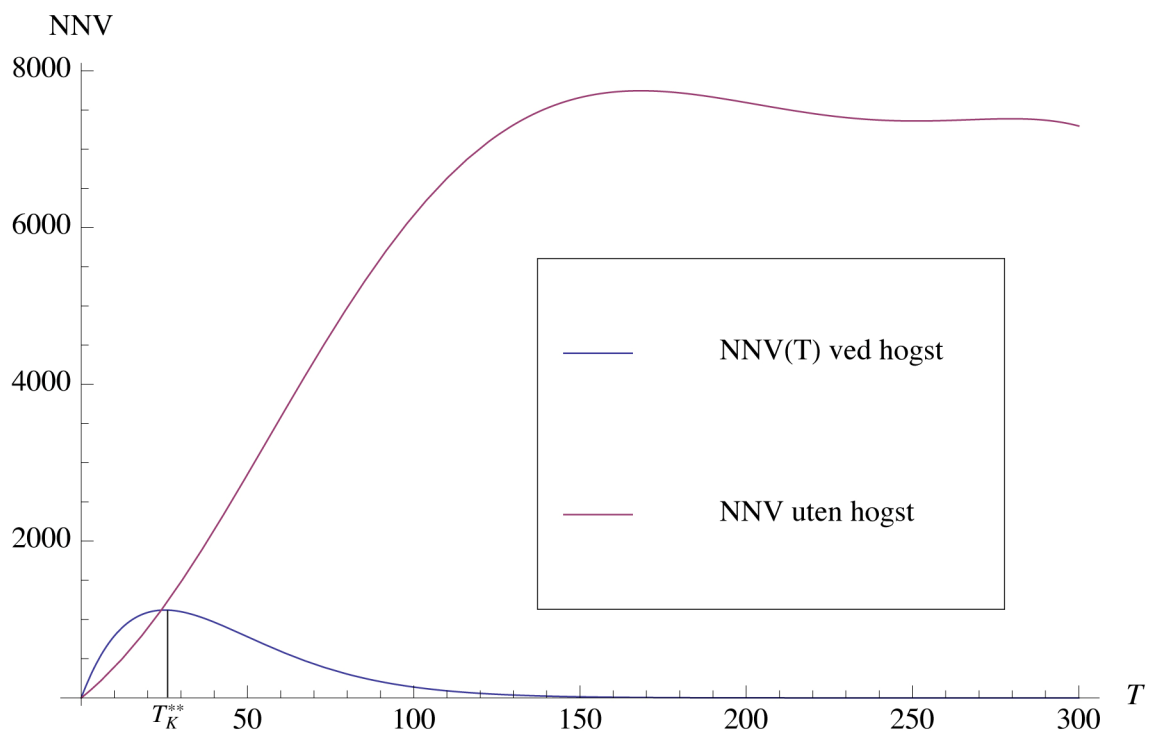
1. En økning i karbonprisen som er høyere enn diskonteringsrenta gjør samfunnets optimale rotasjonstid kortere enn den private optimale rotasjonstiden.
2. En økning i karbonprisen som er lik diskonteringsrenta gjør samfunnets optimale rotasjonstid lik den private optimale rotasjonstiden.
3. En økning i karbonprisen som er mindre enn diskonteringsrenta vil under visse betingelser gjøre samfunnets optimale rotasjonstid lenger enn ved en konstant karbonpris hvis skogen vokser sakte (boreal skog), og kortere enn ved en konstant karbonpris hvis skogen vokser fort.
4. En nedgang i karbonprisen vil under visse betingelser gjøre samfunnets optimale rotasjonstid kortere enn ved en konstant karbonpris hvis skogen vokser sakte (boreal skog), og lenger enn ved en konstant karbonpris hvis skogen vokser fort.

4.0 Diskusjon

Dette kapittelet inneholder en diskusjon av resultatene fra modellene mine sett i lys av begrensningene til modellene og de antakelsene jeg har gjort.

4.1 Forutsetning om at skogen blir avvirket

Modellene i denne oppgaven forutsetter altså at skogen blir avvirket. I følge modellene er det mulig at det vil lønne seg å alltid utsette avvirkningen av skogen, som for eksempel på figur 4 panel d (side 23), men det vil ikke lønne seg å la skogen stå. For å finne ut om det lønner seg å avvirke skogen eller ikke må netto nåverdien av å avvirke i år T sammenlignes med nåverdien av den uendelige strømmen av diskonterte karbonopptak og utslipp. Figur 6 viser et eksempel hvor det lønner seg å la skogen stå, det vil si hvor netto nåverdien av å hogge i år T_K^{**} i alle fremtidige perioder er lavere enn netto nåverdien av å la skogen stå, gitt at skogen har stabilisert seg etter 300 år. Dette kan for eksempel inntreffe når prisøkningen på karbon er positiv og øker mer enn prisen på tømmer.



Figur 6: Netto nåverdi ved hogst av å avvirke i år T og netto nåverdi ved å ikke avvirke

Den diskonterte strømmen av verdien av karbonopptaket vil bli større en ved en konstant karbonpris, noe som vil gjøre det mer lønnsomt å la skogen stå enn ved konstant pris. I tillegg

kan kostnaden ved å avvirke (slippe ut karbon) bli så stor i forhold til inntekten fra et tømmer salg at det vil lønne seg å la skogens stå. Dette kan man finne paralleller til i dagens skogbruk og er ikke så urealistisk som man kan tro. For eksempel kan det være privatøkonomisk ulønnsomt å avvirke skog i områder uten vei fordi kostnadene ved å bygge en vei kan være større enn gevinsten fra avvirkningen. Anta at investeringskostnadene I_v ved å bygge vei. Den privatøkonomiske netto nåverdien av hogst for en periode er da gitt ved $NNV(T) = G(T)e^{-\delta T} - I_v e^{-\delta T}$. Merk at det i flere år har blitt gitt støtte til avvirkning gjennom støtte til veibygging i avsidesliggende områder i Norge (Eriksen et al. 2004).

4.2 Diskonteringsrenta

Som nevnt tidligere er diskonteringsrenta sentral i netto nåverdiberegninger. Særlig når det er snakk om inntekter og utgifter langt frem i tid har diskonteringsrenta en stor innvirkning på netto nåverdien. Antakelsen om at den private diskonteringsrenta er lik den sosiale vil derfor påvirke resultatene i modellene. Den private diskonteringsrenta vil som regel være større enn den sosiale. Dette vil gjøre at samfunnets optimale rotasjonstid og den private optimale rotasjonstiden vil divergere mer enn ved en lik diskonteringsrate.² For en samfunnsplanlegger vil dette gjøre det enda mer aktuelt å gripe inn med virkemidler for at den private optimale rotasjonstiden skal bli mer lik samfunnets optimale rotasjonstid.

4.3 Karbonlagring i byggematerialer

Det blir antatt i modellene at alt karboninnholdet i skogen slippes ut i atmosfæren ved hogst. I virkeligheten vil nok en stor del av karbonet fra skogen slippes ut i atmosfæren de første årene etter avvirkning, men en del vil også bli langvarig lagret i byggematerialer. Ifølge en rapport fra Klif går omtrent 20 % av den norske skogens avvirkning til byggematerialer (Haugland et al. 2011). Karboninnholdet i disse materialene kan lagres i flere hundre år. Brainard et al. (2006) har også laget en funksjon for trevirkets utslipp av karbon over tid etter hogst. Likevel har jeg valgt å forenkle modellene ved min antakelse, da en slik funksjon ville komplisert modellene og gjort de mindre intuitive. Ved innrapportering til FNs klimapanel beregnes også karbonutslippet i det året hogsten finner sted og ikke når det faktisk forbrennes eller nedbrytes

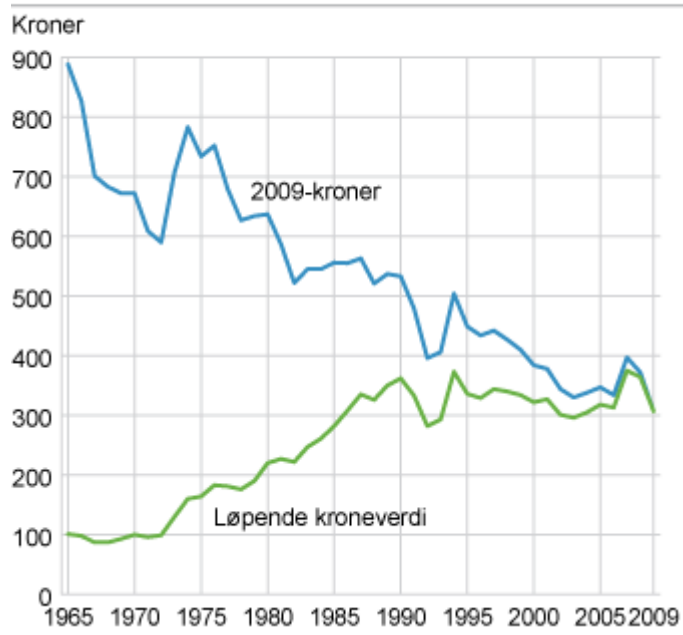
² Ved en sterkt økende karbonpris over tid er det mulig at en ulik diskonteringsrente vil gjøre samfunnets optimale rotasjonstid mer lik den private, men en sterkt økende karbonpris gjør det også sannsynlig at det ikke lønner seg å hogge skogen.

(Haugland et al. 2011). Med en eventuell endring i regelverket i fremtidige klimaforhandlinger slik at man kan få godskrevet mer av opptakene av karbon ved skogtiltak, kan det også være hensiktsmessig å bruke samme antakelse i modellene som ved innrapportering til FN. Van Kooten et al. (1995) har i sin modell en parameter, β , som sier hvor mye av karbonet i trevirket som blir langvarig lagret i byggematerialer. Her kan vi se at hvis andelen som går til langvarig lagring øker, vil den optimale rotasjonstiden bli kortere. Hadde oppgavens modeller tatt høyde for dette, ville samfunnets optimale rotasjonstid altså blitt kortere.

4.4 Pris på trevirke

Jeg antar også at prisen på trevirke er konstant over tid, og at denne prisen er uavhengig av alderen på trærne. Hvordan prisen på trevirke utvikler seg fremover i tid er ikke gitt, og den vil antakeligvis heller ikke holdes konstant. Fra figur 6 (side 31) kan vi se at fra 1965 har gjennomsnittsprisen på tømmer i løpende kroneverdi i Norge gått opp, mens i 2009-kroner er det en ganske kraftig nedgang. Prisen på trevirke er likevel satt konstant for å forenkle modellene. I virkeligheten ville også prisen på trevirke variere i forhold til alderen på trærne, da ulik alder gir ulikt skurutbytte og dermed ulik pris. Ulik kvalitet av trevirke av andre grunner, som for eksempel tynning, som jeg nå vil komme inn på, gir heller ikke andre tømmerpriser i modellene mine.

Gjennomsnittlig tømmerpris i løpende kroneverdi og 2009-kroner



Figur 7: Gjennomsnittlig tømmerpris i løpende kroneverdi og 2009-kroner (ssb.no 2011)

4.5 Tynning

Det blir altså antatt i modellene at det ikke blir gjort noen form for skogskjøtselstiltak som for eksempel tynning eller avstandsregulering. Tynning kan være med på å gi de resterende trærne større volumtilvekst, men det samlede volumet i skogen vil bli mindre (Braastad og Tveite 2000; Braastad og Tveite 2001; Øyen 2003). Tynning kan da være lønnsomt fordi skogeier kan få en høyere pris pr m³ for trevirket på grunn av høyere kvalitet og fordi kostnadene ved hogst vil bli lavere. Likevel hevder flere at den private lønnsomheten ved å tynne er usikker (Braastad og Tveite 2001; Øyen 2003). På grunn av mindre volum i skogen ved tynning, ville samlet karboninnhold blitt lavere, men siden tynning også er med på å øke kvaliteten på trevirket vil skurandelen gå opp, og en større del av karbonet vil dermed bli langvarig lagret i byggematerialer. Dette kan altså sees i sammenheng med de to foregående avsnitt, og er et argument for at om man skal få med effekten av tynning i modellene, bør man også ha med at en del av karbonet blir langvarig lagret i byggematerialer, og at prisen på trevirket vil være høyere. På grunn av de motstridende effektene er det vanskelig å si om tynning og andre skogskjøtselstiltak vil øke samfunnets verdier av skogbruk. Dette vil sannsynligvis også avhenge av boniteten og forholdene ellers i skogen.

4.6 Antakelsen om proporsjonalitet mellom opptak av karbon og skogveksten

I modellene har jeg antatt proporsjonalitet mellom opptak av karbon i skogen og skogveksten. Når skogen slutter å vokse vil skogen altså ikke ta opp mer karbon i modellene. Knohl et al. (2003) hevder derimot at skogen fortsetter å ta opp karbon også etter at den har sluttet å vokse. De overvåket en 250 år gammel naturskog hvor man antok at nettoopptaket av karbon ville ligge på rundt null. Studien deres viste likevel at skogen hadde et stort karbonopptak som var signifikant større enn null. Dette antas å være på grunn av karbonopptak i skogsjorda, noe som taler for at skogens opptak av karbon bør følge en annen funksjon enn skogveksten, slik som Hartman (1976) har brukt for andre skogsverdier. Om en slik funksjon hadde vært med i modellene hvor karbonopptaket er positivt også etter at skogen har sluttet å vokse, ville samfunnets optimale rotasjonstid blitt forlenget, og under visse forhold ville det blitt lønnsomt å ikke hogge skogen.

Skogen lagrer karbon både i trærne og i skogsjorda. Umiddelbart etter hogst vil jorda få et tilskudd av karbon fra hogstavfallet, men den totale effekten avvirkning har på karbonlageret i jorda er usikker. Nilsen et al. (2008) hevder at den totale effekten hogst har på karbonlageret i jorda er usikker, og at jorda vil holde på sitt opprinnelige karbonlager over tid. Johnson et al. (2009) hevder derimot at karbonlageret vil reduseres ved hogst. Dette vil i så fall være et argument for redusert hogst eller lenger rotasjonstid.

4.7 Usikkerhet

I modellene mine har jeg antatt at skogen står sikkert frem til skogeier eventuelt avvirker den. I virkeligheten er dette noe usikkert, da skogen for eksempel kan bli utsatt for billeangrep eller brann. Reed undersøkte i 1984 hvilken innvirkning en skogbrann, eller andre katastrofer som ville ødelegge hele skogen, hadde på den optimale rotasjonstiden. Han fant at ved risiko for brann bør diskonteringsrenta øke med en størrelse som er lik den gjennomsnittlige frekvensen brann oppstår. Skogeier trenger altså en risikopremie for å veie opp for at skogen muligens ødelegges. En økning i diskonteringsrenta vil føre til en kortere rotasjonstid. Dette betyr videre at om usikkerhet for brann eller andre katastrofer i skogen hadde vært med i modellene, ville den optimale rotasjonstiden for både skogeier og samfunnet blitt kortere, og lønnsomheten ved skogbruk vil avta.

4.8 Påvirkningen på optimal rotasjonstid av andre goder fra skogen.

Skogen produserer som nevnt tidligere flere goder enn tømmer og karbonopptak. Jeg vil nå komme inn på hvordan biologisk mangfold, rekreasjonstjenester og jakt kan være med på å endre den optimale rotasjonstiden.

4.8.1 Biologisk mangfold

Ifølge Norsk rødliste for arter lever om lag 50 % av de truede eller nær truede artene i skogen (Kålås et al. 2010). Over halvparten av disse artene er antatt å være negativt påvirket av arealendringer i skogbruket, og både flatehogst og plukkhogst blir ansett som en negativ faktor. Biologisk mangfold vil derfor være med på å gjøre samfunnets optimale rotasjonstid lenger, men i tillegg til at verdien av biologisk mangfold vil være økende med alderen på skogen, vil verdien av vernet skog i høyproduktive områder være stor. Nesten 20 % av artene er avhengig av eldre skog med naturskogpreg med mye død ved. I naturindeks for Norge 2010, som skal gi et overblikk for utviklingen av biologisk mangfold, blir de indirekte indikatorene ”gamle trær” og ”liggende død ved” gitt lave verdier som følge av skogbruksaktivitet (Nybø 2010). På grunn av lavere realpriser på trevirke har andelen med gammelskog vært økende de siste 20 årene, men blant de mest produktive områdene hvor flere av de truede artene hører hjemme er andelen gammelskog liten (Larsson og Hylen 2007). For å øke det biologiske mangfoldet kan det altså være et mål å verne høyproduktiv skog, fordi virkemidler, som for eksempel reduserer lønnsomheten i skogbruket, kun vil stoppe avvirkningen i de minst lønnsomme områdene.

4.8.2 Rekreasjonstjenester

Selv om noen finner stor verdi i å se en elg eller andre dyr på et hogstfelt, vil jeg i likhet med Hartman (1976) mene at verdien av rekreasjonstjenester er voksende med alderen på skogen. En slik positiv funksjon av rekreasjonstjenester vil, som vi så i Hartman, føre til en lenger rotasjonstid.

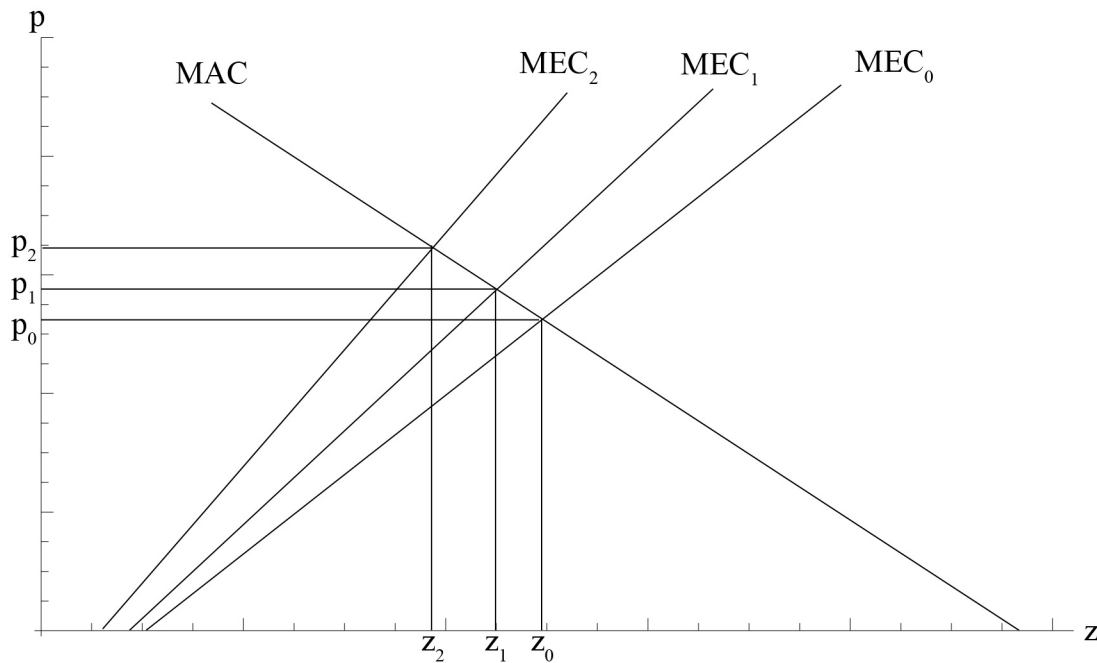
4.8.3 Jakt

På grunn av lavere realpriser på tømmer har inntekter fra jakt blitt viktigere for norske skogeiere. Hogstfelt er ideelle for jakt for enkelte arter med stor kommersiell verdi, for eksempel elg, og inntektene fra jakt vil derfor være størst de første årene etter avvikningen av skogen. Dette vil da være med å gjøre både den private og samfunnets optimale rotasjonstid kortere. Dette er noe skogeier allerede vil ta hensyn til ved å maksimere sine inntekter fra

skogen. Dette må likevel også med i samfunnets optimale rotasjonstid slik at ikke denne kun tar hensyn til tømmerinntektene.

4.9 Dynamisk vs. statisk optimering

I modellene har jeg antatt at prisen på karbon er eksogen. I optimum er denne prisen på karbon der marginal renskostnad (MAC) er lik den marginale kostnaden ved utslipp (MEC), se figur 8. I periode 0 vil da prisen være p_0 , og det optimale utslippet av karbon vil være z_0 . Hvis en tenker seg at de marginale kostnadene ved utslipp av karbon øker til periode 1, vist ved endringen fra MEC_0 til MEC_1 , ser vi fra figuren at den optimale prisen øker til p_1 , og det optimale utslippet av karbon er nå z_1 . De marginale kostnadene øker videre til periode 2 slik at optimal pris er p_2 , og det optimale utslippet nå er z_2 . Ved tre statiske optimeringer i periode 0, 1 og 2 er altså $p_0 < p_1 < p_2$, og $z_0 > z_1 > z_2$. Hvis man hadde vært klar over denne utviklingen, kunne en tatt høyde for dette og tilpasset utslippet av karbon ved å rense mer allerede i periode 0 til en høyere pris. En ville da fått en dynamisk optimal pris $p_t^D = p_0(1 + \delta)^t$. Hvis man da for eksempel i periode 1 ser at $p_1 > p_0(1 + \delta)^1$ burde man ha renset mer i periode 0. Hvis derimot $p_1 < p_0(1 + \delta)^1$ burde man renset mindre i periode 0. Dermed kunne man hatt et likt utslippsnivå over alle årene og en pris som hele tiden er lik prisen i dynamisk optimum. Problemet er at vi ikke har nok informasjon i periode 0 til å foreta denne dynamiske optimeringen. Når for eksempel forventningene om fremtidige skader oppdateres til det verre ved ulike rapporter, kan man få en pris som øker mer enn i det opprinnelige dynamiske optimumet. Ut fra dette kan man si at hvis prisen i mine modeller ikke er lik den dynamiske optimerede prisen over all fremtid, vil ikke de rotasjonstidene jeg kommer frem til være de dynamisk optimale under de ulike forholdene.



Figur 8: Statisk optimal pris (p) og utslipp av karbon (z) i periode 0 til 3.

4.10 Oppsummering av diskusjon

Ut fra de foregående diskusjonene er det klart at modellen har flere forenklinger og antakelser som ville endret resultatene fra modellen hvis de var inkludert. I tabell 2 er en oppsummering av forventet påvirkning fra ulike relevante faktorer på samfunnets optimal rotasjonstid ved konstante karbonpriser. Tabellen gir ikke noe entydig svar, men jeg vil likevel påstå at samfunnets optimale rotasjonstid og den private optimale rotasjonstiden divergerer. Når skogen i dag blir avvirket ved den private optimale rotasjonstid som ikke tar hensyn til flere av skogens goder, så er vi ikke i optimum. Derfor bør en benytte seg av virkemidler for å nærme seg samfunnets optimale rotasjonstid og optimum. Dette bør gjøres med virkemidler som er kostnadseffektive. Samfunnsplanleggeren må imidlertid også være klar over hvor store transaksjonskostnadene vil være ved å sette i gang virkemidler. Transaksjonskostnader er virkelig kostnader, og om transaksjonskostnadene er større en gevinsten ved virkemidler er det bedre å ikke innføre dem.

For å maksimere samfunnets verdier fra skogen er det flere mål som bør etterstrebes. I følge Tinbergen (1952) trenger man et virkemiddel per mål for å kunne få optimal måloppfyllelse.³

³ I noen situasjoner er målene så nært koplet sammen at ett virkemiddel gjør det mulig å oppfylle flere mål samtidig. Dette er imidlertid et spesialtilfelle, og man kan normalt ikke forvente at mål er så sterkt assosiert med hverandre.

Opptak og utslipp av karbon tilsier at rotasjonstiden i skogen bør forlenges. Derfor bør man ha et virkemiddel som forlenger rotasjonstiden, men for å bedre det biologiske mangfoldet er vern også et viktig virkemiddel.

Tabell 2: Påvirkning på samfunnets optimale rotasjonstid fra ulike faktorer.

	Påvirkning på samfunnets optimale rotasjonstid ved konstant karbonpris hvis inkludert i modellen
Karbonlagring i byggematerialer	Kortere rotasjonstid
Ulik pris på trevirke	Usikkert
Tynning	Usikkert
Ikke proporsjonalitet mellom karbonbinding og skogvekst	Lenger rotasjonstid
Fare for brann, billeangrep etc.	Kortere rotasjonstid
Biologisk mangfold	Lenger rotasjonstid
Rekreasjonstjenester	Lenger rotasjonstid
Jakt	Kortere rotasjonstid

5.0 Konklusjon

Klimagasser er med på å skape klimaendringer som påvirker hele kloden og kan endre tilværelsen til det verre for flere hundre millioner mennesker. De største ødeleggelsene kan likevel unngås om vi handler kraftig nå, og reduserer utslippene av klimagasser der det billigst å gjøre det (Stern 2007). Å hindre avskogning blir sett på som et billig klimatiltak, men det er også mulig å bremse klimaendringene i land uten avskogning. Tømmer er ikke det eneste godet skogen produserer – skog binder også karbon og produserer flere andre kollektive goder som for eksempel biologisk mangfold og rekreasjonstjenester. Ved at skogeier maksimerer sine inntekter fra skogen vil produksjonen av disse kollektive godene bli for liten. Jeg har derfor i denne oppgaven sett på endringen i rotasjonstid om man tar hensyn til de kollektive godene, som inkluderer opptak og utslipp av karbon.

Ved hjelp av modeller har jeg i denne oppgaven sett på forskjellen på den private optimale rotasjonstiden, som bare tar hensyn til tømmer, og samfunnets optimale rotasjonstid, som også tar hensyn til opptak og utslipp av karbon. Min første problemstilling var:

1. Hva er forskjellen mellom den private optimale rotasjonstiden og samfunnets optimale rotasjonstid?

Svaret på dette er at samfunnets optimale rotasjonstid med konstante karbonpriser er lenger enn den private optimale rotasjonstiden. Dette kan man se ved å sammenligne uttrykk (2.7) og (3.8) for en periode, og uttrykk (2.10) og (3.12) for alle fremtidige perioder.

Da flere publikasjoner anslår at fremtidige karbonpriser vil øke (Aune og Holtsmark 2009; Klimakur 2009), har jeg også sett på hvordan samfunnets optimale rotasjonstid blir påvirket av endrede karbonpriser. Min andre problemstilling var derfor:

2. Hvordan blir samfunnets optimale rotasjonstid påvirket av en endring i karbonprisen?

Svaret på problemstilling 2 er avhengig av endringen i karbonprisen. Ved å se på forskjellen mellom uttrykk (3.8) og (3.18) for en periode, og forskjellen mellom (3.12) og (3.22) for alle fremtidige perioder, kan man finne hvordan en endring i karbonprisen endrer samfunnets

optimale rotasjonstid. For et mer utfyllende svar på hvordan ulike endringer i karbonprisen over tid påvirker samfunnets optimale rotasjonstid henviser jeg til kapittel 3. Jeg vil likevel her nevne noen av de mest spennende funnene fra modellene. Resultatene gjelder for både en periode og alle fremtidige perioder.

1. En økning i karbonprisen som er høyere enn diskonteringsrenta gjør samfunnets optimale rotasjonstid kortere enn den private optimale rotasjonstiden.
2. En økning i karbonprisen som er lik diskonteringsrenta gjør samfunnets optimale rotasjonstid lik den private optimale rotasjonstiden.
3. En økning i karbonprisen som er mindre enn diskonteringsrenta vil under visse betingelser gjøre samfunnets optimale rotasjonstid lenger enn ved en konstant karbonpris hvis skogen vokser sakte (boreal skog), og kortere enn ved en konstant karbonpris hvis skogen vokser fort.
4. En nedgang i karbonprisen vil under visse betingelser gjøre samfunnets optimale rotasjonstid kortere enn ved en konstant karbonpris hvis skogen vokser sakte (boreal skog), og lenger enn ved en konstant karbonpris hvis skogen vokser fort.

Det er viktig å være klar over at en forutsetning i modellene i oppgaven er at skogen blir avvirket. Det er altså mulig at netto nåverdien ved å ikke hogge skogen vil være større enn netto nåverdien ved å hogge skogen i det året som maksimerer netto nåverdien i modellene. Denne forutsetningen diskuterer jeg i kapittel 4, i likhet med andre antakelser og forenklinger som kan være med på å endre den optimale rotasjonstiden.

Denne oppgaven gir også flere ideer til hva som kan være hensiktsmessig å arbeide med på dette området i fremtiden. Videre forskning bør blant annet se på forholdet mellom karbonbinding og utnyttbart trevirke, slik at man får bedre estimater for virkninger av skogskjøtsel på skurandel og dermed på netto karbonbinding og optimal rotasjonstid.

Det har tidligere blitt gjort mye teoretisk arbeid i skogøkonomien på virkninger av skatter og prisendringer på skogbruket, se blant annet Chang (1982) og Johansson og Löfgren (1985). Disse og lignende arbeider kan brukes for å stadfeste noen av effektene som opptak av karbon gir på rotasjonstid og lønnsomhet. En skatt på avvirkning kan for eksempel sammenlignes med kostnaden ved utslippet av karbon ved hogst. Fremtidig arbeid på utformingen av

virkemidler som kan brukes slik at rotasjonstiden i skogen blir mest mulig lik samfunnets optimale rotasjonstid bør være klar over det som er gjort tidligere i skogøkonomien, og se om dette også kan brukes i nye sammenhenger.

Vedlegg

For utregning av grafene i denne oppgaven har jeg valgt

$$G(t) = 5,63t^2 - 0,05065t^3 + 0,0001664t^4 - 1,904 \cdot 10^{-7} t^5 \quad (3.23)$$

$G(t)$ vil da være lik funksjonen i figur 1.

Ulike valg av diskonteringsrenta vil som nevnt tidligere gi store utslag på optimal rotasjonstid. Jeg vil ikke gå inn på hva som vil være en korrekt diskonteringsrente her da min intensjon kun er å vise hvordan den optimale rotasjonstiden endres gitt en diskonteringsrente. Jeg har da valgt diskonteringsrenta til å være lik 5 %.

For å finne en verdi for p antar jeg at skogen tar opp ca 0,2 tonn karbon per m^3 av tømmer. Gitt en CO_2 pris på ca 17 € per tonn, og en gjennomsnittlig pris på trevirke på ca 350 NOK, vil p da være tilnærmet lik

$$p = \frac{\alpha \cdot p_k}{p_t} = \frac{0,2 \cdot 3,67 \cdot (17 \cdot 8)}{350} \approx 0,3 \quad (3.24)$$

Her er en € er lik 8 NOK, og ett tonn karbon lik 3,67 tonn CO_2 . Igjen er det viktig å påpeke at jeg ikke vil si noe om hva som er den optimale rotasjonsalderen i antall år, men heller hvordan rotasjonsalderen blir påvirket.

Utregning mellom (3.21) og (3.22)

$$\frac{e^{-\delta T} \delta \left[e^{-\delta T} G(T) + \int_0^T G'(t) P(t) e^{-\delta t} dt - e^{-\delta T} G(T) P(T) \right]}{(1 - e^{-\delta T})^2} + \frac{e^{-\delta T} G'(T) - e^{-\delta T} \delta G(T) + e^{-\delta T} \delta G(T) P(T) - e^{-\delta T} G(T) P'(T)}{1 - e^{-\delta T}} = 0$$

Setter over

$$\frac{e^{-\delta T} G'(T) - e^{-\delta T} \delta G(T) + e^{-\delta T} \delta G(T) P(T) - e^{-\delta T} G(T) P'(T)}{1 - e^{-\delta T}} = \frac{e^{-\delta T} \delta \left[e^{-\delta T} G(T) + \int_0^T G'(t) P(t) e^{-\delta t} dt - e^{-\delta T} G(T) P(T) \right]}{(1 - e^{-\delta T})^2}$$

Ganger med $(1 - e^{-\delta T})^2$ på begge sider

$$\begin{aligned} & e^{-\delta T} G'(T)(1 - e^{-\delta T}) - e^{-\delta T} \delta G(T)(1 - e^{-\delta T}) + e^{-\delta T} \delta G(T) P(T)(1 - e^{-\delta T}) - e^{-\delta T} G(T) P'(T)(1 - e^{-\delta T}) \\ &= e^{-\delta T} \delta \left[e^{-\delta T} G(T) + \int_0^T G'(t) P(t) e^{-\delta t} dt - e^{-\delta T} G(T) P(T) \right] \end{aligned}$$

Deler med $e^{-\delta T}$ på begge sider

$$\begin{aligned} & G'(T)(1 - e^{-\delta T}) - \delta G(T)(1 - e^{-\delta T}) + \delta G(T) P(T)(1 - e^{-\delta T}) - G(T) P'(T)(1 - e^{-\delta T}) \\ &= \delta \left[e^{-\delta T} G(T) + \int_0^T G'(t) P(t) e^{-\delta t} dt - e^{-\delta T} G(T) P(T) \right] \end{aligned}$$

Åpner (noen) av parentesene

$$\begin{aligned}
 & G'(T)(1 - e^{-\delta T}) - \delta G(T) + \delta G(T)e^{-\delta T} + \delta G(T)P(T) - \delta G(T)P(T)e^{-\delta T} - G(T)P'(T)(1 - e^{-\delta T}) \\
 &= \delta e^{-\delta T} G(T) + \delta \int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt - \delta e^{-\delta T} G(T)P(T)
 \end{aligned}$$

Deler på $G(T)$

$$\begin{aligned}
 & \frac{G'(T)}{G(T)}(1 - e^{-\delta T}) - \delta + \delta P(T) - P'(T)(1 - e^{-\delta T}) \\
 & \quad \delta \int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt \\
 &= \frac{\delta \int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt}{G(T)}
 \end{aligned}$$

Deler på $(1 - e^{-\delta T})$

$$\begin{aligned}
 & \frac{G'(T)}{G(T)} - \frac{\delta}{(1 - e^{-\delta T})} + \frac{\delta P(T)}{(1 - e^{-\delta T})} - P'(T) \\
 & \quad \delta \int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt \\
 &= \frac{\delta \int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt}{G(T)(1 - e^{-\delta T})}
 \end{aligned}$$

som gir

$$\frac{G'(T)}{G(T)} = P'(T) + \frac{\delta}{1 - e^{-\delta T}} \left[1 - P(T) + \frac{\int_0^T G'(t)P(t)e^{-\delta t} dt}{G(T)} \right]$$

6.0 Referanser

- Angelsen, A. (2009). *Realising REDD+: national strategy and policy options*. Bogor, Indonesia: CIFOR. XXIV, 361 s.
- Anthoff, D., Tol, R. S. J. & Yohe, G. W. (2009). Discounting for climate change. *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, 3 (24): 1–24.
- Aune, F. R. & Holtsmark, B. (2009). *Vurdering av framtidige klimakvotepriser*. Rapporter. Oslo: SSB. 19 s.
- Bergseng, E. & Vatn, A. (2009). Why protection of biodiversity creates conflict-Some evidence from the Nordic countries. *Journal of Forest Economics*, 15 (3): 147-165.
- Brainard, J., Lovett, A. & Bateman, I. (2006). Sensitivity analysis in calculating the social value of carbon sequestered in British grown Sitka spruce. *Journal of Forest Economics*, 12 (3): 201-228.
- Braastad, H. & Tveite, B. (2000). Tynning i granbestand. *Effekten på tilvekst, dimensjonsfordeling og økonomi. Rapport fra skogforskningen*, 4 (00): 1–30.
- Braastad, H. & Tveite, B. (2001). Tynning i gran-og furubestand. *Effekt av tynning på volumproduksjon, middeldiameter og diameter av de, 800*: 1–27.
- Chang, S. J. (1982). An economic analysis of forest taxation's impact on optimal rotation age. *Land Economics*, 58 (3): 310-323.
- Clark, C. W. (2010). *Mathematical Bioeconomics: The Mathematics of Conservation*. Tredje utg.: John Wiley & Sons, Inc.
- Eriksen, R., Hobbelstad, K. & Aalde, H. (2004). Skogbruk og inngrepsfrie naturområder. *En analyse av sammenhengen mellom tilgjengelighet til skogressursene, bygging av skogsveier og bevaring av inngrepsfrie naturområder. NIJOS-rapport*.

- Faustmann, M. (1849). On the determination of the value which forest land and immature stands possess for forestry. *English edition edited by M. Gane, Oxford Institute Paper*, 42 (1968): 7–44.
- Hartman, R. (1976). The harvesting decision when a standing forest has value *Economic Inquiry*, 14 (1): 52-58.
- Haugland, H., Økstad, E., Gulbrandsen, M. U., Strømme, I., Fjeldal, P. & Leffertstra, H. (2011). *Skog som biomasseressurs*: Klif. 101 s.
- Holtmark, B. (2010). *Use of wood fuels from boreal forests will create biofuelcarbon debt with a long payback time*. Discussion papers. Oslo: Statistisk sentralbyrå, Forskningsavdelingen. 34 s.
- Johansson, P. O. & Löfgren, K. G. (1985). *The economics of forestry and natural resources*: Basil Blackwell Ltd.
- Johnson, K., Scatena, F. N. & Pan, Y. (2009). Short-and long-term responses of total soil organic carbon to harvesting in a northern hardwood forest. *Forest Ecology and Management*, 259 (7): 1262-1267.
- Klimakur. (2009). *Vurdering av framtidige kvotepriser*. Oslo: Statens forurensningstilsyn. 21 s.
- Klimakur. (2010). *Tiltak og virkemidler for å nå norske klimamål mot 2020*. Oslo: Klima- og forurensningsdirektoratet. 312 s.
- Knohl, A., Schulze, E. D., Kolle, O. & Buchmann, N. (2003). Large carbon uptake by an unmanaged 250-year-old deciduous forest in Central Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118 (3-4): 151-167.
- Kålås, J., Viken, Å., Henriksen, S. & Skjelseth, S. (2010). Norsk rødliste for arter 2010. *Artsdatabanken, Norge*.

- Larsson, J. Y. & Hysten, G. (2007). *Skogen i Norge: statistikk over skogforhold og skogressurser i Norge registrert i perioden 2000-2004*. Viten fra Skog og landskap. Ås: Norsk institutt for skog og landskap. 91 s.
- Nilsen, P., Hobbestad, K. & Clark, N. (2008). Opptak og utslipp av CO₂ i skog. Vurdering av omløpstid, hogstmetode og hogstfredning for CO₂-binding i jord og trær. *Oppdragsrapport fra Skog og Landskap 06/2008*.
- Nybø, S. (2010). *Naturindeks for Norge 2010: DN-utredning 3-2010*.
- Olschewski, R. & Benítez, P. C. (2010). Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. *Journal of Forest Economics*, 16 (1): 1-10.
- Pachauri, R. K. & Reisinger, A. (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Geneva: IPCC*.
- Polasky, S. & Doremus, H. (1998). When the Truth Hurts: Endangered Species Policy on Private Land with Imperfect Information* 1,* 2. *Journal of Environmental Economics and Management*, 35 (1): 22-47.
- Reed, W. J. (1984). The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest* 1. *Journal of Environmental Economics and Management*, 11 (2): 180-190.
- Searchinger, T. D., Hamburg, S. P., Melillo, J., Chameides, W., Havlik, P., Kammen, D. M., Likens, G. E., Lubowski, R. N., Obersteiner, M., Oppenheimer, M., et al. (2009). Fixing a Critical Climate Accounting Error. *Science*, 326 (5952): 527-528.
- Siry, J. P., Cubbage, F. W. & Ahmed, M. R. (2005). Sustainable forest management: global trends and opportunities. *Forest Policy and Economics*, 7 (4): 551-561.
- ssb.no. (2011). *Gjennomsnittlig tømmerpris i løpende kroneverdi og 2009-kroner*. <http://www.ssb.no/10/04/20/skog/>: Statistisk sentralbyrå.

- Stern, N. H. (2007). *The economics of climate change: the Stern review*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Tinbergen, J. (1952). *On the theory of economic policy*. Amsterdam: North-Holland. 78 s.
- Van Kooten, G. C., Binkley, C. S. & Delcourt, G. (1995). Effect of carbon taxes and subsidies on optimal forest rotation age and supply of carbon services. *American Journal of Agricultural Economics*, 77 (2): 365-374.
- Øyen, B.-H. (2003). *Tynning i granskog på Sørlandet: effekter på tilvekst, dimensjon og økonomi*. Rapport fra skogforskningen. Ås: Skogforsk. 16 s.