



# BIOBASERET BYGGERI

## RÅVAREPOTENTIALER FRA DANSK SKOV- OG LANDBRUG

EMIL DAHL NIELSEN, THOMAS NORD-LARSEN OG UFFE JØRGENSEN

DCA RAPPORT NR. 234 · DECEMBER 2024 · FORMIDLING



AARHUS  
UNIVERSITET

DCA - NATIONALT CENTER FOR FØDEVARER OG JORDBRUG





# Biobaseret byggeri

## - råvarepotentialer fra dansk skov- og landbrug

---

Rapport nr. 234 • DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug • Formidlingsrapport

FORFATTERE:

Emil Dahl Nielsen<sup>1</sup>, Thomas Nord-Larsen<sup>2</sup> og Uffe Jørgensen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi

<sup>2</sup>Københavns Universitet, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning



AARHUS  
UNIVERSITET

DCA - NATIONALT CENTER FOR FØDEVARER OG JORDBRUG



## Datablad

---

Titel:	Biobaseret byggeri; Råvarepotentialer fra dansk skov- og landbrug
Serie og nummer:	DCA rapport nr. 234
Rapporttype:	Formidlingsrapport
Udgivelsesår:	December 2024. 1. udgave. 1. oplag
Forfattere:	Videnskabelig assistent Emil Dahl Nielsen og Professor Uffe Jørgensen, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet samt Seniorforsker Thomas Nord-Larsen, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet
Fagfællebedømmelse:	Seniorrådgiver Søren Ugilt Larsen, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet og Niclas Scott Bentsen, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet
Kvalitetssikring, data/model:	Ph.d.-studerende Esben Øster Mortensen, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet
Kvalitetssikring, DCA:	Chefkonsulent Lene Hegelund, DCA Centerenheden, AU
Rekvirent:	Realdania
Journalnummer:	2023-0611662
Finansiering:	Rapporten er finansieret af Realdania, som et led i projektet "Veje til Biobaseret Byggeri – delprojekt Afgrøderne" ( <a href="https://realdania.dk/projekter/veje-til-biobaseret-byggeri">https://realdania.dk/projekter/veje-til-biobaseret-byggeri</a> )
Ekstern kommentering:	Nej
Eksterne bidrag:	Ja. Lars Broder Lindgren, Artelia A/S har bidraget med beregninger af behovet for biobaserede materialer ved fremtidige byggeaktiviteter som en del af projektet "Veje til biobaseret byggeri"
Kommentarer til besvarelse:	Rapporten præsenterer resultater, som ved udgivelsen ikke har været i eksternt peer review eller er publiceret andre steder. Ved en evt. senere publicering i tidsskrifter med eksternt peer review vil der derfor kunne forekomme ændringer.
Citeres som:	Nielsen ED, Nord-Larsen T, Jørgensen U. 2024. Biobaseret byggeri; Råvarepotentialer fra dansk skov- og landbrug 79 pp. Formidlingsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet.
Foto for- og bagside:	Steffen Stamp for Realdania
Ophavsret:	Rapporten er omfattet af gældende regler om ophavsret
Layout:	Rapportkoordinator Jette Illkjær, DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, AU
Sideantal:	79



ISBN: Trykt version: 978-87-94420-53-2. Elektronisk version: 978-87-94420-54-9

ISSN: 2248-1684

Tryk: DigiSource.dk

Internetversion: <https://dcapub.au.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1522>

## Forord

Overgangen fra mineralsk til biobaseret byggeri 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 biobaserede ressourcer afgørende men også udfordrende. Denne omstilling kræver nøje overvejelse af, hvor og hvordan de biobaserede ressourcer dyrkes og høstes for at få størst mulig klimaeffekt og samtidig undgå negative konsekvenser for miljø, biodiversitet og klima som følge af ændret arealanvendelse.

Denne rapport er blevet til under projektet "Veje til biobaseret byggeri", som er foranlediget og finansieret af Realdania. Aarhus Universitet har været ansvarlig for beregningerne og syntesen relateret til landbrugssektoren, mens Københavns Universitet har haft ansvaret for tilsvarende opgaver inden for skovbrugssektoren. Det samlede arbejde bidrager således til en forståelse af, hvordan forskellige scenarier for anvendelsen af Danmarks arealressource påvirker tilgængeligheden af biobaserede materialer til byggeriet, samt hvilke sideeffekter de har på miljø, klima og fødevareproduktionen. Rapporten søger at give svar på, hvordan byggeriets klimabelastning kan nedbringes under hensyntagen til effekter på klima, miljø og natur i land- og skovbrug, med tanke for, at der også skal være tilstrækkelige ressourcer til fødevarer og til biomasseudnyttelse til andre formål.

I projektet "Veje til biobaseret byggeri" er der, samtidigt med analyserne af råvarepotentialerne, blevet analyseret flere led i værdikæden fra jord til byggeri, og afholdt workshops mv. for at samle aktører på tværs af fagområder. Se nærmere på <http://www.realdania.dk/projekter/veje-til-biobaseret-byggeri>

# Indholdsfortegnelse

<b>Forord</b>	<b>4</b>
<b>Indholdsfortegnelse</b>	<b>5</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>7</b>
<b>1. Baggrund</b>	<b>10</b>
1.1 Kulstofdynamikken i biosfæren	12
1.2 Klimapotentiale ved at anvende biomasse til byggematerialer	14
1.3 Landbrugets samfundsroller og mulige fremtidige tilpasninger	14
1.4 Skovbrugets samfundsroller og mulige fremtidige tilpasninger	16
1.5 Den nuværende tilgængelighed og anvendelse af biomasse i Danmark	18
1.6 Rapportens formål	19
<b>2. Metode</b>	<b>21</b>
2.1 Dansk arealanvendelse og rammesættende politikker for scenarierne	21
2.2 Scenariedefinitioner	22
2.2.1 Scenarier for landbruget	23
2.2.2 Scenarier for skovbrug	27
2.2.3 Parametriseringen af scenariet "Fra Foder til Føde" (FTF)	30
2.2.4 Arealstrategi – omlægning mod en produktion indenfor de planetære grænser	32
2.3 Metode ved landbrugsfremskrivningen	40
2.4 Metode ved skovbrugsfremskrivning	41
2.5 Metode ved fremskrivning af byggeriet og dets efterspørgsel	43
<b>3. Resultater og diskussion</b>	<b>47</b>
3.1 Ændring i arealanvendelse	47
3.2 Potentielle biomasseressourcer til byggeriet	49
3.3 Skovbrugets arealanvendelse, kulstoflagring og biomasseproduktion	51
3.3.1 Arealanvendelse og kulstoflagring	51
3.3.2 Mortalitet og hugst af biomasse i skoven	51
3.4 Miljø- og klimaeffekter	54
3.4.1 Nitratudvaskning	54
3.4.2 Drivhusgasudledning og -optag	56
3.5 Effekter på fødevarerproduktion	59
3.6 Tilgange der indfrier byggeriets efterspørgsel på biomasse	60
3.6.1 Kan jordbruget både levere biomasse til byggeri og opfylde klima- og miljømål?..	60
3.6.2 Byggeriets efterspørgsel sammenholdt med biomassetilgængeligheden	62
<b>4. Usikkerheder</b>	<b>66</b>
<b>5. Konklusion</b>	<b>69</b>



6. Referencer.....	70
Appendix 1.....	77
Appendix 2.....	78
Appendix 3.....	79

## Sammendrag

Der er et stærkt ønske om at reducere udledningen af drivhusgasser, næringsstoffer og pesticider fra den danske arealforvaltning. Samtidigt har dansk byggeri brug for at omstille sig fra mineralsk baserede til biobaserede byggematerialer af hensyn til klimaeffekt, ressourceknaphed og forsyningssikkerhed. På den baggrund opstiller rapporten en række scenarier for den fremtidige arealudnyttelse i Danmark med henblik på at levere både biomasse til byggeriets omstilling og at reducere arealudnyttelsens påvirkning af omgivelserne med fx nitrat, drivhusgasser og pesticider. Dette sker bl.a. ved at benytte eksisterende viden om sårbare arealer for fx udvaskning af næringsstoffer, tab af pesticider og kulstoffattige eller -rige jorde. På disse arealer har vi antaget omlægning til dyrkningssystemer med mindre tab til omgivelserne, eller omlægning til natur.

De analyserede scenarier er: Business-as-usual (BAU), Biomasseproduktion (BIO), Ekstensivering (EKST) og Fra Foder til Føde (FTF), hvoraf de første tre er opstillet af forfatterne, mens FTF er et scenarium opstillet af en række interesseorganisationer, som vi har parametriseret for at kunne sammenligne effekterne. De fremtidige effekter er beregnet for 2030, 2050 og 2089. Effekter i 2030 er naturligvis beregnet med størst præcision, men til gengæld træder en del effekter (specielt for skov) først mere tydeligt frem ved de senere tidsnedslag. År 2089 er valgt som det sidste scenarieår, da det indikerer tidspunktet for den ønskede fordobling af det danske skovareal, som blev besluttet i 1989.

I landbruget findes en betydelig biomasseressource, som kan udnyttes til byggematerialer. I BAU-scenariet stiger ressourcen til ca. 3,4 Mt tørstof/år i 2030, mens der i BIO og EKST beregnes henholdsvis 11,4 og 9,3 Mt tørstof/år. Dette er tilfældet, selvom ca. 100.000 ha landbrugsjord omlægges til infrastruktur (byer, veje, solceller m.m.), og at den økologiske halm antages utilgængelig for materialeudnyttelse. Den øgede biomassetilgængelighed sker dels som konsekvens af ca. en fordobling af halmudnyttelsen, dels som følge af en forventet fortsat stigning i landbrugets produktivitet. I BIO og EKST omlægges grovfoderareal til nye anvendelser (henholdsvis biomasseproduktion og natur) i takt med en antaget reduktion i husdyrproduktion på 20% i 2030 og 50% i 2050 og 2089. FTF-scenariet er ikke designet med henblik på at levere biomasse til samfundet og bidrager i 2030 med 3,0 Mt biomasse, hvilket falder til 0,7 Mt tørstof/år i 2050 og 2089. Det skyldes primært en stigende omlægning til økologi, hvor vi antager at halmen skal bruges internt på landbrugene.

I skovbruget er forskellene mellem scenarierne i totale mængder af træ lang tid om at manifestere sig og ligger i 2030 på højst 2,0 Mt tørstof/år. I 2070 medfører den omfattende skovrejsning en mindre stigning i træ egnet til byggeri på 6-8 %, 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 FTF-scenariet, hvor mængden af træ til byggeri umiddelbart falder med 60 % i forhold til BAU-scenariet. I 2070 og 2090 er faldet reduceret til hhv. 53 og 44 % som følge af, at skovarealet i scenariet udvides over tid. Modsætningsvis viser resultaterne, at der kan opnås en væsentlig forøgelse af mængden af træ til byggeri, hvis en større andel af træet end i dag kanaliseres til produktion af fx plader.

Således stiger andelen af træ, som kan anvendes i det biobaserede byggeri med 385 % i BIO i 2030 i forhold til BAU-scenariet. Denne stigning øges til 469 og 712 % i 2050 og 2090.

Når disse biomasseressourcer sammenlignes med potentielle behov fra byggesektoren, ved dels en uændret byggeudvikling, dels ved en fremtid med næsten intet nybyggeri, er der i de fleste scenarier langt mere biomasse til rådighed, end byggesektoren har behov for. FTF kan dog kun levere nok til scenarier med byggestop, hvor der fortsat sker renovering af bygningsmassen. Det skal hertil bemærkes, at mange andre sektorer i de kommende år vil efterspørge den samme biomasse til materialeudnyttelse og til et vist omfang af fortsat udnyttelse til energiformål samt til pyrolyse til produktion af biokul. Kaskadeudnyttelse af biomassen vil være en del af svaret på den udfordring. Desuden vil der være et stort behov for teknisk udvikling af byggematerialer fra både landbrugsafgrøder og skovflis, så de kan overholde byggetekniske krav og kan produceres til en rimelig pris, før de skitserede biomasseressourcer kan udnyttes i byggeriet.

Ved at anvende afgrøder fra land- og skovbruget i byggeriet er det muligt at indlejre store mængder kulstof i form af isolering og plademateriale (~0,64 og ~0,91 Mt CO<sub>2</sub> pr. år ved henholdsvis en traditionel anvendelse af træressourcen og ved en øget anvendelse af fibre i en ambitiøs omstilling i 2050), og i samme scenarier indlejre henholdsvis ~1,83 og ~1,32 Mt CO<sub>2</sub> pr. år i konstruktionstræ. En del af denne indlejring ville alternativt være blevet frigivet til atmosfæren ved naturlig nedbrydning eller afbrænding. Herved kan der opnås en såkaldt negativ CO<sub>2</sub>-emission, som kan bidrage til en øget værdi af byggematerialet. Samtidig medfører substitutionen af klima-tunge materialer som stål og beton med biobaserede materialer betydelige reduktioner i byggeriets samlede CO<sub>2</sub>-udledninger.

En analyse af scenariernes effekter på miljø og klima fra den største arealforvalter, landbruget, viser at målsætningen fra Aftale om et Grønt Danmark om at reducere nitratudvaskningen med 13.780 tons N til havmiljøet i 2030 kan opfyldes ved at producere mere biomasse til bl.a. byggeriet. I BAU opnås kun ca. 3% af reduktionsmålet vha. skovrejsning og vådlægning af 15.000 ha lavbundsjord, men i BIO, EKST og FTF opfyldes henholdsvis ca. 76%, 103% og 151% af reduktionsmålet. Landbrugsaftalen fra 2021 har et reduktionsmål for landbrugets drivhusgasudledning på omkring 60% i 2030 i forhold til 1990. I BAU opnås ca. 11% af reduktionsmålet vha. skovrejsning og vådlægning af 15.000 ha lavbundsjord, mens der i BIO, EKST og FTF opnås henholdsvis ca. 88%, 113% og 134% af reduktionsmålet for drivhusgasudledning. I disse værdier er indregnet effekter af skovrejsning på landbrugsjord. Dertil kommer CO<sub>2</sub> lagret i eksisterende skov, specielt i de scenarier, hvor hugsten reduceres.

I flere scenarier omlægges betydelige arealer fra land- og skovbrug til natur. I BAU og BIO omlægges dog kun 90.000 ha i 2030 uden yderligere stigning, mens der i EKST omlægges 343.000, 762.000 og 829.000 ha i 2030, 2050 og 2089. I FTF omlægges 514.000, 1.083.000 og 1.111.000 ha i de tre tidsnedslag. Sammen med det eksisterende (ikke nødvendigvis beskyttede) naturareal opfylder FTF allerede i 2030 en ambition om 30% naturareal i Danmark. Denne ambition opfyldes også af EKST, men først fra 2050.

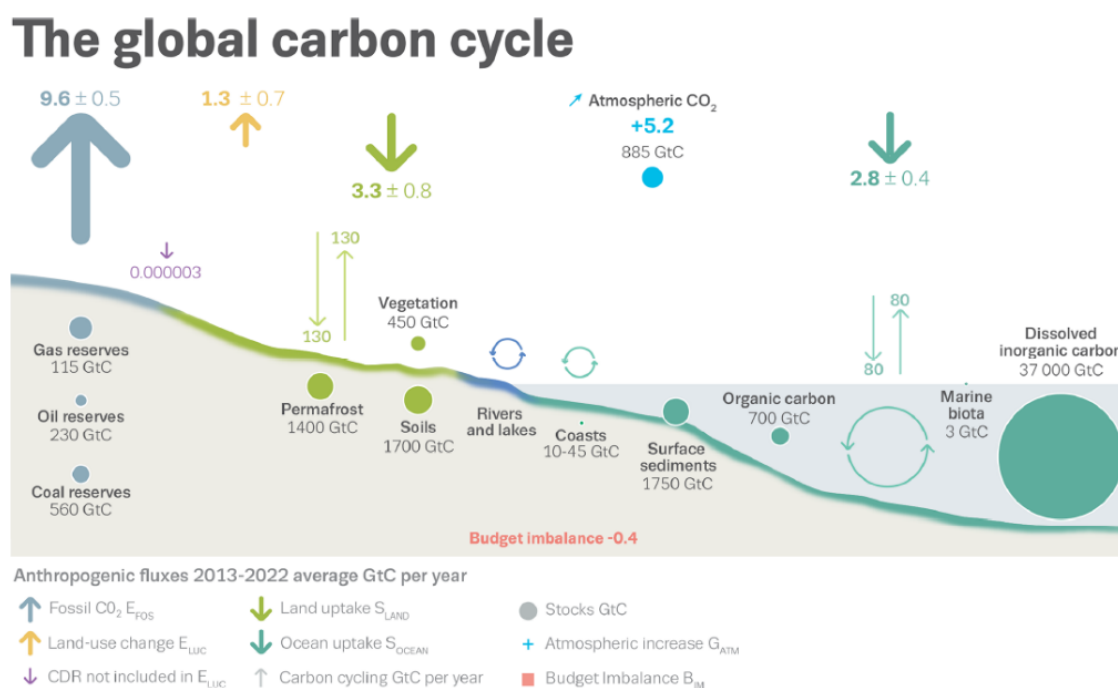


En analyse af proteinbalancen i scenarierne viste, at selvom husdyrproduktionen antages reduceret i en del af scenarierne, og arealer tages ud af drift til natur og til infrastruktur, så stiger landbrugets netto-proteinproduktion betydeligt. Det skyldes dels en fortrængning af importeret sojaprotein med græsprotein, dels et mindre proteintab ved husdyrproduktion.

De skitserede scenarier viser således, at der kan prioriteres en arealanvendelse og vælges dyrknings-systemer, som kan forsyne byggebranchen helt eller delvist med behovet for biobaserede materialer samtidigt med, at behovet for mere natur, reduceret nitratudvaskning, mindre pesticidforbrug og reduceret drivhusgasemission fra jordbruget kan sikres. Hvis en sådan retning prioriteres, vil det være vigtigt med løbende opfølgning på optimering af strategien og beregninger af effekterne, så risikoen for sub-optimeringer eller valg af udviklingsveje, som ikke kan tilpasses fremtidens behov, reduceres. Samlet set kan det konkluderes, at en samtænking af landbruget, skovbrugets og byggeriets kapaciteter og udfordringer vil kunne fremme den grønne omstilling, såvel som styrke konkurrenceevnen for sektorerne.

# 1. Baggrund

Klimakrisen er presserende. Parisaftalens målsætning om en maksimal global temperaturstigning på 1,5°C i 2030 bliver sværere og sværere at nå, idet udledningen af drivhusgasser og de globale temperaturer er fortsat stigende (IPCC, 2023). Den største del af opvarmningen skyldes forøgelsen af atmosfærens indhold af kuldioxid (CO<sub>2</sub>) som resultatet af afbrænding af fossilt kulstofmængden fra olie, kul og naturgas. Men der er også vigtige bidrag fra ændringer i kulstof i de biologiske puljer. For at forstå de processer, der bidrager til henholdsvis at udlede og fiksere CO<sub>2</sub>, er det vigtigt at have en oversigt over kulstoffets globale kredsløb.



**Figur 1.1** Skematisk illustration af den globale kulstofcyklus. Fluxer er illustreret med pile i gigaton kulstof per år (Gt C år<sup>-1</sup>) og puljer er illustreret med fyldte cirkler i gigaton kulstof (Gt C). Kilde: Friedlingstein et al. (2023)

Jordens kulstof er fordelt i fem overordnede, delvist overlappende, naturskabte puljer: 1) Lithosfæren, jordens 'skorpe', som indeholder det fossilt bundne kulstof og de sedimentære aflejringer, samt organisk kulstof i jord. 2) Pedosfæren, landjordens øverste overflade, hvor kulstof bidrager til jorddannelse via levende og døde organismer, der nedbrydes til mindre bestanddele og ofte er bundet til jordkolloider. 3) Hydrosfæren, primært havet, som indeholder opløst CO<sub>2</sub>. 4) Atmosfæren, indeholder forskellige kulstofforbindelser, som CO<sub>2</sub>, kulilte (CO) og metan (CH<sub>4</sub>). 5) Biosfæren indeholder alle levende og døde organismer i hav og på land, som i udgangspunktet akkumulerede CO<sub>2</sub> fra atmosfæren igennem fotosyntesen.

Der er en dynamisk udveksling mellem puljerne, som illustreret i figur 1.1, der påvirkes af både naturlige processer og menneskelige aktiviteter. De menneskelige aktiviteter har de seneste århundreder akkumuleret stigende mængder kulstof i endnu en pulje, 6) Teknosfæren, alt det menneskeskabte (Galbraith et al., 2024).

Det globale kulstofkredsløb kan groft betragtes som det hurtige og det langsomme kredsløb. Det langsomme kredsløb omfatter puljerne i lithosfæren og i havsedimentet. Her findes langt størstedelen af jordens kulstof. Det hurtige kredsløb inkluderer omsætninger mellem atmosfæren, biosfæren, jordens kulstofpulje (SOC) og teknosfæren. Teknosfæren indeholder den pulje af kulstof, som mennesker inkorporerer i materialer i bl.a. bygninger, fra både biomasse og i form af polymerer i plastik og gummi, kemikalier, maling m.m. I dag (2015-2020) er det estimeret, at fluxen af kulstof til teknosfæren er på ca. 0,45 gigatons (Gt) C pr. år, som primært stammer fra fossile kulstofkilder (85% olie, gas og kul), og i mindre grad fra biobaseret kulstof og genanvendelse (Kähler et al., 2021). På baggrund af prognoser for øget global populationstilvækst, samt øget global BNP, estimeres denne flux at skulle vokse til ca. 1 Gt C pr. år (Kähler et al., 2021).

Menneskehedens socio-økonomiske udvikling, herunder ændringer i energiforbrug og befolkningstilvækst har været stærkt koblet med indvinding og forbrænding af fossile brændsler og herved den globale opvarmning. Denne udvikling markerer en sammenblanding mellem det langsomme og det hurtige kulstofkredsløb. Dette refereres til som 'The great acceleration' (Steffen et al., 2015) og manifesterer i høj grad konsekvenserne af at udvinde stabilt, langtidslagret kulstof og allokere det til de aktive og hurtigt fluktuerende puljer, hvorved der udledes mere kulstof, end der indlejres (figur 1.1).

Hvis ikke bare CO<sub>2</sub> men også andre drivhusgasser indregnes, blev der samlet set i 2022 udledt 41,3 Gt CO<sub>2</sub>e<sup>1</sup> på verdensplan (International Energy Agency, 2022). Heraf stod Danmark for ca. 46 megatons (Mt) CO<sub>2</sub>e indenfor landets grænser (Crippa et al., 2023), svarende til ca. 0,11% af de samlede globale drivhusgasemissioner. Hvis man inkluderer international handel uden for dansk territorium i regnskabet, er de danske emissioner 85,5 Mt CO<sub>2</sub>e svarende til en forøgelse på ca. 85% (Pedersen, 2021).

Som et modsvar til truende klimaforandringer forventes bioøkonomien over de kommende årtier at overtage væsentlige dele af den fossile økonomi. Imidlertid er tilgængeligheden af bæredygtigt produceret biomasse nu og i fremtiden en væsentlig begrænsning (Birch et al., 2018; Rasmussen et al., 2022). Det er i den sammenhæng vigtigt at forstå, at biomassetilgængeligheden i land- og skovbrug er dynamiske størrelser, som kan påvirkes gennem valget af afgrøder, deres høst og udnyttelse m.m.

Byggeri og anlæg står for ca. 13,5 Mt CO<sub>2</sub>e (~30%) af de danske drivhusgasemissioner, primært fordelt på energi- og industrisektoren, transportsektoren og affaldssektoren (Nielsen et al., 2023). Det danske landbrug står ligeledes for en årlig udledning på ca. 13,5 Mt CO<sub>2</sub>e af de danske drivhusgasemissioner

---

<sup>1</sup> CO<sub>2</sub>-ækvivalenter (CO<sub>2</sub>e) er en omregningsfaktor til sammenligning af forskellige drivhusgassers indvirken på klimaet. Man har således beregnet, hvor mange ton CO<sub>2</sub>, der skal til for at skabe den samme effekt som ét ton af en anden gas som eksempelvis metan eller lattergas. Dette tal er så gassens CO<sub>2</sub>-ækvivalent.

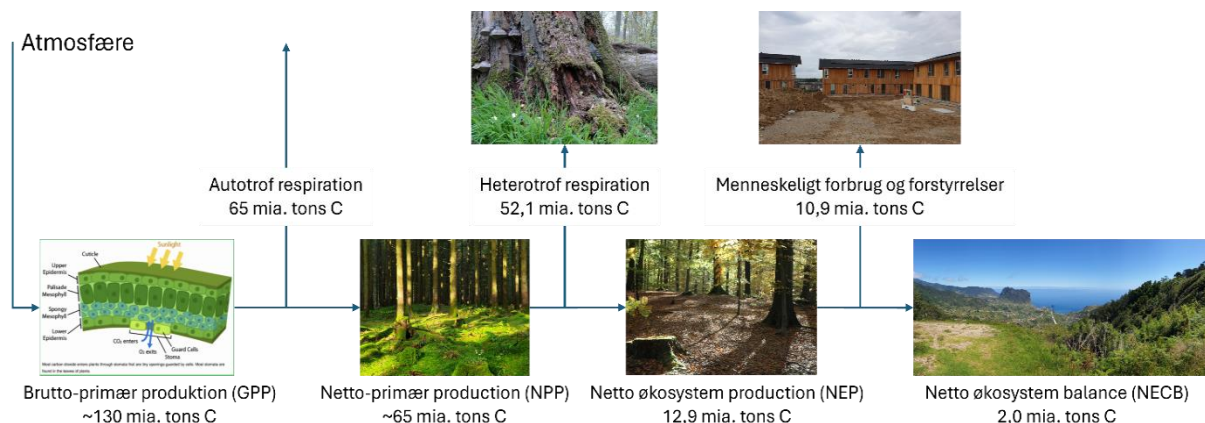


(Møllgaard et al., 2023). Både landbruget og byggeriet står således overfor en betragtelig transformation og søger intenst efter mulige emissionsreduktioner og kulstoflagringsmekanismer, der skal bidrage til, at Danmark og resten af verden kan opfylde Parisaftalen.

Udover menneskehedens vidtgående effekter på klimaforandringerne har jorden nu overskredet fem andre af de ni planetære grænser, der definerer den menneskeskabte belastning, som jorden skal holde sig indenfor for at kunne bevare den økologiske integritet, der er nødvendig for at opretholde livet på jorden (Richardson et al., 2023). Dermed står verdenssamfundet overfor at skulle implementere radikale løsninger, der kan ændre på disse udviklinger, så jorden igen kan komme indenfor det tålelige planetære belastningsområde. Mange af de overskredne grænser, herunder biodiversitet (biosphere integrity), kemisk forurening (novel entities), ændret arealanvendelse (land-use change), udslip af næringsstoffer (biogeochemical flows) og klimaforandringerne (climate change) kan i høj grad relateres til skov- og landbrugssystemerne og den nuværende dyrkningspraksis. Eftersom Danmark har en stor andel af landbrugsareal (61%) relativt til andre lande i EU (Eurostat, 2018), kan en ændring i denne andel samt justeringer i dyrkningspraksis i både skov- og landbrug have betydelige afledte effekter på de planetære parametre. Disse overvejelser afspejles derfor både i dansk politik (Regeringen, 2021; Regeringen et al., 2024) samt i analyser og scenarier fra tænketanke og interesseorganisationer (Duer & Norn, 2023; Haaland & Clement, 2023; Klimarådet, 2024; Vallgård & Duer, 2024).

## 1.1 Kulstofdynamikken i biosfæren

Planterne i land- og skovbruget fikserer CO<sub>2</sub> fra atmosfæren igennem deres fotosyntese, hvor sollysets energi opfanges af pigmenter, der overfører energien til proteinkomplekser, der kan omdanne vand og CO<sub>2</sub> til organiske stoffer og ilt. Når grønne planter vokser, øges deres kulstoflager, og når planterne dør, nedbrydes det igen af bakterier og svampe, hvorved det optagne CO<sub>2</sub> atter frigives.



**Figur 1.2** De grønne planters globale klimaregnskab (baseret på (Chapin III et al., 2011)).

Det er estimeret, at grønne planter globalt set optager 130 Gt kulstof årligt fra atmosfæren (Chapin III et al., 2011), svarende til 477 Gt CO<sub>2</sub>, kaldet brutto-primærproduktionen (GPP, figur 1.2). Imidlertid forbruger planterne selv en stor del af det optagne kulstof (65 Gt) til deres egen respiration (autotrof respiration), og deres netto-optag (nettoprimærproduktion, (NPP)) bliver derfor til ca. 65 Gt kulstof. Omkring

halvdelen bliver årligt omsat og frigivet tilbage til atmosfæren, når svampe og mikroorganismer nedbryder døde planter og plantedele (heterotrofe respiration). Dette efterlader 12,9 Gt kulstof, kaldet netto-økosystemproduktionen (NEP). Heraf forbruger menneskeheden størstedelen til materialer, fødevarer og energi, som sammen med skovbrande fjerner i alt omkring 10,9 Gt kulstof. Dette efterlader en lille "opsparing" på omkring 2 Gt kulstof på kloden kaldet netto-økosystem kulstofbalancen (NECB). Til sammenligning udledes der fra fossile kilder årligt omkring 9 Gt kulstof (Friedlingstein et al., 2023), svarende til den mængde der allerede på nuværende tidspunkt forbruges af menneskeheden. Populært fortalt betyder dette altså, at hvis man 1:1 skulle erstatte fossilt kulstof med biobaseret ville det kræve en ekstra planet.

Grønne planters optag og lagring af kulstof fordeles normalt i fem forskellige puljer: Overjordisk biomasse (fx træernes stammer, grene og blade), underjordisk biomasse (fx træernes rødder), død biomasse (fx dødt ved), litter (fx skovbundens lag af ikke-nedbrudte plantedele) og endelig afsætter planter kulstof, som lagres i mineraljorden.

For de fleste plantesamfund er optaget af kulstof typisk lavt i etableringsfasen, fordi planterne endnu ikke har etableret det fulde produktionsapparat i form af blade og stængler, der kan optage CO<sub>2</sub> fra luften, og i form af rødder, der kan trække vand og næringsstoffer fra jordbunden (Odum et al., 1969). Den årlige tilvækst tager efterfølgende fart og toppe ved forskellig alder afhængig af plantens art. Med stigende alder stiger den autotrofe respiration (altså plantens 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 planter som udkonkurreres eller dør af alderdom og andre årsager. Efterhånden som den autotrofe og heterotrofe respiration stiger, falder netto-økosystemproduktionen mod 0, og den ophobede biomasse i økosystemet går mod et maksimum, hvor der er ligevægt mellem optag og frigivelse af kulstof. Dette forhold kaldes for Odums hypotese (Odum, 1969).

Processerne er grundlæggende de samme i natur, skov og landbrug, men hastigheden af processerne og tidsmæssig allokering til forskellige puljer kan være meget forskellige. I skovene nås en begyndende ligevægt i nogle tilfælde efter ~100 år, mens de mere kortlivede afgrøder fra landbruget ganske vist har et lavt kulstofoptag i etableringsfasen i starten af foråret, men hurtigt stiger til et maksimum. Herefter øges den autotrofe respiration, og netto-økosystemproduktionen når derefter typisk sit maksimum inden høsten samme år. Dette giver også betydelige forskelle i de to arealanvendelsers muligheder for lagring af kulstof i økosystemerne. Skovene har et betydeligt potentiale for at opbygge store kulstoflagre over lange tidsspænd. Modsætningsvis har landbrugsafgrøderne kun begrænsede muligheder for lagring af kulstof i agro-økosystemet, men til gengæld udtages der allerede efter kort tid biomasse ved høst en eller flere gange pr. år. Dog kan jordens kulstofindhold øges fx ved at benytte flerårige afgrøder, som græs, kløver, pil eller poppel (Pugesgaard et al., 2015; Siddique et al., 2023) eller ved at tilbageføre halm og husdyrgødning til jorden (Andersen et al., 2024).

## 1.2 Klimapotentiale ved at anvende biomasse til byggematerialer

I den nuværende anvendelse af den danske biomasse, afbrændes store dele af de høstede sidestrømme. Det drejer sig om 28% af al halm (korn, raps, bælgsgød) i perioden 2006-2022 (Lundø, 2023) og 65% af al dansk træhugst i 2022 (Lundø, 2023). Herved opnås en relativt kort opholdstid i teknosfæren og dermed en lav kulstoflagringseffekt. Samtidig er klimaeffekten ved substitution af fossile energikilder som olie, kul og særligt naturgas forholdsvis lav (Leskinen et al., 2018).

Ved at anvende biomassen til byggematerialer kan opholdstiden for det bundne kulstof øges, idet dets biologiske omsætning, og dermed kulstoffets udledning som CO<sub>2</sub>, udskydes. Endvidere vil biomasse, der bruges til byggematerialer, substituere ressourcetunge materialer såsom stål, beton eller stærkt forarbejdet sten (stenuld).

Desuden må der forventes at være et højt potentiale for genanvendelse af kulstof i det biobaserede byggemateriale efter endt brug. Efter bygningens levetid vil en kaskadeudnyttelse af det biobaserede byggemateriale kunne forlænge kulstoffets opholdstid yderligere ved enten genanvendelse af produkterne til restaurering af bygningsmassen, eller kulstoffet kan raffineres til andre produkter (tekstil, rengøringsmidler, bioplast, biokul, mm.) (Rasmussen et al., 2022). Ved endelig omsætning af ikke-genanvendelige biobaserede rester ved afbrænding og energiudnyttelse, kan CO<sub>2</sub> fra processen opfanges og sendes til geologisk deponi (kaldet BioEnergy Carbon Capture and Storage, BECCS), hvilket er i tråd med udviklingen af disse teknologier med stærk støtte fra regeringen (Regeringen, 2023).

## 1.3 Landbrugets samfundsroller og mulige fremtidige tilpasninger

Efter 2. verdenskrig udbrød der mangel på fødevarer i Europa, hvilket skabte både politisk og økonomisk incitament til øget landbrugsproduktion. Danmark øgede sit landbrugsareal til ca. 75% af landets samlede areal gennem dræning af vådområder, regulering af vandløb m.m. I dag er landbrugets arealudnyttelse reduceret til omkring 60%, men det primære formål og drivkraften er forblevet den samme, nemlig produktion af fødevarer både til eget forbrug, men også til en stor eksport (Pedersen & Møllenberg, 2017).

Landbrugets betydelige effekter på miljø, klima og natur kom særligt i fokus fra omkring 1980'erne, hvor omfattende problemer med iltsvind, eksemplificeret med døde hummere fra Kattegat, førte til en række vandmiljøplaner, som næsten halverede landbrugets nitratudvaskning frem til starten af 00'erne (Grant & Waagepetersen, 2003). Siden omkring 2010/11 er der ikke sket væsentlige reduktioner (Thodsen et al., 2024), og Danmark har hidtil ikke kunnet opfylde kravene om god økologisk kvalitet af vandmiljøet, som det kræves fra EU's Vandrammedirektiv (EU Commission, 2000). Siden har de betydelige drivhusgasemissioner fra landbruget samt direkte og indirekte effekter på biodiversiteten omdefinert landbrugets rolle fra primært at være producent af produkter til i lige så høj grad at være landskabsforvalter og ansvarlig for bæredygtig ressourceforvaltning. Fremtidig udvikling af landbruget skal derfor nødvendigvis også bidrage til forbedringer af klima, miljø og natur.

Over de senere årtier har landbruget i højere og højere grad bidraget til en omstilling af energisektoren fra fossile brændsler til vedvarende energikilder, særligt gennem en øget produktion af biogas (Hamelin et al., 2021) og øget udnyttelse af halm til afbrænding (Bentsen et al., 2019). Hermed bidrager landbruget til udfasningen af de fossile kilder som kul, olie og gas (Hoffmann & Eisler, 2023). Ligeledes forventes det biobaserede kulstof fra biomasse at kunne bidrage til omstillingen fra fossilt baserede materialer, så samfundet omstilles fra en lineær fossil økonomi til en cirkulær bioøkonomi (Det Nationale Bioøkonomipanel, 2022; Tybirk et al., 2024). Anvendelsen af landbrugsbiomasse til byggematerialer har historisk været yderst begrænset til fx tækning af tage med halm eller elefantgræs (Jensen et al., 2019) samt brug af strå i mørtel til stabilisering og isolering. Der har også været eksperimenteret med stråbaserede byggeplader og halmhuse (Øhlenschläger & Pedersen, 2001), men det har ikke hidtil haft stort omfang. Dog er der i de sidste år sket en kommerciel udvikling af halmbaserede byggelementer (Ecococoon UAB, 2023), som kan føre til en mere udbredt anvendelse.

Foder til Danmarks produktion af husdyr dyrkes på omkring 80% af landbrugsarealet (Miljø- og Fødevareudvalget, 2017). Der er et stort pres på at opnå en reduktion af drivhusgasemissionen fra husdyrproduktionen for at kunne opfylde landbrugets samlede drivhusgasreduktion, hvilket sammen med dyrevelfærdsmæssige overvejelser samt rent økonomiske tendenser kan føre til en reduktion i produktionen af husdyr (Cordtz et al., 2024). En sådan udvikling vil frigive areal fra foderproduktionen, som enten kan udlægges til natur eller kan udnyttes til dyrkning af biomasse til byggesektoren, til andre materialer eller til energiudnyttelse.

Cirka 80% af landbrugsarealet dyrkes med enårige afgrøder, primært forskellige kornarter, majs, roer og raps, som alle har en nogenlunde samme dyrkningspraksis (Miljø- og fødevareudvalget, 2017). Dette inkluderer årlig jordbearbejdning, gødsning og sprøjtning for at kunne give den ønskede afgrøde en konkurrencefordel mod naturligt forekommende plantearter (ukrudt), sygdomme og skadedyr. Andelen af arealer dyrket med enårige afgrøder steg fra under 60% i 1940 (Danmarks Statistik, 1968) til det nuværende niveau, der blev opnået omkring begyndelsen af 1980'erne ([www.statistikbanken.dk](http://www.statistikbanken.dk)). Denne stigning har formentlig bidraget til de omfattende problemer med næringsstoffab til vandmiljøet, da en stor andel af flerårige afgrøder i sædskifterne kan reducere nitratudvaskning (Hansen et al., 2018), såvel som overfladeafstrømning af fosfor fra markerne (Eriksen et al., 2020). Næringsstoffab fra enårige afgrøder er over de sidste ca. 20 år forsøgt minimeret med efterafgrøder, der kan opfange næringsstoffer efterår og vinter og holde dem i cirkulation (Eriksen et al., 2020). Alternativt kan omlægges til flerårige afgrøder, der har "indbyggede efterafgrøder" (Manevski et al., 2018), hvis der kan sikres markeder for øget afsætning af disse afgrøder.

En anden tilgang til at reducere dansk landbrugs miljø- og klimapåvirkning er at reducere landbrugsarealet og omlægge til naturareal. Dette vil dog samtidigt reducere mængden af produkter fra landbruget. Klimaprognoser indikerer en mindre stabil fødevareproduktion i Sydeuropa, hvilket intensiverer konkurrencen om arealerne i Danmark og lægger op til en diskussion af, hvorvidt Danmark, der forventes af bevare gunstige dyrkningsforhold i fremtiden, bør bidrage til at stabilisere fødevarerikigheden i

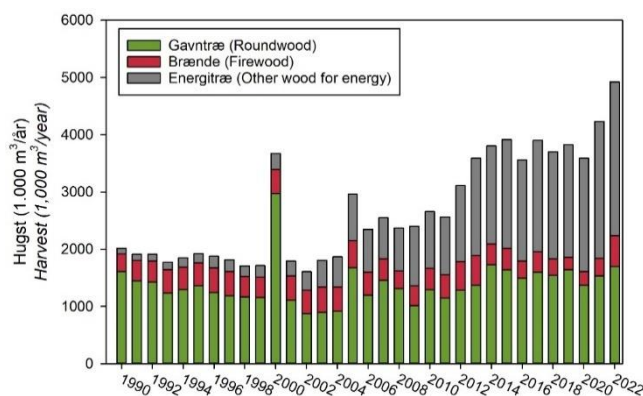
Europa (Jacobs et al., 2019). En rapport fra en række NGO'er og interesseorganisationer om en fremtidig landbrugsproduktion på et mindre areal fremhæver dog, at Danmark fortsat kan brødføde lige så mange eller flere mennesker, hvis dansk landbrug omlægges mod en større andel plantebaseret kost, så energitabet ved fodring af husdyr undgås (Haaland & Clement, 2023).

Danmarks areal er heterogent i forhold til jordbundsmæssige og klimatiske forhold, hvilket påvirker vandets og næringsstofferne tilgængelighed og vej gennem jordsøjlen. Derfor er nogle områder mere følsomme i forhold til næringsstofftab, pesticidtransport til grundvandet, tab af kulstof m.m. end andre. Risikoen for tab af næringsstoffer fra landbrugsarealer påvirkes af den valgte afgrøde og dyrkningsstrategi. I denne rapport har vi på den baggrund inddelt landbrugsarealerne i en række kategorier (yderligere uddybet i afsnit 2.2.4.). 1) Nitratfølsomme jorder, hvor oplandet har lav nitratretention og dermed større risiko for at næringsstoffer ledes ud i sårbare vandmiljøer. 2) Pesticidfølsomme jorder, hvor pesticidretentionen er lav og dermed større risiko for, at pesticider ledes ud i grundvandsmagasiner af potentielle drikkevandsinteresser. 3) Kulstoffattige jorder, hvor jordens struktur er i fare for at blive ødelagt ved yderligere fjernelse af kulstof. 4) Kulstofrige lavbundslande med stor emission af kulstof, og som er oplagte arealer til vådlægning. 5) Oplagte arealer til omlægning til fredet natur. 6) Mere robuste jorder, hvor man kan argumentere for, at der fortsat kan gennemføres landbrugsproduktion med nogenlunde samme metoder som i dag. Ved at identificere disse arealer og deres overlap med hinanden kan potentielle win-win-løsninger foreslås. Dette er tilgangen til scenariernes ændrede arealanvendelse i denne rapport, hvor de sårbare arealer identificeres, og hvor effekten af en omlægning, enten til en mere hensigtsmæssig dyrkningsform eller til ekstensiveret naturlig succession, analyseres.

## 1.4 Skovbrugets samfundsroller og mulige fremtidige tilpasninger

Skovene og deres dyrkning har historisk spillet og spiller fortsat en afgørende rolle for mennesket og samfundet gennem en lang række miljømæssige, økonomiske og sociale funktioner, der gør dem uundværlige for såvel mennesker, samfund som økosystemer (Nord-Larsen et al., 2023). Skovene fungerer som leverandører af råvarer, herunder træ, som anvendes til alt fra byggeri og papirproduktion til møbler og biobrændsel. Træproduktion er en vigtig økonomisk aktivitet, der skaber arbejdspladser, både direkte inden for skovbrug og i relaterede industrier. Samtidig er skovene vigtige for biodiversiteten, da de udgør levesteder for et bredt spektrum af planter, dyr og mikroorganismer. Denne biologiske mangfoldighed sikrer økosystemets modstandsdygtighed og bidrager til økosystemtjenester som bestøvning og skadedyrskontrol. Desuden spiller skovene en central rolle i sikringen af grundvandsressourcer (Eriksen et al., 2020), da deres rodnet stabiliserer jorden og forhindrer erosion, samtidig med at de hjælper med at filtrere regnvand undervejs ned til grundvandet. Skove har også en vigtig rekreativ funktion, da de tilbyder områder for friluftaktiviteter (Gernow et al., 2024), hvilket kan bidrage til menneskers fysiske og mentale sundhed. Endelig beskytter skovene infrastruktur mod ekstreme vejrforhold som oversvømmelser og jordskred ved at absorbere store mængder nedbør og reducere overfladeafstrømning. Samlet set er skovene således ikke kun økonomisk værdifulde, men også essentielle for at opretholde økologisk balance og sikre samfundets trivsel.

Skovens rolle for det danske samfund har udviklet sig markant over tid og afspejler skiftende økonomiske, miljømæssige og sociale behov. I forhistorisk tid var skovene afgørende for menneskers overlevelse gennem deres udbud af jagtmuligheder og træ til brænde og redskaber. Med fremkomsten af landbruget blev skovene trængt tilbage som følge af behovet for jord, men udgjorde fortsat en vigtig ressource i form af træ, der blev brugt til fx byggeri, redskaber, gærdsel, opvarmning og skibsbyggeri. Samtidig blev skovene i stigende grad udnyttet til græsning og om efteråret til svins fouragering på træernes olden. Samlet set førte den mangesidige udnyttelse til en omfattende skovrydning i løbet af middelalderen og op til 1800-tallet. Denne overudnyttelse betød, at skovarealet i Danmark ved fremkomsten af den første skovlov i starten af 1800-tallet var reduceret til under 3% af landets areal (Fritzboeger, 1994). Som en reaktion herpå blev der i løbet af 1800- og 1900-tallet indført skovreformer og plantningsprogrammer for at genoprette skovene. Skovrejsning blev betragtet som nødvendig for at sikre en vedvarende forsyning af træ som råstof, samt for at stabilisere jordbunden og forhindre erosion og sandflugt.



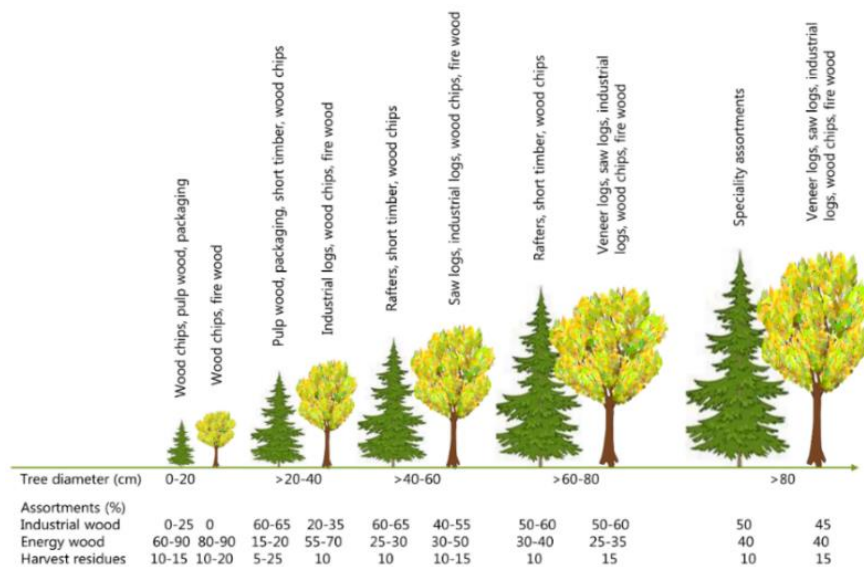
**Figur 1.3** Hugst af træ i Danmark fordelt på sortimenter (Statistikbanken.dk/Skov6).

Også i det 20. og 21. århundrede har skovens rolle i Danmark ændret sig markant. Med fremkomsten af Brundtlandrapporten i 1987 (Brundtland, 1987) og Rio-konferencen i 1992 (United Nations Conference on Environment and Development Rio de Janeiro, 1993) flyttede fokus mod bæredygtig skovforvaltning og multifunktionel anvendelse. Skovene bliver nu i højere grad set som vigtige økosystemer, der samtidig med at de leverer goder som træ til en grøn omstilling af samfundet, skal bevare biodiversiteten og bidrage til klimasikring gennem kulstofbinding. Samtidig er skovene blevet anerkendt som essentielle for rekreation og friluftsliv, hvilket har gjort dem til centrale områder for fritidsaktiviteter og naturoplevelser for befolkningen. Derudover spiller skovene en vigtig rolle i beskyttelsen af grundvandsressourcer, hvilket er særligt betydningsfuldt i et land som Danmark, hvor grundvandet udgør den primære drikkevandsressource. Disse skift i skovens funktion og forvaltning afspejler et skift fra en ressourcudnyttende tilgang til en helhedsorienteret forståelse af skovens værdi for både natur og samfund.

Med en øget bevidsthed om betydningen af klimaforandringer udfylder skovene en dobbeltrolle, dels som kulstoflager og dels som producent af klima-venlige materialer og energi i form af træ. Særligt spiller træet en væsentlig rolle i forhold til at imødegå klimaforandringer, når træet anvendes til at fortrænge klima-dyrt materialer som stål og beton, fordi procesudledningerne ved at producere træet er meget små. Den fremtidige skovforvaltning skal derfor forsøge at ramme en vigtig balance mellem at

benytte og beskytte skovene: beskytte deres kapacitet til at lagre kulstof i lange tidsspænd og benytte deres ressourcer som et middel til at imødegå fossile drivhusgasudledninger.

På trods af at den største klimaeffekt opnås, når træet anvendes til varige produkter eksempelvis i byggeriet, udgør træ til energiformål ikke desto mindre en stor del af det træ, der produceres fra danske skove. I Danmark udgør energitræet således hele 65% af den samlede hugst i 2022 (figur 1.3, (Statistics Denmark, 2024)).



Figur 1.4 Produkter fra skovene for hhv. nåle- og løvtræer. Kilde: Graudal et al., 2013.

Årsagen til den høje andel af energitræ skal findes i, at træ fra store dele af omdriften ikke i dagens marked finder anvendelse i træprodukter. Det gælder eksempelvis små træer, der bliver tyndet ud tidligt i omdriften, toppe og grene af mindre dimensioner og kroget/beskadiget træ, der har svært ved at blive anvendt i dagens produktionsapparat (figur 1.4). Andelen af træ til energi er normalt højere for løvtræ end for nåletræ, fordi grene og stammer fra løvtræ ofte er mindre regelmæssige og derfor mindre egnede til savskæring. Der er således særligt for løvtræet betydelige potentialer for en bedre udnyttelse af biomassen til formål med større klimaeffekt, dels i produkter som erstatter klima-tunge materialer og dels ved gen- og kaskadeanvendelse af biomassen. Et potentiale, som blandt andet beror på en teknisk udvikling af metoderne til anvendelse af biomassen.

## 1.5 Den nuværende tilgængelighed og anvendelse af biomasse i Danmark

I Danmark produceres der biomasse mængder svarende til ca. 27,5 Mt tørstof pr. år, hvoraf størstedelen produceres i landbruget (ca. 92%), en mindre del i skovene (ca. 8%) og en forsvindende lille andel i havet (Rasmussen et al., 2022). Der importeres ca. 9,5 Mt tørstof pr. år, hvor træressourcer og fødevarer udgør ca. 50% hver. Der eksporteres ca. 11 Mt, hvoraf 2/3 består af animalske fødevarer (Rasmussen et



al., 2022). Der forbruges således ca. 25 Mt tørstof i Danmark, som primært udgøres af foder og fødevarer samt træprodukter, primært til energiproduktion.

Det Nationale Bioøkonomipanel (2019) estimerede mængden af sidestrømme fra den producerede biomasse i land- og skovbruget i Danmark til ca. 10,7 Mt tørstof, hvoraf 3,7 Mt tørstof stammer fra primærsektoren (som halm, roetoppe og energitræ fra landbrug og skovbrug), og 7 Mt tørstof stammer fra det øvrige samfunds affaldsstrømme (gylle og dybstrøelse fra husdyrproduktion, bioaffald fra industrien m.m.).

En analyse af træforbrug og -håndtering i den danske økonomi, med fokus på cirkularitet og kaskadeudnyttelse viste, at Danmarks samlede træforbrug i 2018 var ca. 17,7 millioner kubikmeter råtræ-ækvivalenter (anslået svarende til 7,1 Mt tørstof) hvoraf over 85% blev brugt til energiproduktion (Brownell et al. 2024). Det meste af træet er importeret, hvilket afspejler Danmarks afhængighed af eksterne biomassekilder. Af den samlede indenlandske produktion af træ samt en mindre import af rundtræ indgik 2,1 mio. kubikmeter råtræ-ækvivalenter (anslået svarende til 0,8 Mt tørstof) som input til indenlandsk træindustri. Sammen med import af halvfærdige træprodukter gik 2,3 mio. råtræ-ækvivalenter (anslået svarende til 0,9 Mt tørstof) til indenlandsk endeligt forbrug af træprodukter.

Analysen i Brownell et al. (2024) afslørede, at en betydelig del af træstrømmene i Danmark var udokumenterede. Over 1 million kubikmeter træ (anslået svarende til 0,4 Mt tørstof) blev årligt mellem 2015 og 2021 anvendt til energiproduktion fra kilder, der ikke blev opfanget i officielle statistikker. Disse udokumenterede strømme stammede hovedsageligt fra træ uden for skovområder, herunder haveaffald og træ fra landskabspleje. Dette hul i dataene fremhæver behovet for bedre registrering af træstrømme, så Danmark kan optimere sin ressourceforvaltning og øge kaskadeudnyttelsen af træ. Kaskadefaktoren, altså i hvor høj grad træressourcen efter endt anvendelse genbruges i et lavere (eller højere) værdilag, på 1,44 viser, at træ i Danmark genbruges næsten halvanden gang før endelig forbrug til energi, hvor det bunde kulstof atter frigives som CO<sub>2</sub>. Cirkulær materialebrug for træ var 8,4%, men stiger til 17,8%, når importeret træ til energi udelukkes.

## 1.6 Rapportens formål

Denne delanalyse under projektet "veje til biobaseret byggeri" har til formål at udforske et udfaldsrum for potentiel dansk biomasseproduktion fra skov- og landbrug med særligt fokus på ressorens anvendelse og prioritering til byggesektoren. Hvorvidt den fremtidige biomasseproduktion kan accepteres i samfundet og bidrage til bioøkonomien, afhænger af produktivetsparametre samt af produktionens indvirkning på samfund, klima, miljø og biodiversitet, hvilket opsætning af forskellige udviklingsveje skal bidrage til at visualisere. Dette kan forhåbentlig bidrage til udviklingen af en passende politisk ramme for prioritering af den fremtidige produktion af biomasse og udvikling af bioøkonomien, herunder incitamentsstrukturer, som kan fremme hensigtsmæssige valg i både land- og skovbrug samt i byggesektoren, således at den biobaserede kulstofpulje i jordens teknosfære kan øges.

Delanalysen skal undersøge effekten af at målrette dyrkningen af forskellige afgrøder til de natur- og lovgivningsmæssige restriktioner, som arealerne er underlagt, herunder at bidrage til at produktionen holder sig indenfor de planetære grænser. Herefter beregnes mængden af biobaserede materialer de forskellige scenarier kan levere til byggeriet. Tilgængeligheden af biomasse sættes i sammenhæng med materialebehovet fra den danske byggesektor i forskellige fremtidige scenarier for byggeaktiviteten. Effekterne af landbrugsscenarierne på drivhusgasbalance, nitratudvaskning, fødevareproduktion og bidrag til naturgenoprettelse estimeres. Samlet set forsøger vi herved at klarlægge, hvilke tiltag der kan muliggøre byggeriets omstilling mod større brug af biobaserede materialer på en bæredygtig måde.

## 2. Metode

Land- og skovbrugets udviklingsmuligheder og potentiale for leverance af biomasse til byggesektoren er analyseret ved at opstille scenarier for fremtidige biomasseleverancer på tværs af de to sektorer, baseret på samme metode omkring forudsætningsbaseret fremskrivning som i Gylling et al. (2023). Ud over anvendelsen af eksisterende ressourcer fra skov- og landbrug i scenarierne er indlagt dyrkning af særlige afgrøder (hamp, elefantgræs og pil) med et forventet potentiale for anvendelse i byggesektoren i et omfang, som vurderes at kunne bidrage signifikant til byggesektorens behov. Desuden er inkluderet et scenarie, der bygger på rapporten "Fra Foder til Føde", der er udarbejdet af en række interesseorganisationer (Haaland & Clement, 2023), så der, hvor muligt, sikres sammenlignelige forudsætninger for de undersøgte parametre. Parametriseringen anvendt til dette scenarie, er nærmere beskrevet i afsnit 2.2.3.

Endelig er der opstillet scenarier for byggeriets udvikling for at kunne beregne den potentielle efterspørgsel på forskellige typer af biomasse ved forskellige udviklingsveje for byggesektoren.

Scenarierne sammenlignes med hensyn til effekt på: 1) Fødevarerproduktion, 2) Biomassetilgængelighed, 3) Drivhusgasemissioner, 4) Kvælstofudvaskning og 5) Areal til biodiversitet. Resultaterne sammenholdes i de tre tidsnedslag 2030, 2050 og 2089 (året for målet om en fordobling af Danmarks skovareal (Regeringen, 1989)), hvilket for især de seneste årstal har betydet, at antagelserne bag de ekstrapolerede data i stigende grad bliver usikre. Disse langsigtede resultater skal derfor forstås som foreløbigt bedste bud, som senere kan justeres, når bedre forudsætninger for en vurdering opnås.

### 2.1 Dansk arealanvendelse og rammesættende politikker for scenarierne

Det samlede danske areal er på 4,3 mio. ha, hvoraf omkring 0,6 mio. ha er optaget af byer og veje, 0,6 mio. ha er skov, ca. 2,6 mio. ha er landbrugsareal, og de resterende ca. 0,5 mio. ha er optaget af vandmiljø, terrestriske naturarealer m.m. (Levin, 2022). Det samlede landareal forventes at skulle udfylde en lang række akutte behov såsom fødevarerproduktion, produktion af biomasse til fx bioenergi og råvarer til byggeri og industri, arealer til landbaserede solceller og vindmøller og forøgede arealer til natur og sikring af biodiversitet. Når der samtidig skal tages hensyn til grundvandsbeskyttelse, rekreative formål m.m. er der lagt op til en meget kompliceret arealkabale (Duer & Norn, 2023; Klimarådet, 2024).

En række politiske målsætninger sætter rammerne for prioriteringen af det danske landskab og derved også forudsætningerne for arbejdet med denne rapport. Disse omfatter:

- Landbrugsaftalen (Regeringen, 2021) – Forudsætter en reduktion af drivhusgasser for skov- og landbrugssektoren med mellem 6,1 og 8 Mt CO<sub>2</sub>e i år 2030, samt en reduktion af den årlige kvælstofudledning til vandmiljøet med 10.800 tons kvælstof, som et bidrag til opfyldelsen af EU's vandrammedirektiv og de nationale vandområdeplaner 2021-2027.
- Bemærkningerne til lov om naturforvaltning (Regeringen, 1989) – Forudsætter en fordobling af det danske skovareal fra 1989 til 2089, svarende til ca. 412.500 hektar øget skovareal fra 2024 til 2089.

- Aftalen om et Grønt Danmark, udarbejdet af treparten (Regeringen et al., 2024) – Forudsætter et øget skovareal på 250.000 hektar (hvoraf 100.000 ha urørt skov) i 2045 i forhold til 2024, samt udtagningen af 70.000 hektar lavbundsjord og 70.000 hektar randarealer til lavbundsjord.
- Ambitionen om 30% beskyttet og strengt beskyttet natur i EU (Council of the European Union, 2020). Det er et mål på EU-niveau, som endnu ikke stiller de enkelte nationer til ansvar for indfrielsen heraf. Ambitionen er således heller ikke implementeret i dansk lovgivning.
- Hensyn til fødevarerforsyningsikkerheden - hvilket bl.a. handler om at reducere Danmarks afhængighed af sojaimport, samt at fastholde en betydelig fødevarerproduktion (Møllgaard et al., 2024; Regeringen et al., 2024).
- Hensyn til biomasseforsyningen med henblik på at forsyne samfundet med biobaserede ressourcer (Det Nationale Bioøkonomipanel 2019, 2022, 2024; Klimarådet, 2024) - hvilket bl.a. kan ske ved øget dyrkning af biomasseafgrøder, øget halmudnyttelse og optimering af gylleudnyttelsen. Dette var et fokuseret område i Grøn Vækst planen (Regeringen, 2009) og i Energiaftalen (Regeringen et al., 2012), men har siden ikke været en konkret del af politiske planer.

## 2.2 Scenariedefinitioner

Rapporten forsøger at dække et bredt udfaldsrum for dansk land- og skovbrugs arealudvikling i 2030, 2050 og 2089, som det må antages præget af de relevante politikker nævnt i afsnit 2.1. Derfor er der etableret fire grundlæggende scenarier for ændringen i arealanvendelsen i land- og skovbrug. De fire scenarier er baseret på tidligere analyser, hvor forudsætninger for scenarieopsætningen er beskrevet detaljeret (Gylling et al. 2023; Haaland & Clement, 2023). Desuden indeholder scenarierne forskellige tiltag og potentialer i forhold til at bidrage med biomasse til bygge- og anlægsbranchen.

Scenarierne er: Business-as-usual (BAU), Biomasseproduktionsscenariet (BIO), Ekstensiveringsscenariet (EKST) og Fra Foder til Føde (FTF), som alle antager en skovrejsning svarende til målet om 250.000 ha ny skov. Derudover er for skovbrug opsat et ekstra scenarie (BAUx), hvis formål er at danne en ændret arealanvendelse i Danmark med mere skovareal (som i EKST), men med anvendelse (allokering, hugst-sandsynlighed m.m.) svarende til den nuværende (som i BAU). Reference ud fra den hidtidigt forventede udvikling af skovarealet (1.900 ha skovrejsning per år). I scenarierne etableres skov i forskelligt omfang og tempo, og disse arealer udtages af arealet med landbrugsdrift og den nye skovs anvendelse beskrives i skovbrugsscenarierne.

Bygge- og anlægsbranchens omstilling til brug af biobaserede materialer vurderes herefter ved at vurdere behovet i fire hovedscenarier i byggeriet: Stagneret omstilling, moderat omstilling, ambitiøs omstilling og ambitiøs omstilling med byggestop.

Da de specifikke scenariedefinitioner og resultater er ganske forskellige mellem land- og skovbrug, er de i det efterfølgende beskrevet hver for sig.

## 2.2.1 Scenarier for landbruget

*Business-as-Usual (BAU)*, hvor betingelserne for produktion af biomasse i dag fremskrives til de forskellige tidsnedslag (Gylling et al., 2023). Dermed følger BAU-scenariet kun de igangsatte politikker til og med 2023, mens fremtidige politikker for klima, miljø og biodiversitet samt teknologiske virkemidler som fx grøn bioraffinering ikke inkluderes.

Udviklingen af land-, skov- og naturarealet er skitseret i tabel 2.1 og i appendix 1, hvor:

- Der følges den historiske stigning i afgrødeudbytte og fodereffektivitet, reduktion i det dyrkede areal (pga. stigende infrastruktur til veje, boliger, solceller mm.), stigning af økologisk landbrugsareal (historisk tendens med 4.900 ha pr. år fra 2005-2015) og en skovrejsningsrate på 1.900 ha pr. år (Dalgaard & Mortensen, 2022).

Der antages en øget udnyttelse af den eksisterende mængde halm og husdyrgødning, og at 15.000 ha lavbundsjord vådlægges, som det i 2020 blev besluttet at igangsætte (Ministeriet for Fødevarer, Fiskeri og Landbrug, 2020).

*Biomassescenariet (BIO)*, hvor der antages en bæredygtig intensivering af biomasseproduktionen igennem en strategisk omlægning af uhensigtsmæssigt dyrkede jorder med henblik på at maksimere biomasseproduktionen uden negativ indflydelse på miljø og klima. Derudover er antaget en 20% reduktion af husdyrproduktionen i 2030, hvilket øges til 50% reduktion i 2050 og 2089. Det frigivne foderareal som følge af færre husdyr udnyttes til øget biomasseproduktion.

Udviklingen af land-, skov- og naturarealet er skitseret i tabel 2.1 og appendix 1, hvor:

- Samme historiske tendenser følges som i BAU, dog med en øget skovrejsning på 11.900 ha pr. år fra 2024 til 2045 og 3.900 ha pr. år fra 2045 til 2089 (for at opfylde aftalen om et Grønt Danmark (Regeringen et al., 2024) og bemærkningerne til lov om naturforvaltning (Regeringen, 1989) i 2045 og 2089).
- 50.000 hektar lavbundsjord vådlægges, hvoraf 70% anvendes til paludikultur, mens 30% frigives til naturlig succession og evt. græsning.
- Antagelse om omlægning til korn- og rapssorter med 15% stigning i halmudbytte, samt anvendelse af alternativ høstteknologi med 15% øget halmopsamling.
- Antagelse om optimeret gyllehåndtering for at øge den udnyttede mængde af gylletørstof med 7,5%.
- Udnyttelse af bladbiomasse fra eksisterende areal med sukkerroer, samt biomasse fra slåning af vejkanter og grødeskæring.

*Ekstensiveringsscenarioet (EKST)*, hvor der ligeledes antages en strategisk omlægning af uhensigtsmæssigt dyrkede jorde, men med en mindre intensiveret biomasseproduktion, hvor der tages særlig højde

for væsentlige miljø- klima- og naturmål ved blandt andet at afsætte større arealer til biodiversitetsformål (Mortensen & Jørgensen, 2022b). Derudover er der antaget 20% reduktion af husdyrproduktionen i 2030, hvilket øges til 50% reduktion i 2050 og 2089.

Udviklingen af land-, skov- og naturarealet er skitseret i tabel 2.1 og appendix 1, hvor:

- Samme historiske tendenser følges som i BAU, dog med en øget skovrejsning på 11.900 ha pr. år fra 2024 til 2045 og 3.900 ha pr. år fra 2045 til 2089 (for at nå aftalen om et Grønt Danmark (Økonomiministeriet, 2024) og bemærkningerne til lov om naturforvaltning (Regeringen, 1989) i 2045 og 2089).
- 100.000 hektar lavbundsjord vådlægges, hvoraf 30% anvendes til paludikultur eller høst af naturlig vegetation, mens 70% frigives til naturlig succession og evt. græsning.
- Væsentlig forøgelse af det økologiske areal i 2030 i forhold til 2018, som følge af regeringens aftale, hvor der var en ambition om en fordobling af det økologiske areal i 2020 (>15% af samlet landbrugsareal) i forhold til 2007 (Regeringen, 2009). Det økologiske landbrug øges fra til 9,3% i 2015-19 til 15% i 2030. Scenariosammensætningen har ikke i sig selv denne ambition for øje, men som konsekvens af de valgte produktionsformer har det resulteret i en markant forøgelse af andelen af økologisk areal. Langt størstedelen af det nye økologiske areal antages at være græsareal med produktion af græs til bioraffinering.
- Omlægning af ca. 239.000 ha landbrugsjord til naturarealer (udover skovrejsning) frem til 2030. Arealet frigives som følge af reduceret behov for foderareal, samt ved et reduceret fødevarereal som følge af stigende produktivitet. Denne udvikling fortsættes frem til 2050, hvorefter det frigivne fødevarereal i stedet prioriteres til produktion af protein og biomasse ved dyrkning af flerårige afgrøder med reduceret gødsning.
- Antagelse om omlægning til korn- og rapssorter med 15% stigning i halmudbytte, samt anvendelse af alternativ høstteknologi med 15% øget halmopsamling.
- Antagelse om optimeret gyllehåndtering for at øge gylletørstofmængden med 7,5%.
- Udnyttelse af bladbiomasse fra eksisterende areal med sukkerroer, samt biomasse fra slåning af vejkanter og grødeskæring.

*Fra Foder til Føde-scenarie (FTF)*, hvor landbrugsarealet nedskaleres drastisk med henblik på at reducere nitratudvaskningen tilstrækkeligt til opfyldelse af EU's vandrammedirektiv, for at opnå en ambition om 30% beskyttet natur i Danmark, samt for at opnå klimaneutralitet i 2040 for landbrugs- og skovsektoren (LULUCF). Ved udviklingen af scenariet er der ikke lagt vægt på at bidrage til bioøkonomien men på at fastholde fødevarerproduktionen, at konvertere til høj grad af økologi og at initiere et fundamentalt

skifte fra animalske proteinkilder til vegetabiliske. Det resulterer blandt andet i en reduktion af antal husdyrenheder til 56% af husdyrbestanden i 2020 i 2030, hvorefter bestanden falder yderligere til ca. 12% af husdyrbestanden i 2020 i 2050 og 2089 (Haaland & Clement, 2023).

Udviklingen af land-, skov- og naturarealet er skitseret i tabel 2.1 og appendix 1, hvor der i nærværende parametrisering af FTF er antaget følgende væsentlige forudsætninger:

- Ingen yderligere udvikling i areal til infrastruktur og ingen produktivitetstigninger i landbruget, da dette ikke er antaget i FTF.
- En øget skovrejsning på 22.000 ha pr. år fra 2024-2030, 9.000 ha pr. år fra 2031-2040, 5.400 ha pr. år fra 2041-2045 og 3.900 ha pr. år fra 2046-2089 (for at opnå de antagne skovarealer i Haaland & Clement, 2023, samt aftalen om et Grønt Danmark (Økonomiministeriet, 2024) og i bemærkningerne til lov om naturforvaltning's forventede skovareal i 2045 og 2089 (Regeringen, 1989)). Dermed antages en mere intensiv skovrejsning på kort sigt men med samme endelige skovareal som i BIO og EKST i 2089.
- 100.000 hektar lavbundsjord vådlægges, hvoraf 100% anvendes til naturlig succession.
- De miljø- og klimamæssige effekter ved omlægning og konvertering af landbruget, som er angivet i Haaland & Clement (2023), er direkte medregnet, selvom der tilsyneladende er afvigende antagelser om specifikke tiltags effekter (nærmere diskuteret i afsnit 2.2.3 og 3.5).
- Reduktionen af kvælstofudledning for at opfylde Vandrammedirektivet kommer udelukkende som følge af udtagning af landbrugsjord til skovrejsning og naturlig succession på de ca. 500.000 ha mest nitratfølsomme jorde.



**Tabel 2.1** Skitsering af scenariernes udvikling for forskellige parametre til årene 2030-2089. Effekter i 2030 er ikke markeret, mens ændringer til 2050 og 2089 er markeret med hhv. hård parentes [ ] og krøllet parentes { }. Tabellen uddybes i appendix 1 og 2.

Udvikling til 2030, [2050] og {2089}	BAU	BIO	EKST	FTF
Reduktion af husdyr i forhold til 2020 (%)	0 [0] {0}	20 [50] {50}	20 [50] {50}	44 [88] {88}
Udbytteindeks landbrugsafgrøder i forhold til 2017	1,07 [1,20] {1,45}	1,07 [1,20] {1,45}	1,07 [1,20] {1,45}	<b>Ingen antagelser</b>
Udvikling af landbrugsareal (ha)	2.480.000 [2.310.000] {1.960.000}	2.420.000 [2.050.000] {1.900.000}	2.200.000 [1.480.000] {1.340.000}	1.980.000 [1.670.000] {1.510.000}
Udvikling af areal til elefantgræs (ha)	0 [0] {0}	10.000 [10.000] {10.000}	10.000 [10.000] {10.000}	<b>Ingen antagelser</b>
Udvikling af areal til hamp (ha)	0 [0] {0}	17.000 [16.000] {14.000}	8.500 [8.000] {7.000}	<b>Ingen antagelser</b>
Udvikling af areal til dunhammer og tagrør (ha)	0 [0] {0}	16.400 [16.000] {14.000}	9.600 [9.100] {8.000}	<b>Ingen antagelser</b>
Udvikling af areal til pil og poppel (ha)	7.500 [7.000] {6.000}	7.500 [7.000] {6.000}	7.500 [7.000] {6.000}	<b>Ingen antagelser</b>
Udvikling af økologisk andel af landbrugsarealet (%)	13,5 [13,5] {13,5}	13,5 [13,5] {13,5}	15 [15] {15}	57,6 [100] {100}
Skovrejsningsrate (ha/år) <i>Arter</i>	1.900 [1.900] {1.900} <i>Som historisk observeret (2002-2022)</i>	11.900 [9.300] {4.000} <i>Hurtigt voksende</i>	11.900 [9.300] {4.000} <i>Langsomt voksende</i>	21.000 [6.200] {4.000} <i>Langsomt voksende</i>
Udvikling af potentielt areal til naturformål (ha) (sum af eksisterende natur, omlagt landbrugsjord og prioriteret skov)	464.000 [464.000] {464.000}	464.000 [464.000] {464.000}	716.000 [1.135.000] {1.196.000}	1.279.000 [1.456.000] {1.495.000}

## 2.2.2 Scenarier for skovbrug

Scenarierne for skovbrug er beskrevet i Nord-Larsen et al. (2024) og gengives her mere summarisk. Indholdet i de forskellige scenarier består dels af en arealudvikling beskrevet i scenarierne for landbruget samt af en række virkemidler, der svarer til dem, der er anvendt i tidligere studier af potentialet for en øget dansk produktion af bæredygtig biomasse (Nord-Larsen et al., 2024; Gylling et al., 2023; Graudal et al., 2013). Virkemidlerne omfatter:

- Skovrejsning
- Artsvalg ved skovrejsning
- Omdriftsalder/kulturareal
- Artsvalg i foryngelser
- Kulturmetode i foryngelser
- Udlæg af arealer til naturreservater og urørt skov
- Hugststyrke
- Hugstufald
- Forædling

De enkelte elementer sammensættes i fem forskellige scenarier (Tabel 2.2), der afspejler forskellige forventninger til den fremtidige forvaltning og anvendelse af skovene:

*Business-as-usual-scenarie (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 (Nord-Larsen et al., 2024).

*Business-as-usual-scenarie med øget skovplantning (BAUx)*. 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 aftalen om et Grønt Danmark (Økonomiministeriet, 2024).

*Biomasse/produktions-scenarie (BIO)*. Et scenarie der afspejler øget forvaltning af skovene med henblik på at levere råmaterialer til den grønne omstilling, herunder biomasse til energiforsyning og byggeri. Scenariet hviler på øget brug af hurtigt voksende træarter, særligt nåletræarter, i skovrejsningen og en øget udnyttelse af vedmasseressourcerne til varige træprodukter.

*Ekstensiveringsscenario (EKST)*. Et scenarie der afspejler en ekstensivering af skovbrugsproduktionen og forvaltning af skovene for øget sikring af skovens biodiversitet. Scenariet har samme skovrejsningstakt som

BAUx- og BIO-scenarierne, men skovtilplantningen sker med mere langsomt voksende løvtræarter. Udnyttelsen af træ til energi og produkter er mindsket for at efterlade flere hugstrestre til naturlig nedbrydning i skovene.

*Fra Foder-til-føde-scenarie (FTF).* I scenariet sker skovrejsningen hurtigere end i de øvrige scenarier, mens skovdriften ophører på 71% af det eksisterende skovareal. Selvom skovene fortsat dyrkes på 29% af det eksisterende skovareal samt i skovrejsninger, 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 også udarbejdet et supplerende scenarium med fuldt hugststop, som viser effekten af afslutningen af produktionen af konstruktionstræ i Danmark.

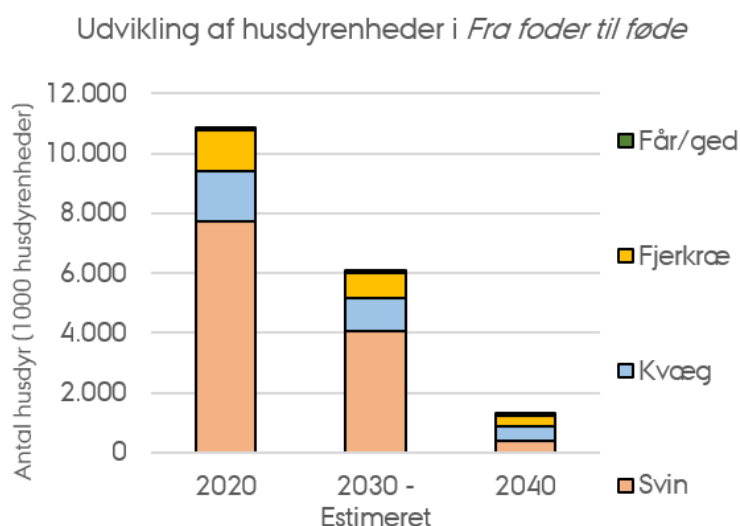
**Table 2.2** Scenarier for skovfremskrivningen. Gråtonede celler angiver, at det ikke inden for projektet var muligt at implementere dette tiltag i modellen. Som supplement til Foder-til-Føde scenariet blev der udarbejdet et supplerende Hugststop scenarium, hvor al hugst ophører i såvel eksisterende som fremtidige skove med visse undtagelser. Gengivet fra Nord-Larsen et al. 2024.

	<b>BAU</b>	<b>BAU(X)</b>	<b>BIO</b>	<b>EKST</b>	<b>FTF</b>
Kommentar	Business as usual. Baseret på et "Frozen-policy"-scenarie med vedtagne tiltag. Identisk med klimafremskrivningen 2024. Anvendelsen af træressourcen svarer til den nuværende.	Business as usual. Baseret på et "Frozen-policy"-scenarie med vedtagne tiltag. Identisk med klimafremskrivningen 2024. Anvendelsen af træressourcen svarer til den nuværende.	Et scenarie hvor produktion af træ, særligt til byggeriet, er centralt.	En kombination af BAU og BIO-scenariet.	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, kulturmetoden	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	Som nuværende	Scenarie med højere udnyttelse af små dimensioner til varige træprodukter (fibre, plader, limtræ mv)	Som nuværende	Som nuværende

### 2.2.3 Parametriseringen af scenariet "Fra Foder til Føde" (FTF)

Rapporten "Fra foder til føde II" (Haaland & Clement, 2023) skitserer, hvorledes den danske arealanvendelse kan ændres for på samme tid at opnå markante klima-, miljø- og biodiversitetsmål, ved at foretage ændringer i landbrugets udbredelse i Danmark.

Danmark importerer store mængder foder, heraf især proteinafgrøder som soja, for at opretholde en høj produktion af specielt svine- og mælkeproduktion, idet 55% af importeret foder går til svin og 35% går til malkekøer (Callesen et al., 2020). Der blev i 2016-18 gennemsnitligt importeret ca. 1.376.000 tons tørstof sojaprodukter, svarende til en mængde råprotein på ca. 646.700 tons, primært fra Brasilien (41,6%) og Argentina (35,4%) fra et samlet dyrkningsareal på ca. 760.000 hektar (Callesen et al., 2020). I FTF-scenariet er det en forudsætning, at denne import elimineres. Dermed er der ikke areal nok til at producere protein på, når 22% af landbrugsjorden samtidig antages omlagt til natur. Derfor reduceres husdyrproduktionen i scenariet betragteligt, så import ikke er nødvendigt. I scenariet vil man dog opretholde fødevarerproduktionen, målt på tons råprotein i færdigprodukter, og derfor anvendes det resterende landbrugsareal i 2030 i vidt omfang til produktion af plante proteiner.



**Figur 2.1** Antaget udvikling af husdyrenhederne i scenariet FTF. Der antages en lineær reduktion, jævnt fordelt over de 4 husdyrgrupper: Svin, kvæg, fjerkræ og får/ged, fra 2020 til 2040, hvormed der i 2030 er en husdyrbestand på ca. 56% af bestanden i 2020, og i 2040 på ca. 12% af 2020.

Der er i FTF-scenariet gjort antagelser om husdyrreduktionen frem mod 2030 og 2040 (figur 2.1), hvilket har effekt på hele arealanvendelsen. I FTF er der ikke antaget en jævn reduktion fordelt på tværs af alle typer husdyr, men fx 95% reduktion af antallet af svin fra 2020 til 2040 og 70% reduktion af antallet af kvæg i samme periode. For at kunne sammenligne husdyrreduktionen i FTF med husdyrreduktionen i de øvrige scenarier (hvor husdyrreduktionen er jævnt fordelt på tværs af dyregruppe), er husdyr konverteret til husdyrenheder hvor de forskellige husdyrgrupper vægtes forskelligt efter behovet for foder i den specifikke husdyrgruppe (Eurostat, 16. september 2024). Herefter er der antaget en lineær reduktion af de forskellige dyregrupper, så der nås en reduktion på ca. 88% husdyrenheder i 2040 ift. 2020.

Efter 2040 antages i nærværende analyse, at husdyrbestanden fastholdes til 2050 og 2089. Samme antagelse gør sig gældende for forudsigelsen af landbrugets areal i fremtiden, som i FTF er angivet til at blive reduceret med ca. 25% i 2030 og med ca. 35% i 2040 i forhold til 2020 (se appendix 1, samt figur 3.1). Arealet i 2040 antages at blive fastholdt til 2050, hvorefter det til 2089 reduceres med yderligere ca. 10%-point som følge af omlægning til skov, for at nå skovarealmålet i 2089 samt et øget areal til byer og infrastruktur.

Effekten på reduktionen af drivhusgasemissioner fra husdyrproduktionen er i scenarierne BAU, BIO og EKST estimeret til ca. 1,12 Mt CO<sub>2</sub>e for hver 10% reduktion af husdyrenheder (Jørgensen et al., 2021), hvorimod effekten af husdyrreduktionen i FTF anslås at være på ca. 0,88 Mt for 10% reduktion i antal husdyrenheder. Denne forskel er formentlig en følge af en ujævn reduktion på tværs af dyregrupper i FTF, hvor svin reduceres mere end kvæg. Det antages i FTF, at svineproduktionen reduceres fra at udgøre ca. 72% af de samlede husdyrenheder i 2020 til at udgøre ca. 31% i 2040, mens kvæg, der forbindes med en ca. 44% højere udledning end svinebrug (Jørgensen et al., 2021), øges fra at udgøre ca. 16% af de samlede husdyrenheder i Danmark i 2020, til ca. 40% i år 2040.

Biomassetilgængeligheden og drivhusgaseffekten ved omlægning til økologi er på samme vis antaget at blive skaleret op og ned i forhold til afgrødernes areal. Andelen af økologi er i 2030, 2050 og 2089 angivet til henholdsvis ~58%, 100% og 100% (Haaland & Clement, 2023). Planteproduktionen er antaget jævnt fordelt over 10 afgrødetyper i det opsatte modelsædskifte, hvilket dikterer udbyttet og tilgængeligheden af biomasse i det respektive tidsnedslag. Effekten på ændringen af udledning af drivhusgasser er i FTF estimeret til i høj grad at stamme fra den store konvertering til økologisk produktion (figur 3.9). En tilsvarende særskilt drivhusgaseffekt ved omlægning fra konventionel til økologisk produktion er ikke indregnet i de øvrige scenarier.

Til at estimere fødevarerproduktionen i de forskellige tidsnedslag tages der udgangspunkt i rapportens anførte modelsædskifte og husdyrproduktionen (Haaland & Clement, 2023). Modelsædskiftet er simplificeret ved at opdele det dyrkede landbrug i 10 forskellige afgrøder i 2040 (angivet i Tabel 2 og 3 i appendix). Afgrødefordelingen på landbrugsarealet er antaget fastholdt i 2050, og nedskaleret i 2089 relativt til det reducerede landbrugsareal.

Da et økologisk dyrkningssystem er meget sensitivt overfor fraførsel af næringsstoffer og kulstof med biomassen, er der i FTF kun regnet fraførsel af halm på de 42,4% konventionelle dyrkningssystemer, som er antaget i scenariet for 2030. Ligeledes er den økologiske halmfraktion i de øvrige scenarier antaget utilgængelig. Her er antaget samme forhold mellem kornets kerne og halm, som gennemsnitligt angivet i Danmarks statistikbank fra 2006-2022 (Lundø, 2023). Halmens fraktioner er inddelt i 4 anvendelseskategorier: Halm til fyring, foder, strøelse og nedmuldning. Det antages, at hele den i dag afbrændte mængde halm bliver tilgængelig for byggesektoren og evt. andre materialeudnyttelser, idet der forventes en fremtidig kaskadeudnyttelse, hvor biomassen først anvendes til materialer og evt. senere kan forbrændes og udnyttes til CO<sub>2</sub>-opsamling og lagring (Rasmussen et al., 2022). Desuden antages 87%

af den i dag nedmuldede mængde halm at blive tilgængelig for materialeanvendelse, dog undtaget fra arealer med kritisk kulstoffattig jord (Dexterindeks på over 10). Derudover er der medregnet en forventet halmbiomasse mængde, der frigives fra strøelse og foder ved det reducerede antal husdyr. Endelig nedjusteres mængden af gyllebaseret biomasse med de reducerede husdyrenheder, jævnt fordelt over dyregrupperne.

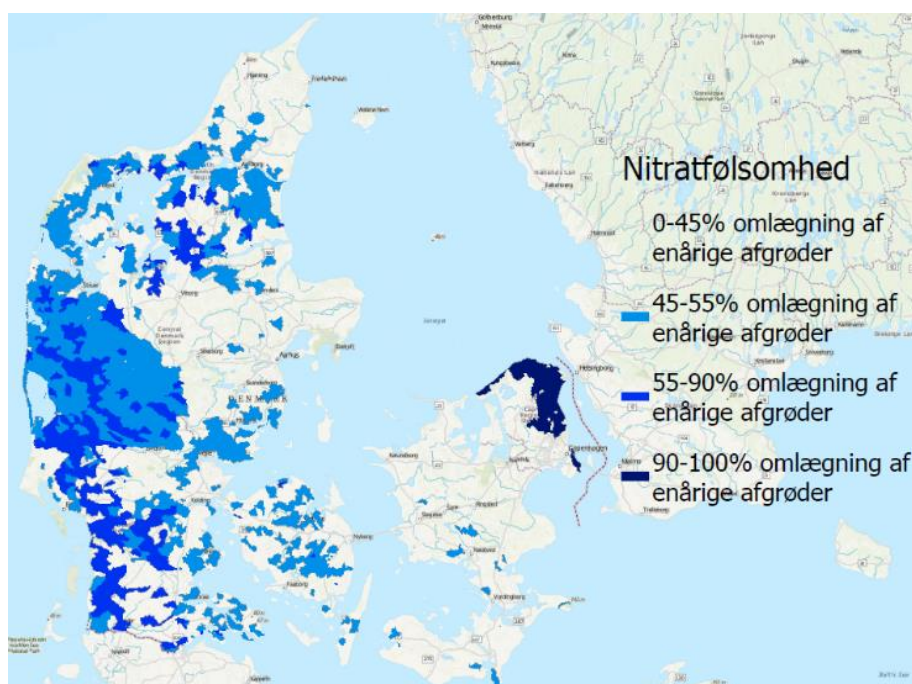
For de økologiske, flerårige afgrøder (kløvergræs), som bidrager med kvælstoffiksering til det økologiske markbrug, er det formodet at hele fiberfraktionen efter bioraffinering er fuldt tilgængelig for det øvrige samfund. For de økologiske enårige afgrøder, som korn, bælgfrugter og grøntsager antages det, at alle biomasserester recirkuleres, så næringsstofferne bibeholdes og kan anvendes indenfor landbrugssystemet, og dermed er biomassen ikke tilgængelig for materialeanvendelse i det øvrige samfund.

#### 2.2.4 Arealstrategi – omlægning mod en produktion indenfor de planetære grænser

Ved at definere og kvantificere de forskellige typer af følsomme arealer og deres overlap er det muligt at anvise hvilke stedspecifikke synergieffekter, der kan opnås ved strategisk omlægning af den nuværende landbrugsproduktion i de enkelte scenarier. En jordbrugsproduktion i Danmark, som kan holde sig indenfor de planetære grænser, kan være vanskelig at definere ud fra generelle, globale grænser som fx beskrevet i Richardson et al. (2023). Vi har derfor taget udgangspunkt i at optimere dyrkning på baggrund af mere regionale og lokale politikker, som adresserer de lokale økosystemers tålekrav for fx at sikre god drikkevandskvalitet og overfladevand i vores søer og farvande af "god økologisk kvalitet" (EU's Vandrammedirektiv, EU Commission (2020)).



### 2.2.4.1 Nitratfølsomme områder



**Figur 2.2** Kortlægning over nitratfølsomt areal i Danmark, defineret som procent nødvendig omlægning af enårige afgrøder (korn, raps og majs) i hvert ID15-opland, for at opnå den nødvendige kvælstofreduktion ift. de respektive recipienter (Mortensen & Jørgensen, 2022b).

Aftalen om et grønt Danmark (Regeringen et al., 2024) fastlægger et mål om at reducere landbrugets årlige kvælstofudledning til havmiljøet med 13.780 tons i 2030. Dette mål lægger op til en strategisk omlægning af de mest nitratfølsomme områder i Danmark for at opnå den største effekt per areal.

Et nitratfølsomt område, er defineret som et område med en dårlig evne til at tilbageholde nitrat, kombineret med et vandopland, der fører vandet og næringsstofferne til et nitratfølsomt vandområde. Et nitratfølsomt område kan f.eks. have 50% retention, hvor 50% af nitraten, der forlader rodzonen, ender i havmiljøet, mens en mere robust jord kan have f.eks. 80% retention, og dermed er det kun 20% af nitraten, der ender i havmiljøet. De følsomme områder er både sandede jorde i det vestlige Danmark, men også bedre jorde, som er drænede i det østlige Danmark. Som følge af den forskellige retention har tiltag på nitratfølsomme jorde en større effekt på kvælstofudledningen til havmiljøet end tiltag på 'robuste' jorde.

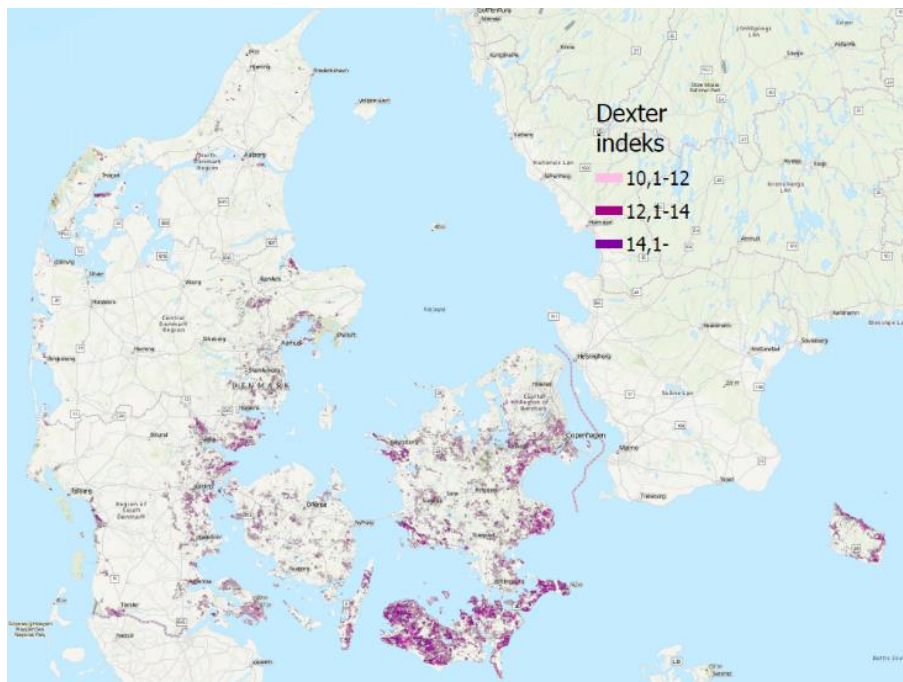
Modellen der er brugt til at beskrive nitratfølsomhed, er sammensat af de eksisterende dyrkingsystemer og vandmiljømål for vandoplandets recipienter (figur 2.2). Dermed bliver nitratfølsomheden et udtryk for, i hvor høj grad der dyrkes uhensigtsmæssigt, ved nuværende dyrkningspraksis, i forhold til jordens retention og vandoplandets miljømål. Denne tilgang er yderligere beskrevet i Mortensen & Jørgensen (2022b). Udledningen af nitrat påvirkes af retentionen i jorden, tilførslen af kvælstof via gødning og fjernelsen af kvælstof ved høst samt afgrødernes vandbalance. Dermed vil effekten af fx skovrejsning bestå af minimeret tilførsel af kvælstof, mindre årligt optag og en større vandfordampning, særligt fra

nåletræer. Effekten af omlægningen fra enårige afgrøder til flerårigt kløvergræs på nitrutfølsomme jorde baseres på den empiriske model NLES5 (Børgesen et al., 2022), mens effekten af de øvrige afgrødeomlægninger i BAU, BIO og EKST er baseret på reduktionsværdier fra (Eriksen et al., 2020 og Olesen et al., 2018). Disse værdier kan være justeret i senere virkemiddelkataloger, men er anvendt for at sikre sammenlignelighed med effektberegningerne i tidligere scenarieanalyser (Gylling et al., 2023). Desuden arbejdes på reviderede N-retentionskort, som kan flytte på den optimale placering af omlægningen af nuværende dyrkningspraksis.

Ved at ændre dyrkningssystem fra et enårigt- til et flerårigt dyrkningssystem kan man mindske nitratudvaskningen også ved sammenlignelige gødningsmængder, hvilket skyldes et større optag og retention i en flerårig afgrøde henover især vinterhalvåret, hvor der ellers er stor risiko for nitratudvaskning (Manevski et al., 2018). Ligeledes vil en konvertering fra et enårigt dyrkningssystem til skov eller et beskyttet naturareal reducere nitratudvaskningen, da der herefter ikke vil være nitratinput ved gødskning til arealet. I dag etableres efterafgrøder på mange arealer med enårige afgrøder for at opnå en reduktion af nitratudvaskningen, hvilket dog ikke er helt så effektivt som omlægning til flerårige afgrøder (Eriksen et al., 2020). Effekten af omlægningen fra enårige afgrøder til flerårigt kløvergræs på nitrutfølsomme jorde baseres på den empiriske model NLES5 (Børgesen et al., 2022), mens effekten af de øvrige afgrødeomlægninger i BAU, BIO og EKST er baseret på reduktionsværdier fra Eriksen et al. (2020) og Olesen et al. (2018). Disse værdier kan være justeret i senere virkemiddelkataloger, men er anvendt for at sikre sammenlignelighed med effektberegningerne i tidligere scenarieanalyser (Gylling et al., 2023). Desuden arbejdes der p.t. på at optimere N-retentionskortet, hvilket kan flytte på den optimale placering af omlægningen af nuværende dyrkningspraksis.

I BIO og EKST implementeres der specifikke afgrøder til byggematerialer på strategisk omlagte arealer, der er velegnede til den specifikke afgrødes dyrknings- og miljømæssige egenskaber. På de nitrutfølsomme arealer placeres således 10.000 hektar elefantgræs i begge scenarier (se tabel 2.1), hvor der i EKST er reduceret gødskning (45 kg N pr. ha i forhold til 75 kg N pr. ha i BIO), og antagelse om et reduceret udbytte på 22%.

### 2.2.4.2 Kulstoffattige arealer



**Figur 2.3** Kortlægning over arealer med høj dexterværdi (ler:kulstofratio >10), baseret på markdata i det øverste jordlag (0-20 cm) (Mortensen & Jørgensen, 2022b).

Et kulstoffattigt areal karakteriseres som et areal hvor jordbunden har et kritisk lavt kulstofindhold i forhold til opretholdelse af en god jordstruktur for afgrødedyrkning (Mortensen & Jørgensen, 2022b), hvilket er kendetegnende for jorde med en dexterværdi større end 10. Dexterværdien angiver forholdet mellem jordens indhold af ler og kulstof (figur 2.3). Et højt dexterindeks indikerer en dårlig jordkvalitet, hvor strukturen af jorden er dårlig, så den er kompakt og svær at bearbejde (Dexter, 2004). Kulstoflageret i jorden udtømmes ved udpining, hvis mere kulstof forlader jorden (primært i form af  $\text{CO}_2$ ) end der tilføres. Dermed vil det i områder med højt dexterindeks være u hensigtsmæssigt fx at fjerne halm fra kornproduktion, idet halmen bør bidrage til jordforbedring.

For et dyrkningssystem med flerårige afgrøder bidrager rodbiomassen samt rodexudater, til at opbygge jorden kulstofpulje, selvom den overjordiske biomasse høstes og fjernes fra arealet (Chen et al., 2022). Det samme gælder for konverteringen af et enårigt dyrkningssystem til natur, hvor træer og andet flerårigt plantedække bidrager til jordens kulstofpulje igennem rodbiomasse, rodexudater m.m. (Or et al., 2021; Pedersen & Kristensen, 2022). Beregningen af scenariernes effekter på drivhusgasudledning fra landbruget er sket med udgangspunkt i Gylling et al. (2023). Effekterne af de enkelte tiltag kan være justeret i senere kilder, men ovenstående er anvendt for at sikre sammenlignelighed med scenariere-sultaterne i Gylling et al. (2023).

### 2.2.4.3 Pesticidfølsomme arealer

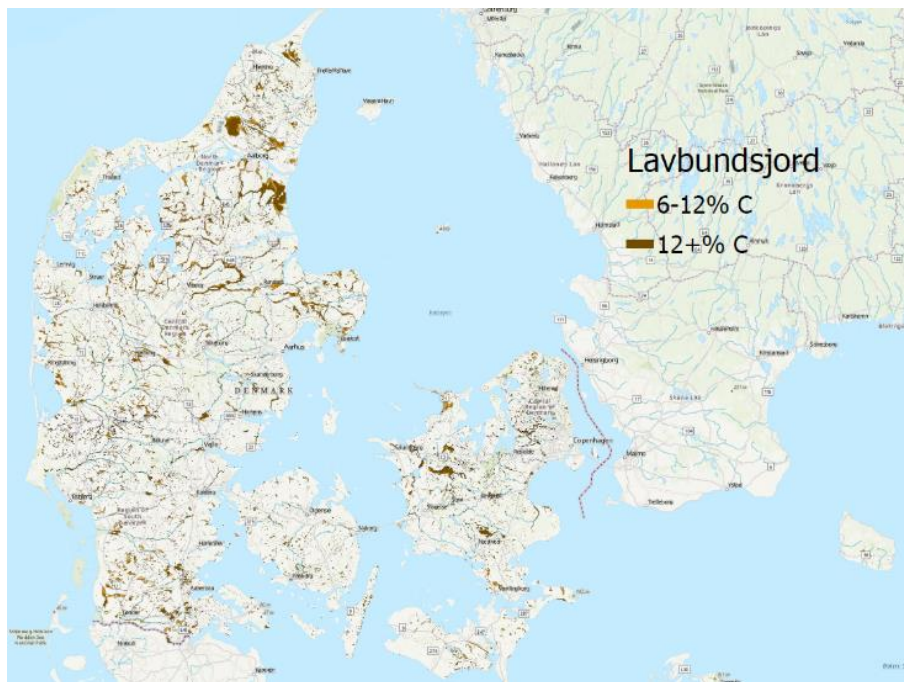


**Figur 2.4** Kortlægning over særligt – og potentielt pesticidfølsomme arealer, hvor området har høj permeabilitet i jorden og er af særlig drikkevandsinteresse (Mortensen & Jørgensen, 2022b).

De pesticidfølsomme områder defineret i denne analyse medregner kun pesticidfølsomhed ved matri-ceflow, og derfor er kun jorde med <10% ler. Et pesticidfølsomt område er karakteriseret ved at gennemtrængeligheden i den øverste meter er høj, samt at det givne område på overfladen er opland for grundvand af særlig drikkevandsinteresse (OSD), som uddybet i Mortensen & Jørgensen, (2022b) og illustreret på figur 2.4.

Ved enårige dyrkningssystemer er behandlingshyppigheden, samt standardbehandlingerne ofte væsentlig højere end i et flerårigt dyrkningssystem (Miljøministeriet, 2021). Dette skyldes bl.a. den højere omlægningsrate, hvor man med pesticider forsøger at give en konkurrencefordel til den nye afgrøde. Dermed vil man med en konvertering til et flerårigt dyrkningssystem kunne reducere pesticidforbruget og dermed pesticidudvaskningen til undergrunden og sikre en mere hensigtsmæssig produktion. For konvertering til natur gælder naturligvis i særdeleshed, at der ikke er noget input af pesticider. I BIO omlægges dette areal (~17.000 ha) til intensivt dyrket hamp og i EKST omlægges til 50% ekstensivt dyrket hamp (med 22% reduceret udbytte, pga. lavere gødskning) og til 50% natur (se tabel 2.1).

#### 2.2.4.4 Kulstofrige lavbundsarealer

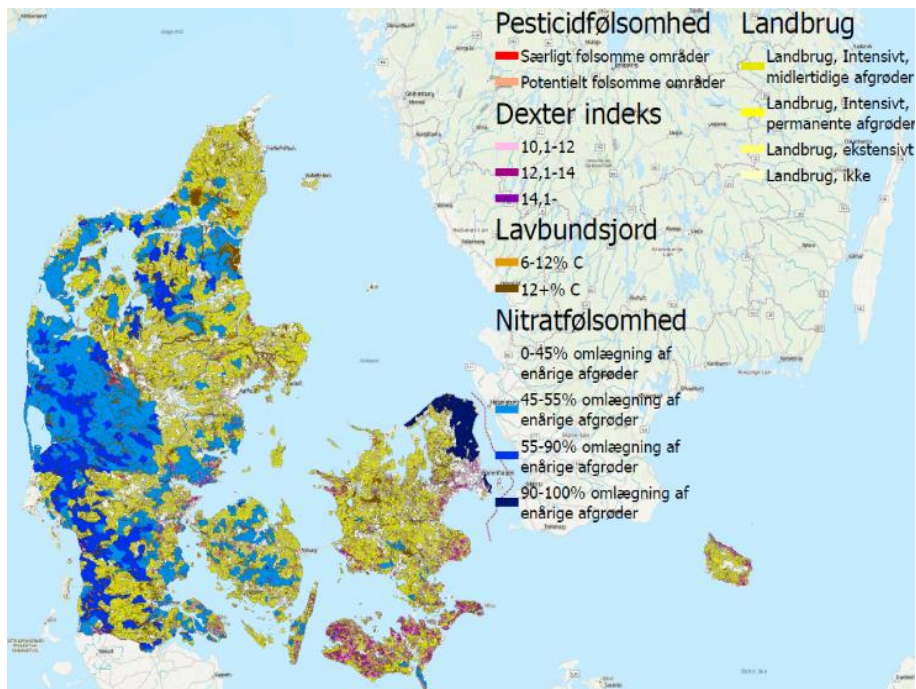


**Figur 2.5** Kortlægning over kulstofrige ( $\geq 6\%$  C) lavbundsjord i Danmark fra markdata fra 2018 (Mortensen & Jørgensen, 2022b).

For kulstofrige lavbundsjord gælder det, at de kan vådlægges, hvorved omsætningen af kulstofpuljen i jorden stoppes, og en positiv klimaeffekt kan opnås (Greve et al. (2021) & figur 2.5). Dette bevirker, at kun afgrøder som kan tåle stående vand kan dyrkes hensigtsmæssigt i et sådant område. Det er indeholdt i dyrkningskonceptet paludikultur, hvor der dyrkes vilde sumpplanter såsom tagrør, dunhammer eller visse kulturgræsser som strandsvingel eller rørgræs, der kan tolerere høj vandstand og har gode karakteristika i forhold til minimal jordbearbejdning og akkumulering af næringsstoffer i biomassen (Ziegler et al., 2021). Ligeledes vil beskyttet natur på kulstofrig lavbundsjord bidrage til minimale jordforstyrrelser. Konverteret kulstofrig landbrugsjord til vådlagt lavbundsjord indeholder oftest mange næringsstoffer, som kan vanskeliggøre opnåelse af en god naturkvalitet hurtigt. Effekten af reduktionen af drivhusgasemissioner, som følge af vådlægning af kulstofrig lavbundsjord (lavbundsjord med  $\geq 6\%$ C og  $>12\%$ C) er estimeret igennem emissionsfaktorer fra Greve et al. (2021), og inkluderer de ændrede udledninger af  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  og lattergas ( $\text{N}_2\text{O}$ ).



#### 2.2.4.5 Samlet oversigt over følsomme og robuste landbrugsarealer



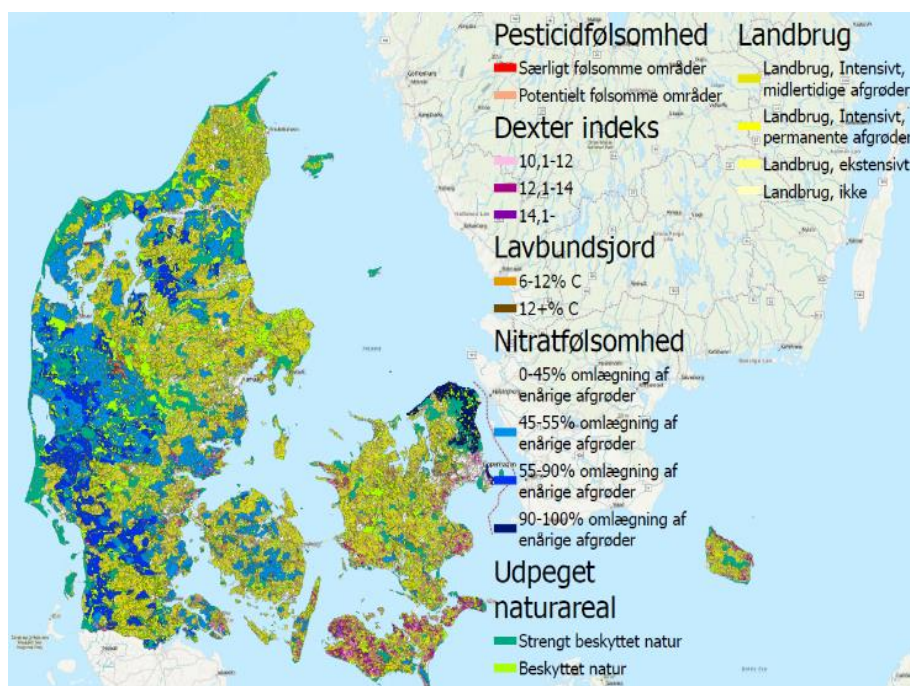
**Figur 2.6** Samlet kortlægning over følsomme arealer i Danmark, samt landbrugsarealer. Følgende lag-hierarki er valgt: 1) Pesticidfølsomt, 2) Dexter, 3) Lavbund, 4) Nitratfølsomt og 5) Landbrug. Hermed illustreres det definerede 'robuste' landbrugsareal.

Ved at samle alle de følsomme arealtyper på kortet med det danske landbrugsareal, fremkommer det landbrugsareal, der for indeværende kan betragtes som robust landbrugsjord (figur 2.6). Kortet viser dog ikke forskellige følsomme områders overlap, da det har været nødvendigt at prioritere disse over hinanden (Pesticidfølsomt > Dexter > Lavbund > Nitratfølsomt > Landbrug), for at undgå uoverskueligt mange kombinationer af arealtypologier (som fx et areal der både er nitratfølsomt, pesticidfølsomt og lavbundsjord). Den robuste landbrugsjord vil i denne analyse være et areal, hvorpå der ikke kan identificeres markante potentialer for synergieffekter. Der vil altså ikke være nogen større miljømæssig gevinst ved at omlægge et robust areal til fx flerårige afgrøder eller skov, hvis nitratretentionen i undergrunden er høj, der ingen grundvandsinteresse er i området, dexterindekset er lavt, og det ikke er kulstofrig lavbundsjord.

#### 2.2.4.6 Sammenkædning af arealstrategier

Ved også at inkludere kortlægningen af udpegede områder, der vil skulle beskyttes, eller strengt beskyttes, hvis 30% af det danske landareal skal udlægges til natur, således (som det er vedtaget som gennemsnit for EU (Council of the European Union, 2020) og foreslået implementeret af Ejrnæs et al., (2022)<sup>2</sup>) er det muligt at kvantificere, hvor stort et miljø- og klimafølsomt areal der overlappes af naturinteresser, og hvor stort et robust areal der overlappes af naturinteresser (figur 2.7). Forslaget om 30% beskyttet natur er i tråd med analysen af de planetære grænser i Richardson et al. (2023), og derfor er det scenariet fra Ejrnæs et al. (2022), der er valgt i den følgende analyse.

Andre tilgange til udpegning og reservation af areal til forbedring af biodiversiteten har andre mål og udfald. Fx i Højgård Petersen et al., 2024, hvor intentionen bl.a. er, at udpegningen skal være så omkostningseffektiv som muligt, ved at sammenkoble større sammenhængende naturarealer. Denne tilgang skønnes at medføre beskyttelse af 22% af Danmarks areal. I en mere omfattende analyse af optimering af Danmarks arealanvendelse i forhold til biodiversitet kunne det være meningsfuldt at undersøge overlappene mellem forskellige analyser af Danmarks potentielle areal til natur, som i en analyse fra Danmarks Naturfredningsforening (Danmarks Naturfredningsforening, 19. september 2024), samt kortlægge prioriteterne på kort og lang sigt ved udpegningen af beskyttet natur.



**Figur 2.7** Samlet kortlægning over følsomme arealtyper i landbruget i Danmark; de udpegede naturarealer til beskyttet og strengt beskyttet natur er fra Ejrnæs et al. (2022).

<sup>2</sup> Kriterier findes i sektion 2.1 i <https://dce2.au.dk/pub/SR507.pdf>



Den landbrugsfaglige analyse har, udover at estimere potentialet for biomasse- og fødevarereproduktion ved forskellige scenarier, haft til formål at anvise og kvantificere synergieffekter ved strategisk omlægning (eller udtag) af dyrkede jorde med særlig følsomhed for fx nitratudvaskning eller pesticidtab. Ved hjælp af GIS-værktøjet ArcGIS PRO 3.1.0 er følsomme arealtypologier samt de mest egnede arealer til naturreservation (Ejrnæs et al., 2022) defineret og sammenstillet. Herved har potentialet for flersidede løsninger på de specifikke arealer kunnet kvantificeres.

Nuværende arealanvendelse er fastsat i Basemap 04 (Levin, 2022), som danner grundlaget for analysen. Ved overlappning af Basemap 04 og naturreservationen i Ejrnæs et al. (2022), er identificeret overlappet mellem allerede-eksisterende natur, skoven og landbruget. Herved fremkommer det areal der skal til for at realisere fordelingen af arealkategorierne i Ejrnæs et al. (2022). GIS-analysen viste, at ca. 26 procentpoint (ca. 1,12 mio. ha) af de 30% er udpeget på arealer med skov, landbrug eller eksisterende terrestrisk natur, mens de sidste 4 procentpoint (164.000 ha) ligger på arealer såsom søer, vandløb samt rekreative områder, som ikke behandles i denne rapport. Det er således de 1,12 mio. ha, der bliver målet for udtagning til naturbeskyttelse i denne rapport.

### 2.3 Metode ved landbrugsfremskrivningen

Til forskel fra tidligere analyser med fokus på hele den bioøkonomiske sektor (Gylling et al., 2023; Rasmussen et al., 2022), har nærværende analyse centreret sig omkring, hvorvidt det danske land- og skovbrugsareal kan forsyne bygge- og anlægsbranchen med biomasse af en kvalitet, så biomassen kan implementeres i byggeriet som biobaserede byggematerialer. Derfor har output fra landbruget skullet tilpasses byggematerialspecifikationer, som har kunnet håndteres i den videre analyse. Fx er output fra paludikultur på lavbundslande tilpasset, så tagrør og dunhammer ikke bioraffineres til proteinkoncentrat og fibre, men høstes til blandt andet tækkerør.

Udover tilgangen fra Gylling et al. (2023), beskrevet detaljeret i (Mortensen & Jørgensen, 2022b), inddrager denne rapport nye afgrøder, som kan bidrage med biomasse til eksisterende byggevarer, med henblik på at skitsere potentielle råvaremængder og hvorledes de passer med byggeriets efterspørgsel. Afgrøderne inddrages på strategisk omlagte arealer, så de kan bidrage til at opfylde miljø- og klimamæssige krav. De inddragne afgrøder og deres biomassefraktioner er: 1) Elefantgræs, der dyrkes på nitratsensitive arealer, da afgrøden har en høj tilbageholdelse af nitrat sammenlignet med et enårigt dyrkningssystem (Jørgensen, 2005). Elefantgræs antages at bidrage med stængler til plademateriale (2/3 af samlet biomasse), samt grøn fiber til isolering eller plademateriale (findes i plantens top efter bioraffinering for proteinekstraktion). 2) Fiberhamp dyrkes på pesticidfølsomme arealer, da pesticidforbruget ved hampedyrkning er meget begrænset (Palleen, 2021). Dette dyrkningssystem bidrager med hampefibre (32% af samlet biomasse) og hampeskæver (65% af samlet biomasse), der kan anvendes til hempcrete, plademateriale og isolering.

Proteinbalancen, beregnes som en simpel balance mellem danskproduceret protein fra dyr og planter og importen af protein fra soja til foder. Proteiner fra animalsk produktion skaleres ned relativt til husdyrreduktionen, med afsæt i den estimerede animalske produktion i dag (~690.000 tons protein pr. år, Hermansen, Mogensen, et al. (2017)). Det samme gør sig gældende for behovet for importen af soja-protein til foderet, hvor der i Callesen et al. (2020) blev estimeret en gennemsnitlig sojaimport på ~635.000 rent protein fra 2016-18 (ved 12% vand og 46% protein i sojaskrå). Den vegetabiliske produktion af proteiner fra grøntsager, korn og bælgfrø til humant konsum estimeret i BAU, BIO og EKST, som tager udgangspunkt i estimatet fra Gylling, M., (2020) på 49.700 tons plante proteiner i 2018. Grønproteinproduktionen fra græs og elefantgræs-top, er estimeret ud fra en antagelse om at ca. 18% af den høstede græsbiomasse kan udtrækkes som en råproteinfraktion, hvoraf ca. 47% er rent protein (Hermansen, Jørgensen, et al., 2017). Af proteinfraktionen, er det antaget at 25% vil være velegnet til direkte humant konsum, og de sidste 75% således vil være egnet til substitution af importeret sojaprotein til husdyr.

## 2.4 Metode ved skovbrugsfremskrivning

I forbindelse med Klimafremskrivning 2024 (Klima-, 2024; Nord-Larsen et al., 2024) blev der gennemført en analyse på tværs af Europa med flere kriterier for at identificere en passende platform til de danske kulstoffremskrivninger for skov. Baseret på en række forskellige kriterier faldt valget på EFISCEN-Space-modellen (Schelhaas et al., 2022) som grundlag for klimafremskrivningerne for skov. I forbindelse med projektet Veje til biobaseret byggeri var det 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. Modellen er beskrevet i flere detaljer i Nord-Larsen et al. (2024).

EFISCEN-Space er en rumligt eksplicit model designet til at gennemføre simuleringer af skovudviklingen under forskellige scenarier for den fremtidige skovforvaltning. Modellen anvender en dynamisk, individbaseret tilgang til at simulere udviklingen af skovbestande over tid på baggrund af data indhentet fra prøveflader i Danmarks Skovstatistik (figur 2.8) Modellen modellerer vækst og dødelighed for enkelttræer målt på prøvefladerne under hensyntagen til faktorer som jordbund, klima, træart, alder, træstørrelse og konkurrence mellem træer på prøvefladen. Da EFISCEN-Space er rumligt eksplicit, muliggør modellen detaljerede vurderinger af skovens udvikling på regionale og nationale niveauer, hvilket tillader en mere præcis repræsentation af forskellige økosystemer.

Grundstenene i EFISCEN-Space modellen udgøres af:

*Input-data i form af træmålinger og -registreringer på Danmarks Skovstatistik prøveflader* (National Forest Inventory, NFI). Data fra den seneste femårige rotation af målinger (2018-2022) (Nord-Larsen et al., 2023) danner udgangspunkt for fremskrivningerne. Målingerne omfattede 9.693 prøveflader, og der blev i perioden 2018-2022 målt i alt 114.426 træer.

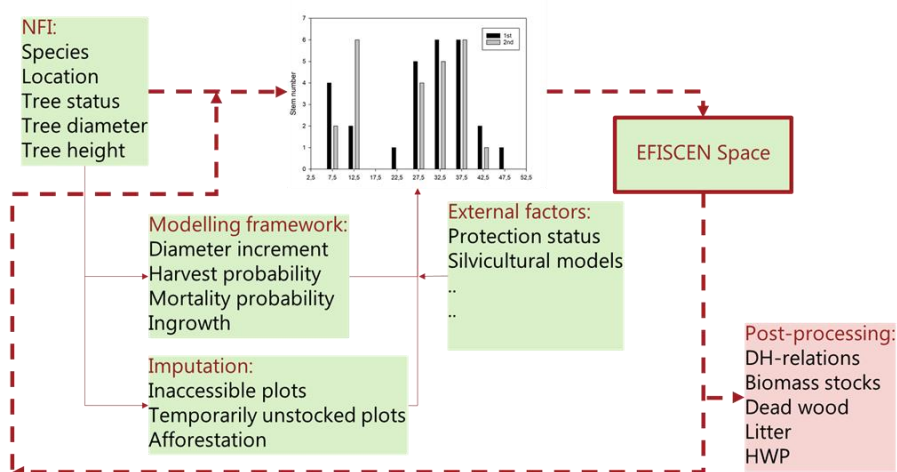
*En tilvækstmodel.* EFISCEN-Space anvender en enkelt-træ tilvækstmodel til at beskrive den dynamiske udvikling af skovbevoksninger over tid. Modellen bygger på en Gompertz-model, der beskriver en sigmoid vækstkurve (Gompertz, 1825). Modellens parametre blev estimeret ud fra gentagne NFI-målinger af 2,3 millioner træer over hele Europa (Schelhaas et al., 2018).

*En model for naturlig dødelighed.* Træernes naturlige dødelighed afhænger af en lang række forskellige komponenter som omfatter jordbunds- og klimaforhold, træart, konkurrence med andre træarter, alder, hyppigheden af insekt- og svampeangreb og hyppigheden af større forstyrrelser som storme og oversvømmelser. For at simulere udviklingen af de danske skove blev den observerede naturlige dødelighed udtrukket fra gentagne målinger i Danmarks Skovstatistik (2002-2022) og brugt til at udlede historiske årlige dødeligheder for hver art og diameterklasse.

*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). Til denne rapport udtrak vi nationale hugstsandsynligheder fra de gentagne målinger i Danmarks Skovstatistik (2002-2022) for at repræsentere de historiske hugstsandsynligheder for hver art. På arealer udlagt til eksempelvis biodiversitetsbeskyttelse afspejler den valgte hugstsandsynlighed scenariet fx ved at sætte sandsynligheden til 0 i urørt skov.

*En model for indvækst af træer på prøvefladerne.* Naturlig selvsåning af nye træer på prøvefladerne simuleres med en dynamisk indvækstmodel, hvori der indgår træartssammensætningen og tætheden af bevoksningen på arealet såvel som viden om træernes spredningsevne. Tilplantning af skovrejsningsarealer simuleres ved at danne nye prøveflader med en træartssammensætning, der dikteres af det enkelte scenarie, og som indsættes ved hver ny femårig rotation af simuleringerne. Diameterfordelingen af de indplantede træer blev fastsat ved højresiden af en normalfordeling med middelværdi 0 og spredning 1. Stamtallet blev fastsat ud fra almindelige planteafstande for hhv. løv- (1,25 x 1,25 m, svarende til 6.400 træer per ha) og nåletræer (1,75 x 1,75 m, svarende til 3.265 træer per ha).

Fremskrivningen af skovene og deres biomasseproduktion til biobaseret byggeri tager udgangspunkt i, hvordan skovene ser ud i dag, baseret på opgørelserne på Danmarks Skovstatistik's prøveflader (figur 2.8). Som udgangspunkt for simuleringerne ekspanderes antallet af træer 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 (figur 2.8). Her beregnes vedmasse, biomasse og kulstofindhold i træerne ud fra nationale vedmasse- og biomassefunktioner (Madsen, 1985; Madsen, 1987; Madsen and Heusèrr, 1993; Nord-Larsen et al., 2017). Resultaterne gemmes i en fil, der opdateres ved hver ny femårig rotation af simuleringerne.

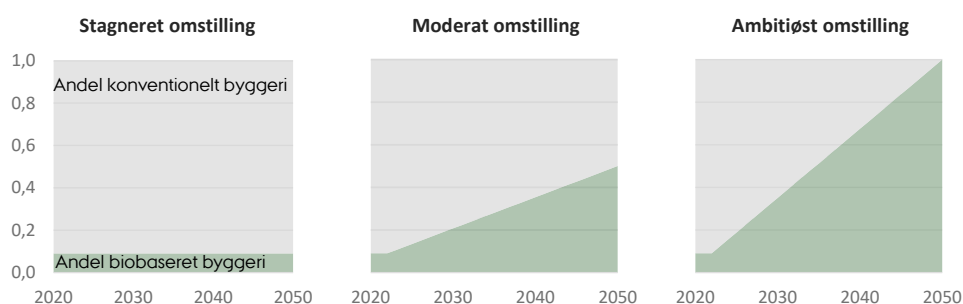


**Figur 2.8** Diagram der viser hvordan simuleringerne med EFISCEN-Space gennemføres.

I det næste skridt opdateres modellerne for hugstsandsynlighed, og der dannes nye prøveflader med skov i overensstemmelse med de forskellige scenariers forventning til skovrejsning (figur 2.8). De opdaterede filer fødes tilbage i EFISCEN-Space, der herefter køres i endnu en femårig periode. I nærværende projekt blev kørslerne gentaget 15 gange og simulerede herved udviklingen fra 2022 til 2027.

## 2.5 Metode ved fremskrivning af byggeriet og dets efterspørgsel

Som en del af indsatsen 'Veje til biobaseret byggeri' er byggeriets fremtidige behov for biobaserede byggevarer behandlet. Behovet er estimeret i en scenariebaseret tilgang, hvor forskellige bud på byggeriets omstillingsgrad til en mere biobaseret byggeskik frem mod 2050 illustreres (Lindgren et al., 2024b). Derudover arbejdes der med en prognose for den fremtidige byggeaktivitet med et usikkerhedsspænd baseret på historisk data. Disse data inddrages her med henblik på at sammenholde dem med de tilgængelige biomasse mængder i jordbrugsscenerierne.

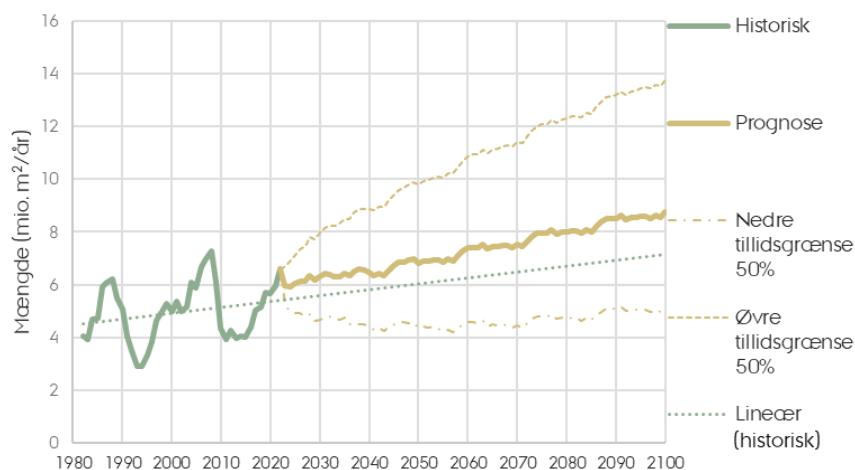


**Figur 2.9** Scenarier for byggeriets omstilling fra konventionelt (grå) til biobaseret (grønt) byggeri.

Følgende hovedscenarier for byggematerialebehov er opstillet og illustreret i figur 2.9:

1. Stagneret omstilling
  - Den nuværende grad af biobaseret byggeri (træ-byggeri) på ca. 9% af byggeaktiviteten forbliver uændret
2. Moderat omstilling
  - I perioden 2022 frem mod år 2050 øges graden af biobaseret byggeri kontinuert mod en omstilling til 50% af byggeaktiviteten
3. Ambitiøs omstilling
  - I perioden 2022 frem mod år 2050 øges graden af biobaseret byggeri kontinuert mod en omstilling til 100% af byggeaktiviteten
4. Ambitiøs omstilling + Byggestop
  - Omstilling til biobaseret byggeri som i "Ambitiøs omstilling"
  - Stop for alt nybyggeri undtagen kritisk infrastruktur. Dette scenarie er fastsat med 5% af den nuværende byggeaktivitet.

For at estimere byggeriets fremtidige behov for byggematerialer er der udarbejdet en model til kortlægning af bygningsdele, der nybygges og renoveres (Lindgren et al., 2024b). Modellen baseres på historisk udvikling og data fra Danmarks Statistik, BRR, Energimærkningsordning og Build rapporten "Klimapåvirkning fra renovering: Muligheder for udformning af grænseværdier til LCA for renovering". Her ved opgøres udviklingen af forskellige nybyggede og renoverede bygningstypologier såsom parcelhuse, rækkehuse, etageboliger mm. (figur 2.10). Da fremskrivningen bliver mere usikker, jo længere tidshorisont der inddrages, og da byggeskikken ændres simultant, er det besluttet ikke at anvende fremskrivninger til længere end 2050.



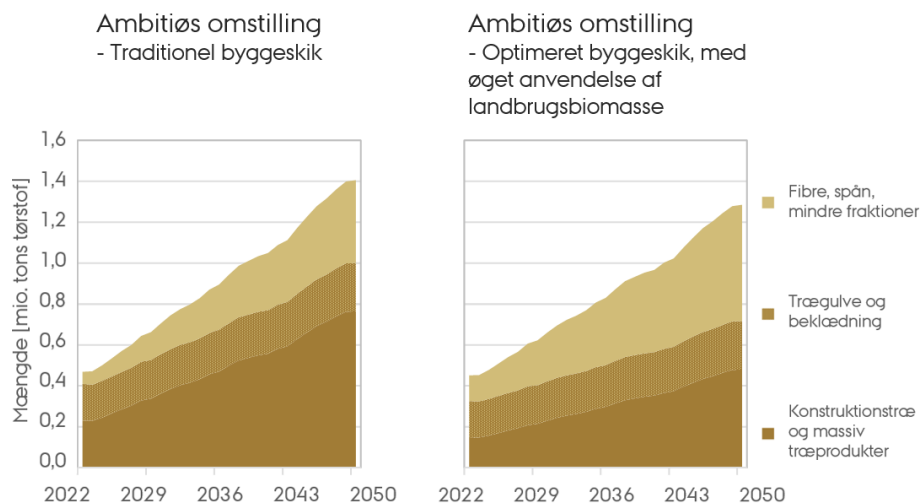
**Figur 2.10** Historisk tendens for byggeaktivitet i Danmark (Blå) (mio. m<sup>2</sup>/år), samt prognosen for den fremtidige byggeaktivitet (Rød). Øvre og nedre tillidsgrænse baseres på 50%-konfidensintervallet og lægger basis for henholdsvis en høj ('festen fortsætter') og lav ('opbremsning') byggeintensitet, mens den estimerede lineære historiske tendens lægger basis for 'prognosen' for byggeintensiteten. Kilde: Lindgren et al., 2024b.

Med udgangspunkt i den modelberegnete udvikling estimeres behovet for biomasse til byggematerialer for hvert scenarie (yderligere uddybet i Lindgren et al. (2024b)).

I denne rapport har vi udvalgt scenariet 'Ambitiøs omstilling' til den videre behovsanalyse, hvor det antages, at byggeriet bliver så biobaseret som muligt i 2050. De materialer, som vi antager vil substituere konventionelle byggeprodukter, er træ (konstrukstræ og massive træprodukter som CLT, LVL, I-profiler, trægulve m.m.), biobaserede plader og isolering (gulvspånplan, undertag, vindspærre, fiberisolering m.m.), hvor det vurderes muligt ift. brand- og fugtforhold.

Biomassebehovet undersøges i to underscenerier: "Traditionel biobaseret byggeskik" (primært træ og træbaserede produkter), og "Optimeret biobaseret byggeskik", hvor anvendelse af massivt træ reduceres. Her anvendes bl.a. bearbejdede træprodukter, hvor regler og ribber af massivt konstrukstræ erstattes af I-profiler bestående af konstrukstræ i flangerne og en biobaseret plade som krop. I dette scenarie reduceres anvendelsen af massivt træ, mens potentialet for anvendelse af landbrugsafgrøder øges (figur 2.11).

Baggrunden for at inkludere et scenarie med øget anvendelsen af landbrugsbaserede biomasseressourcer til at supplere den traditionelle anvendelse af træ i byggeriet består i, at forsyning med danskproduceret træ er begrænset sammenlignet med forsyningen af biomasse fra landbruget (Gylling et al., 2023). Dermed er der i scenariet "traditionel biobaseret byggeskik" en risiko for at skulle importeres en stor andel af de samlede træressourcer for at kunne dække byggeriets materialebehov.



**Figur 2.11** Estimerede årlige mængder af biobaserede materialer ved ambitiøs omstilling af byggeriet for Traditionel biobaseret byggeskik (venstre) og ved Optimeret byggeskik, med øget anvendelse af landbrugsbiomasse (højre). Kilde: Lindgren et al., 2024b.

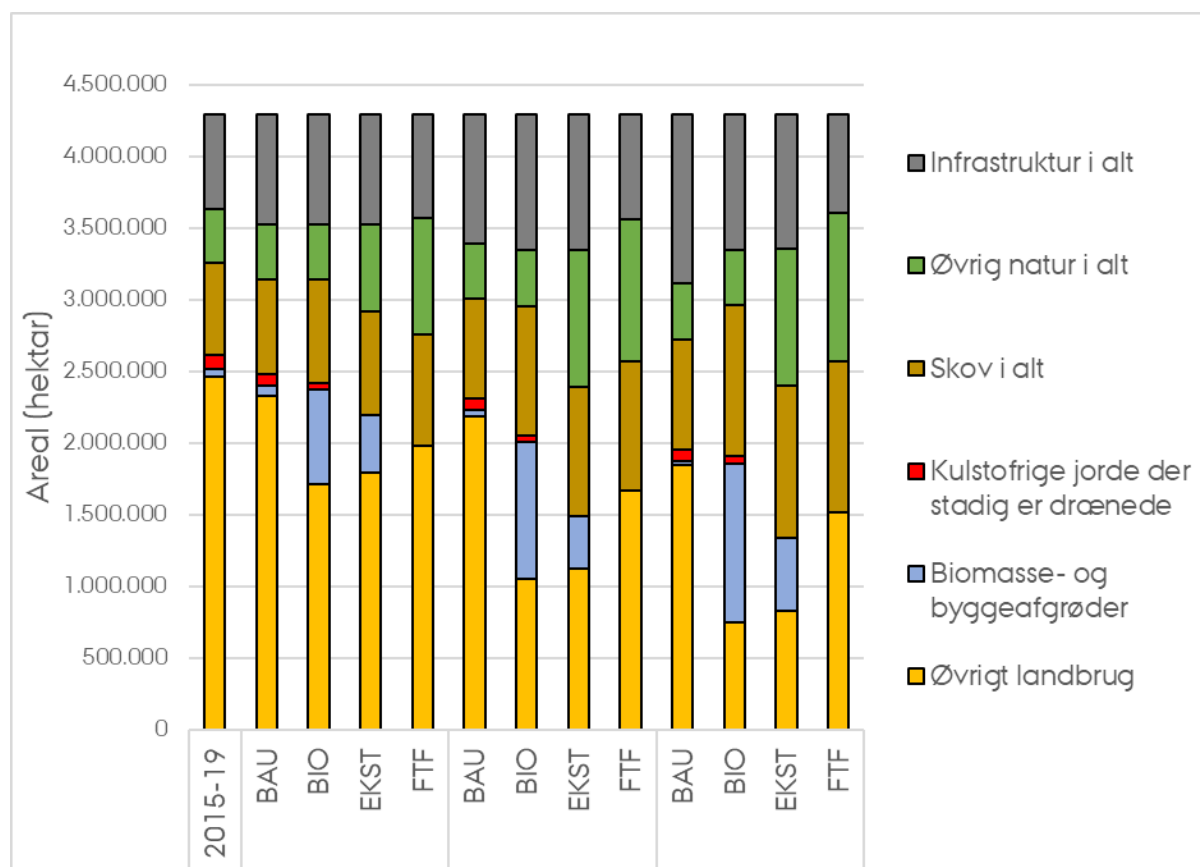
Til at estimere materialebehovet er anvendt kendte byggeprodukters materialefysiske egenskaber (fx isolerings- og bæreevne), densitet og indhold af fugt, binder, brandhæmmer m.m. (Græsfiber: Grami-therm, 2023; Halm: Pieter Stadhouders, 2022; Træfiber: Thermocell Sales ApS, 2019; Hamp: Von Hanf, 2023), hvorved substitutionen af et mineralsk produkt med et biobaseret produkt kan konverteres til den mængde biomasse, der er nødvendigt for at producere produktet.

En uddybende redegørelse for fremskrivningen af byggeriets udvikling og behov for biobaserede materialer findes i baggrundsrapporten: 'Scenarier for fremtidens behov for biobaserede byggematerialer' (Lindgren et al., 2024b).

### 3. Resultater og diskussion

#### 3.1 Ændring i arealanvendelse

Potentialet for biomasseproduktion er stærkt afhængigt af prioriteringen af landets areal til forskellige formål.



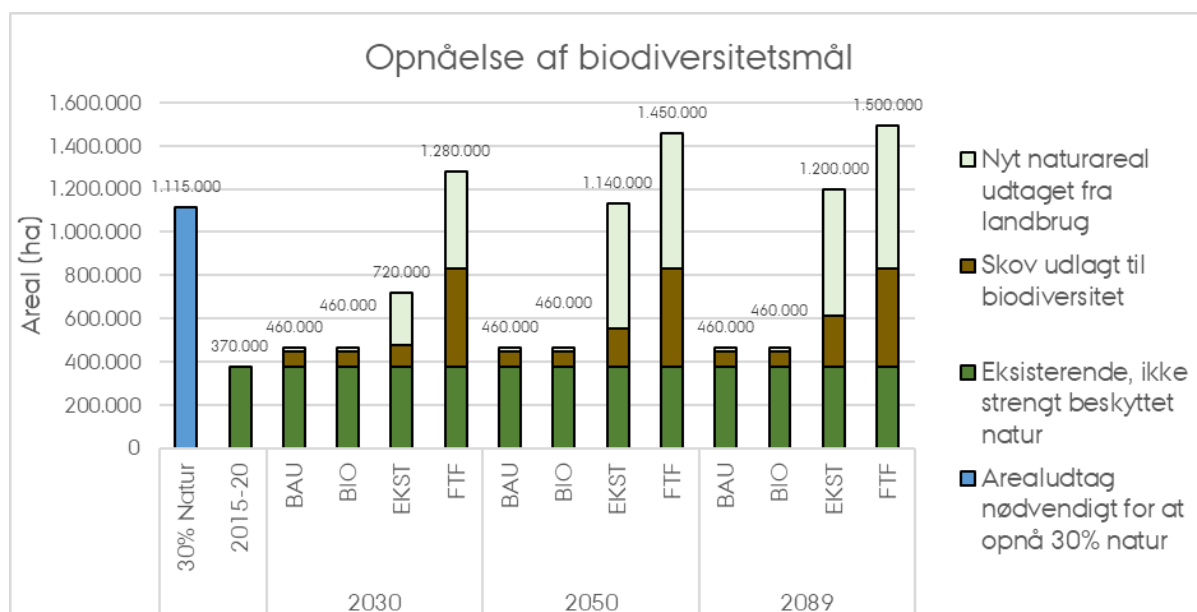
**Figur 3.1** Arealfordeling i scenarier over de tre tidsnedslag 2030, 2050 og 2089. Øvrig natur i alt dækker over nuværende natur, undtagen skovene, samt øvrigt udlagt naturareal i scenarierne. Skov i alt dækker over areal til produktionsskove, samt skove til biodiversitetsformål. Biomasse- og byggeafgrøder dækker over udlagt landbrugsareal til kløvergræs på følsomme arealer, samt udlagt hamp, elefantgræs, pil, poppel, tagrør og dunhammer til byggematerialer.

Landbrugsarealet i de forskellige scenarier til de forskellige tidsnedslag er illustreret i figur 3.1, hvor det i BAU kun er de ekstrapolerede effekter på landbrugsarealet der fremgår. Således reduceres i BAU med henholdsvis 169.00 og 525.000 hektar i 2050 og 2089 i forhold til 2030, idet arealerne primært overgår til infrastruktur, men også skovrejsning i et mindre omfang samt 15.000 hektar lavbundsjord til natur.

I BIO og EKST ses effekten af det reducerede grovfoderareal som følge af husdyrnedgangen og det frigivne areal som følge af øget produktivitet samt prioriteringen af disse arealer. I BIO frigives arealet til



intensiv græsdyrkning og skovrejsning (blå og brun), mens arealet i EKST omlægges til ny udtaget natur, skovrejsning og i 2089 til græsdyrkning med reduceret gødskning (grøn, brun og blå).



**Figur 3.2** Areal der potentielt kan bidrage til at opnå biodiversitetsmålet om 30% natur i de forskellige scenarier. Her er medregnet det eksisterende beskyttede/ikke-beskyttede naturareal (377.000 ha), skov prioriteret til biodiversitetsformål og nyt naturareal udtaget fra landbruget.

I FTF ses en mere omfattende omlægning af landbrugsareal til skov og natur. Landbrugsarealet reduceres således med ca. 625.000 hektar i 2030 i forhold til baseline (gns. i 2015-19), hvoraf ca. 50.000 ha er til ny infrastruktur, 450.000 ha er til ny natur (fordobling af naturarealet), og ca. 125.000 ha allokeres til skovrejsning, hvilket sammen med en stor andel af den nuværende skov, resulterer i ca. 457.000 ha skov til biodiversitetsformål. I 2040 reduceres landbrugsarealet til 1.670.000 ha, hvilket antages fastholdt til 2050, hvorefter landbrugsarealet reduceres til ca. 1.500.000 ha i 2089, idet der allokeres yderligere areal til skovrejsning og natur.

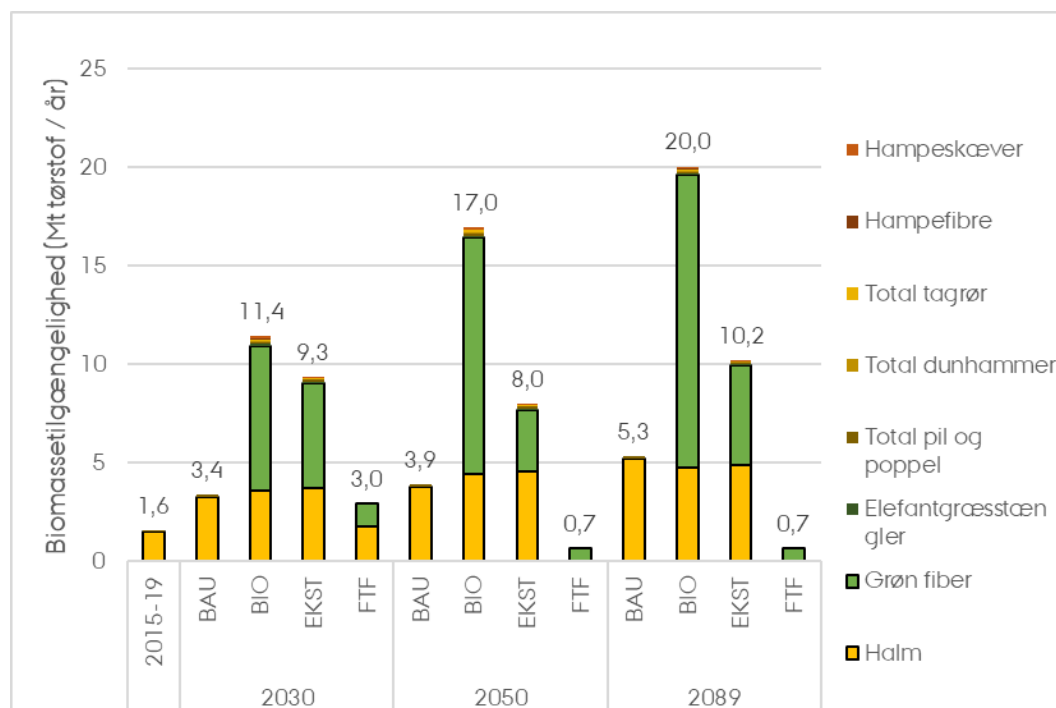
FTF er det eneste scenarie, der kan opfylde en ambition om 30% beskyttet natur i 2030 (~1,28 mio. ha) (figur 3.2), mens BAU samt BIO kan opfylde ca. 41% af målet ved at beskytte hele det allerede-eksisterende naturareal (~0,46 mio. ha). EKST kan potentielt opfylde ca. 65% af målet i 2030 (~0,72 mio. ha). I 2050 og 2089 afsættes der ikke yderligere naturareal i BAU og BIO. I EKST betyder det øgede omlagte grovfoderareal, det frigivne areal som følge af udbyttestigning og fastholdt fødevarerproduktion samt det 40% afsatte skovrejsningsareal til biodiversitet, at det potentielle biodiversitetsareal øges til ca. 1,14 mio. ha i 2050 og dermed overstiger 30% af Danmarks areal. Naturarealet stabiliseres efter 2050, idet skovrejsningsraten stagnerer, der frigives ikke mere grovfoderareal, og halvdelen af det yderligere frigivne fødevarerareal prioriteres til græsdyrkning.

For FTF allokeres mere af landbrugsarealet og en større del af skovarealet til biodiversitetsformål i en sådan grad, at det potentielle biodiversitetsareal i 2030 opfylder det definerede biodiversitetsmål med ca. 115% (~1,28 mio. ha), hvilket øges til 130% (~1,45 mio. ha) og 135% (~1,50 mio. ha) i 2050 og 2089.

## 3.2 Potentielle biomasseressourcer til byggeriet

I landbruget findes en betydelig uudnyttet biomasseressource, som i BAU-scenariet stiger fra 1,6 Mt tørstof pr. år i baseline (gns. af 2015-19) til ca. 3,4 Mt tørstof i 2030 (figur. 3.3). Dette er tilfældet, selvom ca. 100.000 ha landbrugsjord omlægges til infrastruktur (byer, veje, solceller m.m.), og at den økologiske halm antages utilgængelig for materialeudnyttelse. Den øgede biomassetilgængelighed sker dels som konsekvens af en fordobling af halmudnyttelsen og til dels som følge af den forventede stigning i landbrugets produktivitet. For de senere tidsnedslag i 2050 og 2089 forsættes udbyttestigningerne, hvilket leder til en fortsat stigning i halmudbyttet. I BIO og EKST omlægges grovfoderarealet til nye anvendelser i takt med reduktionen i husdyrproduktion på 20% i 2030 og 50% i 2050 og 2089. Det er naturligvis ikke sikkert, at der vil ske så kraftigt et fald i husdyrproduktionen. Mortensen & Jørgensen (2022a) analyserede biomassetilgængeligheden ved både 20% fald og 20% stigning i husdyrproduktionen i 2030 og fandt i begge tilfælde en betydelig stigning i biomassetilgængeligheden, selvom den var størst ved et fald i husdyrproduktionen.

I BIO omlægges dette areal til intensiv dyrkning af kløvergræs, mens det omlægges til naturareal i EKST. Dertil kommer, at der frigives en del areal, idet stigningen i udbytte per arealenhed overstiger landbrugsarealets nedgang. På de frigivne arealer sker i første omgang den antagne skovrejsning, og herefter omlægges overskydende areal til dyrkning af kløvergræs og til natur i henholdsvis BIO og EKST.



**Figur 3.3** Tilgængelighed af biomassetyper, der antages at være relevante for byggeriet. Biomasse fra husdyrgylle og rapsolie er hermed ekskluderet.

For at relatere biomassetilgængeligheden til hvor store mængder potentielle byggemateriale-fraktioner, der er tilgængelige, er biomassetyperne sammenholdt med ekspertviden fra byggebranchen om hvilke produkter, der p.t. er tilgængelige til implementering i byggeri. Derfor er gylle og rapsolie i denne

analyse frasorteret, mens elefantgræs og hamp er opdelt i forskellige fraktioner, som kan anvendes i byggebranchen; elefantgræsstængler, elefantgræs fibre, hampe fibre og hampeskæver. Dermed svarer de illustrerede biomassetilgængeligheder i figur 3.3 til de potentielle mængder af byggematerialer.

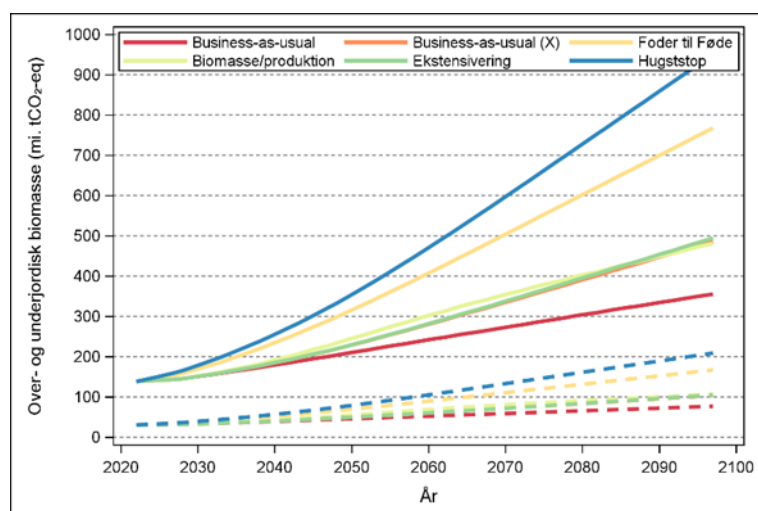
BIO resulterer i 2030 i en stigning af biomassetilgængeligheden af potentielle byggemateriale på ca. 8 Mt tørstof, sammenlignet med BAU (figur 3.3), hvilket primært skyldes omlægningen af enårige afgrøder til intensiv dyrkning af flerårigt kløvergræs, som forventes at have en højere biomasseproduktion på grund af en længere vækstsæson og dermed en højere kulstoffangst. EKST 2030 leder ligeledes til en øget biomassetilgængelighed. Denne stigning er dog lidt mindre (ca. 6 Mt tørstof ift. BAU) pga. mere ekstensiv dyrkning af kløvergræs (gødskning reduceret fra 250 kg N pr. ha i BIO til 150 kg N pr. ha), elefantgræs og hamp (reduceret gødskning og antaget 20% udbyttenedgang). Dertil kommer, at det dyrkede lavbundsareal, det pesticidfølsomme areal og grovfoderarealet reduceres med samlet 224.000 hektar, som frigives til natur. I 2050 og 2089 frigives en endnu større del af grovfoderarealet pga. 50% reduktion i husdyrproduktionen. Samtidig frigøres mere landbrugsareal som konsekvens af, at effekten af afgrødernes udbyttestigning overstiger effekten af den løbende reduktion i landbrugsarealet, samt at skovrejsningsraten reduceres efter opfyldelsen af aftalen om et Grønt Danmark's mål om 250.000 ha skovrejsning på landbrugsjord fra 2024-2045. Dermed bliver en større del af landbrugsarealet i BIO anvendt til intensiv dyrkning af kløvergræs, hvorimod der frigives ca. 585.000 og 590.000 hektar til natur i EKST i 2050 og 2089 ift. udgangspunktet (figur 3.1, samt tabel 1 i appendix), med antagelsen om at halvdelen af det frigivne fødeareal i 2089 ligeledes anvendes til dyrkning af kløvergræs i EKST 2089. Hvis man i stedet holdt fast i, at hele det ekstra areal skal gå til natur, kunne naturarealet øges med yderligere ca. 177.000 hektar i EKST 2089.

I 2030 er andelen af økologisk landbrug i FTF på 58% (antaget lineær tilvækst), hvormed 42% (den konventionelle andel) af den samlede halmmængde er i betragtning til at potentielt at kunne blive anvendt i byggeriet. Heraf er det antaget, at 87% af den ikke-bjærgede andel kan bjærges og være tilgængelig, at al halm som i dag fyres til energi er tilgængelig, og at 44% af halm til foder og strøelse er tilgængelig pga. nedgangen i husdyrproduktionen. Sammenlagt er der ca. 1,4 Mt samlet tørstof mere tilgængeligt i FTF i 2030 end i baseline (gns. 2015-19), og ca. 0,4 Mt tørstof mindre tilgængeligt i forhold til BAU. I FTF-scenariet bliver biomassetilgængeligheden meget begrænset sammenlignet med de andre scenarier, og i 2050 og 2089 bliver tilgængeligheden lavere end i referencescenariet (~0,4 Mt tørstof reduceret). Dette skyldes primært den høje andel af økologisk produktion i FTF, hvor biomasse såsom halm antages at være utilgængelig til andre anvendelser end internt i landbruget, da recirkulering af især fosfor og kalium men også kulstof og nitrogen er helt centralt i økologisk landbrugspraksis (figur 3.3).

### 3.3 Skovbrugets arealanvendelse, kulstoflagring og biomasseproduktion

#### 3.3.1 Arealanvendelse og kulstoflagring

De fem scenarier og det supplerende scenarie med et fuldstændigt hugststop giver anledning til en ret forskellig opbygning af kulstof i skovene (figur 3.4). Naturligt nok giver et fuldstændigt hugststop i skovene, både i den eksisterende skov og i ny skovrejsning, en hurtig opbygning af kulstof i skovene og giver i 2050 et samlet lager af overjordisk biomasse på 354 Mt CO<sub>2</sub> pr. år, svarende til en årlig opbygning på 7,6 Mt CO<sub>2</sub> pr. år frem til 2050. Som følge af at en stor del af skovene udlægges til urørt skov i FTF-scenariet, sker der her også en betydelig opbygning af overjordisk biomasse svarende til 6,2 Mt CO<sub>2</sub> pr. år frem til 2050. BAUx-, BIO- og EKST-scenarierne har nogenlunde samme kulstofopbygning i skovene svarende til 3,1-3,7 Mt CO<sub>2</sub> pr. år frem til 2050, men når dertil ad vidt forskellige veje. Således anvendes der mere hurtigt voksende træarter i BIO-scenariet end i de to øvrige scenarier, men der fældes samtidigt flere træer til eksempelvis byggeri. Modsnævningsvis anvendes der i BAUx og EKST-scenarierne mere langsomt voksende arter med et mindre kulstofoptag, men også en mindre hugst. Endelig er der i BAU en betydeligt mindre opbygning af skovens kulstoflager som følge af den mindre skovrejsning.



**Figur 3.4** Udviklingen i skovens samlede overjordiske (stammer, grene og løv; fuldt optrukne linjer) og underjordiske (rødder; stiplede linjer) biomasse for de fem scenarier samt det supplerende Hugststop-scenarium. De to puljer udgør kun to af de i alt fem kulstofpuljer i skov.

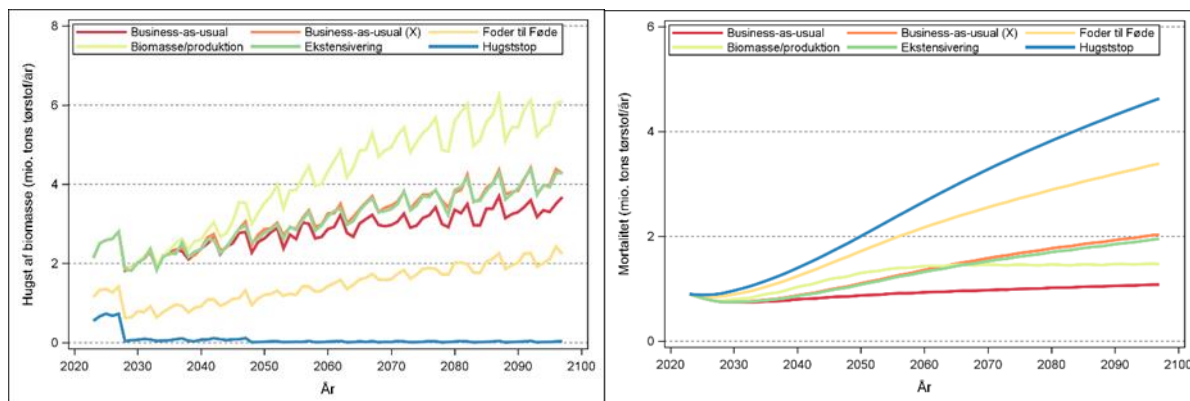
#### 3.3.2 Mortalitet og hugst af biomasse i skoven

Som med udviklingen i skovens kulstofpuljer er der store forskelle mellem de forskellige scenarier på størrelsen af hugsten og den forventede dødelighed i skoven (figur 3.5). På den korte bane frem til 2030 har scenarierne ikke særlig betydning for den samlede hugst (dvs. fældning) af biomasse med undtagelse af scenarier med omfattende afsætning af areal til urørt skov.

På længere sigt leder den intensive plantning af nåletræer på skovrejsningsarealerne til en stigende hugst i BIO-scenariet. Den samlede hugst (inkl. hugstrester som efterlades i skoven) forudsiges således at stige til 3,5 Mt tørstof pr. år i 2050 og omkring 5,0 Mt tørstof pr. år i 2070. Dette svarer til en forøgelse

på hhv. 33 og 65% i forhold til BAU-scenariet. På trods af den omfattende skovrejsning i BAUx og EKST-scenarierne er forøgelsen af den samlede hugst i 2050 og 2070 begrænset (hhv. 5-6 og 14-15% i forhold til BAU-scenariet). 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 BAU. I scenarierne, hvor store dele af den eksisterende skov udlægges til urørt skov, falder hugsten voldsomt. Således er den samlede hugst i 2030 i FTF-scenariet kun 37% af hugsten BAU-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 (Finansministeriet, 2020), og at visse træarter af tekniske årsager fjernes, når modellen forudsiger, at de vokser ind på prøvefladerne.

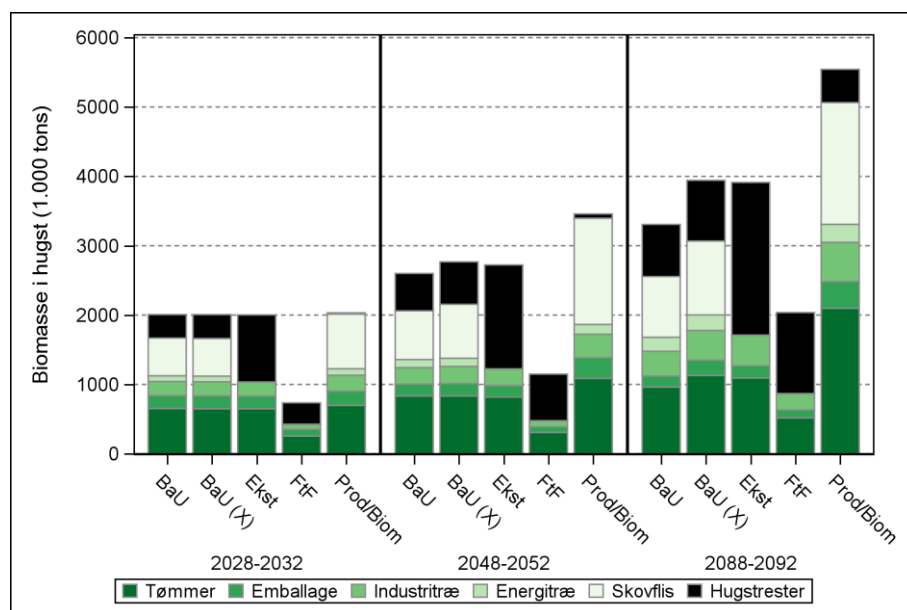
Den forskelligartede hugst i de seks scenarier medfører forskelle i træernes naturlige dødelighed (mortalitet (træer der dør naturligt forventes ikke anvendt til produkter eller energi i scenarierne)) (figur 3.5), som følge af, at konkurrencen mellem træerne påvirkes. Den største mortalitet findes i scenarier med stor andel af urørt skov, fordi den manglende hugst øger konkurrencen mellem træerne. Således er mortaliteten af overjordisk biomasse i Hugststop (2,0 Mt tørstof pr. år) og FTF (1,7 Mt tørstof pr. år) scenarierne 70-100 % større i 2050 end i gennemsnittet for BAU- og EKST-scenarierne. Til sammenligning er dødeligheden i 2050 en smule større i BIO-scenariet end i BAUx- og EKST-scenarierne i 2050, hvilket hænger sammen med, at nåletræerne vokser hurtigere end løvtræerne og derfor skaber konkurrence mellem træerne på et tidligere tidspunkt. Dødeligheden er mindst i BAU-scenariet, hvilket hænger sammen med det mindre skovareal.



**Figur 3.5** Hugst og mortalitet ved de seks scenarier.

Betragter man i stedet for den samlede hugst, den del af hugsten som udtages og nyttiggøres i form af materialer og energi, leder den mere intensive udnyttelse af biomasse i BIO-scenariet i 2030 til en forøgelse af hugsten på godt 20 pct. i forhold til BAU- og EKST-scenarierne (figur 3.6) Dette skyldes at hugstresterne, som efterlades i skoven i BIO-scenariet kun udgør 5 pct. af hugstresterne, der efterlades i BAU-scenariet. Af samme årsag medfører den mindre udnyttelse af hugstresten særligt til energiformål sammen med arealet som reserveres til biodiversitetsbeskyttelse i 2030 til en samlet reduktion i hugsten på hhv. 37 og 74 % for EKST- og FTF-scenarierne i forhold til BAU.

På længere sigt resulterer de fem hovedscenarier i ganske forskellige mængder af biomasse til træprodukter og energi (figur 3.6) I 2050 medfører BIO-scenariet en forøgelse af biomasse-udtaget fra skoven på 64 pct. i forhold til BAU-scenariet som frem til 2070 stiger til 200 %. Modsnævningsvis giver EKST- og FTF-scenarierne i 2030 et fald i udtagningen af biomasse fra skoven på hhv. 47 og 74 pct. i forhold til BAU-scenariet; hovedsageligt fordi der i disse scenarier ikke udtages træ til energi fra skoven. Faldet i forhold til BAU-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 (figur 3.6).

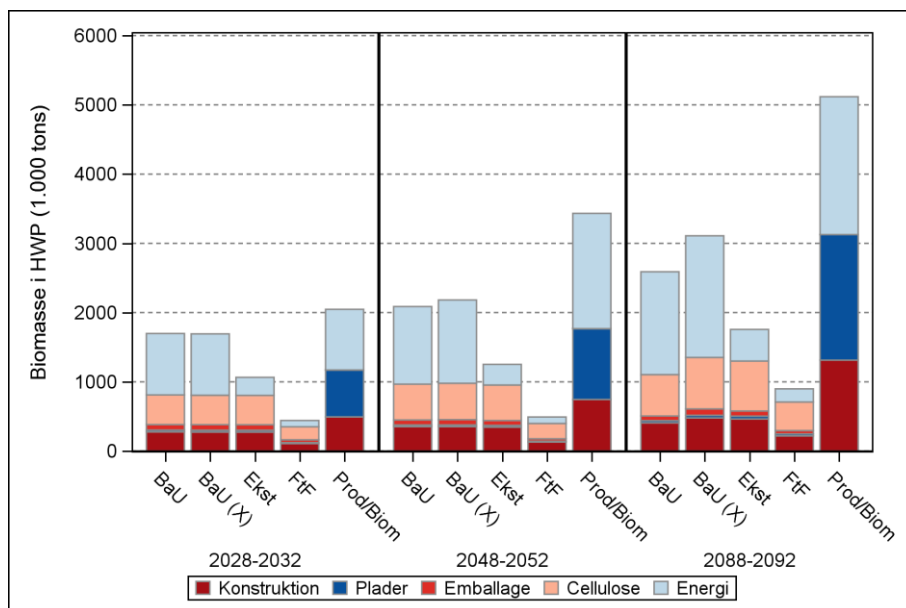


**Figur 3.6** Hugst og sortimentsudfald i skoven (1.000 tons tørstof/år). Hugstrestre aflægges ikke, men efterlades i skoven.

Mængderne af træ, som kan anvendes i det biobaserede byggeri, påvirkes af forskellene mellem de forskellige scenarier (figur 3.7), men forskellene er i nogle tilfælde lang tid om at manifestere sig. Således er der for BAUx- og EKST-scenarierne ikke nogen betydende forskel til BAU-scenariet på mængden af træ, der anvendes til plader eller konstruktions-træ hverken i 2030 eller 2050. Derimod er der en umiddelbar effekt af, at store dele af skovarealet henlægges til urørt skov i FTF-scenariet, hvor mængden af træ til byggeri umiddelbart falder med 60 % i forhold til BAU-scenariet. I 2090 er faldet reduceret til 44 % som følge af, at skovarealet øges betydeligt og at der antages fortsat skovdrift på skovrejsningsarealet.

Modsnævningsvis 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. Således stiger andelen af træ, som kan anvendes i det biobaserede byggeri med 385 % i 2030 i forhold til BAU-scenariet (figur 3.7). Denne stigning øges til 469, 697 og 712 % i 2050, 2070 og 2090. Dette forudsætter imidlertid en udvikling og anvendelse af teknologier til øget udnyttelse af træbiomassen som enten ikke er til rådighed i dag eller som er for dyre til en bred anvendelse i byggeriet. Det

kunne fx være teknologier, som gør det muligt at anvende små dimensioner af træ, skadet eller krumt træ og træarter, der i dag ikke finder bred anvendelse i træprodukter.



**Figur 3.7** Fordelingen af biomasse til endelige træprodukter (Harvested Wood Products, HWP) i de forskellige scenarier (1.000 tons tørstof/år).

### 3.4 Miljø- og klimaeffekter

Ændringen af arealanvendelsen med øget skovrejsning, mere økologi, hensyntagen til arealer, der er følsomme for nitrat- og pesticidudvaskning, samt reduktionen af husdyrproduktionen afspejles markant i påvirkningen af miljø- og klima.

Selvom der i BIO er en høj produktion af biomasse og fødevarer, reduceres påvirkningen af klimaet og miljøet i forhold til i dag som følge af omlægning til produktion, der er mere hensigtsmæssig for det omgivne miljø. Tilgangene kan dermed opdeles i, hvordan vægtningen imellem biomasseproduktion og forbedringer for miljø, klima, natur og sojaimport skal være, da alle scenarier bidrager i forskelligt omfang til alle dagsordener.

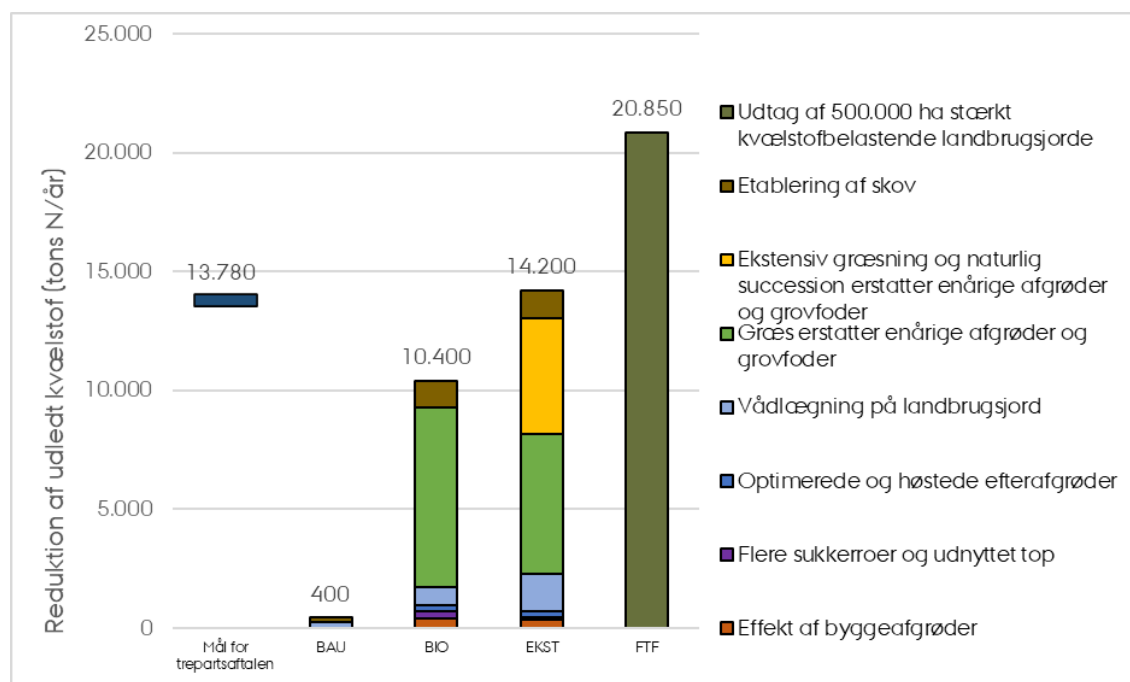
I disse analyser er påvirkningen fra BAU, BIO og EKST beregnet for sig, mens den estimerede miljø- og klimapåvirkning fra FTF er taget fra FTF-rapportens bilag (Haaland & Clement, 2023), som benytter en anderledes beregningsmetode (se afsnit 2.2.3).

Der er alene beregnet effekter for 2030, da fremtidige effekter i stigende grad bliver usikre som følge af klimaforandringer samt udviklingen i effektiviteten af nye dyrkningsformer på klima og miljø.

#### 3.4.1 Nitratudvaskning

Effekten på nitratudvaskning i de forskellige scenarier er i høj grad foranlediget af ændret afgrødevalg på strategisk omlagte jorde (udskiftning af enårige afgrøder med flerårige afgrøder, såsom elefantgræs

og kløvergræs), og skyldes i mindre grad tekniske antagelser (såsom høst af efterafgrøder og roetoppe), som beskrevet i afsnit 2.2.4. Det er især tiltag på arealer med lav kvælstofretention, der slår igennem i havmiljøet, da en stor del af nitraten reduceres til  $N_2$  på arealer med høj retention.



**Figur 3.8** Reduktion af kvælstofudledning i landbruget i 2030 i de forskellige scenarier, relateret til reduktionsmålet på 13.780 tons N/år i 2030 fra Aftalen om et Grønt Danmark (2024). De nitrutfølsomme jorde er antaget at have en kvælstofretention til havmiljøet på 50%, hvorimod de 'robuste jorde' er antaget at have 70% retention.

I aftalen for et grønt Danmark (Regeringen et al., 2024) er angivet en målsætning for, at landbrugets nitratudledning til havmiljøet skal reduceres med 13.780 tons N pr. år i 2030 (altså reduceret fra i dag at udlede ~55.800 tons til at udlede ~42.000 tons i 2030). I BAU opnås ca. 3% af reduktionsmålet vha. skovrejsning og vådlægning af 15.000 ha lavbundsjord, mens der i BIO, EKST og FTF opnås henholdsvis ca. 76%, 103% og 151% af reduktionsmålet (figur 3.8).

Udover ændret arealanvendelse kan andre, kollektive og målrettede foranstaltninger (fx flere efterafgrøder, minivådområder, reduceret gødsugning, præcisionslandbrug (Eriksen et al., 2020)) bidrage med reduktion af kvælstofudledning indenfor landbrugets dyrkningspraksis.

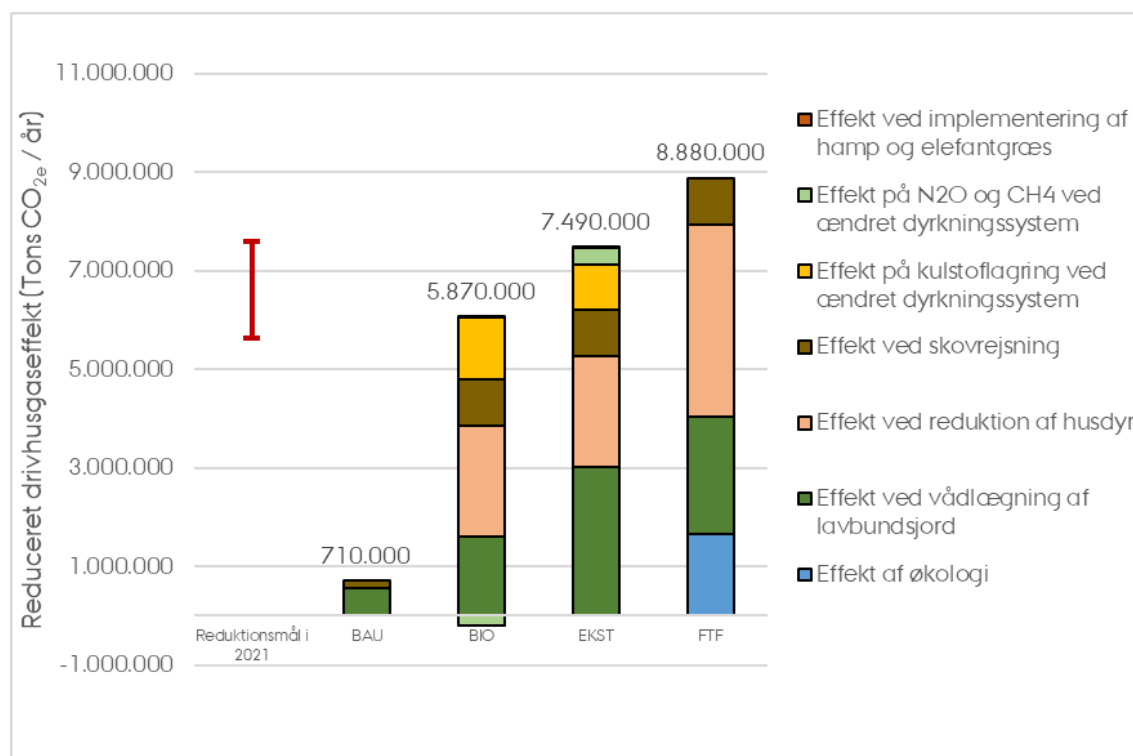
I FTF antages, at udtagningen og omlægningen af 500.000 ha af de mest nitrutfølsomme jorde til skov og andet natur kan opfylde målsætningen om at opnå 'god økologisk tilstand' ved at reducere udledningen til havmiljøet med 20.846 ton N årligt svarende til 41,7 kg N per udtaget ha. Udtagningsstrategien er i tråd med strategien vedtaget i aftalen om et Grønt Danmark om at støtte rejsning af 250.000 ha skove med henblik på bl.a. reduceret udvaskning af nitrat (Regeringen et al., 2024). Det kan dog



blive vanskeligt at opnå så store skovrejsninger og effekter i vandmiljøet til 2030, da der går nogle år inden skovrejsning på landbrugsjord får reduceret nitratudvaskningen (Andersen et al., 2024).

### 3.4.2 Drivhusgasudledning og -optag

Udledningen af drivhusgasserne CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O påvirkes i høj grad af kul- og kvælstofdynamikkerne i landbruget. I scenarierne er det især reduktionen af husdyr, vådlægningen af lavbundsjord, skovrejsning omlægning til økologi, samt effekten på jordens kulstofindhold, der har den største indflydelse (figur 3.9).



**Figur 3.9** Reduktion af drivhusgaseffekter på forskellige puljer i landbrugsprocesser og LULUCF til 2030 i diverse scenarier. Landbrugsaftalens reduktionsmål illustreres som spændet mellem 5,6 og 7,6 Mt CO<sub>2e</sub>/år fra år 2021 (55-65% reduktion ift. udledningen i 1990).

Landbrugsaftalen forudsætter, at land- og skovbrugssektoren skal reducere dets CO<sub>2e</sub>-udledning med mellem 55-65% i 2030 i forhold til 1990 (Regeringen, 2021), hvor der estimeredes at blive udledt ~19,7 Mt CO<sub>2e</sub> pr. år (ekskl. energiforbrug (Klima-, energi- og forsyningsministeriet, 2023)). Dette svarer til et mål i 2030 for en samlet udledning for landbruget og LULUCF på mellem 6,9 og 8,9 Mt CO<sub>2e</sub>. I 2021 estimeres denne sektor at have reduceret drivhusgasudledningen til ~14,5 Mt CO<sub>2e</sub> pr. år (Energistyrelsen, 2023), hvilket leder til et tilbageværende reduktionsmål på mellem 5,6 og 7,6 Mt CO<sub>2e</sub> pr. år fra 2021 til 2030.

I BAU opnås ca. 11% (0,67 Mt CO<sub>2e</sub> pr. år) af den gennemsnitlige målsætning for landbrugets drivhusgasreduktion på ca. 6,6 Mt CO<sub>2e</sub> pr. år, primært ved at vådlægge 15.000 hektar lavbundsjord. I BIO,

EKST og FTF opnåes en samlet drivhusgasreduktion på henholdsvis ca. 88%, 113% og 134% af det gennemsnitlige reduktionsmål (en reduktion på 6,6 Mt CO<sub>2</sub>e pr. år i 2030 i forhold til 2021) (hhv. 5,9, 7,5 og 8,9 Mt CO<sub>2</sub>e pr. år), hvorved alle scenarier med ændret arealanvendelse og husdyrreduktion når indenfor intervallet for regeringens reduktionsmål. Dertil kommer lagring af kulstof i eksisterende skov i scenarier med reduceret hugst.

Det er værd at bemærke, at scenarierne (bortset fra FTF) ikke er designet til at opfylde de konkrete vandmiljø- eller klimamålsætninger, men til at bidrage med betydelige mængder biomasse til bioøkonomien samtidigt med signifikante bidrag til klima, miljø og natur. Forventningen er derfor, at scenarierne kan suppleres med specifikke vandmiljø- og klimatiltag for at sikre samlet målopfyldelse. Det kan fx være anvendelse af pyrolyse og biokul (Elsgaard et al., 2022), foderadditiver (Lund et al., 2024) m.m.

Den største reduktion opnås ved vådlægningen af kulstofrige lavbundsjord (Klimarådet, 2024). Ved vådlægningen gøres jorden iltfattig, hvilket forhindrer mikroorganismernes oxidering af kulstof til CO<sub>2</sub>. Dermed reduceres CO<sub>2</sub> udledningen. På den anden side kan der skabes forhold, hvor andre mikrober kan reducere kulstof til CH<sub>4</sub> og NO<sub>3</sub> til N<sub>2</sub>O (Greve et al., 2021). Selvom CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O er mere potente drivhusgasser, er deres udledning af mindre samlet betydning, og der beregnes en netto reduktion i drivhusgasudledningen. I BIO vådlægges 50.000 ha af de mest kulstofrige jorde (>12% C) i 2030, hvilket estimeres at kunne reducere udledningen med ca. 1,6 Mt CO<sub>2</sub>e. I EKST vådlægges 100.000 ha af både de mest kulstofrige lavbundsjord og de næstmest kulstofrige lavbundsjord (hhv. >12% C og 6-12% C), hvormed det er estimeret, at udledningen reduceres med ca. 3 Mt CO<sub>2</sub>e. I FTF vådlægges 100.000 ha lavbundsjord i 2030 (ikke-defineret C-indhold), hvilket angives at bidrage med en reduktion på ca. 2,4 Mt CO<sub>2</sub>e (Haaland & Clement, 2023). Til sammenligning bidrager vådlægningen af 15.000 ha lavbundsjord i BAU med ca. 0,6 Mt tons CO<sub>2</sub>e.

Effekten ved skovrejsning varierer betragteligt mellem FTF og de øvrige scenarier. For FTF opnås en effekt på ~7 tons CO<sub>2</sub>e pr. ha pr. år fra 2020 til 2030, med antagelsen om et skovoptag på 4 tons CO<sub>2</sub> i denne vækstperiode, samt reduktion af lattergasudledning og oplagring af kulstof i jorden. Til sammenligning antages en effekt i de øvrige scenarier på ca. 13 tons CO<sub>2</sub>e pr. ha pr. år i 2030, der baserer sig på en estimeret gennemsnitlig tilvækst over en 100-årig periode på 12 tons CO<sub>2</sub> pr. ha pr. år (angivet i Johannsen et al. (2020), s. 4). Der påpeges en variation i kulstofbinding ved skovrejsning i de første 10 år på mellem 2 tons CO<sub>2</sub> pr. ha pr. år (lav-bonitetsjord med langsomt voksende træarter, såsom eg) til 17 tons CO<sub>2</sub> pr. ha pr. år (høj-bonitetsjord med hurtigt voksende træarter såsom douglasgran). Tilvæksten, og dermed kulstofbindingen, afhænger og varierer dermed med jordbundsforhold, artssammensætning m.m.

Effekten ved at konvertere enårige dyrkningssystemer til flerårige systemer består i en øget kulstoflagring i jorden (Ledo et al., 2020; Mortensen et al., 2021; Olesen et al., 2016), mens den øgede gødskning på græsarealer, hvis der gødskes til nuværende gældende N-norm, inducerer en stigning i udledning af den potente drivhusgas, lattergas (Baral et al., 2019; Olesen et al., 2018). En løsning herpå kan være

dyrkning af lucerne eller ugødet kløvergræs, som leder til mindre lattergasemissioner (Eriksen et al., 2020).

De forskellige scenariers indvirkning på skovforvaltningen har potentielt stor indflydelse på deres samlede klimaeffekt gennem tre grundlæggende, men også modsatrettede, mekanismer. Skovene spiller en væsentlig rolle i afbødning af klimaforandringer ved at opfange atmosfærisk CO<sub>2</sub> gennem trævækst og lagring af det optagne kulstof i skovøkosystemet. Vores beregninger viser, at skovene, hvis de lades urørt, kan lagre op imod 9,3 Mt CO<sub>2</sub>e pr. år i over- og underjordisk biomasse frem til 2050, hvilket er omtrent dobbelt så meget som i BIO-scenariet.

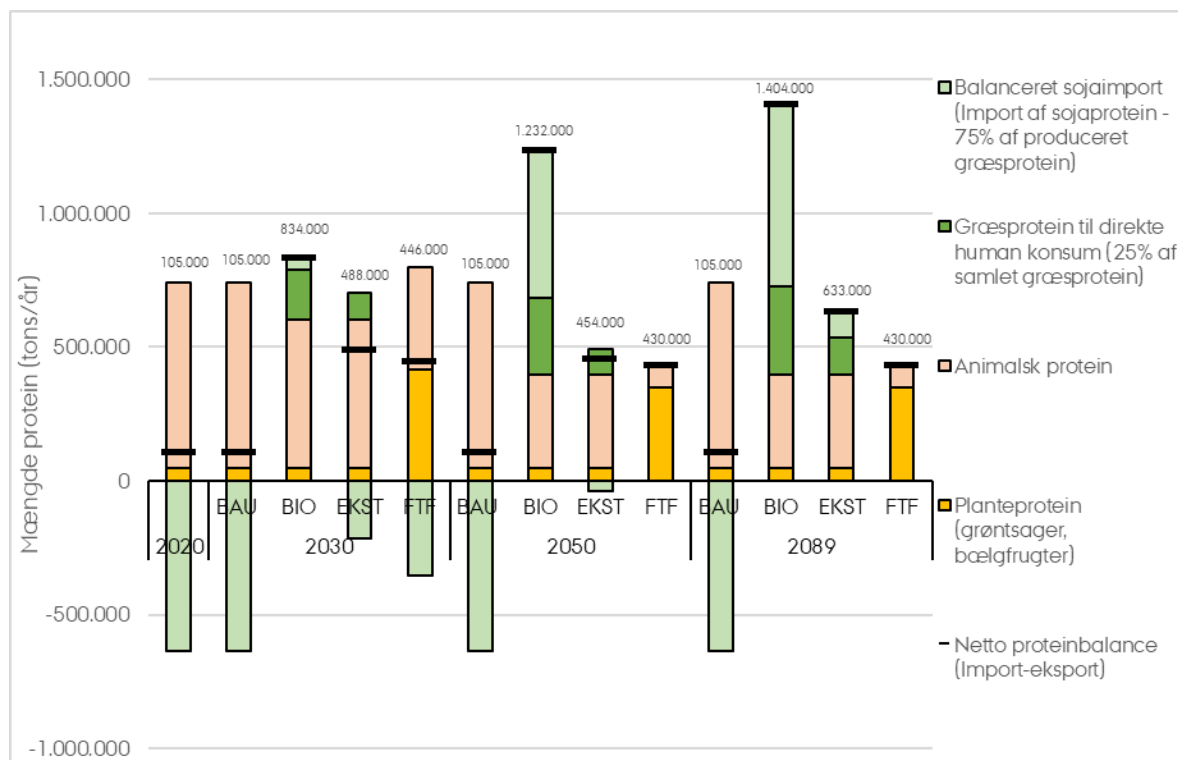
I scenarier, hvor både de nuværende og fremtidige skove forvaltes med henblik på tømmerproduktion, mindskes skovens kulstoflager til fordel for et produktlager, hvor kulstoflagret overgår til materialer. Produkter som papir eller kortlivede trævarer frigiver forholdsvist hurtigt kulstoffet tilbage til atmosfæren, mens holdbare træprodukter kan lagre kulstof i årtier. De fem scenarier i denne rapport resulterer i ganske forskellige mængder træprodukter og energi og bidrager derfor forskelligt til opbygning af et kulstoflager uden for skoven. I særligt BIO-scenariet er fokus på allokering af mest mulig biomasse til holdbare træprodukter såsom træplader og konstruktionstræ. I dette scenarie tilføres i 2050 årligt mere end 3 Mt CO<sub>2</sub>e til træproduktpuljen eller mere end 12 gange så meget som i FTF-scenariet (figur 3.7).

Skovrejsning og efterfølgende skovforvaltning påvirker ikke kun skovenes og produktlagerets kulstoflagringspotentiale, men spiller også en afgørende rolle i fremtidig produktsubstitution, som er processen med at erstatte mere kulstofintensive materialer med biobaserede produkter. Denne substitutionseffekt kan markant reducere emissionerne i industrier som byggeri, hvor biobaserede materialer kan lagre kulstof i længere perioder og har et lavere CO<sub>2</sub>-aftryk end traditionelle materialer (Sathre & O'Connor, 2010; Leskinen et al., 2018). I studiet her viser scenarierne store forskelle i de produkter, som skoven leverer til samfundet. Særligt fører antagelserne i BIO-scenariet til, at en stor mængde af det træ, der i dag afbrændes, fremtidigt anvendes til plader og andre længe-levende træprodukter med stort substitutionspotentiale, forventeligt til en betydelig klimaeffekt gennem en grøn omstilling af byggesektoren. Vi har dog ikke i dette studie regnet på klimaeffekten ved en sådan omstilling, da det indebærer komplekse valg af fx materialesubstitutioner, LCA-metoder m.m., som er udenfor rammen af studiet.

Tilsvarende kan byggematerialer baseret på landbrugsråvarer bidrage med kulstoflagring og negative emissioner. Men udviklingen af landbrugsbaserede byggematerialer er, med nogle enkelte undtagelser, ikke så langt fremme og med så lang anvendelseserfaring, som træprodukterne har. I Sack-Nielsen et al. (2024) er vist eksempler på byggematerialer (isolering og pladeprodukter) baseret på rapshalm og græs fibre. Firmaet Ecococon, der producerer og bygger af halmbaserede byggelementer (Ecococon UAB, 2023), virksomheden von Hanf, der producerer isolerende murblokke af hampebeton (Von Hanf, 2023) og Gramitherm, der producerer græsisolering som alternativ til mineral isolering (Gramitherm, 2023) er eksempler på eksisterende, men stadigvæk relativt små, produkter til byggeri fra landbrugssektoren.

### 3.5 Effekter på fødevarereproduktion

Fødevarereproduktionen og import/eksport-balancen fra dansk landbrug er i denne analyse eksemplificeret med proteintilgængelighed i det producerede animalske, grøntsags og græsbaseerede protein, sammenholdt med det importerede sojaprotein (beskrevet i afsnit 2.3). For en mere dybdegående fødevarereanalyse bør andre makronæringsstoffer som kulhydrat og fedt medregnes, og proteinkvaliteten i de forskellige produkter kan analyseres nærmere.



**Figur 3.10** Fødevarereproduktion estimeret i tons netto-protein produceret/år. Søjlerne angiver proteinproduktion og -import af forskellig karakter (tons/år), og balancen (angivet med fed streg (—) og datamærkerne over søjlerne) estimeres ved at fratække det importerede sojaprotein fra den samlede mængde danskproducerede protein (uddybet i afsnit 2.3).

At proteinbalancen er så tæt på neutral (~100.000 tons/år, svarende til 3,2 mio. personækvivalenter/år<sup>3</sup>) i baseline og BAU, betyder at den samlede produktion af grøntsagsproteiner og animalske proteiner så godt som udlignes af den høje import af sojaprotein til husdyrproduktionen.

I 2030 er BIO estimeret til at producere ca. 750.000 tons græsprotein, hvoraf ca. 560.000 (75% af samlet græsprotein) er nok til at substituere de ca. 520.000 tons importeret sojaprotein (20% reduceret i forhold til udgangspunktet som følge af husdyrreduktionen), hvortil kommer, at ca. 40.000 tons græsprotein kan

<sup>3</sup> En personækvivalent = 1,2 g protein pr. kg kropsvægt pr dag med en gennemsnitsvægt på 75 kg. (kilder: Eurobarometer, 2006; Trolle et al., 2023)

eksporteres eller anvendes på anden vis. Dermed resulterer BIO-scenariet i en proteinbalance på ca. 834.000 tons protein pr. år (~25,5 mio. personækvivalenter/år) i 2030.

I både EKST og FTF er det anslået, at det stadig er nødvendigt at importere soja. For FTF kræver den estimerede animalske produktion i 2030 en import på ca. 350.000 tons tørstof sojaprotein, svarende til 55% af baseline og svarende til ca. 50% af den samlede mængde protein, der produceres fra animalsk protein og vegetabilsk protein fra grøntsager. Dette resulterer i en proteinbalance på ca. 446.000 tons protein/år (~13,6 mio. personækvivalenter/år). For EKST reduceres behovet for importeret sojaprotein pga. det danskproducerede græsprotein, hvorved den samlede proteinbalance estimeres til ca. 488.000 tons protein/år (~14,9 mio. personækvivalenter/år).

I 2050 og 2089 reduceres behovet for sojaimport i BIO og EKST med 50%, samt 88% i FTF, i forhold til BAU pga. en øget husdyrnedgang. For BIO øges arealet med intensiv græsproduktion, hvormed produktionen af græsprotein ligeledes opskales, og ender med en proteinbalance svarende til ca. 1,23 og 1,40 Mt protein/år i henholdsvis 2050 og 2089 (~37 og ~43 mio. personækvivalenter/år).

EKST øger ikke græsproduktionen frem til 2050, da det frigjorte grovfoderareal og fødevarereale allokeres til natur og biodiversitetsformål. Dermed udligner nedgangen i animalsk protein og behovet for importeret sojaprotein næsten hinanden i 2050, hvorved proteinproduktionen stabiliseres til ca. 454.000 tons protein/år (~13,8 mio. personækvivalenter/år). I 2089 prioriteres 177.000 ha frigivet fødevarereale til græsproduktion, hvilket fjerner behovet for importeret sojaprotein og øger proteinbalancen til ca. 633.000 tons protein/år (~19,3 mio. personækvivalenter i 2089).

I 2050, produceres der i FTF tilstrækkeligt græsprotein til at substituere sojaimporten til den tilbageværende husdyrpopulation (ca. 11% af baseline). I 2050 og 2089 er der antaget en fastholdt produktion af animalske proteiner og grøntsagsproteiner, uden behov for import af soja, svarende til en proteinbalance på ca. 430.000 tons proteiner/år (~13,5 mio. personækvivalenter/år).

## 3.6 Tilgange der indfrir byggeriets efterspørgsel på biomasse

I de forskellige scenarier er valgt arealanvendelser og afgrøder for dels at bidrage til opfyldelse af miljø- og klimamål (fx skov og kløvergræs), dels for at bidrage med specifikke biomassekvaliteter til byggeri (fx hamp og tagrør). Hermed giver scenariernes samlede resultater en betydelig variationsbredde i produktivitet af biomasse og effekter på miljø og klima.

### 3.6.1 Kan jordbruget både levere biomasse til byggeri og opfylde klima- og miljømål?

Der er store forskelle mellem scenarierne i forhold til potentialet for biomasseproduktion. Landbrugsarealet i 2030 er mindst for FTF (1,98 mio. ha) og størst for BAU og BIO (hhv. 2,48 og 2,42 mio. ha), hvilket i sig selv påvirker potentialet. Biomassetilgængeligheden er, udover størrelsen af det dyrkede areal, påvirket af ikke mindst valget af afgrøder, og antagelserne om øvrig biomasseanvendelse, såsom bioraf-

finering af grøn biomasse. Grønne fibre fra bioraffinering af både konventionel og økologisk kløvergræsproduktion bidrager med store mængder biomasse (hhv. 7,4 og 5,3 mio. tons tørstof i 2030 ved BIO og EKST). Forskellen i udtaget areal til skov og natur, sammen med forskel i gødskningsintensiteten er den afgørende forskel på tilgængeligheden af biomasse i BIO og EKST.

Der ses et mindre fald i biomassetilgængeligheden i EKST fra 2030 til 2050 (figur 3.3), idet det omlagte foderareal fra den faldende husdyrproduktion antages udnyttet til skovrejsning og natur fremfor til biomasseafgrøder. Disse arealer bliver ganske store som følge af fastholdt fødevarereproduktion med øget afgrødeudbytte, samt reduktion af mængden af husdyr fra 80% af udgangspunktet i 2030 til 50% i 2050. I BIO omlægges det frigivne foderareal til intensivt dyrket kløvergræs, hvorved biomassepotentialet stiger betydeligt. Til 2089 stiger biomassepotentialet for EKST igen pga. en prioritering af, at 50% af det frigivne fødevarereareal (pga. fastholdt fødevarereproduktion med øget udbytte pr. arealenhed) anvendes til kløvergræsproduktion i stedet for 100% omlægning til natur, idet målsætningen om 30% natur allerede er realiseret på dette tidspunkt.

Den lavere biomassetilgængelighed i FTF skyldes det valgte sædskitte, hvor 1/10 er afgrøder til produktion af grøntsagsproteiner, der ikke antages at have et biomassepotentiale til byggematerialer, samt den høje andel af økologi (~58% i 2030), fordelt jævnt over de ti afgrøder i modelsædskittet, hvorfra biomassen (fx halm) er antaget utilgængelig for materialeanvendelse, da recirkulering af næringsstoffer og kulstof til jorden på økologiske landbrugsdrifter er essentielt. Der er ligeledes antaget et forøget økologisk areal i EKST (+12%), men dette fordeler sig primært på de nye kløvergræsarealer (96%), og en mindre del af det nye økologiske areal fordeler sig på raps- og kornarealer (4%). Den mindre biomassetilgængelighed ved øget økologisk areal gør sig især gældende ved FTF-scenariets fremskrivning til de senere tidsnedslag. Her er der antaget 100% økologisk areal, hvormed udelukkende græs-fibre fra bioraffineringen er forventet tilgængelige for materialeanvendelse.

Dermed kan de afgørende effekter på biomassetilgængeligheden i landbruget opsummeres som: Størrelsen af arealet til landbrugsproduktion, andelen af landbrugsarealet til dyrkning af højt ydende flerårige afgrøder samt andelen og fordelingen af økologisk landbrugsareal. Fødevarerearealet påvirkes specielt af husdyrbestanden, som optager et stort areal til foderproduktion i Danmark, og dermed frigives der landbrugsareal ved reduktion af husdyrbestanden, som kan prioriteres til biomasse- og proteinproduktion, eller til natur og biodiversitetsbidrag. Derudover vil der, hvis tendensen i fremtiden følger samme trend som i årene 1990-2016, blive frigivet areal fra den fastholdte fødevarereproduktion som følge af en løbende udbyttetigning (~0,3% årligt) (Dalgaard & Mortensen, 2022).

Det overordnede arealkompromis, som scenariernes forskellige tilgange fremhæver, er prioriteringen mellem produktion og biodiversitet. Produktionen skal understøtte omstillingen af samfundets fossile økonomi til den regenerative bioøkonomi, samt opretholde eller endda øge fødevarertilgængeligheden, hvorimod arealafsættelsen til naturskabelse skal standse tabet af biodiversitet for at forhindre økosystemkollaps (Ejrnæs et al., 2022; Rasmussen et al., 2022). Danmarks areal forventes at blive relativt mere frodigt med en længere vækstsæson i Nordeuropa i takt med klimaforandringerne, hvorfor det er

nærliggende at forvente, at den danske fødevarer- og biomasseproduktion stadig kommer til at spille en relativt stor rolle, set i europæisk kontekst (Jacobs et al., 2019).

For at maksimere effekten af ændret arealanvendelse er det essentielt at kortlægge og strategisk om-lægge arealer for at opnå synergieffekter (fx kombination af biomasseproduktion og beskyttelse af vandmiljø eller pesticidfølsomme arealer og natur), som beskrevet i afsnit 2.2.4. Det er dog ikke nødvendigvis på de kortlagte følsomme arealtyper, at forholdene for biomasseproduktion eller for at opnå biodiversitet er optimale, hvilket bør tages i betragtning. Ved at sammenholde naturudpegningen i Ejrnæs et al. (2022) med infrastrukturkortet fra 2022 (Levin, 2022) findes, at ca. 13% af landbrugsarealet (325.000 ha) er udpeget til naturreservation. Det er 71% af skoven, 95% af det nuværende naturareal (kategorierne 'Natur, tør', 'Natur, tør, ekstensivt landbrug', 'Natur, våd' og 'Natur, våd, ekstensivt landbrug') og ca. 88% af ferskvandsmiljøet (søer og vandløb), der er udpeget til naturreservation. Udpegnin-gen, samt overlap med nuværende landbrugsjord indikerer, at hvis 20% af Danmarks areal skal være beskyttet og 10% strengt beskyttet natur, er der behov for at omlægge ca. 125.000 ha robust landbrugs-jord. Dermed er der ca. 200.000 ha følsom landbrugsjord, hvorpå der potentielt kan opnås flersidede løsninger ved omlægning til naturreservation.

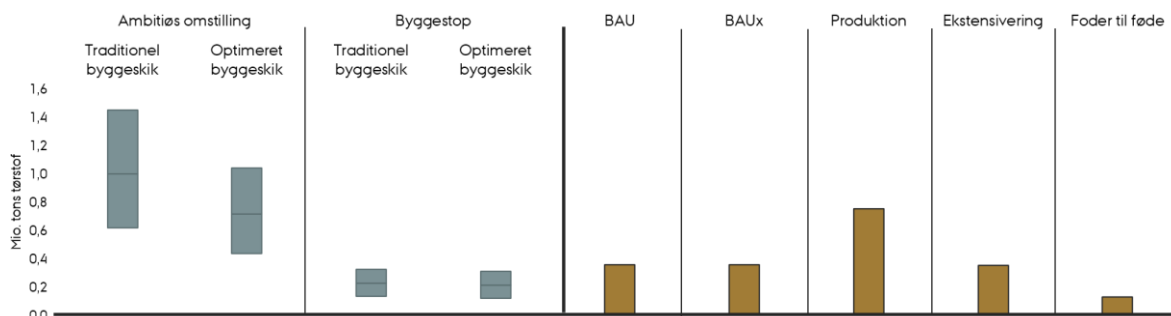
Hvis behovet for biomasseafbrænding reduceres i fremtiden, vil der blive frigivet biomasse (fx side-strømme som halm eller træflis fra udtynding i skove), der potentielt kan anvendes til byggematerialer. Dette vil samtidigt kunne reducere behovet for areal til anden biomasseproduktion, der således kan omprioriteres til eksempelvis naturreservation. Reduceret forbrug af biomasse til energi vil kræve en videre udvikling af kapaciteten fra de alternative vedvarende energikilder såsom vind, vand, sol og evt. kernekraft for at sikre forsyningssikkerheden, uden fortsat at være afhængig af fossile kilder (EA Energi-analyse, 2021). Uanset hvor meget biomasse der produceres, så afhænger biomassetilgængeligheden for byggeriet af, hvorvidt kvaliteten er god nok til, at biomassen er relevant som byggemateriale. Desu-den er prisen på biomassen, der bl.a. defineres af andre aftagere af kulstoffet såsom energisektoren, pyrolyse-værker, BECCS, landbruget selv m.fl., afgørende for, om det er økonomisk attraktivt for bygge-sektoren at anvende biomasse fra landbruget og sidestrømme fra skovbruget.

### 3.6.2 Byggeriets efterspørgsel sammenholdt med biomassetilgængeligheden

De efterspurgte biomassemængder til byggeri er estimeret, idet den efterspurgte biomasse groft kan opdeles i massive, bærende træprodukter (figur 3.11) og fibre/mindre fraktioner til isolering og plader (figur 3.12). Efterspørgslen i byggescenarierne afhænger således af byggeintensiteten (ambitiøs om-stilling til biobaserede materialer eller byggestop), byggeintensitetens konjunktur (opbremsning, prog-nose eller "festen fortsætter") og hvorvidt byggeskikken er traditionel (primært konstruktionstræ) eller optimeret med implementeringen af flere mindre fraktioner til substitution af massivt konstruktionstræ.

For massivt træ til konstruktionstræ vil det være meget vanskeligt at dække behovet i en ambitiøs om-stilling (figur 3.11), hvor konstruktionerne udføres på traditionel vis. Her opfylder produktionsscena-riet (BIO), som det eneste ved lavkonjunkturen (opbremsning) i 2050. Derimod kan BIO opfylde behovet i

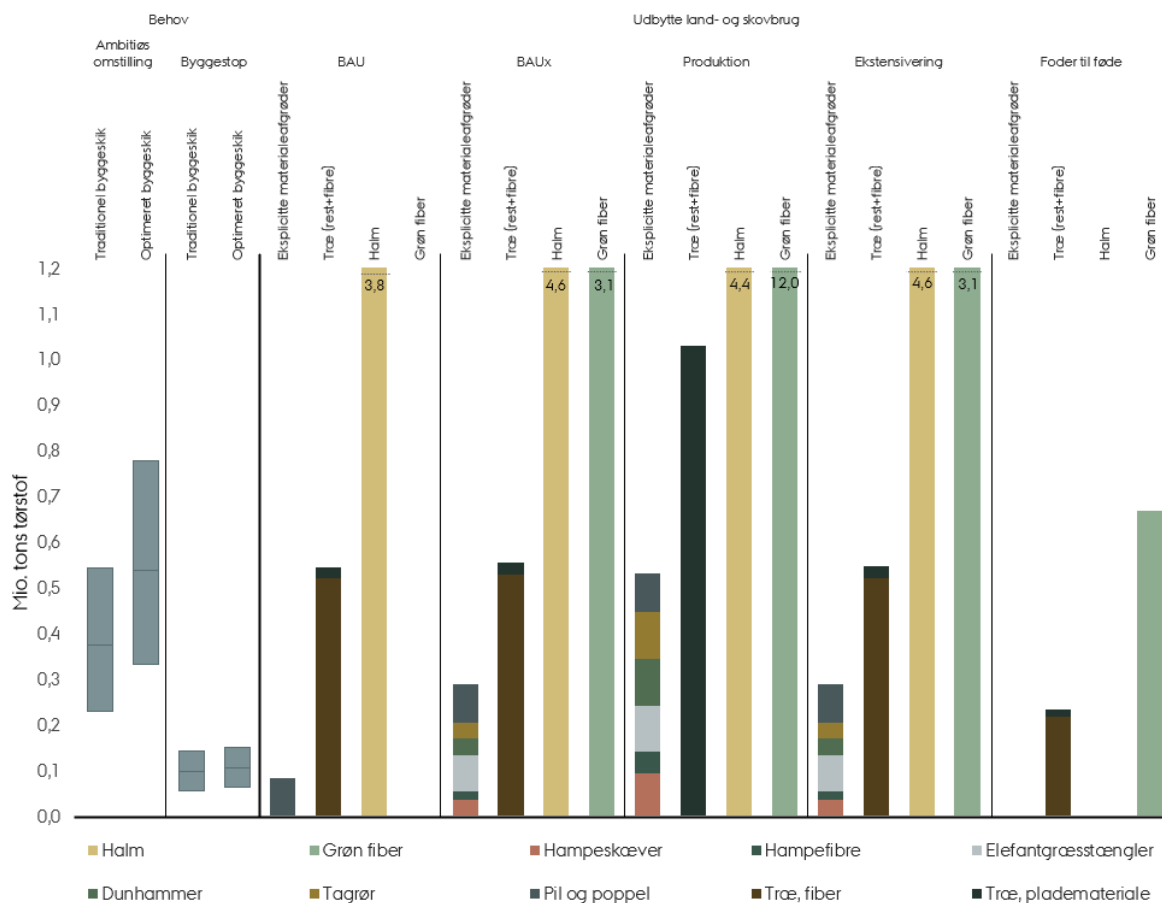
en ambitiøs omstilling, hvis byggeskikken optimeres, og en andel af konstruktionstræet udskiftes med fibre og mindre fraktioner. Ved byggestop scenariet, hvor der kun er 5% nybyg og 50% renovering, af det samlede nybyg og renovering estimeret til 2050, kan alle scenarier med undtagelse af FTF opfylde behovet for massiv træbiomasse (figur 3.11), selv ved højkonjunktur (festen fortsætter), uanset om der anvendes traditionel byggeskik eller en optimeret byggeskik.



**Figur 3.11** Estimeret efterspørgsel (grå) og potentielt udbud (brun) i 2050 for massiv træbiomasse til konstruktionstræ og andre massive træprodukter ved ambitiøs omstilling og byggestop og ved traditionel byggeskik og en optimeret byggeskik med implementering af flere fiberbaserede byggevarer.

For fibre og mindre fraktioner til plader og isolering (figur 3.12) antages det, at både halm, grønne fibre (fra bioraffinering af kløvergræs og elefantgræs), eksplicitte materialebiomasser (hamp, elefantgræs, pil, dunhammer og tagrør) og 'sekundære træprodukter' kan bidrage til at opfylde efterspørgslen. Alle scenarier opfylder i princippet efterspørgslen på fibre og mindre fraktioner i 2050, hvis hele biomasseproduktionen prioriteres til implementering i byggeriet. Desuden kan de sekundære træprodukter opfylde behovet for fibre og mindre fraktioner ved byggestopscenariet. Tilgængeligheden af biomasse fra eksplicitte byggeafgrøder er ikke høj nok til alene at kunne dække behovet i en ambitiøs omstilling, undtagen i BIO-scenariet, hvor behovet ved traditionel byggeskik dækkes, selv ved højkonjunkturen (festen fortsætter), men kun opfylder prognose-behovet ved optimeret byggeskik, hvor der er behov for flere fibre og mindre fraktioner.





**Figur 3.12** Estimeret behov for fibre og mindre fraktioner. Den estimerede efterspørgsel efter træ og landbrugsbiomasse ved ambitiøs omstilling og byggestop (grå), samt land- og skovbrugets materialepotentialer ved BAU-, BAUx-, BIO-, EKST- og FTF-scenarierne i 2050. For hvert scenarie skal biomassetilgængeligheden anses som en sum af de 4 biomassekategorier. Stiplet linje og talværdier for halm og grøn fiber indikerer tilgængelige mængder, som ligger udenfor figurens interval.

Udover behovet, så repræsenterer hvert byggescenarie et CO<sub>2</sub>-lagringspotentiale for det inkorporerede massive træbiomasse i den bærende konstruktion og de inkorporerede fibre og mindre fraktioner i isoleringen og pladerne.

Ved at antage at træbiomassen har en C% på ca. 50, at landbrugsbiomassen har en C% på ca. 45, og at der inkorporeres  $\frac{3}{4}$  landbrugsfibre og  $\frac{1}{4}$  træfibre for at opfylde behovet for fibre og mindre fraktioner, kan det udledes at der:

- ved *ambitiøs omstilling* og *traditionel byggeskik* (prognose) er et årligt CO<sub>2</sub>-lagringspotentiale på 1,83 Mt CO<sub>2</sub> i det massive træ, samt 0,64 Mt CO<sub>2</sub> i fibre og mindre fraktioner i 2050.
- ved *ambitiøs omstilling* og *optimeret byggeskik* (prognose) er et årligt CO<sub>2</sub>-lagringspotentiale på 1,32 Mt CO<sub>2</sub> i det massive træ, samt 0,91 Mt CO<sub>2</sub> i fibre og mindre fraktioner i 2050.

- ved *byggestop* og *traditionel byggeskik* (prognose) er et årligt CO<sub>2</sub>-lagringspotentiale på 0,42 Mt CO<sub>2</sub> i det massive træ, samt 0,07 Mt CO<sub>2</sub> i fibre og mindre fraktioner i 2050.
- ved *byggestop* og *optimeret byggeskik* (prognose) er et årligt CO<sub>2</sub>-lagringspotentiale på 0,39 Mt CO<sub>2</sub> i det massive træ, samt 0,07 Mt CO<sub>2</sub> i fibre og mindre fraktioner i 2050.

## 4. Usikkerheder

Fremskrivningen af arealanvendelsen i Danmark er selvsagt usikker, og vil afhænge af, om de forskellige antagelser holder stik. De valgte lineære fremskrivninger af den årlige reduktion i landbrugsarealet og af udbyttestigningen i BAU, BIO og EKST gengiver en historisk trend (fra 1990-2016), der ikke nødvendigvis kommer til at fortsætte fremadrettet. Der er dog indtil nu ikke tegn på, at den årlige stigning i landbrugets udbytter begynder at falde, på trods af et stigende pres for at reducere indsatsfaktorer (gødning, pesticider) til produktionen. I FTF bibeholdes arealudviklingen af landbruget efter år 2040, bortset fra den øgede skovrejsning, med antagelsen om at den definerede arealsammensætning i 2030 er i en status, som den ønskes fremadrettet at skulle befinde sig i.

Mange faktorer er afgørende for udviklingen i vores klima, miljø og biodiversitet. Der kan fx forekomme nye, radikale politikker, ændringer i det omgivende miljø pga. klimaforandringerne og nye teknologier, der gør at fremskrivninger 26 og især 65 år ude i fremtiden er særdeles usikre. Hvis specifikke scenarier forsøges implementeret, vil det derfor være vigtigt løbende at evaluere udviklingen i forudsætningerne.

For implementeringen af mere biomasse i bygningsmassen vil der være behov for en stor udvikling og evaluering af nye materialetyper, hvis restprodukter fra skov og landbrug skal indgå. Selvom Sack-Nielsen et al. (2024) evaluerede nye biobaserede materials værdier for isolering for varme og lyd samt brandhæmning, mangles endnu en detaljeret analyse af materialernes egenskaber i forhold til fugt og risiko for skimmel. Lindgren et al., 2024a, sammenfatter tilgængelige biobaserede byggevarer, hvor det har været muligt at tilgå eller estimere byggeteknisk data, for at kunne udføre potentialeanalyser for implementeringen af biomasse i byggeriet. Analysen belyser de biobaserede materials funktion i forskellige bygningsdele, såsom terrændæk, ydervægge, indervægge m.m., sammensat med andre materialer, der giver forskellige biobaserede løsninger med forskellige egenskaber. Da de biobaserede materialer differentierer, er estimaterne for materialernes egenskaber og effekterne heraf, usikre.

Nye stramninger af grænseværdier for byggeriets klimapåvirkning frem mod 2029 skal styrke byggeriet i den grønne omstilling (Regeringen, 2024). Her er især fokus på regnskabsførelse af klimapåvirkning gennem LCA således, at især nybyggeri og selve byggeprocessen omfattes af grænseværdierne, hvilket forventes at øge incitamentet for implementeringen af klimaeffektive løsninger, såsom substitution af ressourcetunge materialer med regenerative og mindre bearbejdede materialer. Nilsson et al. (2024) undersøger potentialet for implementeringen af danske biomasseressourcer i byggeriet ved at tage udgangspunkt i kendte, udenlandske, biobaserede byggematerialer, for dernæst at estimere klimaeffekten ved at modellere produktionen i en dansk kontekst ved forskellige LCA-metoder. Det udledes af analysen, at biobaserede materialer, modsat konventionelle mineralske materialer, har en negativ kulstofbalance, selv efter processeringen, transporten og implementeringen.

Lindgren et al. (2024a) påpeger herudover dilemmaet ved at beregningen af de biobaserede byggematerialers klimapotentiale skal inkludere, at det bundne kulstof i materialerne skal frigives til atmosfæren igen efter endt levetid (50 år). Dermed medregnes den kulstoflagrende effekt ikke i særligt stort

omfang i de biobaserede byggematerialers varedeklaration, hvilket hæmmer incitamentet for substitutionen af konventionelle materialer med biobaserede byggematerialer. Der stræbes imidlertid efter løsninger til at indfange kulstoffet efter endt levetid (CCS, pyrolyse m.m.), hvormed det formentlig alligevel kan medregnes i en negativ kulstofbalance.

Effekterne af tiltag i FTF på miljø og klima er medregnet, som de fremgår af rapporten (Haaland & Clement, 2023) uden korrektioner, da vi ikke har haft nok informationer til at kunne beregne med egne forudsætninger. Nogle af effekterne kan dog diskuteres, det gælder fx klimaeffekten ved at omlægge fra konventionel til økologiske malkekvægsproduktion. For malkekøernes CO<sub>2</sub>e-emissioner er der estimeret en reduktion på ca. 30% fra 6,24 tons pr. malkeko i et konventionelt system til 4,27 tons pr. malkeko i et økologisk system. De 30% reduktion er i den høje ende af et angivet interval på mellem 10 og 30% angivet i Klootwijk et al. (2020). Effekten baserer sig bl.a. på, at køerne er antaget at græsse ude i 70% af året, hvor det blev fundet, at køernes enteriske metanproduktion reduceredes som følge af græsning på friskt, letfordøjeligt græs. Selve det hollandske forsøg blev udført fra 21. april til 5. oktober 2020, 167 dage, svarende til knap 50% af året. Ifølge Christian F. Børsting fra Institut for husdyr- og veterinærvidenskab, Aarhus Universitet (personlig kommunikation), ses effekten dog blot i de første par forårsmåneder, hvor græsset stadig er letfordøjeligt, og danske køer i et økologisk system går typisk ude i 6 timer om dagen i 5 mdr., hvilket er 10-12% af året og ikke 70%. Derfor er der stor risiko for at overestimere økologieffekten på drivhusgasemissionerne. FTF's antagne reduktion i kvælstofudledning til havmiljøet på næsten 42 kg N/ha vil kræve en meget nøje udtagning af de mest nitratsensitive 500.000 ha landbrugsjord, hvilket virker optimistisk.

Generelt er udvaskning af nitrat til vandmiljøet ved omlægning fra konkrete afgrøder på specifikke jordtyper er relativt velbelyst (Børgesen et al., 2022; Eriksen et al., 2020), mens effekten ved specifikke gødskningsstrategier og sædskifter samt den strategiske placering af afgrøder på jorde med højere eller lavere nitratretention er mindre belyst og bør optimeres. Det er således også vigtigt at udvikle græs-baserede dyrkningssystemer, hvor markernes eftervirkning ved omlægning opsamles effektivt i næste afgrøde, da reduktionen i nitratudvaskning ellers kan være begrænset.

Aftalen om et Grønt Danmark, udarbejdet i forbindelse med den grønne trepart, afsætter omtrent 43 mia. kroner indtil 2045, for at ændre arealanvendelsen i Danmark fra at være præget af højproduktivt, animalsk domineret landbrug til at blive langt mere præget af skov og natur (Regeringen et al., 2024). Ansvar for planlægning og implementering af omlægningen af landbrug til skov og natur vil ligge hos vandoplandsstyregrupper i kommunerne. Det bliver dermed disse grupper, som skal kunne finde win-win-løsningerne i landskabet, så alle samfundets interesser tilgodeses. Dertil kommer, at aftalen foreslår en indfasning af verdens første CO<sub>2</sub>-afgift på landbruget, hvilket skal give incitament til, at landbruget vil implementere klimavirkemidler for at undgå betydelige økonomiske udgifter. Landbrugs-aftalen fra 2021 (Regeringen, 2021) lagde op til en markant udrulning af teknologier, der for landbruget vurderedes som centrale virkemidler til at reducere klimapåvirkningen, samtidig med opretholdelsen af en effektiv produktion. Bl.a. blev afsat henholdsvis 396 og 260 mio. kroner, forbeholdt udviklingen og

implementeringen af pyrolysesektoren og af grønne bioraffinerings teknologier. I aftalen om et Grønt Danmark er desuden en tilskudsordning på ca. 10 mia. kroner frem mod 2045, hvor landmænd kan få støtte til at udbringe biokul på deres marker (Regeringen et al., 2024). Denne CO<sub>2</sub>-lagringsstrategi med biokul har mødt en del skepsis fra bl.a. Rådet for Grøn Omstilling (Langhede, 2024), der påpeger, at tidshorisonten for klimaeffekten ved pyrolyse kan være relativt lang, hvis biomassen har potentiale til anden kulstofforskydende anvendelse. Fx anføres det, at pyrolyse af træ først vil have en netto lagringseffekt efter ca. 30 år, idet ca. 40-50% af det pyrolyserede kulstof forbliver stabilt som biokul, mens resten ender som gas og olie. Ubehandlet træ har en årelang nedbrydningsrate i naturen, og derfor vil der være en lange tidshorisont før der opnås en positiv netto-lagringseffekt ved pyrolysning. Halm og andre landbrugsafgrøder har derimod en hurtig nedbrydningsrate i jorden og på en kortere tidshorisont vil nå en positiv netto lagringseffekt, hvis det pyrolyseres. Derudover stiller notatet sig kritisk overfor konsekvenserne af at udbringe biokullet med dets potentielle indhold af miljøfarlige stoffer på fødevarearealer, samt overfor det potentielle tab af værdifulde næringsstoffer, som fosfor og kalium, der kan blive immobiliseret i biokullet og blive svært tilgængelige for afgrøderne. Det kan på den baggrund være interessant at sammenligne anvendelsen af forskellige typer af biomasse til henholdsvis byggematerialer og til pyrolyse med hensyn til klimaeffekt (negativ emission), miljøeffekter og næringsstofbalance.

## 5. Konklusion

Dansk landbrug har brug for at reducere udledningen af drivhusgasser. Og dansk byggeri har brug for at omstille fra mineralske til biobaserede byggematerialer af hensyn til klimaeffekt, ressourceknaphed og forsyningsikkerhed. En samtænkning af landbruget, skovbrugets og byggeriets kapaciteter og udfordringer vil kunne fremme den grønne omstilling, såvel som styrke konkurrenceevnen for sektorerne.

Ved at anvende afgrøder fra land- og skovbruget i byggeriet i form af fx isolering og plademateriale er det muligt at indlejre store mængder kulstof, som alternativt var blevet frigivet til atmosfæren ved naturlig nedbrydning eller afbrænding. Hvorvidt dette er den mest kosteffektive måde at opnå de samlet set største drivhusgasreduktioner på, eller om andre teknologier og anvendelser af biomasse, som fx pyrolyse, er mere kosteffektive vil kræve en nærmere analyse. Der er dog en åbenlys nytteværdi ved at benytte biomasse til nybyggeri eller til renovering af de huse vi bor i, som kan være sværere at se for andre udnyttelser.

Hvilke fremtidsscenarier, der bedst opfylder samfundets behov for gode fødevarer, byggematerialer, andre materialer, vedvarende energi, god natur, godt drikkevand, rene fjorde og hav samt sikrer arbejdspladser i landområderne er en vanskelig afgørelse. Men her er vist, at vi har store muligheder for at optimere udfaldet af fremtiden ved at vælge mere ressourceeffektive dyrkningssystemer end dem, vi har i dag, samt ved at samtænke flere behov ved afklaringen af den fremtidige arealanvendelse.

De skitserede scenarier viser således, at der kan prioriteres en arealanvendelse og vælges dyrkningssystemer, som kan forsyne byggebranchen helt eller delvist med behovet for biobaserede materialer samtidigt med, at behovet for mere natur, reduceret nitratudvaskning, mindre pesticidforbrug og reduceret drivhusgasemission fra jordbruget kan sikres. Hvis en sådan retning prioriteres, vil det være vigtigt med løbende opfølgning på optimering af strategien og beregninger af effekterne, så risikoen for suboptimeringer eller valg af udviklingsveje, som ikke kan tilpasses fremtidens behov, reduceres.

## 6. Referencer

- Andersen, N. M., Adamsen, A. P., Lærke, P. E., Larsen, S. U., Jørgensen, U., Olesen, J. E., Manevski, K., Bay, S. S., Hutchings, N. J., Hansen, E. M., Munkholm, L. J., Børgesen, C. D., Thomsen, I. K., Elsgaard, L., Petersen, S. O., Toda, M., Ntinyari, W., Sørensen, P., Audet, J., ... Nielsen, H. M. (2024). *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget - 2024* (Vol. 227). Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Baral, K. R., Lærke, P. E., & Petersen, S. O. (2019). Nitrous oxide emissions from cropping systems producing biomass for future biorefineries. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106576>
- Bentsen, N. S., Jørgensen, J. R., Stupak, I., Jørgensen, U., & Taghizadeh-Toosi, A. (2019). Dynamic sustainability assessment of heat and electricity production based on agricultural crop residues in Denmark. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 213, pp. 491–507). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.194>
- Birch, P., Jørgen, S., Pia, E., Jette, F., Jacobsen, B., Buus, N., Poul, K., Morthorst, E., & Richardson, K. (2018). *Biomassens betydning for grøn omstilling - Klimaperspektiver og anbefalinger til regulering af fast biomasse til energiformål* (pp. 132–140).
- Børgesen, C. D., Pullens, J. W., Zhao, J., Blicher-Mathiesen, G., Sørensen, P., & Olesen, J. E. (2022). NLES5 – An empirical model for estimating nitrate leaching from the rootzone of agricultural land. *European Journal of Agronomy*, 134. <https://doi.org/10.1016>
- Brownell, H., Iliev, B. E., & Bentsen, N. S. (2023). How much wood do we use and how do we use it? Estimating Danish wood flows, circularity, and cascading using national material flow accounts. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 423). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138720>
- Brundtland, G. H. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. (Vol. 42, p. 427). United Nations General Assembly document.
- Callesen, G. E., Gylling, M., & Bosselmann, A. S. (2020). *Den danske import af soja 2017-2018: Hvor store arealer beslaglægges den i producentlandene, og hvor stor andel af den importerede soja anvendes til svine- og mælkeproduktion?* [www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro\\_serier/udredninger/](http://www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro_serier/udredninger/)
- Chapin III, Stuart, F., Matson, P. A., & Mooney, H. (2011). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* (2nd ed.). London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9>
- Chen, J., Lærke, P. E., & Jørgensen, U. (2022). Land conversion from annual to perennial crops: A win-win strategy for biomass yield and soil organic carbon and total nitrogen sequestration. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107907>
- Cordtz, J. F., Juhl, S., Termansen, M., Kreiner, C. T., Sørensen, P. B., & Svarer, M. (2024, February 21). Veje til grøn omstilling af dansk landbrug. *Politiken*.
- Core Writing team of IPCC. (2023). *Climate Change 2023 - Synthesis report* (pp. 2–6). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- Council of the European Union. (2020). *Conclusions on Biodiversity - The need for urgent action* (Vol. 11829, Issue 20, pp. 7–9).
- Crippa, M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Rossi, S., Vignati, E., Muntean, M., Brandao De Melo, J., Oom, D., Pagani, F., Banja, M., Taghavi-Moharamli, P., Koýkkä, J.,

- Grassi, G., Branco, A., San-Miguel, J., & European Commission. Joint Research Centre. (2023). *GHG emissions of all world countries*.
- Dalgaard, T., & Mortensen, E. Ø. (2022). *Udviklingen i udbytter, fodereffektivitet, gødningsforbrug og arealudtag ved fremskrivning af dansk landbrug til 2030*. <https://dca.au.dk/raadgivning/>
- Danmarks naturfredningsforening. (2024, September 19). *Her kan Danmarks nye natur ligge*. <https://www.dn.dk/nyheder/her-kan-danmarks-nye-natur-ligge/>
- Danmarks Statistik. (1968). Landbrugsstatistik 1900-1965. In *Landbrugsareal og høstudbytte samt gødningsforbrug* (Vol. 22).
- Det Nationale Bioøkonomipanel. (2019). *Baeredygtige byggeklodser til fremtiden*. <https://fvm.dk/Media/638524906626743707/B%C3%A6redygtige%20byggeklodser%20til%20fremtiden.pdf>
- Det Nationale Bioøkonomipanel. (2022). *Bioressourcer til grøn omstilling*. <https://fvm.dk/Media/638524906372725917/Bioressourcer%20til%20gr%C3%B8n%20omstilling.pdf>
- Duer, T., & Norn, P. A. (2023). *Danmarks Arealer - Danmarks fremtid*. <https://concito.dk/om-fremtidens-areal-anvendelse>
- EA Energianalyse. (2021). *Optimeret biomasseanvendelse til el- og fjernvarmeproduktion mod 2040* (pp. 7–35). <https://www.ea-energianalyse.dk/wp-content/uploads/2021/10/Optimeret-biomasse-til-el-og-fjernvarme-mod-2040.pdf>
- Ecococon UAB. (2023). *Technical Specifications*. <https://ecococon.eu/professionals/downloads>
- Ejrnæs, R., Bladt, J., & Fløjgaard, C. (2022). *Potentialet for at reservere 30% af landarealet til beskyttede og strengt beskyttede områder i Danmark* (Vol. 507, pp. 6–20). Aarhus University, DCE - National centre for Environment and energygy.
- Elsgaard, L., Adamsen, A. P. S., Møller, H. B., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, E. Ø., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, M. N., Thers, H., & Sørensen, P. (2022). *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture* (Vol. 208). Aarhus University, DCA - Danish national centre for Food and Agriculture.
- Energistyrelsen. (2023). *Klimastatus og-fremskrivning 2023 - Sektorforudsætningsnotat* (pp. 3–8).
- Eriksen, J., Thomsen, I. K., Hoffmann, C. C., Hasler, B., & Jacobsen, B. H. (2020). *Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastning af vandmiljøet* (Vol. 174). Aarhus University, DCA - Danish Centre for Food and Agriculture. <http://dca.au.dk>
- Eurobarometer. (2006). Health and food. In *TNS Opinion & Social* (Vol. 246, Issue 64.3, pp. 10–14).
- European Commission. (2000). *Water framework directive* (Vol. 327, pp. 1–73). The European Parliament and Council. <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>
- Eurostat. (2018). *Agriculture, forestry and fishery statistics*. <https://doi.org/10.2785/340432>
- Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 67. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Fritzbøger, B. (1994). *Kulturskoven. Dansk skovbrug fra oldtid til nutid*. (p. 440). Gyldendal.
- Galbraith, E., Faisal, A.-A., Matitia, T., Fajzel, W., Hatton, I., Haberl, H., Krausmann, F., & Wiedenhofer, D. (2024). *Resolving the Technosphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1133>



- Gernow, L., Legarth, J. V., Jensen, F. S., & Olafsson, A. S. (2024). *National kortlægning af danskernes naturbesøg - Geografiske analyser af friluftslivet i Danmark i forhold til arealanvendelse, beskyttelsesudpejninger og ejerforhold*. Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. [www.ign.ku.dk](http://www.ign.ku.dk)
- Gompertz, B. (1825). On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. In *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (Vol. 115, pp. 513–583). <https://doi.org/http://doi.org/10.1098/rstl.1825.0026>
- Gramitherm. (2023). *B-EPD Environmental Product Declaration - Gramitherm@100*.
- Grant, R., & Waagepetersen, J. (2003). *Vandmiljøplan II - slutevaluering* (p. 14). Miljøministeriet - Danmarks Miljøundersøgelser.
- Graudal, L., Nielsen, U. B., Schou, E., Thorsen, B. J., Hansen, J. K., Bentsen, N. S., & Johannsen, V. K. (2013). *Muligheder for bæredygtig udvidelse af dansk produceret vedmasse 2010-2100: Perspektiver for skovens bidrag til grøn omstilling mod en biobaseret økonomi*. Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. [www.ign.ku.dk](http://www.ign.ku.dk)
- Greve, M. H., Balslev Greve, M., Peng, Y., Faurholt Pedersen, B., Bjørn Møller, A., Erik Lærke, P., Elsgaard, L., Duus Børgesen, C., Leth Bak, J., Aagaard Axelsen, J., Gyldenkaerne, S., Johann Heckrath, G., Henrik Zak, D., Tune Strandberg, M., Henning Krogh, P., Vangsø Iversen, B., Munk Sørensen, E., & Christian Hoffmann, C. (2021). Vidensyntese om kulstofrig lavbundsjord. In *Aarhus Universitet, DCA - National Center for Fødevarer og Jordbrug* (Vols. 2020-0047924, pp. 41–47). <https://dca.au.dk/raadgivning/>
- Gylling, M. (2020). *Proteinproduktion i Danmark: Vol. 2020/25* (pp. 3–5). Københavns Universitet, IFRO - Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi. [www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro\\_serier/udredninger/](http://www.ifro.ku.dk/publikationer/ifro_serier/udredninger/)
- Gylling, M., Nord-Larsen, T., Bruhn, A., Thomsen, M., Ambye-Jensen, M., Mortensen, E. Ø., & Jørgensen, U. (2023). *Potential Danish biomass production and utilization in 2030* (Vol. 219). Aarhus University, DCA - National Centre for Food and Agriculture.
- Haaland, T., & Clement, K. M. (2023). *Bilag til - Fra foder til føde II*. <https://www.greenpeace.org/static/planet4->
- Hamelin, L., Møller, H. B., & Jørgensen, U. (2021). Harnessing the full potential of biomethane towards tomorrow's bioeconomy: A national case study coupling sustainable agricultural intensification, emerging biogas technologies and energy system analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 138*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110506>
- Hansen, E. M., Thomasen, I. K., Petersen, S., Lærke, P. E., Pedersen, B. F., Rasmussen, J., Christensen, B. T., Jørgensen, U., & Eriksen, J. (2018). *Muligheder for reduktion af næringsstoffab i græsrigge sædskifter* (Vols. 2018-760-000776). Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Hermansen, J. E., Jørgensen, U., Erik Lærke, P., Manevski, K., Boelt, B., Krogh Jensen, S., Weisbjerg, M. R., Dalsgaard, T. K., Danielsen, M., Asp, T., Ambye-Jensen, M., Aage Grøn Sørensen, C., Vestby Jensen, M., & Gylling, M. (2017). Green biomass - Protein production through biorefining. In *Aarhus University, DCA - National Centre for Food and Agriculture* (Vol. 093, pp. 38–41).
- Hermansen, J. E., Mogensen, L., Knudsen, M. T., Kristensen, T., & Gylling, M. (2017). Kortlægning af proteinværdikæder. In *Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug* (Vols. 2017-760-000132, pp. 6–8). <http://dca.au.dk/>
- Hoffmann, L., & Eisler, T. (2023). Emissionsregnskab 2022 - CO2 fra biomasse udgør 31 pct. af drivhusgasser. In *Nyt fra Danmarks Statistik* (Vol. 317, pp. 1–3). [www.dst.dk/nyt/46703](http://www.dst.dk/nyt/46703)
- Højgård Petersen, A., Hasler, B., Laage-Thomsen, T., Termansen, M., & Rahbek, C. (2024). *Mere, bedre og større natur i Danmark - Hvor, hvordan og hvor meget?* Københavns Universitet, CMEC - Center for Makroøkologi, Evolution og Klima, Globe Institute.

- Jacobs, C., Berglund, M., Kurnik, B., Marras, S., Mereu, V., & Michetti, M. (2019). *Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe* (Vol. 04). <https://doi.org/10.2800/537176>
- Jensen, J. K. (2019). *Naturens eget tag*. Stråtagetets kontor.
- Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., & Bentsen, N. S. (2020). *Kulstofbinding ved skovrejsning 2020: Sagsnotat* (pp. 2–6). Københavns Universitet, IGN - Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning. [www.ign.ku.dk](http://www.ign.ku.dk)
- Jørgensen, U. (2005). *How to reduce nitrate leaching by production of perennial energy crops?* (K. Zhu, K. Minami, & G. Xing, Eds.; pp. 513–518). Science Press. <https://www.researchgate.net/publication/284814138>
- Sack-Nielsen, T., Mølgaard, A., Mortensen, A., Jørgensen, U., Nielsen, E. D., Overgaard, M., Overgaard, R., Strømmand-Andersen, J., Jeppesen, P. T., Park, A., Bundgaard, P., Borg, F., Hyllegaard, D., & Nielsen, S. H. (2024). *Fra marken til byggeri: Evaluering af biogene materialers betydning for byggeriets planetære grænser*. Realdania.
- Kähler, F., Carus, M., Porc, O., & Vom Berg, C. (2021). Turning off the Tap for Fossil Carbon: Future Prospects for a Global Chemical and Derived Material Sector Based on Renewable Carbon. *Industrial Biotechnology*, 17(5), 245–258. <https://doi.org/10.1089/ind.2021.29261.fka>
- Klima-, energi-og forsyningsministeriet. (2023). *Klimastatus og -fremskrivning, 2023* (pp. 7–11). <http://www.ens.dk>
- Klimarådet. (2024). *Danmarks fremtidige arealanvendelse* (pp. 12–19). <https://klimaraadet.dk/da/analyse/danmarks-fremtidige-arealanvendelse>
- Klootwijk, C., Koning, L., Holshof, G., Klop, A., & Zom, R. (2021). *Enterische methaanemissie van melkvee in relatie tot (vers) graskwaliteit* (Vol. 1342, pp. 48–51). Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174>
- Langhede, T. (2024). *Pyrolyse og biokul - En klimaløsning eller en miljøudfordring?* (pp. 4–6). Rådet for Grøn Omstilling.
- Ledo, A., Smith, P., Zerihun, A., Whitaker, J., Vicente-Vicente, J. L., Qin, Z., McNamara, N. P., Zinn, Y. L., Llorente, M., Liebig, M., Kuhnert, M., Dondini, M., Don, A., Diaz-Pines, E., Datta, A., Bakka, H., Aguilera, E., & Hillier, J. (2020). Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Global Change Biology*, 26(7), 4158–4168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.15120>
- Leskinen, P., Cardellini, G., González-García, S., Hurmekoski, E., Sathre, R., Seppälä, J., Smyth, C., Stern, T., & Verkerk, P. J. (2018). Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. In *From science to policy* (Vol. 7). European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs07>
- Levin, G. (2022). *Basemap04. Documentation of the data and method for the elaboration of a land use and land cover map for Denmark* (Vol. 252). Aarhus University, DCE - Danish Centre for Environment and Energy. <http://dce2.au.dk/pub/TR252.pdf>
- Lindgren, L. B., Frandsen, K. M., & Maagaard, S. E. (2024a). *Inspirationskatalog for biobaserede konstruktioner*. Artelia.
- Lindgren, L. B., Svane, N. D., & Maagaard, S. E. (2024b). *Scenarier for fremtidens behov for biobaserede byggematerialer - En del af Veje til Biobaseret Byggeri*. Artelia.
- Lund, P., Maigaard, M., Kjeldsen, M. H., Johansen, M., Louise, A., Hellwing, F., Weisbjerg, M. R., & Nielsen, O.-K. (2024). *Implementation of the Use of the Enteric Methane Mitigating Feed Additive Bovaer® in the National Danish Emission Inventories for Dairy Cows* (Vol. 229). Aarhus University, DCA - National Centre for Food and Agriculture. <https://dca.au.dk/raadgivning/>

- Lundø, M. (2023). *Statistikdokumentation for Høsten af korn, raps og bælgsgødning 2023*. Danmarks Statistik.
- Madsen, S. F. (1985). *Overensstemmende stammeside- og vedmassefunktioner for fem forskellige nåletræer*. (Vol. 338, pp. 97–139). Det forstlige Forsøgsvæsen i Danmark.
- Madsen, S. F. (1987). *Vedmassefunktioner ved forskellige aflægningsgrænser og nøjagtighedskrav for nogle vigtige danske skovtræer* (Vol. 350, pp. 47–242). Det Forstlige Forsøgsvæsen i Danmark.
- Madsen, S. F., & Heusèrr, M. (1993). *Volume and stem-taper functions for Norway spruce in Denmark*. (Vol. 1, pp. 51–78). Forest and Landscape Research.
- Manevski, K., Lærke, P. E., Olesen, J. E., & Jørgensen, U. (2018). Nitrogen balances of innovative cropping systems for feedstock production to future biorefineries. *Science of the Total Environment*, *633*, 372–390. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.155>
- Miljø- og fødevarerudvalget. (2017). *Sådan ligger landet - tal om landbruget 2017* (Vol. 281, pp. 7–9). Danmarks Naturfredningsforening og Dyrenes Beskyttelse.
- Miljøministeriet. (2021). *Bekæmpelsesmiddelstatistik 2021 - Behandlingshyppighed og pesticidbelastning baseret på salg og forbrug* (Vol. 63, pp. 68–78). Miljøministeriet. [www.mst.dk](http://www.mst.dk).
- Ministeriet for Fødevarer, L. og F. (2020). *600 mio. kroner skal over tre år forvandle marker til natur med klimaeffekt*.
- Møllgaard, P., Halkier, B., Kristensen, N. B., Bye, B., Heiselberg, P., Knudsen, M. T., Münster, M., Richardson, K., & Thorsen, B. J. (2024). *Danmarks klimamål i 2050 - Scenarier for en langsigtet omstilling til et 100- eller 110-procentsmål* (pp. 74–79). Klimarådet.
- Møllgaard, P., Jacobsen, J. B., Kristensen, N. B., Elmeskov, J., Halkier, B., Heiselberg, P., Knudsen, M. T., Morthorst, P. E., & Richardson, K. (2023). *Statusrapport 2023 - Danmarks nationale klimamål og internationale forpligtelser* (pp. 97–103). Klimarådet.
- Mortensen, E. Ø., De Notaris, C., Peixoto, L., Olesen, J. E., & Rasmussen, J. (2021). Short-term cover crop carbon inputs to soil as affected by long-term cropping system management and soil fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *311*, 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107339>
- Mortensen, E. Ø., & Jørgensen, U. (2022). *Forudsætninger for og beregninger af 2030 scenarier for arealanvendelse og biomasseproduktion i landbruget* (Issues 2022-0362959 / 2020-0114173). Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. <https://dca.au.dk/raadgivning/>
- Nielsen, M. H., Liborius, T., Weidinger, A., & Lund, H. T. (2023). *Anbefalinger til regeringen fra Klimapartnerskabet for bygge- og anlægssektoren* (pp. 3–7). Regeringens klimapartnerskaber - Bygge- og anlægssektoren. <https://www.kefm.dk/media/6649/klimapartnerskab-bygge-og-anlaegssektoren-hovedrapport.pdf>
- Nilsson, M. S., Møller, K. B., Petersen, M. R., Lindgren, L. B., & Maagaard, S. E. (2024). *Potentiale ved produktion af biobaserede byggematerialer i Danmark* (pp. 86–103). Artelia. [www.arteliagroup.dk](http://www.arteliagroup.dk)
- Nord-Larsen, T., Brownell, P. H., & Thybring, E. E. (2024). *Skove og træers klimapotentiale*. Københavns Universitet, IGN - Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning. [www.ign.ku.dk](http://www.ign.ku.dk)
- Nord-Larsen, T., Meilby, H., & Skovsgaard, J. P. (2017). Simultaneous estimation of biomass models for 13 tree species: effects of compatible additivity requirements. *Canadian Journal of Forest Research*, *47*, 765–776.
- Nord-Larsen, T., Østergaard, M. J., Riis-Nielsen, T., Thomsen, I. M., Bentsen, N. S., & Jørgensen, B. B. (2023). *Skovstatistik 2022*. Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. [www.ign.ku.dk](http://www.ign.ku.dk)
- Odum, E. P. (1969). *The strategy of ecosystem development* (Vol. 164, pp. 262–270). Science. <https://doi.org/10.1126/science.164.3877.262>

- Øhlenschläger, R., & Pedersen, H. (2001). *High Tech og low tech - mod en bæredygtig arkitektur* (p. 37). Dansk center for byøkologi.
- Olesen, J. E., Jørgensen, U., Hermansen, J. E., Petersen, S. O., Søgaard, K., Eriksen, J., Schjøning, P., Greve, M. H., Greve, M. B., Thomsen, I. K., Børgesen, C. D., & Vinter, F. P. (2016). *Græsdyrknings klima- og miljøeffekter* (Issue 1608410, pp. 5–12). Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. <http://dca.au.dk/>
- Olesen, J. E., Petersen, S. O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., & Lassen, J. (2018). *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget* (Vol. 130). Aarhus Universitet, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Or, D., Keller, T., & Schlesinger, W. H. (2021). Natural and managed soil structure: On the fragile scaffolding for soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 208, 2–3. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104912>
- Pallesen, B. E. (2021). *Bæredygtige hampetekstiler - Udvikling af koncept til fremstilling af bæredygtige hampetekstiler* (pp. 9–11). Miljøstyrelsen.
- Pedersen, H. B., & Møllenberg, S. (2017). *Landbrugsregnskaber i 100 år - 1916-2015* (pp. 10–14). Danmarks Statistik.
- Pedersen, P., & Kristensen, J. A. (2022). *Sammenspil mellem naturgenopretning og klimaafbødning og-tilpasning* (pp. 9–10). Aarhus Universitet, Institut for Biologi.
- Pieter Stadhouders. (2022). *Environmental Product Declaration -Standard and braced straw panel*. <https://ecococon.eu/>
- Pugesgaard, S., Schelde, K., Larsen, S. U., Lærke, P. E., & Jørgensen, U. (2015). Comparing annual and perennial crops for bioenergy production - influence on nitrate leaching and energy balance. *GCB Bioenergy*, 7(5), 11–13. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12215>
- Rasmussen, C., Mortensen, E. Ø., Wenzel, H., Ambye-Jensen, M., & Jørgensen, U. (2022). *Scenarier for anvendelse af biomasseressourcer i fremtidens produktionssystemer for fødevarer, energi og materialer inden for rammerne af gældende politik for landbrug, miljø, klima, natur og energi*. Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. <https://dca.au.dk/raadgivning/>
- Regeringen. (1989). *Lov om Naturforvaltning* (Vol. 339, Issue A 2505, pp. 2511–2514).
- Regeringen. (2009). *Aftale om Grøn Vækst* (p. 5). Miljøudvalget 2011-12. <https://www.ft.dk/samling/20111/almDEL/miu/bilag/21/1030569.pdf>
- Regeringen. (2021). *Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug*. [https://fm.dk/media/25302/aftale-om-groen-omstilling-af-dansk-landbrug\\_a.pdf](https://fm.dk/media/25302/aftale-om-groen-omstilling-af-dansk-landbrug_a.pdf)
- Regeringen. (2023). *Aftale om styrkede rammevilkår for CCS i Danmark - Klimahandling; vejen til fuld fangst og lagring af CO2 i 2030* (pp. 2–5).
- Regeringen. (2024). *Tillægsaftale om national strategi for bæredygtigt byggeri*. Social-, Bolig- og Ældreministeriet. [https://www.sm.dk/Media/638560336830794358/Till%c3%a6gsaftale\\_om\\_stramning\\_af\\_CO2e-krav\\_til\\_bygninger\\_UA.pdf](https://www.sm.dk/Media/638560336830794358/Till%c3%a6gsaftale_om_stramning_af_CO2e-krav_til_bygninger_UA.pdf)
- Regeringen, Landbrug & Fødevarer, Danmarks Naturfredningsforening, Fødevareforbundet NNF, Dansk Metal, Dansk Industri, & Kommunernes Landsforening. (2024). *Aftale om et Grønt Danmark*.
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., Von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>

- Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13, 104–114.
- Schelhaas, M.-J., Hengeveld, G., Filipek, S., König, L., Lerink, B., Staritsky, I., De Jong, A., & Nabuurs, G.-J. (2022). *EFISCEN-Space 1.0 model documentation and manual* (p. 114). Wageningen University and Research.
- Schelhaas, M.-J., Hengeveld, G. M., Heidema, N., Thürig, E., Rohner, B., Vacchiano, G., Vayreda, J., Redmond, J., Socha, J., Fridman, J., Tomter, S., Polley, H., Barreiro, S., & Nabuurs, G. J. (2018). Species-specific, pan-European diameter increment models based on data of 2.3 million trees. *Forest Ecosystems*, 5(1). <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0133-3>
- Siddique, I. A., Grados, D., Chen, J., Lærke, P. E., & Jørgensen, U. (2023). Soil organic carbon stock change following perennialization: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(5), 5–11. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00912-w>
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), 81–98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Thermocell Sales ApS. (2019). *Thermocell - Feeling wood*. [www.thermocell.dk](http://www.thermocell.dk)
- Thodsen, H., Kjaer, C., Tornbjerg, H., Søren, J. R., Larsen, E., & Blicher-Mathiesen, G. (2024). *Vandløb 2022* (Vol. 590). Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. [https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Videnskabelige\\_rapporter\\_500-](https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Videnskabelige_rapporter_500-)
- Trolle, E., Christensen, L. M., & Lassen, A. D. (2023). *Opdatering af det faglige grundlag for De officielle Kostråd i forhold til Nordiske Næringsstofanbefalinger 2023: Planterig kost 2-70 år* (p. 46). DTU Fødevarerinstitution.
- Tybirik, K., Jørgensen, U., Bentsen, N. S., Støckler, M., & Puggaard, L. (2024). *Dansen om det biogene kulstof*. Food & Bio Cluster Denmark.
- United Nations Conference on Environment and Development Rio de Janeiro, Brazil. (1993). *Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development: Rio Declaration on Environment and Development: Statement of Forest Principles*. (p. 294 p.). UN Department of Public Information. <http://digitallibrary.un.org/record/231320>
- Vallgård, A. F., & Duer, T. (2024). *Klimaforandringernes betydning for fremtidens arealanvendelse*. CONCITO - Danmarks Grønne Tænketaank. <https://concito.dk/udgivelser/klimaforandringernes-betydning-fremtidens-arealanvendelse-0>
- Von Hanf. (2023). *Technisches Merkblatt Hemplith @ Flex*.
- Ziegler, R., Wichtmann, W., Abel, S., Kemp, R., Simard, M., & Joosten, H. (2021). Wet peatland utilisation for climate protection – An international survey of paludiculture innovation. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 7–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100305>

**Appendix 1.** Skitsering af scenariernes udvikling af forskellige arealkategorier i land- og skovbruget. Arealændringer til 2030 er ikke markeret, mens ændringer til 2050 og 2089 er markeret med hhv. hård parentes [ ] og krøllet parentes {}.

Kategori	BAU	BIO	EKST	FTF
Landbrugsareal i alt (ha)	2.480.000 [2.311.000] {1.955.000}	2.420.000 [2.053.000] {1.904.000}	2.200.000 [1.480.000] {1.339.000}	1.980.000 [1.513.000] [1.670.000]
Grovfoderareal (ha)	801.750 [752.000] {619.000}	567.000 [240.000] {172.000}	591.000 [262.000] {195.000}	
Rapsareal (ha)	155.000 [145.000] {119.000}	119.000 [87.999] {63.000}	126.000 [94.000] {70.000}	
Kornareal til husdyr (ha)	1.050.000 [693.000] {478.000}	883.000 [422.000] {302.000}	903.000 [444.000] {327.000}	
Kornareal til eksport (ha)	317.000 [596.000] {625.000}	139.000 [300.000] {213.000}	169.000 [325.000] {234.000}	
Omlagt enårigt-nitratfølsomt areal til græs, roer og elefantgræs (ha)	0 [0] {0}	Græs (250 kg N/ha): 239.000 [219.000] {183.000} Roer: 44.000 [42.000] {37.000} Elefantgræs: 10.000 [10.000] {10.000}	Græs (150 kg N/ha): 237.000 [199.000] {196.000} Elefantgræs: 10.000 [10.000] {10.000}	
Omlagt enårigt-pesticidfølsomt areal til hamp (ha)	0 [0] {0}	17.000 [16.000] {14.000}	9.000 [8.000] {7.000}	
Omlagt enårigt højbundsareal med højt dexterindeks (Dexter >10) til græs (ha)	0 [0] {0}	90.000 [86.000] {83.000}	90.000 [86.000] {83.000}	
Andre afgrøder, såsom paludikultur på omlagt lavbundsjord (ha)	72.000 [42.000] {34.000}	110.000 [105.000] {91.000}	61.000 [56.000] {46.000}	
Frigivet grovfoderareal og frigivet fødevareareal som følge af øget udbytte (ha), som udlægges til kløvergræs	0 [0] {0}	160.000 [481.000] {689.000}	0 [0] {177.000}	
Kulstofrige lavbundsjord der stadig er drænedede (ha)	84.000 [82.000] {79.000}	50.000 [49.000] {48.000}	0 [0] {0}	0 [0] {0}
Landbrugsareal omlagt til infrastruktur (byer, veje, solceller mm.) (ha) (Infrastrukturareal i 2024: 588.000 ha)	104.000 [235.000] {517.000}	104.000 [285.000] {279.000}	104.000 [285.000] {270.000}	57.000 [65.000] {25.000}
Landbrugsareal afsat til natur (uden skov) (ha). (Eksisterende naturareal i 2021: 449.000 ha)	15.000 [15.000] {15.000}	15.000 [15.000] {15.000}	239.000 [584.000] {589.000}	448.000 [626.000] {664.000}
Skovrejsning på landbrugsjord i alt (ha) (Skovareal i 2024: 647.000)	11.400 [49.400] {124.000}	71.000 [258.000] {412.000}	71.000 [258.000] {412.000}	133.000 [266.000] {420.000}
Samlet skovareal til biodiversitet (ha)	75.000 [75.000] {75.000}	75.000 [75.000] {75.000}	104.000 [178.000] {240.000}	457.000 [457.000] {457.000}

**Appendix 2.** Estimerede biomasseudbytter fra FTF i 2030 med udgangspunkt i de 10 valgte modelsædskifter, og fremskrevet med lineær nedgang af landbrugsareal og antaget fordeling mellem konventionel og økologisk andel.

Afgrøde	Kløvergræs, foder	Kløvergræs, energi	Havre, afskallet	Rodfrugter <sup>4</sup>	Ærter <sup>5</sup>	Grøntsager	Vårhvede	Hestebønner
Økologisk areal (ha)	192.503	96.251	192.503	96.251	96.251	96.251	96.251	96.251
Konventionelt areal (ha)	141.844	70.922	141.844	70.922	70.922	70.922	70.922	70.922
Økologisk udbytte (tons ts/ha)		6,0	3,5	3,5	3,5		3,5	3,5
Konventionelt udbytte (tons ts/ha)		9,3	5,4	5,4	5,4		5,4	5,4
Økologiske halmudbytte (tons ts/ha)			2,0	3,2	1,7		1,7	1,7
Konventionelt halmudbytte (tons ts/ha)			3,1	4,9	2,7		2,7	2,7
Andel af halm til fyring			0,1	0,2	0,1		0,2	0,0
Andel af halm til foder			0,1	0,0	0,0		0,1	0,0
Andel af halm til strøelse			0,1	0,0	0,0		0,2	0,0
Andel af halm til nedmuldning <sup>6</sup>			0,6	0,8	0,9		0,5	1,0
Andel af græsprotein		0,06						
Andel af græs fibre		0,79						
Andel græs-brunsaft		0,15						
Tilgængelighed af <u>økologiske</u> græs fibre (tons ts/ha)		4,8						
Tilgængelighed af <u>konventionelle</u> græs fibre (tons ts/ha)		7,4						
Tilgængelig halm fra nedmuldning (tons/ha) <sup>7</sup>			1,7	3,4	2,1		1,2	2,3
Tilgængelig halm fra foder/strøelse efter husdyrreduktion (tons/ha)			0,6	0,1	0,1		0,5	0,1
Tilgængelig halm fra fyring (tons/ha)			0,4	0,8	0,2		0,6	0,0
Tilgængelig biomasse per hektar (tons ts/ha) (halm til fyring+nedmuldning+foder/strøelseshalmen):			2,6	4,3	2,4		2,3	2,4
Biomasseudbytte (tons)		981.008	373.413	302.655	167.577		162.645	167.484 <sup>8</sup>
Biomasse i alt (Mt)	<u><u>2,2</u></u>							

<sup>4</sup> Angivet som vinterraps i FTF.

<sup>5</sup> Antaget markærter

<sup>6</sup> Halmens anvendelse er fra Danmarks statistik (2016-2022).

<sup>7</sup> Antaget 87% mulig bjærgning af det konventionelle dyrkningssystem – Se 3.1.2 og (Mortensen & Jørgensen, 2022).

<sup>8</sup> Halm fra havre, rodfrugter, ærter, vårhvede og hestebønner er kun medregnet for konventionel andel, da økologisk halm antages værende utilgængeligt.

**Appendix 3.** Estimerede biomasseudbytter fra FTF i 2040 med udgangspunkt i de 10 valgte modelsædskifter, og fremskrevet med lineær nedgang af landbrugsareal og antaget fordeling mellem konventionel og økologisk andel.

Afgrøde	Kløvergræs, foder	Kløvergræs, energi	Havre, afskallet	Rodfrugter <sup>9</sup>	Ærter <sup>10</sup>	Grøntsager	Vårhvede	Hestebønner
Økologisk areal (ha)	282.000	141.000	282.000	141.000	141.000	141.000	141.000	141.000
Konventionelt areal (ha)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Økologisk kerneudbytte (tons/ha)		6,0	3,5	3,5	3,5		3,5	3,5
Økologiske halmudbytte (tons/ha)			2,0	2,0	2,0	0,0	2,0	2,0
Andel af halm til fyring			0,1	0,2	0,1		0,2	0,0
Andel af halm til foder			0,1	0,0	0,0		0,1	0,0
Andel af halm til strøelse			0,1	0,0	0,0		0,2	0,0
Andel af halm til nedmuldning <sup>11</sup>			0,6	0,8	0,9		0,5	1,0
Andel af græsprotein		0,06						
Andel af græsfibre		0,79						
Andel græs-brunsaft		0,15						
Tilgængelighed af økologiske græsfibre (tons ts/ha)		4,8						
Tilgængelig halm fra nedmuldning (tons/ha) <sup>12</sup>			0,0	0,0	0,0		0,0	0,0
Tilgængelig halm fra foder/strøelse efter husdyrreduktion (tons/ha)			0,0	0,0	0,0		0,0	0,0
Tilgængelig halm fra fyring (tons/ha)			0,0	0,0	0,0		0,0	0,0
Tilgængelig biomasse per hektar (tons ts/ha) (halm til fyring+nedmuldning+foder/strøelseshalmen):			0,0	0,0	0,0		0,0	0,0
Biomasseudbytte (tons)		670.878	0	0	0	0	0	0 <sup>13</sup>

Biomasse i alt (Mt)

0,67

<sup>9</sup> Angivet som vinterraps i FTF.

<sup>10</sup> Antaget markærter

<sup>11</sup> Halmens anvendelse er fra Danmarks statistik (2016-2022).

<sup>12</sup> Antaget 87% mulig bjærgning af det konventionelle dyrkningssystem – Se 3.1.2 og (Mortensen & Jørgensen, 2022).

<sup>13</sup> Halm fra havre, rodfrugter, ærter, vårhvede og hestebønner er kun medregnet for konventionel andel, da økologisk halm antages værende utilgængeligt.



## **Om DCA**

DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug er den faglige indgang til jordbrugs- og fødevarerforskningen ved Aarhus Universitet.

Centret omfatter institutter og forskningsmiljøer, der har aktiviteter på jordbrugs- og fødevarerområdet. Det er primært Institut for Agroøkologi, Institut for Husdyrvidenskab, Institut for Fødevarer, Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning samt dele af Institut for Ingeniørvidenskab.

Aktiviteterne i DCA understøttes af en centerenhed, der varetager og koordinerer opgaver omkring myndighedsbetjening, erhvervs- og sektorsamarbejde, internationalt samarbejde og kommunikation.

## **Forskningsresultater fra DCA**

Resultater fra forskningen publiceres i internationale, videnskabelige tidsskrifter. Publikationerne kan findes via universitets publikationsdatabase ([pure.au.dk](http://pure.au.dk)).

## **DCA rapporter**

DCA's rapportserie formidler hovedsageligt myndighedsrådgivning fra DCA til Miljø- og Fødevarerministeriet. Der kan også udgives rapporter, som formidler viden fra forskningssaktiviteter. Rapporterne kan frit hentes på centrets hjemmeside: [dca.au.dk](http://dca.au.dk).

## **Nyhedsbreve**

DCA udsender et nyhedsbrev, der løbende orienterer om jordbrugs- og fødevarerforskningen og herunder om nye forskningsresultater, rådgivning, uddannelse, arrangementer og andre aktiviteter. Det er gratis at tilmelde sig nyhedsbrevet, og det kan ske på [dca.au.dk](http://dca.au.dk).







## RESUME

Rapporten analyserer scenarier for den fremtidige arealudnyttelse med henblik på at levere biomasse til byggeriets omstilling til biobaserede materialer og at reducere påvirkning af miljø, biodiversitet og klima.

I flere landbrugsscenarier opnås en betydelig biomasseresource, som kan udnyttes til byggematerialer. Den øgede tilgængelighed sker dels ved en fordoblet halmudnyttelse, dels ved en antaget fortsat stigning i landbrugets produktivitet. Grovfoderareal omlægges til nye anvendelser i takt med en antaget reduktion i husdyrproduktion. I skovbruget er forskellene mellem scenariernes totale mængder af træ lang tid om at manifestere sig. Omvendt kan opnås en væsentlig forøgelse af træ til byggeri, hvis en større andel kanaliseres til produktion af fx plader i stedet for til energi.

De fleste arealscenarier giver langt mere biomasse, end byggesektoren har behov for til en omstilling. Men der vil være behov for teknisk udvikling af materialer fra både landbrugsafgrøder og skovflis, så byggetekniske krav opfyldes, før ressourcerne kan udnyttes i byggeriet. Hvis det lykkes, kan der lagres CO<sub>2</sub> i bygninger og atmosfærens indhold af CO<sub>2</sub> nedbringes, samtidig med at udledningerne af fossilt CO<sub>2</sub> fra produktionen af materialer som stål og beton reduceres. Flere scenarier opfylder samtidigt nationale målsætninger for klima, miljø og natur.