

Skove og træers klimapotentiale

Thomas Nord-Larsen, Prescott Huntley Brownell II og Emil Engelund Thybring

Titel

Skove og træers klimapotentiale

Forfattere

Thomas Nord-Larsen, Prescott Huntley Brownell II og
Emil Engelund Thybring

Bedes citeret

Nord-Larsen, T., Brownell II, P.H., og Thybring, E.E. (2024):
Skove og træers klimapotentiale. IGN Rapport, oktober 2024,
Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns
Universitet, Frederiksberg. 73 s. ill.

Udgiver

Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning
Københavns Universitet
Rolighedsvej 23
1958 Frederiksberg C
ign@ign.ku.dk
www.ign.ku.dk

Ansvarshavende redaktør

Vivian Kvist Johannsen

Faglig kvalitetssikring

Niclas Scott Bentsen (IGN, KU)
Søren Ugilt Larsen (Institut for Agroøkologi, AU)
Ansvaret for udgivelsens indhold er alene forfatterne

ISBN

978-87-7903-935-3 (web)

Layout

Thomas Nord-Larsen

Omslagslayout

Jette Alsing Larsen

Forsidefoto

Thomas Nord-Larsen

Publicering

Rapporten er publiceret på www.ign.ku.dk

Gengivelse er tilladt med tydelig kildeangivelse

Skriftlig tilladelse kræves, hvis man vil bruge instituttets navn og/eller
dele af denne rapport i sammenhæng med salg og reklame

Finansiering

Rapporten er finansieret som en del af arbejdet med projektet
"Afgørderne" i samarbejde med DCE, Århus Universitet som en del
af projektet "Veje til biobaseret byggeri" bevilliget af Realdania.

Forord

Overgangen fra mineralske til biogene byggematerialer repræsenterer en væsentlig mulighed for at reducere byggebranchens klima- og miljøpåvirkning. Byggebranchen er en af verdens største forbrugere af ressourcer, hvilket gør skiftet fra mineralske til biogene ressourcer afgørende men også udfordrende. Dette skift kræver nøje overvejelse af, hvor og hvordan de biogene ressourcer dyrkes og høstes, for at få størst mulig klimaeffekt og samtidig undgå negative konsekvenser for miljøet og biodiversiteten som følge af ændret arealanvendelse.

Denne rapport udgør en del af delprojektet "Afgørden" under "Veje til biogent byggeri", som er foranlediget og finansieret af Realdania. Delprojektet "Afgørden" undersøger effekten af forskellige afgrøder og deres dyrkning på økosystemernes kulstofbalance og mængden af biogene materialer som kan leveres til byggeriet under forskellige scenarier for en ændret arealanvendelse i Danmark. Aarhus Universitet har været ansvarlig for beregningerne og syntesen relateret til landbrugssektoren, mens Københavns Universitet har haft ansvaret for tilsvarende opgaver inden for skovene. Denne rapport gengiver resultater for fremskrivningen af skovene under forskellige scenarier for arealanvendelse og anvendelsen af skovressourcen og hermed indvirkningen på skovenes kulstofpuljer og tilgængeligheden af træ til materialer og energi.

Rapportens scenarier er udarbejdet i tråd med linende scenarier for landbruget. Det samlede arbejde publiceres af Aarhus Universitet og bidrager til en samlet forståelse af, hvordan Danmark kan omstille sig til en øget produktion og brug af biogene ressourcer fra land- og skovbrug i byggeriet.

Frederiksberg

Oktober 2024

Sammendrag

Rapporten "Skove og træers klimapotentiale" fokuserer på danske skoves evne til at lagre kulstof og levere biogene materialer, som kan anvendes i byggeriet for at reducere klimabelastningen fra fossil-tunge ressourcer som f.eks. stål og beton. Undersøgelsen belyser forskellige scenarier for skovforvaltning og vurderer deres indvirkning på skovenes kulstoflager og produktion af materialer til det biogene byggeri.

I rapporten anvender vi modellen EFISCEN-Space til at analysere forskellige fremtidige scenarier for dansk skovbrug. Modellen integrerer data fra Danmarks Skovstatistik og muliggør fremskrivninger af skovens udvikling og kulstofoptag under forskellige forvaltningsstrategier. I fremskrivningerne indgår både scenarier, der beskriver en forvaltning af skovene, som det sker i dag, og scenarier som viser konsekvenserne ved et øget fokus på dels træproduktion og dels afsætning af areal til biodiversitetsbeskyttelse.

Scenarierne resulterer i store forskelle på opbygningen af biomasse i skovene. Naturligt giver et fuldstændigt hugstopt i skovene, både i den eksisterende skov og i skovrejsningen, en hurtig opbygning af biomasse i skovene svarende til en årlig opbygning på 5,2 mio. tons tørstof/år frem til 2050. Et andet scenarie, hvor store dele af den eksisterende skov udlægges til urørt skov, giver ligeledes anledning til en stor opbygning af biomasse i skovene. De øvrige scenarier, som omfatter både scenarier, hvor skovene forvaltes på samme måde som for nuværende, og hvor der lægges vægt på hhv. produktion af træ og beskyttelse af biodiversitet har nogenlunde samme opbygning af overjordisk biomasse i skovene svarende til 1,8-2,1 mio. tons tørstof/år frem til 2050. Men når der til ad vidt forskellige veje. Således anvendes der hurtigere voksende træarter i scenariet, der lægger vægt på produktion samtidig med, at der fældes mere træ til eksempelvis byggeri. Modsningsvis plantes mere langsomt voksende træarter i scenarierne med en mere ekstensiv produktion og udnyttelse af biomasse samtidig med, at der også fældes mindre. Herved kommer opbygningen af biomasse i skovene til at blive nogenlunde ens, men med store forskelle i hvor meget træ, der leveres til materialer og energi, der kan anvendes i en grøn omstilling af samfundet.

Som for opbygningen af biomasse i skovene, er der store forskelle på scenarierne for hvad angår deres produktion af biomasse til materialer og energi. I scenarier, hvor skovrejsningens sammensætning og brugen af træ fra skoven er uændret, har skovrejsning kun en begrænset effekt på biomasseproduktionen frem til 2050. Derimod viser scenarier, hvor træet i højere grad finder anvendelse til materialer og energi et betydeligt potentiale for at øge biomasseproduktionen til materialer og energi fra skovene selv på den korte bane. Således øger scenariet, der fokuserer på produktion af træ, allerede i 2030 mængden af biomasse fra skovene med 20 pct. i forhold til et scenarie, som

forudsætter en uændret forvaltning, primært gennem intensiv udnyttelse af hugstaffald til energi. Denne stigning fortsætter til 200 pct. i 2070. Omvendt medfører de to scenarier, som afspejler en ekstensivering af skovdriften både i forhold til artsvalget ved skovrejsning og anvendelsen af træ fra skovene, markante reduktioner i biomasseproduktionen, særligt som følge af scenariernes udlægning af urørt skov og fraværet af bioenergi i sortimentsudfaldet.

Forskellene mellem scenarierne er også tydelige i forhold til træ til byggeri, hvor scenarier med uændrede mønstre i anvendelsen af træressourcen på trods af omfattende skovrejsning kun viser små ændringer frem til 2070, mens scenarier med omfattende udlæg af urørt skov reducerer træ til byggeri markant. Scenarierne viser endvidere, at målrettet udnyttelse af træ til produktion af blandt andet træplader til byggeriet kan øge mængden af træ til biogent byggeri med 385 pct. i 2030 og 469 pct. i 2050, forudsat at nye produktionsteknologier anvendes. Dette illustrerer, hvordan skovforvaltning og anvendelsesstrategier påvirker produktionen af biomasse og træprodukter på både kort og lang sigt.

Samlet set viser rapporten, at dansk skovbrug kan bidrage væsentligt til at møde efterspørgslen efter biogene byggematerialer med indenlandsk produktion og herved til klimamålene, hvis der fokuseres på strategisk skovforvaltning og udnyttelse af biogene ressourcer. Resultaterne peger imidlertid også på at der er betydelige trade-offs mellem produktionen af materialer til den grønne omstilling og beskyttelsen af biodiversitet gennem afsætning af arealer til bl.a. urørt skov. Den viden, som rapporten præsenterer, danner baggrund for en kvalificeret diskussion af, hvordan skovene og særligt den kommende skovrejsning kan bruges til at imødekomme samfundets behov for at finde en vej mod mere biogent byggeri.

Indhold

FORORD	3
SAMMENDRAG	4
1 OPTAG OG LAGRING AF CO₂	8
1.1 Grønne planter og det globale kulstofkredsløb	8
1.2 En skovbevoksnings kulstofdynamik	10
1.3 Skovbevoksningsens produktion af materialer og energi	11
1.3.1 Industrielle rester	14
1.4 Eksempler på kulstoflagring, træprodukter og udledninger ved en række skovdyrkningsscenarier	15
1.4.1 Beregning af skovbevoksningsens CO ₂ -optag	15
1.4.2 Sortimentsforhold	16
1.4.3 Procesudledninger	17
1.4.4 Rødgran.....	18
1.4.5 Bøg	20
1.4.6 Eg	23
1.4.7 Andre træarter og dyrkningssystemer	25
2 DANSKE SKOVRESSOURCER	28
2.1 Tidligere fremskrivninger af skovressourcen	28
2.2 EFISCEN-Space modellen	30
2.3 Scenarier	35
2.4 Efterprocessering	39
2.4.1 Beregning af skovens kulstoflager	39
2.4.2 Beregning af effekten på biogene byggematerialer	40
2.5 Resultater	41

2.5.1	Business-as-usual	44
2.5.2	Business-as-Usual (X).....	45
2.5.3	Biomasse/produktion	47
2.5.4	Ekstensivering	49
2.5.5	Foder-til-Føde.....	51
2.6	Sammenfatning af de fem hovedscenarier	55
3	DISKUSSION.....	57
3.1	Træstrømme.....	57
3.2	Scenariernes effekt på klimaet.....	58
3.3	Indirekte effekter.....	61
4	KONKLUSION	63
5	REFERENCER	64
6	APPENDIKS	68

1 Optag og lagring af CO₂

Fotosyntese er en biokemisk proces, hvor planter, alger og visse bakterier omdanner lysenergi fra solen til kemisk energi, lagret i form af glukose. Denne proces involverer optag af kuldioxid (CO₂) fra atmosfæren og frigivelse af ilt som et biprodukt. I træer foregår fotosyntese primært i bladene, hvor klorofyl, pigmentet der gør bladene grønne, fanger sollys og omdanner CO₂ og vand til glukose og ilt. Glukose omdannes efterfølgende til en lang række andre kemiske forbindelser.

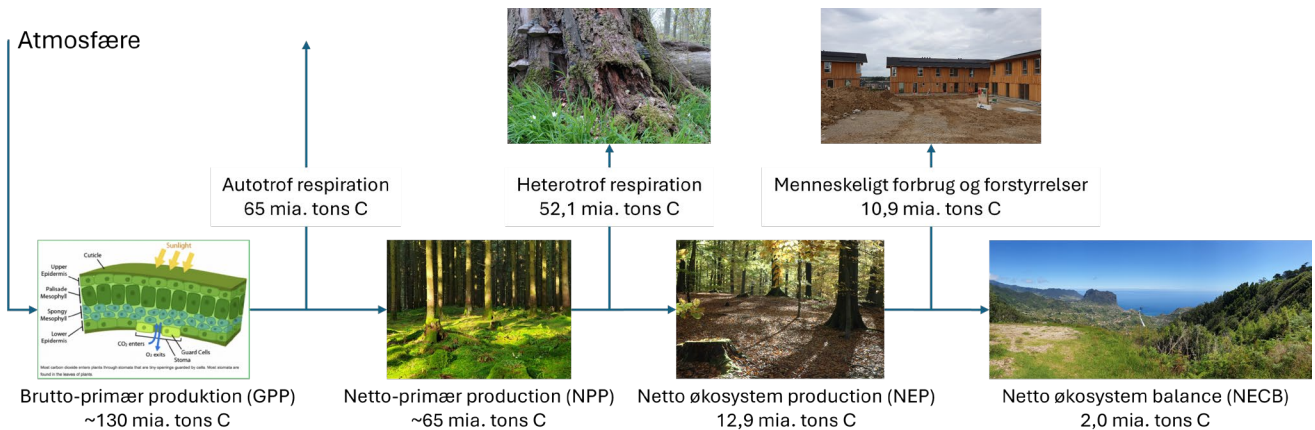
Skovens CO₂-optag refererer til processen, hvor træer optager atmosfærisk CO₂ gennem fotosyntese og omdanner det til kulstofforbindelser, der lagres i træets biomasse. Dette kulstof findes i træets stammer, grene, rødder og blade, hovedsageligt bundet i cellulose (40-50 pct.), hemicellulose (20-30 pct.) og lignin (15-30 pct.). Kulstofflagring i skove spiller en vigtig rolle i reguleringen af det globale klima ved at reducere mængden af CO₂ i atmosfæren, som er en drivhusgas ansvarlig for global opvarmning. Globalt opbevarer verdens skove i øjeblikket 662 mia. tons kulstof i deres stamme, grene, blade, rødder og i skovjorden [1] svarende til 2.400 mia. tons CO₂-ækvivalenter. Dette gør dem til et værdifuldt globalt kulstoflager, og gør bevarelse og vedligeholdelse af sunde skove til en vital strategi i bekæmpelsen af klimaforandringer.

Når træer vokser, øges deres kulstoflager, og når træet dør, nedbrydes veddet af insekter, bakterier og svampe, hvorved det optagne CO₂ atter frigives. Skovforvaltning, der fremmer vækst og sundhed for skovtræer, kan derfor have betydelige fordele for klimaet ved at øge mængden af lagret kulstof, der herved holdes ude af atmosfæren. Ydermere bidrager produkter fra skovene til at modvirke klimaforandringer ved at erstatte klima-dyrt materiale som eksempelvis stål og beton i byggeriet. Disse materialer kræver store mængder af energi at udvinde og forarbejde og herved giver store udledninger af CO₂ ofte fra fossile kilder. Ved at bygge med træ i stedet for stål og beton opbygges der dels et lager af kulstof i træmaterialerne, og dels undgås udledningen af CO₂ fra forarbejdningen af jern og cement.

1.1 Grønne planter og det globale kulstofkredsløb

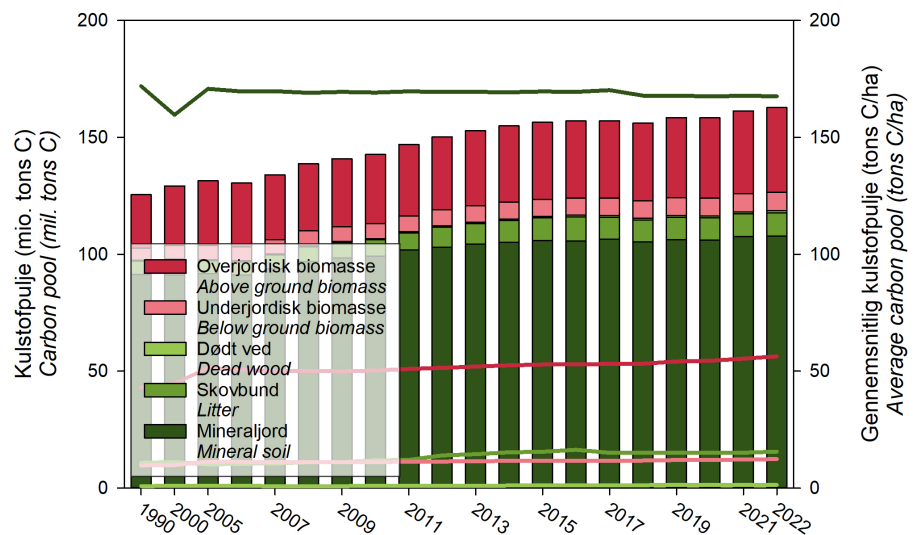
Det er estimeret at grønne planter på landjorden hvert år samlet set optager 130 mia. tons kulstof fra atmosfæren [2, 3], svarende til 480 mia. tons CO₂, kaldet brutto-primærproduktionen (engelsk; Gross Primary Production, GPP, Figur 1.1). Imidlertid forbruger planterne selv omkring halvdelen af det optagne kulstof (65 mia. tons) til deres egen autotrofe respiration, og deres netto-primærproduktion (engelsk: Net Primary Production, NPP) bliver derfor til ca. 65 mia. tons kulstof. Omkring 51 mia. tons kulstof bliver årligt omsat og frigivet tilbage til atmosfæren når svampe og mikroorganismer spiser døde planter og plantedele som en del af den heterotrofe respiration. Dette

efterlader 14,2 mia. tons kulstof kaldet netto-økosystemproduktionen (engelsk: Net Ecosystem Production, NEP). Endelig forbruger mennesker og skovbrande omkring 10,9 mia. tons kulstof og efterlader derved en lille opsparing på 3,3 mia. tons kulstof på kloden kaldet netto-økosystem kulstofbalancen (engelsk: Net Ecosystem Balance, NECB). Til sammenligning udledes der fra fossile kilder årligt omkring 9,6 mia. tons kulstof svarende til 35,2 mia. tons CO₂ [3].



Figur 1.1. Det globale klimaregnskab for landjordens grønne planter (baseret på [2, 3]).

Skovenes optag og lagring af kulstof fordeles normalt i fem forskellige puljer: overjordisk levende biomasse (træernes stamme, grene og blade), underjordisk levende biomasse (træernes rødder), dødt ved, litter (skovbundens lag af ikke-nedbrudte plantedele) og kulstof i mineraljorden. Den langt største pulje af kulstof (i danske skove omkring 2/3, [4]) findes i mineraljorden, men denne pulje er typisk meget stabil og bidrager derfor ikke

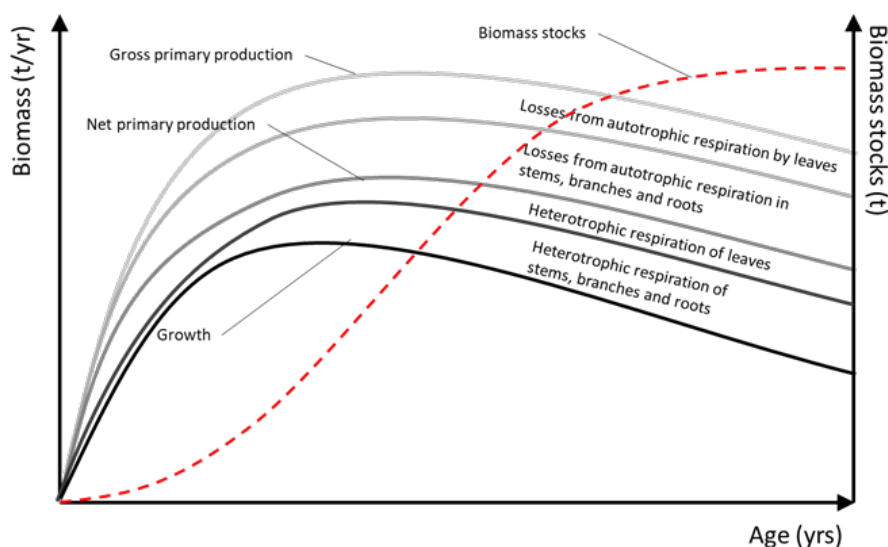


Figur 1.2. De danske skoves kulstofpuljer [4] Søjlerne udtrykker de totale puljer (venstre akse), mens linjerne udtrykker gennemsnit per hektar (højre akse). Forøgelsen af skovenes kulstofpuljer skyldes dels en forøgelse af skovens biomasse som følge af træernes vækst og dels et større skovareal som indvirker direkte på kulstoflagret i mineraljorden.

betydende til skovens kulstofregnskab, da der hverken optages eller udledes fra denne pulje (Figur 1.2). Størstedelen af skovens resterende kulstofpulje findes i de levende, over- og underjordiske kulstofpuljer. Denne pulje påvirkes naturligt af træernes vækst, hugsten af træ i skovene og af træernes naturlige dødelighed. Ifølge de seneste opgørelser [4] indeholder de danske skove samlet godt 160 mio. tons kulstof. Heraf findes 45 mio. tons kulstof svarende til 165 mio. tons CO₂ i den levende biomasse.

1.2 En skovbevoksnings kulstofdynamik

Set over en skovbevoksnings liv er optaget af kulstof typisk lavt i etableringsfasen, fordi træerne endnu ikke har opbygget det fulde produktionsapparat i form af nåle og blade, der kan optage CO₂ fra luften, og i form af rødder der kan trække vand og næringsstoffer fra jordbunden (Figur 1.3). Den årlige tilvækst tager efterfølgende



Figur 1.3. Skematiseret udvikling af kulstofoptaget i levende biomasse i en skovbevoksning.

alder afhængig af træart. Såkaldte pionérarter som lærk, birk og eg toppe i væksten tidligt (15-20 årsalderen), mens klimaksarter som bøg, kæmpegran og douglasgran toppe sent (40-60 årsalderen). Med stigende alder stiger den autotrofe respirations andel af primærproduktionen (altså træets egen omsætning af fotosynteseprodukterne) og forskellen mellem brutto-primærproduktionen og netto-primærproduktionen stiger. Ligeledes stiger den heterotrofe respiration (altså mikroorganismers nedbrydning af plantedele) dels af nåle-/bladmassen, som løbende udskiftes, men også i stigende grad af træer som udkonkurreres eller dør af alderdom og andre årsager. Efterhånden som den autotrofe og heterotrofe respiration stiger, falder netto-økoystemproduktionen mod 0 og den ophobede biomasse i økosystemet går mod et maksimum. Med lidt andre ord opnås en ligevægt, hvor opbygning af biomasse gennem fotosyntese og nedbrydning af svampe og mikroorganismer er lige stor. Dette forhold kaldes for Odums hypotese [5] og underbygges af danske studier [6].

1.3 Skovbevoksningens produktion af materialer og energi

Skovbevoksningens produktion af materialer og energi varierer over tid og er afhængig af træarten og det valgte dyrkningssystem. Hovedparten af skovene i Danmark er opstået ved plantning af træer i bevoksninger af samme art, selvom en del skove i dag forvaltes efter såkaldt naturnære principper, ofte i træartsblandinger med træer af forskellig alder, hvor den nye bevoksning typisk fremkommer ved det naturlige frøfald. Det skal således alene tages som et eksempel, når vi i det efterfølgende beskriver skovbevoksningens produktion af materialer og energi ud fra en plantning eller såning af træer på et areal uden ældre træer. Principperne i det valgte eksempel gælder dog for alle mulige skovdyrkningssystemer.

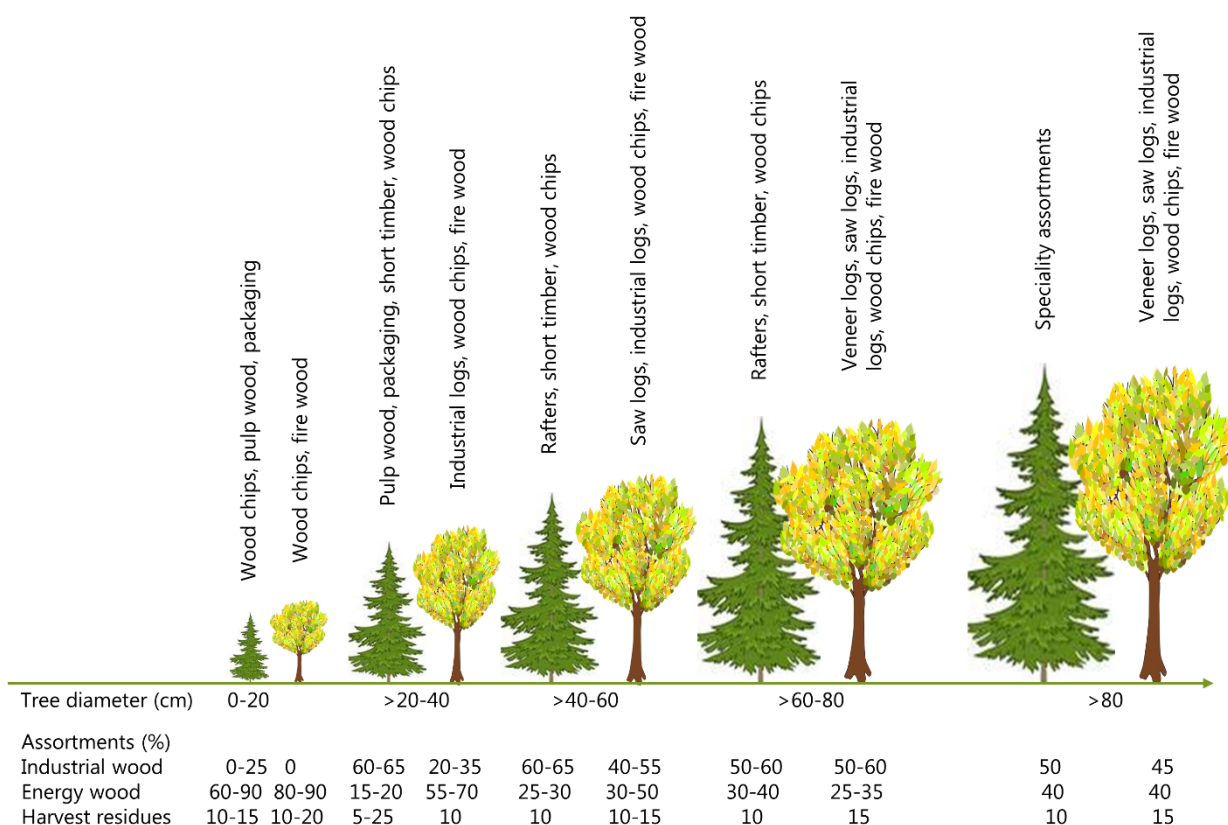
I forvaltede skove, etableret ved naturlig såning eller plantning, er antallet af planter typisk meget højere end antallet af træer i det endelige udbytte. Det høje plantetal medfører, at træernes krone-tag hurtigt sluttet og derved udnytter sollyset bedst muligt, samtidig med at konkurrerende vegetation undertrykkes. Det højere plantetal muliggør samtidig udvælgelse af de bedst formede individer under udtyndinger, og den gensidige skygge fra planterne forbedrer kvaliteten af det endelige udbytte.

Ved tidlige udtyndinger fjernes overskydende konkurrence, hvilket er vigtigt for den fremtidige udvikling af bevoksningen (Figur 1.3). På dette stadium er udtyndingstræerne typisk små og kan ikke på det nuværende marked anvendes som tømmer. Derudover fjernes i disse udtyndinger uønskede konkurrerende træarter, som almindeligvis ikke er egnet til tømmerproduktion. Dermed efterlades de fældede træer enten i bevoksningen, hvor de rådner bort, eller anvendes til bioenergi. Valget mellem at udnytte skovbiomassen fra tidlige udtyndinger afhænger af det lokale marked for bioenergi, træernes størrelse, da små træer kan være for dyre at få ud af bevoksningen, og adgangen til stedet.

I de senere udtyndinger opnår træet en størrelse, hvor det kan markedsføres og anvendes til fiberprodukter som papirmasse til papir, i den kemiske industri og til emballage (paller). Når træerne vokser sig større, anvendes en stigende andel af nåletræ til konstruktion og for løvtræsarter til mindre elementer i møbel- og gulvindustrien. Den mindste diameter af træet hvor produktion af tømmer er mulig, er typisk 15-20 cm. Dog fortsætter de mindre dele af træet i toppen og grenene med at blive brugt til fiber- og kemiprodukter og til bioenergi.

I de sene udtyndinger og ved den endelige afdrift, hvor træerne er blevet store, er andelen af tømmerstømmen stor - for nåletræsarter op til 90 pct. og for løvtræsarter 50-70 pct. For nåletræsarter bliver op til 70 pct. konstruktionstømmer, mens 45-50 pct. af de store træer for løvtræsarterne bliver til møbler eller gulvtræ. Resten bruges til fiberprodukter og bioenergi. Andelen af træ til

energi er normalt højere for løvtræ end for nåltræ, fordi grene og stammer ofte er mindre regelmæssige og derfor mindre egnede til opskæring. Når træerne vokser endnu større, kan en stigende del af træet blive beskadiget af insektangreb, svampe og stormfald, hvilket gør træet uegnet til konstruktionstømmer. Derudover skaber behovet for at rydde jorden før genplantning eller såning ofte et incitament til at udnytte toppe og grene til energi, hvilket øger andelen af bioenergi i sortimentsfordelingen. I nogle skandinaviske lande fjernes også rødder og stubbe i forbindelse med afdrift, men dette er ikke almindelig praksis i Danmark.

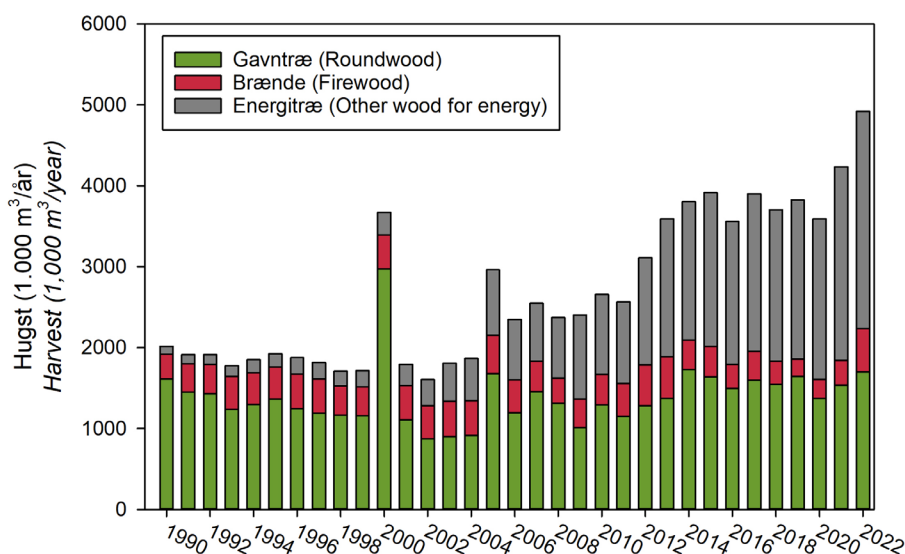


Figur 1.4. Produkter fra skovene for hhv. nåle- og løvtræer (fra [7]). I denne figur anvendes termen ”Industrial wood” om alt træ, der sendes videre til industriel forarbejdning. Dette omfatter konstruktionstræ, emballagetræ og cellulosestræ.

Generelt gælder det, at træ af højere kvalitet altid kan anvendes til mindre værdifulde formål, mens det modsatte almindeligvis ikke er muligt. For eksempel kan store stammer, der er velegnede til savet tømmer, anvendes til papirmasse og bioenergi, men små træer af dårlig kvalitet kan ikke anvendes til stort konstruktionstræ. Derfor betales der altid i markedet en præmie for at tiltrække

bedre kvaliteter af træ, hvilket gør de højere kvaliteter af træ dyrere end de ringere. Som et eksempel, baseret på dansk prisstatistik, opnår kvalitetstræ en nettopris, der er mere end fem gange højere end skovflis [8, 9].

I det nuværende marked for træ udgør træ til energiformål ikke desto mindre en stor del af det træ, der produceres fra danske skove. I Danmark udgjorde energitræet således 65 pct. af den samlede hugst i 2022 (Figur 1.5, [10]).



Figur 1.5. Hugst af træ i Danmark fordelt på sortimenter (Statistikbanken.dk/Skov6). Med "hugst" forstås her træ, der er rapporteret til Danmarks Statistik, som forventes at være de dele af træet, som er fjernet fra skoven og solgt. En del af den samlede hugst efterlades imidlertid i skoven fordi det ikke er teknisk muligt at få det ud, fordi det ikke har en tilstrækkelig høj pris, eller fordi det af andre årsager er ønskeligt at efterlade vedmassen i skoven, eksempelvis af biodiversitetshensyn. Gavntræ omfatter her alle andre anvendelser end energi som f.eks. cellulosetræ, emballage træ, spånpladetræ, savværkskævler og tømmer.

I en praktisk sammenhæng bestemmes skæbnen for et givet træstykke ikke kun af dets tekniske egenskaber, men også af f.eks. den individuelle tyndingsoperation i forhold til terræn, maskineri, den kollektive sortimentsfordeling og den aktuelle og lokale prisstruktur. Derfor er fordelingen mellem sortimenter i praksis flydende. Generelt er energitræ dog dårligt betalt, dyrt at udvinde og sjældent det egentlige mål for skovproduktion.

Biomasse til energi kan komme fra alle dele af skovrotationen, men afhænger af lokale betingelser, træarter, skovforvaltning, træstørrelse, trækvalitet og prisstruktur. Skovforvaltningen, inklusive valg af arter, afhænger i høj grad af vækstbetingelser, men også af lokale traditioner. Generelt øger bedre vækstbetingelser det økonomiske incitament til at investere i aktiv skovforvaltning, mens

dårligere vækstbetingelser favoriserer mindre intensive foranstaltninger. Derfor er aktiv skovforvaltning, herunder plantning med højt plantetal, pleje af skovbevoksningen, udtynding og undertiden endda korrigerende foranstaltninger som beskæring og opkvistning, dominerende i de tempererede regioner, inklusive Danmark og Centraleuropa. Derimod er forvaltningen i boreale zoner (f.eks. i Canada, det nordlige Sverige og i Norge) ofte baseret på plantning med lav tæthed eller helt afhængig af naturlig foryngelse, mindre intensiv pleje af skovbevoksningen og sjælden eller endog ingen udtynding under omdriften. Kombineret med forskellene i biomasseproduktion mellem de forskellige zoner, producerer dette meget forskellige sortimentsudfald.

1.3.1 Industrielle rester

Når træet kommer til savværket, bliver det først afbarket. Barken bruges almindeligvis til bioenergi og har i øjeblikket begrænset alternativ anvendelse, selvom der udvikles metoder til at udvinde tannin fra nåletræernes bark til brug som råmateriale i limprodukter anvendt i forskellige træprodukter og andre materielle anvendelser. Den resterende fiberfraktion kan bruges til at producere sukker til fermenteringsprodukter. Barkfraktionen af stammen udgør typisk 5-7 pct.

Efter afbarkning bliver stammerne skåret til kvadratiske eller rektangulære planker og brædder, hvilket resulterer i produktion af rester i form af kantskiver, savsmuld og spåner. Typisk er skæredbyttet 45-50 pct. af det samlede volumen for både nåletræ og løvtræ. Resterne er velegnede til produkter som spånplader og papirmasse, og en del af dette recirkuleres derfor til andre anvendelser, mens noget bruges til bioenergi. Mængden af genanvendte rester er ukendt. Dog er forbruget af trærester til produktion af spånplader i Danmark meget mindre end hvad der bliver produceret ved savskæringen af træ til planker og brædder, hvilket gør en stor del af denne ressource tilgængelig for bioenergi i den aktuelle markedssituation.

Træprodukterne bearbejdes yderligere i byggesektoren, møbelindustrien og andre steder, hvilket fører til en yderligere produktion af rester. Andelen af træ, der ender i det endelige produkt, er ukendt og meget afhængig af bearbejdningsindustrien. Det anslås, at 10 pct. af volumenet går tabt i den endelige bearbejdningsproces. Således vil man i en afsluttende hugst i rødgran, hvor anslået 70 pct. af vedmassen bliver til tømmer og med et skæredbytte på 45 pct. ende med 28 pct. af vedmassen i det endelige produkt. For en stor del af hugsten er andelen af træ, som ender i det endelige produkt lavere fordi træet er mindre eller af arter (løvtræ), hvor udnyttelsesgraden er mindre end i eksemplet her.

1.4 Eksempler på kulstoflagring, træprodukter og udledninger ved en række skovdyrkingsscenarier

Fordi forskellige træarter har forskellig livscyklus og leverer forskellige produkter med meget forskellige krav til eksempelvis kvalitet og dimension, dyrkes de forskelligt og har derfor også ofte meget forskellige profiler hvad angår optag af CO₂ i skoven og udledninger af CO₂ fra produktionen af energi og træprodukter. I det følgende har vi opstillet en række mulige scenarier for optag og udledninger af CO₂ for de mest almindelige træarter i Danmark: rødgran, bøg og eg, dyrket i klassiske, ensaldrende dyrkningssystemer.

1.4.1 Beregning af skovbevoksningens CO₂-optag

Fælles for de tre scenarier er at tilvækstoversigter er blevet opstillet i programmet Vidar [11], der ud fra et sæt dynamiske vækstmodeller beregner træernes vækst (Tabel 1.1). Der findes ikke som sådan en standard-forvaltning af de tre træarter idet den konkrete forvaltning altid er lokalitets- og situationsbestemt, men sandsynlige dyrkningssystemer er udviklet baseret på eksisterende tilvækstoversigter [12] og erfaring med praktisk skovforvaltning.

Vidar beregner ikke i sig selv CO₂-optag og -udledninger. I stedet er bevoksningens optag og udledninger beregnet ud fra tilvækstoversigtens stamtal, bevoksningsdiameter og -højde ved hjælp af et sæt nationale biomasseligninger [13] som også anvendes i den nationale skovstatistik [4, 14] og i de nationale emissionsberegninger [15]. De allometriske funktioner omsætter diameteren og højden af bevoksningens gennemsnitlige træ til stamme-, over- og underjordisk biomasse som ganget med bevoksningens stamtal, giver den samlede biomasse. Med et forventet kulstofindhold på 0,47 g C/g tør biomasse [16] og et forhold mellem CO₂ og kulstof på 44/12 kan biomassen omsættes til CO₂-ækvivalenter.

Fælles for beregningerne er, at der alene indgår kulstofpuljerne i levende biomasse (stamme og rødder) og at beregningerne således ikke medtager kulstofpuljer i dødt ved, litter og mineraljord (se Figur 1.2). Denne forsimpning er gjort i erkendelse af at mængden af dødt ved i klassisk skovdrift er lille, og at puljerne i litterlaget og mineraljorden kun ændres langsomt og i ret begrænset omfang. Herved forventes de tre puljer kun i mindre omfang at bidrage til bevoksningens samlede kulstofoptag. Ved hugst regner vi med, at rodbiomassen af de fældede træer overgår til mineraljordens kulstofpulje. Denne pulje antages på baggrund af en lang række studier af udviklingen i jordens kulstofpulje [17, 18] at være konstant, selvom hugst fører til en umiddelbar forøgelse af mineraljordens kulstofpulje, som over tid atter frigives ved forrådnelse af den underjordiske, døde biomasse. Denne forsimpning er nødvendig fordi omsætningshastigheden af den underjordiske døde vedmasse er ukendt.

Tabel 1.1. Eksempel på en tilvækstoversigt for rødgran. Hg er bevoksningshøjden, Dg er bevoksningsdiameteren, N er stamtallet, G er grundfladen og V er vedmassen.

T	Blivende bestand efter hugst					Tyndet bestand/hugst			
	H _g	D _g	N	G	V	D _g	N	G	V
[År]	[m]	[cm]	[/ha]	[m ² /ha]	[m ³ /ha]	[cm]	[/ha]	[m ² /ha]	[m ³ /ha]
16	5,7	7,9	3500	17,2	58,3	-	0	0,0	0,0
18	6,7	9,0	3456	21,9	85,7	-	0	0,0	0,0
20	7,9	10,0	3409	26,7	120,6	-	0	0,0	0,0
22	9,2	11,2	2570	25,2	132,0	9,9	786	6,1	30,3
24	10,5	12,2	2530	29,6	175,5	-	0	0,0	0,0
27	12,7	14,0	1703	26,2	185,3	12,5	762	9,3	62,7
30	14,6	15,8	1362	26,9	216,3	14,4	299	4,9	38,1
33	16,3	17,7	1115	27,5	244,9	16,3	213	4,4	38,4
37	18,2	20,2	885	28,3	279,1	18,7	194	5,3	51,0
41	19,9	22,6	722	29,1	309,3	21,2	135	4,8	49,5
45	21,2	25,1	603	29,9	336,0	23,8	97	4,3	47,7
50	22,7	28,2	495	30,9	365,5	27,0	86	4,9	57,0
56	24,1	31,9	403	32,2	396,3	30,9	70	5,3	64,4
62	25,3	35,5	337	33,4	422,9	34,9	50	4,8	60,2
69	26,4	39,7	281	34,8	449,6	39,6	41	5,0	65,0
70	26,6	40,4	279	35,7	462,0		0	0,0	0,0

1.4.2 Sortimentsforhold

I beregningerne er der anvendt sortimentsudfald fra et studie af sortimentsudfaldet i Naturstyrelsens skove [19]. Grundlaget for sortimentsfordelingerne er hugst- og salgsdata opsamlet i Naturstyrelsens databaser Planmas, Flismas og Saba. Sortimentsfordelingerne er alene baseret på den aflagte¹ og solgte hugst, opgjort i kubikmeter fastmasse. Ikke udnyttet vedmasse (eksempelvis grene, toppe, glemte effekter og råddent eller skadet træ) må der således tages højde for ved brugen af sortimentsudfaldene. I beregningerne har vi har skønnet andelen af træet, der efter hugst bliver efterladt i bevoksningen afhængig af hugstdiameter (Appendiks 6.5). Sortimentsfordelingerne udtrykker vækstforhold, dyrknings- og aflægningspraksis i Naturstyrelsens skove og er derfor ikke nødvendigvis repræsentative for alle skove.

¹ Ved aflagt vedmasse forstås den mængde træ, der er blevet fældet og ligger klar til brug til produktion af trævarer, brændsel eller andre formål.

1.4.3 Procesudledninger

Skovforvaltningen medfører en række procesudledninger forbundet med kulturetablering, tynding og hugst. Procesudledningerne i dette studie baserer sig generelt på internationale studier, da der ikke findes danske studier om emnet. Vi har alene medtaget udledninger af CO₂, selvom udledninger af andre drivhusgasser (metan og lattergas) lokalt kan være betydelige. Vi har endvidere alene medtaget udledninger, der er direkte associerede med aktiviteten. Således er der ikke medtaget indirekte udledninger fra produktionen af eksempelvis materiel (skovningsmaskiner, mv.).

Kulturetablering

Kulturetableringen består typisk af en jordbearbejdning, plantning og kulturpleje. Jordbearbejdningen er på baggrund af svenske og finske opgørelser fundet til at udlede 85 kg CO₂/ha (Tabel 1.2, [20]). Til produktionen af småplanter i planteskolerne medgår en stor mængde forskellige processer og materialer, og i de studier vi fandt om emnet, var der store forskelle i udledningerne mellem forskellige producenter (47-133 kg CO₂/1.000 planter [21]). Forskellene skyldtes hovedsageligt forskelle i energiforsyningen og opvarmningsbehovet mellem de forskellige producenter. Da vi regner med at en stor del af energiforsyningen vil være biobrændsler og vindmøllestrøm, valgte vi at anvende et tal i den lavere ende af spektret på 50 kg CO₂/1.000 planter

Hugst

Procesudledninger fra hugsten af træbiomasse omfatter udledninger fra fældning, udkørsel, eventuel flishugning og transport af træ til savværker og kraft-/varmeværker. På baggrund af et meget stort materiale fra Sverige [20] beregnede vi CO₂-udledningerne forbundet med maskinel tynding og hugst samt ved udkørsel ud fra maskineffektiviteten (målt i vedmasse per time) og dieselforbruget (målt i liter per time). Vi antog i beregningen en udledning på 3.126 g CO₂/kg brændsel [20] og en rumtæthed af diesel på 0,85 kg/l. For lastbiltransport af træ regnede vi med et forbrug på 0,021 l diesel/m³/km. Baseret på erfaringer med lignende regnestykker antog vi en gennemsnitlig transportafstand for dansk produceret træ på 50 km og en emissionsfaktor på 2.836 g CO₂/kg brændsel.

Brændstofforbruget forbundet med flishugning blev fastsat til 1,85 l diesel per ton. I lighed med beregningerne ovenfor antog vi desuden en udledning på 3.126 g CO₂/kg brændsel [20] og en rumtæthed af diesel på 0,85 kg/l.

Tabel 1.2. CO₂-udledninger ved aktiviteter i skoven.

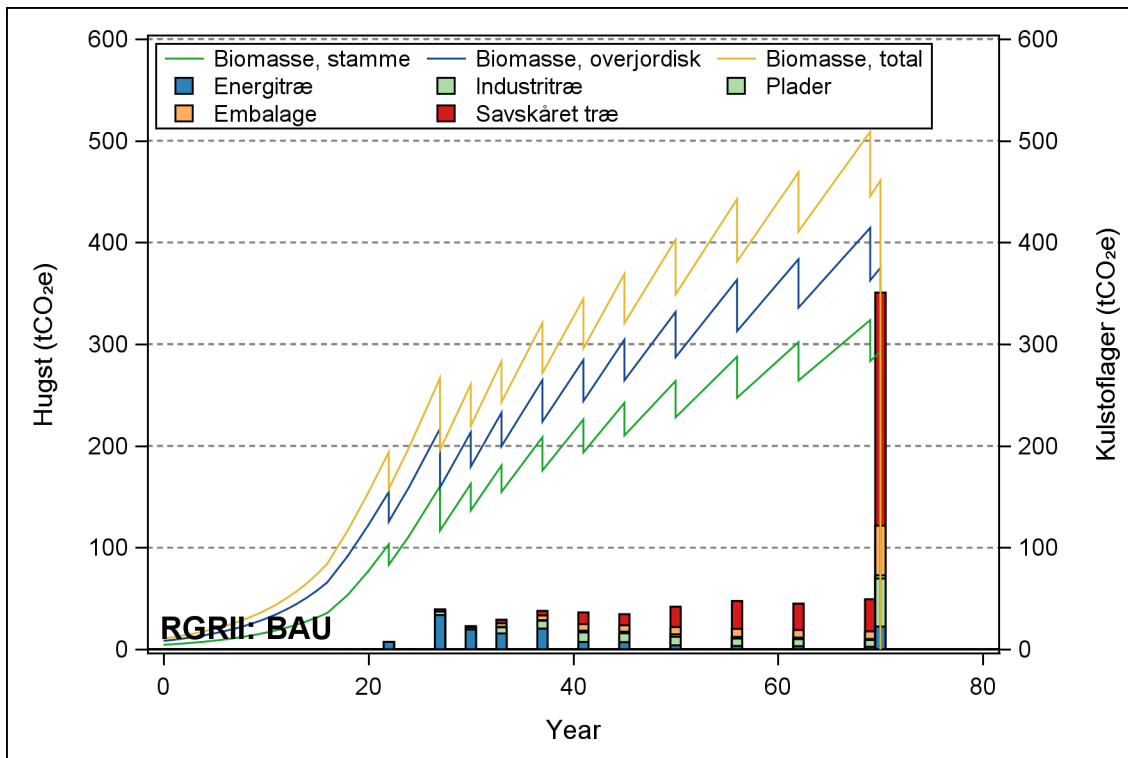
Aktivitet	Udledninger		Reference
	g/ha	g/m ³	
Jordbearbejdning	85.460		[20]
Plantning	163.265		[21]
Kulturpleje	3.004		[20]
Hugst/tynding		4.639	[20]
Hugst/renafdrift		3.177	[20]
Udkørsel/tynding		2.657	[20]
Udkørsel/renafdrift		2.749	[20]
Flishugning		4.178	[22]
Transport (lastbil)		2.531	[20]

1.4.4 Rødgran

Tilvækstoversigten for rødgran blev baseret på en middelgod bonitet (bonitet II efter Møller [23]) med en forventet omdriftsalder på 70 år. Det forventede start-plantetal var på 3.500 per ha. Desuden blev der fastsat en målgrundflade² på 24 m²/ha ved alder 16 år stigende mod 35 m²/ha ved alder 70 år. Herved blev der opnået en bevoksningsdiameter på 40 cm ved alder 70 år.

Igennem hele bevoksningens liv er der en opbygning af kulstof der toppe på afdriftstidspunktet med godt 400 tCO₂e bundet i træernes stamme, grene og rødder (Figur 1.6). Samlet i bevoksningens liv optager rødgranbevoksningen 767 tCO₂e/ha svarende til 11,0 tCO₂e/ha/år.

² Ved grundflade forstås summen af træstammernes tværsnitareal målt i 1,3 m's højde over jorden som udtrykkes i antallet af kvadratmeter grundflade per ha.



Figur 1.6. Kulstofpuljernes udvikling og hugstens fordeling i en rødgranbevoksning med en omdriftsalder på 70 år. Hugsten omfatter alene overjordisk biomasse mens kulstoflagret er vist for stammer, overjordisk biomasse og for hele træ-biomasen inklusive rødder. Vertikale "hak" i kurven udgør kulstofpuljen i hugsten af træbiomasse. Rodbiomassen for fældede træer overgår til skovjordens kulstofpulje ved hugst og udgår således af diagrammet.

Af den samlede overjordiske vedmasse forventes 48 pct. aflagt som tømmer, mens hhv. 15 og 14 pct. forventes aflagt som industrietræ (eksempelvis til papirmasse) og emballage (eksempelvis pal-ler) (Tabel 1.3). De tre kategorier udgør til sammen "gavntræ" som angivet i Figur 1.5. Procesud-ledningerne udgør omkring 1,5 pct. af mængden af CO₂ indeholdt i den samlede overjordiske ved-masse produceret over omdriften.

Tabel 1.3. Udviklingen i kulstoflager og hugst af overjordisk træbiomasse i en rødgranbevoksning med en om-drift på 70 år. Hugsten er fordelt til forskellige produkter.

Alder	Før hugst Diameter	Hugst								
		Biomasse	Biomasse	Energi	Industri	Emballage	Tømmer	Produkt- lager*	Proces-udled- ninger	
År	cm	tCO ₂ eq/ha								
0		6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
5		12,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10		24,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	7,9	53,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	9,0	75,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	10,0	103,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	10,9	133,2	25,7	25,6	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,4
24	12,2	139,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	13,6	193,2	50,6	44,7	3,5	1,5	1,0	4,2	4,2	0,8
30	15,6	192,2	29,6	26,1	2,0	0,9	0,6	2,5	2,5	0,5
33	17,5	210,9	29,4	15,6	6,0	3,6	4,1	8,9	8,9	0,5
37	19,9	241,2	38,5	20,4	7,9	4,8	5,4	11,7	11,7	0,6
41	22,4	260,0	36,8	7,1	9,5	6,6	13,6	17,7	17,7	0,5
45	25,0	278,4	35,1	6,7	9,0	6,3	13,0	16,8	16,8	0,5
50	28,0	303,2	41,9	3,7	8,6	7,3	22,2	21,1	21,1	0,6
56	31,7	331,6	46,6	3,1	7,5	8,1	27,9	22,9	22,9	0,7
62	35,4	349,3	43,9	2,9	7,0	7,7	26,3	21,6	21,6	0,6
69	39,7	376,3	47,8	2,4	6,7	7,6	31,1	23,5	23,5	0,7
70	40,4	340,5	340,5	21,5	47,6	49,2	222,2	143,6	143,6	4,7

* Beskriver input til produktlagret og omfatter de forskellige sortimenter fraregnet træ, der anvendes direkte til energi og fraskær, der anvendes til energi i forbindelse med opskæringen af rundtræ til firkantede elementer.

1.4.5 Bøg

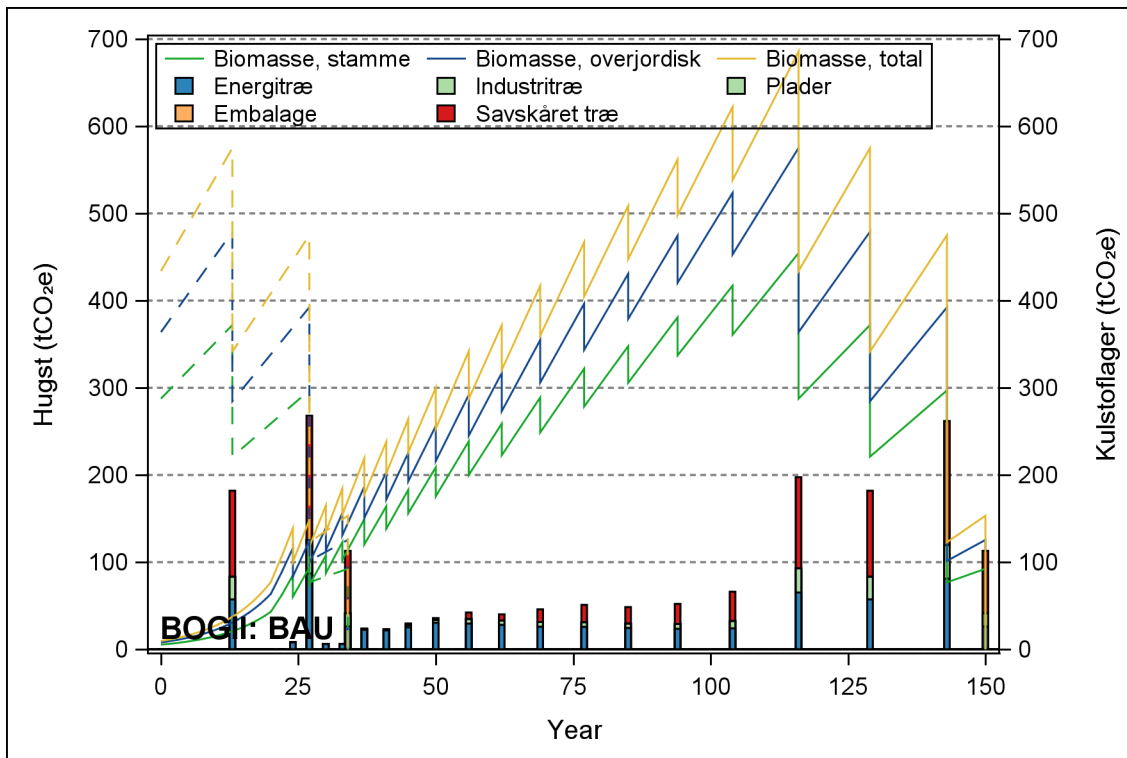
Tilvækstoversigten for bøg blev baseret på en middelhøjt bonitet (bonitet II efter Møller [15]) og antagelsen om en klassisk driftsform, hvor bøgen forynges naturligt under en skærm af de gamle bøgetræer. Foryngelsen påbegyndes omkring en alder på 115 år og de sidste af de gamle træer forventes afdrejet ved alder 150 år. Der blev fastsat en målgrundflade på 13 m²/ha ved alder 18 år stigende mod 26 m²/ha ved alder 100 år. Herved blev der opnået en bevoksningsdiameter³ på 49 cm ved alder 104 år og de sidste træer afdrives ved en bevoksningsdiameter på 67 cm.

³ Bevoksningsdiameteren er her angivet som den grundfladevægtede middeldiameter. Grundfladevægtet middeldiameter er et mål, der bruges i skovbrug til at beregne en repræsentativ diameter for en bevoksning. Denne diameter vægter hvert træ ud fra dets grundfladeareal, som er et mål for trækroneens tværsnitsareal i brysthøjde (1,3 meter over jorden).

Lageret af kulstof i bevoksningen topper omkring tidspunktet, hvor foryngelsen påbegyndes med en skærmstilling⁴ ved alder 116 år med et samlet lager på næsten 600 tCO₂e bundet i træernes stamme, grene og rødder (Figur 1.7). Samlet i bevoksningens liv optager bøgetræerne 1311 tCO₂e/ha svarende til 8,7 tCO₂eq/ha/år. Imidlertid gentages rotationen i det beskrevne system ikke med 150 års mellemrum, men forynges ved alder 116 år, hvorefter der er et overlap mellem generationer, således, at der i de første ca. 34 år af omdriften er to "bevoksninger" på arealet: den nye bevoksning og de gamle overstandere, der gradvis fjernes ved hugst. Således bliver den samlede tilvækst faktisk opnået på 116 år eller svarende til et gennemsnitligt optag på 11,3 tCO₂eq/ha/år. Selvom optaget her er sammenligneligt med eksemplet for rødgran, kan tallene ikke sammenlignes, fordi angivelsen af bonitet ikke kan sammenlignes direkte. Med andre ord kan en vækstlokalitet som giver en høj tilvækst for rødgran være mindre god for bøg.

I denne beregning er der ikke taget højde for, at den nye bevoksning har en mindre tilvækst end tilvækstoversigten tilsiger, fordi de nye træer i nogen grad skygges af de tilbageværende overstandere og derfor forventes at have en mindre tilvækst. Beregningen skal altså alene ses som et eksempel på et skovdyrkningsystem med vedvarende kronedække.

⁴ Ved skærmstilling forstås hugst af træer med henblik på at tillade lys at komme ned til skovbunden for at tillade foryngelse af skovbevoksningen ved plantning eller fremspiring af planter efter naturligt frøfald. Skærmens tæthed angiver hvor meget lys der slippes igennem kronetaget og afhænger i reglen af træart og bevoksningsudvikling i foryngelsen.



Figur 1.7. Kulstofpuljernes udvikling og hugstens størrelse i en bøgebevoksning med en omdriftsalder på 150 år. Hugsten omfatter alene overjordisk biomasse mens kulstoflagret er vist for stammer, overjordisk biomasse og for hele træ-biomassen inklusive rødder. Vertikale fald på kurven udgør kulstofpuljen i hugsten af træbiomasse. Rodbiomassen for fældede træer overgår til skovjordens kulstofpulje ved hugst og udgår således af diagrammet.

Af den samlede vedmasse forventes 41 pct. aflagt som tømmer (kævler), mens hhv. 12 og 47 pct. forventes aflagt som industritræ (eksempelvis til papirmasse) og energitræ (Tabel 1.4). Procesudledningerne udgør omkring 1,4 pct. af mængden af CO₂ indeholdt i den samlede overjordiske vedmasse produceret over omdriften.

Tabel 1.4. Udviklingen i kulstoflager og hugst af overjordisk træbiomasse i en bøgebevoksning med en 150-årig omdrift, hvor der findes overlappende generationer fra alder 116 markeret med gråt. Hugsten er fordelt til forskellige produkter.

Alder År	Før hugst Diameter cm	Hugst							
		Biomasse	Biomasse	Energi	Industri	Emballage	Tømmer	Produkt- lager	Proces-udled- ninger
		tCO ₂ eq/ha							
0		6,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5		11,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10		19,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	5,3	32,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	5,3	55,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	6,0	77,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	6,6	103,1	29,5	29,0	0,4	0,0	0,1	0,4	0,5
27	8,0	111,8	22,4	22,0	0,3	0,0	0,1	0,3	0,4
30	9,3	126,0	23,1	22,7	0,3	0,0	0,1	0,3	0,4
33	10,7	142,2	23,3	22,9	0,3	0,0	0,1	0,3	0,4
37	12,5	170,9	31,6	29,8	1,3	0,0	0,5	1,4	0,5
41	14,3	186,8	30,6	28,9	1,2	0,0	0,5	1,3	0,5
45	16,3	207,7	30,1	25,4	2,6	0,0	2,1	3,3	0,4
50	18,6	236,3	36,5	30,8	3,2	0,0	2,5	4,0	0,5
56	21,4	269,5	42,4	29,2	5,3	0,0	7,9	8,4	0,6
62	24,2	292,6	40,3	27,7	5,1	0,0	7,5	7,9	0,6
69	27,5	327,2	45,7	25,7	5,6	0,0	14,4	11,5	0,6
77	31,2	365,2	50,3	25,5	5,3	0,0	19,4	13,5	0,7
85	35,0	395,9	47,7	24,2	5,0	0,0	18,4	12,8	0,6
94	39,1	435,2	51,1	23,2	5,7	0,0	22,2	15,1	0,7
104	43,7	479,0	64,7	23,8	8,4	0,0	32,5	22,2	0,9
116	49,2	524,5	192,8	64,4	28,0	0,0	100,4	70,3	2,6
129	56,5	434,1	176,2	55,9	26,1	0,0	94,2	65,9	2,4
143	66,2	352,3	261,2	80,8	38,4	0,0	142,1	98,5	3,8
150	67,0	111,7	111,7	26,0	14,8	0,0	70,9	45,2	1,6

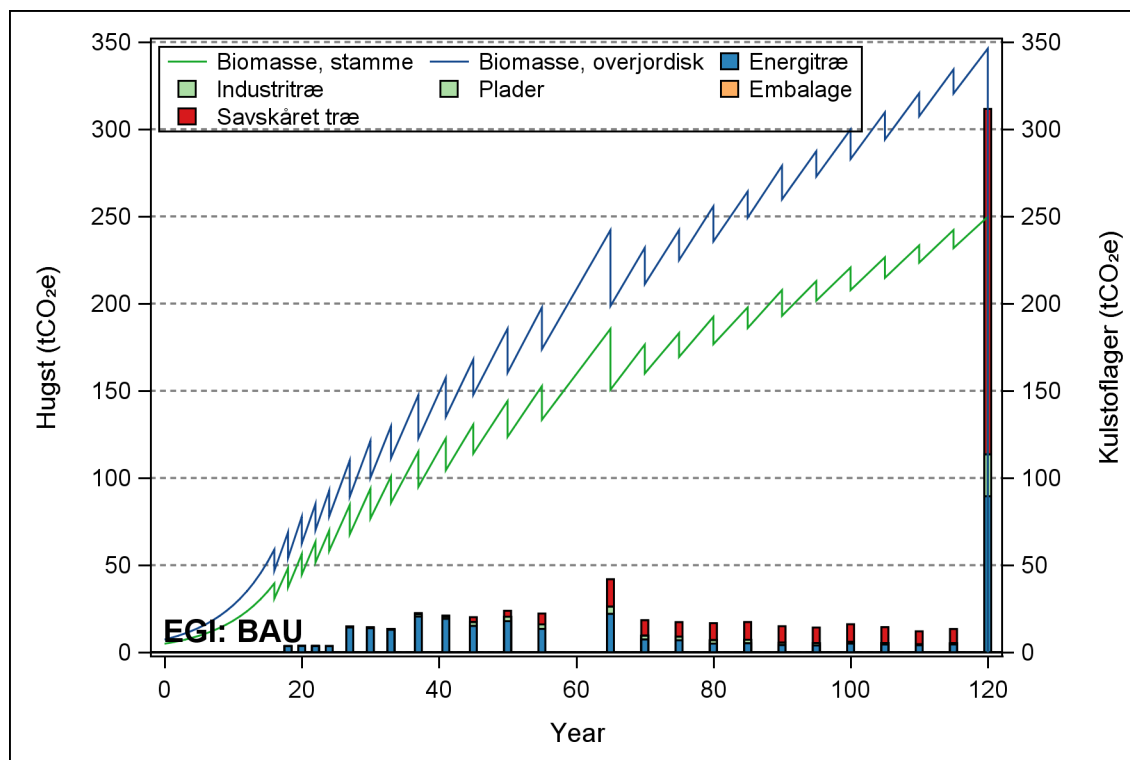
1.4.6 Eg

Tilvækstoversigten for eg blev baseret på en god bonitet (bonitet I efter Jensen and Jensen [24]) dyrket efter samme principper som den intensive drift der praktiseres på Bregentved Skovdistrikt og med en forventet omdriftsalder på 120 år. Valget af bonitet skyldes dels at tilvækstoversigten kun indeholder én bonitet og dels, at egedyrkning med produktionsformål ofte reserveres til de bedste jorde.

Det forventede start-plantetal var på 5.800 per ha. Desuden blev der fastsat en målgrundflade på 10 m²/ha ved alder 16 år stigende mod 19 m²/ha ved alder 120 år. Herved blev der opnået en bevoksningsdiameter på 69 cm ved alder 120 år.

Igennem hele bevoksningens liv er der en opbygning af kulstof, der toppe på afdriftstidspunktet med godt 300 tCO₂e bundet i træernes stamme og grene (Figur 1.8). Samlet i bevoksningens liv

optager egebevoksningen 722 tCO₂e/ha svarende til 6,0 tCO₂eq/ha/år. Optaget er herved betydeligt lavere end for både bøg og rødgran. Selvom boniteter ikke kan sammenlignes direkte, er det alligevel tydeligt at eg generelt har et mindre kulstofoptag end de to andre arter.



Figur 1.8. Kulstofpuljernes udvikling og hugstens størrelse i en egebevoksning med en omdriftsalder på 120 år. Hugsten omfatter alene overjordisk biomasse mens kulstoflagret er vist for stammer og overjordisk biomasse. Vertikale “hak” i kurven udgør kulstofpuljen hugsten af træbiomasse. Der er ikke gengivet en kurve for den totale over- og underjordiske biomasse fordi, der ikke for danske forhold er udviklet biomassefunktioner til estimering af den underjordiske biomasse.

Af den samlede vedmasse forventes 43 pct. aflagt som tømmer (kævler) mens hhv. 7 og 50 pct. forventes aflagt som industritræ og energitræ (Tabel 1.5). Procesudledningerne udgør omkring 1,6 pct. af mængden af CO₂ indeholdt i den samlede producerede vedmasse.

Tabel 1.5. Udviklingen i kulstoflager og hugst af overjordisk træbiomasse i en egebevoksning med en 120-årig omdrift. Hugsten er fordelt til forskellige produkter.

Alder År	Før hugst Diameter cm	Hugst							
		Biomasse	Biomasse	Energi	Industri	Emballage	Tømmer	Produkt- lager	Proces-udled- ninger
		tCO ₂ eq/ha							
0		6,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
5		12,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
10		23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
15	5,3	44,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
16	5,3	50,8	10,3	10,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
18	6,4	60,3	12,8	12,6	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
20	7,7	68,8	13,2	13,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
22	9,0	76,1	13,2	13,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
24	10,4	83,2	13,0	12,9	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
27	12,2	99,4	19,4	18,7	0,6	0,0	0,1	0,6	0,3
30	14,4	109,7	18,8	18,1	0,5	0,0	0,1	0,5	0,3
33	16,5	117,5	17,6	17,0	0,5	0,0	0,1	0,5	0,3
37	19,1	134,0	22,5	20,5	1,3	0,0	0,7	1,5	0,3
41	21,9	142,9	21,1	19,1	1,2	0,0	0,7	1,4	0,3
45	24,7	152,3	19,9	14,7	2,2	0,0	2,9	3,3	0,3
50	27,9	168,2	23,5	17,4	2,6	0,0	3,5	3,9	0,3
55	31,3	178,9	21,8	13,1	2,6	0,0	6,1	5,1	0,3
65	36,8	218,4	40,7	21,4	4,2	0,0	15,1	10,6	0,6
70	40,8	208,7	17,9	7,2	2,2	0,0	8,5	5,8	0,2
75	43,9	217,4	16,7	6,7	2,0	0,0	8,0	5,4	0,2
80	47,0	229,2	16,1	4,9	1,9	0,0	9,3	5,9	0,2
85	49,9	236,4	16,7	5,0	2,0	0,0	9,7	6,2	0,2
90	52,9	249,1	14,4	4,0	1,3	0,0	9,0	5,3	0,2
95	55,7	256,1	13,6	3,8	1,3	0,0	8,6	5,0	0,2
100	67,0	266,7	15,4	4,8	1,0	0,0	9,6	5,2	0,2
105	68,0	274,8	13,7	4,3	0,9	0,0	8,6	4,6	0,2
110	69,0	284,1	11,5	3,9	0,6	0,0	7,0	3,7	0,2
115	70,0	295,6	12,7	4,3	0,7	0,0	7,7	4,1	0,2
120	71,0	305,8	305,8	87,8	23,6	0,0	194,4	108,7	4,5

1.4.7 Andre træarter og dyrkningssystemer

De skitserede udviklinger for rødgran, bøg og eg er selvsagt simple, om end klassiske, repræsentanter for den enorme variation i mulige dyrkningsforhold, træarter og dyrkningssystemer, som findes i Danmark.

De valgte scenarier repræsenterer middelgode til gode dyrkningsforhold, som man vil kunne finde i det østlige Danmark fra omkring is-standsningens linje fra den seneste istid og østpå. Her er træartsvalget rimeligt frit og de fleste arter vil klare sig godt, om end nåletræsarterne klarer sig mindre godt på de lerede jorde i de allerøstligste og sydligste dele af landet. Længere vestpå er dyrkningsforholdene generelt ringere end i de viste eksempler. Mere sandede jorde, typisk med et lavere

næringsstofindhold og en ringere vandholdende evne gør, at tilvæksten her typisk vil være mindre, og at særligt løvtræerne vil klare sig dårligere.

Fælles for de tre viste scenarier er, at de kun indeholder én art, hvor alle træerne er af samme alder, idet der dog for den viste bøgedyrkning i en periode er to aldre på arealet – foryngelsen og såkaldte overstandere fra den tidligere bevoksning. På denne vis repræsenterer scenarierne den typiske nuværende skovdyrkning i Danmark, hvor omkring 75 pct. af skovarealet dyrkes som ensaldrende bevoksninger. Imidlertid bliver en stigende andel af Danmarks skovareal forvaltet med flere træarter på samme areal og i visse tilfælde også i uensaldrende strukturer [4]. Denne udvikling skal ses i lyset af, at statsskovene og en række private skovejendomme har omstillet driften til naturnær skovdrift, som hviler på en række centrale principper:

1. Bevarelse af den naturlige skovstruktur. Dette inkluderer opretholdelsen af en variation af træarter og aldre, hvilket hjælper med at efterligne mangfoldigheden i naturlige skovøkosystemer.
2. Vedvarende kronedække. Et nøgleprincip i naturnært skovbrug er at undgå renafdrift, hvor alle træer i en bevoksning fældes før efterfølgende såning eller plantning.
3. Understøttelse af naturlige processer som eksempelvis foryngelse ved naturligt frøfald og naturlig udtynding af foryngelse.
4. Tilpasning til lokale vækstforhold. Den naturnære skovdrift lægger vægt på at tilpasse praksis til lokale økologiske forhold og skovens naturlige dynamikker.

Denne tilgang til skovforvaltning søger at imødekommer bredere miljømål som eksempelvis sikring af træressourcer, bevarelse af biodiversitet og modstandsdygtighed over for klimaændringer.

Når de scenarier for skovenes CO₂-optag, der er medtaget i denne rapport, ikke inkluderer eksempler på naturnær skovdrift er det fordi der for nuværende ikke er videnskabelig empiri og modeller, der understøtter beskrivelsen af tilvækst og hugst i naturnært forvaltede skove (Figur 1.9). Selvom, der som grundlag for forvaltningen af naturnært dyrkede skove er beskrevet en række skovudviklingstyper med forskellige blandinger af træarter og forvaltningsformer [25], er der ikke udviklet redskaber, der med tilstrækkelig præcision kan beskrive den forventede udvikling af disse type-skove. Der findes dog en række værktøjer på europæisk plan [26] der kan håndtere uensaldrende bland-skove, men som har vist sig uegnede til at beskrive vækstforholdene i Danmark [27].



Figur 1.9. Skovbrugets nuværende tilvækstmodeller er lavet til at beskrive tilvæksten i ensaldrende og ensartede skove (billede 1 og 2 fra venstre) og derfor mindre egnede til brug i naturnært dyrkede skove med flere træarter af forskellige aldre (billede 3 fra venstre).

2 Danske skovressourcer

Sammen med landbruget spiller skovene en væsentlig rolle i den grønne omstilling af samfundet ved at levere biogene materialer til eksempelvis husbyggeri og møbler samt biomasse til energi. Imidlertid leverer skovene samtidig en lang række andre samfundsnyttige funktioner i form af eksempelvis beskyttelse af levesteder for dyr og planter, beskyttelse af grund- og overfladevand mod eutrofiering og som udflugtsmål for befolkningen. De mange forskellige funktioner medfører, at der er mange forskellige ønsker til skovenes udstrækning og udformning. Hvordan de forskelligartede ønsker prioriteres i fremtidens skove og i deres forvaltning har afgørende betydning for deres udbud af træ til samfundet.

Med dagens marked for energi og træprodukter og med det nuværende teknologiske stade bliver en stor del af træressourcen brugt til energi. Et fremtidigt bioaseret samfund, som vil bygge på begrænsede biogene ressourcer, har næppe råd til at en stor del af træet ikke indgår som materialer. I hvilken grad vi er i stand til at bruge træressourcen konstruktivt, vil have stor betydning for skovenes klimaeffekt.

Samlet set er der som grundlag for en grøn omstilling mod et biobaseret samfund, og som del af diskussionen om hvordan fremtidens skove skal udformes og anvendes, et behov for et konsolideret vidensgrundlag om hvordan forskellige scenarier for arealanvendelsen påvirker udbuddet af træ. Samtidig er der behov for at analysere, hvordan ændret brug af træet kan understøtte omstillingen af byggeriet mod et mindre klimaftryk og en grøn omstilling.

2.1 Tidligere fremskrivninger af skovressourcen

Gennem årtier er der blevet udarbejdet forskellige prognoser vedrørende det fremtidige udbud af træ og træbrændsler i Danmark [28-33]. Fælles for dem alle er, at de var baseret på Markov-kædemodeller [34]. Markov-kædemodeller anvender overgangs- og konverteringssandsynligheder, der beskriver sandsynligheden for, at en bestand bevæger sig fra en tilstand (f.eks. aldersklasse eller artssammensætning) til en anden over en given periode. Sandsynligheden for, at skovbevoksninger af en given alder og art overføres til den efterfølgende aldersklasse efter en given periode, kaldes overgangssandsynligheden, mens nettostrømmen til eller fra artsklasserne kaldes konverteringssandsynligheden.

Tidlige fremskrivninger [31, 32] var baseret på den observerede arts- og aldersklassesammensætning fra spørgeskemaundersøgelser udført af Danmarks Statistik. I disse undersøgelser blev 10-årige overgangssandsynligheder afledt af ændringerne i arts- og aldersklassefordelinger observeret i på hinanden følgende undersøgelser. I senere fremskrivningsmodeller blev overgangs-

sandsynlighederne modelleret ud fra overgangene mellem aldersklasser observeret på de permanente prøveflader i Danmarks Skovstatistik (NFI) [4, 14, 33, 35, 36]. I den nyeste fremskrivning af skovens kulstofemissioner blev overlevelsessandsynlighedsmodellen estimeret ud fra data indsamlet mellem 2002-2020 [37]. Modellen inkluderede desuden eksplicit modellering af skovrejsning og ændringer i skovforvaltningen som følge af udlægning af områder til biodiversitetsbeskyttelse.

Data fra Danmarks Skovstatistik er betydeligt mere detaljerede end data fra de tidligere skovtællinger baseret på spørgeskemaer og afspejler i højere grad skovens faktiske tilstand og udvikling. Den større detaljerighed og den mere indgående viden om skovenes faktiske forvaltning har medført en række udfordringer for modelleringen af skovenes udvikling ved brug af Markov-kædemodeller:

- 1) Ifølge NFI-data forvaltes en stor del af skoven efter andre principper end det renafdriftssystem, der er foreskrevet i Markov-kæderne, hvor hovedskovede arealer altid overføres til den første aldersklasse i systemet. Selvom Markov-kæderne i princippet kunne bygges til at repræsentere overførsler til andre aldersklasser, øges modellens kompleksitet herved dramatisk.
- 2) For at være operationel repræsenteres hver bevoksning i Markov-kædemodellen af én dominerende art med én bestandsalder. Imidlertid viser tal fra Danmarks Skovstatistik en stor del af skovarealet indeholder blandinger af træarter ofte med forskellige aldre. Disse skove er ikke repræsenteret særligt godt af den arts- og aldersklassespecifikke model.
- 3) Overgangssandsynlighederne er traditionelt blevet modelleret ved hjælp af forskellige former for logistiske modeller med en log-lineær kombination af parametre. Tilsyneladende afviger de faktiske mønstre på bestandsniveau fra modellen med en form, der er svær at gengive. Desuden er overgange på bestandsniveau sjældne hændelser, og de tilgængelige data er utilstrækkelige til at fange systemets faktiske adfærd.
- 4) Alderen, der bruges i modellerne til at bestemme hugstsandsynligheden, er ikke det primære hugstkriterium, som snarere bestemmes af træets størrelse, der er tættere relateret til de resulterende skovprodukter.

Sammenfattende er den tidligere bevoksningbaserede tilgang til fremskrivning af skovenes ressourcer og deres udvikling blevet stadig mere utilstrækkelig på grund af ændringer i nutidig skovforvaltning og skovstruktur. For at afhjælpe de nuværende problemer med Markov-kædemodeller baseret på bevoksningssalder og artsklasser er der opstået et behov for et skift i modelleringstilgangen mod fremskrivninger baseret på individuelle træer og dermed vækst- og overgangssandsynligheder relateret til det enkelte træ snarere end en hel bevoksning. Da de oprindelige modeller

blev udviklet, var denne tilgang ikke mulig, da der endnu ikke eksisterede en model, der kunne lave sådanne individuelle træfremskrivninger på nationalt plan, og langsigtede data med tilstrækkelig opløsning ikke var tilgængelige.

I forbindelse med Klimafremskrivning 2024 [38, 39] blev der gennemført en analyse af eksisterende skov-fremskrivningsmodeller hvori der indgik en række kriterier for at identificere en passende platform til de danske kulstoffremskrivninger for skov, herunder at den valgte model skulle:

- 1) være blevet succesfuldt testet under europæiske forhold og initialiseret ved hjælp af data fra mere end ét land.
- 2) være frit tilgængelig. Dette udelukkede proprietære modeller designet til landespecifikke forhold eller datakilder, da de sandsynligvis ville kræve yderligere indsats at implementere.
- 3) være i stand til at fremskrive skovudviklingen under forskellige forvaltningsscenarier, hvilket muliggør overvejelser om planlagte forvaltningsændringer i statsskovene.
- 4) kunne håndtere blandede bevoksninger og udviklingen i skov udlagt til biodiversitetsformål, herunder til urørt skov.
- 5) gøre brug af det flerårige datasæt fra den danske NFI.
- 6) muliggøre brug af lokale volumen- og biomassefunktioner.

Baseret på disse kriterier faldt valget på den seneste udgave af European Forest Institute Scenario model (EFISCEN) kaldet EFISCEN-Space [40] som grundlag for klimafremskrivningerne for skov.

I forbindelse med nærværende projekt var det som en del af det overordnede projekt *Veje til bio-gent byggeri* centralt, at der var en sammenhæng mellem de nationale klimafremskrivninger for skov og de scenarier, der fremstilles i projektet. Således er EFISCEN-Space modellen brugt som grundlag for at lave fremskrivningerne under forskellige scenarier for skovens forvaltning og anvendelsen af materialer fra skoven til varige træprodukter og energi.

2.2 EFISCEN-Space modellen

EFISCEN-Space er en rumligt eksplicit model designet til at gennemføre simuleringer af skovudviklingen under forskellige scenarier for den fremtidige skovforvaltning. EFISCEN-Space anvender en dynamisk, individbaseret tilgang til at simulere udviklingen af skovbevoksninger over tid på baggrund af data indhentet fra prøveflader i Danmarks Skovstatistik. Modellen modellerer vækst og dødelighed for enkelt-træer målt på prøvefladerne under hensyntagen til faktorer som jordbund, klima, træart, alder, træstørrelse og konkurrence mellem træer på prøvefladen. Da EFISCEN-Space er rummeligt eksplicit muliggør modellen detaljerede vurderinger af skovenes udvikling på

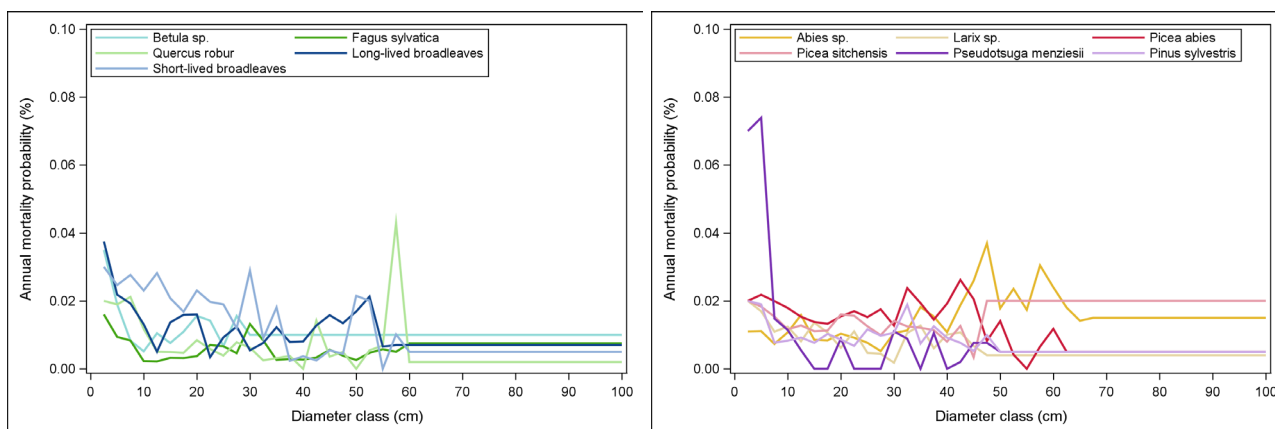
lokale, regionale og nationale niveauer, hvilket tillader en mere præcis repræsentation af forskellige økosystemer.

I denne gennemgang beskrives EFISCEN-Space og brugen af modellen overfladisk, idet der henvises til Nord-Larsen og Brownell [38] for en grundig gennemgang af modellen og af hvordan den bruges til fremskrivningerne.

Grundstenene i EFISCEN-Space modellen udgøres af:

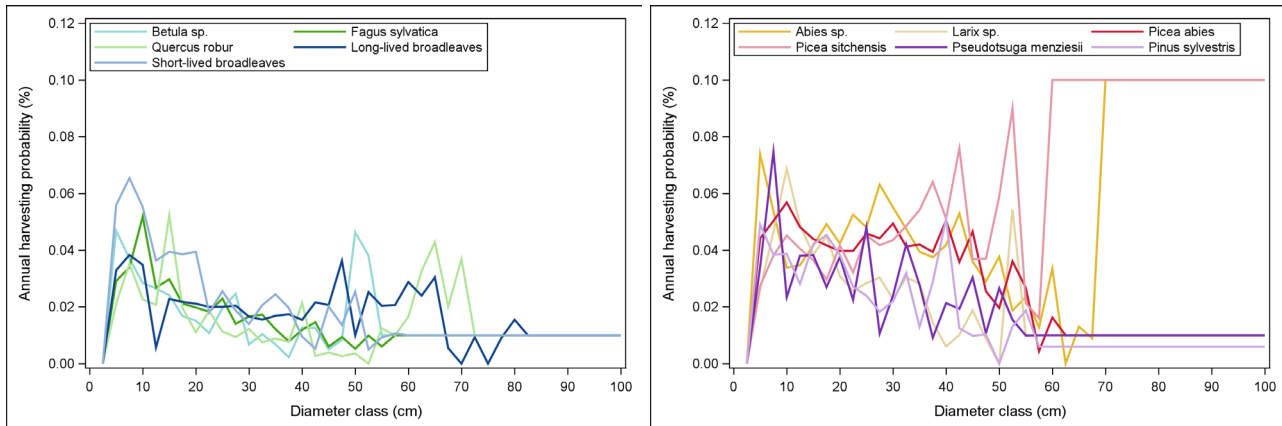
- 1) *Input data i form af træmålinger og -registreringer på Danmarks Skovstatistikks prøveflader.* Skovfremskrivningerne med EFISCEN-Space tager udgangspunkt i skovenes status, typisk i form af målinger optaget i forbindelse med national skovovervågning. Danmarks Skovstatistik er baseret på et landsdækkende netværk af prøveflader [14]. Data fra den seneste femårige rotation af målinger (2018-2022) i Danmarks Skovstatistik [4] er af særlig betydning, da de danner udgangspunkt for fremskrivningerne. Målingerne omfattede 9.693 prøveflader med skov. Af det samlede antal prøveflader var 33 pct. inden for permanente prøvefladegrupper og i de fleste tilfælde genmålt fra tidligere rotationer. Der blev på Danmarks Skovstatistikks prøveflader i 2018-2022 målt i alt 114.426 træer.
- 2) *En tilvækstmodel.* EFISCEN-Space anvender en enkelt-træ tilvækstmodel til at beskrive den dynamiske udviklingen på prøvefladerne fra punkt 1) over tid. Modellen bygger på en Gompertz-model, der beskriver en sigmoid vækstkurve [39]. Modellen blev estimeret ud fra gentagne målinger af 2,3 millioner træer over hele Europa [40] og medtager en lang række parametre som afspejler lokale vækstvilkår (klima, jordbund, N-deposition etc.). Der indgik ikke data fra de danske prøveflader i estimeringen af modellen, og forsøg på at tilpasse modellen alene på baggrund af danske data (~70.000 træer) afslørede, at disse data var utilstrækkelige til at opnå tilstrækkelig robusthed i modellens forudsigelser.
- 3) *En model for naturlig dødelighed.* Den naturlige dødelighed (mortaliteten) er i EFISCEN-Space specificeret i en matrix af arts- og diameterklassespecifikke sandsynligheder for at træerne dør. For at simulere udviklingen af de danske skove blev den observerede naturlige dødelighed udtrukket fra gentagne målinger i den danske NFI (2002-2022) og brugt til at udlede historiske årlige dødeligheder for hver art og diameterklasse (Figur 2.1). Imidlertid medfører bl.a. udlæg af urørt skov i scenariekørslerne væsentlige ændringer i forudsætningerne for de historisk observerede dødeligheder. Vi valgte derfor i fremskrivningerne, der ligger til grund for denne rapport, at bruge de indbyggede dynamiske dødelighedsfunktioner i EFISCEN-Space-modellen [41]. Disse modeller inkluderer tæthedsparametre og resultatet af ensidig konkurrence fra træer, der er større end de betragtede træer, og kan derfor

bedre rumme simuleringer med ændrede grundlæggende forhold. Sammenligning af de to typer funktioner viste kun mindre forskelle mellem fremskrivningerne.



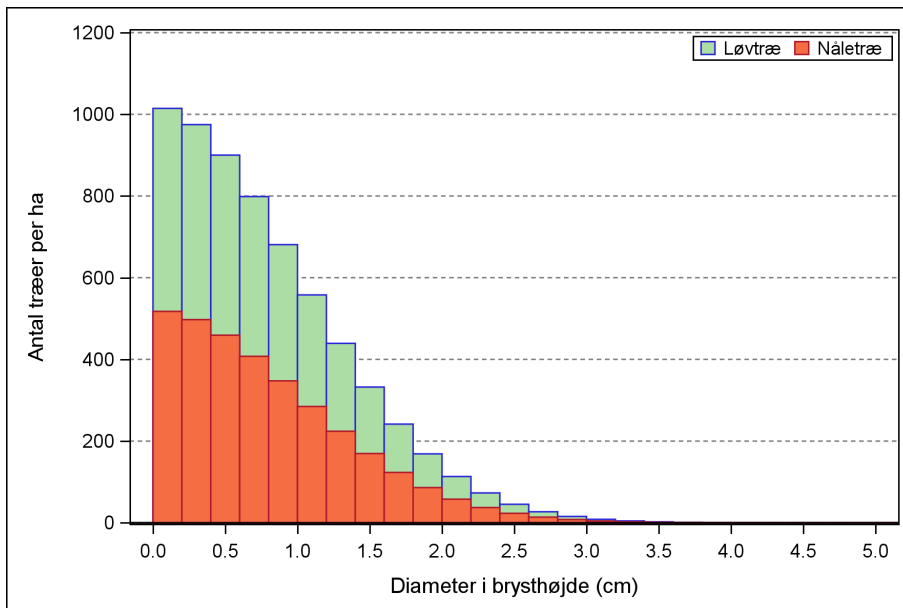
Figur 2.1. Sandsynligheder for mortalitet for løv- (venstre) og nåletræer (højre). Sandsynlighederne er bestemt ud fra målinger af enkelttræer i Danmarks Skovstatistik, men er for diameterklasser med meget lidt data fastsat på baggrund af et skøn.

- 4) *En model for hugstsandsynligheder.* Som en del af fremskrivningerne, anvender EFISCEN-Space en sandsynlighed for at et træ fældes i den kommende periode (her fem år). Hugstmodellen er baseret på en matrix, der specificerer arts- og diameterklassespecifikke dødelighedssandsynligheder. Til denne rapport udtrak vi nationale hugstsandsynligheder fra de gentagne målinger i den danske NFI (2002-2022) for at repræsentere de historiske hugstsandsynligheder for hver art (Figur 2.2). På arealer, der udlægges som urørt skov eller nationalpark som en del af Natur- og biodiversitetspakken [42] afspejler hugstsandsynlighederne den vedtagne konverteringsperiode, der er hhv. 6 og 25 år i Østdanmark og de vestjyske hedeplantager som beskrevet for klimafremskrivningen for skovene for 2024 [38]. På arealer der yderligere udlægges til urørt skov, som en del af scenarierne beskrevet i det efterfølgende, antages der ikke at være en konverteringsperiode og hugstsandsynligheden sættes således til 0.



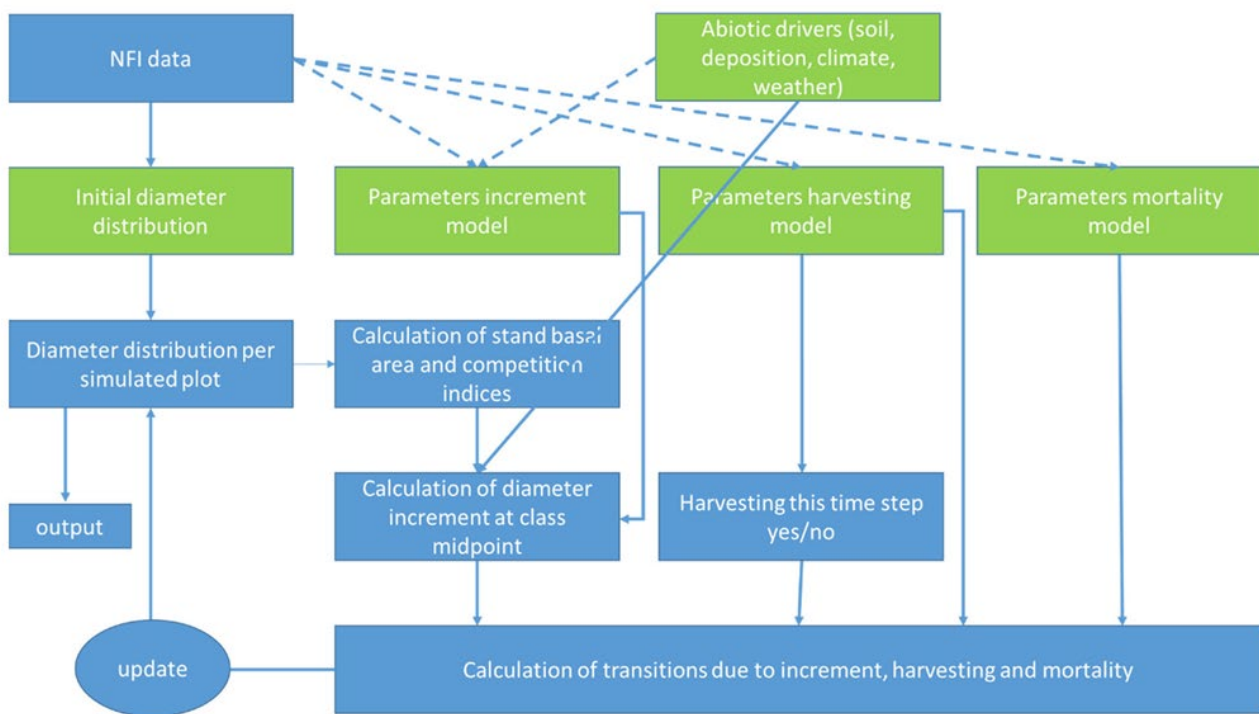
Figur 2.2. Hugstsandsynligheder for løv- (venstre) og nåletræer (højre). Sandsynlighederne er bestemt ud fra målinger af enkelttræer i Danmarks Skovstatistik, men er for diameterklasser med meget lidt data fastsat på baggrund af et skøn.

- 5) *En model for indvækst af træer på prøvefladerne.* Naturlig selvsåning af nye træer på prøvefladerne kan i EFISCEN-Space simuleres ved at brugeren specificerer et antal træer, der tilføjes en eller flere specifikke diameterklasser ved hver periodevis kørsel af programmet [40]. Alternativt kan man anvende en dynamisk indvækstmodel, der anvender en statistisk model for fremspiringen af nye træer ud fra træartssammensætningen og tætheden af bevoksningen på arealet såvel som viden om træernes spredningsevne. Ved vores brug af modellen har vi valgt at simulere indvækst på skovdækkede prøveflader ved hjælp af den dynamiske indvækstmodel og tilplantning af skovrejsningsarealer uden for EFISCEN-Space modellens regi ved at danne nye prøveflader med en træartssammensætning, der dikteres af det enkelte scenarie, og som indsættes ved hver ny femårig rotation af simuleringerne (Appendiks 6.1). Diameterfordelingen af de indplantede træer blev fastsat ved højresiden af en normalfordeling med middel 0 og spredning 1 (Figur 2.3). Stamtallet blev fastsat ud fra almindelige planteafstande for hhv. løv- (1,25 m) og nåletræer (1,75 m).



Figur 2.3. Fordelingen af træer til diameterklasser for skovrejsning med hhv. løv- og nåletræer. Der antages en planteafstand for nåletræer på 1,75 m (3265 planter/ha) og for løvtræer på 1,25 m (6400 planter/ha). Skovrejsningen antages at ske midt i de 5-årige perioder i fremskrivningen og antages altså at være gennemsnitligt 2,5 år gammel.

Samlet udgør de fem modeller grundlaget for EFISCEN-Space modellen, som initieres med målinger fra den nationale skovstatistik og fremskrives i ét-årige perioder, og hvor produktet af hver fremskrivning danner grundlaget for det efterfølgende års fremskrivning i en iterativ proces beskrevet i Figur 2.4.

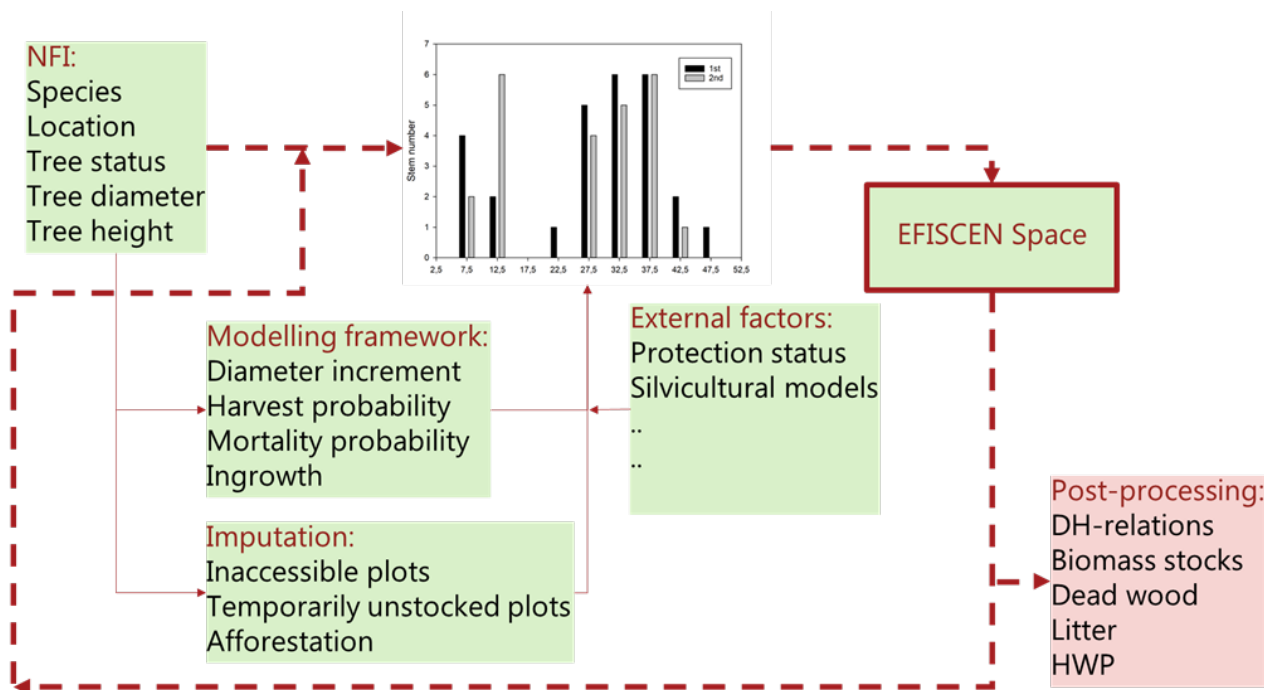


Figur 2.4. EFISCEN-Space matrixmodellen (fra [43]). Modelleringen af trætilvækst inkluderer et stort sæt geografisk eksplicitte faktorer såsom klima- og jordforhold, der muliggør tilpasning til lokale vækstbetingelser.

2.3 Scenarier

Beregning af den fremtidige biomasseproduktion fra de danske skove tager udgangspunkt i, hvordan skovene ser ud i dag, baseret på opgørelserne på Danmarks Skovstatistikks prøveflader. Som udgangspunkt for simuleringerne skaleres antallet af træer på prøvefladerne i hver arts- og aldersklasse til stamtallene svarende til én hektar skov. Herefter fremskrives træarts- og diameterfordelingen ud fra vækst-, hugst-, dødeligheds- og indvækstmodellerne i fem år. Resultatet i form af den fremskrevne diameterfordeling eksporteres herefter til et andet program. I dette beregnes vedmasse, biomasse og kulstofindhold i træerne ud fra nationale vedmasse- og biomassefunktioner [13, 44-46]. Resultaterne gemmes i en fil der opdateres ved hver ny femårig rotation af simuleringerne.

I det næste skridt opdateres modellerne for hugstsandsynlighed og der dannes nye prøveflader med skov i overensstemmelse med de forskellige scenarier. De opdaterede filer fødes tilbage i EFISCEN-Space, der herefter køres i endnu en femårig periode (Figur 2.5).



Figur 2.5. Diagram der viser hvordan simuleringerne med EFISCEN-Space gennemføres (fra [38]).

De forskellige scenarier hviler på en række virkemidler der svarer til dem anvendt i en række tidligere studier af potentialet for en øget dansk produktion af bæredygtig biomasse [6,7] og omfatter:

- Skovrejsning
- Artsvalg ved skovrejsning
- Omdriftsalder/kulturareal
- Artsvalg i foryngelser
- Kulturmetode i foryngelser
- Udlæg af arealer til naturreservater og urørt skov
- Hugststyrke (hyppighed og intensitet)
- Hugstufald (hugstens fordeling til sortimenter og ikke aflagt vedmasse som efterlades i skoven)
- Forædling

De enkelte elementer sammensættes i fem forskellige scenarier (Tabel 2.1), der afspejler forskellige forventninger til den fremtidige forvaltning og anvendelse af skovene:

- 1) Business-as-usual (BAU). Et scenarie der afspejler de nuværende rammer for og metoder anvendt i skovforvaltningen og i allokeringen af træressourcerne. Scenariet er mere eller mindre identisk med scenariet anvendt i klimafremskrivningen for skovene [38].

- 2) Business-as-usual med øget skovplantning (Business-as-Usual (X)). Scenariet afspejler de nuværende metoder anvendt i skovforvaltningen og den nuværende allokering af træressourcerne. Scenariet er opdateret med forventningerne til den fremtidige skovrejsning, der er resultatet af de grønne trepartsforhandlinger [47].
- 3) Produktion/biomasse. Et scenarie der afspejler øget forvaltning af skovene med henblik på at levere råmaterialer til den grønne omstilling, herunder biomasse til energiforsyningen. Scenariet hviler på øget brug af hurtigt voksende træarter, særligt nåletræarter, i skovrejsningen og en øget udnyttelse af vedmasseressourcerne til varige træprodukter.
- 4) Ekstensivering. Et scenarie der afspejler en ekstensivering af landbrugsproduktionen og forvaltning af skovene for øget sikring af skovens biodiversitet. Scenariet har samme skovrejsningstakt som Business-as-Usual (X) og Produktion/biomasse scenarierne, men skovtilplantningen sker med mere langsomt voksende løvtræarter.
- 5) Foder-til-føde. Scenariet bygger på en rapport om den fremtidige fødevarerproduktion i Danmark, hvor der lægges overvejende vægt på sikring af biodiversitet [48]. Scenariet har samme mål for det endelige skovareal som i de grønne trepartsforhandlinger men angiver en hurtigere forøgelse af skovarealet. I scenariet er >70 pct. af skovarealet sat til side til biodiversitetsformål. I scenariet gennemføres fortsat skovdrift på 29 pct. af det eksisterende skovareal samt i skovrejsninger. Dog vil den tilbageværende skovsektor være så begrænset, at der vurderes at være en stor sandsynlighed for at der ikke fortsat vil være industri eller afsætningskæder til skovbruget. Derfor er der som supplement udarbejdet et supplerende scenarium med fuldt hugstopt, som viser effekten af afslutningen af produktionen af konstruktionstræ i Danmark.

Tabel 2.1. Scenarier for skovfremskrivningen. Gråtonede celler angiver, at det ikke inden for projektet var muligt at implementere dette tiltag i modellen. Som supplement til Foder-til-Føde scenariet blev der udarbejdet et supplerende Hugststop scenarium, hvor al hugst ophører i såvel eksisterende som fremtidige skove med visse undtagelser.

	Scenarium				
	Business-as-Usual	Business-as-Usual (X)	Produktion/biomasse	Ekstensivering	Foder-til-Føde
Kommentar	Business-as-Usual scenarie. Baseret på et "Frozen-policy" scenarie med vedtagne tiltag. Identisk med Klimafremskrivning 2024 [38]. Anvendelsen af træressourcen svarer til den nuværende.	Business-as-Usual scenarie. Baseret på et "Frozen-policy" scenarie med vedtagne tiltag inklusive resultatet af trepartsforhandlingerne [47]. Anvendelsen af træressourcen svarer til den nuværende.	Et scenarie hvor produktion af træ, særligt til byggeriet er centralt.	En kombination af BAU scenariet og produktionsscenarioet.	Gengiver et scenarie med >70 pct. af skovarealet sat til side med biodiversitetsformål. Scenariet suppleres med et Hugststop scenarium hvor produktionen af træprodukter i Danmark helt ophører.
Skovrejsning, areal	Gennemsnit: 1.900 ha/år	250.000 ha skovrejsning i 2022-2045 og 25 pct. skov i 2089.	250.000 ha skovrejsning i 2022-2045 og 25 pct. skov i 2089.	250.000 ha skovrejsning i 2022-2045 og 25 pct. skov i 2089.	250.000 ha skovrejsning i 2022-2045 og 25 pct. skov i 2089.
Skovrejsning, arter	Imputation af NFI prøveflader med faktisk observeret skovrejsning (2002-2020)	Imputation af NFI prøveflader med faktisk observeret skovrejsning (2002-2020)	Sitkagran, rødgran, douglasgran og lærk.	Eg, skovfyr og længelevende løvtræer	Eg, skovfyr og længelevende løvtræer
Skovrejsning, kulturmetode	Som observeret i NFI	Som observeret i NFI	Plantning	50 pct. Plantning 50 pct. Naturlig tilgroning	50 pct. Plantning 50 pct. Naturlig tilgroning
Hugstsandsynlighed, eksisterende skov	Som observeret i NFI	Som observeret i NFI	Som observeret i NFI	Som observeret i NFI	Biodiversitetstiltag på 71 pct. af eksisterende skovareal. Som observeret i NFI på 29 pct.
Hugstsandsynlighed, skovrejsning	Som observeret i NFI	Som observeret i NFI. Urørt skov på 100.000 ha.	Som observeret i NFI.	Som observeret i NFI. Urørt skov på 100.000 ha.	Som observeret i NFI. Urørt skov på 100.000 ha.
Eksisterende skov, foryngelse	EFISCEN indvækst (afhængig af eksisterende træartssammensætning)	EFISCEN indvækst (afhængig af eksisterende træartssammensætning)	Foryngelse med gran efter løv	EFISCEN indvækst (afhængig af eksisterende træartssammensætning)	EFISCEN indvækst (afhængig af eksisterende træartssammensætning)
Forædling	0 pct.	0 pct.	10 pct. øget vedmasseproduktion for nåletræarter	0 pct.	0 pct.
Udlæg af areal til biodiversitet	Udlæg af 75.000 ha urørt skov og naturnationalpark	Udlæg af 75.000 ha urørt skov og naturnationalpark. Af den samlede skovrejsning udlægges 100.000 ha til urørt skov.	Udlæg af 75.000 ha urørt skov og naturnationalpark. Der udlægges ikke urørt skov som en del af skovrejsningen.	Udlæg af 75.000 ha urørt skov og naturnationalpark. Af den samlede skovrejsning udlægges 100.000 ha til urørt skov.	Udlæg af 75.000 ha urørt skov og naturnationalpark. Samlet udlægges 71 pct. af det eksisterende areal til biodiversitetsskov. Af den samlede skovrejsning udlægges 100.000 ha til urørt skov.
Hugstaffald efterladt i bevoksning	Som nugældende praksis. Procentsats afhængig af diameter.	Som nugældende praksis. Procentsats afhængig af diameter.	0 pct.	100 pct.	100 pct.
Sortimentsudfald	Som nuværende [19]	Som nuværende [19]	Scenarie med højere udnyttelse af små dimensioner til varige træprodukter (fibre, plader, limtræ mv)	Som nuværende [19]	Som nuværende [19]

2.4 Efterprocessering

Output fra EFISCEN-Space består af tabeller med stamtalsfordelingen for hver prøveflade til arter, diameterklasser og bevoksningsdel (blivende træer, fældede træer eller naturligt døde træer). For at omsætte diameterfordelingerne til estimater for vedmasse, biomasse, kulstoflagre, hugstmængder og trævarer til byggesektoren foretages en del forskellige mellemregninger. I disse mellemregninger har det været centralt at følge beregningsgangene, som indgår i eksempelvis Danmarks Skovstatistik [14] og hermed også f.eks. i den nationale klimarapportering for hermed at skabe mest mulig konsistens mellem tallene.

2.4.1 Beregning af skovens kulstoflager

Første skridt i beregningerne er at omsætte diameterfordelingerne til vedmasser, biomasser og kulstof. Da de modeller, der bruges til dette, anvender både træets diameter og højde, kræver dette et estimat af træernes højder. Til dette anvender vi i nærværende projekt den observerede sammenhæng mellem trædiameter og -højde på Danmarks Skovstatistik's prøveflader. Sammenhængen beskrives ved hjælp af en funktion af den generelle form:

$$h_{ij} = 13 + b_1 \times e^{-\frac{b_2}{d_{ij}}}$$

hvor h_{ij} er højden (i dm) af et træ i den i 'te diameterklasse for den j 'te art, d er diameteren (i mm) og b_1 og b_2 er modellens artsspecifikke parametre.

Ud fra de sammenhørende diameter og højder i hver diameter- og artsklasse bestemmes vedmassen af træerne i klassen ved hjælp af artsspecifikke vedmassefunktioner [44-46]. For arter hvortil der ikke findes en vedmassefunktion anvendes funktioner for arter med den størst mulige fænologiske lighed. Funktionerne muliggør anvendelsen af bevoksningsparametre (bevoksningsdiameter og -højde) i modellen. Disse ansættes i dette arbejde til diameteren og den estimerede højde af træerne i den enkelte diameterklasse.

Ligeledes ud fra de sammenhørende diameter og estimerede højder estimeres biomassen i hhv. stamme, grene, rødder, træets overjordiske dele og træet i sin helhed diameterklassevist for de forskellige træarter ud fra nationale og træartsspecifikke biomassefunktioner [13]. Den estimerede biomasse omsættes til kulstof ud fra en forventet kulstofandel på 0,47 g C/g biomasse [16, 49] og kulstof omsættes til CO₂-ækvivalenter (CO₂-eq) ved hjælp af molvægt-forholdet 44/12. Beregningsgangene er identiske med beregningerne, der ligger til grund for det nationale klimaregnskab og er beskrevet i Nord-Larsen og Johannsen [14] og procedurene er yderligere beskrevet i Nielsen og Nord-Larsen [50].

2.4.2 Beregning af effekten på biogene byggematerialer

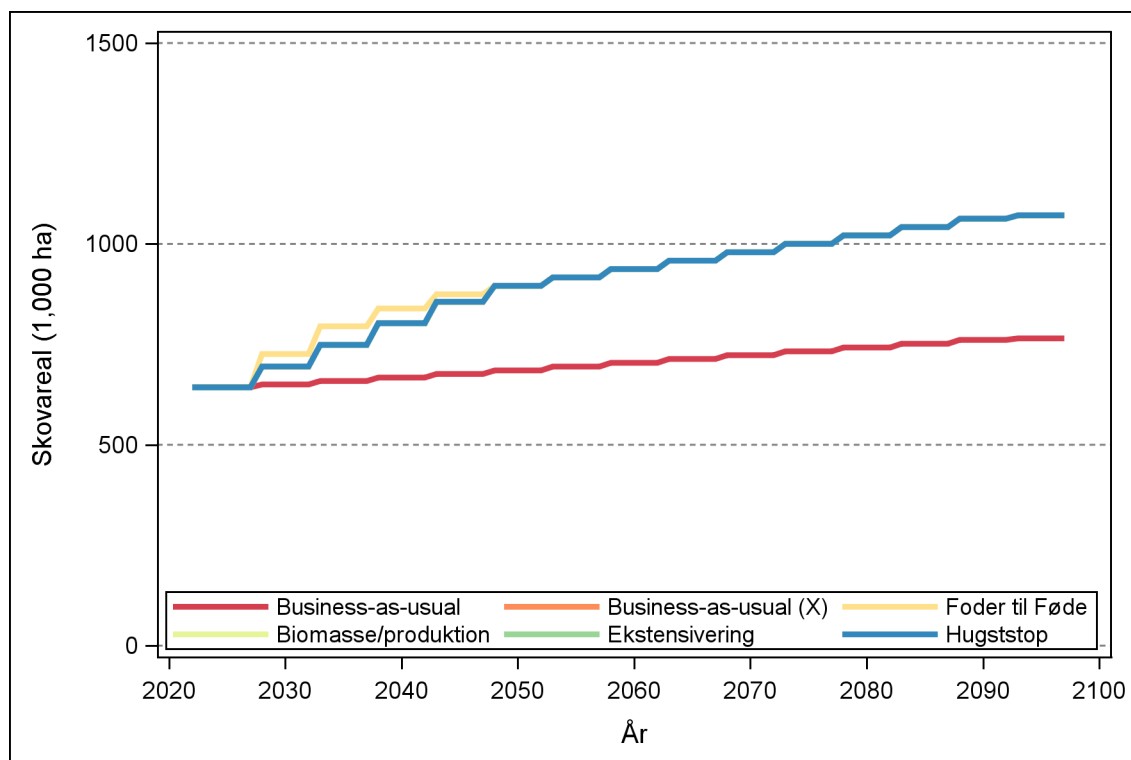
For at beregne mængden af træ som i skoven aflægges til gavntræ (f.eks. møbler, bygningstømmer, spånplader, papir og emballage) og energi (f.eks. energitræ som flis og energitræ som rundtræ) anvender vi som grundlag et studie af sortimentsudfaldet i Naturstyrelsens skove [16]. Disse sortimentsudfald er baseret på den aflagte og solgte hugst, opgjort i kubikmeter fastmasse. Ikke udnyttet eller ekstra udnyttet masse må der således tages højde for ved brugen af sortimentsudfaldene.

I udmøntningen af de forskellige scenarier har vi antaget forskellige mønstre for særligt anvendelsen af hugstrestre og energitræ. I de to Business-as-Usual scenarier er vi gået ud fra sortimentsudfaldet udtrykt i [19], idet vi har skønnet andelen af træet, der efter hugst bliver efterladt i bevoksningen afhængig af hugstdiameter (Appendiks 6.2). I Ekstensivering og Foder-til-Føde scenarierne har vi antaget, at der ikke udtages hugstrestre i form af grene, topender og skadet/råddent træ til skovflis som et udtryk for en mindre intensiv skovdrift, hvor hugstrestre efterlades for at gavne biodiversitet (Appendiks 6.3). Det samme gælder rundtræ til energi. Samlet set medfører scenariet et betydeligt fald i udnyttelsen af træ, der i dag anvendes til energiformål. I Biomasse/produktions-scenariet afspejler sortimentsudfaldet en situation, hvor efterspørgslen efter træ til produkter og energi er høj, og hugstrestreterne derfor i stort omfang udtages til energi (Appendiks 6.4).

Efter hugst omsættes sortimentsudfaldet til forskellige produkter/trævarer, ofte betegnet Harvested Wood Products (HWP). De forskellige scenarier afspejler forskellig udvikling af industrien til at imødekomme samfundets efterspørgsel efter træ til bl.a. biogent byggeri. I de to Business-as-Usual scenarier er omsætningen til endelige trævarer nogenlunde som i dag (Appendiks 6.5). Det antages overordnet at 7 pct. af vedmassen er bark, som anvendes til energi. Af fraskæret, som fremkommer når det runde træ skæres til firkantede elementer, bliver 50 pct. genanvendt til cellulosemasse, mens resten bliver afbrændt til energi. I Ekstensivering og Foder-til-føde scenarierne, ligner omsætningen af sortimenterne fra skoven til trævarer Business-as-Usual scenarierne og afspejler hermed at den mindre mængde træ til industrien også medfører et uændret udviklingspotentiale (Appendiks 6.6). I Biomasse/produktion scenariet afspejler omsætningen til trævarer en situation, hvor der er en stor efterspørgsel efter biogene byggematerialer og energi (Appendiks 6.7). I dette scenarie anvendes rundtræ, der i dag bliver brugt til energi og cellulosemasse, i højere grad til plader i byggeriet. Samtidig kanaliseres savværkernes fraskær ligeledes til produktion af plader. Endelig forventes al hugstaffald anvendt til energi.

2.5 Resultater

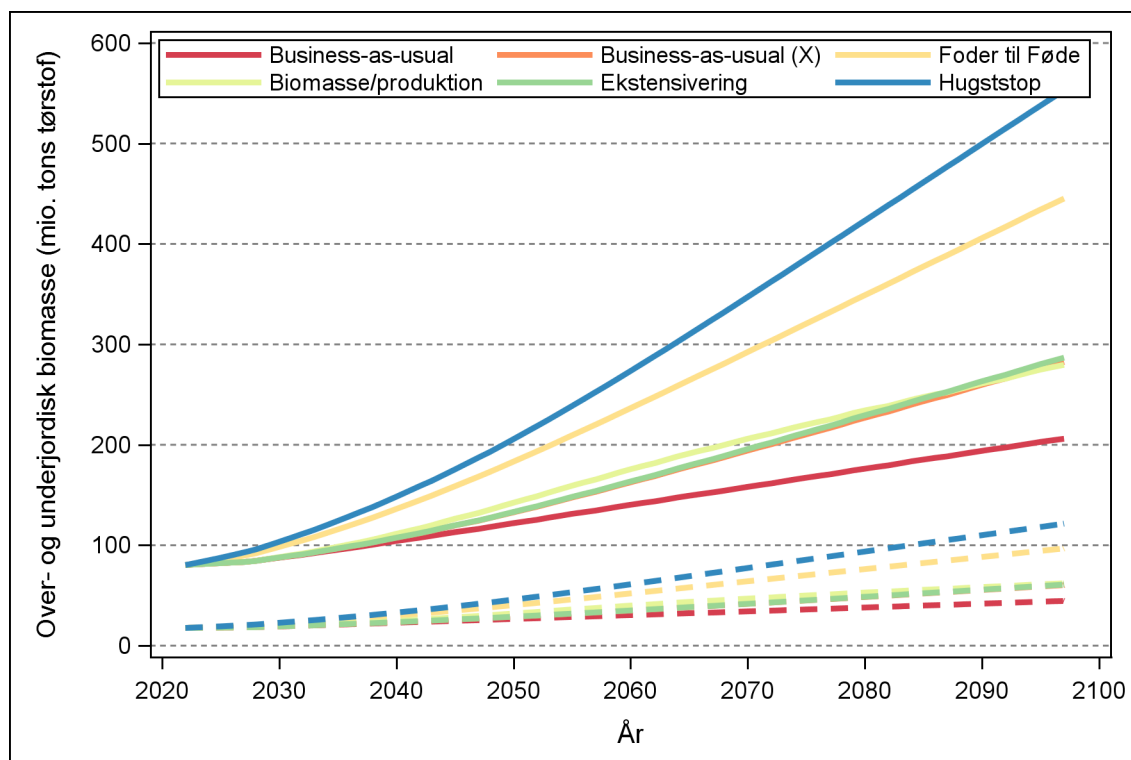
De i alt fem forskellige scenarier (samt det supplerende Hugststop scenarium) medfører samlet tre forskellige udviklinger i skovarealet (Figur 2.6). Alle scenarier undtagen Business-as-Usual scenariet medfører et skovareal på ca. 25 pct. af landets areal ved afslutningen af simuleringerne i tråd med folketingsbeslutningen fra 1989 [51], som angiver en ideel målsætning om at skovarealet skal nå op på 25 pct. af landets areal inden for en tidsperiode på 80-100 år. I Business-as-Usual scenariet når man dog ikke denne målsætning med en skovrejsning på kun 1.900 ha/år og et samlet skovareal i 2089 på 761.000 ha eller 18 pct. af landets areal. Alle øvrige scenarier bygger på målsætningen om at lave skovrejsning svarende til 250.000 ha frem til 2045 i overensstemmelse med resultatet af forhandlingerne i den grønne trepart [47]. Foder-til-Føde scenariet har en lidt hurtigere udvikling end de øvrige scenarier, fordi der er antaget en højere målsætning for skovrejsningen i 2030 og 2040.



Figur 2.6. Udviklingen af skovarealet for de i alt fem scenarier (samt det supplerende Hugststop scenarium). Business-as-Usual (X), Biomasse/produktion, Ekstensivering og Hugststop har samme udvikling i skovarealet og kurverne er derfor skjult bag hinanden.

De fem scenarier (samt det supplerende Hugststop scenarium) giver anledning til en ret forskellig opbygning af biomasse i skovene (Figur 2.7). Naturligt giver et fuldstændigt hugststop i skovene, både i den eksisterende skov og i skovrejsningen, en hurtig opbygning af biomasse i skovene og giver i 2050 et samlet lager af overjordisk biomasse på 206 mio. tons tørstof, svarende til en årlig

opbygning på 4,2 mio. tons tørstof/år frem til 2050. Det samlede lager af kulstof i både over- og underjordiske trædele øges i samme periode til 252 mio. tons tørstof svarende til en opbygning på 5,2 mio. tons tørstof/år frem til 2050. Som følge af at en stor del af skovene udlægges til urørt skov i Foder-til-Føde scenariet sker der her også en betydelig opbygning af overjordisk biomasse svarende til 3,5 mio. tons tørstof/år frem til 2050. Business-as-Usual (X), Biomasse/produktion og Ekstensivering scenarierne har nogenlunde samme opbygning af overjordisk biomasse i skovene svarende til 1,8-2,1 mio. tons tørstof/år frem til 2050, men når der til ad vidt forskellige veje. Således anvendes der mere hurtigt voksende træarter i Biomasse/produktion scenariet end i de to øvrige scenarier, men der fældes samtidigt flere træer til eksempelvis byggeri. Endelig er der i Business-as-Usual scenariet en betydeligt mindre opbygning af skovens kulstoflager som følge af den mindre skovrejsning.

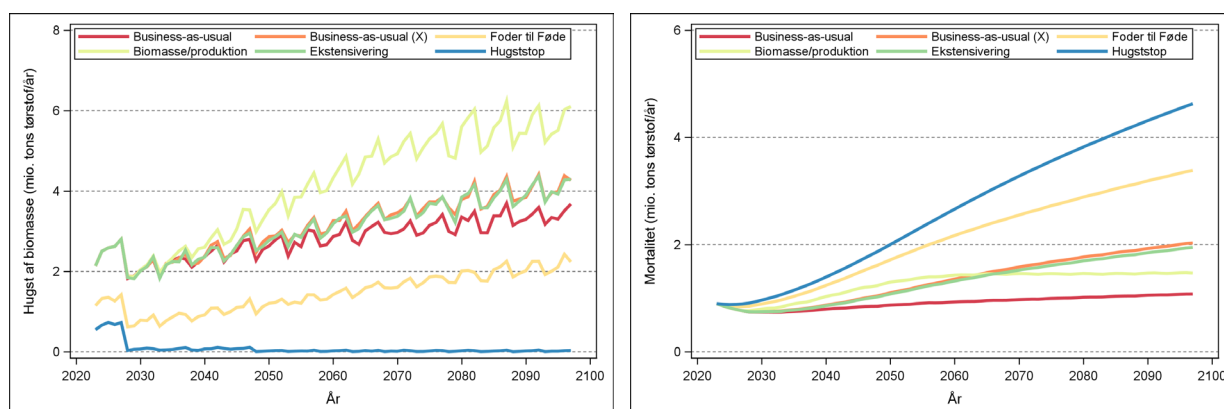


Figur 2.7. Udviklingen i overjordisk (fuldt optrukne linjer) og underjordisk (stiplede linjer) biomasse for de fem scenarier (samt det supplerende Hugststop scenarium). Over- og underjordisk biomasse udgør to af de i alt fem kulstofpuljer i skov.

Som med udviklingen i skovens biomasse er der store forskelle på størrelsen af hugsten og den forventede dødelighed i skoven mellem de forskellige scenarier (Figur 2.8). Den intensive plantning af nåltræer på skovrejsningsarealerne medfører en stigende hugst i Biomasse/produktion scenariet, der kommer op imod 5,7 mio. tons tørstof/år ved slutningen af fremskrivningen. I 2050 er hugsten i Biomasse/produktion scenariet omkring 3,5 mio. tons tørstof/år og herved 25-32 pct. højere

end i Business-as-Usual, Business-as-Usual (X) og Ekstensivering scenarierne, der på dette tidspunkt er rimeligt sammenlignelige. Dette afspejler at de langsomt voksende løvtræer plantet i den omfattende skovrejsning ikke når at gøre en større forskel på hugsten i scenarierne med større skovrejsningstakt end Business-as-Usual. I scenarierne, hvor store dele af den eksisterende skov udlægges til urørt skov, falder hugsten voldsomt. Således er hugsten i Foder-til-Føde scenariet kun 40 pct. af hugsten i de to Business-as-Usual scenarier og under en tredjedel af hugsten i Biomasse/produktion scenariet. At der fortsat forekommer hugst i Hugststop scenariet skyldes at der fortsat sker en konvertering af arealer udlagt til urørt skov og nationalpark i forbindelse med Natur- og Biodiversitetspakken [42], og at visse træarter af tekniske årsager fjernes, når modellen forudsiger, at de selvsår sig på prøvefladerne.

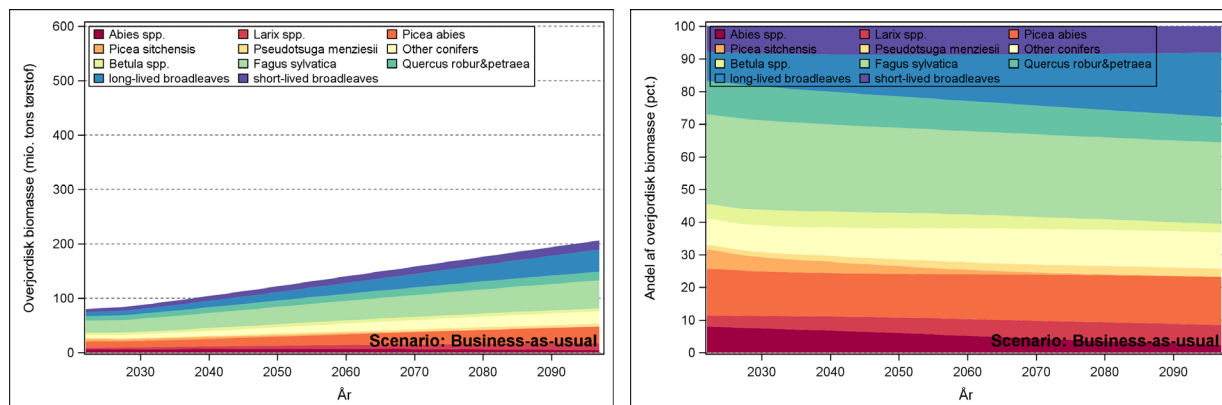
Den forskelligartede hugst i de fem scenarier (samt det supplerende Hugststop scenarium) medfører forskelle i dødeligheden (Figur 2.8) som følge af at konkurrencen mellem træerne påvirkes. Den største dødelighed findes i scenarier med stor andel af urørt skov, fordi den manglende hugst øger konkurrencen mellem træerne. Således er dødeligheden i Hugststop (2,0 mio. tons tørstof/år) og Foder-til-Føde (1,7 mio. tons tørstof/år) scenarierne 70-100 pct. større i 2050 end i gennemsnittet for Business-as-Usual og Ekstensivering scenarierne. Dødeligheden er en smule større i Biomasse/produktion scenariet i 2050 end i Business-as-Usual (X) og Ekstensivering scenarierne i 2050, hvilket hænger sammen med, at nåletræerne vokser hurtigere end løvtræerne og derfor skaber konkurrence mellem træerne på et tidligere tidspunkt. Kulstofpuljerne i træer, der årligt dør, er mindst i Business-as-Usual scenariet, hvilket hænger sammen med det mindre skovareal (Figur 2.8).



Figur 2.8. Hugst (til højre) og mortalitet (til venstre) ved de fem scenarier (samt det supplerende Hugststop scenarium). Den takkede form på hugst-kurven til venstre skyldes EFISCEN-Space modellens opbygning og afspejler ikke forventninger til variationen i de årlige hugstmængder.

2.5.1 Business-as-usual

I Business-as-Usual scenariet bevares den nuværende træartsfordeling i skovene nogenlunde som for nuværende. Modellen forudsiger at andelen af den samlede biomasse i ædelgran (*Abies* spp.), birk (*Betula* spp.) og sitkagran (*Picea sitchensis*) vil være faldende, mens den vil være stigende for de længelevende løvtræarter og konstant for de øvrige arter (Figur 2.9, højre). Mønsteret kan nogenlunde genkendes fra udviklingen i skovene over de seneste årtier, idet man dog her har set et fald i andelen af rødgran og en stigning i andelen af eg [4].



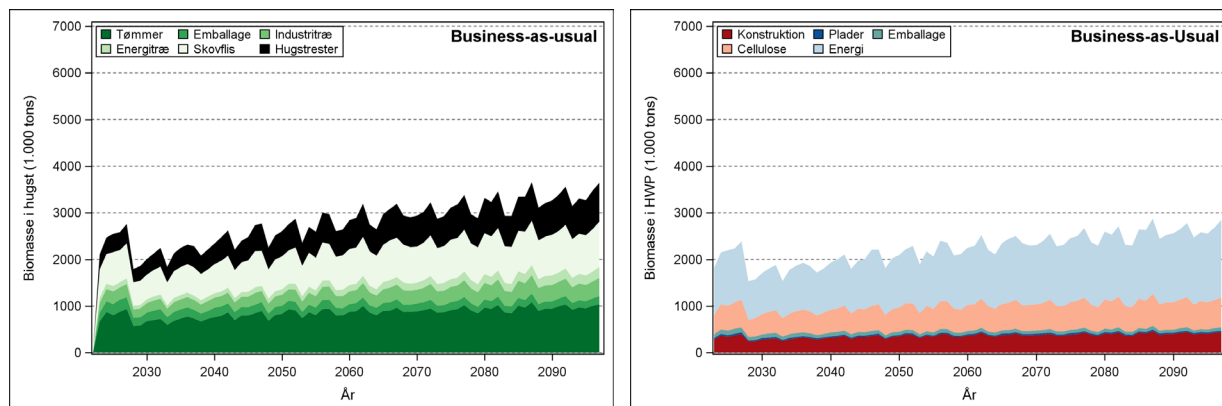
Figur 2.9. Artsfordelingen i Business-as-Usual scenariet udtrykt i overjordisk biomasse (venstre) og dennes procentuelle fordeling (højre).

I Business-as-Usual scenariet fældes der i 2050 omkring 5,0 mio. kubikmeter træ i skovene årligt, svarende til 2,1 mio. tons tørstof eller 3,6 mio. tons CO₂-eq i energitræ og færdige produkter (Tabel 2.2, Figur 2.10). Det er en mindre stigning i forhold til den nuværende hugst.

I hugsten aflægges 32-36 pct. af vedmassen til skovflis og 5-8 pct. til energitræ som rundtræ (Figur 2.10, venstre). Andelen af den samlede mængde træ, der aflægges til energiformål, er stigende igennem fremskrivningen. Tømmeret udgør 36-39 pct. af hugsten og er faldende i løbet af fremskrivningen.

Fordelingen af den huggede vedmasse til energi og træprodukter (Figur 2.10, højre) afspejler dels sortimentsudfaldet ude i skoven og det enkelte scenarier anvendelse af træet til forskellige typer produkter. I løbet af simuleringen er andelen af biomasse, der anvendes til energi stigende fra 53 pct. i den første periode til 57 pct. ved afslutningen af simuleringerne. Den øgede andel af energitræ sker hovedsageligt som følge af en mindsket produktion af træ til emballage og træplader, hvilket igen skyldes en mindre andel af nåletræ i skovene. Hugsten af løvtræ giver generelt flere energiprodukter grundet løvtræernes mere besværlige geometri end de mere rette nåletræer. Betragter man fordelingen af biomasse til energiformål i hugsten og i den endelige fordeling til træprodukter, kan man se, at andelen af biomasse, der anvendes til energiformål er større end

hvad der oprindelig aflægges ude i skoven. Dette skyldes at rester som eksempelvis bark og en vis andel af fraskæret ved oparbejdning af tømmeret ender som energi.



Figur 2.10. Biomasse i hugsten (venstre) og i energi og produkter (højre) i scenariet Business-as-usual. Fordelingen afspejler scenariernes forudsætninger om hvordan hugsten i venstre figur bruges i industrien i højre figur. Forskellen i samlet biomasse mellem de to figurer skyldes hugstrester, der efterlades i skoven.

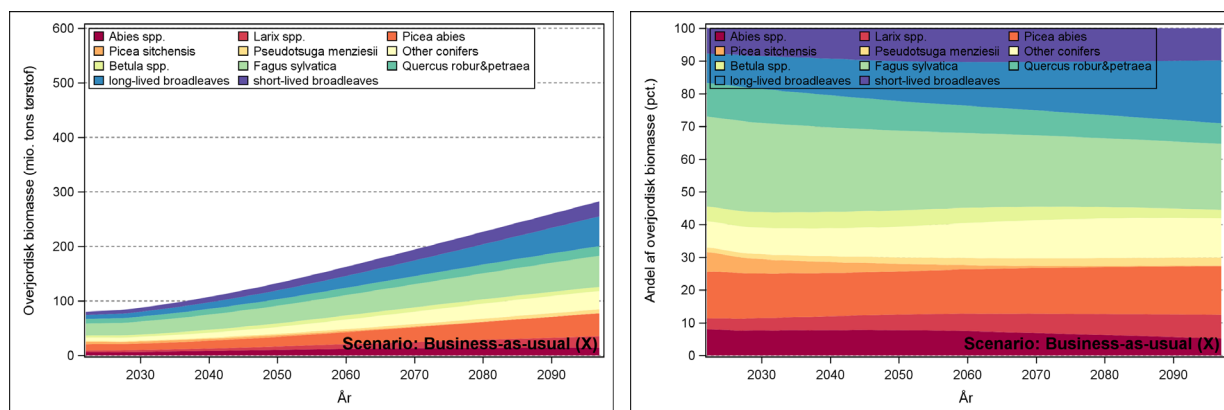
Tabel 2.2. Årlig hugst i Business-as-Usual scenariet. I 2050 fældes der omkring 5 mio. kubikmeter træ i skovene. Af den samlede vedmasse udnyttes hoveddelen til energi.

Periode	Skovareal ha	Vedmasse 1.000 m ³ /år	1.000 tons tørstof/år				
			Energi	Fiber	Emballage	Plader	Konstruktion
2023-2027	642.976	4.938	1.144	528	98	34	353
2028-2032	650.140	3.988	887	428	79	27	276
2048-2052	685.061	5.005	1.121	517	72	24	353
2068-2072	723.061	5.761	1.324	573	70	30	381
2088-2092	761.061	6.361	1.485	598	67	31	408

2.5.2 Business-as-Usual (X)

I Business-as-Usual (X) scenariet, hvor det antages at der frem mod 2045 rejses 250.000 ha skov med en træartsfordeling som observeret i den nationale skovstatistik, sker der en forøgelse af kulstofpuljerne for alle træarter (Figur 2.11, venstre). Udviklingen i træartsfordelingen i skovene svarer nogenlunde til Business-as-Usual scenariet. Dog er det mere udtalt, at andelen af bøg er faldende, sandsynligvis fordi denne art ikke tidligere har været meget brugt ved skovrejsning. Modellen forudsiger desuden at andelen af kulstoflagret i ædelgran, birk og sitkagran vil være faldende, mens den vil være stigende for de længelevende løvtræarter og konstant for de øvrige arter (Figur 2.11,

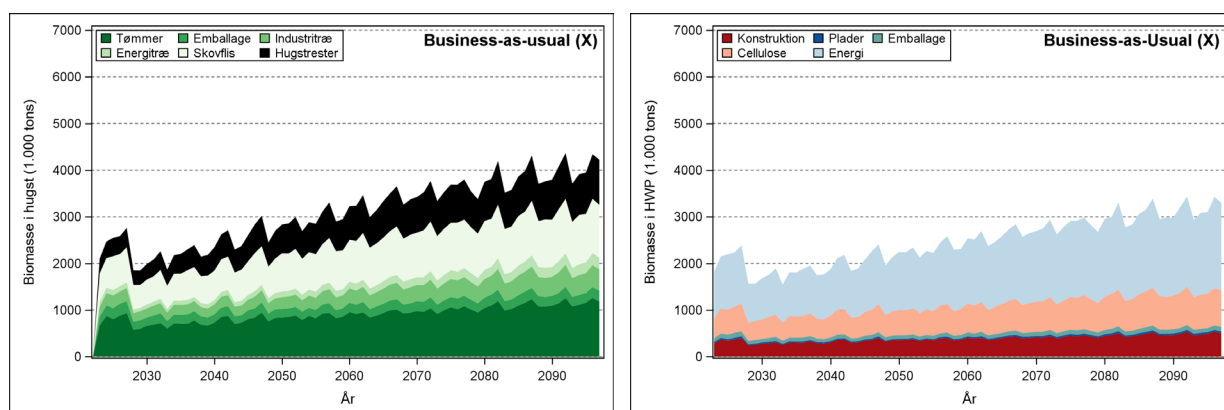
højre). Det er overraskende, at en art som rødgran ifølge modellen forventes at have en nogenlunde konstant andel af kulstofpuljen. Dette hænger muligvis sammen med, at modellens forudsigtelse af indvækst beregnes ud fra den eksisterende træartsfordeling, hvor rødgran er Danmarks mest udbredte træart.



Figur 2.11. Artsfordelingen i Business-as-Usual (X) scenariet udtrykt i overjordisk biomasse (venstre) og dennes procentuelle fordeling (højre). I scenariet behandles skoven som hidtil, men der forventes en skovrejsning på 250.000 ha frem mod 2045 som resultat af de grønne trepartsforhandlinger.

I Business-as-Usual (X) scenariet fældes der i 2050 omkring 5,3 mio. kubikmeter træ i skovene årligt, svarende til 2,2 mio. tons tørstof i energitræ og færdige produkter (Figur 2.12, venstre, Tabel 2.3). Det er en mindre stigning i forhold til den nuværende hugst og i forhold til standard Business-as-Usual, hvilket afspejler, at selv en kraftig forøgelse af skovrejsningen er lang tid om at manifestere sig i hugstens størrelse. Som i standard Business-as-Usual scenariet aflægges 32-37 pct. af hugsten til skovflis og 5-8 pct. til energitræ som rundtræ. Tømmeret udgør 35-39 pct. af hugsten og er faldende i løbet af fremskrivningen som følge af at den omfattende skovrejsning i mange år ikke producerer stort træ.

Som i standard Business-as-Usual scenariet anvender vi i dette scenarie den nuværende tilvirkning af træet til forskellige typer produkter. Andelen af den samlede mængde træ, der anvendes til energiformål, er stigende fra 53 pct. i begyndelsen af fremskrivningerne til 57 pct. efter 75 år (Figur 2.12, højre). Andelen stiger en smule mere end i standard Business-as-Usual scenariet som følge af at den større skovrejsning medfører en større hugst af små træer uden anden anvendelse end energi. Andelen af træ der ender med at blive anvendt til konstruktionsformål er nogenlunde konstant (15-16 pct.).



Figur 2.12. Biomasse i hugsten (venstre) og i energi og produkter (højre) i scenariet Business-as-Usual (X). Fordelingen afspejler scenariernes forudsætninger om hvordan hugsten fra regnet hugstresterne i venstre figur bruges i industrien i højre figur. I Business-as-Usual (X) scenariet forventes fordelingen til energi og færdige træprodukter at være som hidtil.

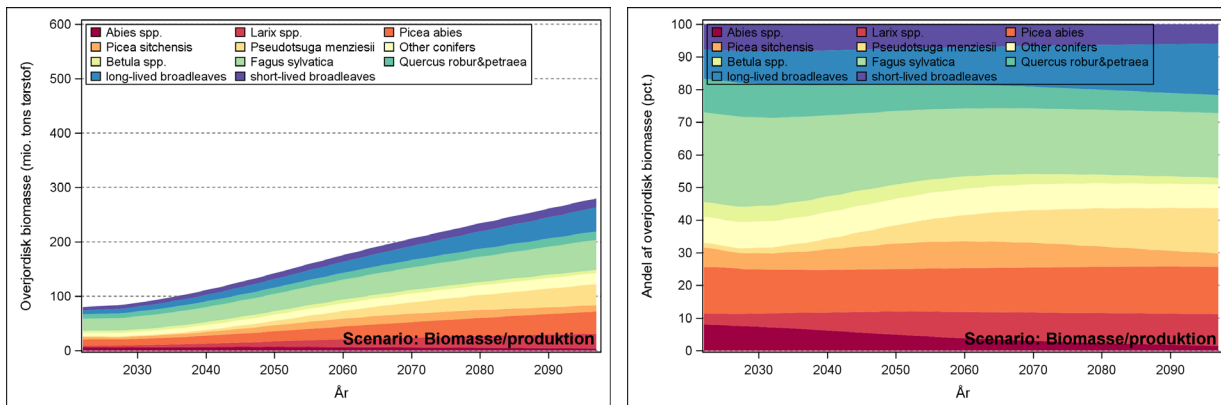
Tabel 2.3. Årlig hugst i Business-as-Usual (X) scenariet. I 2050 fældes der omkring 5,3 mio. kubikmeter træ i skovene. Af den samlede vedmasse udnyttes hoveddelen til energi.

Periode	Skovareal ha	Vedmasse	Energi	Fiber	Emballage	Plader	Konstruktion
		1.000 m ³ /år	1.000 tons tørstof/år				
2023-2027	642.976	4.938	1.144	528	98	34	353
2028-2032	694.728	3.992	887	425	79	27	274
2048-2052	895.661	5.324	1.199	525	76	25	353
2068-2072	979.261	6.673	1.536	647	88	34	411
2088-2092	1.062.861	7.606	1.755	742	91	38	478

2.5.3 Biomasse/produktion

I Biomasse/produktion scenariet rejses der frem mod 2045 250.000 ha skov med en overvægt af nåletræer. Der udlægges ikke urørt skov i skovrejsningen og modellen forudsætter en omlægning af træindustrien til bedre at udnytte rester i form af eksempelvis skaller til varige træprodukter særligt i form af træplader. Modellen forudsiger en stor stigning i skovarealet men kun en mindre stigning i skovenes kulstoflager (Figur 2.13, venstre) som følge af en samtidigt stigende hugst.

Som følge af scenariets fokus på nåletræer er særligt kulstoflagret i douglasgran stigende, mens der i modsætning til de andre scenarier sker en svag stigning i kulstoflagerets andel af rødgran og sitkagran (Figur 2.13, højre).

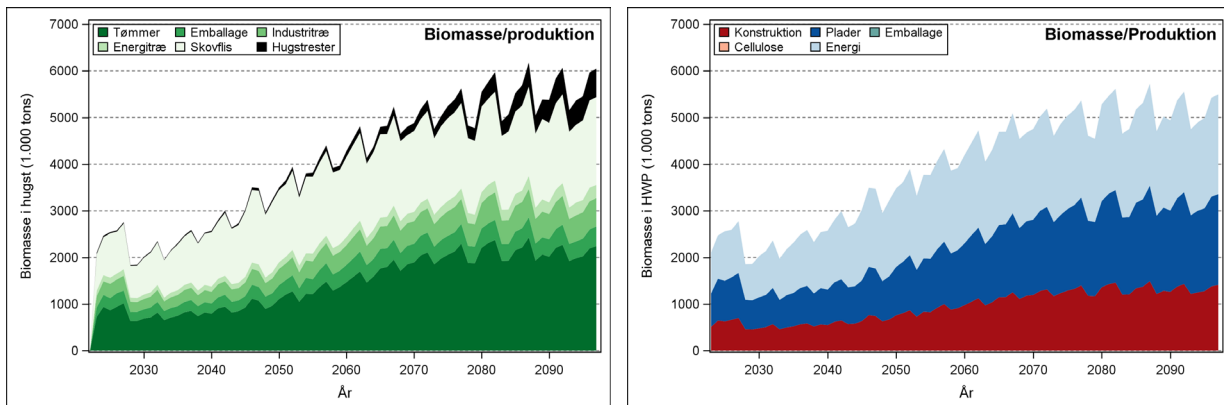


Figur 2.13. Artsfordelingen i Biomasse/produktion scenariet udtrykt i overjordisk biomasse (venstre) og dennes procentuelle fordeling (højre). I scenariet forventes en skovrejsning på 250.000 ha frem til 2045 som resultat af de grønne trepartsforhandlinger, som i scenariet overvejende sker med hurtigt voksende nåletræsarter.

I Biomasse/produktion scenariet fældes der i 2050 omkring 6,6 mio. kubikmeter træ i skovene årligt, svarende til 3,4 mio. tons tørstof i energitræ og færdige produkter (Figur 2.14, Tabel 2.4). Dette svarer til en 50 pct. stigning i forhold til den nuværende hugst.

Tømmeret udgør 32-40 pct. af hugsten og andelen er, efter et mindre fald i den første del af simuleringerne, stigende (Figur 2.14, venstre) som følge af at de hurtigt voksende nåletræer i stigende grad bidrager med træ i dimensioner, der kan aflægges som tømmer. Af samme årsag er energitræ-andelen (aflagt som skovflis eller rundtræ til energi, 40-49 pct.) stigende i begyndelsen af simuleringerne og falder herefter igen til at udgøre ca. 40 pct. af den samlede vedmasse. Mængden, der aflægges til industritræ, er nogenlunde konstant gennem simuleringerne, mens andelen af træ til emballage er faldende.

En slående forskel til den nuværende praksis er at der i Biomasse/produktion scenariet ikke forarbejdes træ til emballage eller træfibermasse, idet det forudsættes, at disse sortimenter fremtidigt kan oparbejdes til forskellige former for limtræs- eller plade produkter som eksempelvis CLT (cross-laminated-timber) og OSB (Oriented Strand Board)-plader (Figur 2.14, højre). I de endelige produkter anvendes 39-48 pct. af biomassen til energiformål i form af bark og træaffald fra forarbejdningen, mens 22-26 pct. ender som konstruktionstræ og 30-35 pct. som plader. Andelen af træ, der anvendes til energi, er fortsat høj, bl.a. fordi vi forudsætter fuld udnyttelse af hugstrester i form af skovflis til energiformål.



Figur 2.14. Biomasse i hugsten (venstre) og i energi og produkter (højre) i scenariet Biomasse/Produktion. Fordelingen afspejler scenariernes forudsætninger om hvordan hugsten bruges i industrien. I Biomasse/produktion scenariet udlægges skovrejsning ikke til urørt skov og der forventes en omfordeling af biomasse til længelevende træprodukter.

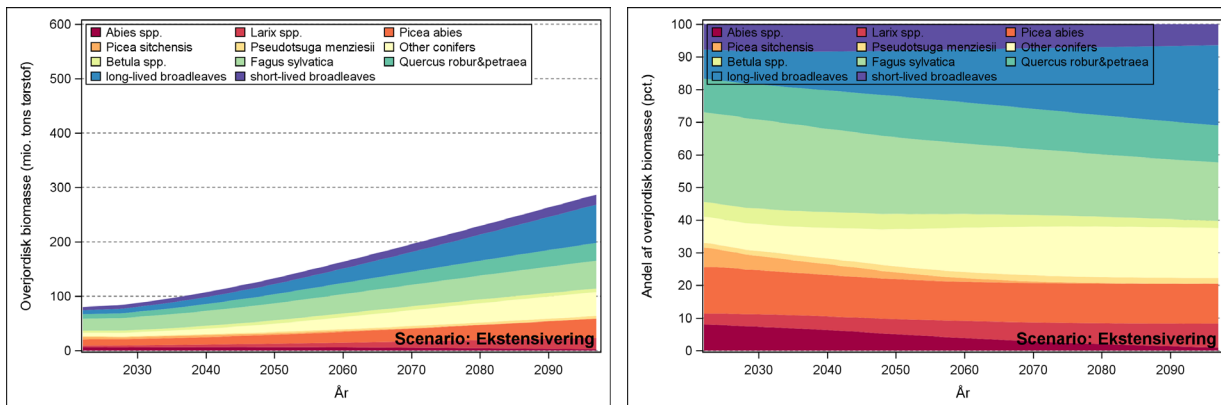
Tabel 2.4. Årlig hugst i Biomasse/produktion scenariet. I 2050 fældes der omkring 6,6 mio. kubikmeter træ i skovene. Scenariet indbefatter at mest muligt træ anvendes til længelevende træprodukter.

Periode	Skovareal ha	Vedmasse	Energi	Fiber	Emballage	Plader	Konstruktion
		1.000 m ³ /år	1.000 tons tørstof/år				
2023-2027	642.976	4.938	1.001	0	0	873	629
2028-2032	695.152	4.028	876	0	0	678	493
2048-2052	895.661	6.621	1.665	0	0	1.023	745
2068-2072	979.261	9.383	1.977	0	0	1.644	1.215
2088-2092	1.062.861	10.381	1.990	0	0	1.814	1.313

2.5.4 Ekstensivering

I Ekstensivering scenariet rejses der frem mod 2045 250.000 ha skov med en overvægt af eg og andre længelevende træarter. Der udlægges urørt skov i skovrejsningen som angivet i resultatet af de Grønne trepartsforhandlinger, og modellen forudsætter en anvendelse af træet som for nuværende. Modellen forudsiger en stor stigning i skovarealet, men kun en mindre stigning i skovenes kulstoflager (Figur 2.15) som følge af anvendelsen af mere langsomt voksende træarter og en fortsat hugst på størstedelen af arealet.

Som følge af scenariets fokus på skovrejsning med løvtræarter er kulstoflagret særligt i længelevende løvtræarter stigende, mens der sker en nedgang i kulstoflagerets andel af rødgran og sitkagran, men også bøg som ikke anvendes i skovrejsningen (Figur 2.15, højre).

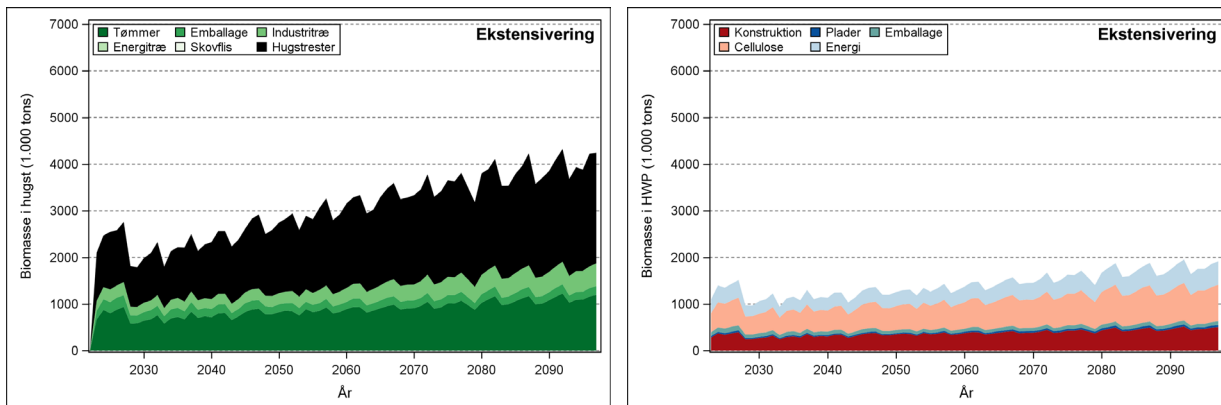


Figur 2.15. Artsfordelingen i Ekstensivering scenariet, hvor der forventes en skovrejsning på 250.000 ha frem mod 2045 som resultat af de grønne trepartsforhandlinger og at skovrejsningen sker med eg og andre længelevende træarter.

I Ekstensivering scenariet fældes der i 2050 omkring 5,2 mio. kubikmeter træ i skovene årligt, svarende til 1,3 mio. tons tørstof i energitræ og færdige produkter (Figur 2.16, Tabel 2.5). Dette svarer til en mindre stigning i forhold til den nuværende hugst og nogenlunde til Business-as-Usual (X) scenariet, hvilket afspejler at skovrejsningen i mange år har været fokuseret på netop hjemmehørende løvtræarter med en mindre hurtig vækst.

I Ekstensivering scenariet udgør tømmeret 62-66 pct. af den aflagte vedmasse. Den høje andel af tømmer skyldes, at der ikke aflægges skovflis eller energitræ (Figur 2.16, venstre) som følge af et øget fokus på biodiversitetsbeskyttelse, hvor mindre dimensioner af træ ikke udnyttes, men efterlades i skoven. Industritræet udgør 20-27 pct. af hugsten mens træ til emballage udgør 12-18 pct.

I de endelige produkter anvendes 24-26 pct. af biomassen til energiformål i form af bark og træaf-fald fra forarbejdningen mens 26-28 pct. ender som konstruktionstræ (Figur 2.16, højre). Den største andel af træet (39-42 pct.) ender herved som fiberprodukter idet en stor del af fraskæret ved forarbejdningen af konstruktionstræ genanvendes som cellulose-træ.



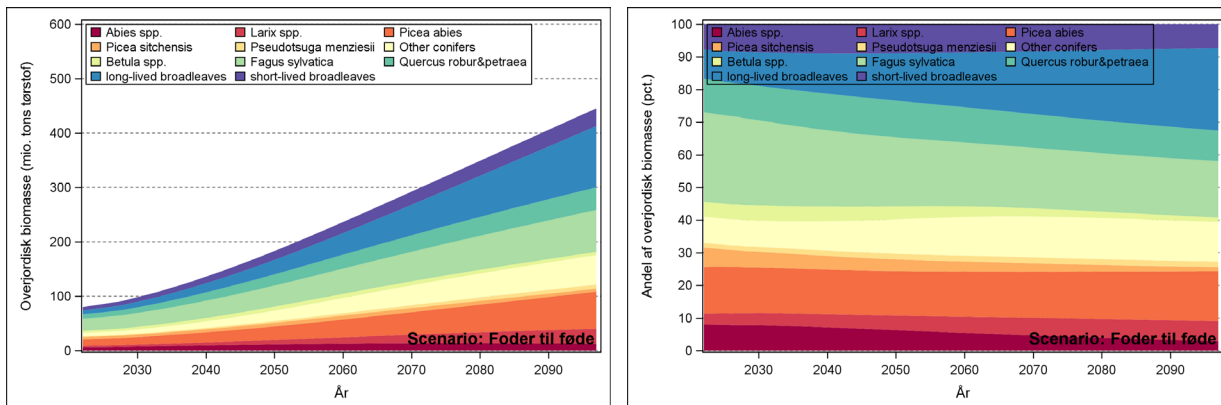
Figur 2.16. Biomasse i hugsten (venstre) og i energi og produkter (højre) for Ekstensivering scenariet. Fordelingen afspejler scenariernes forudsætninger om hvordan hugsten bruges i industrien.

Tabel 2.5. Årlig hugst i Ekstensivering scenariet. I 2050 fældes der omkring 5,2 mio. kubikmeter træ i skovene.

Periode	Skovareal ha	Vedmasse	Energi	Fiber	Emballage	Plader	Konstruktion
		1.000 m ³ /år	1.000 tons tørstof/år				
2023-2027	642.976	4.938	347	528	98	34	353
2028-2032	694.834	3.976	260	425	78	27	274
2048-2052	895.661	5.204	298	513	70	25	346
2068-2072	979.261	6.516	371	629	73	36	398
2088-2092	1.062.861	7.502	457	721	74	42	463

2.5.5 Foder-til-Føde

I Foder-til-Føde scenariet, udlægges en stor del af det eksisterende skovareal til urørt skov og det antages, at der frem mod 2045 rejses 250.000 ha med en overvægt af eg og længelevende løvtræarter. Modellen forudsiger en stor stigning i skovarealet og i skovenes biomasse for alle arter (Figur 2.17). I dette scenarie er andelen af længelevende løvtræarter (som ær og kirsebær) stærkt stigende og udgør næsten en fjerdedel af skovenes kulstoflager ved simuleringernes afslutning efter 75 år (Figur 2.17, højre). Forøgelsen sker på bekostning af bøgens dominans i skovbilledet, der falder fra at udgøre omkring en tredjedel til at udgøre under en femtedel af den samlede kulstofpulje i levende biomasse. Også for dette scenarie er rødgrans andel af kulstofpuljerne konstant.

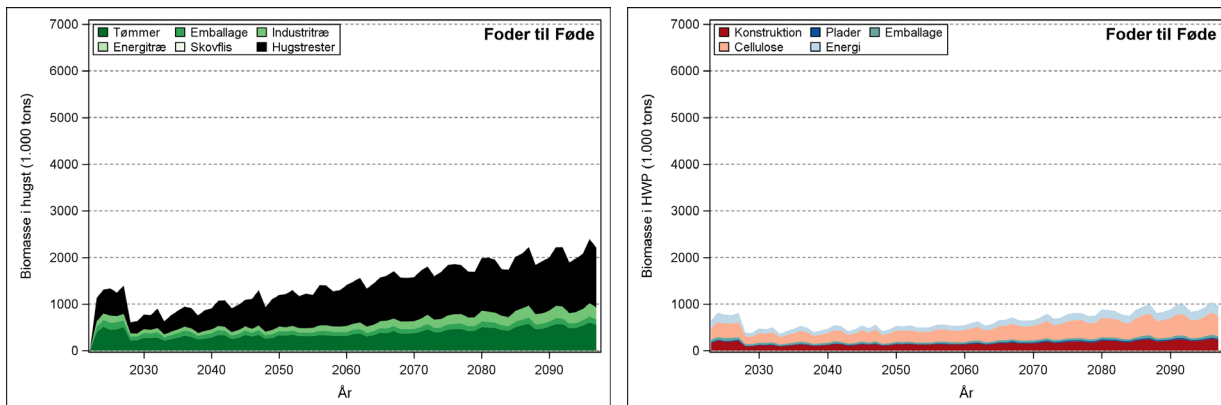


Figur 2.17. Artsfordelingen i Foder-til-Føde scenariet udtrykt i overjordisk biomasse (venstre) og dennes procentuelle fordeling (højre). I scenariet udlægges en stor del af skoven til urørt skov, og der forventes en skovrejsning på 250.000 ha frem mod 2045 som resultat af de grønne trepartsforhandlinger.

I Foder-til-Føde scenariet fældes der i 2050 omkring 2,1 mio. kubikmeter træ i skovene årligt, svarende til 0,9 mio. tons tørstof i energitræ og færdige produkter (Figur 2.18, Tabel 2.6). I forhold til den nuværende hugst er der tale om mere end en halvering, som dels skyldes at en stor del af skovene udlægges til urørt skov, men også at en mindre del af vedmassen udnyttes som følge af en generel ekstensivering i brugen af træ fra skovene.

En slående forskel til standard Business-as-Usual scenariet er at der ikke aflægges skovflis eller energitræ, som led i en generel ekstensivering af skovdriften for at understøtte biodiversitet og at denne del af hugsten derfor efterlades i skoven (Figur 2.18, venstre). Tømmeret udgør 58-63 pct. af den aflagte vedmasse og er faldende i løbet af fremskrivningen til fordel for særligt industritræet. Dette er forventeligt, da den omfattende skovrejsning bidrager til puljen af vedmasse i mindre dimensioner, der ikke egner sig til tømmer eller savværkskævler.

I de endelige produkter anvendes 19-24 pct. af biomassen til energiformål i form af bark og træaf-fald fra forarbejdningen, mens 24-26 pct. ender som konstruktionstræ (Figur 2.18, højre, Tabel 2.6). Den største andel (39-47 pct.) anvendes til industriel fibermasse. Her skal det dog erindres at kun lidt under halvdelen af træmassen udgøres af cellulose, mens resten består af bl.a. hemicellulose og lignin. Hvor fibermassen udvindes ved kemisk pulping fjernes ligninen og afbrændes i dag typisk, mens man ved (termo)mekanisk pulping (også kaldet slibemasse) skiller træet i fibre mekanisk uden fjernelse af ligninen. Hvor stor en del af den industrielle fibermasse, der herved afbrændes, vides ikke.



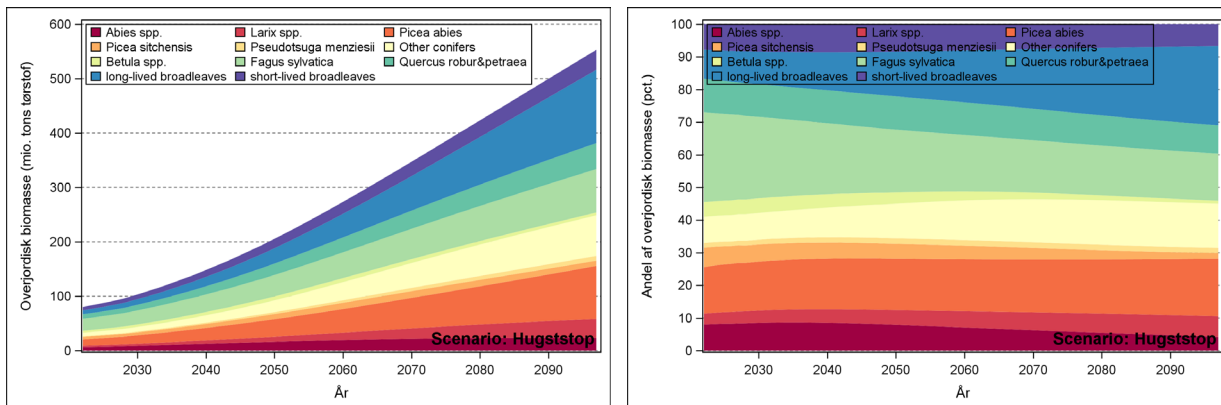
Figur 2.18. Biomasse i hugsten (venstre) og i energi og produkter (højre) i scenariet Foder-til-Føde. Fordelingen afspejler scenariernes forudsætninger om hvordan hugsten fraregnet hugstresterne i venstre figur bruges i industrien i højre figur. I Foder-til-Føde scenariet forventes en stor del af skovene udlagt til urørt skov og der aflægges ikke energitræ i skovene.

Tabel 2.6. Årlig hugst i Foder-til-Føde scenariet. I 2050 fældes der omkring 2,1 mio. kubikmeter træ i skovene. Al energitræ kommer fra forarbejdningen af gavtræ, da der ikke i skovene aflægges træ til energi.

Periode	Skovareal ha	Vedmasse 1.000 m ³ /år	Energi	Fiber	1.000 tons tørstof/år		
					Emballage	Plader	Konstruktion
2023-2027	642.976	2.513	185	299	60	20	197
2028-2032	726.240	1.444	91	188	41	14	108
2048-2052	895.661	2.113	93	221	35	13	130
2068-2072	979.261	3.054	135	321	43	24	168
2088-2092	1.062.861	3.817	190	413	48	28	219

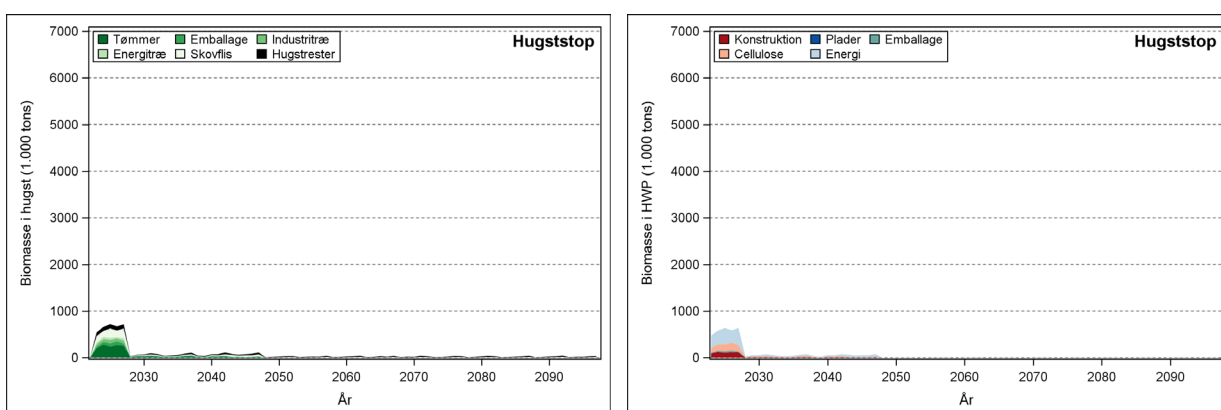
Hugststop

I det supplerende Hugststop scenarium rejses der 250.000 ha skov frem mod 2045 med en overvægt af eg og andre længelevende træarter, men der sker alene hugst i de statsskove, der i forbindelse med Natur- og Biodiversitetspakken blev udlagt til urørt skov eller naturnationalpark. Modellen forudsiger en stor stigning i skovarealet, og i skovenes kulstoflager (Figur 2.19). Scenariet medfører en forøgelse af kulstofpuljen for alle træarter, men andelen af særlig bøg mindskes og længelevende løvtræarter øges.



Figur 2.19. Artsfordelingen i Hugststop scenariet, hvor der forventes en skovrejsning på 250.000 ha frem mod 2045 som resultat af de grønne trepartsforhandlinger og at skovrejsningen sker med eg og andre længelevende træarter.

I Hugststop scenariet fældes der fortsat træ frem til 2047 som et led i konverteringen af skovene udlagt til urørt skov og naturnationalparker (Figur 2.20, Tabel 2.7). Hugsten er dog yderst begrænset efter den første del af konverteringen er gennemført i den første 5-års periode og retter sig mest mod fjernelsen af bl.a. sitkagran og contortafyr. Der er efterfølgende af modeltekniske årsager en lille hugst, der skyldes at modellen forudser en ikke-sandsynlig fremspiring af en række træarter som ikke naturligt kan etablere sig i Danmark (bl.a. eucalyptus og kork-eg). Vi har valgt at modellen fælder disse når de optræder, hvilket giver anledning til en mindre hugst, der dog ikke anvendes til træprodukter.



Figur 2.20. Biomasse i hugsten (venstre) og i energi og produkter (højre) i Hugststop scenariet. Hugststop scenariet indeholder en vis hugst i arealer udlagt til urørt skov og Naturnationalpark frem til 2027 som et led i en konverteringsproces. Efter konverteringsprocessen er tilendebragt, vil der ikke være hugst af træ i Danmark.

Tabel 2.7. Årlig hugst i Hugststop scenariet. I 2050 fældes kun en smule træ i skovene, der alene anvendes til energi. Dette skyldes at EFISCEN-Space modellen forudsætter en vis indvækst af træarter, som næppe vil kunne vokse i Danmark og som vi derfor af modeltekniske årsager lader modellen fælde.

Periode	Skovareal ha	Vedmasse	Energi	Fiber	Emballage	Plader	Konstruktion
		1.000 m ³ /år			1.000 tons tørstof/år		
2023-2027	642.976	1.270	309	136	23	7	107
2028-2032	694.728	124	23	16	4	1	9
2048-2052	895.661	30	6	0	0	0	0
2068-2072	979.261	31	6	0	0	0	0
2088-2092	1.062.861	32	7	0	0	0	0

2.6 Sammenfatning af de fem hovedscenarier

De fem hovedscenarier resulterer i ganske forskellige mængder af biomasse til træprodukter og energi. Frem til 2050 afspejler resultaterne for Business-as-Usual (X) scenariet, at den ekstra skovrejsning i forhold til Business-as-Usual scenariet kun har en lille betydning for biomasseproduktionen (Tabel 2.8). Derimod har anvendelsen af træ fra skoven ganske stor betydning. Allerede i 2030 giver Biomasse/produktion scenariet 20% mere biomasse fra skoven, hovedsageligt som følge af den mere intense udnyttelse af hugstaffald til energiformål. I 2050 er forøgelsen steget til 64 pct. og i 2070 til 200 pct. i forhold til Business-as-Usual scenariet. Modsætningsvis giver Ekstensivering og Foder-til-Føde scenarierne i 2030 et fald i den samlede biomasse fra skoven på hhv. 47 og 74 pct. i forhold til Business-as-Usual scenariet, hovedsageligt fordi der i disse scenarier ikke udtages træ til energi fra skoven. Faldet i forhold til Business-as-Usual scenariet er nogenlunde uændret i 2050 og 2070, hvilket indikerer at man ved denne skovforvaltning ikke opnår en øget produktion af biomasse fra skovene på trods af et kraftigt forøget skovareal (Tabel 2.8).

Også mængderne af træ som kan anvendes i det biogene byggeri påvirkes af forskellene mellem de forskellige scenarier, men forskellene er længere tid om at manifestere sig for nogle af scenarierne. Således er der for Business-as-Usual (X) og Ekstensivering scenarierne ikke nogen betydelig forskel til Business-as-Usual scenariet på mængden af træ, der anvendes til plader eller konstruktionstræ hverken i 2030 eller 2050. I 2070 er der en mindre stigning på 6-8 pct., hvilket peger på, at det særlig for løvtræ-domineret skovrejsning tager lang tid før træet opnår en størrelse, hvor det kan anvendes til andre formål end energi og cellulosemasse. Derimod er der en umiddelbar effekt af at store dele af skovarealet henlægges til urørt skov i Foder-til-Føde scenariet, hvor mængden af træ til byggeri umiddelbart falder med 60 pct. i forhold til Business-as-Usual scenariet. I 2070 og 2090 er faldet reduceret til hhv. 53 og 44 pct. som følge af, at skoven i scenariet dyrkes på skovrejsningsarealet.

Modsætningsvis viser resultaterne, at der på endog helt kort sigt kan opnås en væsentlig forøgelse af mængden af træ til byggeriet, hvis en større andel af træet end i dag kanaliseres til produktion af særligt plader. I Biomasse/produktion scenariet stiger andelen af træ, som kan anvendes i det biogene byggeri, således med 385 pct. i 2030 i forhold til Business-as-Usual scenariet. Denne stigning øges til 469, 697 og 712 pct i 2050, 2070 og 2090. Dette forudsætter imidlertid en anvendelse af nye teknologier, som ikke er til rådighed i dag.

Tabel 2.8. Sammenfatning af mængderne af træprodukter og energi ved de fem hovedscenarier (eksklusive Hugststop). Tabellen sammenfatter mængden af træprodukter i tabellerne Tabel 2.2-Tabel 2.5.

Scenarium	Produkt	Periode			
		2028-2032	2048-2052	2068-2072	2088-2092
Business-as-Usual	Energi	887	1.121	1.324	1.485
	Cellulose	428	517	573	598
	Emballage	79	72	70	67
	Plader	27	24	30	31
	Konstruktion	276	353	381	408
	Sum	1.698	2.087	2.378	2.590
Business-as-Usual(X)	Energi	886	1.203	1.541	1.757
	Cellulose	426	525	646	743
	Emballage	79	76	89	92
	Plader	27	25	34	38
	Konstruktion	275	353	411	478
	Sum	1.693	2.182	2.721	3.109
Biomasse/produktion	Energi	876	1.665	1.977	1.990
	Cellulose	0	0	0	0
	Emballage	0	0	0	0
	Plader	678	1.023	1.644	1.814
	Konstruktion	493	745	1.215	1.313
	Sum	2.047	3.433	4.836	5.117
Ekstensivering	Energi	260	298	371	457
	Cellulose	425	513	629	721
	Emballage	78	70	73	74
	Plader	27	25	36	42
	Konstruktion	274	346	398	463
	Sum	1.065	1.252	1.507	1.757
Foder-til-Føde (supplerende)	Energi	91	93	135	190
	Cellulose	188	221	321	413
	Emballage	41	35	43	48
	Plader	14	13	24	28
	Konstruktion	108	130	168	219
	Sum	442	492	690	899

3 Diskussion

3.1 Træstrømme

De fem scenarier (samt det supplerende Hugststop scenarium) i denne rapport leder til forskellige fremtidige træstrømme. Med udgangspunkt i Business-as-Usual (X) scenariet, medfører den lavere realiserede skovrejsning i BAU scenariet i 2050 en reduktion af hugsten på ca. 6 pct, mens fokus på mere hurtigt voksende nåletræarter og fravalg af urørt skovrejsning medfører forøgelse af hugsten på 24 pct. i Biomasse/produktion scenariet. Ekstensivering af driften i Ekstensivering og Foder-til-Føde scenarierne medfører i 2050 en reduktion i hugsten på hhv. 2 og 61 pct. Reduktionen i Ekstensivering scenariet skal ses i lyset af, at der i både Business-as-Usual (X) og Ekstensivering scenariet anvendes en overvægt af mere langsomt voksende træarter i skovrejsningen.

Som følge af at skovrejsningen antages at blive gennemført løbende frem til 2045/2089, og at træerne forventes at vokse langsomt de første år efter plantning, manifesterer forskellene mellem scenarierne sig ganske langsomt. I 2090, ved simuleringernes afslutning, leder den lavere realiserede skovrejsning i BAU scenariet til en reduktion i hugstmængderne på 16 pct. i forhold til Business-as-Usual (X) scenariet, mens produktionsscenarioet leder til en forøgelse af træhugsten på 36 pct. Ekstensivering og Foder-til-føde-scenarierne leder i 2090 til en reduktion af hugstmængderne på hhv. 1 og 50 pct. i forhold til Business-as-Usual (X) scenariet.

Forskellene mellem scenarierne omfatter ikke alene forskelle mellem træarter og tilplantningstakt, men også hvordan træet anvendes efterfølgende. Særligt Biomasse/produktion scenariet illustrerer en tænkt fremtid, hvor industrien er bedre til at anvende træet til produkter som konstruktionstræ eller neddelt i form som plader. Dette medfører en reduktion i andelen af energitræ som udgør 39-48 pct. i Biomasse/produktion scenariet i forhold til en andel på 52-57 pct. i Business-as-Usual (X) scenariet. Samtidig kan 52-61 pct. af vedmassen i Biomasse/produktion scenariet indgå i bygningsmassen som konstruktionstræ eller plader, mens den samme andel for Business-as-Usual (X) scenariet er 16-18 pct.

I de forskellige scenarier, der arbejder med en ekstensivering af skovdriften, er andelen af træ, der anvendes til energiformål lavere end i Business-as-Usual og Business-as-Usual (X) scenarierne fordi det antages, at der udtages mindre hugstaffald ved skovningen end ved gældende praksis. Således er andelen af træ der anvendes til energiformål 24-26 pct. i Ekstensivering scenariet og 19-24 pct. i Foder-til-Føde scenariet.

En nylig undersøgelse [52] har kortlagt træstrømmene fra danske skove og importeret træ til industri, endeligt forbrug og eksport. I 2018 var den samlede skovhugst ifølge Danmarks Statistik omkring 3,7 mio. m³ [10]. Hertil kommer der ifølge statistik fra blandt andet Energistyrelsen [53] omkring 2,9 mio. m³, der ikke er opgjort, men som forventes at komme fra bl.a. private haver, parker og det åbne land. Af den indenlandske skovhugst blev cirka 58 pct. direkte brugt til energi, mens 42 pct. (1,55 mio. m³) gik til forarbejdning som tømmer. Som tidligere beskrevet vil kun en mindre del af det træ, der sendes til forarbejdning som tømmer, ende i træprodukter. Det samlede indenlandske træforbrug (høst + import – eksport) var i 2018 ca. 17,7 mio. m³, hvoraf mere end 15 mio. m³ blev brugt til energi. Selv hvis træ fra andre kilder end skove (såsom landskabspleje) inkluderes, er Danmark således ifølge undersøgelsen afhængig af import svarende til mere end 60 pct. af træforsyningen.

De forskellige scenarier imødekommer i varierende grad efterspørgslen efter træ. Hvis man forudsætter en uændret efterspørgsel, imødekommer Business-as-Usual scenariet i 2050 28 pct. af den samlede efterspørgsel efter træ. Det større skovareal i Business-as-Usual (X) og Ekstensivering scenarierne leder til, at en lidt højere andel af forbruget kan høstes i danske skove (29-30 pct.), mens det mere intensive skovbrug i Biomasse/produktion scenariet leder til at 37 pct. af forbruget kan imødekommes med indenlandske ressourcer. Derimod leder omfattende udlæg af urørt skov i Foder-til-Føde scenariet til at kun 12 pct. af forbruget kan mødes af træ fra danske skove.

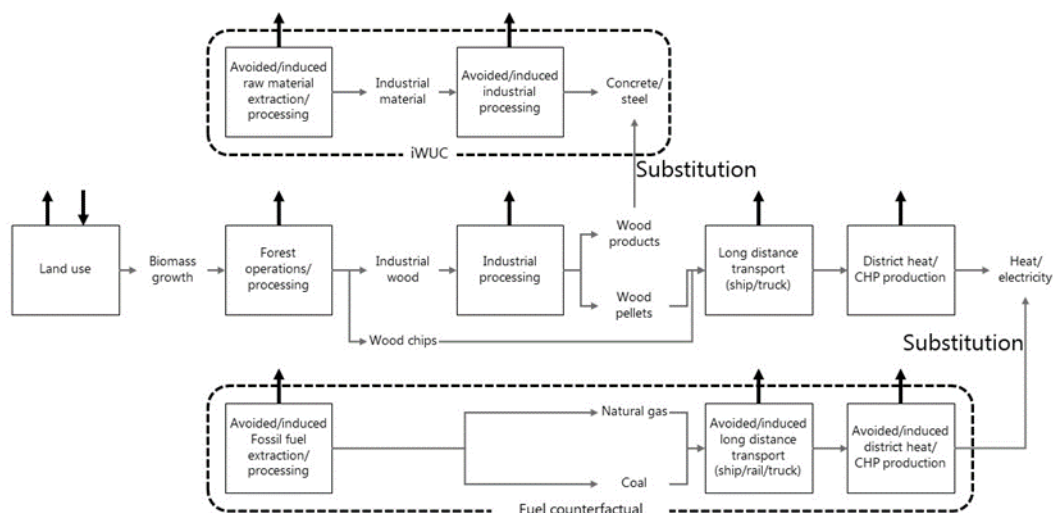
En meget stor del af importen anvendes til energi. Imidlertid forventes denne del gradvis erstattet med energi fra vind og sol. Hvis man på denne baggrund ser på hvor stor del af råtræimporten til andre formål end energi, der kan erstattes med indenlandsk træproduktion, danner der sig et andet billede. Med forudsætningen om at forbruget er uændret i 2050 kan Business-as-Usual scenariet imødekomme 69 pct. af den indenlandske efterspørgsel efter gavntræ (træ til cellulose, emballage, træplader og konstruktionstræ). Det tilsvarende tal er for Business-as-Usual (X) 70 pct., for Foder-til-Føde 27 pct., for Biomasse/produktion scenariet 130 pct. og for Ekstensivering Scenariet 69 pct.

Analysen tyder på, at vi med fokus på træproduktion særligt på de nye skovrejsningsarealer kan møde en stor del af den indenlandske efterspørgsel efter biogene materialer til byggeriet.

3.2 Scenariernes effekt på klimaet

I dette studie har fokus været på i hvilken grad fremtidig efterspørgsel efter biogene byggematerialer kan imødekommes med nationalt produceret træ. Selvom den underliggende problemstilling handler om at imødegå truende klimaforandringer ved at bruge lav-emissionsmaterialer i byggeriet, er der ikke gjort forsøg på at omsætte scenarierne til effekten på klimaet.

Beregningen af effekten på klimaet ved de forskellige scenarier er kompleks og omfatter kulstofopbygningen i økosystemerne, udledningerne forbundet med hugst, oparbejdning og processering af de biogene materialer, lagring af kulstof i træprodukterne og de indirekte effekter forbundet med at erstatte mere klima-tunge materialer og fossile energiformer med biogene (Figur 3.1).



Figur 3.1. Model for beregning af klimaeffekten ved skovdyrkning og anvendelse af træressourcer. Modellen inkluderer direkte udledninger fra hele produktkæden, herunder skovens vækst og de nødvendige skovdriftsaktiviteter for at producere træprodukter og energi. Modellen tager også højde for udledninger i forbindelse med bearbejdning af træ, transport samt energiproduktion i fjernvarmeanlæg og kraftvarmeværker. Modellen omfatter ydermere indirekte udledninger som følge af markedsdrevne ændringer i arealanvendelse (indirect Land Use Change, iLUC), træanvendelse (indirect Wood Use Change, iWUC) og brændstofforbrug (indirect Fuel Use Change, iFUC) (gengivet fra [54]).

De fem scenarier fremstillet i dette studie giver anledning til store forskelle i emissioner og processer i de forskellige dele af diagrammet i Figur 3.1. I Biomasse/produktion scenariet er opbygningen af kulstof i skov-biomassen i diagrammets venstre side moderat (Figur 2.7), mens mængden af kulstof, der omsættes til produkter, stiger kraftigt (Figur 2.8, venstre) som følge af øget fokus på hurtigt voksende nåletræer med en højere udnyttelsesgrad ved bearbejdningen til træprodukter. Modsat sker der i scenarierne med store andele urørt skov en stor opbygning af kulstof i skovøkosystemet, mens kun en meget begrænset mængde kulstof ender i produkter. Når træerne i den urørte skov vokser, og nogle af dem ikke fældes som en del af skovdriften, stiger konkurrencen mellem træerne, hvilket leder til større dødelighed og derfor til en stigende mængde kulstof i dødt ved (Figur 2.8, højre), men herved også stigende udledninger fra omsætningen af det døde ved. Ved lang tids urørthed vil skoven nærme sig en ligevægtstilstand, hvor udledningerne svarer til optaget af CO₂ og skovens klimavirkning derfor er minimal [6, 55].

Når træ forlader skoven som træprodukter, repræsenterer de stadig et kulstoflager. Der er ikke i studiet her gjort forsøg på at kvantificere virkningen af scenarierne på kulstoflagret i HWP. Det er dog meget forskelligt, hvordan træprodukterne påvirker CO₂-balancen og herigennem klimaet. Helt generelt opdeles påvirkningen af CO₂-balancen fra træprodukter i to forskellige typer:

1. Lagereffekt: Effekten af at kulstoffet, så længe det er bundet i et træprodukt, ikke udledes til atmosfæren i form af CO₂
2. Substitutionseffekt: Effekten af at træet fortrænger andre og ofte mere klimabelastende materialer og energiformer.

For hvad angår lagereffekten er der store forskelle mellem forskellige sortimenter. Energitræ i form af skovflis og brænde lagrer således kun kulstoffet i kort tid (uger til få år) før det atter udledes ved afbrænding, mens savværkstømmer kan lagre kulstoffet i mange år, når det indbygges i huse eller møbler. Træ, der anvendes til cellulosemasse (papir), har i reglen en lagereffekt, som kan sammenlignes med energitræ, mens træ, der anvendes til spån- og OSB-plader kan have en lagereffekt som ligner savværkstømmer. Afviklingen af kulstofpuljen i et givet træprodukt og herved lagereffekten beskrives i reglen med en henfaldsfunktion med en halveringstid, der varierer mellem de forskellige træprodukter. For henholdsvis savværkstømmer, plader og cellulosetræ antages puljernes halveringstider at være hhv. 35, 25 og 2 år i klimarapporteringen til FN [56].

Substitutionseffekten handler om, at træ i mange tilfælde erstatter andre råvarer med en anden klimaprofil. I reglen antages det i analyser af træets klimaeffekt (LCA-analyser), at samfundets efterspørgsel efter varer og tjenester f.eks. til bygninger og møbler, ikke påvirkes af ændret udbud i træ fra danske skove. Dette synes rimeligt med tanke på, at træ kun udgør en mindre del af byggeriets samlede værdi. Det må derfor antages, at der med et øget eller mindsket udbud af træ på markedet, produceres et uændret udbud bygninger eller møbler. Afhængig af priselasticiteten vil en del af efterspørgslen imidlertid skifte mellem træ og andre produkter, når udbuddet af træ ændres. Et sådant skift kan føre til ændrede CO₂-udledninger, da mange af alternativerne til træ har en højere CO₂-udledning i deres produktionskæde end træ. Således kan de produkter, der erstatter træ, i nogle tilfælde have CO₂-udledninger, der er mere end 10 gange højere end træ, og i andre tilfælde er de næsten de samme. Dette udtrykkes almindeligvis som en substitutionsfaktor, der giver kulstofbesparelser som en faktor for kulstoffet i træet, der erstattes [57]:

$$SF = \frac{GHG_{non-wood} - GHG_{wood}}{WU_{wood} - WU_{non-wood}}$$

hvor SF angiver substitutionsfaktoren, GHG_{wood} og $GHG_{non-wood}$, refererer til drivhusgasemissioner (GHG) genereret fra brugen af henholdsvis træ- og ikke-træbaserede materialer udtrykt i kul-

stofmængder (C) og $WU_{non-wood}$ og $WU_{non-wood}$ angiver mængden af træ, der anvendes i henholdsvis træbaserede og ikke-træbaserede alternativer, også udtrykt i kulstof (C) indeholdt i træet. Sagt på en anden måde, angiver en substitutionsfaktor på 2 for træ i forhold til beton, at man har undgået udledninger på 2 kg CO₂ for hvert kilo CO₂, der er bundet i træet.

Et tidligere studie [58] viser, at den gennemsnitlige substitutionsfaktor for produkter, der erstattes med træ er 1,3 for konstruktionsdele i bygninger, f.eks. bjælker og trærammer, 1,6 til ikke-strukturelle dele f.eks. vinduer, gulve, beklædning og 1-1,5 til andre produkter, f.eks. kemikalier, emballage og papir. For savværkstræ har tidligere studier anvendt en substitutionsfaktor på 1,4 til strukturelle og ikke-strukturelle bygningsdele og 1,2 for paneler og plader fremstillet af industrielle rester og 1 for celluloseprodukter såsom papir [58]. For energitræet er substitutionsfaktoren for hhv. kul og naturgas 0,4 og 0,15 [54]. En række studier viser at substitutionsfaktorerne kan variere ganske meget fra produkt til produkt og fra én forsyningskæde til den anden [54, 57-59].

De fem scenarier præsenteret i dette studie vil givet have ganske forskellige profiler med hensyn til produktsubstitution. I scenarierne med store andele af urørt skov forventes træ til byggeri og energi erstattet af træ fra andre egne og for en vis del af andre og typisk mere klimabelastende råvarer. Derimod vil særligt Biomasse/produktion scenariet lede til en større produktion af træ, som samtidig allokeres til produkter med en lang levetid og større substitutionseffekt.

3.3 Indirekte effekter

Valg, der træffes for forvaltningen af Danmarks areal, har effekter, der rækker ud over kulstofpuljerne i skoven og i de umiddelbare nære sektorer. Disse effekter kaldes "indirekte effekter" og omfatter land-substitution (iLUC), produkt-substitution (iWUC) og energi-substitution (iFUC). De indirekte effekter er defineret som markedsreaktioner, der sker som følge af ændringer i produktudbuddet fra eksempelvis land- og skovbrug.

Eksempelvis kan udlæg af urørt skov medføre, at efterspørgslen efter træ overstiger udbuddet. Det vil i reglen medføre en marginal prisstigning på træ, hvilket kan medføre, at der tages nye ikke tidligere huggede skove ind i drift, hvis træet ikke erstattes af andre produkter. Dette vil påvirke CO₂-udledningerne, da udvidelse af det forvaltede skovareal, hvorfra der hugges træ for at imødekomme efterspørgslen (her betegnet skov iLUC) vil formindske kulstoflagret i disse områder.

Indirekte effekter i form af iLUC kan også opstå, når landbrugsjord tages ud af drift, for eksempel ved skovrejsning. Her sker iLUC fordi der ved udtag af landbrugsjord vil ske et øget pres på fødevaremarkedet, hvilket kan føre til iLUC i form af f.eks. udvidelse af landbruget til skovområder an-

dre steder i verden, eller det kan medføre at der bliver produceret mere effektivt på de tilbageværende landbrugsarealer. Typisk vil skovrejsning på lavproduktive områder kun medføre iLUC i en grad, der kan opfanges ved produktionsforøgelse på de resterende jorde, hvorimod skovrejsning på højproduktiv landbrugsjord vil medføre iLUC i størrelsesordenen af det samlede optag for hele skovrejsningsprocessen. For specifik modellering af landbrugs iLUC henvises til [60].

Når efterspørgslen efter træ overstiger udbuddet, kan priserne på træ stige, hvilket ud over iLUC, kan medføre at træ bliver dyrere, og træet erstattes derfor af andre billigere produkter som medfører større CO₂-udledninger. Et særskilt problem i denne sammenhæng opstår når efterspørgslen efter bestemte produktkategorier (f.eks. energitræ) stiger eller udbuddet falder (f.eks. ved udlæg af urørt skov) og medfører en øget pris. Dette kan medføre en indirekte ændring i anvendelsen af træ iWUC (f.eks. fra gavntræ til energitræ), som medfører en øget udledning af CO₂, da det formindskede udbud nu må erstattes med andre produkter med en dårligere CO₂-udledningsprofil, som beskrevet ovenfor. En lignende effekt fås når en stor efterspørgsel på træ til energi medfører at træ, der ellers kunne have været anvendt til produkter med en længere levetid, anvendes til energi hvor træet har en kort levetid før det bundne kulstof atter udledes.

I lighed med produkt-substitution kan øget efterspørgsel efter træ til andre formål (i forbindelse med udvikling af nye træprodukter) og en heraf følgende øget pris på træ medføre at energiproduktionen flyttes mod andre energikilder, som eksempelvis olie, kul eller naturgas. En sådan "indirect fuel-use change" (iFUC) kan medføre ændrede udledninger i tilgrænsende sektorer, når træ i energiforsyningen erstattes med energikilder med en større CO₂-udledning. Ligeledes kan denne udvikling også fremdrive at der flyttes mere energiproduktion over på andre bæredygtige kilder som solvarme, varmepumper mm.

Samlet set leder forskellene mellem de fem scenarier til vidt forskellige emissionsprofiler over tid og rum. En række studier viser, at selvom der er umiddelbare kvantitative forskelle i scenariernes udledninger, bevirker tidsmæssige forskydninger, at profilerne er vanskelige at sammenligne på et objektivt grundlag [61]. Det må dog slås fast, at mulighederne for at lave en grøn omstilling af samfundet for at mindske eller måske endda helt fjerne fossile udledninger til atmosfæren afhænger af en fortsat biogen produktion af materialer og varer til samfundet.

4 Konklusion

Skovene har gennem deres evne til at optage og binde kulstof ved fotosyntesen betydelig indvirkning på den globale kulstofcyklus og kan derfor spille en væsentlig rolle i forhold til imødegåelse af klimaforandringer. Dette gælder særligt når træ anvendes som materiale i byggeriet, der i dag er en af verdens største forbrugere af fossil-tunge ressourcer, hvilket gør skiftet fra mineralske til biogene ressourcer afgørende men også udfordrende. Vores studie viser, at forskellige scenarier for hvordan skovene dyrkes og træet anvendes giver betydelige forskelle i såvel skovenes lager af kulstof, som i mængden af træ, der kan anvendes i det biogene byggeri.

I scenarier, hvor skovrejsningens sammensætning og brugen af træ fra skoven er uændret, har skovrejsning kun en begrænset effekt på biomasseproduktionen frem til 2050. Derimod viser scenarier, hvor træet i højere grad finder anvendelse til materialer og energi et betydeligt potentiale for at øge biomasseproduktionen fra skovene. Således øger scenariet, der fokuserer på produktion af træ, allerede i 2030 biomasse-mængden med 20 pct. i forhold til i dag, primært gennem intensiv udnyttelse af hugstaffald til energi. Denne stigning fortsætter til 200 pct. i 2070. Omvendt medfører de to scenarier, som medfører en ekstensivering af skovdriften både i forhold til artsvalget ved skovrejsning og anvendelsen af træ fra skovene, markante reduktioner i biomasseproduktionen, særligt som følge af scenariernes udlægning af urørt skov og fraværet af bioenergi i sortimentsudfaldet.

Forskellene mellem scenarierne er også tydelige i forhold til træ til byggeri, hvor scenarier med uændrede mønstre i anvendelsen af træressourcen på trods af omfattende skovrejsning kun viser små ændringer frem til 2070, idet scenarier med omfattende udlæg af urørt skov reducerer træ til byggeri markant. Scenarierne viser dog også, at målrettet udnyttelse af træ til produktion af blandt andet træplader til byggeriet kan øge mængden af træ til biogent byggeri med op til 712 pct. i 2090, forudsat at nye teknologier anvendes. Dette illustrerer, hvordan skovforvaltning og anvendelsesstrategier påvirker produktionen af biomasse og træprodukter på både kort og lang sigt.

Scenarierne viser, at det med forøgelsen i det danske skovareal som er et resultat af den grønne trepart og med et øget fokus på skovproduktion, både i form af træartsvalget og anvendelsen af træet fra skoven, kan lade sig gøre at møde efterspørgslen efter biogene byggematerialer med indenlandsk produktion. Undersøgelsen viser imidlertid også direkte trade-offs mellem produktionen af materialer til den grønne omstilling og beskyttelsen af biodiversitet gennem afsætning af arealer til bl.a. urørt skov. Målet med denne rapport er ikke at komme med anbefalinger i forhold til dette valg, men rapportens resultater danner baggrund for en kvalificeret diskussion af, hvordan skovene og særligt den kommende skovrejsning kan bruges til at imødekomme samfundets behov for at finde en vej mod mere biogent byggeri.

5 Referencer

1. FAO, *Global Forest Resources Assessment 2020*. Main report. 2020, Rome.
2. Chapin III, F.S., P.A. Matson, and P.M. Vitousek, *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Second ed. 2011, New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer.
3. Friedlingstein, P., et al., *Global Carbon Budget 2023*. *Earth Syst. Sci. Data*, 2023. **15**(12): p. 5301-5369.
4. Nord-Larsen, T., et al., *Skovstatistik 2022*. 2023, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet: Frederiksberg. p. 64.
5. Odum, E.P., *The Strategy of Ecosystem Development*. *Science*, 1969. **164**(3877): p. 262-270.
6. Nord-Larsen, T., et al., *Ecosystem carbon stocks and their temporal resilience in a semi-natural beech-dominated forest*. *Forest Ecology and Management*, 2019. **447**: p. 67-76.
7. Graudal, L., et al., *Muligheder for bæredygtig udvidelse af dansk produceret vedmasse 2010-2100. Perspektiver for skovenes bidrag til grøn omstilling mod en biobaseret økonomi*. 2013, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, University of Copenhagen.
8. Skovdyrkerne, *Skovflis – et af skovbrugets vigtigste produkter*, in *VidenCenter Flis*, M. Gehlert, Editor. 2020.
9. Dansk Skovforening, *Årsstatistik for Danmark 2023* 2023, Dansk Skovforening: Frederiksbergh.
10. Statistics Denmark. *Statistikbanken.dk*. 2024 [cited 2024 April 9]; Available from: <https://statistikbanken.dk/statbank5a/default.asp?w=1920>.
11. Meilby, H., *Vidar*. 2009, Skov&Landskab, University of Copenhagen: Frederiksberg.
12. Det forstlige Forsøgsvæsen, *Skovbrugstabellerler*. 1990, Klampenborg. 270.
13. Nord-Larsen, T., H. Meilby, and J.P. Skovsgaard, *Simultaneous estimation of biomass models for 13 tree species: effects of compatible additivity requirements*. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017. **47**(6): p. 765-776.
14. Nord-Larsen, T. and V.K. Johannsen, *Danish National Forest Inventory: Design and calculations*, in *IGN Rapport*. 2016, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet.
15. Nielsen, O.-K., et al., *Denmark's National Inventory Report 2021. Emission Inventories 1990-2019 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol*, in *Scientific Report*. 2021, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus University. p. 944 pp.
16. IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, E. H.S., et al., Editors. 2006, Intergovernmental Panel on Climate Change: Japan.
17. Vesterdal, L., E. Ritter, and P. Gundersen, *Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land*. *Forest Ecology and Management*, 2002. **169**: p. 137-143.
18. Jandl, R., et al., *How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?* *Geoderma*, 2007. **137**(3): p. 253-268.

19. Meilby, H., *Sortimentsfordelinger til skovøkonomiske beregninger baseret på Naturstyrelsens data (2013-2021)*. 2024, IFRO; University of Copenhagen: Frederiksberg.
20. Berg, S. and T. Karjalainen, *Comparison of greenhouse gas emissions from forest operations in Finland and Sweden*. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2003. **76**(3): p. 271-284.
21. Aldentun, Y., *Life cycle inventory of forest seedling production — from seed to regeneration site*. *Journal of Cleaner Production*, 2002. **10**(1): p. 47-55.
22. Nielsen, A.T., T. Nord-Larsen, and N.S. Bentsen, *CO2 emission mitigation through fuel transition on Danish CHP and district heating plants*. *GCB Bioenergy*, 2021. **13**: p. 1162-1178.
23. Møller, C., *Boniteringstabeller og bonitetsvise Tilvækstoversigter for Bøg, Eg og Rødgran i Danmark*. . Dansk Skovbrugs Tidsskrift, 1933. **18**: p. 537-623.
24. Jensen, J.S. and J. Jensen, *Egeskoven på Bregentved anno 1987 - Analyser af vedmassefaktorer og tilvækstfaktorer og tilvækstforhold i renbestande af eg*, in *Skovbrugsinstituttet*. 1987, Den Kg!. Veterinær- og Landbohøjskole.
25. Larsen, J.B., *Naturnær skovdrift - hvorfor og hvordan?* 2005, København Dansk Skovforening.
26. Pretzsch, H., et al., *The Individual-Tree-Based Stand Simulator SILVA*, in *Sustainable Forest Management: Growth Models for Europe*, H. Hasenauer, Editor. 2006, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 78-84.
27. Carlsen, C.R., *Eksempler på økonomisk og strukturel udvikling i naturnær nåleskovsdrift*, in *Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning*. 2021, Københavns Universitet.
28. Meilby, H., *Den fremtidige danske nåletræsproduktions kvalitet*. 1996: Frederiksberg. p. 134
29. Meilby, H. and A. Bergstedt, *Prognoser vedrørende udbud og kvalitet af gran i Danmark*. 1998: Frederiksberg. p. 30
30. Olesen, H.H., *Prognose for hugsten i Danmark frem til år 2000. I: Savværksindustriens udviklingsmuligheder frem til år 2000*. 1987. p. 44.
31. Lind, C.H., *Træbrændselsressourcer fra danske skove over ½ ha - Opgørelse og prognose.*, in *Skovbrugsserien* 1994: Hørsholm. p. 103
32. Nord-Larsen, T. and N. Heding, *Træbrændselsressourcer fra danske skove over ½ ha: opgørelse og prognose 2002*. Dansk skovbrugs tidsskrift, 2003. **87**: p. 1-72.
33. Nord-Larsen, T. and M. Suadicani, *Træbrændselsressourcer fra danske skove over ½ ha: opgørelse og prognose 2010*, in *Arbejdsrapport / Skov & Landskab*. 2010, Skov & Landskab, Københavns Universitet.: Frederiksberg.
34. Hayes, B., *First links in the Markov chain*. *American Scientist*, 2013. **101** p. 92–96.
35. Nord-Larsen, T. and V.K. Johannsen, *Fremskrivning af danske biomasseressourcer – skovressourcen*, in *IGN Rapport*. 2022, Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen: Frederiksberg. p. 38.
36. Nord-Larsen, T., et al., *Skovstatistik 2020*. 2021, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet.: Frederiksberg.
37. Johannsen, V.K., T. Nord-Larsen, and N.S. Bentsen, *Opdatering af skovfremskrivning: Forventet drivhusgasregnskab for de danske skove 2020-2050*, in *IGN rapport*. 2022, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet: Frederiksberg.

38. Nord-Larsen, T., P.H. Brownell II, and V.K. Johannsen, *Forest Carbon Pool Projections 2024*, in *IGN Report*. 2024: Frederiksberg.
39. Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet,, *Klimastatus og-fremskrivning 2024*. 2024: København. p. 63.
40. Schelhaas, M.-J., et al., *EFISCEN-Space 1.0 model documentation and manual*. 2022: Wageningen. p. 114
41. Schelhaas, M.-J., et al., *Actual European forest management by region, tree species and owner based on 714,000 re-measured trees in national forest inventories*. PLOS ONE, 2018. **13**(11): p. e0207151.
42. Finansministeriet, *Aftale om biodiversitet giver historisk løft til Danmarks natur*. 2020: København.
43. Schelhaas, E.A.a.M.-J., *National Forestry Accounting Plan Submission of the Forest Reference Level 2021-2025 for the Netherlands*. 2019, Wageningen Environmental Research Wageningen.
44. Madsen, S.F., *Overensstemmende stammeside- og vedmassefunktioner for fem forskellige nåletræarter*. Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark, 1985. **338**: p. 97-139.
45. Madsen, S.F., *Vedmassefunktioner ved forskellige aflægningsgrænser og nøjagtighedskrav for nogle vigtige danske skovtræarter*. Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark, 1987. **350**: p. 47-242.
46. Madsen, S.F. and M. Heusèrr, *Volume and stem-taper functions for Norway spruce in Denmark*. Forest and Landscape Research, 1993. **1**: p. 51-78.
47. Økonomiministeriet, *Regeringen og parterne i Grøn trepart indgår historisk Aftale om et grønt Danmark*. 2024, Økonomiministeriet: København.
48. Danmarks Naturfredningsforening, et al., *Fra foder til føde II. En ny vej for dansk landbrugsproduktion og fødevarerforbrug inden for planetens grænse*. 2024. p. 36.
49. IPCC, *Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland. 2014.
50. Nielsen, A.T. and T. Nord-Larsen, *Fremskrivning af kulstof i skovene i periodeplanen*, in *IGN report*. 2021, Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen: Frederiksberg.
51. Folketinget, *Lov om naturforvaltning, Lov nr. 339 af 24-05-1989*. 1989, Folketinget: København.
52. Brownell, H., B.E. Iliev, and N.S. Bentsen, *How much wood do we use and how do we use it? Estimating Danish wood flows, circularity, and cascading using national material flow accounts*. Journal of Cleaner Production, 2023. **423**: p. 138720.
53. Energistyrelsen, *Energistatistik 2022*. 2022, Energistyrelsen.
54. Nielsen, A., N. Bentsen, and T. Nord-Larsen, *CO2 emission mitigation through fuel transition on Danish CHP and district heat plants: Carbon debt and payback time of CHP and district heating plant's transition from fossil to biofuel*. 2020, Department of Geosciences and Natural Resource Management, University of Copenhagen: Frederiksberg C.
55. Brownell II, P.H., et al., *Including carbon accounting in learning tools for sustainable forest management*. Forest Ecology and Management, 2022. **Submitted**.

56. IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Chapter 2 Stationary Combustion*. 2006.
57. Sathre, R. and J. O'Connor, *Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution*. *Environmental Science & Policy*, 2010. **13**: p. 104-114.
58. Leskinen, P., et al., *Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation*, in *From Science to Policy*. 2018, European Forest Institute. p. 27 p.
59. Taerwe, A., et al., *Do forests best mitigate CO2 emissions to the atmosphere by setting them aside for maximization of carbon storage or by management for fossil fuel substitution?* *Journal of Environmental Management*, 2017. **197**: p. 117-129.
60. Schmidt, J.H., B.P. Weidema, and M. Brandão, *A framework for modelling indirect land use changes in Life Cycle Assessment*. *Journal of Cleaner Production*, 2015. **99**: p. 230-238.
61. Bentsen, N.S., *Carbon debt and payback time – Lost in the forest?* *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **73**: p. 1211-1217.

6 Appendiks

Appendiks 6.1. Træartsfordelingen i plantninger for de tre scenarier, der ikke bygger på observeret skovrejsning i Danmarks Skovstatistik. De to Business-as-Usual scenarier (BAU og Business-as-Usual (X)) bygger på observeret skovrejsning i Danmarks Skovstatistik og er ikke medtaget her.

Artsgruppe	Art-sindex	Planteafstand	Foder-til-Føde	Produktion/ Biomasse	Ekstensivering
			pct. af plantetal		
Ædelgran	1	1,75	0	0	0
Lærk	2	1,75	0	20	0
Rødgran	3	1,75	0	10	0
Sitkagran	4	1,75	0	50	0
Douglasgran	5	1,75	0	20	0
Skovfyr	6	1,75	30	0	30
Andre fyrrearter	7	1,75	0	0	0
Andre nåletræer	8	1,75	0	0	0
Birk	10	3	0	0	0
Ægte kastanie	11	1,25	0	0	0
Bøg	13	1,25	0	0	0
Poppel	15	2	0	0	0
Eg	16	1,25	50	0	50
Andre løvtræarter	19	1,25	20	0	20

Appendiks 6.2. Sortimentforhold for Business-as-Usual (BAU) og Business-as-Usual (X) scenarierne.

Art	Sortiment	Diameterklasse (cm)													
		2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5
Bøg	Hugstaffald	100,0	50,4	10,4	7,5	8,2	6,7	6,5	6,5	6,6	6,6	6,5	6,4	10,0	10,0
	Skovflis	-	46,3	75,4	58,2	34,0	28,5	27,7	21,5	14,1	16,1	16,4	16,4	16,1	16,0
	Energitræ som rundtræ	-	2,1	7,3	14,0	22,4	19,5	18,6	16,4	16,1	15,4	13,5	12,6	13,0	10,6
	Industritræ	-	1,2	5,0	10,8	11,9	10,2	8,8	11,2	12,1	14,0	13,3	13,4	13,2	13,2
	Kævler	-	-	2,0	9,5	23,5	35,1	38,3	44,3	51,1	47,9	50,4	51,2	47,7	50,2
Eg	Hugstaffald	100,0	50,1	10,1	6,4	7,6	6,1	6,1	6,2	6,1	6,0	5,8	5,9	10,0	10,0
	Skovflis	-	48,1	82,9	74,3	45,9	43,3	33,3	21,5	15,0	15,7	21,7	21,4	15,9	15,7
	Energitræ som rundtræ	-	0,8	2,9	7,4	12,1	11,2	10,9	9,3	10,5	10,8	10,2	10,1	11,3	8,8
	Industritræ	-	1,0	3,5	7,1	12,9	8,8	9,6	12,4	9,3	7,5	3,9	5,5	9,5	4,4
	Kævler	-	-	0,6	4,8	21,6	30,5	40,0	50,6	59,1	60,0	58,4	57,0	53,3	61,1
Rødgran	Hugstaffald	100,0	50,3	10,5	9,8	9,6	7,0	6,7	6,5	6,5	6,6	6,6	10,0	10,0	100,0
	Skovflis	-	49,6	67,8	25,3	8,2	6,9	4,4	3,6	7,1	2,6	-	-	-	-
	Energitræ som rundtræ	-	-	1,9	1,9	1,0	0,8	0,5	0,8	0,4	1,8	0,1	-	76,3	-
	Industritræ	-	0,2	12,0	25,0	21,3	15,7	13,1	12,2	12,9	13,5	13,1	90,0	13,7	-
	Spånpladetræ	-	-	0,3	2,0	6,3	4,0	2,1	1,5	0,2	1,4	-	-	-	-
	Emballagetræ	-	-	5,2	17,0	15,4	16,1	15,3	13,2	12,8	12,8	15,6	-	-	-
	Kævler	-	-	2,3	19,0	38,2	49,5	57,8	62,1	60,1	61,3	64,5	-	-	-

Appendiks 6.3. Sortimentforhold for Ekstensivering og Foder-til-føde scenarierne.

Art	Sortiment	Diameterklasse (cm)													
		2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5
Bøg	Hugstaffald	100,0	98,8	93,1	79,7	64,6	54,7	52,9	44,5	36,8	38,1	36,4	35,4	39,1	36,6
	Skovflis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Energitræ som rundtræ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Industritræ	-	1,2	5,0	10,8	11,9	10,2	8,8	11,2	12,1	14,0	13,3	13,4	13,2	13,2
	Kævler	-	-	2,0	9,5	23,5	35,1	38,3	44,3	51,1	47,9	50,4	51,2	47,7	50,2
Eg	Hugstaffald	100,0	99,0	95,9	88,1	65,5	60,7	50,4	37,0	31,5	32,5	37,6	37,4	37,2	34,5
	Skovflis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Energitræ som rundtræ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Industritræ	-	1,0	3,5	7,1	12,9	8,8	9,6	12,4	9,3	7,5	3,9	5,5	9,5	4,4
	Kævler	-	-	0,6	4,8	21,6	30,5	40,0	50,6	59,1	60,0	58,4	57,0	53,3	61,1
Rødgran	Hugstaffald	100,0	99,8	80,1	36,9	18,8	14,7	11,7	10,9	14,0	11,0	6,7	10,0	86,3	100,0
	Skovflis	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Energitræ som rundtræ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Industritræ	-	0,2	12,0	25,0	21,3	15,7	13,1	12,2	12,9	13,5	13,1	90,0	13,7	-
	Spånpladetræ	-	-	0,3	2,0	6,3	4,0	2,1	1,5	0,2	1,4	-	-	-	-
	Emballagetræ	-	-	5,2	17,0	15,4	16,1	15,3	13,2	12,8	12,8	15,6	-	-	-
	Kævler	-	-	2,3	19,0	38,2	49,5	57,8	62,1	60,1	61,3	64,5	-	-	-

Appendiks 6.4. Sortimentsforhold for Biomasse/produktion scenariet.

Art	Sortiment	Diameterklasse (cm)													
		2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5	62,5	67,5
Bøg	Hugstaffald	-	-	0,0	-0,0	-	-	0,0	-0,0	0,0	-	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0
	Skovflis	99,7	92,6	83,8	61,3	35,8	30,0	29,2	22,7	14,8	17,0	17,3	17,3	17,9	17,8
	Energitræ som rundtræ	0,1	4,2	8,1	15,6	24,9	21,6	20,7	18,2	17,9	17,1	15,0	14,0	14,4	11,8
	Industritræ	0,2	2,5	5,5	11,9	13,2	11,4	9,8	12,5	13,4	15,6	14,7	14,9	14,7	14,7
	Kævler	-	0,8	2,6	11,2	26,1	37,0	40,3	46,7	53,8	50,4	53,0	53,9	53,0	55,7
Eg	Hugstaffald	-	-0,0	0,0	0,0	-	0,0	-0,0	-0,0	0,0	-0,0	0,0	-0,0	-	-
	Skovflis	99,8	96,3	92,1	78,2	48,3	45,6	35,1	22,6	15,8	16,5	22,8	22,6	17,6	17,4
	Energitræ som rundtræ	0,2	1,6	3,2	8,3	13,4	12,5	12,1	10,3	11,6	12,0	11,3	11,2	12,6	9,8
	Industritræ	-	1,9	3,9	7,8	14,3	9,8	10,7	13,8	10,4	8,4	4,4	6,2	10,5	4,9
	Kævler	-	0,3	0,8	5,7	24,0	32,1	42,1	53,3	62,2	63,1	61,5	60,0	59,3	67,9
Rødgran	Hugstaffald	-	0,0	-	-	-0,0	0,0	-	-0,0	-	0,0	-	-	-	100,0
	Skovflis	100,0	99,1	75,3	26,6	8,6	7,2	4,7	3,8	7,5	2,7	-	-	-	-
	Energitræ som rundtræ	-	-	2,1	2,1	1,1	0,9	0,6	0,8	0,5	2,0	0,2	-	84,8	-
	Industritræ	-	0,3	13,3	27,8	23,7	17,4	14,5	13,6	14,4	15,0	14,6	100,0	15,2	-
	Spånpladetræ	-	-	0,4	2,3	7,0	4,4	2,3	1,7	0,2	1,5	-	-	-	-
	Emballagetræ	-	-	5,8	18,9	17,1	17,9	17,0	14,7	14,2	14,3	17,3	-	-	-
	Kævler	-	0,5	3,1	22,4	42,5	52,1	60,9	65,3	63,3	64,5	67,9	-	-	-

Appendiks 6.5. Omsætningen af sortimentsudfaldet fra skoven (lodret) til træprodukter (HWP, vandret) for BAU og Business-as-Usual (X)-scenarierne.

Art	Sortiment	Træprodukter				
		Energi	Fiber	Emballage	Plader	Konstruktion
Nål	Flis	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nål	Energitræ	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nål	Industritræ	0,070	0,930	0,000	0,000	0,000
Nål	Emballage	0,577	0,000	0,423	0,000	0,000
Nål	OSB plader	0,070	0,000	0,000	0,930	0,000
Nål	Tømmer	0,070	0,507	0,000	0,000	0,423
Løv	Flis	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Løv	Energitræ	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Løv	Industritræ	0,070	0,930	0,000	0,000	0,000
Løv	Emballage	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Løv	Tømmer	0,576	0,000	0,000	0,000	0,424

Appendiks 6.6. Omsætningen af sortimentsudfaldet fra skoven (lodret) til træprodukter (HWP, vandret) for Foder-til-Føde- og Ekstensivering scenarierne.

Art	Sortiment	Træprodukter				
		Energi	Fiber	Emballage	Plader	Konstruktion
Nål	Flis	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nål	Energitræ	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nål	Industritræ	0,070	0,930	0,000	0,000	0,000
Nål	Emballage	0,577	0,000	0,423	0,000	0,000
Nål	OSB plader	0,070	0,000	0,000	0,930	0,000
Nål	Tømmer	0,070	0,507	0,000	0,000	0,423
Løv	Flis	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Løv	Energitræ	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Løv	Industritræ	0,070	0,930	0,000	0,000	0,000
Løv	Emballage	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Løv	Tømmer	0,576	0,000	0,000	0,000	0,424

Appendiks 6.7. Omsætningen af sortimentsudfaldet fra skoven (lodret) til træprodukter (HWP, vandret) for produktion/biomasse scenariet.

Art	Sortiment	Træprodukter				
		Energi	Fiber	Emballage	Plader	Konstruktion
Nål	Flis	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nål	Energitræ	0,070	0,000	0,000	0,930	0,000
Nål	Industritræ	0,070	0,000	0,000	0,507	0,423
Nål	Emballage	0,070	0,000	0,000	0,507	0,423
Nål	OSB plader	0,070	0,000	0,000	0,507	0,423
Nål	Tømmer	0,070	0,000	0,000	0,507	0,423
Løv	Flis	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Løv	Energitræ	0,070	0,000	0,000	0,930	0,000
Løv	Industritræ	0,070	0,000	0,000	0,506	0,424
Løv	Emballage	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Løv	Tømmer	0,070	0,000	0,000	0,506	0,424

KØBENHAVNS UNIVERSITET

INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB
OG NATURFORVALTNING

ROLIGHEDSVEJ 23
1958 FREDERIKSBERG

TLF. 35 33 15 00
IGN@IGN.KU.DK
WWW.IGN.KU.DK