

Magnus Olai Landaas

En analyse av hvordan Carbon Removal Certification (CRC) påvirker optimal rotasjonstid i skog

Masteroppgave i Samfunnsøkonomi

Veileder: Tom Erik Thorkildsen

Juni 2023

Magnus Olai Landaas

En analyse av hvordan Carbon Removal Certification (CRC) påvirker optimal rotasjonstid i skog

Masteroppgave i Samfunnsøkonomi
Veileder: Tom Erik Thorkildsen
Juni 2023

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for økonomi
Institutt for samfunnsøkonomi



Kunnskap for en bedre verden

Forord

I forbindelse med masterstudier ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU) har jeg utarbeidet en masteroppgave.

Målet med oppgaven er å sette samfunnsøkonomisk teori i praksis.

Jeg vil gjerne takke Eli Bjørnhovde Rindal Treindustrien, Terje Brende og Hege Voll Midtgaard fra Bergene Holm for deres kunnskap om hvordan treindustrien i Norge opererer.

Jeg vil også takke veilederen min Tom Erik Thorkildsen, denne oppgaven hadde ikke vært mulig uten deg.

Sammendrag

Denne masteroppgaven utforsker de potensielle utfallene Carbon Removal Certification (CRC) har på den individuelle skogeier, skogsindustrien i Norge og samfunnsøkonomiske konsekvenser. Forskningsspørsmålet i oppgaven er:

Hvilke innvirkninger vil Carbon Removal Certification ha for den enkelte skogeier, vil hen utsette hogsttidspunktet av skogen sin og hvilke samfunnsøkonomiske konsekvenser vil Carbon Removal Certification ha for Norsk skogsindustrien?

Grunnlaget for modellene jeg har brukt for å løse denne oppgaven benytter jeg van Kooten et al. (1995) som er en teoretisk utredning av en Faustmann modell for verdisetning av skog og optimalt rotasjonstidspunkt som tar hensyn til karbonprising. For å svare på forskningsspørsmålet har jeg formulert to modeller, én modell som studerer den enkelte skogeiers tilnærming til CRC og én modell som studerer total effekten for samfunnet som også inkluderer gevinst fra bioenergi. Disse modellene er en utvidelse av van Kootens modell som inkluderer CRCs rammeverk hvor skogeier vil bli belønnet for endret oppførsel som resulterer i økt karbonlagring. For å sette modellen i praksis har jeg benyttet SiTree (Clara Antón-Fernández og Rasmus Astrup, 2021) som er et rammeverk for å simulere en enkel skogbestand med datapunkter helt ned til det individuelle treet.

Resultatet av analysen var at det økonomiske utfallet fra å introdusere CRC er avhengig av relasjoner mellom tømmer, energi og karbonpriser samt diskonteringsrenten. Hvor det er et positivt forhold mellom karbonpris og rotasjonstidspunkt som fører til at skogeier venter med å høste skogen. Det er da et negativt forhold mellom økte tømmer priser, energi priser, økt diskonteringsrente og rotasjonstidspunkt som fører skogeier til å redusere rotasjonstidspunktet.

Abstract

This thesis studies the potential consequences of EUs new climate proposal, Carbon Removal Certification (CRC). The goal of this study is to answer the following thesis question:

What will the impact of Carbon Removal Certification be on the individual forester, the Forest industry in Norway and the socio-economic consequences of this proposal.

The fundamental model that I have used to answer this question is van Kooten et al. (1995), that serves as a theoretical framework consisting of a Faustmann model for valuation of a forest stand and optimal rotation time that also includes carbon pricing. My attempt at answering the thesis question consists of two models. The first model is an isolated scenario that considers how the individual forester will adapt to the CRC framework. The second model studies the total socio-economic effects the CRC framework will have, this model also considers gains from bioenergy. These models can be described as an expansion of the van Kooten model which includes the CRC framework of additionality where the forester is rewarded for each additional ton of carbon he stores in his forest. To put the theory into practice I have used the SiTree (Clara Antón-Fernández and Rasmus Astrup, 2021) framework that simulates a single forest stand with datapoints all the way down to the granular level.

The result of my analysis is that the economic implications from introducing CRC are dependent on the relationship between timber, energy, and carbon prices together with interest rate. There is a positive correlation between carbon prices and the rotation period observed, leading to the forester delaying harvest. On the other hand, the rotations period is negatively correlated with increased timber prices, energy prices and interest rates causing the forest owner to reduce the rotation period.

Innholdsfortegnelse

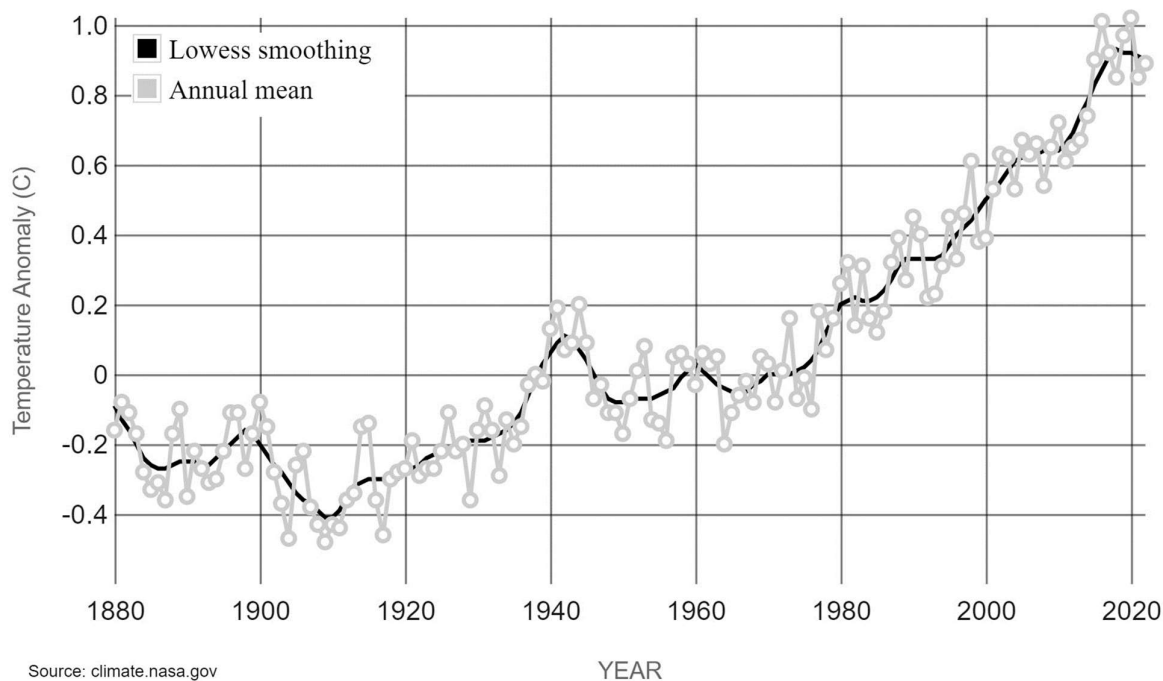
Sammendrag	2
Abstract.....	3
1.0 Innledning	7
1.1 Klimastatus	7
1.2 Internasjonale klimaavtaler	8
1.3.0 Karbonprising.....	9
1.3.1 Nordhaus karbonprising.....	9
1.4 Carbon Removal Certification.....	10
1.5 Problemstilling og hypotese	12
2. Bakgrunn	14
2.1 Boreal Skogen	14
2.2 Bonitet.....	15
2.3.1 Skog i Norge.....	15
2.3.2 Gran.....	18
2.3.3 Skogeiere i Norge.....	18
2.3.4 Klima	18
3. Metode (Fremgangsmåte)	20
3.1 Simulering ved hjelp av SiTree.....	20
3.1.2 Fremgangsmåte - Tre bestand.....	20
3.1.3. Vekstfunksjon (dbhi.BN2009) Bollandsås, Næsset (2009)	21
3.1.4 Mortalitet funksjon Bollandsås 2007	21
3.1.5 Rekrutering Bollandsås (2009)	22
3.1.6 optimal rotasjonstid	23
3.2.1 Rotasjonsmodell for en periode	24
3.2.2 En kontinuerlig rotasjon modell	25
3.2.3 Rotasjon som tar hensyn til karbon.....	26
3.3 Modell formulering.....	27
3.3.1 Antakelser	27
3.2.2 Skogeierens tilnærming til CRC	29
3.2.3 Samfunnets tilnærming til CRC.....	30
4.0 Resultater – simulering.....	31
4.0.1 Volum vekst rate i levende bestand	32
4.0.2 Levende og død Biomasse over tid.....	33
4.1 Standard Faustmann	34

4.3 van Kooten (1995).....	36
4.4 Skogeiers reaksjon til Carbon Removal Certification (CRC).....	37
4.5 Samfunnsoptimal Modell Etter CRC.....	38
5.0 Diskusjon.....	40
5.1 Karbonlagring ved Carbon Removal Certification.....	40
5.2.0 Antakelser.....	41
5.2.1 Karbonlagring.....	41
5.2.2 Burde skogen bare stå?.....	42
5.2.3 Pris av eldre tømmer.....	42
5.2.4 Energipriser.....	43
5.2.4 Skogeier som profitt maksimerer.....	43
5.2.5 Diskonteringsrenten.....	44
6. Konklusjon.....	44
6 Konklusjon.....	46
7 Referanse liste.....	47

1.0 Innledning

1.1 Klimastatus

De menneskeskapte klimaendringene påvirker alt liv på Jorden. Uten drivhuseffekt ville kloden hatt en gjennomsnittstemperatur på -18°C . Jorden har heldigvis en naturlig drivhuseffekt som øker temperaturen til et levelig nivå for oss mennesker. Bruk av fossile brensler som kull, olje og gass har imidlertid forsterket drivhuseffekten ytterligere. Når vi snakker om menneskeskapte klimaendringer er det denne tilleggs-effekten vi snakker om (IPCC, 2018). Målinger fra NASAs Goddard Institute for Space Studies (GISS) (2022) viser at gjennomsnittstemperaturen har steget med $0,89^{\circ}\text{C}$ fra 1880 til 2022. Figur 1 viser årlige målinger av gjennomsnittstemperatur i hele perioden. Som grafen viser har temperaturøkningen eskallert siden 70-tallet.



Figur 1 Global årlig gjennomsnittstemperatur varians fra 1880, i $^{\circ}\text{C}$, hentet 06.06.2023: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

I de siste årene har global oppvarming gitt en rekke konsekvenser; unaturlig temperatur stigning, mønsterendring i nedbør og nedbør økning, permafrosten tiner osv.

Klimagassutslipp, spesifikk økt utslipp av CO₂ er et tidskritisk problem og de overnevnte konsekvensene har blitt mye sterkere med tiden (IPPC, 2018, B). Effektiv karbonfangst og lagring i skog og treprodukter er en viktig del av løsningen for å bøte på klimaproblemene.

1.2 Internasjonale klimaavtaler

Globale problemer krever globalt samarbeid. Klimaforhandlinger er derfor sentralt og kan ses på som den strategiske fremgangsmåten for å dempe konsekvensene. De internasjonale klimaforhandlinger er blant annet FNs konvensjon i 1992, etterfulgt av Kyotoprotokollen i 1997 og i 2005 med Parisavtalen. Parisavtalen ble vedtatt i 2015 av FNs klimakonvensjon hvor klimamålene for første gang var juridisk bindende på det internasjonale forumet (Parisavtalen, 2015). Det overordnede og ambisiøse målet om «å holde økningen i den globale gjennomsnittstemperaturen godt under 2° C sammenliknet med førindustrielt nivå, og tilstrebe å begrense temperaturøkningen til 1,5° C over førindustrielt nivå» (Parisavtalen, 2015, Artikkel 2).

Flertallsbeslutning i FNs klimakonvensjon påpeker at rike land skal ha utvidet ansvar for å bekjempe global oppvarming. Det er da tre spesielle forhold som gjør at de rike landene må tildeles ekstra ansvar:

1. De rike landene er typisk de landene som har stått for mesteparten av utslippene de siste 200 årene frem mot 1990. Dermed argumenterer utviklingsland at årsaken til klimakrisen er overforbruket til rike land. (FN-sambandet, 2023)
2. Utslippskutt blir målt mot 1990-nivå. Dermed har de landene som forurenset mest frem til da, altså de rike landene, de største utslippsbudsjettene. Kumulative utslippstall for regioner viser til at i år 1990 stod Nord Amerika og Europa for ~87% av totale utslipp fra industri og fossile brennstoff (Ritchie et al, 2020).
3. Fattige land har tradisjonelt sett adoptert de samme utviklingsstegene som rike land. I dag må de da forbigå forurensende teknologi som fossil energi og heller adoptere fornybar teknologi fra starten av. Disse løsningene er da mer kostbare og det er da urealistisk å forvente at fattige land vil kunne finansiere dette på like vilkår som rike land.

Dermed er jeg enig med Parisavtalen i at for å få til en global avtale må man ha «felles, men differensiert ansvar og respektive muligheter, sett i lys av ulike nasjonale omstendigheter.» (Parisavtalen, 2015, Artikkel 2)

Når et land skriver under konvensjon, har dette landet en meldeplikt på utslippene sine. Tallene som rapporteres skal så brukes til kartlegging for å få et tydelig bilde av problemets omfang (UNFCCC, 2023).

1.3.0 Karbonprising

Det er flere teoretiske modeller for hvordan man skal prissette karbonutslipp. I dette delkapittelet vil jeg presentere William Nordhaus sin tilnærming for å estimere den sosiale kostnaden av karbon (SSC) gjennom sin DICE modell (“Dynamic Integrated model of climate and the Economy”) (Nordhaus, 2017). Her vil jeg kun diskutere Nordhaus sin modell som et eksempel på økonomisk karbonprising. Ettersom selve modellen er relativt komplisert vil jeg ikke utlede modellen i denne oppgaven. Modellen jeg vil hovedsakelig ta utgangspunkt i er Nordhaus (2017)

1.3.1 Nordhaus karbonprising

For å implementere passende klimapolitikk er det nyttig med en teoretisk forståelse for kostnadsomfanget av karbonutslipp. Nordhaus foreslår at det bør etableres en karbonskatt eller en cap-and-trade-mekanisme for at karbonkostnadene skal effektivt internaliseres og reduseres. Dette er i tråd med forurenser-betaler-prinsippet. Nordhaus fikk Nobels minnepris i økonomi for sitt bidrag til det klimaøkonomiske fagfeltet (2018). En oppsummering av de sentrale arbeidene oppsummeres kort under:

I. Sosial kost av karbon (SSC)

Nordhaus (2017) foreslår å estimere den marginale økonomiske kostnaden ved utslipp av en CO₂-ekvivalent ekstra. SCC vil dermed ta innregning av de langsiktige innvirkningene av klimaendringer, som inkluderer miljøskader, helse effekter og økonomiske tap. Han bruker da SCC som en guide for å fastsette en passende pris for karbon utslipp.

II. Karbonavgift

Nordhaus støtter implementering av en karbonavgift som gunstig politikk mot klimaendringer. Karbonavgiften vil han presenterer er basert på karboninnholdet av fossile brennstoff og disse utslipp av drivhusgasser. Ved å internalisere kostnaden ved utslipp vil da avgiften skape finansielt insentiv for forurenserne til å redusere sine utslipp og investere i og adoptere renere teknologi. (Nordhaus, 2013)

III. Cap-and-trade

Et alternativ til karbonavgiften er et cap-and-trade system som vi har i dag gjennom EU ETS som jeg har diskutert tidligere. Under denne tilnærmingen vil det settes et tak på totale utslipp og karbonkvoter er allokert eller auksjonert til de som forurenser. Forurenserne kan da kjøpe og selge disse kvotene etter behov som skaper fleksibilitet og effektivitet for utslippsreduksjon. I et intervju med The Washington Post uttalte Nordhaus at det ikke var så viktig om man har en karbonavgift eller et cap-and-trade-system. Derimot, er det viktigst så lenge man øker karbonprisen. (Mufson, 2021).

IV. DICE

For å analysere interaksjoner mellom klimaendringer og den globale økonomien har Nordhaus utviklet DICE modellen. Modellen integrerer klimadynamikker, energibruk, utslipp og økonomisk vekst for å vurdere virkningene av forskjellige politiske scenarier. Den inkorporerer nøkkelvariabler som karbon utslipp, temperatur endringer, karboninnhold i atmosfæren (ppm), skader forårsaket ved klimaendringer og kostnaden av å forhindre disse endringene. DICE modellen gir da verdifull innsikt for å anslå optimal karbonpris og hvordan karbonutslipp reduseres over tid. Målet med modellen er å finne en balanse mellom økonomiske kostnader av å forhindre klimaendringer og potensielle problemer som vil oppstå om vi ikke forhindrer klimaendringer. Denne modellen skaper et grunnlag for beslutningstakere til å evaluere avveininger og for å føre effektiv klimapolitikk.

1.4 Carbon Removal Certification

Karbonfangst er en måte å redusere karbondioksid i atmosfæren. Men, det har det ikke blitt gitt klare retningslinjer om hva som betegnes som karbonfangst. «For å sikre en levbar fremtid» har Europakommisjonen har lagt frem et forslag for et rammeverk om sertifisering av karbonfangst, Carbon Removal Certification (CRC). Rammeverket består av kriterier for å definere høykvalitets karbonfangst og metoder for å observere, rapportere og verifisere disse. Målet med dette rammeverket er å skape insentiver til videreutvikling av karbonfangst teknologi, bærekraftig «carbon farming», samtidig som man forhindrer grønnvasking (EC, 2022). Hvor grønnvasking er definert som oppførsel eller handlinger for å mislede folk til å tro at et selskap gjør mer for å beskytte miljøet enn det egentlig gjør (Cambridge, 2023). Rammeverket for sertifisering er innrammet i fire kriterier:

1. Kvalitet på karbonfjerning skal ta hensyn til, kvantifisering, addisjonalitet, langtidslagring av karbondioksid og bærekraft.
2. overvåkning
3. vertifiseringsgrunnlag av karbonfjerningen.
4. Økt karbonfangst og lagring skal ikke skje på bekostning av biologisk mangfold

I denne oppgaven skal jeg fokusere på kriteriet om addisjonalitet, altså at kun karbonlagring som skjer i tillegg til hva som er forventet etter gjeldende lover, normer og praksis kan krediteres. I praksis betyr dette at reduksjon oppnådd ved et prosjekt må være et tilskudd til hva som hadde skjedd om prosjektet ikke hadde blitt fullført. I kapittel 3 analyserer jeg en situasjon der CRC innarbeides i skogeiers beslutningsgrunnlag, og hvordan dette påvirker hogsttidspunktet.

Framgangsmåten for å bli sertifisert er at den som driver med karbonfangst sende en søknad til offentlig eller privat sertifisering ordning og de er nødt til å være godkjent av kommisjonen. Arbeidet med karbonfjerning vil bli konstant overvåket av en selvstendig sertifisering tredjepart som operer i tråd med EU sine regler. Siste leddet i prosessen får man sertifisering for samsvar deretter karbonfjerning enheter dokumenteres i et offentlig forum kontrollert av de om jobber med sertifiseringsordningen (EC, 2022)

Lovforslaget om CRC må gjennom en lengre prosess med åpne diskusjoner i nedsatt ekspertutvalg, forankring blant medlemslandene og øvrige rettslige prosedyrer. CRC kan ses på som en utvidelse av kvotesystemet ble introdusert i 2005 “The EU Emission Trading system” (EU ETS) som en del av EU-direktivet om europeisk karbonkvotehandel, et cap-and-trade-system i praksis. Dette kvotesystemet har videreutviklet seg gjennom en serie av lovforslag for å nå klimanøytralitet innen 2050. Hvor det nå har kommet til fase 4 (2021-2030) (EC, 2021). Hvor en klimakvote er den rettighet som tillater deg til å slippe ut et tonn karbondioksid eller CO₂-ekvivalenter. Som del av EØS-avtalen har Norge siden 2008 tatt del i EUs klimakvote system (Klima- og miljødepartementet et al., 2021). Handel av kvoter styres gjennom markedsmekanismen, dvs. prissetting av karbon bestemmes ved etterspørsel og tilbud av allokerede kvoter (EC, 2021). Dette er da et cap-and-trade-system som jeg beskrev tidligere. Ifølge Europa-kommisjonen «phase 4 (2021-2030 EU ETS cap for general allowances» ligger gratis kvoter på 43 prosent og kvoter som auksjoneres på 57 prosent (EC, 2021). Dermed setter ETS et tak på det totale utslipp, det forventes videre innstramning av

karbon kvoter innen 2030. Ettersom antallet gratiskvoter reduseres vil dette skape insentiver for forurensende bedrifter å finne mere bærekraftige løsninger som kutter marginale utslipp (EC, 2021). Dette vil også skape en et marked hvor de som kan lagre karbonet vil kunne selge kvoter. Dermed vil vi få størst mulig utslippsreduksjon til lavest mulig pris. Videre er det utarbeidet utslipp bot for de landene som ikke opprettholde sin del av avtalen, se Environmental Protection Agency for mer informasjon (EPA, 2023).

1.5 Problemstilling og hypotese

Norge har, i tråd med Parisavtalens færing, fra 2019 forpliktet seg til å kutte 50 til 55 prosent av sine klimagassutslipp målt mot 1990-nivå, innen 2030, i samarbeid med EU. (CEU, 2021). Den ekstra dytten for å realisere målet på 55 prosent førte til at Europakommisjon har utarbeidet en klimapakke «Fit for 55» som kom i juli 2021 og omfatter en rekke foreslått endringer på EUs lover og regler på klima, transport og energifeltet Pakken symboliserer et sterkt ønske om et klimanøytralt Europa med tidshorisont innen 2050. (CEU, 2021).

For denne oppgaven vil det mest sentrale elementet være er fremlegging av Carbon Removal Certification. Ifølge forslaget har ikke naturlig karbonfangst i økosystem vært tilstrekkelige. Det kreves derfor sterkere insentiver til å drive karbonfangst og lagring. Det forutsettes at CRC-tiltak er transparent, og at iverksatte tiltak ikke går på bekostning av andre miljøverdier som naturmangfold og forringelse av økosystemer. Jeg vil dermed fokusere på addisjonalitetsaspektet av CRC når det kommer til skogbruk i Norge. På bakgrunn av dette og hvilken betydning de juridiske rammene kan ha for norsk klimapolitikk og derav næringslivet i Norge, legger jeg dette som utgangspunkt for motivasjon til vår problemstilling.

Fokuset i masteroppgaven vil ta for seg om et av de nye forslagene som er ble lagt frem, nemlig høyere karbonfangst i skogsektoren samt ses den i lys med redusering av utslippstillatelser i årene fremover. I den forbindelse skal jeg prøve å estimere effekten av en slik forslag basert på informasjon jeg har tilgjengelig som nevnt ovenfor. Jeg legger til grunn for alle aktører (inkludert Statskog og andre ikke -privat eiere har interesse av at tømmerverdier deres blir maksimert. Om lag 77 prosent av skogarealene er eid av enkeltprivatpersoner (Statistisk sentralbyrå, 2023c). For å reparere markedssvikten må disse

skogeierne kompenseres for den samfunnsmessige verdien av ekstra karbonfangst.

Forskningsspørsmålet som jeg prøver å svare på er:

Hvilke innvirkninger vil Carbon Removal Certification ha for den enkelte skogeier, vil hen utsette hogsttidspunktet av skogen sin og hvilke samfunnsøkonomiske konsekvenser vil Carbon Removal Certification ha for Norsk skogsindustrien?

Det er også av interesse å se hvordan Carbon Removal Certification rammeverket, hvor den overordnede planen vil påvirke skogsektoren, noe som gjør Norsk skogindustri aktuelt å studere. I første omgang tar jeg oss hvordan skogbrukene i Norge blir påvirket, deretter vil jeg se på de aggregerte samfunnsøkonomiske effektene. De viktigste faktorer for skogeier er hogsttidspunkt, priser og andre inntjeningsmuligheter. Videre vil jeg også diskutere hvordan Treindustrien for øvrig påvirkes med hensyn til produksjonsvolum, priser og inntjeningsmuligheter.

I Denne oppgaven vil jeg presentere en justert Faustmann modell for optimal rotasjonslengde hvor skogeieren får en belønning for karbon sekvestrering i skogen. Denne belønningen er gitt for hvert ton som skogen tar opp utover normal praksis, altså skogeier må utsette hogsten for å kvalifisere seg for belønning. Dette er basert på Carbon Removal Certification, EUs nye rammeverk for utslipp.

2. Bakgrunn

Norges er kjent for sine store skogsområder, fortryllende landskap og naturarv. Disse skogene har en betydningsfull rolle for vår kulturelle identitet, økologiske balanse og økonomiske velstand. For å undersøke forholdene og dynamikken i norsk skog er helt avgjørende for effektiv skogforvaltning og bærekraftig bruk av skogressurser. Gjennom bakgrunnskapittelet vil jeg gi en helhetlig oversikt forbundet til norske skogsforhold som er relevant for den valgte problemstillingen.

Geografien til Norge byr på et mangfoldig terreng, fra majestetiske fjell, frodige daler til dype fjorder og vidstrakte platåer. Disse topografiske variasjonene påvirker da strukturen samt sammensetningen av landets skoger. Norge har betydelige skogressurser, ettersom skoger dekker 37% (Statistisk sentralbyrå, 2023) av total arealet i landet. Norges skog er da en del av borealskogen, som er et bartre skogssone som strekker seg over den nordlige halvkule som jeg vil videre utdype på senere i kapitlet (Solheim og Tomter 2023).

Landets skogavvirkning har utviklet seg over tid med fokus på å sikre en bærekraftig utnyttelse samt at økologisk selvstendighet bevares. Hvor statlige inngrep har spilt en svært viktig for å bevare skogen gjennom ansvarlig skogforvaltning, gjennom sertifiseringssystemer og forskrifter som for eksempel skogreising som vil diskuteres senere i dette kapitlet. Jeg vil senere i oppgaven diskutere hvordan inngrep som CRC i kapittel 5 kan føre til mer enn bare reduserte utslipp, men også til andre uventede eksternaliteter.

2.1 Boreal Skogen

Norsk skog er en del av den europeiske boreal sonen. Den boreale skogen utgjør et stort biom som strekker seg utover de nordlige regionene på kloden, den er karakterisert av tette barskoger og ekspansive våtmarksområder. nordlige områdene. Dette leder borealskogen til å være et av de største karbonlagrene på jorda. Skogen består hovedsakelig av bartrær som gran og furu, dette er fordi disse artene er spesielt tilpasset til de kalde og skyggefulle omstendighetene som karakteriserer borealsonen. (Solheim og Tomter, 2023).

Trærne i barskogen konkurrer mot hverandre om plass og næringsstoffer. Dette er et faktum som vil videre utdype i oppgaven ettersom det er essensielt å kvantifisere for å estimere individuelle træs mortalitetsfunksjon som jeg vil diskutere i kapittel 3 i oppgaven. Trær dør da ofte i oppreist stilling og vil bli stående og råtne. Disse trærne danner da et grunnlag for videre utvikling av innsekter som videre fungerer som føde til ulike fuglearter. Konsentrasjon

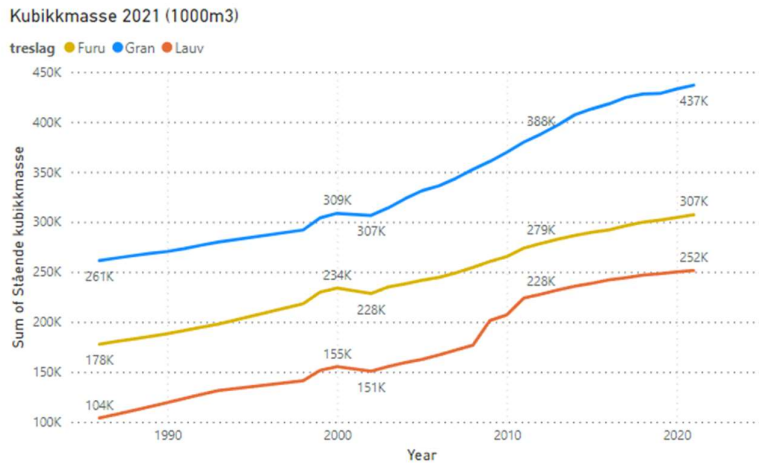
av døde og døende trær er dermed en karakteristikk for naturskog eller urskog ifølge Solheim og Tomter (2023). Videre kan dødved brukes som en nøkkelindikator på naturmangfold ifølge Norsk Institutt for Naturforskning (NINA) (Jakobsen og Pedersen, 2020). Det vil dermed være interessant å vurdere om vi utsetter hogsten vil skogen da gli over til naturskog eller urskog i det området som vurderes som følge av denne utsettelsen? Skogen i borealsonen vokser sakte, hvor det er typisk for trærne å først oppnå en hogstmoden alder etter 70-120 år fra den først spirer. Denne hogstalderen er bestemt av boniteten av skogområder hvor treet vokser. Jeg vil diskutere hogstmoden alder og vekstfunksjon nærmere i kapittel 3 og 4.

2.2 Bonitet

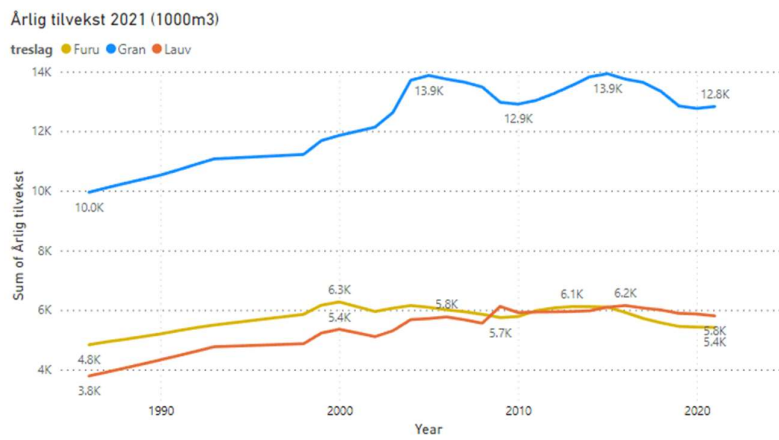
Det er vanskelig å kvantifisere hvor raskt en enkelt skog vil vokse ettersom en vekstrate i skogen er avhengig av forholdene i skogen, altså boniteten av skogen. Bonitet er den samlede «godheten» av skogen som er summen av en rekke vekstfaktorer, altså de samlede abiotiske vekstfaktorene i skogen. Slike vekstfaktorer kan for eksempel være tilgang på næring, temperatur eller fuktighetsforhold. Boniteten av et skogsområde er klassifisert etter H40 systemet, som gir en numerisk verdi basert på flere faktorer som tre arter, alder og tetthet og kvalitet av jorden som bestanden står på (Larsen, 2023). Ved høyere nummer indikerer man bedre vekst potensiale. Jeg vil ikke bruke bonitet i denne oppgaven direkte, men jeg vil bruke en approksimering for bonitet i vekst funksjonen jeg bruker for å estimere trebestanden som jeg simulerer i oppgaven.

2.3.1 Skog i Norge

I dag er det hovedsakelig tre tresorter som står for mesteparten av stående kubikkbiomasse, Gran (44%), Furu (31%) og Lauv (25%), ifølge tall fra landskogstakseringen. Gran står for 73% av Norsk avvirkning i 2022 (Statistisk sentralbyrå, 2023b). ved figur 2 kan man se nærmere på fordelingen av kubikkmassen i skogen og nettotilvekst over tid av disse artene ved å se på figurene under, figur 3.



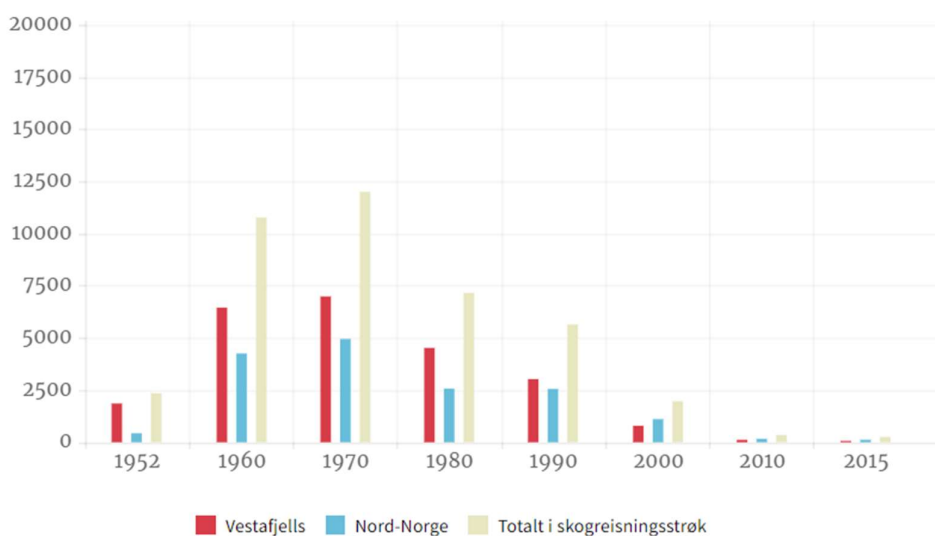
Figur 2 Total Kubikkmasse i skogen i Norge data hentet fra kilde tabell 06289(Statistisk sentralbyrå, 2023d)



Figur 3 Årlig tilvekst i skogen i Norge (Statistisk sentralbyrå, 2023d)

Her kan man se at den Norske skogen vokser og har siden 1990-tallet nesten fordoblet seg i kubikkmasse. Dette er et resultat av at det utføres bærekraftig skogbruk i Norge i den forstand at årlig avskoging er lavere enn netto tilvekst SSBs statistikk (2023a og 2023b).

Hovedgrunnen til at skogen vokser så mye som den gjør i dag kommer av at Stortinget satt i gang en skogreising som startet på 1950-tallet og som varte frem til 2000-tallet hvor det ble plantet om lag 13 000 hektar med skog i landet hvert år (Nygaard, 2021). Disse trærne ble hovedsakelig plantet på Vestlandet (60%) og Nord-Norge (40%). Målet med skogreisingen var å «bygge landet» (Statsforvalteren i Vestland, 2020). De oppnådde dette ved å erstatte «snaumark» som er mineraljord som har naturlig vegetasjonsdekket som ikke er skog med produktive treslag. Det var dermed plantet hovedsakelig Norsk Gran i disse områdene som er en av grunnene til at grana er den mest utbredte tetypen i landet. Omfanget av skogreisingen er visualisert i figur 4 under (Nygaard, 2021). De fleste av disse trærne er nå mellom 30-70 år gamle som vil si at disse trærne er i en utviklingsfase med stor tilvekst. Dermed kan man anta at den norske skogen vil fortsette å vokse i volum. Jeg vil videre diskutere vekstfunksjonen til



Figur 4 Årlig skogreising areal målt i hektar (Nygaard, 2021)

grantrær senere i kapittel 3.

2.3.2 Gran

Som diskutert tidligere er den mest utbredte tre typen gran og vil jeg dermed simulere en bestand Norsk Gran. Jeg vil videre bruke denne bestanden som basis for alle kalkulasjoner i denne oppgaven. Grana er svært utbredt på Østlandet, Midt-Norge og på Sørlandet. Hvor den trives best i dyp næringsrik jordsmonn og er hardfør nokk til å tåle Norges kalde somre og vintre. Trærne kan bli opptil 40-50 meter høyt og opptil 400 år gammelt. Gran er det vi kaller et klimakstre, altså at treet kommer etter andre treslag. Den tåler da skygge og sprer seg i skyggepartier av annen skog eller andre grantrær. Trevirket fra norsk gran er kjent for å være solid, allsidig og holdbar. Det er dermed vidt brukt i konstruksjon av bolig, møbler og som råmateriale for papirproduksjon (Kilde, 2011). En andel av avvirket tømmer blir konstruksjonsvirke og møbler som lagrer karbon gjennom sin levetid. Dette midlertidige karbonlageret regnes i det norske klimaregnskapet under kategorien Harvested Wood Products (HWP), basert på produksjonsdata for kategoriene trelast, trebaserte plater og papir og kartongproduksjon. Jeg vil kun anse HWP som en variabel i modellen min for langtidslagring av karbon.

2.3.3 Skogeiere i Norge

Det produktive skogsarealet i Norge er fordelt mellom statlig og privat eier. Ifølge den siste målingen i 2021 til Statistisk sentralbyrå at de private aktørene eier hele 83.9% av det produktive skogsarealet. Videre er det enda mer interessant at enkeltpersoner står for 77% av det private eierskapet. Dermed viser det seg at en betydelig andel av skogene i Norge ligger i hendene til individuelle skogeiere (Statistisk sentralbyrå, 2023c).

Videre rapporterer SSB at i 2021 lå de gjennomsnittlige næringsinntektene til alle skogeiere på rundt 62 000 kroner i året. Dette indikerer at flertallet av norske skogeiere ikke har skogdrift som hovedinntekt (SSB, Skogeiernes inntekt 2023e).

2.3.4 Klima

For å vinne kampen mot global oppvarming må vi først og fremst slippe ut mindre CO_2 , men vi må også fokusere på å lagre en større andel av karbonet i atmosfæren. Skogens egenskap i å ta opp karbondioksid for så å lagre den gjør skogen uerstattelig i kampen mot global oppvarming.

Norges største redskap til å redusere netto utslipp av CO₂-ekvivalenter er gjort gjennom skogen. Tall fra 2021 viser til et nettoopptak på 20,4 millioner tonn, hvor de totale utslippene av drivhusgasser i Norge var 49,2 millioner tonn karbondioksid. Netto karbonlagring i skog reduserte da netto utslippene i Norge med 41 prosent. (Søgaard, Breidenbach, Smith & Hobrak, 2023).

3. Metode (Fremgangsmåte)

3.1 Simulering ved hjelp av SiTree

Ettersom enkeltpersoner eier 77% av skogen i Norge ifølge de siste tallene fra SSB fra 2021 (Statistisk sentralbyrå, 2023c) har jeg bestemt meg for å sette søkelys på hvordan CRC vil påvirke en enkelt skogeier. For å simulere en enkeltrestbestand har jeg tatt bruk av datasettet *stand.west.tr*, som kommer med SiTree pakken. Dette er da en bestand Norsk Gran på $1019m^2$ som ligger i Hordaland. Dette datasettet inkluderer alle relevante variabler som jeg har lagt frem tidligere for å kunne utføre kalkulasjonene i modellene. Siden det viste seg å være vanskelig å få gode data om hvordan skogen vokser så brukte jeg en pakke i R som heter SiTree som er utviklet av Clara Fernandez ved NIBIO (2022). Simuleringen estimerer hvordan en bestand av gran trær vokser gjennom en 250 år periode uten hogst. Jeg vil bruke dataene fra denne simuleringen for å estimere optimal rotasjonslengde gjennom Faustmann modellen. Deretter vil jeg estimere det samfunnsoptimale hogsttidspunktet ved hjelp av en modifisert van Kooten modell som tar hensyn til karbon utslipp ved hogst og fra død biomasse som råtner i tillegg til karbonbinding i skogens tilvekst.

Før jeg begynner å utlede modellene vil jeg utrede hvordan jeg har brukt SiTree for å simulere bestanden som brukes gjennom resten av kalkulasjonene.

3.1.2 Fremgangsmåte- Tre bestand

Jeg har simulert hvordan en restbestand vokser gjennom 250 år uten hogst. For å simulere vekst i bestanden har jeg brukt vekst funksjonen til Bollandsås og Næsset (2009). Det antas også at en andel av bestanden vil dø hver periode, her brukes mortalitetsfunksjonen for individuelle trær i en bestand fra Bollandsås (2007). Videre antar jeg at når et tre dør vil et nytt tre bli rekruttert og ta dens plass i neste periode (Bollandsås, Buongiorno og Gobakken, 2008). Videre vil jeg bruke diameter målt ved brysthøyde i mm (DBH) og høyde av trærne for å estimere biomasse og volumet av bestanden ved bruk av funksjoner i SiTree. Ettersom den aktuelle funksjonen som brukes i SiTree ikke er lett tilgjengelig så vil jeg ikke utlede den her. Jeg har brukt biomasse til å beregne årlig karbonfangst og tilvekst uttrykt som økonomisk tømmerverdi. Det vil også tas hensyn til hvor mye CO_2 ekvivalenter som slippes ut ved hogst og ved råtning av død skog.

3.1.3. Vekstfunksjon (dbhi.BN2009) Bollandsås, Næsset (2009)

Vekstfunksjonen jeg benytter meg av for å estimere hvordan grana vokser over tid ble utviklet av Bollandsås og Næsset (2009). Funksjonen brukes til å forutsi vekst av diameter etter 5 år. Modellen er basert på antakelsen at den årlige veksten av trær følger en Weibull fordeling som er bestemt av to parametre: form parameter og en skala parameter. Form parameteren bestemmer formen på kurven, mens skala parameteren bestemmer lokasjonen av kurven på x-aksen. I dette tilfellet bestemmer det første uttrykket i (1), altså det i hakeparentesen, formen av kurven.

$$(1) I5\text{år}_{jp} = \left[\left(\frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \left(\frac{dbh_{jp}}{\beta_2} \right)^{\beta_1 - 1} e^{-\left(\frac{dbh_{jp}}{\beta_2} \right)^{\beta_1}} \right] \times (\gamma_0 dq_{jp}^{\gamma_1} BN_p^{\gamma_2} GF_p^{\gamma_3} LAT_p^{\gamma_4}) u_p + e_{jp}$$

Formen på vekst kurven er dermed hovedsakelig determinert av dbh_{jp} og regresjons koeffisientene $\beta_{1,2}$ hvor dbh_{jp} er Diameter ved brysthøyde av tre j på plott p . Uttrykket som bestemmer skalaen av kurven er det vi ser er ganget med form parameter. Dette uttrykket forklarer karakteristikene av plottet, altså:

dq_{jp} – er en verdi for tre-nivå konkurranse indeks hvor dbh_j er delt på snitt grunnflatesum diameter (Dg) ved plott p .

Dg – Snitt grunnflate areal diameter.

BN_p – Bonnitet ved plott p .

GF_p – Grunnflatesum ved plott p .

LAT_p – Breddegrad ved plott p .

u – Er de tilfeldige effektene på plott nivå som tar hensyn til hierarki strukturen av dataene.

e_{jp} – er residual på tre nivå. (parameteren som minimerte SSR som blir estimert på iterasjons nivå (dobbel quasi Newton Metode)).

3.1.4 Mortalitet funksjon Bollandsås 2007

Mortalitets funksjon i simuleringen tar utgangspunkt i Bollandsås (2007, s.11-12). Denne funksjonen viser da sannsynligheten for at et tre dør i en periode i på 5 år hvor denne sannsynligheten er estimert gjennom variabler som omhandler de individuelle trærne som DBH og kvaliteten av plottet (GF).

$$(2) m_i = \left(\mathbf{1} + e^{-(\delta_{i0} + \delta_{i1}DBH + \delta_{i2}DBH^2 + \delta_{i3}GF_p)} \right)^{-1}$$

Hvor δ parameterne ble estimert med individuelle tre data ved logistisk regresjon. Relasjonen blir brukt til å forutse forventet mortalitet, m_{ij} , for trær i hver størrelses klasse j , basert på gjennomsnittets diameter i klassen (DBH) og plottets basale område (BA). Dermed vises det her at ettersom treet blir større vil det da være mer sannsynlig at treet dør av naturlige årsaker. Ulike årsaker som kan få treet til å dø er blant annet:

- i. Alder, som alt levende har et tre et naturlig livsløp hvor et gran tre lever vanligvis i 150-200 år, men det er tilfeller av eldre tre om de har blitt utsatt for optimale forhold.
- ii. Barkbiller eller rotsopp kan angripe bestanden som gjør strukturen av treet svakere som kan gjøre det mer sårbart for andre stressfaktorer som for eksempel storm.
- iii. Miljø faktorer som klima effekter, jordforhold, tilgang på vann og næring eller ekstremvær som tørke, flod eller stormer kan også drepe trærne.
- iv. Konkurransen mellom trærne for skogens ressurser som vann, næring og sollys. Denne konkurransen kan lede til stress og redusert vekst som kan videre føre til at treet dør.

3.1.5 Rekrutering Bollandsås (2009)

Rekrutering i sammenheng med skog refererer til prosessen hvor nye trær etablerer seg naturlig innenfor et skogsområde. Dette skjer gjennom spredning av frø og spiring, ellers kan det bli gjort gjennom menneskelige inngrep for eksempel ved planting av frø. Her antar jeg at trærne i bestanden som simuleres blir plantet av skogeier i periode t_0 . Deretter vil all rekrutering utenfor dette være naturlig rekrutering som følger funksjon (3). Rekruteringsfunksjon i simuleringen tar utgangspunkt i Bollandsås (2009). Denne funksjonen er da en logistisk regresjon som viser da sannsynligheten for at et tre blir rekruttert.

$$(3) \pi_i = \left(1 + e^{-(\alpha_{i0} + \alpha_{i1} + \alpha_{i2}BN + \alpha_{i3}PGF)}\right)^{-1}$$

π_i – Sannsynlighet for rekrutering

GF – Grunnflatesum

BN – Bonitet

PGF – prosent av grunnflaten som består av en bestemt bestand.

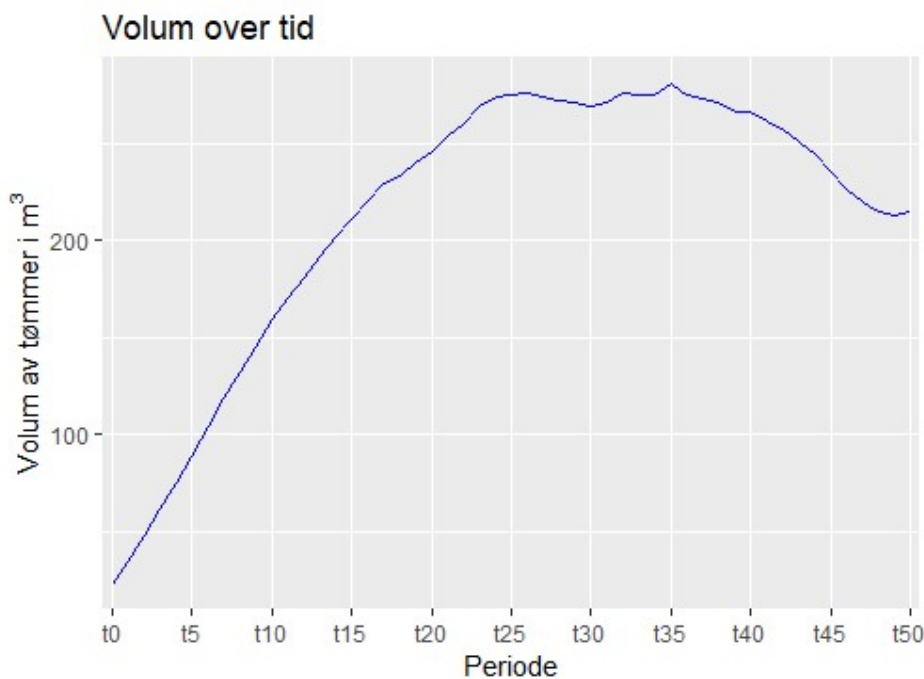
Forventet antall rekrutter vil være avhengig av positive rekrutering, CR_i , som utledes gjennom følgende modell:

$$(4) CR_i = \beta_{i0}BA^{\beta_{i1}}SI^{\beta_{i2}}PBA^{\beta_{i3}}$$

Hvor β parameterne er estimert fra plot hvor rekrutering har oppstått, ved lineær regresjon etter logaritmisk transformasjon av variablene.

3.1.6 optimal rotasjonstid

For å finne den optimale rotasjonstiden, altså det tid tidspunktet hvor nåverdien av Faustmann modellen er maksimert, for skogbestanden som nå er simulert i SiTree så vil det finnes en funksjon $S(t)$, hvor S er da volumet av levende tømmer i skogen målt i m^3 og hvor $t \in \{0, 250\}$ er alderen målt i 5 års lange perioder siden planting. Gitt vekst kurven i (1) så kan vi anta skogen vokser etter en logaritmisk vekst kurve som vil si at bestanden vokser raskt de første periodene hvor vekst deretter avtar etter trærne blir voksne.



Figur 5. vekst av tømmer i kubikkmeter

For å regne ut volumet av bestanden har vi brukt samme kalkulasjoner som Landsskogstakseringen. Her ser man at volumet i bestanden vår vil vokse ganske kraftig hver periode fem til et sted mellom t_{20} og t_{25} . Dermed bør man se at Faustmann kriteriet vil også gi en verdi innenfor dette intervallet. Faustmann kriteriet er da veksten av bestanden er lik diskonteringsrenten, det vil si at marginal inntekten er lik null ved dette punktet.

3.2.1 Rotasjonsmodell for en periode

Før det kan estimeres hvordan CRC vil påvirke valgene til skogeier så må jeg først utlede en modell for å se hvordan skogeier operer i dag. Vi vil dermed ta utgangspunkt i Faustmanns modell for optimal rotasjonslengde (Perman et al. 2013, s.614-620). Jeg antar at skogeier vil optimere verdien av skogen sin og vil dermed kutte skogen på det punktet hvor nåverdien av skogen er høyest. Dermed gjør jeg følgende antakelser:

- Skogen er uniform, hvor alle trær er av same type og alle trær vil bli plantet i periode t_0 .
- Påfølgende utplantingskostnader og hogstinntekter får ingen innvirkning på beslutningen som gjelder inneværende rotasjonsperiode - derav betegnelsen enkeltrotasjonsmodell. Det er ingen alternativ bruk av skogsarealet utenfor å drive skogbruk.
- Det er en konstant plantekostnad k og en marginal kostnad for hogst c og brutto pris pr m^3 av tømmeret som hogges er P som er konstant over tid.
- Det finnes ingen løpende kostnader (tynning og annen skogpleie) eller inntekter (tømmer/ved/annet etter tynning, jaktinntekter m.m.) mellom utplanting og hogsttidspunkt
- Diskonteringsraten i vil aldri vil alltid være større en null.

Den maksimale nåverdien av skogen kan uttrykkes som $NNV(T)$ hvor T er rotasjonslengden som gir høyest verdi av NNV .

$$(5) (P - C)S_T e^{-iT} - k = pS_T e^{-iT} - k$$

S_T – Volum av tømmer klar til hogst ved periode T .

i – Diskonteringsrate lik alternativ kostnad for skogeiers kapital. Skogeiere sparer ofte i skog, der denne raten vil for eksempel kunne bli sett på som om skogeier hogger skogen også setter pengene i bruk gjennom andre investeringer eller sparing i bank.

p – Netto pris av tømmeret som høstes.

Videre kan man se at

$$(6) (P - C)S_T = pS_T$$

Relasjon (6) er da netto verdien av gevinsten ved å høste skogbestanden, ofte kalt stubbeverdi. Her ser man at NNV er maksimert i den perioden hvor T gir høyest verdi for $pS_T e^{-iT} - k$.

Videre maksimerer jeg uttrykket ved å derivere (5) med hensyn til T og så løse for T .

$$\frac{d}{dT}(pS_T e^{-T} - k) = \frac{d}{dT}(pS_T e^{-iT})$$

$$pe^{-i} \frac{dS}{dT} + pS^T \frac{de^{-i}}{dT}$$

Dette impliserer at når man setter uttrykket lik null så får vi

$$pe^{-i} \frac{dS}{dT} - ipS_T e^{-iT} = 0$$

Som videre gir uttrykket

$$p \frac{dS}{dT} = ipS_T$$

Hvis jeg da løser for i får man

$$(7) i = \frac{p \frac{dS}{dT}}{pS_T}$$

Altså at T vil være maksimert der hvor vekst raten er lik renten. Den optimale rotasjonstiden vil dermed være uavhengig av pris av tømmeret og kun være avhengig av vekst raten og diskonterings renten.

$$(7.5) i = \frac{p \frac{dS}{dT}}{pS_T} = \frac{\frac{dS}{dT}}{S_T} = \frac{S'_T}{S_T}$$

(7.5) er da ofte kalt faustmann kriteriet. Vi ser da også at skogeier vil hogge skogen tidligere dersom renten øker og senere dersom renten reduseres. Altså det vil være et inverst forhold, $\{i \uparrow, T \downarrow\}$ mellom renten og den optimale hogst perioden.

3.2.2 En kontinuerlig rotasjon modell

Nå som jeg har diskutert hvordan faustmann modellen er fremstilt så kan jeg videre utforske hvordan skogeier vil optimere verdien på skogen over flere perioder. Som i modellen for en rotasjon så må jeg ta hensyn til at utsatt hogst medbringer en alternativ kostnad. En skogeier vil da maksimere NNV for alle fremtidige perioder, og ikke bare den ene perioden. Faustmann utledet den kontinuerlige modellen i 1849 hvor variablene er de samme som modellen vi utledet tidligere. Vi kan dermed anta at NNV for den første rotasjonsperioden vil være lik (8).

$$(8) NNV(T) = pS_{(t_1-t_0)} e^{-i(t_1-t_2)} - k$$

For å maksimere sin profitt må skogeier diskontere profitten sin over uendelige tidshorisonter som er gitt ved rekken (9).

$$(9) \pi = [pS_{(t_1-t_0)}e^{-i(t_1-t_2)} - k] + e^{-i(t_1-t_0)}[pS_{(t_2-t_1)}e^{-i(t_2-t_1)} - k] \\ + e^{-i(t_2-t_0)}[pS_{(t_3-t_2)}e^{-i(t_3-t_2)} - k] + e^{-i(t_3-t_0)}[pS_{(t_4-t_3)}e^{-i(t_4-t_3)} - k] + \dots \\ + e^{-i(t_n-t_0)}[pS_{(t_n-t_{(n-1)})}e^{-i(t_n-t_{(n-1)})} - k]$$

Her ser da at nåverdien av profitt fra et uendelig antall rotasjoner vil være lik summen av profitt for hver av de uendelige rotasjonene. Gitt at kondisjonene vil være konstante gjennom tid så vil det optimale rotasjonen være lik i hver eneste periode. Jeg kaller denne optimale rotasjons tiden for T som tidligere. Vi kan dermed skrive om nåverdifunksjonen som

$$(10) \pi = [pS_T e^{-iT} - k] + e^{-iT}[pS_T e^{-iT} - k] + e^{-2iT}[pS_T e^{-iT} - k] + e^{-3iT}[pS_T e^{-iT} - k] \\ + \dots$$

Videre kan man forenkle uttrykket ved å faktorisere ut e^{-iT} fra (10) som gir oss (11).

$$(11) \pi = [pS_T e^{-iT} - k] + e^{-iT} [[pS_T e^{-iT} - k] + e^{-iT}[pS_T e^{-iT} - k] + e^{-2iT}[pS_T e^{-iT} - k] \\ + \dots]$$

Man ser da at det andre uttrykket i (11) er identisk til det andre uttrykket og utover i (10), dermed kan dette skrives om som (12).

$$(12) \pi = [pS_T e^{-iT} - k] + e^{-iT} \pi$$

Så kan man løse for π som gir følgende.

$$(13) \pi = \frac{pS_T e^{-iT} - k}{1 - e^{-iT}}$$

Hvis man videre maksimerer dette uttrykket, får vi da at

$$(14) \frac{S'_T}{S_T} = \frac{i}{1 - e^{-iT}}$$

Dermed ser man da at rotasjonsperioden vil være noe kortere enn hvis man bare tar hensyn til en enkelt rotasjon. Videre antar jeg renten og T alltid vil være større enn null.

3.2.3 Rotasjon som tar hensyn til karbon

Nå som jeg har diskutert hvordan skogeier optimerer rotasjons intervallet med hensyn til én rotasjon og ved kontinuerlig rotasjon så vil jeg nå diskutere hvordan skogeier vil ta hensyn til karbonopptaket i skogen. Van Kooten et al (1995) gjør antakelsen at karbonlagring i skogen sammensvarer med veksten av skogen. Etersom jeg allerede har utledet vekst i skogen kan jeg dermed anta at karbonlagring vil være lik α tonn karbon skogen tar opp per kubikk meter tømmer m^3 . Dermed vil netto nåverdi nå verdi av karbonopptaket i skogen over rotasjonsperiode T være lik (15).

$$(15) \text{NNV}_K(T) = \int_0^T P_K \alpha S'_T(t) e^{-iT} dt$$

Hvor P_K er karbonprisen eller den sosiale verdien av karbon som blir fjernet fra atmosfæren. Videre antar Van Kooten at netto nåverdien av skogen forblir den samme som ved relasjon (8) bortsett fra et negativt ledd som tar for seg den negative sosiale verdien forbundet med karbonutslipp når skogen høstes. Dermed vil netto nåverdien av skogen være lik (16).

$$(16) \text{NNV}_S(T) = p_S S_T e^{-iT} - p_K \alpha (1 - \beta) S_T e^{iT}$$

Hvor $(1 - \beta)$ er andelen av tømmeret som ikke blir lagret som HWP, hvor β er andelen som blir lagret i HWP og p_S er prisen skogeier får for tømmeret, vi antar at denne prisen er konstant over hogstintervallet. Videre kan man deretter regne ut nåverdien av opptak samt utslipp av karbon i tillegg til inntektene fra salg av tømmeret. Dermed vil den totale nåverdien være lik $\text{NNV}(T)$.

$$(17) \frac{\int_0^T P_K \alpha S'_T(t) e^{-i} dt + p_S S_T e^{-iT} - p_K \alpha (1 - \beta) S_T e^{iT}}{1 - e^{iT}}$$

Når man maksimerer (17) med hensyn til optimal rotasjons periode T og setter resultatet lik null får vi (18).

$$(18) \left[(p_S + p_K \alpha \beta) \frac{S'_T}{S_T} + i p_K \alpha \right] = \frac{i}{1 - e^{iT}} \left[(p_S + p_K \alpha \beta) + \frac{i p_K \alpha}{S_T} \int_0^T S_T e^{-it} dt \right]$$

3.3 Modell formulering

Vi utleder først den teoretiske modellen som her vil bygge videre på de modellene som har blitt presentert gjennom de tidligere kapitlene. Deretter vil vi gjøre en empirisk analyse hvor jeg benytter SiTree og deres funksjoner som er allerede gjorde redet for. Modellen er bestående da av to deler:

- I. Skogeiers optimerings modell med hensyn til CRC forslaget
- II. Den samfunnsoptimale modellen med hensyn til CRC forslaget og energigjenvinning

3.3.1 Antakelser

Modellene bygger videre på modellen til Van Kooten et al. (1995). I motsetning til van Kooten, vil den samfunnsoptimale modellen vår også ta hensyn til energi gevinsten ved forbrenning av den andelen av tømmeret som ikke blir lagret i form av HWP. Det antas at skogeier planter alle trær i periode 0 på et areal i Hordaland. Deretter antar vi at for hver periode vil en andel av trærne dø, hvor i neste periode bli et nytt tre rekruttert og erstatte det treet som døde. Videre antar jeg at når skogen skal avvirkes så avvirkes alle trær, selv nye

rekrutter, om man skal ta hensyn til en lavalder av skog som kan avvirket ville dette introdusert en del kompleksitet til modellen. For enkelhet skyld antar jeg at jorden i arealet vil ha en konstant bonitetsverdi gjennom hele modellen, dvs. at vekstevnen i skogen er lik i år 0 som i år 250. Som van Kooten (1995) antar jeg at karbonlagring er proporsjonal med veksten av skogen, men til motsetning av van Kooten så vil jeg bruke biomassen i skogen og ikke volumet av skogen til å kalkulere dette. Jeg mener at dette vil resultere i et mer presist resultat. Karbon innholdet i biomasse er ifølge (IPPC, 2014, s.72) lik 0,5 av total vekten, videre er omregningsfaktoren fra karbon til karbondioksid lik $\frac{42}{12}$. Dermed vil jeg bruke CO_2 ekvivalenter i våre kalkulasjoner, hvor 1 tonn CO_2 kostet $p_K = \text{€}94$, 19.05.2023. Antakelsene våre vil videre basere seg på at det finnes ikke noe utslipp ved hogst, derav at totalt volumet som blir ekstrahert fra skogen blir brukt opp i sagbruket som senere vil bli tatt hensyn til i modellen med samfunnsoptimalitet. Vi antar at maskineri som trengs for bearbeiding av større trestokker vil bli adoptert uten kostnad for sagbruket slik at sagbruket vil betale en konstant pris for hver m^3 tømmer lik p_S .

Siden vi er interessert i å analysere hvordan inklusjon av karbon kvoter vil påvirke skogeierens optimale rotasjonstid så vil vi først inkludere et konstant karbon pris p_K som vi definerte tidligere. Deretter vil vi utforske om den optimale rotasjonstiden vil variere når karbonprisen endrer seg over tid. Vi vil da erstatte p_K med en funksjon, $p_K(t)$, hvor $p_K = p_K(0)$. Denne funksjonen vil da bruke den samme renten som diskonteringsrenten slik at prisen av CO_2 holder like mye omfang over tid.

$$(19) p_K(t) = p_K e^{it}$$

Vi vil presentere endringer i rotasjonstid ved de forskjellige scenarioene grafisk hvor grafene er basert på en simulering av en trebestand i SiTree som diskutert tidligere. R-kode for kalkulasjoner og grafer ligger i vedlegget. Når det kommer til diskonteringsrenter, har vi tatt i bruk en diskonteringsrente lik $i = 0.03$. Jeg har valgt denne diskonteringsrenten etter regjeringens retningslinjer for økonomiske analyser NOU 2012: 16 (Finansdepartementet, 2012). Disse retningslinjene er utviklet i tråd med teorien til Weitzman (1998,2001,2012) om at diskonteringsrenten for samfunnsøkonomiske prosjekter burde reduseres over tid. Jeg har da valgt å ta i bruk den risikjusterte diskonteringsrenten for prosjekter fra 40-75 år (Finansdepartementet, 2012, tabell 5.2) i denne oppgaven.

3.2.2 Skogeierens tilnærming til CRC

Modellen vår tar utgangspunkt i modellene som vi har presentert tidligere, men vil endre noen antakelser som vi mener er viktige for at vi skal kunne få et reelt innblikk av hvordan en skogeier vil tar stilling til EUs CRC som beskrevet innledningsvis. Vi antar at skogeier ikke vil få noen belønning for karbon sekvestrering før hun har passert det optimale hogst tidspunktet som er illustrert i relasjon (14). Vi gjør denne antakelsen ettersom vår tolkning av EUs nye regelverk er at det er kun karbon sekvestrering utenfor vanlig drift som vil bli belønnet. Det vil si at premien ved å utsette hogsten må være stor nok slik at $NNV(T_{CS}) > NNV(T)$ for hver periode som T blir utsatt. I motsetning til van Kooten vil vi også anta at skogeieren ikke vil ta på seg noen av de negative kostnadene ved utslipp etter treet hogges som for eksempel brenning av det volumet av stokken som ikke blir lagret i form av HWP. Dette er fordi skogeier selger stokken som en innsatsvare som hun da ikke vil være ansvarlig for etter salg. Derimot vil vi inkludere et ledd som tar for seg utslipp ved råtning av døde trær som vil diskuteres grundigere senere i oppgaven. Når vi inkluderer karbonkvoter i skogeiers profitt funksjon vil da skogeier maksimere relasjon (19) som består av nåverdien av skogen og karbonet i skogen.

$$NNV_F = p_S S_{T_{CS}} e^{-iT_{CS}}$$

$$NNV_K = G \left[\int_T^{T_{CS}} p_K K'_{LT_{CS}}(t) e^{-it_{CS}} dt \right] - \int_0^{T_{CS}} p_K \sigma K_{DT_{CS}}(t) e^{-it_{CS}} dt$$

Vi tar så den delvis integrasjonen av NNV_K .

$$NNV_K(T) = G \left[p_K K(t) e^{-iT_{CS}} + p_K i \int_T^{T_{CS}} K(t) e^{-it_{CS}} \right]$$

$$- \left[p_K \sigma K_{DT_{CS}}(t) e^{-it_{CS}} + p \sigma i \int_0^{T_{CS}} K_{DT_{CS}}(t) e^{-it_{CS}} dt \right]$$

$$(19) NNV(T_{CS}) = NNV_F + NNV_K$$

$$= p_S S_{T_{CS}} e^{-iT_{CS}} + G \left[p_K K(t) e^{-iT_{CS}} + p_K i \int_T^{T_{CS}} K(t) e^{-it_{CS}} \right]$$

$$- \left[p_K \sigma K_{DT_{CS}}(t) e^{-it_{CS}} + p \sigma i \int_0^{T_{CS}} K_{DT_{CS}}(t) e^{-it_{CS}} dt \right]$$

Her vil den nye optimale rotasjonsperioden være lik T_{CS} som da vil være lengre enn T dersom karbon prisen er større enn null. Når skogeier tar hensyn til karbon kvoter vil hun da måtte ta hensyn til både en premie for opptak av karbon og en bot for å slippe ut karbon ved at trær som har dødd fra bestanden råtner. Variabelen G vil da være en «dummy variabel» som er lik null så lenge $T_{CS} \leq T$, altså skogeier vil kun få premien ved opptak av karbon dersom hun utsetter hogsten. Det siste leddet i relasjon (19) vil da være utslipp av karbon grunnet råtning. Det er usikkert om omfanget av EUs nye regelverk vil ta hensyn til råtning, men min tolkning er at all utslipp vil regnes som utslipp gjennom alle perioder fra planting til hogst ettersom det er vanskelig å kvantifisere om r .

For å regne ut hvor mye karbonopptaket og utslippet vil vi karbon, K , som da er biomassen regnet om til CO_2 ekvivalenter gitt i kilo. Total biomasse i skogen er så delt opp i to grupper, levende, og død biomasse hvor vi antar at den døde biomassen vil øke ettersom skogen blir eldre og flere trær begynner å nærme seg gjennomsnitts levealder. Vi vil da ha en mengde karbon, $K_{D,L}$ som vil stå for dødt og levende karbon. Vi antar videre at en andel av det døde karbonet, σ , råtner gjennom hver periode. Ettersom relasjon (19) er veldig kompleks vil vi ikke finne eksplisitt løsning for optimal T_{CS} , dermed vil vi løse denne likningen numerisk ved hjelp av simulasjonen vår i R.

3.2.3 Samfunnets tilnærming til CRC

Den rotasjonsperioden som maksimerer samfunnets nettonåverdi, vil da være en utvidelse av den optimale rotasjonsperiode modellen for skogeieren. For å fange opp det negative utslippet fra materialer som ikke blir lagret i HWP, vil vi da som i van Kooten (1995) anta at dette materialet brennes etter hogst. Men til motsetning av van Kooten vil vi også ta hensyn til energien som kan bli fanget opp i form av elektrisitet ved brenning. Dette er ofte referert til energigjenvinning og er i dag kvantifisert i Environmental Product Declaration (EPD) i henhold til ISO 14025 og EN 15804 +A2. Jeg vil bruke et eksempel av en EPD senere i oppgaven for å kalkulere den energigjenvinningen. Dermed vil netto nåverdi for samfunnet når man tar hensyn til verdien av skogen, karbon sekvestrering og utslipp være lik

$$(20) \text{NNV}(T^*) = \text{NNV}(T) + \text{NNV}(C) + \text{NNV}(E)$$

$$(20.1) \text{NNV}(T) = p_S S_T e^{-iT^*}$$

Hvor netto karbon opptak for perioden vil være lik $K_{NT} = K'_{LT} - \sigma K_{DT}$. Det vil si totale opptake for periode T minus råtning av død skog ved periode T .

$$(20.2) \text{NNV}(C) = \int_0^{T^*} P_K K_{NT}(t) e^{-iT^*} dt$$

For å kunne regne om den sosiale verdien av energien som blir produsert ved forbrenning av den andelen av volumet som ikke blir lagret i form av HWP vil vi først regne om volumet til potensiell energi gitt i Mega Joule. For å oppnå dette bruker vi tall fra Aniszewska (2018) som viser til at i gjennomsnitt så vil 1kg tørt trevirke tilsvare 20.08 MJ energi. Vi vil videre regne om denne potensielle energien til kWh, hvor én kWh tilsvarer 3.6 MJ. Vi viser så til EPD rapport, NEPD-2546-1284-NO for å regne om volum m^3 til kg hvor omregningsfaktoren for norsk gran er da $375kg/m^3$ (Ruttenborg, 2020). Til slutt antar vi at brenner dette volumet ved en bioelektrisitetsanlegg som oppnår maksimal effektivitet i henhold til EUs omregnings faktor, 36%. Energi vil dermed være en multiplikator lik.

$$E = \frac{20.08(MJ)}{3.6(kWh)} * 375(kg) * 0.36 = 753kWh/m^3$$

$$(20.3) \text{NNV}(E) = p_E * E * S_T e^{-iT^*} (1 - \beta) - p_K \alpha (1 - \beta) S_T e^{iT^*}$$

Nå som vi har presentert hvordan de forskjellige netto nåverdiene er kalkulert hver for seg så kan vi sette dem sammen som gir oss den samfunnsoptimale netto nåverdien, $\text{NNV}(T^*)$.

$$(21) \text{NNV}(T^*)$$

$$= p_S S_T e^{-iT^*} + \int_0^{T^*} P_K K_{NT}(t) e^{-iT^*} dt$$

$$+ [p_E E S_T e^{-iT^*} (1 - \beta) - p_K \alpha (1 - \beta) S_T e^{-iT^*}]$$

Nå som jeg har utredet hvordan introduksjon av karbonkvoter vil påvirke skogeier og hva den samfunnsoptimale netto nåverdien burde være, kan jeg maksimere nettonåverdi med hensyn til T^* .

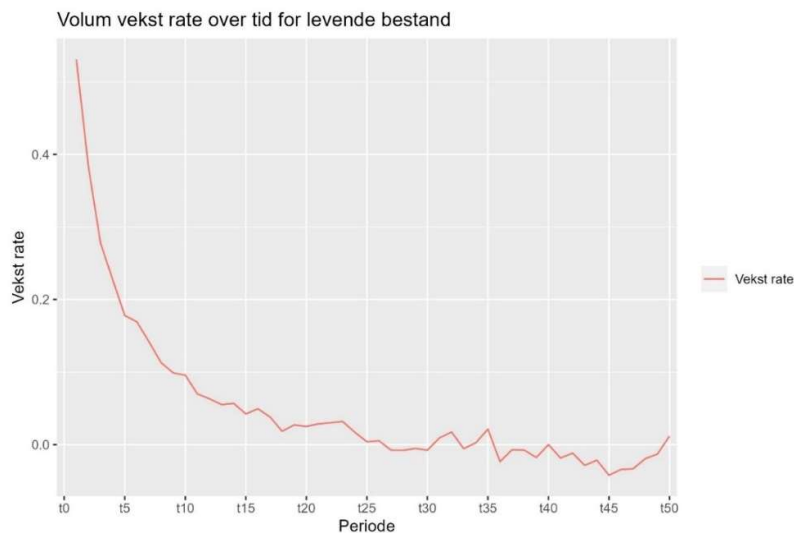
4.0 Resultater – simulering

Før jeg presenterer hvordan inklusjon av karbon kvoter og energi priser kan påvirke hogsttidspunktet i skogen så vil vi presentere resultatene av simuleringen av trebestanden vår. Ettersom kalkulasjonene våre bruker volum som en variabel for å estimere den kommersielle verdien av skogen vil vi først presentere hvordan skogens volum endrer gjennom tid. Vi vil dermed se på endringer i både levende og død biomasse over tid. Resultatene vi presenterer

her vil alle ta bruk av en diskonteringsrate som vi har definert tidligere som vil være lik $i = 0.03$.

4.0.1 Volum vekst rate i levende bestand

Volumet i den levende skogen vil som du ser ved figur 6 gå mot en stabil likevekt når trærne er fullvoksne etter 135 år, ($t = 27$). Her vil da veksten av volum i skogen, $\frac{\dot{S}_T}{S_T}$, være lik volumet av skogen som dør hver periode. Dette er da metningspunktet hvor skogen ikke klarer å opprettholde mer vekst, her vil da marginal inntekten fra salg av tømmer gå mot null. Vi antar at denne stabile likevekten vil slå ut i både netto nåverdien av skogen i form av inntekter av tømmer og i inntekter fra karbon sekvestrering.

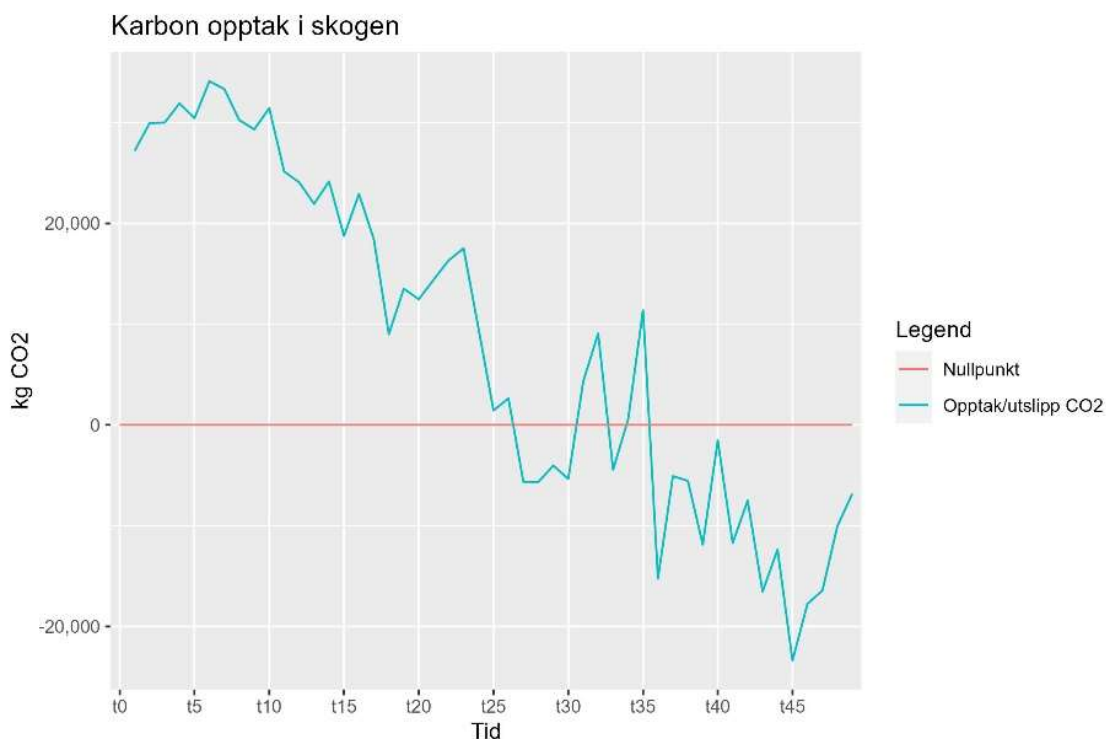


Figur 6

Siden skogen slutter å vokse i volum så vil verdien av tømmeret falle i henhold til både diskonterings raten e^{-iT} og i henhold til den negative veksten av volumet i form av andelen av trærne i bestanden som dør.

Karbon lagring er direkte forbundet med vekstraten av biomasse i skogen. Biomassen kan bli delt opp i tre grupper, biomasse over grunn, biomasse under grunn og død biomasse. Videre er med regnet om vekstraten av biomasse til netto karbonopptak i Figur 7 Her ser vi som i Figur 6 at netto utslipp vil være negativt, dette viser videre at skogen vil nå et metningspunkt hvor den slipper ut mer CO_2 enn den tar opp om vi kun ser på karbon lagret i levende volum. Jeg vil diskutere dette nærmere i neste delkapittel hvor jeg diskuterer levende og død biomasse.

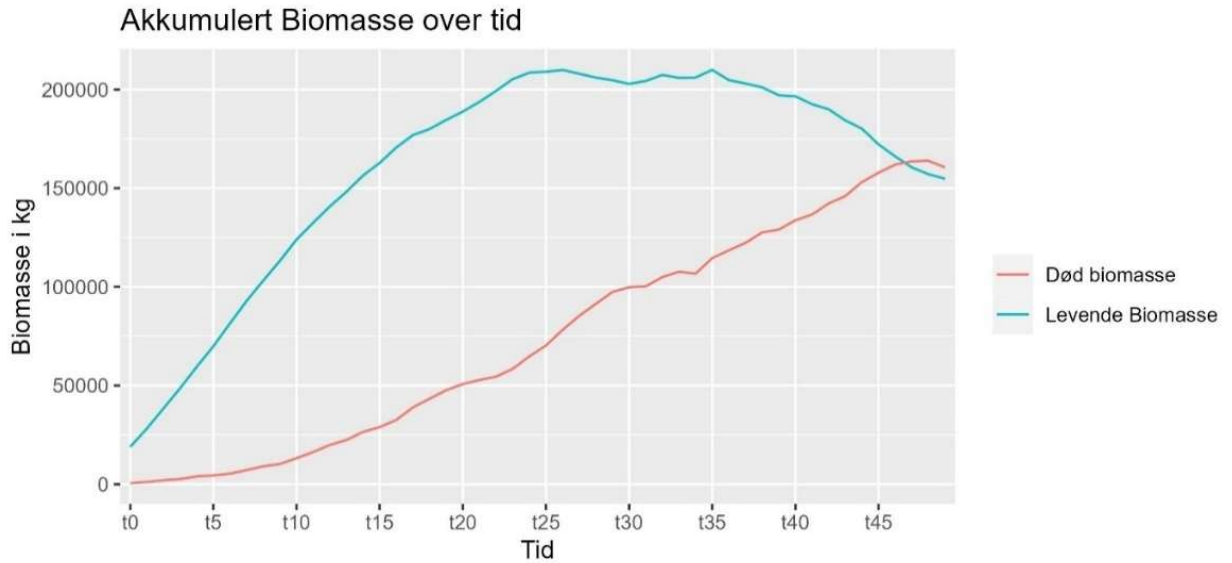
Nå som jeg diskutert vekst og karbonopptak i bestanden jeg har simulert, vil vi nå se på hvordan inklusjon av karbon i slår ut i modellene vi presenterte i forrige kapitel.



Figur 7 Karbon fangst over tid

4.0.2 Levende og død Biomasse over tid

Som vi har lagt frem tidligere så har vi brukt biomasse i kg for å estimere karbonlagring og utslipp. Det er derfor nyttig å diskutere hvordan biomasse endrer seg over tid i den simulerte bestanden vår. Figur 8 visualiserer hvordan den levende og den døde biomassen i skogen utvikler seg over tid. Hvor den levende biomassen er summen av biomasse for alle levende trær ved hvert enkelt periode. Den døde biomassen er da total vekten biomasse akkumulert hver periode minus en råtningsrate mellom (0.032-0.044), i mine kalkulasjoner 4% for Norsk Gran, av volumet som råtner fra periode til periode (Yatzkov, Harmon og Krankina, 2003). Denne figuren fremhever da at vi har størst karbonlagring i skogen når man tar hensyn til både døde og levende trær.



Figur 8

4.1 Standard Faustmann

For å se hvilke effekter inklusjon av karbonkvoter vil ha på modellene våre, må vi først se på hvordan skogeieren vil oppføre seg dersom hennes eneste inntekt er fra tømmer. I våre beregninger har vi brukt en diskonterings rente lik $i = 0.03$. Figur 9 viser da Netto Nåverdi av tømmer i skogen gjennom hver periode hvor vi har brukt relasjon (5) for våre estimeringer.

$$(5) (P - C)S_T e^{-iT} - k = pS_T e^{-iT} - k$$

Vi ser da at $NNV(T^*) = 18$, vil være det optimale hogstpunktet for skogeieren, som tilsier 90 år etter trærne ble plantet. Vi kan dermed definere $t = 18$ (90 år) hoggstidspunktet som tilsvarer vanlig drift for skogeier. For at skogeier skal ha insentiv til å utsette hogst etter en rotasjonsperiode på 90 år, er han avhengig av inntekter fra karbonfangst fra og med dette tidspunktet. Jeg vil dermed definere dummyvariabelen $G(T)$ som vi definerte i relasjon (19)

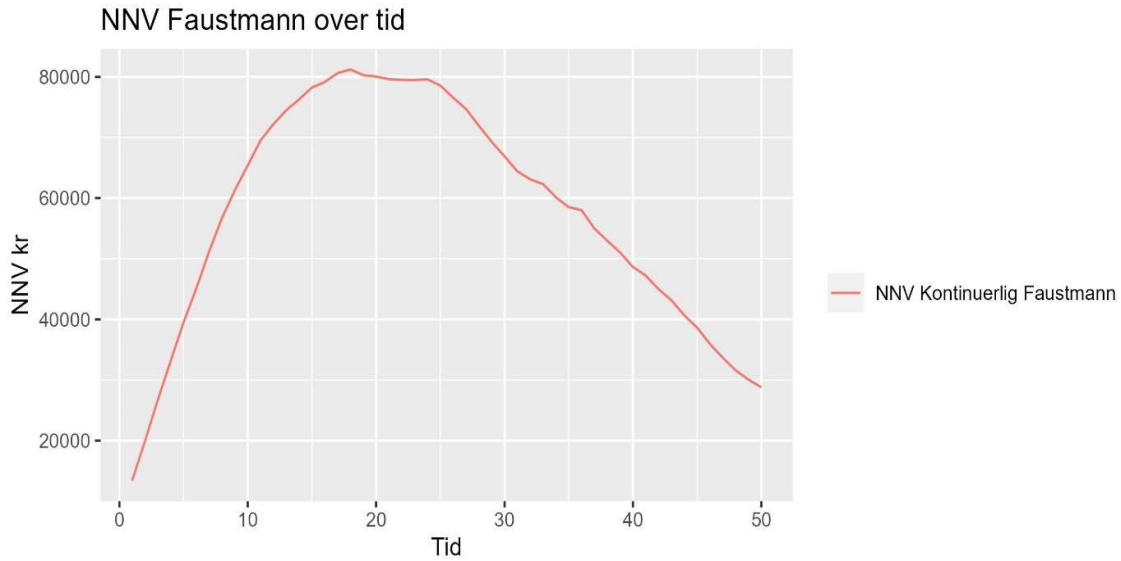
$$(19) NNV(T_{CS}) = NNV_F + NNV_K$$

$$= p_S S_{T_{CS}} e^{-iT_{CS}} + G \left[p_K K(t) e^{-iT_{CS}} + p_K i \int_T^{T_{CS}} K(t) e^{-iT_{CS}} \right]$$

$$- \left[p_K \sigma K_{DT_{CS}}(t) e^{-iT_{CS}} + p \sigma i \int_0^{T_{CS}} K_{DT_{CS}}(t) e^{-iT_{CS}} dt \right]$$

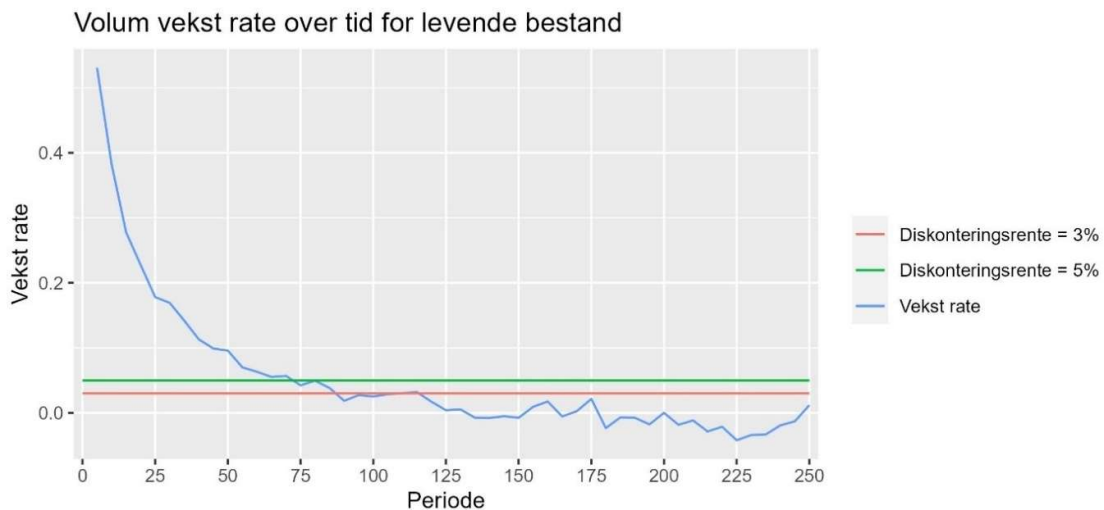
som:

$$G(T) = \begin{cases} 0, & T \leq 18 \\ 1, & T > 18 \end{cases}$$



Figur 9

Vi vet fra relasjon (7.5) $i = \frac{S'_T}{S_T}$ at det optimale hogsttidspunktet ved standard Faustmann modell vil være avhengig av diskonteringsrenten som vi bruker, ettersom det er forholdet mellom veksten av skogen i volum og diskonteringsrenten som bestemmer hogsttidspunktet. Se figur 10

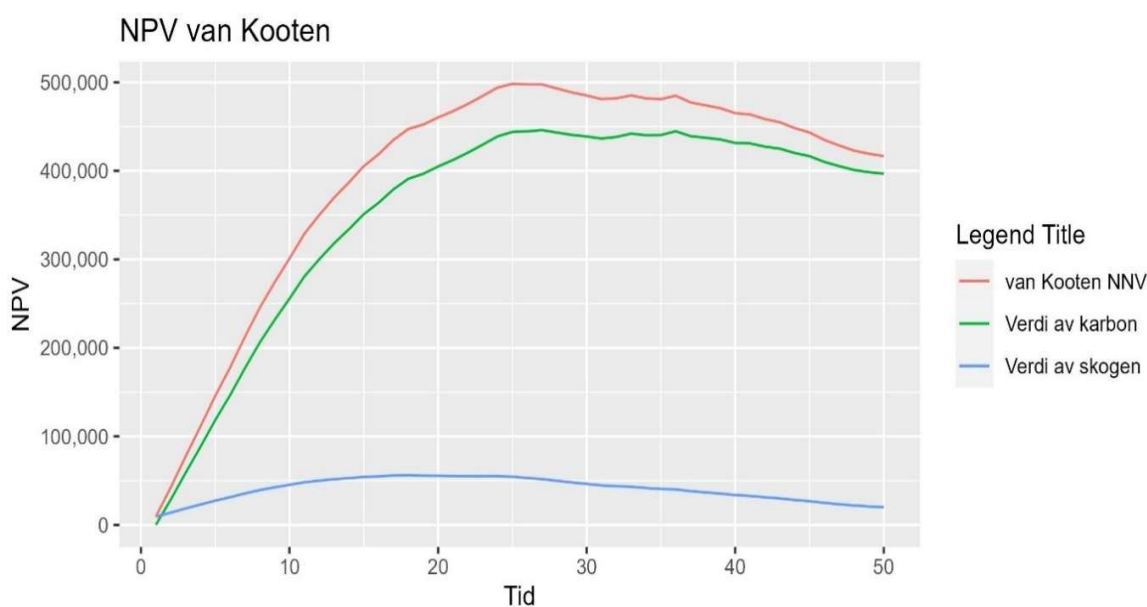


Figur 10

4.3 van Kooten (1995)

Nå som vi har et utgangspunkt for hvordan normal drift for skogeier vil være, vil det dermed være interessant å se hva det samfunnsoptimale hogst tidspunktet vil være ut ifra van Kooten (1995). Vi kan se fra Figur 11 at inklusjon av karbon sekvestrering og utslipp vil føre til en betydelig økning i Netto Nåverdi i forhold til standard modellen. Men som vi så ved relasjon (18) så vil denne effekten være avhengig av karbonprisen. Hogstperioden utsettes med 35 år (7 perioder

Derimot ser vi ganske klart at når man inkluderer karbon så vil den optimale hogstperioden utsettes med 7 perioder (35 år) fra periode 90 år (18 perioder) ved standard Faustmann til 125 år (25 perioder) med forutsetningene som van Kooten legger til grunn. Vi kan da argumentere at dersom man vil nå den samfunnsoptimale nåverdien så må skogeier motiveres til å utsette hogsten og det er akkurat dette som er målet med EUs nye rammeverk.



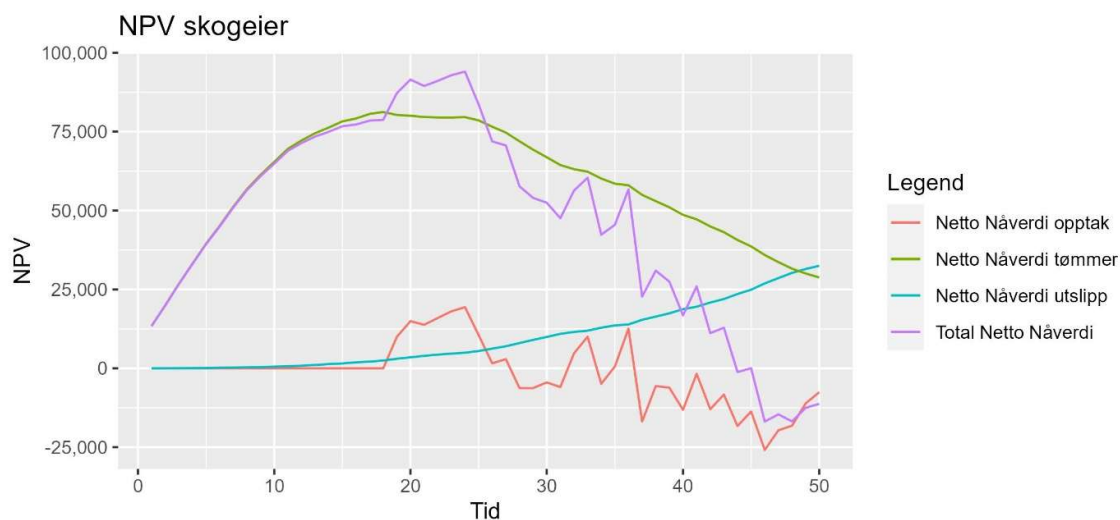
Figur 11

Ved van Kooten (1995) vil det dermed være to priser som påvirker hogsttidspunktet. Prisen på tømmer vil være negativt korrelert med det optimale hogsttidspunktet, hvor en økning av pris av tømmer vil trekke hogsttidspunktet mot Faustmann (1849) eller $G(T)$ som vi definerte tidligere. En reduksjon av prisen av tømmer vil da utsette hogsttidspunktet når man inkluderer

karbon. Altså det er forholdet mellom pris av tømmer og karbon vil dermed bestemme hvor mye skogeier vil utsette hogsten fra $G(T)$. Vi har illustrert dette videre i figur 11 over.

4.4 Skogeiers reaksjon til Carbon Removal Certification (CRC)

Nå skal vi presentere hvordan CRC rammeverket vil påvirke skogeier i praksis ved bruk av modellen vi har utledet i forrige kapittel. Dersom vi ser på Figur 12 ser vi at det optimale hogsttidspunktet vil bli utsatt til $T = 24$. Ettersom vi har inkludert utslipp av karbon i form av råtning av dødt materiale i skogen så vil Netto Nåverdien til skogeier synke raskere enn ved van Kooten som ikke tar hensyn til dette utslippet. I modellen vår har vi også gjort den antakelsen at prisen på karbon vil vokse sammen med diskonteringsrenten fra $t = 0$ og utover i motsetning til van Kooten dette vil da videre øke denne effekten. Ettersom vi antar at skogeier får en belønning i form av karbonkvoter gjennom CRC for veksten av karboninnholdet i skogen fra hvert år utover 90. Dermed vil nettonåverdi kalkulasjonene hense være lik standard Faustmann minus diskontert karbonutslipp i form av råtning. Netto Nåverdi utslipp følger en eksponentiell kurve som kommer fra at volumet av død biomasse vil øke kraftig ettersom trærne begynner å nærme seg sin antatte levetid, denne effekten er forsterket gjennom antakelsen jeg har tatt av at prisen for karbon kvoter antas å øke sammen med diskonteringsrenten.



Figur 12

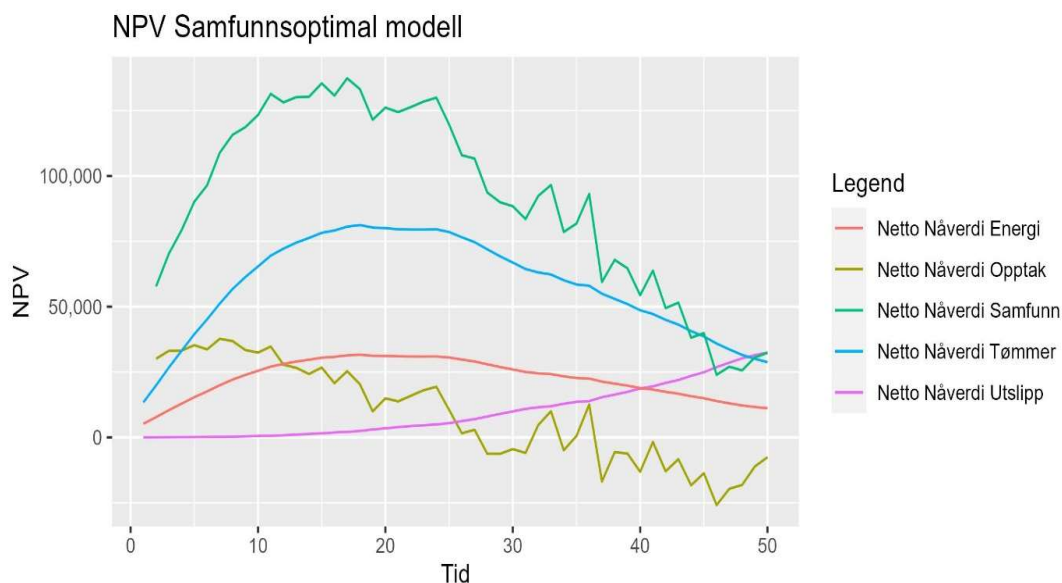
Som ved van Kooten (1995) vil det optimale hogsttidspunktet være avhengig av forholdet mellom prisen av tømmer og prisen av karbon sekvestring som presentert i figur 12. Vi ser

dermed det samme som tidligere hvor høyere karbonpriser sammenliknet med tømmerpriser vil utsette hogsten til et punkt hvor karbonsekvistrering er positivt. Desto lavere karbonprisen blir, desto nærmere vil vi bevege oss mot likevekten ved Faustmann frem til en karbonpris lik $p_K = 0$ som vil være tilsvarende til den originale Faustmann modellen.

Til slutt skal vi presentere hvordan den Samfunnsoptimale modellen vil se ut om man ekspanderer van Kooten ved å inkludere energien som blir generert ved brenning av volumet av tømmeret som ikke blir lagret i HWP.

4.5 Samfunnsoptimal Modell Etter CRC

Resultatet vi fikk ved å simulere den samfunnsoptimale modellen var veldig overraskende. Her ser vi at hogsttidspunktet vil bli dyttet bakover til et punkt tilnærmet lik modellen presentert av Faustmann i 1849. Vi antar at dette er fordi den samlede verdien av karbon sekvestrering, inntekter fra tømmer og verdien av energi ved brenning av tømmer vil være høyest ved det punktet hvor endring av skogens volum er lik diskonteringsraten som i (7.5) $\frac{\dot{S}}{S} = i$. Siden volumet av skogen er avgjørende i kalkulasjon av disse verdiene. Det er også viktig å fremheve at den totale samfunnsoptimale netto nåverdien vil være større enn ved modellen som kun inkluderer skogeier ettersom den vil også ta hensyn til nåverdien av energi.



Figur 13

Ved den Samfunnsoptimale modellen så har vi da introdusert enda en pris som vil påvirke det optimale hogsttidspunktet. Når prisen av energi i forhold til karbonprisen øker vil vi se at hogsttidspunktet vil trekkes tilbake mot det som er optimalt ved Faustmann (1849).

Vi kan oppsummere hvordan endringer i de forskjellige prisene vil påvirke Netto Nåverdi samfunn og videre hogsttidspunktet ved enkel rotasjonsperiode i tabell 2.

	$\Delta NNV(T^*)$	ΔT^*	Oppsummering
$\frac{\delta NNV(T^*)}{\delta p_S}$	$\uparrow S_T e^{-iT}$	\downarrow	En økning av prisen for tømmer vil krympe hogsttidspunktet
$\frac{\delta NNV(T^*)}{\delta p_K}$	$\uparrow K_{NT}(t)e^{-iT}$ $\downarrow a(1 - \beta)S_T e^{iT}$	\uparrow	En økt karbon pris vil i første omgang utvide hogsttidspunktet gjennom økte inntekter av karbonlagring, men det vil også gjøre det mer kostbart med utslipp
$\frac{\delta NNV(T^*)}{\delta p_E}$	$\uparrow ES_T e^{-iT}(1 - \beta)$	\downarrow	En økning i eletrisitetspriser vil gjøre det mere gunstig å brenne tømmer som da vil presse opp prisen på tømmer stokken. Som vil føre til krymping av hogsttidspunktet

Tabell 1 Preiseffekter som påvirker nåverdi og hogsttidspunkt

5.0 Diskusjon

Dette kapittelet diskuterer hvilke konsekvenser Carbon Removal Certification (CRC) vil påvirke karbonlagring i Norge samt økonomiske konsekvenser som kommer av dette forslaget basert på bakgrunnsinformasjon gitt i kapittel 2 og resultatene av analysen jeg har fremlagt i kapittel 4. Diskusjonen er tar da utgangspunkt i forskningsspørsmålet:

Hvilke innvirkninger vil Carbon Removal Certification ha for den enkelte skogeier, vil hen utsette hogsttidspunktet av skogen sin og hvilke samfunnsøkonomiske konsekvenser vil Carbon Removal Certification ha for Norsk skogsindustrien?

5.1 Karbonlagring ved Carbon Removal Certification

Det viktigste funnet fra resultatene av denne oppgaven er at inkorporering av karbonlagring i skogeiers profittfunksjon fører til en utsettelse av rotasjonsperioden. Det vil si at Carbon Removal Certification (CRC) vil ha en positiv effekt på karbonlagring i skogen. Det er imidlertid viktig å poengtere at under de antakelsene som er gjort i oppgaven, vil det eksistere et maksimalt punkt hvor videre utsettelse av hogsttid ikke vil være gunstig. Altså der hvor den negative verdien fra råtning av død skog vil være større enn verdien av karbonlagring i levende skog, illustrert ved figur 7. Dette skyldes begrensningen av skogens kapasitet til å opprettholdelse av biologisk masse som den kan opprettholde til enhver tid, se figur 8.

Et forlenget rotasjonstidspunkt vil også føre til økt langtidslagring av karbon i dødt materiale i skogen. Men en svakhet ved modellen i denne oppgaven er at det ikke er tatt hensyn til de ulike konsekvensene som tilhører død biomasse i skogen. Hvor modelleringen min av trebestanden kun tar et bilde av total biomasse ved treets dødstidspunkt for å lagre disse dataene i en separat tabell. Dermed er kostnader ved å fjerne det døde treet eller reduksjon av tilgjengelig vekst areal ikke blitt betraktet i modellen.

På kort sikt vil det føre til tilbudsknapphet av tømmer i markedet Hvis dagens skogeiere i Norge bestemmer seg for å utsette rotasjonsperioden. Dermed vil prisen på tømmer øke som vil da medføre et skift i tilbudskurven av tømmer i neste periode. Etersom tilbudet av tømmer øker så vil prisen bli presset ned igjen. Disse svingningene vil da fortsette frem til markedet når den nye langtids likevekten. I denne tilvenningsperioden vil det da være gunstigere relativt mot trevirke å substituere tømmer med for eksempel sement og stål til konstruksjon. Dette kan da føre til økte utslipp på kortsikt og gir oss det motsatte resultatet fra det man

ønsker ved ratifisering av CRC. EU har også andre forslag som vil virke symbiotisk sammen med CRC for å redusere nettokarbonutslippet innenfor EU. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) pålegger en karbonskatt på karbonintensive produkter som stål og betong. Denne økte prisen vil dermed lede til et negativt skift i tilbudet av disse produktene på lik linje med trevirke. Dermed antar jeg at substitusjonseffekten i justeringsperioden vil være liten.

5.2.0 Antakelser

I dette delkapittelet vil jeg utforske og diskutere antakelsene som har blitt gjort i forbindelse med modellen, og hvordan disse forenklingene potensielt kan påvirke resultater av analysen. Det er da viktig å ta i betraktning at ved enhver økonomisk modell så vil det innebære visse simplifiseringer og begrensninger. Som den britiske statistikeren George Box sa «All models are wrong, but some are useful» er ikke modellen min en komplett representasjon av virkeligheten, men den kan hjelpe oss med å forstå de økonomiske samt de økologiske konsekvensene av CRC.

5.2.1 Karbonlagring

Jeg antar i modellene at 55% av karboninnholdet i volumet av skogen som høstes blir lagret i byggematerialer og dermed at de resterende prosentene av volumet blir sluppet ut i atmosfæren umiddelbart etter hogst gjennom forbrenning. Jeg har gjort denne antakelsen for å forenkle modellen min, men i realiteten så blir ikke alt brent på anlegg. Videre tar jeg ikke hensyn til den biomassen som ligger igjen i skogen etter hogst i form av hogstavfall, altså greiner, røtter, topper og stubber. Når tømmerstokken kommer til sagbruk så blir den typisk fordelt på følgende måte etter uttalelsene fra Bergene, se tabell 1.

Tømmerproduksjons fordeling	
Produkt	Andel
Trelast	55%
Sagspon	8-10%
Bark	8-10%
Celluloseflis	30%

Grunnet denne antakelsen har jeg ikke tatt høyde for videre foredling av tømmeret ettersom det ikke var relevant for den enkelte skogeieren. Derimot ville det vert veldig relevant å

kvantifisere hvor mye de enkelte produktene fra tømmerstokken selges for i markedet for den samfunnsøkonomiske modellen.

5.2.2 Burde skogen bare stå?

Modellene jeg har presentert igjennom oppgaven forutsetter at det vil være et punkt hvor skogen vil bli avvirket, men vil det noen gang være gunstig for skogeier å bare la skogen stå? Ja, det kan være flere grunner til at bestanden ikke er drivverdig, hvor det ikke lønner seg å hogge. Dette kan da være tilfelle når kostnadene ved hogst er større eller like store som tømmerverdien. Dette kan være tilfelle dersom

- Tomten er utilgjengelig på grunn av topografi eller manglede skogsbilvei
- Store transportkostnader til sagbruk hvor det er da for langt mellom skogen og sagbruket
- Lave tømmerpriser i området grunnet liten etterspørsel fra sagbruk.
- Lav tømmerverdi som følge av lav kvalitet ved for eksempel råte eller om bestanden har blitt angrepet av barkebiller.

Videre vil skogeieren vurdere alternative inntekter som kanskje er viktigere enn de inntektene hen kan få fra skogen som for eksempel jakt inntekter, tilgang på fiske eller annen rekreasjonsturisme. Det er også viktig å fastsette at skogeier har en høy alternativ kostnad for sin tid, spesielt i et land med høyt lønningsnivå som Norge hvor skogbruk er vanligvis ikke skogeierens hovedinntekt. Disse alternative kostnadene er da ikke tatt hensyn til i modellen og det er da et potensiale for videre forskning.

Om jeg følger antakelsene som jeg har gjort så langt så vil svaret til dette spørsmålet være nei. Dette er fordi relasjonene i modellene våre tar utgangspunkt i endring i levende biomasse for å kalkulere karbon lagring. Jeg har gjort denne simplifiseringen ettersom det ville føre til en god del kompleksitet om jeg skulle modellere reel karbon sekvestrering. Hvis man ser bort fra denne antakelsen og dermed antar at karbonfangsti en voksen skog alltid vil være høyere enn utslipp så kan man anta at det vil være en karbonpris hvor skogeier vil ha en høyere inntekt dersom hen aldri avvirker bestanden.

5.2.3 Pris av eldre tømmer

Modellene jeg har fremstilt bygger på at skogeier alltid får best mulig pris for hver kubikkmeter tømmer han selger. Dette er da en grov forenkling ettersom verdien av tømmeret

er kalkulert fra bredden samt høyden av de individuelle tømmerstøkkene. Dermed vil et utsatt hogsttidspunkt føre til større trær som igjen vil gi en lavere pris per kubikk meter til skogeieren. Det er to årsaker til dette.

1. Norske sagbruk er optimalisert til å bearbeide tømmer som har en visse dimensjoner. Det er da krevende og kostbart å kjøre overdimensjonerte tømmerstokker gjennom sagbruket.
2. Større trær vil produsere lengre planker som vil være vanskeligere å selge på markedet ettersom de går utenfor de vanlige produktkategoriene.

Videre kan det være mer kostbart å frakte dette tømmeret ettersom det vil muligens kreve utvikling i logistikk for å frakte stokken til sagbruket. Dermed ville en integrering av variable tømmer priser gjort modellen samt hensyn til logistikk gjøre modellen mer presis.

5.2.4 Energipriser

Nylig har energipriser vært et veldig debattert tema. Jeg mener dermed at det var relevant å ta hensyn til energi gevinsten ved forbrenning av den andelen av tømmeret som ikke blir langtidslagret som HWP i den samfunnsøkonomiske modellen. Energiprisen vil da ha en krypende effekt på rotasjonsperioden ettersom det vil øke den samfunnsøkonomiske nåverdien i de tidligere periodene. Dette er visualisert ved figur 13 i kapittel 4. Videre vil et høyere nivå av energipriser føre til en økning i tømmerpriser ettersom det vil være mer lønnsomt å produsere biobrensel fra tre til energi generering eller til oppvarming.

Vi kan se bevis for dette ved å studere prisendringer i strømmarkedet og endringer i pris av sagtømmer og massevirke. Gjennom 2022 har vi hatt rekordhøye strømpriser grunnet krigen mellom Russland og Ukraina som videre har ført til rekordhøye strømpriser. Disse prisene har videre ført til en rekordvekst i prisendring av tømmer i perioden 2021-2022 hvor den gjennomsnittlige tømmerprisen har økt med 15,8% (Statistisk Sentralbyrå, 2023b)

5.2.4 Skogeier som profitt maksimerer

I kapittel 2 ble det tydelig fremhevet at skogen ikke utgjør hovedinntekten til den enkelte skogeier. Hvor gjennomsnittsinntekt fra skog lå på kun 62.000 i tillegg til at 43 prosent av andel produktivt skogareal er klassifisert som hogstklasse V, hogstmoden skog (Statistisk sentralbyrå, 2023). Det er da implisitt at skogeier ser på skogen som en form for sparing eller forsikring som kan utnyttes når behovet oppstår. Videre kan det antas at han vil utsette hogsten for å bevare verdien og potensialet i skogen. Jeg antar da at skogeier høster skogen

når han har et økonomisk behov. Dette kan skyldes ulike faktorer som personlige eller familiære utgifter som for eksempel et bryllup eller investeringsmuligheter. Dette gir da skogeieren fleksibilitet til å tilpasse seg en usikker fremtid uten risiko.

5.2.5 Diskonteringsrenten

Diskonteringsrenten er sentral til beregningene i modellene våre ettersom jeg må analysere de mulige inntektene til skogeier og samfunnet fra et økonomisk perspektiv. Jeg har i oppgaven antatt at diskonteringsrenten er konstant for både den private aktøren (skogeier) og den offentlige samfunnsplanleggeren. Som jeg har diskutert tidligere i oppgaven, vil samfunnsplanleggeren vanligvis ha en regressiv Weitzman diskonteringsrente når man planlegger prosjekter som påvirker klimaet. Jeg har da ikke tatt hensyn til dette ettersom målet med denne oppgaven er å estimere hvordan skogeier endrer sin oppførsel etter CRC er introdusert, hvor jeg observerer at det være rasjonelt for skogeier endrer rotasjonstiden med 30 år (6 perioder). Dette er da innenfor 40 års regelen som jeg diskuterte tidligere og dermed vil man ikke justere diskonteringsrenten nedover.

6. Konklusjon

Denne masteroppgaven har studert hvordan Carbon Removal Certifications vil påvirke skogeierne og treindustrien i Norge. Her har jeg undersøkt hvordan en skogeier for en enkelt granbestand som jeg antar er typisk for norske forhold vil oppføre seg hvis han får en belønning i form av karbonkreditter dersom han utsetter hogsttidspunktet.

Resultatene av oppgaven indikerer at om skogeier tar hensyn til karbonopptak i skogen vil dette føre til en lengre rotasjonsperiode for skogeierne. Dette kommer av at hvis man antar at skogeier vil maksimere sin profitt ved å høste skogen på det tidspunktet som maksimerer hans egen nåverdi. Imidlertid er det viktig å merke seg at en utvidet rotasjonsperiode kan medføre visse utfordringer for skogeier og sagbruk. Det er dermed nødvendig å ha en balansert tilnærming som betrakter bære karbonopptaks miljøfordeler og økonomiske utfordringer.

På samfunnsnivå vil inkludering av karbonopptak ha en stor positiv effekt på nåverdien til samfunnet, som ble illustrert gjennom modellering av van Kooten (1995). Her kan man se at fra et samfunnsøkonomisk perspektiv er da verdien av karbonopptaket mange ganger mer

verdifullt enn selve tømmeret gitt dagens priser. Til slutt har jeg presenter hvordan den totale samfunnsøkonomiske nåverdien av tømmerdrift er avhengig av forholdet mellom prisen av tømmer, elektrisitet og karbon hvor hver av disse prisene vil dra hogsttidspunktet mellom resultatet av en standard Faustmann modell og maksimal kapasitet i skogen.

Forskning som har blitt foretatt så langt på dette temaet har konkludert at dersom karbon utslipp bærer en sosial kostnad burde dette føre til at lengre rotasjonsperioder blir iverksatt, slik som van Kooten (1995), (Hoel, Holtsmark B., Holtsmark K., 2014), (Rørstad, 2022), eller Asante (2016). Ifølge EUs nye rammeverk for utslipp vil den sosiale kostnaden da være en sosial belønning til skogeierne. Dermed har målet ved denne oppgaven vært å kvantifisere hvor lang denne utsettelsen blir, og hva dette vil si for treindustri i Norge. For å gjøre denne kvantifiseringen har jeg først presentert noen baseline modeller for optimal rotasjonslengde hvor jeg ikke tar hensyn til EUs nye rammeverk basert på en standard Faustmann modell og van Kooten et al. (1995). Jeg har videre formulert to egne modeller som vil representere hva EUs nye rammeverk, CRC, vil påvirke skogeier og samfunnet.

6 Konklusjon

Denne masteroppgaven har studert hvordan Carbon Removal Certifications vil påvirke skogeierne og treindustrien i Norge. Her har jeg undersøkt hvordan skogeieren vil oppføre seg hvis han får en belønning i form av karbonkreditter dersom han utsetter hogsttidspunktet.

Resultatene av oppgaven indikerer at om skogeier tar hensyn til karbonopptak i skogen vil dette føre til en lengre rotasjonsperiode for skogeierne. Dette kommer av at hvis man antar at skogeier vil maksimere sin profitt ved å høste skogen på det tidspunktet som maksimerer hans egen nåverdi. Derimot er det viktig å merke seg at en utvidet rotasjonsperiode kan medføre visse utfordringer for skogeier og sagbruk. Det er dermed nødvendig å ha en balansert tilnærming som betrakter både karbonopptaks miljøfordeler og økonomiske utfordringer.

På samfunnsnivå vil inkludering av karbonopptak ha en stor positiv effekt på nåverdien til samfunnet, som ble illustrert gjennom modellering av van Kooten (1995). Her kan man se at fra et samfunnsøkonomisk perspektiv er da verdien av karbonopptaket mange ganger mer verdifullt enn selve tømmeret gitt dagens priser. Til slutt har jeg presenter hvordan den totale samfunnsøkonomiske nåverdien av tømmerdrift er avhengig av forholdet mellom prisen av tømmer, elektrisitet og karbon hvor hver av disse prisene vil dra hogsttidspunktet mellom resultatet av en standard faustmann modell og maksimal kapasitet i skogen.

7 Referanse liste

- Asante, P. and Armstrong, G. (2016) “Carbon sequestration and the optimal forest harvest decision under alternative baseline policies,” *Canadian Journal of Forest Research*, 46(5), pp. 656–665. Available at: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0222>.
- Bollandsås, Næsset, 2009, “Weibull models for single-tree increment of Norway spruce, Scots pine, birch and other broadleaves in Norway”
- Cambridge Dictionary. (n.d.). Greenwashing. In Cambridge English Dictionary. Retrieved 11/06/2023, from <https://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/greenwashing>
- Council of the European Union. (Accessed: June 11, 2023). *Fit for 55: The EU plan for a green transition*. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/#what>
- Environmental Protection Agency (EPA). (Accessed: June 11, 2023). Stationary Operators - EU ETS Compliance. Hentet fra <https://www.epa.ie/our-services/licensing/climate-change/eu-emissions-trading-system-/emissions-trading-system---stationary-installations/stationary-operators---eu-ets-compliance/>
- European Commission, ‘Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a Union certification framework for carbon removals’ COM (2022),
- European Commission. (Accessed: June 11, 2023). EU Emissions Trading System (EU ETS) - Revision Phase 4 (2021-2030). Hentet fra https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/revision-phase-4-2021-2030_en
1. <https://nibio.brage.unit.no/nibio-xmlui/handle/11250/2996908>
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24, doi:10.1017/9781009157940.001.
- Kilde Vegard (2011) *Fokus på tre: Gran* (ISSN 15 01-7427). TreFokus, Treteknisk. Hentet fra <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/28-Gran.pdf>
- Klima- og miljødepartementet (2021). *Internasjonale klimaforhandlinger*. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/klima/innsiktsartikler-klima/de-internasjonale-klimaforhandlingene/id2741333/>

- Klima- og miljødepartementet, Finansdepartementet, Olje- og energidepartementet og Samferdselsdepartementet (2021). *EUs klimapakke Klar for 55 (Fit for 55)*. Hentet fra <https://www.regjeringen.no/no/tema/klima-og-miljo/innsiktsartikler-klima-miljo/eus-klimapakke-klar-for-55/id2887217/>
- Larsen, Øyvind Stranna: *bonitet* i *Store norske leksikon* på snl.no. Hentet 12. juni 2023 fra <https://snl.no/bonitet>
- Michael Hoel, Bjart Holtsmark and Katinka Holtsmark (2014), "Faustmann and the climate", *Journal of Forest Economics*: Vol. 20: No. 2, pp 192-210.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfe.2014.04.003>
- Mufson, S. (2021, June 14). Q&A with 'The Spirit of Green' author William Nordhaus. The Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/climate-solutions/2021/06/14/qa-william-nordhaus-interview-carbon-pricing/>
- NASA Goddard Institute for Space Studies. (Hentet: June 11, 2023). *Global Mean Estimates based on Land and Ocean Data*. Hentet fra https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/graph_data/Global_Mean_Estimates_based_on_Land_and_Ocean_Data/graph.txt
- NIBIO-rapport for balansekvantum
- Nordhaus, W. D. (2013). *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*. New Haven, CT: Yale University Press.
- Nordhaus, W. D. (2017). *Revisiting the social cost of carbon*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7), 1518-1523. doi: 10.1073/pnas.1609244114.
- Norwegian Association for the United Nations (FN-sambandet). (hentet: June 11, 2023).
Klimaendringer. Hentet fra <https://www.fn.no/tema/klima-og-miljoe/klimaendringer>
- Nygaard, P.H., (2021). *Skogreisning — Bærekraftig skogbruk i Norge*.
<https://www.skogbruk.nibio.no/skogreisning>
- Parisavtalen. (2015). *Parisavtalen* (2015-12-12-32) Lovdata.
<https://lovdata.no/dokument/TRAKTAT/traktat/2015-12-12-32>
- Parisavtalen. (2015). *Parisavtalen* (2015-12-12-32) Lovdata.
<https://lovdata.no/dokument/TRAKTAT/traktat/2015-12-12-32>
- Ritchie, H., Roser M. & Rosado, P. (2020). *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from (14.06.2020):
<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>
- Rørstad P.K (2022), *Payment for CO₂ sequestration affects the Faustmann rotation period in Norway more than albedo payment does*, *Econological Economics*, Vol 199, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.econ.2022.107492>

- Søgaard, Breidenbach, Smith & Hobrak (2023), *Skogens Klimaregnskap*. Hentet fra <https://www.skogbruk.nibio.no/klimagassregnskapet-for-norske-skoger>
- Solheim, R. og Tomter, S.M. (2023) Den Boreale Barskogssone. I *Store norske leksikon*. Hentet fra https://snl.no/den_boreale_barskogssone
- Statistisk sentralbyrå (2022), *Landskogstakseringen*. Hentet fra <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/skogbruk/statistikk/landsskogtakseringen>
- Statistisk sentralbyrå. (2023a), *09594: Arealbruk og arealressurser*. Hentet fra <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/areal/statistikk/arealbruk-og-arealressurser>
- Statistisk sentralbyrå (2023b), *[08983, 07410, 07413]: Skogavvirkning for salg*. Hentet fra <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/skogbruk/statistikk/skogavvirkning-for-salg>
- Statistisk sentralbyrå (2023c), *10613: Skogeiendommer og skogareal, etter eierform, statistikkvariabel og år*. Hentet fra <https://www.ssb.no/statbank/sq/10083667>
- Statistisk sentralbyrå (2023d), *06289: Stående kubikkmasse under bark og årlig tilvekst under bark (1 000 m³), etter treslag, år og statistikkvariabel,*. Hentet fra <https://www.ssb.no/statbank/sq/10083664>
- Statistisk sentralbyrå (2023e), *[06502, 08975]: Skogeiernes inntekt*. Hentet fra <https://www.ssb.no/jord-skog-jakt-og-fiskeri/skogbruk/statistikk/skogeiernes-inntekt>
- Statsforvalteren i Vestland (2020), *Frå skogreising til avskoging til påskoging*. Hentet fra <https://www.statsforvalteren.no/vestland/landbruk-og-mat/skogbruk/frac-skogreising-til-avskoging-til-paskoging/>
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511817434
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), (2022). *Reference Manual for the Enhanced Transparency Framework under the Paris Agreement Understanding the enhanced transparency framework and its linkages*. Available from https://unfccc.int/sites/default/files/resource/v2_ETFreferencemanual.pdf
- Van Kooten, G. C., Binkley, C. ., & 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. <https://doi.org/10.2307/1243546>
- Yatskov, M., Harmon, M. E., & Krankina, O. N. (2003). chronosequence of wood decomposition in the boreal forests of Russia. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(7), 1211–1226. <https://doi.org/10.1139/x03-033>

