

Klimarådet.

• • • • • • • • • • • • • • • •
• • • • • • • • • • • • • • • •
• • • • • • • • • • • • • • • •
• • • • • • • • • • • • • • • •

Baggrundsnotat 2

Modellering af bioressourcer og drivhusgasudledning fra landbrug, skovbrug og arealer

Baggrundsnotat til analysen *Danmarks klimamål i 2050*.

1	Indledning	2
2	Beskrivelse af BioRes	3
3	Omstillingselementer	13
4	Arealtyper og arealfordeling	21
5	Landbrug	24
6	Bioraffinering af græs	26
7	Biogasproduktion	27
8	Pyrolyse	29
9	Skov	36
10	Havbrug	39
11	Fødevarerforbrug og forarbejdning	40
12	Danmarks globale bidrag	45
13	Forenklinger og usikkerheder	49
14	Referencer	53

1 Indledning

Dette notat beskriver de metoder, der bruges til at opgøre bioressourcer og drivhusgasudledning fra landbrug, skovbrug og arealanvendelse i projektet *Danmarks klimamål i 2050*. Landbrug, skovbrug og arealer kan både udlede og optage drivhusgas. Samtidig er de tre sektorer leverandører af fødevarer, materialer og brændsler. Der er en tæt sammenhæng mellem deres bidrag til at løse klimaudfordringen og deres øvrige leverancer. De tre sektorer skal derfor ses i et systemperspektiv, når man skal undersøge, hvordan de kan bidrage til at nå fremtidige klimamål.

Landbrug, skovbrug og arealanvendelse kan både reducere klimaforandringerne og øge dem. Skov kan mindske klimaforandringerne ved at optage CO₂ fra atmosfæren og lagre kulstoffet i træer og jord. Landbrug og skovbrug kan medføre udledninger, men samtidig producere fødevarer, materialer og biomasse. Biomasse som halm og træ kan bruges til energiformål i stedet for fossile brændsler. Biomasse kan også være en vej til negative udledninger - enten via pyrolyse og lagring af biokul, eller via afbrænding af biomasse og fangst og lagring af CO₂ i undergrunden.

Der er en tæt sammenhæng mellem landbrugets og skovbrugets bidrag til at løse klimaudfordringen og deres øvrige leverancer. Brug af dyrkningsareal til energiafgrøder vil alt andet lige mindske fødevarerproduktionen. Høst af bioressourcer til energi reducerer kulstoflageret på arealet, hvilket tæller som en udledning i drivhusgasopgørelsen. Arealanvendelsen har stor betydning for natur og miljøforhold, som også er genstand for politiske målsætninger. Det er derfor afgørende at se landbrug, skovbrug og arealanvendelse i et systemperspektiv, når man skal undersøge, hvordan fremtidige klimamål kan opfyldes. Det gælder især, hvis målet er at nå en nettonegativ udledning.

I *Danmarks klimamål i 2050* opbygges et antal scenarier, der viser, hvordan fremtidige klimamål kan opfyldes. Et scenarie er et regneeksempel baseret på sæt af antagelser og omstillingselementer, som illustrerer en mulig fremtidig udvikling. Projektets scenarier beskrives i hovedrapporten *Danmarks klimamål i 2050* og i *Baggrundsnotat 1*. Scenarierne omfatter alle sektorer. Dette notat beskriver grundlæggende data, antagelser og metoder til at opgøre drivhusgasudledning og produktion af biogene produkter fra landbrug, skovbrug og arealanvendelse.

Produktion og udledning opgøres ved hjælp af en model

Til analysen af produktion og udledninger fra landbrug, skovbrug og arealer har Klimarådet anvendt bioressourcemodellen DK-BioRes 2.0 (herefter BioRes). Den første version af modellen, BioRes 1.0, blev udviklet af Energy Modelling Lab i et projekt for Energistyrelsen i 2021. Modellen er derefter blevet omstruktureret, opdateret og videreudviklet af Energy Modelling Lab i samarbejde med Klimarådets sekretariat i perioden 2023 til 2024.¹ Forskere fra Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) og Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug (DCA) ved Aarhus Universitet samt fra Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning (IGN) ved Københavns Universitet har tillige ydet konsulentbistand til videreudviklingen af BioRes modellen.²

BioRes-modellen gør det muligt at opbygge scenarier for landbrug, skovbrug og arealer i Danmark. Modellen beregner udledninger og produktion af biologiske ressourcer for de forskellige scenarier. De biologiske ressourcer omfatter afgrøder og produkter fra landbrug, træ fra skovdrift og rest- og affaldsprodukter fx halm og bioaffald. Biologiske ressourcer kan bruges til fødevarer, foder og materialer samt til energi- og lagringsformål. Ressourcer til energi – og lagring kan afbrændes direkte, eller de kan anvendes til pyrolyse eller til produktion af biogas. Biologiske ressourcer kan anvendes til materialer og andre formål først og derefter anvendes til energi og lagringsformål, når de er blevet til affald. Biologiske ressourcer, også kaldet bioressourcer, skal altså forstås bredt, som alle ressourcer af biologisk oprindelse.

Scenarierne viser, hvordan skov, landbrug og arealsektoren kan bidrage til at opfylde fremtidige nationale klimamål gennem leverancer af biogene produkter, gennem reduktion af drivhusgasudledningen og gennem øget optag og lagring af CO₂ på arealerne.

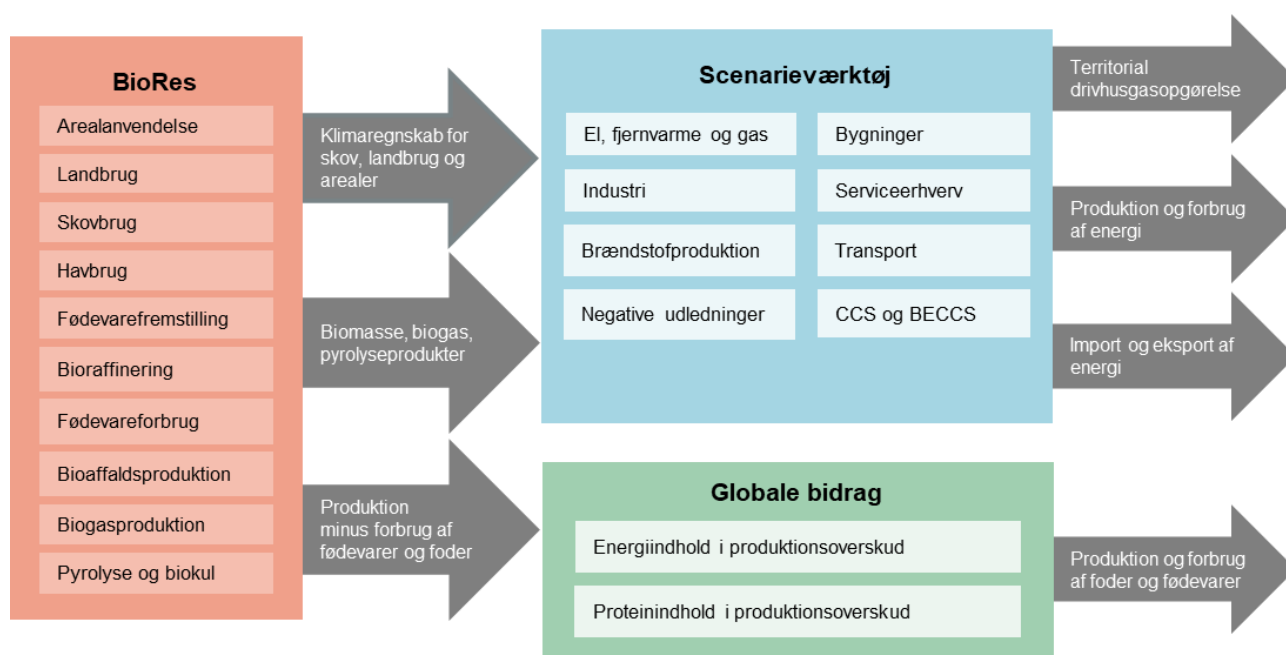
Målet er en systemanalyse for areal og bioressourcer

Det er målet med projektet at se drivhusgasudledningen fra landbrug og arealer i sammenhæng med produktion af biogene produkter til fødevarer, energi og kulstoflagring. En sådan systemanalyse kan holde styr på arealforbrug og

ressourcestrømme og fx vise, at øget anvendelse af areal til produktion af biomasse har konsekvenser for fødevarereproduktionen. Ligesom udlægning af areal til urørt skov har konsekvenser både for lagring af kulstof i skoven og for produktion af træ til materialer og energi. En systemanalyse kan desuden belyse klimaeffekten af det samlede system og sikre, at der holdes styr på ressourcestrømmene, så hver ressource kun bruges én gang.

Analysen fokuserer på Danmarks territorium. Det undersøges, hvad der kan produceres af biologiske ressourcer på danske arealer under forskellige forudsætninger. Samtidig føres der regnskab med eventuelle konsekvenser for produktionen af landbrugsprodukter.

En vigtig forudsætning er, hvor meget plads, der antages afsat til natur og biodiversitet. Det har konsekvenser for både produktion og udledninger fra Danmarks territorium. Danmarks import og eksport af fødevarer og bioenergi er også central. Import og eksport-balancen har betydning for Danmarks bidrag til verdens fødevarerforsyning. Balancen påvirker desuden arealanvendelsen globalt og dermed mulighederne for at have plads til natur udenfor Danmark. Danmarks produktionsoverskud af landbrugsvarer opgøres derfor i analysen. Figur 1.1 viser hvilke områder, der belyses af BioRes og hvilke, der beregnes i andre modelværktøjer.



Figur 1.1 Modelværktøjer anvendt til rapporten *Danmarks klimamål i 2050*

Kilde: Klimarådet.

2 Beskrivelse af BioRes

BioRes gør det muligt at udarbejde scenarieanalyser, der viser forskellige omstillingselementers betydning for produktion af biologiske ressourcer og drivhusgasudledningerne fra arealer, skov og landbrug i Danmark. Modellen regner i fysiske enheder, fx ton og PJ, mens økonomiske forhold ikke indgår. Nedenfor beskrives de valg, der er truffet ved udformningen af modellen herunder grundlæggende antagelser, omstillingselementer og beregningsmetoder.

BioRes indeholder en repræsentation af hele Danmarks areal opdelt på landbrug, skov, vådområder, bebyggelse mv. På landbrugsarealer produceres afgrøder, og landbruget producerer også animalske produkter. På arealer med skovbrug produceres gavntre og træ til energi. Både landbrug og skovbrug producerer biomasse og påvirker samtidig indholdet af drivhusgasser i atmosfæren. Andre arealer har ingen produktion af biomasse, fx urørt skov, men urørt skov kan påvirke atmosfærens indhold af drivhusgasser ved at lagre CO₂.

BioRes indeholder en repræsentation af dansk fødevarerproduktion og -forbrug. BioRes beregner således landbrugsproduktionen og forbruget af foder og fødevarer i Danmark. På den baggrund beregnes balancen mellem produktion og forbrug i form af et produktionsoverskud eller -underskud.

BioRes beregner for det valgte scenarieår fx 2050:

- **Bioenergipotentialt.** Bioenergipotentialt er energiindholdet i de biogene produkter, der produceres i Danmark, og som anvendes til energiformål i scenarierne. De biogene produkter er brændsler som fast biomasse til afbrænding, flydende biobrændsler og biogas samt pyrolysegas og -olie. Efter anvendelsen til energiformål kan kulstoffet i brændslerne anvendes til lagring af CO₂ ved hjælp af BECCS, der står for *BioEnergy Carbon Capture and Storage*. Bioenergipotentialt omfatter ikke bioressourcer anvendt til lagring af biokul.
- **Drivhusgasudledningen.** Det vil sige den samlede nettodrivhusgasudledning fra landbrug, skovbrug og arealsektoren i Danmark.
- **Produktion minus forbrug.** Produktion minus forbrug, eller produktionsoverskuddet, er dansk producerede landbrugsvarer i form af afgrøder og animalske produkter fratrukket dansk forbrug af samme slags varer.

BioRes indeholder et netværk af processer og produkter

BioRes indeholder et netværk af processer og produkter, der gør det muligt at følge strømme af biologiske ressourcer og drivhusgasudledninger. *Landbrug* er fx en proces, der blandt andet producerer afgrøder herunder produktet *græs*. Græs kan være input til processen *produktion af græsprotein*, der som output har produkterne *protein*, *græsfiber* og *brunsaft*. Brunsaft kan være input til processen *biogasproduktion*, der som output har produkterne *biogas* og *afgasset biomasse*. Afgasset biomasse kan igen være input til processen *pyrolyse*, der som output har produkterne *pyrolysegas* og *olie* samt *biokul*. Hver proces i modellen har tilknyttet parametre, der angiver, hvad processen producerer både i form af produkter og drivhusgasudledninger. Figur 2.1 viser et udvalg af de processer og produkter, der indgår i modellen.

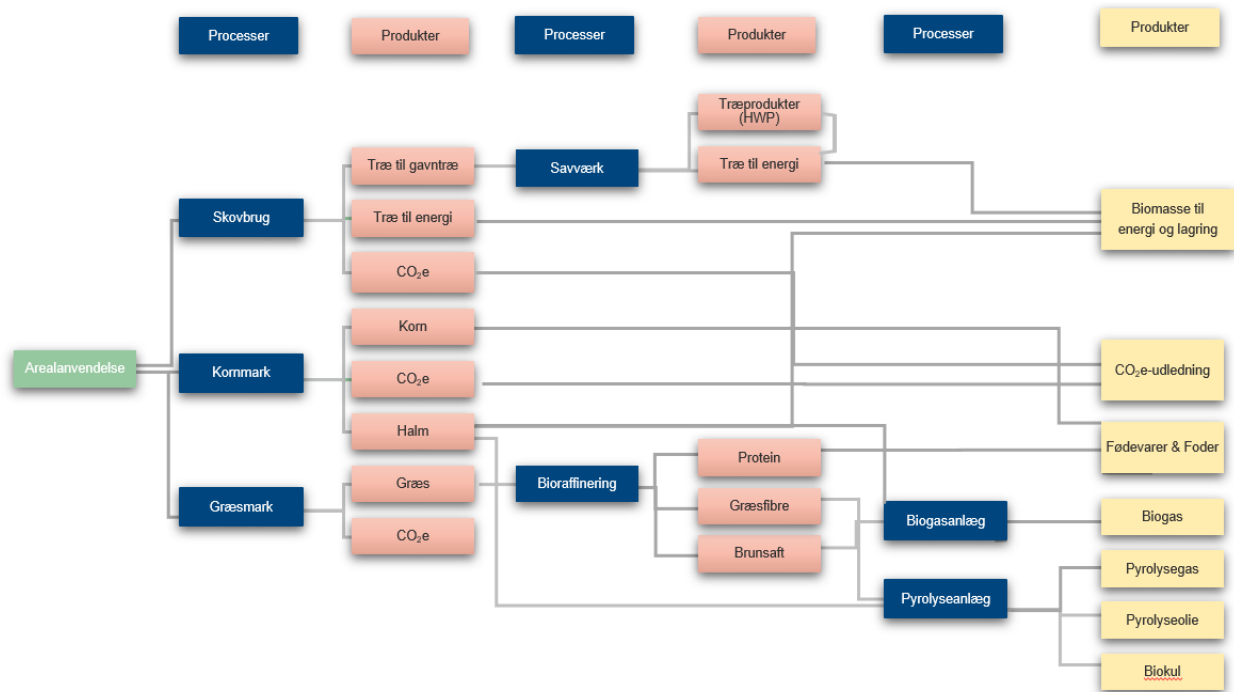
Modellens beregning af *produktion minus forbrug* bruges til at holde styr på, hvor stor en del af den danske produktion, der skal til for at dække danskernes behov. Modellen beregner fx produktionen af svinekød og sammenholder dette med danskernes forbrug af svinekød ud fra kostundersøgelser.³ På den baggrund opgøres et evt. produktionsoverskud, der potentielt kan eksporteres. Dette bruges til at opgøre scenariernes globale bidrag, som beskrives nærmere i kapitel 12.

Valg af omstillingselementer skaber et scenarie

Modellen indeholder en række omstillingselementer, som kan vælges til og fra og justeres for at skabe et scenarie. Omstillingselementer er strukturelle eller tekniske muligheder for at øge produktionen af biologiske ressourcer og/eller ændre drivhusgasudledningen i landbrug, skovbrug og i arealsektoren. Skovbrug og arealsektoren kaldes samlet for LULUCF, som står for *Land Use, Land Use Change and Forestry*.

Omstillingselementer kan være brug af nye teknologier, ændret produktion og ændret arealanvendelse. I landbruget kan omstillingselementer være dyrkning af efterafgrøder, ændringer i antallet af husdyr og hyppig udslusning af gylle fra stalde. I skovbruget kan et omstillingselement være brug af hurtigvoksende træarter. I arealsektoren kan et omstillingselement være vådlægning af kulstofrige jorder.

Virkemidler, fx afgifter eller tilskud, som skal give aktører incitament til at tage omstillingselementerne i brug, indgår ikke i modellen og beskrives dermed ikke i dette notat.



Figur 2.1 Udsnit af processer og produkter i BioRes

Kilde: Klimarådet og Energy Modelling Lab.⁴

BioRes bygger på tidligere scenarierarbejde og på Danmarks drivhusgasopgørelse

BioRes er inspireret af scenarier, som er udarbejdet dels for Klima- og Energiministeriet, Fødevarerministeriet og Miljøministeriet og dels for Bioøkonomipanelet af en række forskere blandt andre Claus Rasmussen, Esben Øster Mortensen og Uffe Jørgensen, DCA, Aarhus Universitet, Thomas Nord-Larsen, IGN, Københavns Universitet og Henrik Wenzel, Syddansk Universitet.^{5, 6, 7}

BioRes er baseret på Danmarks nationale drivhusgasopgørelse fra 2023, *Denmark's National Inventory Report 2023*, som er udarbejdet af Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) ved Aarhus Universitet.⁸ Denne publikation kaldes herefter Danmarks drivhusgasopgørelse 2023 eller NIR 2023. BioRes anvender tal herfra for referenceåret 2020. For scenarieårene beregner modellen udledninger i forhold til referenceåret ud fra de valgte omstillingslementer.

En anden væsentlig kilde er Andersen mfl. *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget* fra 2023.⁹ Denne publikation kaldes herefter Klimavirkemiddelkataloget.

Energistyrelsens *Klimastatus- og fremskrivning 2023* samt Klima-, Energi- og Forsyningsministeriets *Klimastatus og – fremskrivning 2024* indgår også i modellens datagrundlag. Hovedkilden er fremskrivningen fra 2023, men data er på enkelte punkter opdateret til fremskrivningen fra 2024. Klimastatus- og fremskrivning fra henholdsvis 2023 og 2024 kaldes herefter KF23 og KF24.^{10, 11}

Andre kilder er Danmarks Statistik (DST) og en lang række rapporter om de emner, som håndteres af modellen. De anvendte kilder fremgår under Referencer til sidst i dette notat. Kilderne fremgår desuden i selve BioRes-modellen, som udgives af Energy Modelling Lab.

Modellen er en forsimpning af virkeligheden

BioRes-modellen er en forsimpet model af det meget komplekse system, som landbrug, skovbrug og arealanvendelsen udgør. Modellen indeholder ikke alle typer af udledninger, og beregningen af produktion og CO₂-udledninger er i mange tilfælde baseret på simple antagelser og ikke på en fuldt modelleret tidslig udvikling.

Modellen er således på nogle punkter statisk, idet forhold, som ikke aktivt ændres af brugeren, antages at være konstante dvs. på 2020-niveau. En ko er fx en gennemsnitlig ko i 2020. Der antages altså ikke at ske en genetisk betinget udvikling af køers foderindtag, mælkeydelse og metanudledning frem til 2050. Metanudledningen kan til gengæld reduceres via omstillingselementet *fodertilsætning til malkekøer*. Modelleringen af kulstoflageret i jorder er også forsimplet, idet en dynamisk tidsmæssig udvikling er erstattet af gennemsnitlige faktorer for bestemte perioder. Dette er nærmere beskrevet i kapitel 3 og 5.

Modellen er på andre punkter dynamisk, idet den modellerer en tidsafhængig udvikling. Det er fx tilfældet på følgende punkter:

- Udbyttet af afgrødedyrkning i landbruget
- Befolkningsudviklingen
- Skov og træprodukter
- Lagring af biokul fra pyrolyse.

Afgrødeudbyttet i landbruget antages fx at stige med 19,5 pct. fra 2020 til 2050.¹² Det svarer til udbyttetigningen i det scenarierarbejde, der ligger til grund for Bioøkonomipanelets anbefalinger.¹³

Befolkningstallet i Danmark antages at øges til 6,3 millioner mennesker i 2050 baseret på Danmarks Statistik.¹⁴ Befolkningens størrelse har blandt andet indflydelse på forbruget af landbrugsprodukter samt på, hvor meget affald og spildevand der genereres i forskellige år.

For skov gælder, at skovens tilvækst og dermed dens kulstofoptag afhænger af træernes alder. Ved ændring i årlig hugst eller skovrejsning beregner modellen således skovsektorens nettooptag over tid ud fra skovtypen og træernes alder. Modellen beregner også tidsmæssige ændringer i udledning og lagring af CO₂ i høstede træprodukter. Dette er nærmere beskrevet i kapitel 9.

Modellens forsimplede antagelser og usikkerheder betyder, at dens resultater ikke skal betragtes som en forudsigelse af Danmarks drivhusgasudledning i 2050. Modelberegningerne kan imidlertid vise væsentlige sammenhænge mellem arealanvendelse, produktion og udledninger. Det vurderes også, at beregningerne kan give en indikation af, hvordan udledninger fra landbrug, skovbrug og arealsektor *kan* udvikle sig frem til 2050 under de angivne forudsætninger, herunder om et klimamål er indenfor rækkevidde med de valgte omstillingselementer. En nærmere beskrivelse af udeladelser, forsimplinger og usikkerheder i modellen fremgår af kapitel 13.

2.1 Beregning af drivhusgasudledninger

Modellen opgør udledninger fra Danmarks landbrug, skovbrug og arealanvendelse. Udledningskategorierne følger FN's fælles regler for rapportering af landes drivhusgasudledninger, det såkaldte *Common reporting format* (CRF). De udledninger, der opgøres i BioRes, er CRF-kategorierne 3 (Landbrug) og 4 (LULUCF). Herudover medtages CO₂-optag fra biokul fra pyrolyse, som på nuværende tidspunkt ikke er placeret i en CRF-kategori. Tabel 2.1 giver et overblik over hvilke udledningskategorier, der medregnes i BioRes.

Drivhusgas kan være kuldioxid (CO₂), lattergas (N₂O) eller metan (CH₄). For at kunne regne på de samlede drivhusgasudledninger omregnes metan og lattergas til CO₂-ækvivalenter, som forkortes CO₂e. I Parisaftalen blev parterne enige om at bruge konverteringsfaktorer fra IPCC's femte hovedrapport fra 2013.¹⁵ I BioRes konverteres metan og lattergas som følge heraf til CO₂e med en faktor på henholdsvis 28 og 265.

Nedenfor beskrives de beregningsmetoder, som bruges til beregning af udledninger i basisåret for de udledningskategorier, som medregnes jf. tabel 2.1.

Tabel 2.1 Oversigt over typer af udledninger, som medregnes eller ikke medregnes i BioRes-modellen

CRF Kode	Engelsk betegnelse	Dansk betegnelse	Medregnes i BioRes
3A	Enteric fermentation	Husdyrs fordøjelse	Ja
3B	Manure management	Gødningshåndtering	Ja
3D	Agricultural soils	Lattergas fra marker	Ja
3F	Field Burning of Agricultural Residues	Afbrænding af planterester	Nej
3G	Liming	Kalkning	Nej
3H	Urea application	Urea	Nej
3I	Other carbon-containing fertilizers	Anden kulstofholdig gødning	Nej
4A	Forest land	Skov	Ja
4B	Cropland	Dyrket mark	Ja
4C	Grassland	Græsarealer	Ja
4D	Wetlands	Vådmarker	Ja
4E	Settlements	Byer og infrastruktur	Nej
4F	Other Land	Andet land	Nej
4G	Harvested wood products	Høstede træprodukter	Ja
4H	Other LULUCF	Andet LULUCF	Nej
		CO ₂ -optag fra lagring af biokul	Ja
		CO ₂ -optag fra havbiomasse	Nej

Anm.: Biomasse fra havet medregnes som fødevarer/foder eller bioenergi. Der indregnes ikke et CO₂-optag i havbiomasse, fx tang, da dette ikke indgår i Danmarks drivhusgasopgørelse.

Kilde: Klimarådet og Danmarks drivhusgasopgørelse

CRF-kategori 3A: Husdyrs fordøjelse

BioRes indeholder tre typer husdyr: kvæg, svin og fjerkræ. Drivhusgasudledningen fra disse dyrs fordøjelse i 2020 fremgår af Danmarks drivhusgasopgørelse. BioRes fordeler denne udledning på alle kvæg, fjerkræ og svin i 2020, hvorved der fås en udledningsfaktor pr. gennemsnitsdyr. Antallet af dyr, det vil sige husdyrbestanden i 2020, er hentet fra Danmarks Statistik.¹⁶ Udledningen pr. gennemsnitsdyr i bestanden holdes konstant i alle årene, medmindre der indføres omstillingsselementer fx fodertilsætning, som reducerer udledningen. Dette er nærmere beskrevet nedenfor under omstillingsselementer. Konventionelle og økologiske dyr antages at have samme udledning fra fordøjelsen.

CRF-kategori 3B: Gødningshåndtering

BioRes indeholder gødningsmængder fra kvæg, fjerkræ og svin i 2020.¹⁷ Modellen anvender en faktor for udledningen fra stald og lager pr. ton gylle baseret på Klimavirkemiddelkatalogets tal for udledningen fra gennemsnitlige staldsystemer.¹⁸ For fjerkræ er udledningen baseret på Danmarks drivhusgasopgørelse. Gødning afsat på græs fratrækkes ud fra antallet af græsningsdage.

BioRes indeholder to omstillingsselementer til at nedbringe udledningen fra håndtering af husdyrgødning: *bioafgasning* og *hurtig udslusning*. I 2020 blev en del af husdyrgødningen bioafgasset, og en del af gyllen blev udsluset hurtigt. BioRes beregner en reduktion i udledningen, hvis yderligere gødning bioafgasses, og yderligere gylle udsluses hurtigt.

Datagrundlaget er Klimavirkemiddelkatalogets tal for reduktionens størrelse og for, hvor stor en del af gyllen der blev udsluset hurtigt i 2020. Mængden af gylle, der blev bioafgasset i 2020, er baseret på data fra Energistyrelsen.¹⁹

CRF-kategori 3D: Lattergas fra marker

Denne kategori af udledninger består af lattergasudledning ved gødsning, indirekte lattergasudledninger fra dyrket jord, lattergasudledninger fra planterester på markerne og lattergasudledninger fra drænede, kulstofrige jorde.

Lattergasudledningen ved gødsning beregnes ved at bruge kvælstofnormen for hver afgrøde og antage, at kvælstofnormen udnyttes i samme omfang som i 2020. Dermed kendes den udsprede mængde kvælstof (N). Den direkte lattergasudledning ved gødsning beregnes ved at bruge IPCC's udledningsfaktor (2019) for lattergas, ifølge hvilken 1 pct. af den udsprede kvælstof (N) bliver til lattergas. Lattergasudledningerne fra gødsning ændres, hvis der i scenarierne skiftes til afgrøder med andre kvælstofnormer. Antagelsen om et generelt stigende udbytte indebærer en generelt stigende kvælstofnorm og dermed også en stigende lattergasudledning fra gødsning.

BioRes beregner en udledningsfaktor for lattergas pr. ton af forskellige typer af gødning ud fra kvælstofindholdet i forskellige typer. Der ses bort fra udnyttelseskrav til husdyrgødning og andre former for organisk gødning. Gødsning med spildevandsslam og slam fra industrien medregnes ikke.

Lattergasudledningen ved gødsning er skaleret, så de samlede udledninger for 2020 passer dels med den anvendte mængde af husdyrgødning og kunstgødning og dels med udledningen i 2020 ifølge NIR 2023. Derved tages der højde for gødskningen med slam samt for udnyttelseskrav og udnyttelsesgraden af N-normerne. Den samme skaleringsfaktor anvendes i alle år, da der ikke vurderes at være videngrundlag for at ændre denne. Det antages dermed implicit, at der vil være den samme udnyttelse af N-normerne i alle år.

Indirekte lattergasudledninger er beregnet med en fast udledningsfaktor pr. hektar dyrket jord, så det passer med den samlede udledning fra denne kategori i 2020 ifølge NIR 2023.

Lattergasudledninger fra planterester er indregnet med en gennemsnitlig faktor pr. hektar for de afgrøder, som producerer planterester, så det passer med den samlede udledning i 2020 fra denne kategori i NIR 2023. Det betyder, at udledningerne af lattergas fra planterester ikke ændrer sig i modellen, hvis der skiftes fra en afgrøde, der antages at producere planterester, til en anden, der også producerer planterester. Hvis man derimod omlægger en mark fra at producere en afgrøde med planterester til en flerårig afgrøde uden planterester, vil lattergasudledningen fra planterester falde. En øget udlægning af efter- og mellemafgrøder vil også afspejles i lattergasudledningerne fra planterester. I visse tilfælde ændres lattergasudledningerne dog ikke. Det er tilfældet, hvis der i scenarierne opsamles flere planterester, fx hvis der sker en øget opsamling af halm. Denne unøjagtighed bør udbedres i en senere version af modellen.

CRF-kategori 4A og 4G: Skov og Høstede træprodukter

Skov optager CO₂ fra luften, og en del af den optagne CO₂ lagres i træerne. Når træerne vokser, vokser skovens kulstofpulje også. Omvendt sker der en udledning, hvis træerne høstes eller dør, og kulstoflageret i skoven falder. Hvis skov lægges urørt, vil skoven optage og lagre CO₂ i mange år, indtil skoven bliver gammel og nettooptaget aftager. Hvornår dette sker afhænger af skovtypen.

Ifølge FN's opgørelsesregler skal følgende indregnes i drivhusgasopgørelsen for skovsektoren:

1. Ændringer i skovens kulstoflager
2. Ændringer i lageret af høstede træprodukter

Ændringerne i skovkulstoflageret skyldes primært tilvækst og hugst, men lageret er også påvirket af fx stormfald, tørke, barkbilleangreb mv. Høst af træ fra skoven mindsker skovkulstoflageret og repræsenterer en CO₂-udledning. Samtidig sker der løbende en tilvækst i skoven, som øger skovkulstoflageret. I tråd med FN's opgørelsesmetode er det den resulterende nettoændring af skovens kulstoflager, der indgår i drivhusgasopgørelsen. Det er ligeledes denne nettoændring, som beregnes i BioRes.

BioRes beregner skovens optag på baggrund af skovarealet, de anvendte skovtyper og træernes alder. Optag og høst er for de forskellige skovtyper modelleret på baggrund af notatet *Kulstofbinding ved skovrejsning* af V. K. Johannsen m.fl., fra 2020.²⁰ Optag og høst af basisskoven frem til 2050 er modelleret i 5-års intervaller på baggrund af data fra Thomas Nord-Larsen og Niclas Scott Bendtsen fra København Universitet.²¹

Hugst i skoven kan gå til gavntræ, energitræ eller til rester, som typisk forbliver i skoven i form af dødt ved. Gavntræ går til savværket, der producerer savskåret træ, træplader og trærester. Trærester anvendes typisk til energiformål og dette antages at være tilfældet i BioRes.

De producerede træprodukter udgør et midlertidigt kulstoflager. Tilførslen til lageret af træprodukter afhænger af høsten i det pågældende år, som igen er bestemt af produktionsskovenes areal, skovtyperne og træernes alder. Fraførslen fra lageret af træprodukter er bestemt af en halveringstid, der er 35 år for savskåret træ og 25 år for træplader.²² For det træ, der går til træprodukter, antager BioRes en fordeling på 75 pct. til savskåret træ og 25 pct. til træplader.²³ BioRes beregner i alle år frem til 2050 en årlig tilførsel af kulstof til lageret af høstede træprodukter og en årlig fraførsel. Nettofraførsel af kulstof fra lageret repræsenterer en udledning af CO₂.

BioRes skelner mellem urørt skov og produktionsskov:

- **Urørt skov.** Modellen indeholder to typer af urørt skov: gammel og ny urørt skov. Gammel urørt skov er en eksisterende gennemsnitlig dansk skov, som lægges urørt. Ny urørt skov er landbrugsareal, som udtages og tillades at springe i skov. Begge typer urørt skov har et CO₂-optag frem til 2050, som er bestemt af den tid, der er gået, siden de blev lagt urørt.
- **Produktionsskov.** Produktionsskov antages at blive drevet forretningsmæssigt, hvilket vil sige, at træer høstes og tyndes på skovbrugsmæssigt hensigtsmæssige tidspunkter. BioRes indeholder fire typer af ny produktionsskov med forskellige sammensætninger af hurtigt- og langsomtvoksende løv- og nåletræer. Den nuværende gennemsnitlige skov i Danmark, kaldet basisskoven, forynges løbende med de valgte skovtyper.

Optag og udledning fra skov kan ændres i scenarierne ved at ændre skovarealet, fordelingen mellem skovtyperne og fordelingen mellem gavntræ og træ til energi. Dette er nærmere beskrevet nedenfor under omstillingselementer og i kapitel 9 om skov.

CRF-kategori 4B: Dyrket mark

Udledningen fra landbrugsarealer afhænger af dyrkningsformen og af jordens kulstofindhold. Forholdet mellem den årlige kulstoftilførsel og den årlige nedbrydning bestemmer, om jorderne har en nettoudledning eller et optag af CO₂. Et mindsket kulstoflager i jorden repræsenterer en CO₂-udledning. BioRes har tre jordtyper: mineraljord (JB-1-10), kulstofrig jord med 6 - 12 pct. kulstof (OC6) og tørvejorder med > 12% kulstof (OC12).

Mineral jorder.

Mineraljorder i BioRes er et gennemsnit af jordtyper med et organisk kulstofindhold på under 6 pct. De danske jorde er opdelt i 11 jordbundstyper (JB-nr.) fra nr. 1 til 11. De mineralske jorder i BioRes omfatter JB1-10. Det vil sige, at mineraljorder i BioRes dækker alle jordtyper, der ikke er kulstofrige jorder.

Det antages i BioRes, at marker med etårige afgrøder på mineraljord, der forbliver dyrkede marker med étårige afgrøder, ikke er forbundet med nogen udledninger af kulstof, og at kulstoflageret over og under jorden forbliver konstant.²⁴ Kulstofbalancen for mineraljord anses altså for at være i ligevægt. Ligevægten er betinget af, at der tilføres nogenlunde samme mængde kulstof i form af husdyrgødning, afgasset biomasse og nedmuldet halm til jorden hvert år.

Hvis tilførslen af kulstof ophører eller reduceres, vil kulstofmængden i jorden mindskes, hvorved der sker en udledning af kulstof fra jorden til atmosfæren i form af CO₂. Tilførslen af kulstof ændres, hvis der dyrkes efterafgrøder, som nedpløjes. Den ændres også, hvis halm eller afgasset biomasse, som ellers nedpløjes, fjernes. Kulstoflagringen ved tilførsel af husdyrgødning og afgasset husdyrgødning antages at være på samme niveau, selv om kulstoffet i den afgassede biomasse er sværere nedbrydeligt.²⁵

Ændringer i kulstoflageret i jorden som følge af ændringer i tilførsel af planterester kan ifølge Klimavirkemiddelkataloget indregnes som 12 procent af den tilførte kulstofmængde i 20 år. Derefter er der indtrådt en ny ligevægt, som betyder, at der ikke er nettoudledning fra arealerne på grund af ændringerne i jordens kulstofpulje. Effekten af øget tilførsel af plantemateriale er i BioRes indregnet som et gennemsnitlig øget årligt CO₂-optag i en periode på 30 år efter tiltaget er gennemført. Det øgede årlige optag antages at være 2/3 af værdierne i Klimavirkemiddelkataloget, da perioden ændres fra 20 til 30 år.

Hvis der skiftes fra etårige afgrøder til flerårige energiafgrøder fx græs eller pil, indregnes et stigende kulstoflager i jorden baseret på den øgede tilførsel af plantemateriale i jorden baseret på ovenstående princip.²⁶

Kulstofrige jorder.

Dyrkning og dræning af kulstofrig landbrugsjord er en stor kilde til udledninger, idet iltning betyder, at kulstoffet i humuslaget nedbrydes til CO₂. Udledningerne reduceres, hvis arealet vådlægges. I december 2023 fremkom ny viden, som viste at udbredelsen af de kulstofrige lavbundsjord dækkede et areal på 117.800 hektar af landbrugsarealet i 2018, hvor den tidligere kortlægning viste et areal på 171.600 hektar i 2018.²⁷ Det fremgår af den nye rapport, at forskellen mellem de to kort primært kan forklares ved, at jordernes kulstof mineraliserer over tid. Den nye viden er anvendt i BioRes, således at modellens areal af kulstofrige jorder i 2020 svarer til den nye kortlægning.²⁸

I januar 2024 udgav DCE ved Aarhus Universitet et *Notat om emissionsestimater for organiske jorder historisk (1990-2022) og i fremskrivningen (2023-2040)*.²⁹ Af notatet fremgår at udledningsfaktorerne for kulstofrige jorder forventes revideret ultimo 2024. Da der således endnu ikke foreligger nye reviderede udledningsfaktorer, anvender BioRes fortsat de officielle udledningsfaktorer for kulstofrige jorder, som også anvendes i Danmarks drivhusgasopgørelse for 2024.³⁰

CRF-kategori 4C: Græsarealer

Udledningen af drivhusgasser fra eksisterende græsarealer på mineraljord, der fortsætter med at være græsarealer, antages i modellen at være nul, baseret på Danmarks drivhusgasopgørelse.³¹ For græsarealer på kulstofholdige jorder indregnes en udledning af CO₂ baseret på en udledningsfaktor, som beskrevet under afsnittet ovenfor om *Dyrket mark*. Ved vådlægning af kulstofrige græsarealer tildeles arealet en udledning af metan.

Når landbrugsarealer i omdrift udtages til græsarealer, fx ved afsætning af arealer til natur, sker der en opbygning af kulstof i jorden. Kulstofopbygningen antages at være den samme som ved udtagning af landbrugsjord til permanent brak.³²

CRF-kategori 4D: Vådområder

Udledningen fra eksisterende vådområder, herunder fra permanent vanddækkede arealer, som i BioRes kaldes *Søer*, er sat til nul. Udledninger fra tørvegravning er ikke medtaget i BioRes. Ved omlægning af drænet, kulstofrig lavbundsjord fra landbrugsdrift til vådområde tildeles arealet en udledning af metan. Dette er nærmere beskrevet under beskrivelsen af omstillingsselementet *vådlægning af kulstofrige jorder* nedenfor.

CO₂-optag fra lagring af biokul

I 2020 var CO₂-optaget fra lagring af biokul nul, da der ikke fandt en lagring af biokul sted i Danmark dette år. I BioRes kan der laves biokul ved at pyrolysere halm, fiberfraktionen fra separeret afgasset biomasse, spildevandsslam, flis fra have-parkaffald, pil, græs, bioaffald og efterafgrøder.

Klimaeffekten ved biokul afhænger af den anvendte biomasse og kulstofindholdet heri samt af tidsperspektivet. Der antages en lille årlig nedbrydelsesrate for kulstoffet i biokullet. Derudover vil der være tilfælde, hvor den pyrolyserede biomasse ville have haft en alternativ anvendelse. Det gælder fx for afgasset biomasse og for en del af halmen, som alternativt ville være nedmuldet i marken. Ophør af denne tidligere praksis betyder, at der bliver tilført mindre kulstof til jorden end tidligere. Kulstoflageret i jorden vil dermed falde og gå mod en ny ligevægt. Denne effekt medregnes i BioRes. Beregning af klimaeffekten af pyrolyse er nærmere forklaret i kapitel 8.

2.2 Beregning af energipotentialet fra danske bioressourcer

BioRes beregner et dansk bioenergi-potentiale. Bioenergi-potentialet er energiindholdet i den mængde af biogene produkter, som produceres i det givne scenarie, og som kan bruges til energiformål. De biogene produkter er fx energitræ, energiafgrøder, halm, bioaffald, biogas og pyrolysegas eller -olie.

Nogle typer af biomasse anvendes direkte til afbrænding, andre kan anvendes til produktion af biogas eller til pyrolyse i modellen. Det bioenergi-potentiale, som beregnes i BioRes, er energiindholdet i den biomasse, der er til rådighed til afbrænding, samt energiindholdet i den producerede pyrolysegas og -olie samt biogas.

Nogle typer af afgrøder anvendes ikke direkte til energiformål i scenarierne. Det gælder fx korn og majs, der anvendes til produktion af fødevarer. Disse afgrøder blev anvendt til biogas i 2020, da de kan anvendes til dette formål op til en grænse på 4 pct. af inputmængden.³³ I scenarierne for 2050 anvendes imidlertid kun non-food-afgrøder, fx græs og energipil direkte til energiformål. Det er således fravalgt at anvende fødevarer direkte som brændsler. Dette valg er inspireret af de begrænsninger, der er sat for brug af fødevarer- og foderafgrøder til biobrændstoffer i EU ud fra miljøhensyn.³⁴ Græs og pil kan desuden have miljøfordele, som kan tale for at anvende dem som energiafgrøder fremfor korn og majs.³⁵

Biologiske ressourcer kan også anvendes til materialer

Biologiske ressourcer kan anvendes til materialer i modellen. Hvis man gør dét, fratrækkes ressourcerne fra bioenergi-potentialet. Det må forventes, at biologiske ressourcer i stigende omfang vil blive brugt til materialer som før blev produceret af fossile brændsler fx plastic, tøj og byggematerialer. Så længe materialerne er i brug eller i cirkulation i samfundet, vil kulstoffet være lagret og således ikke befinde sig i atmosfæren.

Materialer vil typisk være i brug i et stykke tid, hvorefter de bliver til affald, som kan indgå i energipotentialet. Bortset fra gavntre og høstede træprodukter er materialecirkulationen dog ikke en del af modellen. Det kan overvejes i en senere version at muliggøre at en andel af bioressourcen kan anvendes til plastic eller andre produkter og efter endt anvendelse og evt. genanvendelse til sidst kan anvendes til energi.

En række biologiske ressourcer medregnes i bioenergi-potentialet.

BioRes medregner følgende ressourcer i opgørelsen af bioenergi-potentialet:

- Afgrøder, som ikke er fødevarer eller foder, herunder efter- og mellemafgrøder.
- Halm: Halm af korn, raps, frøgræs og bælgssæd.
- Bionedbrydeligt affald: Bioaffald, brun saft, have/parkaffald, industriaffald og spildevandsslam.
- Græs og græs fibre: Græs fra dyrkning af græs på landbrugsarealer, græs fra naturarealer samt græs fibre fra græsproteinproduktion.
- Havbiomasse: Tang og muslinger.
- Husdyrgødning. Dybstrøelse, fjerkrægødning, kvæggylle og svinergyll.
- Vedmasse: Træ til energi fra skovbrug, resttræ fra savværker samt pil dyrket på landbrugsareal.
- Biogas: Den producerede biogas fra biomasse, der allokeres til biogasproduktion.
- Pyrolyseprodukter: Pyrolysegas eller -olie fra pyrolyse af biomasse, der allokeres til pyrolyse.
- Rapsolie, der ikke anvendes til fødevarer.

Nogle typer af biomasse kan bruges til flere former for bioenergi

Nogle typer af biomasse kan bruges til biogas, andre kan bruges til direkte afbrænding eller til pyrolyse. Nogle typer af biomasse kan bruges til flere forskellige formål. I modellen er biomasserne opdelt i fire kategorier:

- **Biomasse til biogas.** De typer af biomasse, der i modellen kun kan bruges til biogasproduktion er: gylle fra husdyr, brunsaft og industriaffald. Biogas fra disse typer regnes med i bioenergiepotentialiet, hvis biomasserne i scenariet er allokeret til biogasproduktion.
- **Biomasse til pyrolyse.** Nogle typer af biomasse kan kun anvendes til energiformål via pyrolyse. Det er tilfældet for afgasset biomasse fra biogasanlæg, der ikke kan anvendes til andre energiformål. For afgasset biomasse medregnes den producerede mængde af pyrolysegas og -olie i bioenergiepotentialiet.
- **Biomasse til direkte afbrænding.** Biomassetyper, der kan afbrændes direkte, fx vedmasse, og som ikke er allokeret til pyrolyse i scenariet medregnes i bioenergiepotentialiet med deres brændværdi.
- **Biomasse, der kan anvendes til flere formål.** Nogle typer biomasse kan bruges til flere af ovenstående formål. Halm kan fx både afbrændes direkte i fx et kraftvarmeværk, anvendes til biogasproduktion eller anvendes til pyrolyse. Bioaffald, have/parkaffald, græs fibre og tang kan både anvendes til biogasproduktion og til pyrolyse. For disse typer biomasse vil det være brændværdien, der medregnes i energipotentialet, medmindre ressourcen i scenariet er allokeret til biogas eller til pyrolyse.

Hvis det i et scenarie er valgt at bruge en ressource til biogas eller pyrolyse, vil den producerede biogas eller pyrolyseprodukter blive medregnet i bioenergiepotentialiet. Energiepotentialiet fra biogas eller pyrolyse er således energiindholdet i PJ i den producerede biogas, pyrolysegas og pyrolyseolie. For biogas og pyrolyse opgøres bioenergiepotentialiet dermed eksklusivt konverteringstab. Pyrolysegas og -olie kaldes under ét for pyrolyseprodukter.

Modellen sørger for, at dobbelttælling undgås. Hvis en biomasse er anvendt til materialer, vil den samme biomasse ikke også blive medregnet i bioenergiepotentialiet. Halm, der er anvendt til foder, vil fx ikke blive medregnet i bioenergiepotentialiet.

Bioenergiepotentialiet afhænger af mange forhold

Bioenergiepotentialiets størrelse afhænger af mange forskellige forhold, herunder arealanvendelsen, valget af afgrøder og antallet af husdyr. De forhold, der bestemmer potentialiet fra de vigtigste typer af biomasse, er:

- **Afgrøder.** Det er afgørende, hvor stort et areal, der bruges til at producere de planter, som efterfølgende direkte eller indirekte bruges til energi. Det har betydning, hvilken type afgrøde, der dyrkes på arealet og dermed hvilket udbytte, der antages. Bioenergiepotentialiet fra afgrøder afhænger også af, om der dyrkes efterafgrøder og om disse høstes. Der dyrkes i dag primært efterafgrøder til nedpløjning for at undgå udvaskning af kvælstof. Der er i BioRes mulighed for at dyrke N-fikserende efterafgrøder til høst. For landbrugsafgrøder anvendes udbyttet fra Danmarks Statistik for 2020, og der antages som nævnt et generelt stigende udbytte frem til 2050. Udbyttet af N-fikserende efterafgrøder er antaget til 2,5 ton tørstof pr. hektar.³⁶
- **Halm.** Energiepotentialiet fra halm afhænger af, hvor stort et areal, der dyrkes med afgrøder, der har restproduktet halm. Det er korn, raps, frøgræs og bælgssæd. Potentialiet afhænger desuden af, hvor meget halm, der opsamles, hvilket kan ændres i scenarierne.
- **Bionedbrydeligt affald.** Energiepotentialiet fra bionedbrydeligt husholdningsaffald afhænger af, hvor stort madspildet er, og hvor meget husholdningsaffald, der udsorteres. Der kommer også husholdningslignende bioaffald fra virksomheder, og mængden herfra afhænger også, hvor meget der udsorteres. Madspild og udsorteringsgrad af bioaffald fra husholdninger og virksomheder kan varieres i scenarierne. Mængden af bionedbrydeligt affald fra industri afhænger af, hvad der produceres. Hvis der fx produceres protein af græs produceres også græs fibre og brunsaft. Græs fibre kan anvendes til foder, til biogas eller til pyrolyse. Brunsaft kan kun anvendes til biogas. Nogle typer bioaffald medregnes ikke 100 pct. i bioenergiepotentialiet. For have/parkaffald komposteres ca. 2/3 dele i dag, mens 1/3 energiudnyttes.³⁷ Det antages i BioRes, at 2/3 af have/parkaffaldet kan energiudnyttes i fremtiden, mens én tredjedel fortsat komposteres.

- **Græs og græs fibre.** Energipotentialt fra græs afhænger af hvor store arealer, der er til dyrkning og høst af græs, samt af hvor meget græs, der anvendes til foder. Der kan dyrkes tre slags græs på landbrugsarealer: højtydende græs, græs i omdrift og permanent græs. Disse tre typer har forskellige kvælstofnormer og forskellige udbytter. Der kan desuden høstes græs på naturarealer. Det antages forsimplet, at afgrøden i alle tilfælde er "græs", som kan anvendes til enten foder, biogas, pyrolyse eller græsproteinproduktion. I praksis vil græs fra naturarealer dog sandsynligvis ikke være velegnet til græsproteinproduktion. Græsproteinproduktion giver biproduktet græs fibre, der kan anvendes til foder, biogas eller pyrolyse.
- **Husdyrgødning.** Mængden af husdyrgødning afhænger af antallet af husdyr, og af hvor mange dyr, der går ude, da gødning fra dyr på græs ikke er tilgængelig for biogasproduktion.
- **Vedmasse.** Mængden af vedmasse til energiformål afhænger af skovarealet, foryngelsesraten, skovtypen og af tidsforløbet for indfasning af eventuel skovrejsning. Det har desuden betydning, hvor stor en andel af resttræ, der kommer fra savværkerne. Der er i BioRes indbygget en antagelse om, hvor stor en andel af hugsten for de forskellige skovtyper og aldersklasser, der går til hhv. energi og tømmerproduktion. Der er også antaget en andel af resttræ fra savværkerne. Begge dele kan dog til en vis grad ændres i scenarierne. Træ, der går til træprodukter, vil efter en periode blive til træaffald, som kan anvendes til energiformål. Det antages at 75 pct. af dette træaffald kan indsamles og anvendes til energiformål.

Biogas, pyrolyse, skov og biomasse fra havet er nærmere beskrevet i kapitel 7, 8, 9 og 10.

3 Omstillingselementer

Analysen inddrager en række omstillingselementer i landbrug, skovbrug og arealanvendelse. Omstillingselementerne kan bidrage til øget produktion af biologiske ressourcer eller til reduceret udledning af drivhusgasser. De omstillingselementer, som indgår i analysen, fremgår af tabel 3.1 nedenfor.

Ikke alle omstillingselementer i tabel 3.1 indgår på nuværende tidspunkt i Danmarks drivhusgasopgørelse. Det gælder fx brug af fodertilsætningsstoffet bovaer, brug af nitrifikationshæmmere i landbruget og pyrolyse. Klimaeffekten af disse omstillingselementer forventes i fremtiden at blive indregnet i drivhusgasopgørelsen, men det vides endnu ikke præcis hvordan. De indregningsmetoder, der vil blive anvendt, kan derfor adskille sig fra de metoder, der anvendes her. Generelt er opgørelsen af landbrugets udledninger præget af stor usikkerhed, og det samme gælder klimaeffekten af mange omstillingselementer.

Analysen har ikke alle omstillingselementer med

Analysen har ikke til formål at dække alle potentielle klimatiltag. Formålet med BioRes er at vurdere, hvor langt man samlet set kan komme med tekniske og strukturelle omstillingstiltag i landbrug, skovbrug og arealsektoren. Visse omstillingselementer indgår derfor ikke i analysen.

Tiltagene *biogas* og *hurtig udslusning af gylle til biogas* er fx medtaget, mens andre tiltag til at reducere udledningen af gødnings håndtering ikke er. Det skyldes, at landbrugeren sandsynligvis ikke vælger både *hurtig udslusning til biogas* og *fx gylleforsuring*. *Hurtig udslusning af gylle til biogas* skal derfor ses som en repræsentant for tiltag til at reducere udledningen fra gødnings håndtering. Den opnåede reduktion ville altså potentielt kunne opnås på andre måder fx via gyllekøling eller forsuring.

Nogle omstillingselementer er fravalgt, fordi de har en lille effekt eller et utilstrækkeligt datagrundlag. Det gælder for tiltagene *genetisk selektion af malkekvæg* og *reduceret jordbearbejdning*.

Nye innovative produktionsformer som fx vertikalt landbrug og dyrkning af mikroalger i bioreaktorer indgår heller ikke i modellen, da datagrundlaget og potentialt i øjeblikket vurderes at være for usikkert. Perspektivet i sådanne teknologier er at øge den fotosyntetiske aktivitet på et mindre areal, end der normalt kræves til dyrkning af afgrøder. Mikroalger kan potentielt vokse hurtigere end almindelige afgrøder og bruges til foder, fødevarer, kosmetik, farmaci og biobrændsel. Disse nye produktionsformer indgår imidlertid ikke i BioRes.

Tabel 3.1 Omstillingselementer i BioRes

Omstillingselement	Produktion af biomasse eller bioenergi	Produktion af fødevarer	CO ₂ e reduktion	Negativ udledning
Arealomlægning				
Vådlægning af kulstofrige jorder		-	+	
Udtag af landbrugsareal til natur		-	+	+
Landbrug				
Omlægning fra korn til græs	+	-/+	+	+
Efter og -mellemafgrøder	+		+	+
Pil på landbrugsjord	+	-	+	+
Øget opsamling af halm	+			-/+
Høst på naturarealer	+			
Nitrifikationshæmmere			+	
Færre husdyr		-/+	+	
Fodring med fedt til kvæg			+	
Fodertilsætning til kvæg			+	
Bioraffinering af græs				
Produktion af græsprotein	+	+		
Biogas				
Biogas af husdyrgødning	+		+	
Hurtig udslusning af gylle	+		+	
Biogas af andre typer af biomasse	+			
Pyrolyse og biokul				
Pyrolyse og biokul	+		+	+
Skovbrug				
Skovrejsning på landbrugsjord	+	-	+	+
Brug af hurtigvoksende træarter	+		+	+
Eksisterende skov lægges urørt	-		+	+
Havbrug				
Produktion af muslinger		+		
Produktion af tang	+	+		
Fødevarerforbrug og bioaffald				
Præcisionsfermenteret mælk (kunstigt mælk)		+		
Kultiveret kød (kunstigt kød)		+		
Højere andel af plantebaserede fødevarer	+	+	+	
Mindre madspild	-	+		
Øget udsortering af bioaffald	+			

Anm.: Tabellen viser, om de enkelte omstillingselementerne bidrager til henholdsvis produktion af biomasse, produktion af fødevarer, reduktion af drivhusgasudledning og/eller negative udledninger. "+" betyder, at omstillingselementet har en positiv effekt, "-" at det har en negativ effekt +/- at der kan være både positive og negative effekter. Et blankt felt, at omstillingselementet enten ikke har en effekt, eller at effekten ikke er medregnet.

Kilder: Klimarådet

Visse potentielle tiltag er fravalgt, fordi de vil medføre en reduktion i biomasseproduktionen, som der samtidig er behov for at øge for at nå klimamålene. *Braklægning i sædskiftet, reducerede kvælstofnormer eller reduceret hugst i produktionsskov* indgår derfor ikke i analysen. Til gengæld kan landbrugsjord udtages til natur i scenarierne, hvorved udledning af lattergas mindskes og kulstofpuljen i jorden øges. Desuden kan produktionsskov lægges urørt, hvorved hugsten ophører og kulstoflageret i skoven øges i en periode.

Analysen fokuserer primært på klima, men forholder sig til de begrænsninger, som andre politiske målsætninger kan lægge på arealanvendelsen, herunder øget brug af areal til byggeri og infrastruktur og natur. Analysen har ikke et særskilt fokus på at forbedre vandmiljøet, men nogle af omstillingselementerne vil kunne reducere udledningen af næringsstoffer. Det gælder fx udtag af omlægning fra étårige afgrøder til græs og pil, udtag af landbrugsarealer til natur og skovrejsning. Omvendt vil omlægning til afgrøder med højere kvælstofnorm samt grundantagelsen om et stigende afgrødeudbytte og dermed også stigende kvælstofnormer dog potentielt kunne trække den anden vej. Begrænsning af udledning af næringsstoffer blev analyseret nærmere i Klimarådets rapport: *Danmarks fremtidige arealanvendelse* fra april 2024.³⁸

3.1 Beskrivelse af omstillingselementerne

Omstillingselementerne påvirker både bioenergipotentialt og drivhusgasudledningen. De omstillingselementer, som er medtaget i BioRes, beskrives nærmere nedenfor. Beskrivelsen inkluderer effekten på bioenergipotentialt og effekten på udledningen af drivhusgasser. For nogle omstillingselementer beskrives, hvordan effekterne er medregnet i BioRes, og hvad datagrundlaget er. For andre henvises til en mere detaljeret beskrivelse i et efterfølgende kapitel.

Vådlægning af kulstofrige jorder

Når kulstofrige jorder vådlægges, reduceres den CO₂-udledning, som skyldes dræning af jorden. Samtidig øges metanudledningen. Vådlagte jorder antages at blive til vådområder, der ikke gødskes, hvorved lattergasudledningen mindskes.

Vådlægning af landbrugsjord mindsker dyrkningsarealet og dermed, alt andet lige, fødevarerproduktionen. Det er i modellen muligt at høste biomasse fra vådlagte arealer, hvilket øger bioenergipotentialt. Høst af biomasse fra vådlagte arealer antages i BioRes forsimplet at være græs. I praksis vil biomasse på vådlagte arealer kunne være tagrør eller dunhammer, og høsten vil skulle ske med særlige maskiner. Der antages et lavt udbytte, og høsten antages ikke at have konsekvenser for udledningen fra jorderne.

Klimaeffekten fra vådlægning af kulstofrige jorder skyldes altså:

- Reduceret CO₂-udledning fra omsætning af organisk materiale.
- Reduceret lattergasudledning, fordi arealerne ikke gødskes.
- Merudledning af metan som følge af omsætningen af organisk materiale i et iltfattigt miljø.

Udledningsfaktorerne for de drænede kulstofrige jorder afhænger af arealanvendelsen og indholdet af organisk kulstof. Faktorerne fremgår af tabel 3.2.

Klimaeffekten af at vådlægge kulstofrig jord er lig med forskellen mellem udledningen fra arealets før og efter vådlægning. Vådområder, der etableres efter 2020, tillægges en øget udledning af metan. På baggrund af Danmarks drivhusgasopgørelse anvendes to forskellige udledningsfaktorer afhængigt af kulstofindholdet i jorderne. For jorder med et kulstofindhold på mellem 6-12 pct. (OC6) er udledningsfaktoren 235 kg metan, svarende til 6,6 ton CO₂e, pr. hektar om året. For jorder med over 12 pct. (OC12) kulstofindhold er udledningsfaktoren 288 kg metan, svarende til 8,1 ton CO₂e, pr. hektar om året.³⁹

Tabel 3.2 Udledningsfaktorer for drænedede kulstofrige jorder i ton CO₂e pr. hektar.

CRF	Drivhusgas	Omdriftsarealer		Græsarealer	
		>12 pct. organisk kulstof	6-12 pct. organisk kulstof	>12 pct. organisk kulstof	6-12 pct. organisk kulstof
4B, 4C	Direkte CO ₂	42,2	21,1	30,8	15,4
4B, 4C	DOC-CO ₂	1,1	0,6	1,1	0,6
4B, 4C	Metan	0	0	0,4	0,2

Anm.: For dyrkede landbrugsjorder anvendes værdierne for "omdrift" mens værdierne for "græs" anvendes for græsarealer.

Kilde: Klima- Energi- og Forsyningsministeriet⁴⁰ og Danmarks drivhusgasopgørelse.⁴¹

Udtag af landbrugsareal

Landbrugsareal kan i BioRes omlægges til skov eller til græsareal. Udtag til skov beskrives nærmere under Skovrejsning.

Omlægning af landbrugsareal til græsareal betyder, at arealet ikke længere dyrkes. Græsarealer medregnes derfor som potentielt naturareal i denne analyse. Græsarealer er arealer, der forbliver græsdækkede, det vil sige, at de ikke springer i skov. I Danmark vil arealer, som ikke græsses, høstes eller dyrkes, dog ofte gro til med buske og træer. Det antages derfor implicit, at græsarealer forbliver græsarealer af en årsag, som kan være, at de græsses, eller at naturarealet lejlighedsvis høstes, det vil sige, at der tages slæt på det.

Klimaeffekten af udtagning af landbrugsjord til græsarealer består dels i ophør af gødskning, hvilket reducerer lattergasudledningen, og dels i øget opbygning af kulstof i jorden. Den øgede opbygning af kulstof i jorden baseres i BioRes på Klimavirkemiddelkatalogets tal for udtagning af omdriftsareal til permanent brak. Det antages, at den øgede kulstofopbygning i jorden sker med en gennemsnitlig kulstofmængde over en periode på 30 år, hvorefter en ny ligevægt antages at have indfundet sig.

Omlægning af landbrugsareal til græsareal betyder samtidig, at den produktion, der var på arealet, ophører. Det medfører alt andet lige en mindre produktion af foder eller fødevarer, som potentielt vil mindske eksporten eller øge importen fra Danmark. Det er i modellen muligt at høste biomasse fra en andel af græsarealet, hvilket øger bioenergi-potentialet. Udbyttet er dog sat relativt lavt, på 2 ton tørstof pr. hektar, da arealerne ikke gødskes.

Omlægning af afgrøder fra korn/majs til græs på omdrifts jord

Når der dyrkes etårige afgrøder fjernes det meste af den overjordiske biomasse ved høsten. En stor del af den underjordiske biomasse bliver desuden nedbrudt, når afgrøderne er høstet, og jorden pløjes. Det antages derfor i BioRes, at arealer, hvorpå der dyrkes etårige afgrøder, har et konstant indhold af kulstof i jorden, og der derfor ikke er årlige nettoudledninger fra disse arealer.⁴²

Omlægning af landbrugsjord fra etårige afgrøder som korn og majs til flerårigt græs betyder, at jorden ikke pløjes op hvert år, og at planternes rodsystem derfor vokser videre. Jordens kulstofindhold vil derfor stige. Klimaeffekten er det øgede CO₂-optag, som dette stigende kulstofindhold i jorden repræsenterer.

Olesen m.fl. har estimeret, at græsmarker øger jordens kulstofindhold med 0,6 ton C/ha/år uanset jordtype og græsmarkens alder.⁴³ Omlægning fra etårige afgrøder til græs og kløvergræs antages på den baggrund at bidrage med 0,6 ton C/ha/år. Da det imidlertid vurderes at være usikkert, om effekten kan fortsætte på længere sigt, medregnes kun 2/3 af denne i BioRes.

For højtydende græs antages markerne at blive pløjet op hvert 4. år. Dette antages at reducere den gennemsnitlige kulstoflagring med en fjerdedel. Datagrundlaget herfor er usikkert.

Udover et ændret kulstofindhold i jorden vil omlægning fra én afgrøde til den anden typisk medføre, at kvælstofnormen for arealet ændrer sig. Det kan betyde en øget eller reduceret lattergasudledning. Højtydende græs har i BioRes en relativt høj kvælstofnorm og skift til denne afgrøde vil derfor typisk give anledning til en øget lattergasudledning.

Efterafgrøder og mellemafgrøder

Øget brug af efterafgrøder kan øge tilførslen af kulstof til jorden, når afgrøden pløjes ned. Dette medregnes i BioRes som et årligt CO₂-optag i jorden i 30 år efter brugen af efterafgrøder er indført. Det årlige ekstraoptag er et gennemsnitligt optag over perioden, baseret på tal fra Klimavirkemiddelkataloget. Efterafgrøder antages at give en kulstoflagring på 0,7 t CO₂e/ha/år og mellemafgrøder antages at give en lagring svarende til det halve af efterafgrøder.

Hvis efterafgrøden høstes, øges bioenergi-potentialet, samtidig med at den ekstra tilførsel af kulstof til jorden reduceres. BioRes medregner derfor et øget bioenergi-potentiale, og et halveret kulstofindhold i jorden, når efterafgrøden høstes.

Der skelnes mellem *N-fikserende* efterafgrøder og *Ikke-N-fikserende* efterafgrøder. N-fikserende afgrøder kan optage mere kvælstof og har et højere udbytte, til gengæld øges lattergasudledningen, hvis planteresterne pløjes ned. Kun N-fikserende afgrøder vil i almindelighed have så højt et udbytte, at det giver mening at høste dem. Udbyttet antages at være 2,5 ton tørstof pr. hektar.

I 2020 blev der dyrket *Ikke-N-fikserende* efterafgrøder på godt 500.000 hektar, som blev pløjet ned.⁴⁴ På dette areal medregner BioRes ikke en effekt på CO₂-optaget i jorden i 2050 som følge af efterafgrøder, da der på det tidspunkt er gået 30 år, og en ny ligevægt i jorden derfor antages at have indstillet sig.

Dyrkning af pil på landbrugsjord

Omlægning fra dyrkning af etårige afgrøder til pil øger produktionen af vedmasse, der indgår i bioenergi-potentialet. Samtidig betyder afgrødeskiftet, at jorden ikke pløjes op hvert år, og at planternes rodsystem vokser videre. Jordens kulstofindhold vil derfor stige. Dette udgør et CO₂-optag eller en negativ udledning. BioRes medregner denne effekt ud fra tal fra Klimavirkemiddelkataloget.⁴⁵

Omlægning af landbrugsareal med etårige afgrøder til pil betyder samtidig, at den produktion, der var på arealet, ophører. Det medfører alt andet lige en mindre produktion af foder eller fødevarer, som potentielt vil mindske eksporten eller øge importen fra Danmark.

Medregningen af lagringseffekter i BioRes ved skrift fra etårige afgrøder til pil og græs fremgår af tabel 3.3.

Tabel 3.3 Lagringseffekter af skift fra etårige afgrøder til pil og græs

Afgrøder, der skiftes til	Ton CO ₂ e pr. hektar pr. år i 30 år
Græsarealer udenfor landbrug	-0,40
Permanent græs på landbrugsjord	-1,47
Højtydende græs på landbrugsjord	-1,10
Pil på landbrugsjord	-0,44
Permanent brak på landbrugsjord	-0,40

Anm.: Lagringseffekten set over 30 år antages, at være 2/3 af lagringseffekten set over 20 år.

Kilde: Klimarådet på basis af Klimavirkemiddelkataloget og Olesen et al.⁴⁶

Øget halmudbytte

Halm er et vigtigt restprodukt fra landbruget, som indgår i bioenergi-potentialet. Halm kan afbrændes til el og varme, det kan bruges til biogasproduktion eller pyrolyseres til pyrolyseprodukter og biokul. Halm kan også ad forskellige konverteringsveje være råstof til biobrændstofproduktion eller til CO₂-lagring via CO₂ fangst og -lagring. Samtidig er landbrugsjordens indhold af kulstof afhængig af, hvor meget organisk materiale fra afgrøderne, der tilbageføres til jorden. En konstant tilførsel af organisk materiale er nødvendig for at opretholde mineraljordernes kulstofpulje. Brug af halm til fx energiformål påvirker altså klimaregnskabet på flere måder.

Produktionen af halm svinger afhængigt af kornareal og vejrforhold, men i de sidste mange år er der årligt produceret mellem 4,5 og 6,5 mio. ton halm i Danmark. Den gennemsnitlige produktion og anvendelse af halmen fremgår af tabel 3.4.

Tabel 3.4 Gennemsnitlig produktion og anvendelse af halm i Danmark i perioden 2006-2022

Anvendelse	Mio. ton
Fyring	1,6
Foder	0,9
Strøelse m.v.	0,8
Nedmuldning	2,4
I alt	5,7

Kilde: Danmarks Statistik⁴⁷

Produktionen af halm kan øges både via den generelle udbyttetigning og ved at anvende sorter med mere halm.⁴⁸ I scenarierne antages halmudbyttet at følge den generelle udbyttetigning på 19,5 pct. frem til 2050. Halms bidrag til bioenergipotentialt stiger dermed tilsvarende.

Øget opsamling af halm

Opsamlingen af halm kan øges ved at opsamle den mængde halm, der i dag ikke bjerges. Opsamlingen kan potentielt også øges ved at modificere mejetærskeren, så mere halm kan høstes fra marken.

En øget fraførsel af halm fra jorden fremfor nedpløjning eller anden tilbageførsel vil reducere jordens kulstoflager. Dette bogføres som en udledning i Danmarks drivhusgasopgørelse på baggrund af beregninger med modellen C-TOOL.⁴⁹ Det har ikke været muligt inden for dette projekts rammer at anvende modeller som C-TOOL. BioRes har derfor en forenklet modellering af kulstofeffekterne ved brug af halm til bioenergi. BioRes indregner kulstofeffekterne således:

Halm, der kan opsamles uden konsekvenser for markjordens kulstofindhold:

- Fraførsel af 1,55 mio. ton halm til fyring (26 pct. af den nuværende halmmængde), som har været praksis i mange år, antages at kunne fortsætte på dette niveau uden effekt på jordens kulstofpulje. Det antages altså, at denne halmmængde kan bruges til afbrænding eller til pyrolyse, uden at det har konsekvenser for jordens kulstofpulje.
- Ved øget udbytte af halm antages det, at den ekstra halm fra marken, der skyldes udbyttetigningen, kan fjernes uden at det har konsekvenser for markjordens kulstoflager. Denne halmmængde kan bruges til afbrænding eller til pyrolyse.
- Det antages ikke at påvirke kulstoflageret i jorden, om halm nedmuldes direkte eller tilbageføres via husdyrgødning i rå eller afgasset tilstand.⁵⁰ Det betyder, at der kan anvendes øgede mængder halm til foder og strøelse og biogasanlæg uden effekter på kulstoflageret i jorden, når strøelse eller afgasset biomasse tilbageføres til jorden.

Halm, der kan opsamles med konsekvenser for markjordens kulstofindhold:

Halmopsamlingen kan øges i scenarierne fra de nuværende ca. 54 pct. til fx 80 pct. Dette kan medføre en mindre tilbageførsel af organisk materiale til jorden, og dermed en udledning, afhængig af hvordan halmen anvendes:

- Hvis øget opsamlet halm anvendes til biogas, hvor den afgassede biomasse tilbageføres til markerne, antages effekten på jordens indhold af kulstof at være nul.

- Hvis afgasset biomasse fra biogasanlæg ikke føres tilbage til markerne, men bruges til pyrolyse, vil den mindre tilførsel af kulstof til jorden fra afgasset biomasse blive modregnet i lagringseffekten for biokul.
- Hvis øget opsamlet halm anvendes til pyrolyse, vil den mindre tilførsel af kulstof til jorden fra halmen blive modregnet i lagringseffekten for biokul.

Modellen beregner, hvor meget halm, der efterlades på marken i scenariet set i forhold til en referencesituation, hvor der i scenariet ikke blev opsamlet øget halm. Hvis den efterladte halmmængde er på niveau med eller større end i referencen antages den ekstra opsamling ikke at have konsekvenser for kulstofindholdet i jorden. Hvis den efterladte mængde er mindre end i referencen, antages den øgede opsamling at have konsekvenser for kulstofindholdet i jorden, og denne effekt indregnes for pyrolyse. Samme effekt vil skulle indregnes for anvendelse af den øget opsamlet halm til direkte afbrænding til energiformål. Der anvendes dog ikke øget opsamlet halm til afbrænding i scenarierne.

Høst af biomasse på naturarealer

Høst af naturplejebiomasse er en vej til at skaffe mere biomasse til energiformål i modellen. Udbyttet fra høst af biomasse fra naturområder antages i BioRes at være 2 ton tørstof pr. hektar.⁵¹ Omlægning af areal til græsareal medfører en kulstoflagring i jorden, som beskrevet ovenfor. Høst af naturarealer med det antagede fremtidige udbytte, antages at kunne ske uden konsekvenser for kulstoflagringen i jorden.

Brug af nitrifikationshæmmere

Nitrifikationshæmmere er en gruppe af stoffer, der tilsættes ammoniumholdig gødning for at forsinke dannelsen af nitrat i jorden, og dermed udviklingen af lattergas fra nitrat. Nitrifikationshæmmere kan i dag anvendes til både husdyrgødning og kunstgødning til konventionel produktion. Omkring 60 pct. af kunst- og husdyrgødning er i dag ammoniumholdig gødning.⁵² Klimaeffekten af nitrifikationshæmmere er fortsat usikker og varierer afhængigt af jordtype, klima, afgrødetype og den konkrete dyrkning. Ligeledes er der usikkerhed om mulige miljømæssige sideeffekter. På baggrund af data fra Klimavirkemiddelkataloget anvendes i BioRes en reduktionsfaktor for husdyrgødning og kunstgødning på henholdsvis 1,7 og 1 kg CO₂e pr. kg N.⁵³

Reduktion af den animalske produktion

Hvis den animalske produktion reduceres, mindskes udledningerne fra dyrs fordøjelse og fra gødningshåndtering. Samtidig mindskes mængden af husdyrgødning, som er tilgængelig for biogasproduktion, og der tilbageføres mindre husdyrgødning til markerne. Det giver et reduceret kulstoflager i jorden, hvilket medregnes som en udledning i modellen. Effekten kan dog opvejes af, at arealet kan blive omlagt til formål, der giver en øget kulstofopbygning. Når antallet af husdyr reduceres, skal der bruges mindre foder, hvilket frigør arealer til andre formål og mindsker importen af foder. Modellering af dyreholdet er nærmere beskrevet i kapitel 5.

Metanreducerende foder til kvæg

Metanudledningen fra kvægs fordøjelse kan reduceres ved at ændre kvægets foder. Der kan eksempelvis tilsættes øgede mængder af fedt eller tilsætningsstoffet bovaer (3-NOP) til foderet.

Øget fedt i foderrationen til kvæg kan reducere dannelse af metan i vommen og dermed udledningen af metan fra dyrenes fordøjelse pr. kg fodertørstof. Øget fedtfodring kan som udgangspunkt bruges til alle kvægtyper. Der ses i denne analyse bort fra, at effekten kan svinge betydeligt afhængigt af bedriftens fodersammensætning.⁵⁴ Det antages altså, at tilsætningen af fedt i foderet kan øges for alt konventionelt og økologisk kvæg og give en reduktion af metanudledningen. Baseret på data fra Klimavirkemiddelkataloget og fra regeringens delstrategi for metanreducerende foder antages det i BioRes, at øget fodring med fedt reducerer udledningerne fra fordøjelsen med 4 pct. for konventionelle og økologiske køer.^{55, 56}

Bovaer (3-NOP) blev som det første og eneste metanreducerende fodertilsætningsstof markedsgodkendt i EU i 2022. Stoffet kan reducere metanudledninger fra kvægs fordøjelse. I Danmark er udbredelsen af tilsætningsstoffet endnu begrænset, da der endnu ikke er incitament til at anvende det. Bovaer kan anvendes til malkekvæg og avlskvæg, men er ikke godkendt til økologiske kvæg. Bovaer kan reducere metanudledningen med op til 30 pct. ved en dosis på 60 mg per kilo fodertørstof.⁵⁷ Denne effekt er anvendt i BioRes, hvor der dog ikke skelnes mellem kvægtyper, men kun fordelingen mellem konventionelle og økologiske køer. Reduktionspotentialet ved brug af Bovaer er i praksis stærkt påvirket af

fodersammensætningen. Dette er der ikke taget højde for i den nuværende version af modellen. Der er fortsat usikkerhed omkring effekten af Bovaer, herunder særligt de dyrevelfærdsmæssige konsekvenser.⁵⁸

Bioraffinering af græs til proteinproduktion

Bioraffinering af græs har til formål at producere proteiner til fødevarer og dyrefoder og samtidig opnå klima- og miljømæssige fordele, når græs erstatter majs, korn eller andre etårige afgrøder. Bioraffinering af græs beskrives nærmere i kapitel 6.

Biogas af husdyrgødning og hyppig udslusning af gylle

Bioafgasing af husdyrgødning reducerer metanudledning fra gødningshåndtering og -lagring. Samtidig øges biogasproduktionen og dermed bioenergi-potentialet. Hyppig udslusning af gylle fra stalden reducerer metanudledning fra gødningen i stalden. Samtidig øges biogasproduktionen. Modellering af biogasproduktion beskrives nærmere i kapitel 7.

Pyrolyse og biokul

Pyrolyse af biomasse kan producere pyrolysegas, pyrolyseolie samt biokul. Pyrolysegas og -olie kaldes under ét pyrolyseprodukter og indgår i bioenergi-potentialet. Biokul medfører langsigtet lagring af CO₂ i jorden. Pyrolyse beskrives nærmere i kapitel 8.

Skovrejsning på landbrugsjord

Skovrejsning på landbrugsjord medfører et optag af CO₂, som lagres i over- og underjordisk biomasse i skoven. Klimaeffekten består i, at træernes CO₂-optag ikke udledes igen, som det typisk sker, når ét årlige landbrugsafgrøder høstes til foder eller fødevarer. Derudover reduceres lattergasudledningen, når jorden ikke længere gødskes. Dette medregnes i BioRes ved, at der er et mindre areal, som gødskes op til den relevante kvælstofnorm.

Størrelsen af CO₂-optaget ved skovrejsning udvikler sig over tid og afhænger af hvilken skovtype, der rejses. Der kan i BioRes rejses forskellige typer af produktionsskov og urørt skov. Urørt skov vil fx opstå, hvis arealet springer i skov af sig selv. Urørt skov medregnes i naturarealet. BioRes metode til at beregne CO₂-lagringen i skoven, beskrives nærmere i kapitel 9.

Skovrejsning på landbrugsjord betyder, at den produktion, der var på arealet, ophører. Det medfører alt andet lige en mindre produktion af foder eller fødevarer, som kan mindske eksporten fra Danmark eller øge importen. Dette medregnes i BioRes' beregning af *produktion minus forbrug*, som bruges til at beregne de globale bidrag. Dette beskrives nærmere i kapitel 12.

Brug af hurtigvoksende træarter

Hvis der anvendes hurtigvoksende træarter på nye skovarealer eller ved genplantning af fældede arealer i eksisterende skov, vil skovkulstoflageret på arealet stige hurtigere. Den årlige stigning i skovkulstoflageret udgør et CO₂-optag eller en negativ udledning i det pågældende år. CO₂-lagringen i skov beskrives nærmere i kapitel 9.

Eksisterende produktionsskov lægges urørt

Hvis eksisterende skov lægges urørt ophører hugsten. Dermed ophører også den reduktion i skovens kulstoflager som følger af hugsten. På kortere sigt vil fraværet af hugst altså øge skovens netto-CO₂-optag. På lang sigt vil netto-CO₂-optaget i urørt skov dog falde for efter omkring 200 år eventuelt at ophøre.⁵⁹ CO₂-lagringen i skov beskrives nærmere i kapitel 9.

Havbrug

Produktion af muslinger og tang øger produktionen af bioressourcer uden brug af landareal. Muslinger kan anvendes til fødevarer eller foder. Tang kan anvendes til fødevarer, foder eller biogas. Tang optager CO₂, men CO₂-optag i tang medregnes ikke, da klimaeffekter i havet ikke medregnes i Danmarks territoriale drivhusgasopgørelse. Effekterne beskrives nærmere i kapitel 10.

Præcisionsfermenteret mælk og kultiveret kød

I BioRes kan forbrug af kød og mælk erstattes af kultiveret kød og præcisionsfermenteret mælk (også kaldet kunstigt kød og mælk). Det medfører et mindre træk på areal til produktion af foder til dyr. Dermed frigøres potentielt areal til skovrejsning, produktion af biomasse eller udtag af landbrugsjord til natur. Modelleringen heraf er nærmere beskrevet i kapitel 11.

Ændret fødevarerforbrug, mindre madspild og øget udsortering af bioaffald.

Hvis danskerne reducerer deres forbrug af kød og mælk vil det påvirke produktionsoverskuddet og dermed potentielt import og eksport af disse varer. Der antages ikke i BioRes at være en sammenhæng mellem dansk efterspørgsel og dansk produktion af landbrugsvarer. I scenarier kan der dog antages en sammenhæng, fx således at en reduceret eller øget produktion modsvarer af en reduceret eller øget dansk efterspørgsel. Det antages i så fald implicit, at der gennemføres politiske tiltag for at realisere en sådan udvikling.

Andelen af madspild kan sættes i BioRes. Reduceret madspild reducerer forbruget af fødevarer i Danmark og påvirker dermed også produktionsoverskuddet af fødevarer. Reduceret madspild reducerer mængden af bioaffald og dermed biogasproduktionen.

Graden af udsortering af bioaffald kan sættes i BioRes. Øget udsortering af affald giver mere bioaffald som kan anvendes til biogasproduktion. Modellering af fødevarerforbrug og bioaffald er nærmere beskrevet i kapitel 11.

4 Arealtyper og arealfordeling

Arealtyper i BioRes følger arealopdelingen i Danmarks nationale drivhusgasopgørelse

BioRes indeholder en samlet opgørelse over arealanvendelsen i Danmark. Opdelingen i arealkategorier følger Danmarks drivhusgasopgørelse, som er beskrevet i Danmarks drivhusgasopgørelse (NIR 2023). Arealkategorierne i BioRes fremgår af tabel 4.1 nedenfor.

BioRes' arealfordeling adskiller sig fra Danmarks Statistik

Arealfordelingen i BioRes adskiller sig på en række punkter fra Danmarks Statistiks arealfordeling. Danmarks Statistiks arealopgørelser, fx ArealDk, bygger på det såkaldte *Basemap*.^{60, 61, 62} Basemap har ikke samme arealkategorier som Danmarks drivhusgasopgørelse.⁶³ For eksempel indeholder *Basemap* arealkategorien "Natur", som ikke indgår i drivhusgasopgørelsen.

Det skyldes, at formålet med Basemap er alment, og at Basemap ikke skal danne grundlag for en drivhusgasopgørelse. Basemap har desuden en opløsning på 10×10 meter, hvor arealfordelingen i drivhusgasopgørelsen er baseret på celler på 25×25 meter. Det betyder, at selv om kategorien er den samme, kan arealet være forskelligt i drivhusgasopgørelsen og i Danmarks Statistiks ArealDK.

Visse arealtyper fx skovsøer, eng- og moseområder vil i *Basemap*, såfremt de er store nok til at være mest dominerende i en 10×10 m celle, ikke blive kategoriseret som *Skov*, men som *Natur*. I NIR 2023 vil mange af disse ikke være dominerende i et 25×25 meters opløsning, og de vil derfor blive kategoriseret som *Skov*. Desuden medregnes skovlysninger og midlertidigt ryddede arealer i skove i drivhusgasopgørelsen som *Skov*.

Skovarealet er derfor større i Skovstatistikken, i drivhusgasopgørelsen og i BioRes end i ArealDK. Ifølge Danmarks Statistik er 222.000 hektar permanente græsarealer. Disse er i NIR 2023 kategoriseret enten under Landbrugsarealer (Cropland), hvis de potentielt kan opdyrkes, eller under græsarealer (Grassland).

Tabel 4.1 Oversigt over arealkategorierne i BioRes

Arealkategori i BioRes	Kategori i NIR23	Areal i 2020 i hektar	Beskrivelse
Bebyggelse & infrastruktur	Settlements	539.100	Byer, bygninger og infrastruktur
Landbrugsafgrøder	Cropland	2.619.987	Alle marker med dyrkede afgrøder, herunder etårige afgrøder, græs i omdrift samt frugttræer og juletræer, der ikke er skov
Andet landbrugsareal	Cropland	181.913	Landbrugsareal, som ikke dyrkes, fx læbælter og småbiotoper
Produktionsskov	Forest	614.425	Skovarealet fratrukket arealet af urørt skov
Urørt skov	Forest	26.875	Antaget areal med urørt skov i 2020.
Græsarealer	Grassland	168.900	Græsarealer er residualen fra øvrige kategorier og består af hedekrat og marginalt græsningsareal, som ikke gødskes
Vådområder	Wetlands	68.800	Vådområder dækker over moser, drænedede områder til tørvindvinding og genoprettede vådområder.
Søer	Wetlands	59.100	Permanent vanddækkede vådområder.
Andet		26.500	Dækker bla. strande og klitter
I alt:		4.305.600	

Anm. 1: Definitionen på skov følger FAO: Et areal med træer som er større end 0,5 ha, om mindst 20 meter bredt, hvor træerne kan nå mindst 5 meters højde og en kronedækningsgrad på mindst 10 pct..

Anm. 2: Arealet af urørt skov er baserede på det skovdækkede areal med urørt skov som forvaltes af Naturstyrelsen samt urørt skov i privat eje.⁶⁴

Kilde: Danmarks drivhusgasopgørelse.⁶⁵

Natur indgår i andre arealkategorier i BioRes

Danmarks naturareal udgjorde i 2020 ifølge Danmarks Statistik knap 400.000 hektar eller ca. 9,2 pct. af det totale landareal. Nogle af naturarealerne er omfattet af naturbeskyttelseslovens § 3 og andre ligger i Natura 2000-områder. Områderne kan i nogle tilfælde være fredet, men er ikke nødvendigvis omfattet af varig naturbeskyttelse eftersom både § 3 og Natura 2000-områder kan være under landbrugsmæssig drift. Danmarks Statistiks naturareal inkluderer desuden områder, fx vejrabatter, som ikke kan betegnes som egentlige naturområder.⁶⁶

Ifølge Biodiversitetsrådet kan 1,6 pct. af landarealet kvalificere sig til betegnelsen strengt beskyttet natur svarende til ca. 71.000 hektar.⁶⁷

Da Danmarks drivhusgasopgørelse og BioRes ikke indeholder arealkategorien *Natur*, indgår naturarealerne i de øvrige arealkategorier. Et groft skøn over hvordan det nuværende naturareal fordeler sig på arealkategorierne i BioRes fremgår af tabel 4.2. Fordelingen er baseret på oplysninger fra DCE.⁶⁸

Tabel 4.2 Danmarks arealfordeling og andelen af natur i de forskellige kategorier i 2020

	Hektar	Andel af landet (pct.)	Andel af natur i kategorien (pct.)	Naturareal (pct.)
Bebyggelse & infrastruktur	539.100	13%	3,4%	18.329
Landbrugsafgrøder	2.619.987	61%	0,0%	0
Andet landbrugsareal	181.913	4%	58,0%	105.510
Produktionsskov	614.425	14%	7,4%	45.750
Urørt skov	26.875	1%	100,0%	26.875
Græsarealer	168.900	4%	68,7%	116.034
Vådområder	68.800	2%	78,9%	54.283
Søer	59.100	1%	3,2%	1.891
Andet	26.500	1%	91,2%	24.168
Total	4.305.600	100%	9%	392.841

Kilde: DCE.⁶⁹

BioRes tillader en tilnærmet opgørelse af naturarealet

For at kunne opgøre naturarealet i BioRes, selv om der ikke findes en arealkategori for *Natur*, antages en naturandel i andre arealkategorier. Andelen baseres blandt andet på tabel 4.2 ovenfor.

For at lette opgørelsen af naturarealet er *Landbrugsafgrøder* i BioRes underopdelt i to kategorier nemlig *Landbrugsafgrøder* og *Andet landbrugsareal*. *Landbrugsafgrøder* er det dyrkede landbrugsareal, svarende til Danmarks Statistiks afgrødeareal, mens ”*Andet landbrugsareal*” ikke dyrkes, og derfor blandt andet indeholder småbiotoper, der i Basemap ville blive kategoriseret som *Natur*.

Tilsvarende er kategorien *Skov* i BioRes opdelt i *Produktionsskov* og *Urørt skov*, hvor *Urørt skov*, regnes med i opgørelsen af naturarealet. Der antages dermed en naturandel i de forskellige arealkategorier i 2050 svarende til den, som fremgår af tabel 4.3.

I de scenarier, der antager 30 pct. natur, omlægges arealer således, at det samlede naturareal bliver 1.290.000 hektar, idet de naturandele, der fremgår af tabel 4.3, lægges til grund. Arealomlægningen i disse scenarier tillader dermed, med de angivne forudsætninger, at ca. 30 pct. af Danmarks areal afsættes til natur.

Tabel 4.3 Antaget naturandel i hovedscenarier

	Areal (ha)	Naturandel i 2020 jf. DCE (pct.)	Naturandel i scenarierne (pct.)
Bebyggelse & infrastruktur	539.100	3,4	0
Landbrugsafgrøder	2.619.987	3,8*	0
Andet landbrugsareal	181.913	-	60
Produktionsskov	614.425	11,3*	10
Urørt skov	26.875	-	100
Græsarealer	168.900	68,7	100
Vådområder	68.800	78,9	100
Søer	59.100	3,2	85
Andet	26.500	91,2	90
Total	4.305.600		

Anm. Stjernen (*) betyder, at procentsatserne gælder hhv. det samlede landbrugsareal og det samlede skovareal. I BioRes er landbrugsarealet og skovarealet opdelt i to underkategorier.

Kilde: Klimarådet.

5 Landbrug

BioRes har en repræsentation af dansk landbrugsproduktion i form af afgrøder og animalske produkter. Udgangspunktet er den danske landbrugsproduktion i 2020 baseret på data fra Danmarks Statistik. For efterfølgende år kan den danske produktion af foder og fødevarer ændres i scenarierne. Produktionen af foder og fødevarer kan ændres ved at ændre afgrødesammensætningen, ændre antallet af husdyr eller ændre fodersammensætningen. Dette kapitel beskriver, hvordan landbrugsproduktionen er modelleret i BioRes.

Der antages en forsimplet afgrødefordeling og et stigende udbytte

Areal med afgrøder

Danmarks dyrkede areal er fordelt på afgrødetyper ud fra Danmarks Statistiks opgørelser af afgrødetyper i Danmark.⁷⁰ BioRes har en forsimplet afgrødefordeling på i alt 16 hovedafgrøder. I BioRes repræsenterer fx "korn" således alle korn typer herunder vinter- og vårsæd. På samme måde dækker fx frugt og bælg sæd over alle underkategorier i de dertilhørende hovedkategorier i Danmarks Statistiks tabel.

Det dyrkede areal er inddelt i økologisk og konventionelt dyrkede arealer. Det økologiske areal bestemmes ud fra den nuværende økologiandel baseret på Danmarks Statistik.⁷¹ Af det dyrkede areal i BioRes er 12 pct. således økologisk dyrket. Økologiandelen differentieres altså ikke på tværs af afgrødetyper, hvilket er en forsimpning, da der i praksis er stor forskel på, hvilke afgrøder der produceres økologisk. I 2020 var det hovedsageligt græs, grøntfoder og korn, der var økologisk. Andelen af økologi følger KF23 frem til 2035 og holdes derefter konstant i BioRes, med mindre den ændres som et omstillingselement.

Grøntsagsproduktion i væksthuse indgår også i BioRes som en delmængde af Danmarks grøntsagsproduktion. I 2020 fyldte produktion i væksthuse 90 hektar, hvilket svarer til 1% af det samlede areal til grøntsagsproduktion i Danmark. Denne andel holdes konstant i BioRes, med mindre den ændres som et omstillingselement.

Afgrøders udbytte og gødningsbehov

BioRes indeholder data for udbytter og kvælstofnormer for en lang række forskellige afgrøder til fødevarer og foder. Afgrødernes udbytter og kvælstofnorm afhænger af jordtypen, og af om der dyrkes konventionelt eller økologisk.

Der antages, som nævnt, en generel udbyttestigning på 19,5 pct. for alle afgrøder fra 2020 til 2050. Udbyttestigningen kræver, at planterne får tilstrækkeligt med kvælstof. Det antages derfor, at kvælstofnormerne også stiger, men mindre end den generelle udbyttestigning, da det samtidig antages, at tabet af kvælstof kan mindskes. Det antages derfor, at kvælstofnormerne generelt stiger med 75 pct. af udbyttestigningen.⁷²

Der antages en forsimplet husdyrproduktion uden produktivitetsstigning

BioRes indeholder landbrugets dyrehold af svin, kvæg og fjerkræ fordelt på konventionel og økologisk drift. Husdyrene er gennemsnit af underkategorier og skal betragtes som gennemsnitlige dyr. En *ko* i BioRes er således et gennemsnit af malkekvæg, tyre, ammekøer og kvier inkl. kalve.

Modellen inkluderer ikke udledninger fra øvrige dyr som får, lam, geder, heste og hjorte, selv om disse dyr indgår i Danmarks drivhusgasopgørelse. I 2020 udgjorde grise, kvæg og fjerkræ 96 pct. og 98 pct. af udledningerne knyttet til henholdsvis fordøjelse og gødningshåndtering. Udledninger fra de øvrige dyr holdes konstant på 2020-niveau og medregnes i den samlede opgørelse af Danmarks udledninger i Scenarieværktøjet.

Den samlede dyrebestand er baseret på Danmarks Statistik, *Landbrug med dyr efter område, enhed og art*, som er i overensstemmelse med Danmarks drivhusgasopgørelse.⁷³ For den økologiske bestand er der anvendt data fra Danmarks Statistik, *Økologiske dyrebestand i Danmark*.⁷⁴ Klimapåvirkningen pr. husdyr i modellen er beregnet ud fra de samlede årlige udledninger fordelt ud på antallet af dyr i modellen og holdes konstant i alle årene.

Modellen indregner ikke en produktivitetsstigning i den animalske produktion. Der foregår i praksis en produktivitetsstigning, som blandt andet kommer til udtryk i en årlig stigning i mælkeydelse pr. malkeko, antal smågrise pr. år pr. so og et formindsket foderforbrug pr. kg. kød eller mælk. Produktivitetsstigningen har betydning for udledningerne fra den animalske produktion.

Når der alligevel ikke indregnes en produktivitetsstigning frem til 2050 i denne analyse, skyldes det, at det er usikkert, om den nuværende stigningsstakt vil kunne fortsætte, eller om den vil blive bremset af dyreetiske eller andre forhold. Derudover har produktivitetsstigningen på nogle punkter modsatrettede effekter, der delvist ophæver hinanden. For eksempel forventes udledningen pr. malkeko at stige på grund af øget mælkeydelse, som følge af genetisk forædling og øget foderindtag. Af samme årsag forventes antallet af malkekøer at falde, da der skal færre køer til at producere samme mængde mælk. Udledningen fra malkekvæg forventes derfor samlet set at forblive på omtrent samme niveau.⁷⁵ Dette er forenklet modelleret i BioRes ved at fastholde malkekøerne, som de var i 2020.

Udledning fra gødningshåndtering er baseret på gennemsnitlige staldtyper

Staldsystemet har både betydning for udledningerne og for, hvilke tiltag, der kan implementeres. Danmarks drivhusgasopgørelse opererer med 42 forskellige husdyrkategorier med tilhørende staldsystemer og gødningsstyper. Det giver 289 kombinationer af husdyr og staldsystemer.⁷⁶

I BioRes ses der bort fra disse faktorer, da modellen ikke er i stand til at håndtere så mange forskellige kombinationer af dyr og staldsystemer. I stedet skelnes der mellem stalde med gyllehåndtering og stalde med dybstrøelse. Udledninger fra gyllehåndtering er baseret på et gennemsnit af udledningerne fra de nuværende staldtyper, som fremgår af klimavirkemiddelkataloget. Desuden antages en udvikling i staldtyperne. Tiltaget ”hyppig udslusning af gylle” antages fx at kunne implementeres i alle stalde med gyllehåndtering i 2050.

Der er stor forskel på, hvor mange græsningsdage konventionelle og økologiske husdyr har. Det har betydning for potentialet og klimaeffekten af tiltag, der reducerer udledningerne i staldene og på lager. Konventionelle malkekøer går gennemsnitligt 11 dage, kvier 132 og økologiske køer 150 dage på græs.⁷⁷ Antallet af dage på græs har blandt andet betydning for bioafgasning af gylle. For at tage højde for det, er mængden af husdyrgødning fordelt ud på den gødning, som efterlades på marken, når dyrene græsser, og den gødning som efterlades i stald og lager.

Modellen indeholder data for produktion og forbrug af foder

Modellen indeholder data for produktion og forbrug af forskellige fodertyper samt fodertypernes næringsværdi og tørstofindhold. Næringsindholdet i foderet er baseret på Danmarks Statistik, DTU's Fødevaredatabase eller fodermiddeltabeller.^{78, 79} Modellen kategoriserer fodertyperne og gør det muligt at implementere forskellige fordelinger af foder. Det er desuden muligt at implementere omstillingslementer som øget tildeling af fedt i foderet, tilsætning af Bovaer til foder og at bruge protein fra bioraffineret græs som foder.

Hvis der er flere dyr, end der kan produceres foder til i DK, beregnes et produktionsunderskud, svarende til en import af foder i modellen. Dette gælder også grovfoder, selv om det i praksis nok ikke vil blive importeret eller eksporteret på grund af transportomkostninger.⁸⁰ I scenarierne tilstræbes det at undgå import af grovfoder ved at tilpasse den indenlandske produktion til forbruget.

BioRes indeholder mineraljord og kulstofrige jorder

BioRes har tre jordtyper. Mineraljorder er slået sammen til én kategori JB1-10. Organiske jorder er opdelt i OC12, der har et kulstofindhold på 12 pct. eller derover, og OC6, der har et kulstofindhold på 6 – 12 pct.. For mineraljorder er der typisk en ligevægt mellem planternes optag af CO₂ fra atmosfæren og den mængde drivhusgasser, der frigives fra jorden som følge af nedbrydningsprocesser i jorden. Ligevægten opstår typisk ved ca. 1-1,5 % OC i jorden. Alle drænedede jorder med et indhold over dette niveau vil afgive CO₂ som følge af, at nedbrydningen er større end tilførslen. For drænedede organiske jorder med et stort indhold af kulstof kan der udledes betydelige mængder af drivhusgasser.

Det kort, der lægges til grund for arbejdet med lavbundsprojekter, Tørv2022, rummer i alt ca. 218.000 hektar kulstofrige jorder. Dyrkning og dræning af organiske jorder, som danske landmænd indtegner i Landbrugsstyrelsens markkort (Internet Markkort) er opgjort til ca. 127.000 hektar i 2020. Fordeling af arealer på jordtyper og anvendelse fremgår af tabel 5.1. Denne fordeling anvendes i BioRes. Der er ikke antaget en mineralisering af kulstofrige jorder frem til 2050.

Tabel 5.1 Danmarks samlede areal, marker i omdrift og græsarealer fordelt på jordtyper, hektar

Jordtype	Marker	Græsarealer	Hele Danmark
OC12	14.555	36.112	88.946
OC6	33.789	42.952	129.234
JB1-10	2.571.643	89.836	4.087.420
Total	2.619.987	168.900	4.305.600

Kilde: DCE⁸¹ og Danmarks drivhusgasopgørelse.⁸²

6 Bioraffinering af græs

Bioraffinering af græs har til formål at producere proteiner til fødevarer og dyrefoder og samtidig opnå klima- og miljømæssige fordele, når græs erstatter majs, korn eller andre etårige afgrøder.⁸³ De første bioraffinaderier af grøn biomasse til foder og bioenergi i industriel skala er ved at blive etableret i Danmark. Der er endnu usikkerhed forbundet med teknologien.

Dyrkning af græs kan potentielt levere større udbytter af biomasse og protein end korn, blandt andet fordi græs har en længere vækstsæson. For rent græs afhænger proteinudbyttet af niveauet af N-gødsning. I græskløverblandinger er vigtigheden af N-gødsningen lavere.

Klimafordelen ved at skifte fra korn til enten flerårigt kløvergræs eller rent græs består i, at jordens kulstoflager øges på grund af græssets kulstofbinding. Lagringseffekter af omlægning af etårige afgrøder til flerårige græsmarker fremgår af kapitel 3. Det højere biomasseudbytte giver desuden mulighed for en større produktion af foder og/eller biomasse til energiformål.

Der kan også være ulemper ved dyrkning af højtydende græs. Øget N-gødsning, som kan være nødvendigt for at opnå et højt udbytte, kan øge udledningen af lattergas, der er en stærk drivhusgas. Den øgede N-gødsning kan potentielt også påvirke andre miljøforhold negativt.

Med den nuværende bioraffinerings teknologi forventes 40% af proteinet i den grønne biomasse at kunne blive udvundet i et proteinkoncentrat med et proteinindhold på omkring 50% af tørstof. Det svarer til proteinindholdet i sojakager. Derudover produceres en fiberfraktion, som typisk indeholder 15-18% protein i tørstof. Den kan bruges som foder til drøvtyggere, til produktion af bioenergi, til videre bioraffinering til kemiske byggeklodser, eller det kan bruges til biomaterialer til emballage i fødevarerindustrien. Endelig produceres brunsaft, der kan anvendes til biogasproduktion.

Proteinkoncentratet forventes at kunne erstatte traditionelle proteinkilder til dyr som svin og fjerkræ. Det undersøges i øjeblikket, om proteinet kan anvendes direkte i fødevarer.

I BioRes antages det baseret på data fra Uffe Jørgensen m.fl., at bioraffineringsanlægget ud fra 20.000 ton tørstof (TS) producerer ca. 3.600 tons TS tørret proteinkoncentrat (18% af de 20.000 ton TS), med et proteinindhold på 47%, samt 14.000 tons TS pulp til kvægfoder og 2.500 tons TS brunsaft til biogas.⁸⁴

Der kan i BioRes omlægges landbrugsjord fra etårige afgrøder til højtydende græs til brug for bioraffineringen. I BioRes antages højtydende græs at have et udbytte på 15 ton tørstof eller 83,3 ton vådvægt pr. hektar og en høj kvælstofnorm på 434 kg N pr. hektar på mineraljord for at sikre et tilstrækkeligt udbytte og proteinindhold i afgrøden. Der kunne alternativt have været anvendt kløvergræs eller græs med lucerne til bioraffineringen. Det ville have reduceret behovet for gødning og dermed også udledningerne af lattergas fra gødsning.

7 Biogasproduktion

Biogas kan produceres af mange forskellige typer biomasse. BioRes indeholder et biogasmodul, hvor husdyrgødning, forskellige former for bioaffald, halm, græs og andre typer af biomasse kan allokeres til biogasproduktion. Modulet tager udgangspunkt i biogasproduktionen i 2020 - 2021, og de typer af biomasse, der blev anvendt i denne periode på de landbrugsbaserede biogasanlæg.⁸⁵

Mængden af dansk biomasse, som kan bruges til biogas, er bestemt af en række forhold, som kan varieres i scenarierne, herunder antallet af husdyr, arealanvendelsen, afgrødefordeling, fodersammensætning, mængden af madspild og graden af udsortering af bioaffald i husholdninger og virksomheder.

I 2020 blev biogas delvist produceret af importeret biomasse fx industriaffald og glycerin. Hvis der allokeres mere af en type biomasse til biogas, end der er produceret af denne type i Danmark, opgøres det som et produktionsunderskud i BioRes, det vil sige en negativ post i *produktion minus forbrug*.

Biogasanlæg på rensningsanlæg og lossepladser er ikke medtaget i BioRes, da modellen ikke har affaldssektoren med. De landbrugsbaserede biogasanlæg stod for 95 pct. af biogasproduktionen i 2021, og andelen er stigende.⁸⁶ Landbrugsbaserede biogasanlæg afgasser også spildevandsslam i begrænset omfang.

Energistyrelsens opgørelse af anvendt biomasse til biogas er datagrundlag for BioRes' biogasproduktion i 2020.⁸⁷ Biogaspotentialer i BioRes stammer hovedsagelig fra den årlige opgørelse af biogasproduktion og biomasseforbrug, som er baseret på biogasanlæggenes årlige indberetninger.⁸⁸ Visse gaspotentialer er dog hentet fra andre rapporter.⁸⁹

I scenarierne produceres biogas primært af rest- og affaldsprodukter, som fx husdyrgødning, halm, brunsaft fra bioraffinering og bioaffald. Kun hvis mængden af disse typer biomasse er lav, og der er behov for mere biogas for at tilfredsstille energisystemets behov, kan der også produceres biogas af energiafgrøder.

Biogas reducerer udledningen fra gødningshåndtering

Data fra Klimavirkemiddelkataloget bruges til at opgøre udledning af metan fra gødningshåndtering og klimaeffekten af at bioafgasse gylle i BioRes. Det fremgår her, hvad metanudledningen fra stald og lager er pr. ton gylle for en gennemsnitlig kvægstald og for en gennemsnitlig svinestald. Det fremgår desuden, hvor meget metanudledningen reduceres, hvis gylle fra gennemsnitlige kvægstalde og svinestalde bioafgasses, se tabel 7.1.

Tabel 7.1 Metanudledning fra gødningshåndtering af ikke-afgasset og afgasset gylle, kg CH₄ pr. ton gylle

Gylletype	Stald (kg CH ₄ /ton gylle)	Lager (kg CH ₄ /ton gylle)	Total (kg CH ₄ /ton gylle)
Kvæggylle udledning uden biogas	0,9	0,9	1,8
Kvæggylle udledning med biogas	1	0,3	1,3
Forskel	-0,1	0,6	0,5
Svinegylle udledning uden biogas	1,8	2,5	4,2
Svinegylle udledning med biogas	1,9	0,1	2
Forskel	-0,1	2,4	2,2

Kilde: Klimavirkemiddelkataloget.⁹⁰

For en gennemsnitlig kvægstald reduceres udledningen af metan fra stald og lager med 25,8 pct., hvis kvæggyllen bioafgasses. For en gennemsnitlig svinestald reduceres udledningen af metan fra stald og lager med 51 pct., hvis svinegyllen afgasses. Bioafgasningens eventuelle effekt på lattergasudledning indregnes ikke, da disse udledninger udgør under 1 pct. af den samlede udledning fra stald og lager.^{91, 92} For dybstrøelse antages en metanudledning baseret på IPCC's opdaterede retningslinjer fra 2019.⁹³ Som det fremgår af tabel 7.1 er reduktionseffekten størst i udledningen fra lageret.

Den samlede metanudledning fra gødningshåndtering og reduktionen i udledningen som følge af bioafgasning fremgår som to selvstændige linjer på BioRes' resultatark. Når tungtomsættelig biomasse såsom halm, som ikke ellers ville give anledning til metanudledning, anvendes i biogasanlæggene, vil den andel af kulstoffet i halmen, som ikke omsættes til gas, blive ført tilbage til gylletankene og lagret her sammen med den afgassede husdyrgødning. Denne anaerobe lagring i gylletankene vil give anledning til metanudledning, men der er stor usikkerhed om størrelsen heraf. I BioRes antages en udledning fra lagring af afgasset biomasse, som er på niveau med IPCC's faktor for udledning fra afgasset biomasse fra kvæggylle.

Hyppig udslusning reducerer udledningen fra gødningshåndtering yderligere

Udledningen af metan fra gødningshåndtering kan yderligere reduceres ved hjælp af tiltaget "hyppig udslusning", som i BioRes antages at kunne anvendes på alle svine- og kvægbedrifter i 2050. Biogas kombineret med hyppig udslusning antages på baggrund af Klimavirkemiddelkataloget at reducere udledningen fra stald og lager med 72,2 pct. for kvæggylle og 74,8 pct. for svinegylle set i forhold til en situation uden bioafgasning og hyppig udslusning af gyllen. Samtidig betyder den hyppige udslusning, at biogasproduktionen øges med 8 pct. for kvæggylle og 11,8 pct. for svinegylle.

Klimavirkemiddelkataloget indeholder skønmæssige vurderinger af udbredelsen af hyppig udslusning og biogas. Disse indgår i BioRes for 2020. I scenarierne kan mængden af husdyrgødning, der bioafgasses eller bioafgasses og udsluses hurtigt, øges fra dette niveau.

Metantab fra biogasanlæg medregnes ikke i BioRes, men det er i de samlede scenarier antaget, at der tabes 1 pct. af biogasproduktionen.

8 Pyrolyse

Pyrolyse af biomasse producerer biokul, pyrolysegas og eventuelt pyrolyseolie. I processen opvarmes biomassen til høje temperaturer i et iltfrit miljø, hvorved kulstoffet i biomassen fordeler sig i en gasformig, en flydende og en fast bestanddel. Gassen og olien kan anvendes til energiformål. Den faste del, biokullet, nedbrydes meget langsomt og kan derfor lagre kulstof i jorden i mange år.⁹⁴ Lagring af kulstof i biokul kan dermed skabe negative udledninger, der kan opveje restudledninger fra fx landbruget. Pyrolyseteknologien er ikke ny, men den har ikke tidligere været anvendt som et omstillingselement i klimapolitikken.

Der er flere mulige klimaeffekter ved pyrolyse

Pyrolyse af biomasse kan reducere drivhusgasudledningen på flere måder. Effekterne kan opdeles således:

- **Lagringseffekten:** Pyrolyse af biomasse stabiliserer kulstoffet til langvarig lagring, så biomassen ikke nedbrydes. Lagringseffekten er den ekstra kulstoflagring, som opnås ved at pyrolysere biomassen og lagre den i form af biokul.
- **Energiprodukter:** Pyrolysegas og -olie kan spare anden biogen CO₂ eller substituere fossile brændsler. I BioRes indgår pyrolyseprodukterne i bioenergipotentialet, som bruges til at opfylde samfundets behov for energi og kulstof uden brug af fossil brændsler, så klimamålene kan nås.
- **Systemeffekter:** En øget efterspørgsel efter biomasse til pyrolyse kan medføre andre ændringer i forvaltningen af biomasse og eventuelt areal. Det kan have konsekvenser for drivhusgasudledningen.

Lagringseffekten afhænger af typen af biomasse

Lagringseffekten afhænger af den specifikke type biomasse, der anvendes. Biomasser varierer i deres kulstof- og tørstofindhold. Det påvirker forholdet mellem energiprodukter og biokul, og dermed også mængden af kulstof, der lagres.

Lagringseffekten afhænger også af den tidligere anvendelse af biomassen. Hvis en biomasse, der normalt bringes ud på landbrugsjord, hvor den bidrager til at opretholde jordens kulstofpulje, i stedet bliver pyrolyseret og udbragt som biokul, vil lagringseffekten skulle opgøres som summen af to effekter:

- Lagringen af kulstof i biokul.
- Den reducerede lagring af kulstof fra biomasse, der ikke længere udbringes på marken.

Den tidligere anvendelse af biomassen kaldes i det følgende for *referencen*. Denne kan variere både mellem forskellige biomassetyper og inden for samme biomassetype.⁹⁵

Energiprodukter er gas og eventuelt olie

Pyrolyse producerer – ud over biokul, også pyrolysegas og eventuelt olie. BioRes beregner den producerede mængde gas og olie pr. ton biomasse. Datagrundlaget for halm og afgasset biomasse er DCA's vidensyntese om biokul i dansk landbrug.⁹⁶ For andre typer af biomasse anvendes data fra Niras, RUC, og Stiesdal SkyClean.⁹⁷

Muligheden for at producere pyrolyseolie afhænger af biomassetypen. For halm omdannes ca. 18 pct. af kulstoffet til bioolie og 38 pct. til pyrolysegas. Der produceres i dag typisk kun olie af tørre biomasser, da der for vådere biomasser fx

afgasset biomasse typisk anvendes relativt meget energi til tørring inden pyrolysen.⁹⁸ Det antages dog, at der også kan produceres olie ved pyrolysning af våde biomassetyper i 2050. I BioRes kan der således produceres både pyrolysegas og -olie af alle typer af biomasse i 2050.

Pyrolyseolien og -gassen har efterfølgende forskellige anvendelser. Olien kan anvendes til biobrændstoffer, mens gassen kan anvendes i industrien eller til produktion af el og varme. Anvendelsen og klimaeffekten heraf ligger uden for BioRes modellen og indgår i stedet i Scenarieværktøjet. Energiforbruget til afvanding og evt. tørring inden pyrolyse håndteres i Scenarieværktøjet, der generelt håndterer energiforbrug i industrien.

Systemeffekter kan være undgåede udledninger af drivhusgasser eller effekter af ændret arealanvendelse

Etablering af pyrolyseanlæg kan medføre ændringer i anvendelse af biomasse og/eller forvaltning af arealer. Øget efterspørgsel af biomasse til pyrolyse kan fx betyde, at afgasset biomasse bliver separeret, og at en andel sendes til pyrolyse fremfor at blive opbevaret i gylletanken og derefter udbragt på marken. Øget efterspørgsel efter biomasse til pyrolyse kan også medføre, at nogle landbrugere vælger at producere andre afgrøder, der kan levere biomasse til pyrolyse. Sådanne systemeffekter kan have konsekvenser for den samlede udledning af drivhusgasser.

Undgået metanudledning indregnes i BioRes.

Pyrolyse af visse biomassetyper kan fx reducere udledningen af metan eller lattergas. Afgasset biomasse fra biogasanlæg kan fx udlede metan, når det opbevares i gylletanke. Denne udledning kan mindskes, hvis biomassen separeres og pyrolyseres, da der i så fald bliver opbevaret mindre biomasse, som giver anledning til udledning. Dette er blevet vurderet til at være en væsentlig positiv klimaeffekt ved pyrolyse.⁹⁹ Den positive effekt er særlig stor, hvis der sammenlignes med en referencesituation, hvor den afgassede biomasse bliver separeret, og fiberfraktionen bliver lagret uden at blive pyrolyseret. Den normale referencesituation er imidlertid snarere, at den afgassede biomasse bliver lagret i gylletankene uden at blive separeret, da separationen typisk sker som forberedelse til at pyrolysere fiberfraktionen. I BioRes indregnes en 33 pct. reduktion af udledningerne fra lagring af ikke-separeret afgasset biomasse, når denne separeres og pyrolyseres. Metanudledningen forbundet med opbevaring af afgasset biomasse hviler dog på et usikkert datagrundlag.¹⁰⁰

Undgåede lattergasudledninger indgår ikke i BioRes

Pyrolyse kan reducere udledninger fra lattergas, hvis pyrolyse af biomassen medfører, at der er mindre kvælstof på marken, som kan give anledning til udledning af lattergas. BioRes indregner dog ikke en reduceret lattergasudledning fra marken på grund af pyrolyse. Dette skyldes, at det i BioRes generelt antages, at kvælstofnormerne udnyttes på samme niveau som i 2020, og at evt. fjernet kvælstof via pyrolyse vil blive erstattet af anden kvælstoftilførsel til markerne. Dermed vil de direkte og indirekte lattergasudledninger forblive på samme niveau. For så vidt angår lattergasudledninger fra planterester, vil disse også blive reduceret, hvis der efterlades færre planterester på marken. Som omtalt i kapitel 2, indregnes dette dog på nuværende tidspunkt ikke i modellen.

Effekter af ændret arealanvendelse

Øget efterspørgsel af biomasse til pyrolyse kan betyde, at flere arealer bruges til at producere afgrøder, der leverer biomasse til pyrolyse. Det kan være der skiftes til energiafgrøder fx pil, der er eksemplet i scenarierne, eller der kan skiftes til nye sorter eller afgrøder, der leverer flere typer biomasse, hvor en delmængde kan gå til pyrolyse. Sådanne ændringer kan medføre øgede eller reducerede udledninger afhængig af, hvilke afgrøder, der skiftes fra og til. Hvis fx produktion af korn ændres til produktion af pil, vil det reducere udledningen af lattergas, da pil har et lavere kvælstofloft end korn. Samtidig vil skiftet medføre en større kulstofopbygning i jorden.

BioRes kan pyrolysere forskellige typer biomasse og tage højde for systemeffekter

Biokul kan fremstilles af en lang række forskellige organiske materialer fx husdyrgødning, halm, afgasset biomasse, træflis, tang, dybstrøelse og have-parkaffald. I dag forventes især restbiomasser uden anden betydelig økonomisk anvendelse, at blive anvendt til produktion af biokul, fx halm og afgasset biomasse.¹⁰¹ Dette kan ændre sig i fremtiden.

Det er muligt at pyrolysere en række forskellige biomasser i BioRes. For nogle biomasser vil der skulle tages højde for at biomassen allerede i dag bidrager til kulstoflagring. For nogle biomasser indregnes desuden andre systemeffekter. Tabel 8.1 viser de typer af biomasse, der kan pyrolyseres i BioRes. Tabellen viser også biomassens oprindelse, antagelser om referencen og andre systemeffekter.

Som tabel 8.1 viser, kan det være relevant at inddrage referencen, når biomassen ville have bidraget til at opretholde et kulstoflager i jorden, hvis den ikke blev pyrolyseret. Det gælder for afgasset biomasse, spildevandsslam og delvist for halm. Den samlede lagringseffekt ved at pyrolysere disse typer biomasse er forskellen mellem den årlige kulstofpuljeændring i jorden, der ville være sket ved den alternative anvendelse og kulstofbindingen i biokullet. For halm indregnes referencen kun for en del af halmen, nemlig for den del, der alternativt ville være nedmuldet. Dette er nærmere forklaret under *Øget opsamling af halm* i kapitel 3. Denne del af halmen kaldes i det følgende for resthalm.

I andre tilfælde er det ikke relevant at indregne en reference i lagringseffekten for biokul, fordi referencen allerede er indregnet på anden vis i BioRes. Det gælder fx for skov, hvor hugsten indregnes i CFR kategorien *4A Skov*. I BioRes antages det, at der fraføres en bestemt mængde træ til energi fra produktionsskov. Denne mængde kan bruges enten til kraftvarme, til brændstoffer eller til pyrolyse. Uanset hvilket formål, det anvendes til, er der allerede under *Skov* indregnet, at der er fraført træ fra skoven. For træ kan man altså ikke, som med halm, vælge at fraføre mere træ fra skoven for at bruge det til pyrolyse. Det er derfor ikke nødvendigt at indregne en reference i lagringseffekten for pyrolyse af træ fra skov. Det samme er tilfældet for efterafgrøder. Hvis man vælger at dyrke efterafgrøder indregner BioRes en lagringseffekt under CFR kategorien *4B Dyrket jord*. Hvis efterafgrøden høstes, indregnes en halveret lagringseffekt. Når høstede efterafgrøder anvendes til pyrolyse, er der således allerede taget højde for referencen under *Dyrket jord*.

Omdirigering af have/parkaffald til pyrolyse fra kompostering sparer udledning af metan og lattergas fra komposteringen men samtidig mister kulstoflagring i jorden. Disse effekter ophæver delvist hinanden, men er ikke analyseret nærmere i dette projekt. I BioRes indregnes der altså ikke en reference i lagringseffekten af biokul fra have/parkaffald og heller ikke andre systemeffekter ved pyrolyse af have/parkaffald.

Referencen er ikke relevant, hvis biomassen er produceret med henblik på pyrolyse. Det gælder fx for pil og græs, og antages også at gælde for tang. Dyrkning af pil og græs har imidlertid andre systemeffekter. En af disse er nævnt i tabel 8.1 og er, at dyrkning af pil i stedet for etårige afgrøder medfører en kulstofopbygning i jorden. Andre systemeffekter er, at arealet til produktion af korn bliver mindre, hvilket påvirker produktionsoverskuddet af foder og fødevarer. Dette er også indregnet i BioRes og beskrives i kapitel 12.

Pyrolyse af halm og afgasset biomasse er særlig relevant

Der har i Danmark især været fokus på pyrolyse af halm og afgasset biomasse fra biogasanlæg.¹⁰² Afgasset biomasse forventes at blive en lettilgængelig biomasse til pyrolyse, ligesom der også er forventninger til at resthalm skal bidrage til biokulproduktionen.¹⁰³ Lagringseffekten ved pyrolyse af resthalm og afgasset biomasse beskrives derfor nærmere i det følgende.

Ved pyrolyse af biomasse bindes omkring halvdelen af kulstoffet stabilt i biokul. Efter 100 år forventes 92 pct. af kulstoffet stadig at være i biokullet. Stabiliteten af biokul beregnes i BioRes med udgangspunkt i den nyeste viden om nedbrydningen af biokul. Dermed inddrages danske erfaringer fra pyrolyse, som viser en større stabilitet end antaget i andre videnskabelige udredninger.^{104, 105, 106, 107}

Kulstofindholdet i biomasse varierer og biokullets egenskaber, herunder lagringstiden, afhænger af biomassen og pyrolyseprocessen. Til beregning af lagringseffekten ved pyrolyse af resthalm og afgasset biomasse er der i BioRes anvendt data fra DCA's vidensyntese om biokul i dansk landbrug.¹⁰⁸ Det antages, at 51 pct. af kulstofmængden i afgasset biomasse lagres i biokul, mens det for halm er 44 pct. Den anvendte initiale kulstofmængde i halm og afgasset biomasse er henholdsvis 473 og 436 kg kulstof pr. ton tørstof.

Tabel 8.1 Oversigt over biomassetyper, der kan pyrolyseres i BioRes og tilhørende antagelser.

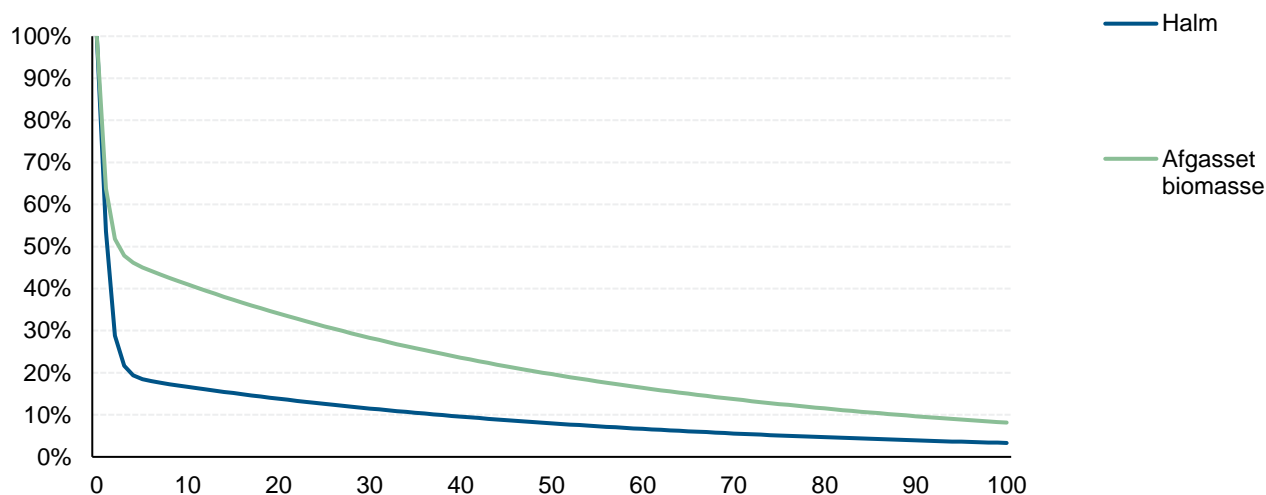
Biomasse	Oprindelse og potentiale	Indregnes en reference i lagringseffekten?	Indregnes andre systemeffekter?
Halm	Stammer fra øget opsamling af halm, øget halmudbytte eller halm, der i dag går til afbrænding eller anden anvendelse	Referencen, som er nedmuldning, indregnes for den andel af halmen, der stammer fra øget opsamlet halm (resthalm)	Nej
Afgasset biomasse	Ved separation af afgasset biomasse fra biogasanlæg fås en våd fraktion og en fiberfraktion. Fiberfraktionen kan gå til pyrolyse	Referencen indregnes for al afgasset biomasse, da den alternativt ville være bragt ud på landbrugsjord	Ja. Der indregnes en reduceret udledning af metan fra opbevaring af afgasset biomasse i gylletanke
Spildevandsslam	Den andel, der i dag spredes ud på landbrugsjord, kan gå til pyrolyseanlæg. Det svarer til 40 pct. af slammet ¹⁰⁹	Reference indregnes, da denne andel af slammet alternativt ville være bragt ud på landbrugsjord	Nej
Skovflis og trærester fra savværkerne	Den del af høsten af træ fra skovene, som er til rådighed til energiformål, kan anvendes til pyrolyse	Nej. Der indregnes ikke en reference i lagringseffekten, da der kun anvendes træ til pyrolyse, der alligevel var blevet fraført skoven.	Ja. Høst af træ modregnes i CO ₂ -optaget i skovene og indgår under <i>Skov</i> i drivhusgasopgørelsen.
Have-park affald	Det antages, at to tredjedele af have/parkaffaldet kan pyrolyseres eller afbrændes til energiformål. Det antages at en tredjedel komposteres, da den er uegnet til afbrænding	Nej	Nej
Pil	Al produceret pil kan potentielt gå til pyrolyse	Nej	Ja. Dyrkning af pil i stedet for korn medfører en øget kulstoflagring på marken
Græs	Al høstet græs kan potentielt gå til pyrolyse	Nej	Ja. Dyrkning af græs i stedet for korn medfører en øget kulstoflagring på marken
Græs fibre	Al græs fibre fra græsraffinerings kan potentielt gå til pyrolyse	Nej	Nej
Efter- og mellemafgrøder	Al høstet efter- og mellemafgrøder kan potentielt gå til pyrolyse	Nej	Ja. Høst af disse afgrøder indregnes under <i>Dyrket jord</i>
Tang	Al høstet tang kan potentielt gå til pyrolyse	Nej	Nej
Bioaffald	Al bioaffald kan potentielt gå til pyrolyse	Nej	Nej

Kilde: Klimarådet og Energy Modelling Lab.

Resthalm og afgasset biomasse bidrager til jordens kulstofpulje

En årlig tilførsel af biomasse til en mark bidrager til at vedligeholde markens kulstoflager i jorden. Hvis der tilføres mindre biomasse til marken, vil kulstofindholdet i jorden gradvist falde, efterhånden som jordens organiske kulstof nedbrydes. Faldet sker over en periode og repræsenterer en årlig udledning i takt med, at kulstoflageret reduceres, indtil der er opstået en ny ligevægt. Figur 8.1 viser kulstoflageret over tid som følge af, at der første år tilføres 1 ton tørstof fra halm, gylle eller afgasset gylle til marken.

Pct.



Figur 8.1 Kulstofindhold i biomasse efterladt på marken over tid.

Amn.: Nedbrydningshastigheden af halm og afgasset biomasse de første år er forbundet med usikkerhed.

Kilde: DCA.^{110, 111}

Som figur 8.1 viser, sker der et hurtigt fald i kulstoflageret fra den tilførte biomasse i løbet af de første år. Derefter nedbrydes den resterende biomasse meget langsommere. Figur 8.1 viser kun effekten af ét års tilførsel af halm eller afgasset biomasse til marken. I praksis tilføres der typisk halm eller afgasset biomasse til marken hvert år, hvorved kulstoflageret i jorden opretholdes.

Kulstoflagring opgøres ved at se på forskellige kulstofpuljer

I Danmarks drivhusgasopgørelse baseres opgørelsen af kulstoflagring ved nedmulding af resthalm og afgasset biomasse på modellen C-TOOL. Organisk materiale opdeles her i forskellige kulstofpuljer, der adskiller sig fra hinanden ved at have forskellige nedbrydningshastigheder. C-TOOL arbejder med følgende tre puljer:^{112, 113}

1. **Fresh Organic Matter (FOM)** som er over- og underjordisk organisk materiale fra planterester og husdyrgødning, der har en relativ grov tekstur. Halveringstiden er typisk <1 år.
2. **Humidified Organic Matter (HOM)** er delvist nedbrudt organisk materiale med en større stabilitet end FOM. Halveringstid typisk 20 år.
3. **Resistant Organic Matter (ROM)** er det stabile indhold af organisk kulstof i jorden. Halveringstiden er typisk omkring 1.500 år.

FOM-puljen består af planterester og husdyrgødning. Omsætningen af kulstof i FOM-puljen sker typisk om efteråret, når afgrøden er høstet. Denne omsætning er meget temperaturfølsom og kolde efterår kan betyde, at FOM-puljen ikke omsættes i høståret, men først i året efter. I det tilfælde kan udledningen fra FOM-puljen risikere at blive meget stor året efter. Det kan give udsving i udledningerne i drivhusgasopgørelsen.

Udsvingene førte til, at FN i 2012 anbefalede Danmark at undlade rapportering af FOM-puljen.^{114, 115} Det har været praksis i den danske drivhusgasopgørelse siden. Opgørelsen tager dermed højde for, hvordan ændringer i FOM-puljen påvirker de andre kulstofpuljer, men rapporterer ikke direkte på ændringer i FOM-puljen. Det giver et retvisende billede af de danske udledninger og færre udsving i de danske udledninger, så længe ændringerne i FOM-puljen alene skyldes varierende vejrforhold. I så fald udjævner ændringerne i FOM-puljen nemlig sig selv over årene.

BioRes beregner lagringseffekten af biokul med en foreløbig metode

Det er endnu ikke afklaret, hvordan lagringseffekten af biokul skal indregnes i Danmarks drivhusgasopgørelse. FN's Klimapanel har indtil videre kun udgivet en såkaldt *Basis for en fremtidig metodeudvikling*.¹¹⁶ Klimapanelet beskriver her den partielle effekt af lagringen af kulstoffet i biokullet og gør opmærksom på, at interaktioner med arealforvaltningen ikke er beskrevet. Interaktionerne med arealforvaltningen omfatter det, der her kaldes referencen.

Da der således endnu ikke findes en konsolideret metode, beregner BioRes lagringseffekt af pyrolyse ved hjælp af en foreløbig metode. Beregningen indregner referencen og tager her udgangspunkt i de metoder, der anvendes i Danmarks drivhusgasopgørelse. Ændringerne i FOM-puljen medtages dog i beregningerne. Det skyldes, at når man begynder en ny praksis, hvor man fjerner den halm, eller afgasset biomasse, der plejer at blive nedmuldet på marken, så er der ikke længere tale om vejrafhængige udsving, men om en systematisk ændring af FOM-puljen såvel som af de øvrige kulstofpuljer.

Figur 8.2 viser udledningen af CO₂ forbundet med pyrolyse. Udledningen er effekten af, at der første år er opsamlet resthalm og afgasset biomasse, hvorefter biomassen er pyrolyseret og tilbageført som biokul. Figuren viser tre effekter:

- **Biokul.** Når afgasset biomasse eller halm pyrolyseres og de producerede biokul tilføres marken giver det anledning til lagring af ca. 800 kg CO₂, svarende til 220 kg kulstof i biokul, første år, hvorefter der stort set ikke sker nogen udledning. Det vises i den blå kurve.
- **Referencen.** Når ét ton biomasse efterlades på marken, giver det anledning til en lagring af 1.600 eller 1.700 kg CO₂ for henholdsvis afgasset biomasse og halm første år. En stor del af biomasse nedbrydes dog relativt hurtigt, hvilket giver anledning til efterfølgende udledninger. Det vises på den lysegrønne kurve.
- **Nettoudledning ved pyrolyse.** Nettoresultatet er en udledning på 800-1.000 kg CO₂ første år og en øget lagring (negativ udledning) i årene efter. Den øgede lagring skyldes, at den naturlige nedbrydning af afgasset biomasse og halm ikke finder sted, når biomassen pyrolyseres.

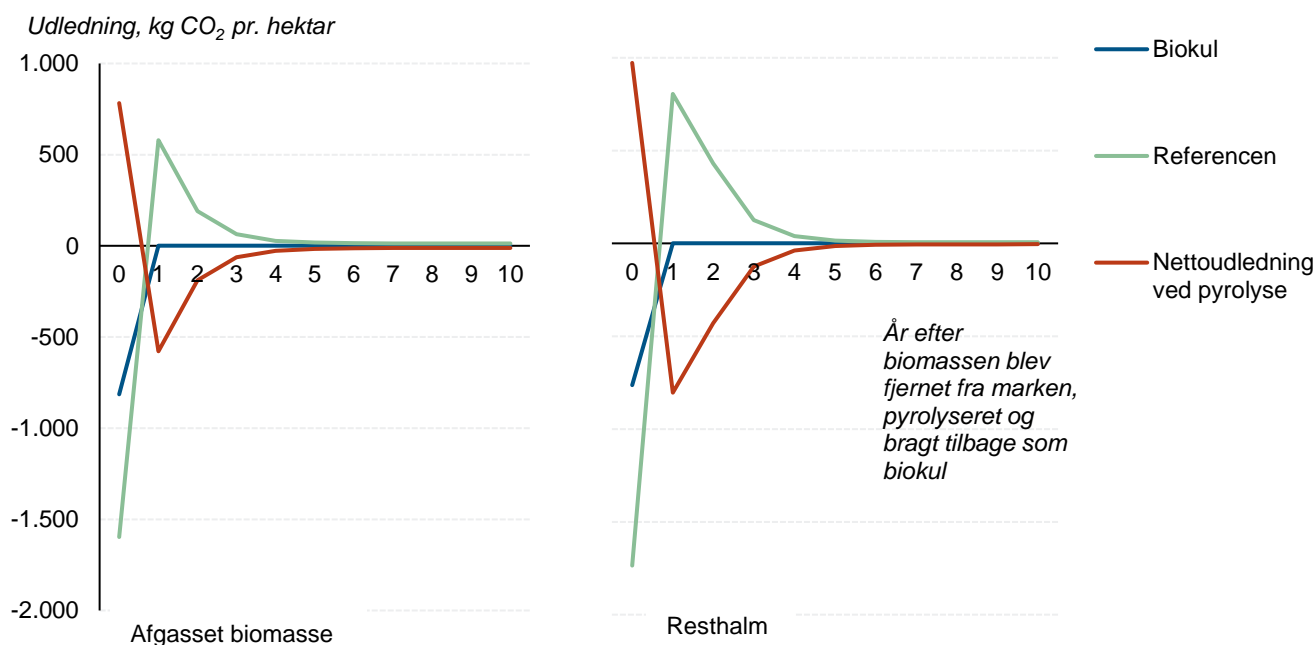
Ser man isoleret på biokul, er der således en negativ udledning (optag) første år. Men da der samtidig mistes en endnu større lagring fra halm og afgasset biomasse er den samlede førsteårs effekt af pyrolyse en udledning. Det ændrer sig i de følgende år, hvor stabiliteten af biokullet medfører en negativ nettoudledning ved pyrolyse.

Figur 8.2 viser kun effekten af ét års pyrolyse af biomassen til biokul. Når pyrolysen fortsætter år efter år, kan den samlede effekt i ét år opgøres ved at sammenlægge effekterne af dette års og de foregående års kulstoflagring.

BioRes antager en indfasning af pyrolyse af halm og afgasset biomasse frem til 2050

BioRes antager en gradvis implementering af pyrolyse af halm og afgasset biomasse frem til 2050. Denne implementering er baseret på en forventning om, at udviklingen af pyrolyseteknologien i Danmark følger et S-kurveformet indfasningsforløb. Der forventes altså en accelererende udbygning af pyrolyseanlæg frem mod 2040, hvorefter indfasningskurven forventes at flade ud. Den samlede effekt af lagring af biokul i 2050 beregnes ved at addere effekten af at lagre en stigende mængde biokul hvert år i perioden frem til 2050.

Indfasningsforløbet har væsentlig betydning for lagringseffekten af biokul i de enkelte år frem til og med 2050. Det kan dog ikke på nuværende tidspunkt vides, hvordan indfasningsforløbet for pyrolyseteknologien bliver i Danmark.



Figur 8.2 Udledningen af CO₂ set over tid som følge af ét års pyrolyse af afgasset biomasse og resthalm

Amn. 1: Figuren viser den partielle effekt af 1) Lagring af biokul (blå) og 2) Referencen, dvs. nedmuldning af halm/afgasset biomasse i år nul, (lysegrøn). Desuden vises 3) Nettoudledningen ved pyrolyse (rød kurve), som er udledningen fra biokullet minus udledningen fra referencen. Det antages, at der efterlades et ton tørstof afgasset biomasse/halm pr. hektar.

Kilde: DCA.^{117, 118}

Der indregnes ikke noget metantab fra pyrolyseanlægget

Ifølge IPCC (2019) guidelines skal der anvendes en standard udledningsfaktor for metantab fra pyrolyseanlæggene, så længe der ikke foreligger national dokumentation og lavere eller ingen udledning.¹¹⁹ Lækket kan komme fra selve anlægget eller i røggasserne. De fleste danske anlæg kører med svagt undertryk i pyrolyseprocessen for at forhindre læk og der findes danske erfaringer, som viser et lavt indhold af drivhusgasser i røggasserne.¹²⁰ Der indregnes derfor ikke et metantab fra pyrolyseanlæg i BioRes.

Der er behov for øget viden om biokul

Det er endnu uklart, hvordan lagringseffekten af biokul skal indregnes i Danmarks drivhusgasopgørelse. Ovenfor blev beskrevet et foreløbigt bud på en beregning, som må konsolideres eller videreudvikles, inden lagring af biokul indregnes. Det må forventes, at der i drivhusgasopgørelsen vil blive taget højde for både interaktionerne med arealforvaltningen, dvs. for referencen, og for indfasningen af pyrolyse.

Der er også behov for mere viden om andre aspekter af biokul. Der er begrænsede danske erfaringer med udbringning af biokul på landbrugsjord. Udbringning kræver en godkendelse af kommunen, og biokullet skal overholde bestemte grænseværdier for tungmetaller og tjære. Der er ikke i dag videnskabelig konsensus om effekterne af at sprede store mængder biokul på landbrugsjorde.¹²¹ En række forhold er desuden stadig under afklaring, herunder biokuls effekter på jordbund, dyrkningsforhold og jordbiologi. SEGES anbefaler derfor at starte med at udbringe mindre mængder biokul og fortsat at tilføre andet organisk materiale til jorden for at opretholde fødegrundlaget for jordens organismer.¹²²

Fosforloftet begrænser hvor meget biokul, der kan udbringes på marker

Biokul indeholder fosfor, og der må maksimalt tilføres 30 kg. fosfor pr. hektar ifølge fosforloftet. Det begrænser, hvor meget biokul, der kan tilføres et areal.¹²³ Mange danske søer er forurenede af fosfor, som er et næringsstof der blandet andet findes i husdyrgødning.¹²⁴ Når biomasse laves til biokul, så bindes de fleste indholdsstoffer permanent. Fosfor derimod frigives fra biokullet. Biokul kan dermed bidrage til at recirkulere fosfor, men det er også vigtigt at være opmærksom på fosforloftet, som kan blive reduceret i fremtiden som følge af vandrammedirektivets mål for 2027.

9 Skov

BioRes indeholder 7 skovtyper, hvoraf 5 er produktionsskov og 2 er urørte skove. I basisåret 2020 antages al produktionsskov at være skovtypen *basisskov*, det vil sige den gennemsnitlige danske skov i 2020. Skovtyperne 1 – 4 er forskellige typer af produktionsskov, og der er to typer urørte skove: *Gammel urørt skov* er basisskov, der omlægges til urørt skov, mens *Ny urørt skov* er areal, der lægges urørt, og som bliver til skov via naturlig tilgroning. Skovtyperne vises i tabel 9.1.

Tabel 9.1 Skovtyper i BioRes

Skovtyper i BioRes	
Basisskov	Det danske skovareal i 2020
Skovtype 1	Blandet løv med indblanding af nål
Skovtype 2	Hurtigvoksende kultur, ½ douglasgran og ½ rødgran med lærk
Skovtype 3	Løv, eg eller bøg
Skovtype 4	Hurtigvoksende kultur, bøg eller eg med poppel
Ny urørt skov	Naturlig tilgroning
Gammel urørt skov	Basisskov, der lægges urørt

Kilde: Klimarådet og Energy Modelling Lab på basis af IGN¹²⁵

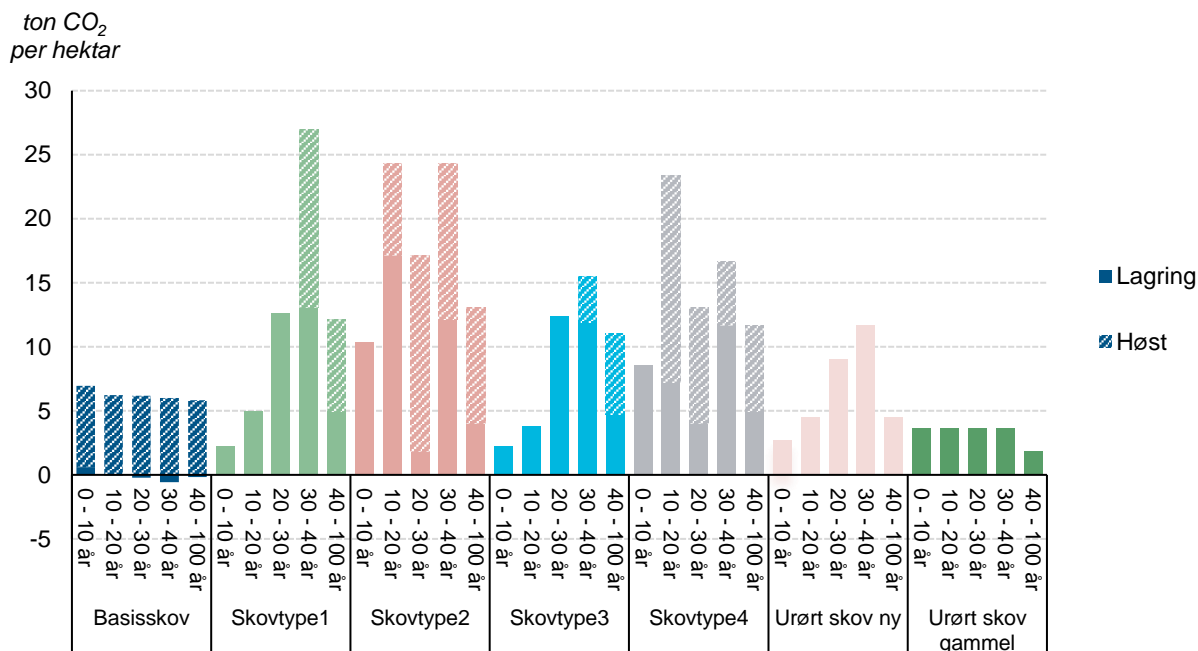
I scenarierne antages det, at 1 pct. af basisskoven forynges hvert år. Det betyder, at 1 pct. af basisskovens areal bliver fældet og tilplantet på ny. Der antages desuden en årlig skovrejsning. Skovforyngelse og -rejsning kan ske med skovtype 1 – 4, med ny urørt skov eller med en blanding, hvor hver skovtype indgår med en andel.

Produktionsskov tyndes og fældes ud fra driftsmæssige betragtninger

Skovens optag vil i sagens natur kunne svinge meget fra år til år afhængig af, hvor meget der hugges netop dét pågældende år. For produktionsskov antager BioRes, at der udtyndes i træerne, og at de fældes, når de er klar til det ud fra en driftsmæssig betragtning. Hvornår dette er, afhænger af skovtypen og træernes alder og kan ikke justeres af brugeren af BioRes. Det er således ikke muligt i et scenarie at reducere hugsten i hurtigvoksende produktionsskov for at sikre et højt CO₂-optag. I stedet kan hugsten reduceres ved at lægge basisskov, altså eksisterende skov, urørt. Der kan også rejses ny urørt skov via naturlig tilgroning. Modellen har således et klart skel mellem produktionsskov og urørt skov, hvor produktionsskov har almindelig skovbrugsdrift, og urørt skov ikke hugges, men tilgodeser biodiversitets- og andre hensyn.

Der er i BioRes indbygget en antagelse om, hvor stor en andel af hugsten for de forskellige skovtyper og aldersklasser, der går til hhv. energi, tømmerproduktion og tab. Denne fordeling mellem gavntræ og træ til energi er for skovtype 1 – 4 som udgangspunkt baseret på sagsnotatet *Kulstofbinding ved skovrejsning 2020*.¹²⁶ For basisskoven er fordelingen baseret på input fra Niclas Scott Bentsen og Thomas Nord-Larsen, Københavns Universitet.¹²⁷

Skovtype 1 og 3, der primært består af løvskov, vokser relativt langsomt i starten og har derfor i de unge aldersklasser et lavere årligt CO₂-optag end de hurtigtvoksende kulturer. De årlige ændringer i skovens kulstoflager og den aldersbestemte høst fremgår af figur 9.1.



Figur 9.1 Årlig ændringer af skovens kulstoflager og den årlige høst, som er bestemt af skovtypen og træernes alder

Kilde: IGN.¹²⁸

Udviklingen i basisskoven er modelleret ud fra skovfremskrivningen fra 2022

Den eksisterende danske skov har i dag en uens aldersfordeling, hvorfor hugst, tilvækst og følgelig CO₂-balance vil ændre sig frem mod 2050. Den eksisterende danske skov har blandt andet en høj andel af hugstmodne træer, som kan forventes at blive fældet i de kommende år, og som, i de år de fældes, vil reducere skovens nettooptag af CO₂. For at tage højde for den uens aldersfordeling, er BioRes' modellering af tilvækst, hugst og leverancer af træ fra Basisskoven frem til 2050 baseret på bearbejdede data fra skovfremskrivningen fra 2022.^{129,130}

I 2024 udkom en ny skovfremskrivning, som viste et større CO₂-optag i skov end i tidligere fremskrivninger.¹³¹ Samtidig tyder skovfremskrivningen i 2024 på, at mange hugstmodne træer er blevet fældet, eller vil blive det før 2030, hvorved der kan forventes en mindre hugst og dermed et større optag i 2030 og 2035. Også på længere sigt forventes et øget optag. Dette skyldes blandt andet en ændret fremskrivningsmetode, der blandt andet påvirker estimeringen af den forventede fremtidige hugst. En væsentlig metodisk forskel er fx, at det i det i skovfremskrivningen fra 2022 blev antaget, at områder blev ryddet og genplantet, mens det i 2024 blev antaget, at enkelte træer blev udvalgt og fældet.

Når der ikke antages at ske en rydning af et område, vil de træer, der bliver tilbage på området, være ældre – og dermed generelt have et større årligt CO₂-optag, end hvis hele området var blevet ryddet. I BioRes antages det som nævnt, at et område på 1 pct. af basisskoven, hvert år ryddes og genplantes. Det giver mulighed for at skifte skovtype på arealet i et scenarie, men det betyder samtidig, at BioRes' metode adskiller sig fra den metode, der anvendes i skovfremskrivningen fra 2024, hvor det er enkelte træer og ikke områder, der fældes. Det kan betyde, at BioRes kan vurdere optaget på nogle arealer til at være lavere end hvis metoden fra skovfremskrivningen fra 2024 var blevet anvendt. BioRes vil dog samtidig kunne have et større optag på andre arealer fx de, der er forynget tidligt eller er tilplantet med hurtigtvoksende skovtyper og derfor i 2050 har træer i hurtig vækst.

Samlet set vurderes det, at en evt. undervurdering af skovens CO₂-optag som følge af anvendelsen af skovfremskrivningen fra 2022 fremfor fremskrivningen fra 2024 er af begrænset betydning set i forhold til den generelle usikkerhed og øvrige forhold, som påvirker CO₂-optaget i skoven i scenarierne fx skovareal, andel af urørt skov og skovtypefordelingen i produktionsskoven.

Høstede træprodukter udgør et midlertidigt lager

Høstede træprodukter (kaldet HWP for *Harvested Wood Products*) udgør et midlertidigt lager af kulstof i fx møbler og byggematerialer. Lageret er midlertidigt, da træprodukterne efterhånden bliver til affald eller forgår på anden vis. Kulstoffet i HWP-lageret bliver derfor gradvist frigivet igen som CO₂, hvilket medregnes som en udledning, jf. guidelines fra FN's Klimapanel.¹³²

Hastigheden, hvormed træprodukterne bliver til affald, og den bundne CO₂ frigives som en udledning, er defineret ved en halveringstid, som afhænger af typen af træprodukt. Savskåret træ antages på baggrund af guidelines fra FN's Klimapanel, at have en halveringstid på 35 år og træplader 25 år.¹³⁹ Mellem 1989 og 2021 var den gennemsnitlige fordeling af tilgangen 40 pct. til savskåret træ og 60 pct. til plader.¹³³ Efter 2021 antages fordelingen i BioRes dog at være 75 pct. til savskåret træ og 25 pct. til plader på baggrund af input fra Niclas Scott Bentsen, Københavns Universitet.¹³⁴

I BioRes beregnes den årlige tilførsel af træ til HWP-lageret ud fra den årlige hugst, som er bestemt af niveauet af skovrensning, foryngelse af basisskoven og de valgte skovtyper i scenariet. Det årlige udslip af CO₂ fra HWP-lageret beregnes ud fra halveringstiderne og fordelingen mellem savskåret træ og træplader, som angivet ovenfor. Udledningen af CO₂ fra HWP-lageret medregnes i BioRes.

Fraførslen fra HWP-lageret er affaldstræ, som i nogle tilfælde kan anvendes til energiformål. Affaldstræet fra HWP-lageret er defineret som affald, da det stammer fra produkter, der har været i brug. Affaldstræ medregnes ikke automatisk i bioenergiepotentialer i BioRes. Affaldstræ kan i nogle tilfælde genanvendes til nye produkter, hvilket i praksis vil forlænge lagringen af kulstoffet og derfor er at foretrække ud fra et klimasynspunkt.¹³⁵ Det antages dog i dette projekt, at ¾ af affaldstræet anvendes til energiformål, og dette medregnes i det bioenergiepotentiale, der leveres fra BioRes til Scenarieværktøjet. Resten af affaldstræet antages at være utilgængeligt, fordi det er rådnet, ikke indsamlet eller er blevet imprægneret, så det ikke kan afbrændes i affaldsforbrændingsanlæg.

Udledninger fra organiske jorder i skove modelleres ikke i BioRes

Vådlagte organiske jorder i skove forbliver i kategorien *Skov* i drivhusgasopgørelsen og overgår ikke til *Vådområde*. Dette princip følges i BioRes.

For 2020 blev CO₂-udledningen fra dræning af organiske jorder i skove i NIR24 opgjort til 52,2 kt C svarende til 190.000 ton CO₂ på baggrund af udledningsfaktorer fra IPCC.¹³⁶ Udledningen af lattergas og metan fra de organiske jorder blev opgjort til omkring 14 kt C svarende til ca. 50.000 ton CO₂. I alt var udledningen fra organiske jorder i skove således omkring 240.000 ton CO₂e i 2020.

BioRes medregner ikke udledninger fra organiske jorder i skove. Datagrundlaget for opgørelsen vurderes som usikkert, og det er endnu mere usikkert, hvordan udledningen vil udvikle sig frem til 2050.

I det omfang eksisterende skov lægges urørt, vil naturlige hydrologiske forhold blive genskabt i skovene. Det vil medføre faldende udledning af CO₂ fra jorderne, men til gengæld en begrænset stigning i udledningen af metan. Organiske jorder i produktionsskov vil sandsynligvis fortsat blive drænet i et vist omfang, hvilket vil medføre en fortsat udledning af CO₂. Der rejses forholdsvis meget produktionsskov i scenarierne, men primært på mineraljorder, da de organiske jorder bliver vådlagte.

Da der sandsynligvis vil være tale om en udledning af en vis størrelse fra organiske jorder i skove, er der i scenarierne for 2050 medregnet en udledning herfra svarende til halvdelen af udledningen i 2020.

10 Havbrug

Blå biomasse er organisk materiale, som udvindes af havet. Det kan være fisk, invertebrater (fx søpølser), skaldyr samt tang og alger. Ifølge en rapport fra DTU Aqua i 2021 er der et betydeligt teknisk potentiale for dyrkning af tang og muslinger og andre typer blå biomasse i de danske farvande.¹³⁷ I BioRes indgår kun tang og muslinger, hvorfor kun disse beskrives i det følgende. Dyrkning af tang og muslinger sker med såkaldt lavtrofisk akvakultur, der ikke kræver fodring i størstedelen af deres livscyklus. Som nævnt indgår drivhusgasudledninger eller -optag i havet ikke i Danmarks drivhusgasopgørelse og dermed heller ikke i BioRes.

Muslinger

Produktionen af blåmuslinger var i 2019 på 8.800 ton/år, hvoraf 80 pct. eksporteres. Muslinger udleder CO₂, men lagrer samtidig kulstof i deres kalkskaller. Hvis skallerne bliver deponeret på land i fx byggematerialer, kan optagelsen af CO₂ i skaller betragtes som en kulstofbinding, der dog er beskedent.

Muslinger kan bidrage til at øge sigtbarheden i vandet ved at fjerne planteplankton i vandsøjlen. Til gengæld kan muslingeproduktion skygge havbunde og give anledning til sedimentering af materiale. En barriere for kystnær muslingeproduktion kan være tilgængeligt areal og lokal modstand.¹³⁸ Potentialet for at dyrke muslinger til foder er væsentligt større end til konsum, da muslinger til konsum kræver en anden produktionsproces, der tillader hver enkelt musling at vokse sig større.

Tang

Der er dansk produktion af tang fire steder i landet. Det største anlæg producerer 16 ton om året. Produktet anvendes til fødevarer og foder.¹³⁹

Tang kan bruges som foder, fødevarer eller energi. Tang vokser ved at optage CO₂ fra vandet, der udveksler CO₂ med atmosfæren. Dyrkning af sukkertang binder 1,2 ton CO₂ for hvert ton høstet tang (tørstof). Tang kan øge iltindholdet i vandet, men kan også medføre ulemper som øget sedimentering og udskygning af havbunden.

Barrierer for tangproduktion i Danmark er svingende saltholdighed og problemer med begroning på tangen. Lokal modstand, rentabilitet og produktionsomkostninger er også barrierer. Disse ville kunne reduceres gennem udvikling af dyrkningsteknologi. Der mangler generelt viden om miljøeffekter ved dyrkning i stor skala. Udbyttet af tangdyrkning er 12-25 tons vådvægt pr. hektar, mens det for græs og majs typisk er 13,8 – 44,5 tons pr. hektar.

Potentialet for tang og muslinger

Det danske havområde er på 105.000 hektar. Dette omfatter de kystnære områder, samt det åbne hav, som Danmark har eneret til at udnytte. Det tekniske potentiale for muslinger i dette havområde er ifølge ovenfor nævnte rapport imellem 275.000 og 400.000 tons, imens det for tang er imellem 107.000 og 1.500.000 tons vådvægt. Potentialet vil ikke kunne udnyttes uden teknologiudvikling og økonomisk støtte. Potentialerne er vist i tabel 10.1. Såfremt der ikke prioriteres en indsats for at støtte produktionen af blå biomasse, estimeres det, at potentialet for blå biomasse i Danmark er på 100.000 tons i 2030.

De indre danske farvande er meget velegnede til lavtrofisk akvakultur, blandt andet fordi det kan ske i læ for bølger og kraftig strøm. Efter en teknologisk udvikling vil åbne farvande på sigt også kunne udnyttes fx gennem samlokalisering af vedvarende energi-anlæg og lavtrofisk akvakultur.

Tang og muslinger i BioRes

BioRes antager et potentiale på 275.000 ton muslinger og 100.000 ton tang, svarende til de lave potentialer i tabel 10.1. Disse vurderes realistiske, da de er på et højere teknologisk udviklingsstadium og har støtte i litteraturen. Videngrundlaget for de maksimale potentialer er mere usikkert, og der har ikke været muligt i dette projekt at foretage en selvstændig potentiale vurdering. Det er derfor muligt, at potentialet for produktion af muslinger og tang kan vise sig at være væsentligt højere i 2050. For produktion i 2020 og udbytte pr. hektar bruger BioRes tal fra fiskeristatistikken for 2020.¹⁴⁰

Tabel 10.1 Potentialer for dyrkning af muslinger og tang, ton vådvægt

Type af blå biomasse	Potentiale i 2030 i tre scenarier (ton vådvægt)	Potentiale i 2050 (ton vådvægt)
Blåmuslinger	13.600 (BAU)	275.000 (TRL-niveau 9)
	55.000 (Biomasse)	400.000 (off-shore TRL-niveau 6)
	235.000 (Ekstensivering)	
Sukkertang	2.400 (BAU)	100.000 (TRL-niveau 9)
	13.700 (Biomasse)	1.500.000 (TRL-niveau 6)
	78.000 (Ekstensivering)	

Anm.: De høje potentialer i 2050 bygger på off-shore produktion på 1% af DK's havareal.

Kilde: DCE¹⁴¹ og DTU Aqua¹⁴²

11 Fødevarerforbrug og forarbejdning

BioRes opgør den samlede produktion af afgrøder, husdyr og mælk fra dansk landbrug. BioRes indeholder desuden data for husdyrenes indtag af foder og danskernes indtag af forskellige typer fødevarer. I scenarierne kan kostsammensætningen ændres. Det sker ved at ændre den procentvise andel af fødevarer i kosten. BioRes omregner dette til et ændret forbrug af fødevarer målt i ton og tilpasser forbruget til ændringer i befolkningens størrelse.

Afgrøder kan bruges direkte som foder, eller de kan forarbejdes til forarbejdede foderprodukter eller fødevarer. Modellen foretager en simpel forarbejdning af visse råvarer til forarbejdede produkter. I forarbejdningsprocessen kan der produceres restprodukter, som kan anvendes til energiformål. Producerede dyr og afgrøder, som ikke forbruges af danskerne og danske husdyr, udgør et produktionsoverskud. Den overskydende produktion kan eksporteres og dermed udgøre et ressourcebidrag til andre lande.

Modellen kan foretage denne forarbejdning af råvarer til fødevarer og foder:

- Roer kan omregnes til sukker og slik til forbrug i Danmark. Eventuel yderligere produktion eksporteres som råvare.
- Korn kan omregnes til brød til fødevarer eller foderkorn til forbrug i Danmark. Eventuel yderligere produktion eksporteres som råvare.
- Græs kan omregnes til protein, græsfibre og brunsaft.
- Raps kan omregnes til rapskage og rapsolie.
- Dyr kan omregnes til kød, industri- og slagteriaffald.
- Indvejet sødmælk kan omregnes til smør, ost, konsummælk, mælkekonserves, mælk til foder og industriaffald.
- Korn, raps, soja mv. indgår i produktion af plantebaserede fødevarerprodukter.
- Korn, roer, bælgæd, m.fl. indgår i produktion af kultiveret kød og præcisionsfermenteret mælk.

Græsprodukterne, rapskagerne samt dele af den animalske produktion bruges til foder, øvrige produkter bruges til fødevarer, og restprodukter som brunsaft og industriaffald bruges til biogasproduktion. Roer benyttes i modellen til foder og til produktion af danskernes forbrug af sukker og slik som en samlet kategori.¹⁴³ Mængden af korn til brød er baseret på danskernes forbrug af hhv. hvede- og rugbrød samt kornmængderne til produktion af hver af de to produkter.

Husdyrproduktionen i BioRes består af kvæg, svin og fjerkræ. Mængden af kød, industri- og slagteriaffald i hver kategori er baseret på en rapport om industriaffald i den danske fødevarerindustri.¹⁴⁴ Kød fra de tre dyrehold forarbejdes til et enkelt produkt, fx svinekød, og der skelnes dermed ikke imellem forskellige former for forarbejdet kød (udskæring, hakket, kødpålæg, osv.). Ved produktion af kød fra de tre typer af husdyr produceres industriaffald, imens der for kvæg- og svineproduktion også produceres en mindre mængde slagteriaffald til foder.

Indvejet sødmælk fra mejerier forarbejdes til konsummælk, smør, ost og mælkekonserves. Derudover produceres der i modellen mælk til foder og industriaffald.

I BioRes kan der ligeledes produceres plantebaserede fødevarer baseret på råvarer og en simpel forarbejdning. I modellen benyttes korn, der er modellens samlekategori for forskellige korntyper herunder havre, til produktion af plantebaserede mejeriprodukter. Planteprotein produceres ved brug af bælgæd som proteinkilde suppleret af korn, grøntsager og rapsolie. Indholdet af råvarer i fødevaren er baseret på indholdet i havredrik og planteburgere fra producenten Naturli'.¹⁴⁵ Bælgæd erstatter soja som proteinkilde, da soja som udgangspunkt ikke bliver produceret i Danmark.

11.1 Råvarer til kunstigt kød og mælk

Udover produktion af de mest gængse fødevarer til konsum i dag indeholder BioRes data for forbrug af råvarer til produktion af kunstigt kød og mælk. Det gør det muligt i scenarierne at antage, at dele af den animalske produktion bliver erstattet af produktion i bioreaktorer og laboratorier.

De specifikke teknologier, som der er taget udgangspunkt i i BioRes er kultiveret kød og mælk produceret ved brug af præcisionsfermentering. Disse teknologier er valgt, fordi det færdige produkt har potentiale til at ligne de nuværende kød og mejeriprodukter på smag, tekstur og næringsindhold. Samtidig kan man ved denne produktion undgå de biologiske processer (for eksempel kvægs fordøjelse), som har en stor drivhusgasudledning. I scenarierne vil produkterne blive erstattet 1:1, dvs. 1 kg animalsk-produceret kød bliver erstattet med 1 kg kunstigt kød, og 1 kg animalsk-produceret mælk bliver erstattet af 1 kg kunstigt mælk.

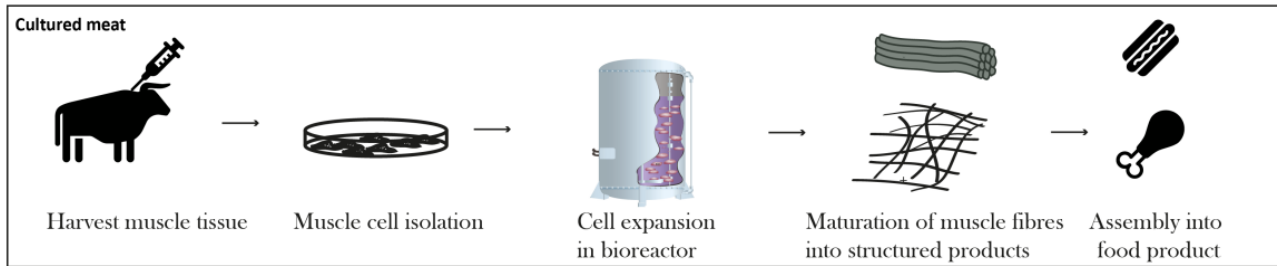
Kunstigt kød produceres ved at dyrke dyreceller i bioreaktorer

Teknologi

Kultiveret kød (kaldes også cellebaseret kød eller "in vitro" produktion) produceres ved kultivering af dyreceller i bioreaktorer. Produktet forventes at have samme proteinstruktur som konventionelt produceret kød og har dermed en højere fordøjelighed end planteprotein.¹⁴⁶

Kultiveret kød produceres typisk i en bioreaktor, hvor stamceller fra et givent dyr dyrkes med et cellemedie bestående af næringsstoffer og andre ingredienser, som skal få cellerne til at vokse. Omkostninger, miljøkonsekvenser og energibehovet i forbindelse med produktionen af kultiveret kød afhænger især af cellemediet og dets ingredienser. Mediets ingredienser varierer med produktionsmetoden og kan blandt andet være hydrolysat fra cyanobakterier, glukose fra majs eller hvede, eller protein fra soja. Desuden benyttes serum fra kalvefostre i cellemediet blandt andet i en nuværende produktion af kultiveret kød i Singapore. Ifølge en rapport fra UNEP vil brug af kalveserum dog blive udfaset i løbet af de kommende år.¹⁴⁷

For at cellerne kan vokse og omdannes til hele stykker kød, skal cellerne have et stillads at sidde fast på til opbygning af muskelfiberstrukturen. Desuden kan stilladset bidrage til tekturen af produktet. Stilladset kan bl.a. laves med præcisionsfermentering eller plantemateriale. I sidstnævnte tilfælde ville produktet kunne betragtes som et hybridprodukt, hvis andelen af stillads er relativt stor. Under væksten differentieres cellerne, og de begynder at vokse sammen til muskeltvæv. Når cellerne har udviklet sig som ønsket, høstes de og omdannes til slutproduktet.



Figur 11.1 Simplificeret oversigt over produktionsprocessen for kultiveret kød

Kilde: Norwegian Institute of Food, Fisheries and Aquaculture Research.¹⁴⁸

Outputtet fra produktionen kan være forskellige former for kød, såsom hakket okse- eller grisekød. Det er også teknisk muligt at kultivere mælk og skaldyr¹⁴⁹, men disse teknologier er ikke inkluderet i BioRes. En simplificeret fremstilling af produktionen af kultiveret kød er vist i figur 11.1.

Produktion af kultiveret kød er stadig på et tidligt stadie. Der skal, ifølge forskerne på AU, en del mere forskning og viden til for at lave produktionen omkostningseffektiv, skalerbar og produkterne af en acceptabel kvalitet for forbrugerne.¹⁵⁰ Nogle af de teknologiske udfordringer for skalerbar produktion er bl.a. en bæredygtig forsyning af næringsstoffer til cellemediet, udvikling af et optimalt miljø for cellevækst samt stilladsudvikling.¹⁵¹

Estimater for input af råvarer ved produktion af cellemedium

Ved produktion af kultiveret kød, skal der primært benyttes arealer til dyrkning af energi (kulhydrater) og protein til cellemediet.

I BioRes antages det, at der skal benyttes 400 g kulhydrater pr. kg kultiveret kød samt 285 g protein pr. kg kultiveret kød baseret på Sinke et al (2023)¹⁵². Estimaterne for kulhydrater er lavere end i lignende studier, imens mængden af proteiner er højere. Dette skyldes forskellige antagelser om cellevækst, cellemedie, produktionsdesign, m.m. Da det forventes, at der i større omfang vil være mangel på plantebaserede proteiner end kulhydrater i 2050, anses estimaterne fra Sinke et al (2023) at være de mest konservative sammenlignet med lignende studier.¹⁵³

I BioRes antages det, at cellemediets energi- og proteinkilder er korn og bælgssæd. I dag bliver glukose fra majs typisk benyttet som energikilde, imens sojaskrå typisk bliver benyttet som proteinkilde. Da majs og soja er mindre tilgængelige afgrøder i en dansk kontekst, substitueres de med korn og bælgssæd. Da kulhydrat- og proteinindholdet er forskellig fra majs og soja til korn og bælgssæd kan dette bl.a. have betydning for arealanvendelsen ved produktion af kultiveret kød i denne analysen sammenlignet med livscyklusanalyser af arealanvendelse ved produktion af kultiveret kød.

Udover energi og proteiner skal der til produktion af kultiveret kød benyttes andre ingredienser. For eksempel stamceller, vitaminer, salte og destilleret vand, som benyttes i produktionen af cellemediet. Disse ingredienser er ikke inkluderet i BioRes. Dertil er produktion af stillads heller ikke inkluderet, da der tages udgangspunkt i et rent kødprodukt fremfor et hybridprodukt. Arealanvendelsen ved produktion af kultiveret kød ville derfor alt andet lige være højere, hvis produktion af næringsstoffer og stillads var inkluderet.

Usikkerheder ved estimater for kunstigt kød

Estimaterne for produktion af et kilo kød er baseret på en livscyklusvurdering for produktion i storskala i år 2030. Estimaterne er forbundet med en betydelig mængde usikkerhed, da der endnu ikke er produktion af kultiveret kød i industriel skala. Dermed er estimaterne baseret på en række antagelser om produktionsdesign, cellevækst, valg af input, med mere, som afspejler en forventet udvikling i teknologien frem mod 2030.

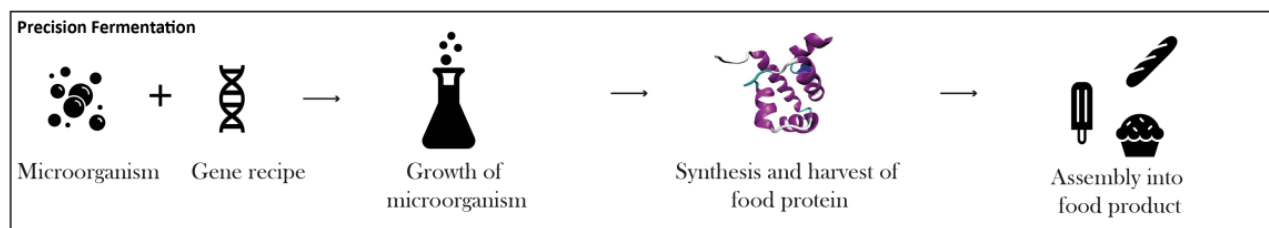
Produktionen af kultiveret kød vil forventeligt se anderledes ud i 2050 sammenlignet med 2030. Hvis kultiveret kød slår igennem som teknologi, forventes produktionen af blive effektiviseret og mængden af råvarer pr. kilo kød i 2050 forventes derfor at være lavere end i 2030. Det har imidlertid ikke været muligt at findes livscyklusvurderinger for produktionen af kultiveret kød i 2050 og det heller ikke at identificere et forskningsbaseret grundlag for at vurdere potentielle fremskridt fra 2030 til 2050. Derfor benyttes estimaterne for 2030 i BioRes.

Kunstig mælk fremstilles af genmodificerede mikroorganismer

Teknologi

Præcisionsfermenteret mælk fremstilles ved at indsætte et eller flere ønskede gener i mikroorganismer, fx bakterier, gær eller filamentøse svampe. Mikroorganismen producerer derefter det eller de ønskede proteiner, kulhydrater, fedt eller andre molekyler. Teknologien involverer altså genetisk modificerede organismer (GMO), men selve fødevarer (mælken) vil være et oprenset produkt.

Ved præcisionsfermentering produceres altså et delprodukt, fx et enkelt protein, som efterfølgende oprenses og blandes med øvrige ingredienser inklusiv plantebaserede ingredienser, hvorved selve fødevarer produceres.¹⁵⁴ Der har fx været fokus på, at producere valleprotein *beta-laktoglobulin*. Dette protein indgår fx i produkter, som mælk og is, som virksomheden *Perfect Day* sælger i USA. Andre virksomheder benytter kasein som protein i deres produktion, bl.a. den amerikanske virksomhed *New Culture*.¹⁵⁵



Figur 11.2 Simplificering af produktionen af fødevarer ved hjælp af præcisionsfermentering

Kilde: Norwegian Institute of Food, Fisheries and Aquaculture Research.¹⁵⁶

Mikroorganismer, som bruges til præcisionsfermentering, skal have næring, der får dem til at producere de ønskede stoffer. Næring kan være sukker fra sukkerrør, sukkerroer, kokosolie, solsikkeolie og lignende.¹⁵⁷ Det kan også være affalds- og sidestrømme fra virksomheder.¹⁵⁸

Præcisionsfermentering kan benyttes til at producere direkte substitutter til den animalske produktion, især mejeriprodukter, fedtstoffer og æg. Proteinerne bliver også anvendt til hybrid-produkter, hvor de indgår som en del af et plantebaseret produkt. Præcisionsfermentering kan desuden benyttes til at fremme væksten i kultiveret kød, og der er dermed et overlap imellem de to produktionsformer.¹⁵⁹ I denne analyse inkluderes kun produktionen af kunstigt mælk ved brug af præcisionsfermentering til at producere mælkeproteiner.

Præcisionsfermentering benyttes allerede i dag i produktionen af fødevarerzymer samt i medicinalindustrien. Brugen af teknologien til produktion af proteiner er dog ny. Teknologien skal dermed udvikles yderligere for at blive effektiv i stor skala til dette formål.

Råvareforbrug ved produktion af præcisionsfermenteret mælk

Til produktion af præcisionsfermenteret mælk skal der bruges energi (kulhydrater) og fedt både til fodring af mikroorganismer og til sammensætning af det endelige mælkeprodukt. Valleprotein og kasein er de primære proteiner i mælk. I BioRes tages der udgangspunkt i et estimat for råvareforbruget ved produktion af valleprotein. Udviklingen af valleprotein ved brug af præcisionsfermentering er længere fremme end produktionen af kasein. I BioRes antages det, at udviklingen af kaseinproduktionen er på niveau med produktionen af valleprotein i 2050. Der skelnes altså ikke imellem de forskellige typer af proteiner i mælk i 2050. Estimaterne for råvareforbruget er dermed ens for begge typer protein.

Udover protein, skal der til produktionen af mælk også benyttes kulhydrat, fedt, mineraler og vitaminer. Tabel 11.1 viser en oversigt over de råvare-input til produktion af mælk ved brug af præcisionsfermenteret valleprotein, som benyttes i BioRes.

Udover sukker, skal der i produktionen af valleprotein benyttes mineraler og ammoniak. Dertil er der vitaminer og mineraler i mælk. Disse øvrige ingredienser til produktionen af mælk med præcisionsfermenteret mælkeprotein er ikke inkluderet i BioRes.

Tabel 11.1 Råvareinput ved produktion af 1 kg protein og 1 kg mælk.

Slutprodukt	Afgrøde	Estimat
Protein	Kulhydrat (sukker)	6.490 g / kg protein
Mælk	Protein	3,3 g / kg mælk
	Kulhydrat	4,6 g / kg mælk
	Fedt	3,8 g / kg mælk

Kilde: Klimarådet baseret på Hamelin L. et al.¹⁶⁰

Usikkerheder ved estimater for kunstig mælk

Estimaterne for råvareforbruget til produktion af kunstigt mælk er forbundet med en betydelig usikkerhed. Råvareforbruget afhænger af en lang række antagelser om produktionsdesign samt effektivitet af produktionen, som endnu ikke er gennemtestet. Der har desuden været et meget begrænset datagrundlag tilgængeligt.

Estimaterne for produktionen af præcisionsfermenteret protein og mælk er baseret på en livscyklusanalyse for en enkelt virksomhed og dermed en specifik produktionsproces. Ifølge studiet af teknologien kan der ikke ekstrapoleres til en generel ikke-animalsk produktion af mejeriproteiner. Det kan desuden forventes, at teknologi til produktion af mælk med præcisionsfermentering ser betydeligt anderledes ud i 2050 sammenlignet med i 2023. Der er dermed en betydelig usikkerhed forbundet med estimaterne for råvareforbruget til kunstigt mælk.

11.2 Ændring af fødevarerforbrug

BioRes antager, at danskerne har en bestemt kostsammensætning, der er fastlagt med udgangspunkt i gennemsnittet for voksne i undersøgelsen *Danskernes kostvaner 2011-2013*, udgivet i 2015.¹⁶¹ Kostsammensætningen i BioRes er dog opdateret til 2020 med en udvikling mod mindre kød og mælk i kosten.¹⁶² Med dette udgangspunkt kan danskernes kostsammensætning ændres i scenariernes efterfølgende år.

Danskernes kost kan fx ændres til at være mindre baseret på kød og mere baseret på planter. Det gøres ved at angive at en procentdel af forbruget af fx oksekød, der omlægges, og hvad der omlægges til, hvilket kan være bælgæd, korn, planteprotein eller kunstigt kød. Modellen omlægger forbruget mængdemæssigt 1:1. Dette vil selvsagt ikke give den samme næringsværdi, hvis fx oksekød omlægges til korn. I stedet kan man vælge at erstatte oksekød med planteprotein af hensyn til ernæringsværdien. Derved vil BioRes indregne et større ressourcetræk på afgrøderne. Man kan også erstatte oksekød med kultiveret kød, der i BioRes hedder "kunstigt kød", og som stammer fra dyrkning af celler. Herved får forbrugeren proteiner af samme type som ved kød. BioRes har, som beskrevet ovenfor, et bagvedliggende ressourcetræk på korn og bælgfrugter, som skal til for at sikre produktionen af kultiveret kød den nødvendige mængde proteiner og kalorier.

BioRes belyser konsekvenserne af ændringer i forbrug og produktion af fødevarer og andre bioressourcer ved at beregne biomassepotentialet, drivhusgasudledningen samt et ændret produktionsoverskud.

Der kan i et scenarie etableres en sammenhæng mellem produktion og forbrug fx ved at tilpasse produktionen til et ændret forbrugsvalg. Hvis der ikke etableres en sådan sammenhæng, vil et ændret forbrugsvalg påvirke produktionsoverskuddet. Eftersom Danmark importerer mange fødevarer og har en meget stor eksport af fx svinekød, må danskernes til- og fravalg af fødevarer i sig selv antages at have relativt begrænset indflydelse på dansk landbrugsproduktionen.

Muligheden for at afkoble produktion og forbrug er dog ikke mulig for produktionen af kunstigt kød og mælk. I dette tilfælde antager modellen, at produktionen af fødevarerne følger det danske forbrug af disse. Der opgøres altså ikke et produktionsoverskud eller underskud for kunstigt kød og mælk, men kun for de afgrøder, som udgør input til produktionen. Tilsvarende gælder for produktionen af græsprotein til foder, at den producerede mængde protein kun kan bruges i Danmark.

Omstillingselementer, der indebærer ændret kostsammensætning og ændret produktion, vil begge kræve, at der tages virkemidler i brug for at realisere dem.

11.3 Bioaffald

I modellen indgår data for andelen af madaffald, som danske husholdninger og erhverv udsorterer fra restaffaldet. Modellen indeholder også mængder af madspild fra danske husholdninger og erhverv. Det gør det muligt at implementere omstillingselementerne 'øget udsortering' og 'reduceret madspild'. Modellen giver endvidere mulighed for at anvende bioaffaldet til biogas. Et mindre madspild reducerer mængden af bioaffald.

12 Danmarks globale bidrag

I scenarierne varieres der på produktion og forbrug af energi og bioressourcer. Det har konsekvenser for, hvor mange ressourcer vi trækker på fra andre lande, og hvad vi kan bidrage med til andre lande. Vi ønsker derfor at sammenligne scenariernes varierende overskud af energi og fødevarer. Det kan belyse sammenhænge mellem produktion af energi, fødevarer og foder og bidrage til en diskussion af, hvad Danmark skal bruge sit areal til. Hvad er fx konsekvenserne af at prioritere energiafgrøder frem for fødevarer? Og hvad er konsekvenserne af at omlægge fra animalsk til plantebaseret produktion?

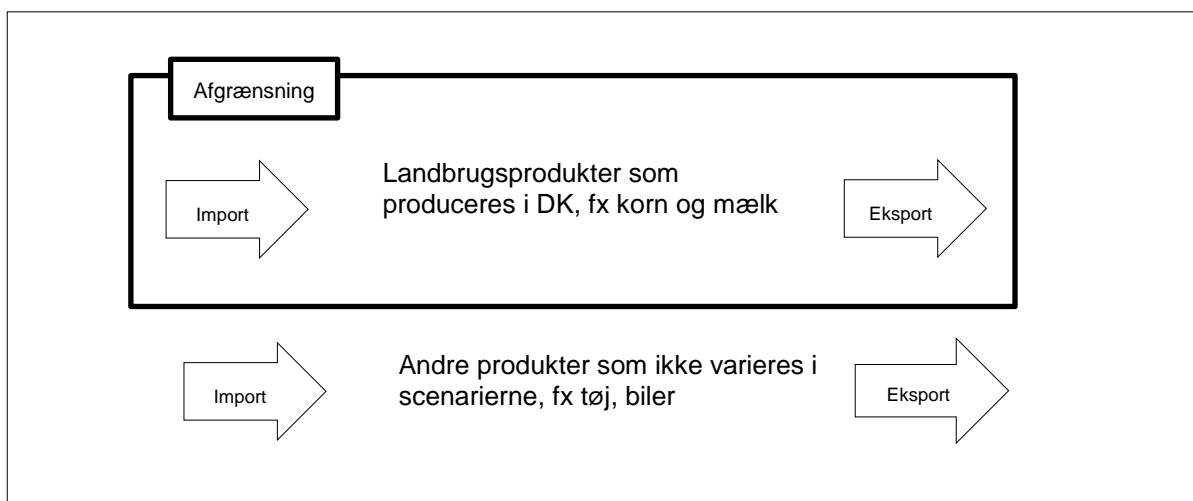
Scenarierne viser Danmarks udveksling af visse ressourcer med omverdenen

Danmark udveksler ressourcer med andre lande. Danmark kan trække på andre landes ressourcer for at opfylde behov for energi og fødevarer, herunder foder til husdyr. Danmark kan også producere varer til omverdenen fx fødevarer. BioRes opgør produktionsoverskud til omverdenen målt i ton af den enkelte type af fødevarer, foder eller biomasse. I et selvstændigt regneark omregnes produktionsoverskuddet i ton af fødevarer og foder til ernæringsværdier i form energi- og proteinindhold. Fødevarer, foder og biomasse omregnes endvidere til arealenheder.

Danmarks produktionsoverskud belyses kun for de produkter, der i scenarierne produceres flere eller færre af for at opnå klimamål. Det vil altså sige landbrugsprodukter og biogene produkter, der produceres på danske arealer. Produktionen af disse produkter påvirkes af størrelsen af arealerne til skov og landbrugsafgrøder og af afgrødefordelingen på landbrugsarealerne.

For andre typer af varer, fx tøj, møbler, elektronik, biler og ris, opgøres ressourceudvekslingen med omverdenen ikke. Analysen har således ikke hele Danmarks forbrugsbaserede klimaaftryk med. Scenarierne fokuserer på produktion og forbrug af biomasse fra landbrug herunder foder, korn, bælgfrugter, mælk og kød.

For skov indgår træbiomasse til energi i beregningen af ressourceudvekslingen med omverdenen, hvis det indgår i brugerens scenarie. Andre varer, der indeholder træ, fx møbler, kan produceres af gavntræ fra danske skove, men der opgøres ikke et produktionsoverskud af træ til møbler eller byggematerialer. Figur 12.1 illustrerer, hvad der indgår i opgørelsen af Danmarks udveksling af ressourcer med omverdenen.



Figur 12.1 Afgrensning af, hvad der indgår i opgørelsen af Danmarks udveksling af ressourcer med omverdenen.

Anm. De varer der indgår i analysen fremgår af tabel 12.1.

Kilde: Klimarådet

Afgrensningen har betydning for anvendelsen af resultaterne

I analysen beregnes dansk produktion minus dansk forbrug af landbrugsprodukter og enkelte andre biogene produkter jf. tabel 12.1. Et produktionsoverskud i en bioressourcekategori giver mulighed for eksport i den kategori. Produktionsoverskuddet er altså et mål for Danmarks potentielle ressourcebidrag til andre lande med fødevarer, foder eller biomasse. Et produktionsunderskud svarer omvendt til en import af ressourcer fra andre lande.

Beregningen egner sig til at give et billede af konsekvenserne ved fx:

- prioritering af arealer til energi eller mad,
- prioritering af animalsk eller plantebaseret landbrugsproduktion og kost,
- afgrødeskift til fx højtydende græs proteinproduktion frem for kornproduktion og sojaimport.

BioRes beregner konsekvenserne af sådanne ændringer for Danmarks territoriale drivhusgasudledning, biomasseproduktion og produktionsoverskud.

Beregningen kan ikke vise:

- samlede effekter af *hele* Danmarks produktion og forbrug,
- variationer i udbytter af afgrøder i de faktiske import- og eksportstrømme, da danskerne og danske husdyr modelmæssigt spiser danske varer først,
- konsekvenser for drivhusgasudledningerne i udlandet ved ændret import eller eksport.

Fødevarer og foder håndteres samlet

BioRes beregner den overskydende mængde foder og fødevarer, efter at danske husdyr og danskernes behov er opfyldt. Denne samlede mængde af 'spiselig biomasse' indgår i beregningen af Danmarks ressourcebidrag til omverdenen. Der skelnes ikke mellem fødevarer til mennesker og foder til dyr. Det skyldes, at formålet med beregningen er at opnå et samlet tal for ressourceudvekslingen. Desuden kan de landbrugsvarer, som im- eller eksporteres, fx bælgfrugter og korn,

typisk spises af både mennesker og dyr. Grovfoder, fx græs og halm, der kun kan spises af dyr, importeres og eksporteres som regel ikke. I scenarierne i dette projekt tilpasses produktion og forbrug af grovfoder derfor, så det ikke indgår i ressourceudvekslingen med omverdenen.

Varekategorier matches med tilsvarende kategorier i fødeveder databasen Frida

Det samlede energi- og proteinindhold i produktionsoverskuddet opgøres ved for hver varekategori at sammenholde mængden af varen fra BioRes med energi- og proteinindhold pr. vægtenhed af varen. Den primære kilde til energi- og proteinindhold er fødeveder databasen Frida, der udgives af DTU Fødeveareinstituttet.¹⁶³

Der foretages således et udtræk af fødevarer fra Frida-databasen for at matche BioRes' kategorier af fødevarer og foder. Dette gøres ved hjælp af databasens kategorisering af fødevarer. Tabel 12.1 viser de afgrøder og varer, der indgår i analysen.

Tabel 12.1 Afgrøder og varer, der indgår i opgørelsen af modellens produktionsoverskud

Afgrøder	Animalske produkter	Havbiomasse	Andre biogene produkter
Bælgsæd	Fjerkrækød	Muslinger	Juletræer
Frukt	Konsummælk	Tang	Pil
Frø (primært græsfrø)	Mælk til foder		Træ til energi
Græs	Mælkekonserves		Halm
Græsprotein	Oksekød		
Grøntsager	Svinekød		
Import af foder	Æg		
Kartofler			
Korn			
Majs, helsæd til foder			
Rapsfrø			
Rapskage			
Rapsolie			
Roer			

Anm.: Tabellen viser BioRes' varer. Det er derefter op til brugeren hvilke varer, der skal indgå i et scenarie.

Kilde: Klimarådet.

Varekategorierne i BioRes er færre og mere overordnede end varetyperne i Frida-databasen. Flere underkategorier i Frida matches derfor typisk med én kategori i BioRes. Fx er energiindholdet i forskellige typer af frukt trukket ud af Frida til beregning af et gennemsnit, der passer til kategorien *Frukt* i BioRes. Et gennemsnit af data for æg fra burhøns, frilands- og skrabehøns fra Frida bruges for kategorien *Æg* i BioRes. Et gennemsnit af tørre bælgfrugter i Frida bruges for kategorien *Bælgsæd* i BioRes, da BioRes' bælgfrugter dyrkes til modenhed.

I nogle tilfælde bruges dog tal for typiske produkter i stedet for gennemsnit. Fx anvendes data for Frida databasens kategori *Kylling, kød, rå* for kategorien *fjerkrækød* i BioRes. For svinekød anvendes et gennemsnit af to varetyper i Frida, nemlig *Grisekød, uspecificeret med 10 pct. fedt* og *Grisekød, uspecificeret med 20 pct. fedt*. *Import af foder* optræder som sin egen kategori. Kategorien består primært af sojakage, men også fx korn og bælsæd. Der er beregnet et gennemsnitligt energi- og proteinindhold i foderimporten på basis af de forskellige varer og andelen, der indgår i kategorien *Import af foder*.

For nogle varekategorier beregnes tilnærmede værdier for energi- og proteinindhold

For frø, græs, græsprotein, import af foder, mælk til foder og rapskage har det ikke været muligt at finde data i Frida-databasen. Der er derfor beregnet tilnærmede værdier for energiindholdet på baggrund af foderværdien set i forhold til korns foderværdi. Energiindholdet i frø er antaget lig græs, og energiindholdet i raps er antaget lig rapskage plus rapsolie.

For frø, græs, græsprotein, import af foder, mælk til foder, rapskage og roer har det heller ikke været muligt at finde proteinindholdet i Frida-databasen. Proteinindholdet i frø er antaget lig korn. For græs er anvendt data fra græsproteinprocessen i BioRes. For sojakage er anvendt proteinindhold som anvendt i Jørgensen m. fl.¹⁶⁴ For mælk til foder er sødmælk anvendt som tilnærmet værdi. For rapskage er anvendt halvdelen af proteinindholdet i sojakage.¹⁶⁵ For roer er der anvendt et proteinindhold fra SEGES Klimafoderdatabase.¹⁶⁶

Beregningen er grov, men forskellene mellem scenarierne er udtryk for robuste tendenser

Beregningen af produktionsoverskuddets energi- og proteinindhold er grov, da den bygger på gennemsnitlige eller tilnærmede værdier for overordnede varegrupper uden at inddrage de præcise mængder af underkategorierne. Derudover indeholder Frida-databasen varer, som danskerne spiser, herunder importerede varer, og det er usikkert i hvilket omfang data for disse varer er dækkende for tilsvarende varer dyrket i Danmark.

I BioRes' beregning af *produktion minus forbrug* indgår både forarbejdede fødevarer, såsom kød, og råvarer som korn og roer. Rest- og spildprodukter fra forarbejdningen indgår som en ressource i modellen. Nogle af de råvarer, der optræder i produktionsoverskuddet som råvarer, er i realiteten forarbejdede, og der kan derfor være et spild af energi eller protein, som ikke er modelleret. Varerne repræsenterer derfor det samlede energi- og proteinindhold, som ellers ville være fordelt på forarbejdede produkter og restprodukter.

Ovenstående betyder, at opgørelsen af energi- og proteinindholdet i produktionsoverskuddet skal betragtes som et groft overslag, der er behæftet med usikkerhed. Da det er de samme data, der anvendes for alle scenarier vurderes forskelle mellem scenarierne imidlertid til at være udtryk for robuste tendenser.

Produktionsoverskuddets tilknyttede areal opgøres for hvert scenarie

Produktion af afgrøder sker på et areal. Det gælder både afgrøder til fødevarer og foder og for afgrøder og træ til energi. Som led i opgørelsen af Danmarks produktionsoverskud, omregnes dette fra mængder til et tilknyttet areal i hektar. Arealet opgøres ved at sammenholde BioRes' mængder af afgrøder for hver kategori med udbyttefaktorer for hver afgrøde. Der anvendes primært udbyttedata for 2020 fra FAO's Statistik.¹⁶⁷

Globale gennemsnitsudbytter

Der anvendes globale gennemsnitsudbytter for verden. Der er et væsentligt metodevalg. Alternativt kunne der være taget udgangspunkt i hvilke lande (eller regioner) i verden, der øger eller sænker produktionen for hver af de pågældende afgrøder. Der er meget store forskelle i udbytter i de forskellige dele af verden, hvorfor en anvendelse af meget lave eller meget høje udbytter, i stedet for gennemsnit, ville ændre resultaterne markant.

Hele arealanvendelsen tilskrives i beregningen til primærafgrøderne. Det betyder, at der ikke knyttes en arealanvendelse specifikt til restprodukter såsom affald, slam, gylle, halm og produkter heraf. Restprodukternes arealanvendelse er således inkluderet i beregningen via primærafgrøderne.

Fremskrivning af udbytter

Der anvendes udbyttedata fra FAO for 2020 for omregningen til arealer. Da BioRes antager en udbyttetigning på 19,5 pct. frem til 2050, kan dansk produktion i 2050 komme til at se urimeligt effektiv ud sammenlignet med importerede varer. Der justeres for dette ved at forhøje udbyttefaktorer fra FAO med den samme udbyttetigning, som er anvendt i BioRes for de nationale udbytter. Metoden vil give et resultat, der formentlig stadig favoriserer dansk produktion frem for udlandets, da andre lande må forventes at kunne opnå nogle af de udbyttetigninger, Danmark har været blandt de første til at opnå. Det vurderes dog ikke at være et problem for sammenligning af resultaterne indbyrdes mellem scenarierne.

Kategorisering af afgrøder

Det er nødvendigt at foretage en kategorisering af visse afgrøder fra FAO's Statistik. For afgrødegrupperne bælgssæd, frugt og grøntsager findes en tilsvarende kategori i BioRes. For korn og frø er der foretaget et udtræk fra FAO's Statistik for at beregne et gennemsnit, som matcher BioRes' kategorier. For øvrige afgrøder findes et passende match til kategorien i BioRes.

I opgørelsen af scenariernes nettobidrag af areal til udlandet indgår alle afgrøder i tabel 12.1. Det er dog ikke alle ovenstående kategorier, der findes et produktionsoverskud af i scenarierne. Der tages højde for, at korn og majs har forskellige udbytter, når det produceres til henholdsvis modenhed og til foderensilage. Kategorien *Korn* i BioRes indeholder både *Korn til modenhed* og *Majs til modenhed*. For græs findes der ikke udbyttedata i FAO's Statistik. Der vælges derfor samme udbytte for dansk græs som anvendt i scenarierne.

Beregning af arealanvendelse for træ

Sammenlignet med etårige afgrøder er det for træbiomasse sværere opgøre hvor stort et areal, der er forbundet med produktionen. Det skyldes, at en skov producerer både gavntre og træbiomasse til energi over mange år på det samme areal. Træbiomasse til energi betragtes ofte som et restprodukt ved produktion af gavntre, men da det ofte udgør en stor del af produktionen, og også giver et økonomisk afkast, kan det med rimelighed betragtes som et biprodukt. I en skov ændrer udbyttet pr. hektar sig løbende over årene efter træernes alder. Det er muligt at intensivere skovdriften, hvorved der kan produceres mere træbiomasse til energi på det samme areal. Størrelsen af det anvendte areal er derfor bestemt af et komplekst dynamisk samspil mellem forskellige faktorer, herunder priser på træprodukter og træbiomasse, alternative arealanvendelser samt politiske rammebetingelser og klimatiske forhold.

I dette projekt anvendes en simpel faktor for hvor meget areal, der i dag bruges til at producere træbiomasse. Faktoren er baseret på en gennemsnitlig skov i EU. Ifølge en rapport fra EU-Kommissionens forskningscenter, JRC, er den gennemsnitlige årlige tilvækst før hugst i EU's skove 4,9 m³ pr. hektar. Den gennemsnitlige hugst er 4 m³ pr. hektar.¹⁶⁸

Hvis der tages udgangspunkt i hugsten på 4 m³ pr. hektar er arealanvendelsen 0,25 ha pr. m³. Hvis 1 m³ vejer 0,6 ton kræver produktion af 1 ton træbiomasse altså 0,42 ha. Dette er et "statisk" regnestykke baseret på tal for perioden 2020-2025, hvor arealanvendelsen allokeres ud fra mængderne og beregningen sker ud fra de nuværende skove og den nuværende skovdrift i EU27.

Skovens nettotilvækst i EU steg fra 3 m³ pr. hektar pr. år i 1950 til omkring 5,1 m³ pr. hektar pr. år i 2005. Tilvæksten forblev stabil fra 2005 til 2015 og det er nu forventet, at den falder til omkring 4,8-4,9 m³ pr. hektar pr. år i perioden 2020-2025. Regnestykket gælder derfor for indeværende 10-år og ikke for fx 2050, hvor skovdriften og andre forhold kan have ændret sig. Da det ikke vides, hvordan skovens tilvækst i EU vil udvikle sig frem til 2050, holdes arealanvendelsen pr. ton træbiomasse dog konstant i beregningerne.

13 Forenklinger og usikkerheder

BioRes er en forsimplet model af virkeligheden. Modellens resultater for drivhusgasudledning og biomasseproduktion i 2050 vil derfor være behæftet med stor usikkerhed. Dette vil gælde for alle scenarieberegninger så langt frem i tiden ikke mindst af så komplekse sektorer som landbrug og LULUCF. For disse sektorer er der i forvejen en række generelle usikkerheder knyttet til beregning af udledningerne.^{169, 170} Stor usikkerhed skal ikke forhindre forsøg på at beregne konsekvenser af en fremtidig udvikling. Der er dog vigtig at gøre sig klart, at forenklinger kan føre til over- eller undervurderinger. De vigtigste forsimplelser og usikkerheder i BioRes-modellen fremgår derfor nedenfor.

- **Udledninger fra kulstofrige jorder.** Der er ikke antaget en mineralisering af jorderne i perioden frem til 2050 og eksisterende emissionsfaktorer er anvendt. Nye emissionsfaktorer er undervejs, men er endnu ikke udkommet.
- **Udledninger, der ikke modelleres:** Lattergasudledninger fra mineralisering og CO₂ fra kalkning modelleres ikke, ligesom små udledninger fra anden kulstofholdig gødning (spildevandsslam og industrislam) og urea ikke medregnes. Udledninger fra arealer med bebyggelse og infrastruktur medregnes heller ikke.

- **Forsimpleret repræsentation af husdyr.** Modellen indeholder kun kvæg, svin og fjerkræ. Andre typer husdyr er udeladt. Der er ikke antaget en udvikling af husdyrenes produktivitet i modellen. Deres udledning, ydelse og foderindtag er derfor på 2020-niveau. For malkekøer er der således set bort fra, at deres mælkeydelse, udledning og foderindtag forventes at stige.
- **Udledninger og optag i basisskov.** Den gennemsnitlige danske skov i 2020 kaldes *basisskov* i modellen. Data for udviklingen i høst og lager i basisskoven er udarbejdet af IGN på basis af Skovfremskrivning 2022. I BioRes er der et mindre optag fra skoven i 2020 end der blev indberettet til FN's klimakonvention i dette år. Det skyldes, at man i de historiske år, og dermed i indberetningen til FN i NIR 2023, regner med løbende 5 års perioder med rapporteringsåret som det sidste år. De tal, der indgår i BioRes, er derimod gennemsnit af en anden 5 års periode nemlig 2020 – 2025. Samtidig er tallene behæftet med stor statistisk usikkerhed.
- **Udledninger fra kulstofholdige jorde i skove.** Modellen indeholder kun kulstofholdige jorde på landbrugsarealet. Der findes også drænede organiske jorde i skove, som er kilde til udledninger, og som kunne vådlægges. Der er medregnet en udledning på halvdelen af den nuværende udledning fra disse jorder, men de indgår ikke eksplicit i modellen på grund af et usikkert datagrundlag.
- **Forsimpleret modellering af udledninger fra arealer.** Ændrede udledninger eller optag på landbrugsarealer er, på grund af Klimavirkemiddelkataloget, modelleret som en konstant ændret nettoudledning eller -optag over 30 år, selv udledningen reelt ændres dynamisk over lange tidsperioder. Det betyder, at den ændrede årlige nettoudledning/optag bliver medregnet i 2050, som er det år, der regnes frem til i scenarierne, men de vil samtidig ophøre kort efter 2050.
- **Sammenhæng mellem kulstofpuljer og øget udbytte.** Det antages i scenarierne, at der sker en generel udbyttestigning på 19,5 pct. fra 2020 - 2050. Denne stigning antages forsimplet ikke at føre til øget kulstofbinding i jorden, idet det antages, at der sker en tilsvarende øget fraførsel af kulstof via høst.
- **Der ses bort fra vejrforhold.** BioRes indgår der ikke en modellering af vejrforhold, hvorfor det ikke er muligt at tage højde for påvirkningen herfra. Der ses derfor bort fra ændringer som skyldes ændrede vejrforhold, stigende temperaturer eller ændrede regnmængder.
- **Kvælstofnormer.** Det antages, at marker gødskes op til kvælstofnormen for den pågældende afgrøde. Lattergasudledningen fra gødskningen beregnes på basis af lattergasudledningen i 2020 fra de dyrkede afgrøders gødningsnormer i 2020. Der ses således bort fra ændringer i udnyttelsen af kvælstofnormerne.
- **Udnyttelseskrav ved brug af organisk gødning.** Der ses bort fra udnyttelseskrav til husdyrgødning og andre former for organisk gødning. Disse former for gødning antages således at have et udnyttelseskrav på 100%. I realiteten er der lavere udnyttelseskrav til organisk gødning, hvilket betyder, at der kan spredes mere N på markerne indenfor kvælstofnormen ved brug af organisk gødning, end der kan ved brug af mineralsk gødning, der har et udnyttelseskrav på 100%. Denne effekt er ikke medregnet i BioRes. Modellen er i stedet kalibreret, så lattergasudledningerne passer med udledningen i 2020. Men i scenarier, hvor der i 2050 bioafgasses mere husdyrgødning og andre typer af biomasse, kan modellen undervurdere mængden af kvælstof, der spredes på markerne, og dermed potentielt også lattergasudledningerne fra anvendelsen af den organiske gødning, herunder husdyrgødning og afgasset biomasse fra biogasanlæg.
- **Kategorisering af afgrøder.** BioRes har en grov kategorisering af afgrøder og fødevarer. Forsimplingen af afgrødetyper i BioRes betyder fx at "korn" repræsenterer alle korntyper inkl. vinter- og vårsæd. På samme måde dækker fx frugt og bælgssæd over alle underkategorier i de dertilhørende hovedkategorier i Danmarks Statistiks tabel.
- **Råvareinputtet til produktion af kunstigt kød og mælk.** Råvareinputtet til produktion af kultiveret kød og præcisionsfermenteret mælk er forsimplet i BioRes-modellen. Blandt andet er der ikke inkluderet produktion af vitaminer eller stillads i produktionen af kultiveret kød. Såfremt stilladset er plantebaseret, kan dette dermed skabe større arealeffekter end der opgøres i BioRes. Til

gengæld er det fornødne proteinbehov til produktionen af kultiveret kød i BioRes baseret på et relativt konservativt estimat.

Forskellen mellem BioRes' beregning af udledningerne fra skov, landbrug og arealer i 2020 og Danmarks klimaregnskab fra NIR 2023, fremgår af Tabel 13.1 nedenfor.

Tabel 13.1 Sammenligning mellem BioRes' beregning af udledningerne i 2020 og Danmarks Klimaregnskab

IPCC udledningskategorier (CRF)			NIR 2023 (2020)	BioRes (2020)	Difference	Årsag til difference
Sektor	CRF	Beskrivelse		Mio. ton CO ₂ e		
Landbrug	3A	Husdyrenes fordøjelse	4,12	3,95	-0,2	Heste, får mm. er ikke med i BioRes
Landbrug	3B	Gødningshåndtering	3,76	3,67	-0,1	Heste, får mm. er ikke med i BioRes
Landbrug	3D	Lattergas på marken	4,25	4,16	-0,1	Enkelte underkategorier indgår ikke i BioRes
Landbrug	3F	Afbrænding af planterester	0,00	0,00	0,0	Indgår ikke i BioRes
Landbrug	3G	Kalkning	0,25	0,00	-0,3	Indgår ikke i BioRes
Landbrug	3H	Urea	0,00	0,00	0,0	Indgår ikke i BioRes
Landbrug	3I	Anden kulstofholdig gødning	0,00	0,00	0,0	Indgår ikke i BioRes
LULUCF	4A	Skov	-2,15	-0,46	1,7	Anden tidsperiode, nyere tal i BioRes og stor statistisk usikkerhed.
LULUCF	4B	Dyrkede marker	2,82	1,36	-1,5	Delvist: nye tal for kulstofrige jorder
LULUCF	4C	Græsarealer	2,20	1,87	-0,3	Delvist: nye tal for kulstofrige jorder
LULUCF	4D	Vådområder	0,16	0,03	-0,1	Udledning fra vådlagte arealer medregnes kun for nye områder i BioRes
LULUCF	4E	Bebyggelse	0,24	0,00	-0,2	Indgår ikke i BioRes
LULUCF	4G	Høstede træprodukter	-0,12	-0,13	0,0	
Total			15,54	14,41	-1,1	

Kilde: Klimarådet og Danmarks drivhusgasopgørelse¹⁷¹

Data for produktion minus forbrug

BioRes beregning af produktionsoverskuddet er også forsimplet. Nedenfor kommenteres kompletheden af BioRes-modellens data for produktion minus forbrug:

- **Drikkevarer.** Danskernes indtag af drikkevarer, som kan indeholde fx sukker, korn og frugt, er ikke fratrukket produktionen af landbrugsvarer i BioRes-modellen. Det kan give en lille overestimering af produktionsoverskuddet. Det fremgår dog af Statistikbanken NIO1, at landbrugets leverancer til drikkevareindustrien kun udgør 1 pct. af den samlede landbrugsleverance til industrier.¹⁷² Det vurderes, at udeladelsen af drikkevarer er acceptabel set i lyset af modellens øvrige usikkerheder.
- **Fisk.** Der indgår ikke produktion af fisk i scenarierne. Produktionen af fisk er ikke indarbejdet i BioRes, og modellen kan derfor heller ikke give brugbare data for produktion minus forbrug af fisk. Dette håndteres ved at antage at forbruget af fisk er konstant i alle scenarier, på samme måde som fx forbruget af ris. Det vurderes derfor uproblematisk, at produktionen af fisk ikke indgår. Fiskeriets og fiskeindustriens energiforbrug er inkluderet i Klimarådets samlede scenarier.
- **Træ til materialer.** BioRes-modellen indeholder produktion af gavntræ fra danske skove (Harvested Wood Products, HWP). Gavntræ kan blandt andet bruges til møbler og byggematerialer. Modellen indeholder dog ikke danskernes samlede forbrug af træ til materialer fx af importerede planker eller møbler. Dermed kan modellen heller ikke give data for produktion minus forbrug af træ til materialer.
- **Forarbejdning.** BioRes-modellens resultater for produktion minus forbrug indeholder en modellering af råvarer, således at forbrug af forarbejdede fødevarer fratrækkes producerede råvarer. Dette gøres for korn, kød, sukker, ost, smør og madolie. Alle husdyr er fx forarbejdet til kød i modellen. Men der indgår ikke en forarbejdning af frugt og grønt i BioRes.
- **Industriproces.** I BioRes-modellens resultater for produktion minus forbrug er en stor del af produkterne råvarer. Der er indlagt en forarbejdningsproces i modellen, som gør det muligt at trække indtaget af forarbejdede varer som svarer til de producerede råvaremængder. Men for resten af råvarerne, viser modellen produktionsoverskuddet i råvarer. For eksempel er produktionsoverskuddet af mejerivarer opgjort i mængder af mælk og ikke i mængder af mælk, ost og smør. Det vurderes uproblematisk, da beregninger af nettoeksportens ernæringsværdi og areal så blot skal repræsentere råvarernes egenskaber. Så længe danskernes indtag er fratrukket produktionen, er det ikke så afgørende, om råvarerne eksporteres direkte eller undergår en industriproces først.
- **Udbytter og udbyttestigning.** Der er usikkerhed forbundet med de anvendte udbyttetal og med den forventede udbyttestigning for afgrøder både i Danmark og globalt. Det har blandt andet betydning for omregning af scenariernes produktionsoverskud til et tilknyttet areal.

Som det fremgår af tabel 13.1, er udledningerne i 2020 fra Landbrug og LULUCF 1,1 millioner ton lavere i BioRes end rapporteret i Danmarks drivhusgasopgørelse 2023. Dette skyldes, at BioRes er en forenklet model, der ikke genskaber alle aspekter af Danmarks drivhusgasopgørelse. BioRes undervurderer generelt udledningernes størrelse, undtagen for skov, hvor det er skovens CO₂-optag, der undervurderes. Det vurderes, at der for 2050 vil være både over- og undervurderinger, der delvist vil opveje hinanden.

Hvem har vi talt med?

I arbejdet med analysen har Klimarådet og Klimarådets sekretariat haft drøftelser med en række organisationer og eksperter, herunder: Steen Gyldenkerne, Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE), Aarhus Universitet, Mette Hjorth-Mikkelsen, Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE), Aarhus Universitet, Rikke Albrechtsen, Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE), Aarhus Universitet, Trine Anemone, Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE), Aarhus Universitet, Lærke Worm Callisen, Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE), Aarhus Universitet, Gregor Levin, Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet, Uffe Jørgensen, Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug (DCA), Aarhus Universitet, Søren Ugilt, Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug (DCA), Aarhus Universitet, Christian Friis Børsting, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab - ANIVET Kvægmærning (RUN), Aarhus Universitet, Niclas Scott-Bentsen,

Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning (IGN), Københavns Universitet, Thomas Nord-Larsen, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning (IGN), Københavns Universitet, Tobias Pape Thomsen, Institut for Mennesker og Teknologi, Roskilde Universitet, Jette Young, Institut for Fødevarer, Aarhus Universitet, Margrethe Therkildsen, Institut for Fødevarer, Aarhus Universitet, Nina Aagaard Poulsen, Institut for Fødevarer, Aarhus Universitet, Lotte Bach Larsen, Institut for Fødevarer, Aarhus Universitet, Peter Ruhdal Jensen, Fødevareinstituttet, DTU, Hanna Tuomisto, Helsinki Institute of Sustainability Science, University of Helsinki, Morten Ambye-Jensen, Department of Biological and Chemical Engineering, Aarhus Universitet, Nicholas John Hutchings, Department of Agroecology - Climate and Water, Aarhus Universitet, Innovationscenter for Økologisk Jordbrug, Miljøministeriet, Landbrugsstyrelsen, Stiesdal, CONCITO og Danmarks Naturfredningsforening.

14 Referencer

- ¹ Energy Modelling Lab, *DK-BioRes 2.0*, 2024. (<https://energymodellinglab.com/supporting-the-council-on-climate-change/>).
- ² Steen Gyldenkerne (DCE, AU), Mette Hjorth Mikkelsen (DCE, AU), Rikke Albrektsen (DCE, AU), Trine Anemone Andersen (DCE, AU), Lærke Worm Callisen (DCE, AU), Uffe Jørgensen (DCA, AU), Niclas Scott-Bentsen (IGN, KU) og Thomas Nord-Larsen (IGN, KU).
- ³ Pedersen, A. N., Christensen, T., Matthiessen, J., Knudsen, V. K., Sørensen, M. R., Biltoft-Jensen, A. P., Hinsch, H., Ygil, K. H., Kørup, K., Saxholt, E., Trolle, E., Søndergaard, A. B., Fagt, S., *Danskernes kostvaner 2011-2013*, 2015, DTU Fødevareinstituttet.
- ⁴ Energy Modelling Lab, *DK-BioRes 2.0*, 2024, (<https://energymodellinglab.com/supporting-the-council-on-climate-change/>).
- ⁵ Rasmussen, C., Mortensen, E. Ø., Wenzel, H., Ambye-Jensen, M., Jørgensen, U., *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*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ⁶ Mortensen, E. Ø., & Jørgensen, U., *Forudsætninger for og beregninger af 2030 scenarier for arealanvendelse og biomasseproduktion i landbruget*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ⁷ Gylling, M., Nord-Larsen, T., Bruhn, A., Thomsen, M., Ambye-Jensen, M., Mortensen, E. Ø., Jørgensen, U., *Potential Danish biomass production and utilization in 2030*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ⁸ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ⁹ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁰ Energistyrelsen, *Klimastatus og -fremskrivning 2023*, 2023.
- ¹¹ Klima-, Energi og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2024*, 2024.
- ¹² Personlig kommunikation med Uffe Jørgensen, februar 2024.
- ¹³ Rasmussen, C., Mortensen, E. Ø., Wenzel, H., Ambye-Jensen, M., Jørgensen, U., *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*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁴ Danmarks Statistik, *Statistikbanken, FRLD123*, 2023.
- ¹⁵ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet. Annex 3D Agriculture, Table 13.
- ¹⁶ Danmarks Statistik, *Statistikbanken, HDYR07*, Data for 2020 hentet i 2024.
- ¹⁷ Klima-, Energi og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2024*, 2024.
- ¹⁸ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁹ Energistyrelsen, *Biomasseindberetning 2016-2022*, u.å., (https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Bioenergi/biomasseindberetning_2016-2022.xlsx., Sommer 2020-sommer 2021).
- ²⁰ Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Bentsen, N. S., *Kulstofbinding ved skovrejsning 2020: Sagsnotat*, 2020, IGNM, Københavns Universitet.

- ²¹ Bentsen, N. S. og Nord-Larsen, T., *Konsulenthjælp til skovmodellering – input til BioRES*, 2023.
- ²² Johannsen V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Bentsen, N. S., *Kulstofbinding ved skovrejsning 2020: Sagsnotat*, 2020, IGNM, Københavns Universitet.
- ²³ Bentsen, N. S. og Nord-Larsen, T., *Konsulenthjælp til skovmodellering – input til BioRES*, 2023.
- ²⁴ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ²⁵ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ²⁶ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ²⁷ Beucher, A., Weber, P. L., Hermansen, C., Pesch, C., Koganti, T., Møller, A. B., Gomes, L., Greve, M., Greve, M. H., *Updating the Danish peatland maps with a combination of new data and modeling approaches*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ²⁸ Gyldenkerne, S., Callisen, L.W., *Notat om emissionsestimater for organiske jorder historisk (1990-2022) og i fremskrivningen (2023-2040)*, 2024, DCE, Aarhus Universitet.
- ²⁹ Gyldenkerne, S., Callisen, L.W., *Notat om emissionsestimater for organiske jorder historisk (1990-2022) og i fremskrivningen (2023-2040)*, 2024, DCE, Aarhus Universitet.
- ³⁰ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ³¹ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ³² Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ³³ Regeringen m.fl., *Aftale om nye krav for anvendelsen af energiafgrøder til produktion af biogas af 30. juni 2021*, 2021.
- ³⁴ Europa-parlamentet og Rådet, *Direktiv (EU) 2023/2413 af 18 oktober 2023 om ændringer af direktiv (EU) 2018/2001, forordningen (EU) 2018/1999 og direktiv 98/70/EF for så vidt angår fremme af energi fra vedvarende energikilder om og ophævelse af Rådets direktiv (EU) 2015/652*, 2023.
- ³⁵ Larsen, S. U. m.fl., *Kortlægning af potentiale og barrierer ved energipil*, 2015, AgroTech.
- ³⁶ Personlig kommunikation med Uffe Jørgensen, Aarhus Universitet, februar 2024.
- ³⁷ Niras, *Kortlægning af biomasser til biokul og CO₂-potentialer*, 2023, (https://cipfonden.dk/wp-content/uploads/2023/06/NIRAS-biomasse-rapport_til-udgivelse.pdf).
- ³⁸ Klimarådet, *Danmarks fremtidige arealanvendelse*, 2024.
- ³⁹ Pers. komm. af Steen Gyldenkerne, DCE, Aarhus Universitet, januar 2024.
- ⁴⁰ Klima-, Energi og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2024*, 2024.
- ⁴¹ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ⁴² Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023 DCA, Aarhus Universitet.
- ⁴³ 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. og Vinther, F. P., *Græsdyrknings klima- og miljøeffekter*, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet, 2016.

Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Pedersen, B. F., Rasmussen, J., Christensen, B. T., Jørgensen, U., & Eriksen, J., *Muligheder for reduktion af næringsstoffab i græsrigge sædskifter*, 2018, DCA, Aarhus Universitet.

⁴⁴ Energistyrelsen, *Klimastatus – og fremskrivning 2023*, 2023.

⁴⁵ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.

⁴⁶ Olesen, J. E., Jørgensen, U., Hermansen, J. E., Petersen, S. O., Søegaard, K., Eriksen, J., Schjøning, P., Greve, M.H., Greve, M. B., Thomsen, I. K., Børgesen, C. D. og Vinther, F. P., *Græsdyrknings klima- og miljøeffekter*, Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet, 2016.

⁴⁷ Danmarks Statistik, *Statistikbanken, HALM1: Halmudbytte og halmanvendelse efter område, afgrøde, enhed og anvendelse*, 2024

⁴⁸ Mortensen, E. Ø., & Jørgensen, U., *Forudsætninger for og beregninger af 2030 scenarier for arealanvendelse og biomasseproduktion i landbruget*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.

⁴⁹ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.

⁵⁰ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.

⁵¹ Mortensen, E. Ø., & Jørgensen, U., *Forudsætninger for og beregninger af 2030 scenarier for arealanvendelse og biomasseproduktion i landbruget*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.

⁵² Klimarådet, *Baggrundsnotat om landbrugets omstilling ved en drivhusgasafgift*, 2023.

⁵³ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.

⁵⁴ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.

⁵⁵ Miljøministeriet og Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri: *Hurtigere fra laboratoriet til marken og stalden, Strategier for tekniske reduktionspotentialer på landbrugsområdet, Metan reducerende foder*. 2023.

⁵⁶ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.

⁵⁷ DCA, *Undersøgelse af metan-reducerende foder til køer*, 2023, (<https://dca.au.dk/aktuelt/nyheder/vis/artikel/undersogelse-af-metan-reducerende-foder-til-koeer>).

⁵⁸ DCA, *Undersøgelse af metan-reducerende foder til køer*, 2023, (<https://dca.au.dk/aktuelt/nyheder/vis/artikel/undersogelse-af-metan-reducerende-foder-til-koeer>).

⁵⁹ Johannsen, V. K., *Klimaeffekter af urørt skov og anden biodiversitetsskov: Sagsnotat*, 2019, IGN, Københavns Universitet.

⁶⁰ Danmarks Statistik, *Arealopgørelser*, (<https://www.dst.dk/da/Statistik/emner/miljoe-og-energi/areal/arealopgoerelser>).

⁶¹ Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet, *Basemap*, (<https://envs.au.dk/faglige-omraader/samfund-miljoe-og-ressourcer/arealanvendelse-og-gis/basemap>).

⁶² Danmarks Statistik, *Statistikbanken, AREALDK*, 2023.

⁶³ Danmarks Statistik, *Arealopgørelser*, (<https://www.dst.dk/da/Statistik/emner/miljoe-og-energi/areal/arealopgoerelser>).

⁶⁴ Nord-Larsen, T., Johannsen, V.K., Riis-Nielsen, T., Thomsen, I. M., & Jørgensen, B. B., *Skovstatistik 2020*, 2021, IGN, Københavns Universitet.

⁶⁵ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L.,

- Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ⁶⁶ Ejrnæs, R., Bladt, J. & Fløjgaard, C., *Potentialet for at reservere 30 % af landarealet til beskyttede og strengt beskyttede områder i Danmark*, 2022, DCE, Aarhus Universitet.
- ⁶⁷ Biodiversitetsrådet, *Mod robuste økosystemer – anbefalinger til en dansk lov om biodiversitet*, 2023.
- ⁶⁸ Gregor Levin, DCE, Personlig kommunikation, 1. 9. 2023.
- ⁶⁹ Gregor Levin, DCE, Personlig kommunikation, 1. 9. 2023.
- ⁷⁰ Danmarks Statistik, Statistikbanken, *AFG05*, data for 2020 trukket i 2023.
- ⁷¹ Danmarks Statistik, *Statistikbanken, OEKO11*, data for 2020 trukket i 2023.
- ⁷² Personlig kommunikation med Uffe Jørgensen, Aarhus Universitet, februar 2024.
- ⁷³ Danmarks Statistik, *Statistikbanken, HDYR07*, 2024.
- ⁷⁴ Danmarks Statistik, *Statistikbanken, HDYROEKO*, data for 2020 trukket i 2023.
- ⁷⁵ Klima-, Energi og Forsyningsministeriet, *Klimastatus og -fremskrivning 2024*, 2024.
- ⁷⁶ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Baunbæk, L., & Hansen, M.G., *Denmark's National Inventory Report 2022*, 2022, DCE, Aarhus Universitet.
- ⁷⁷ Energistyrelsen, *Klimastatus og -fremskrivning 2023*, 2023.
- ⁷⁸ DTU Fødevareinstituttet, *frida, version 5.1*, 2023.
- ⁷⁹ NORFOR, (<http://feedstuffs.norfor.info/>); Seges, *Klimafoderdatabase*, 2017, (<https://www.klimafoderdatabase.dk/Fodermidler/>).
- ⁸⁰ Mortensen, E. Ø., & Jørgensen, U., *Forudsætninger for og beregninger af 2030 scenarier for arealanvendelse og biomasseproduktion i landbruget*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ⁸¹ Gyldenkerne, S., Callisen, L.W., *Notat om emissionsestimer for organiske jorder historisk (1990-2022) og i fremskrivningen (2023-2040)*, 2024, DCE, Aarhus Universitet.
- ⁸² Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ⁸³ Jørgensen, U., Kristensen, T., Jørgensen, J.R., Kongsted, A.G., De Notaris, C., Nielsen, C., Mortensen, E.Ø., Ambye-Jensen, M., Jensen, S. K., Stødkilde-Jørgensen, L., Dalsgaard, T.K., Møller, A.H., Sørensen, C.G., Asp, T., Olsen, F.L., Gylling, M., *Green biorefining of grassland biomass*, 2021, DCA, Aarhus Universitet.
- ⁸⁴ Børgesen, C. D., Dalgaard, T., Pedersen, B. F., Kristensen, T., Jacobsen, B. H., Jensen, J. D., Gylling, M., & Jørgensen, U., *Kan reduktionsmålsætninger for nitratudvaskning til Limfjorden opfyldes ved øget dyrkning af biomasse*, 2018, DCA, Aarhus Universitet.
- ⁸⁵ Energistyrelsen, *Biomasseindberetning 2016-2022*, u.å., (https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Bioenergi/biomasseindberetning_2016-2022.xlsx).
- ⁸⁶ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ⁸⁷ Energistyrelsen, *Biomasseindberetning 2016-2022*, u.å., (https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Bioenergi/biomasseindberetning_2016-2022.xlsx).
- ⁸⁸ Tafdrup, S., *Biomasse og biogas fra gyllebiogasanlæg i 2020-2021*, 2022.
- ⁸⁹ Ea Energianalyse, *Anvendelse af biogas til el- og varmeproduktion*, 2014; Gylling, M., Olsen, F. L., Hagelund, A., Jakobsen, A. B., *Analyse af det eksisterende og potentielle råvaregrundlag og forarbejdsningsteknologier til produktion af biopolymerer*, 2019, IFRO, Københavns Universitet; Miljøministeriet, *Livscyklusvurdering og samfundsøkonomisk analyse for anvendelsen af spildevandsslam*, 2013.
- ⁹⁰ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ⁹¹ Andersen, M. N., Adamsen, A. P., Hansen, E. M., Thomsen, I. K., Hutchings, N. J., Elsgaard, L., Jørgensen, U., Munkholm, L., Børgesen, C.D., Sørensen, P., Petersen, S. O., Lærke, P. E., Olesen, J. E., Børsting, C. F., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Maigaard, M., Villumsen, T. M., Dalby, F. R., Kai, P., Nørremark, M., Blicher-Mathiesen, G., Audet, J., Bruus, M., Krogh, P. H., Kronvang, B., Winding, A., Kristensen, H. L., *Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget – 2023*, DCA, Aarhus Universitet, 2023.
- ⁹² Olesen, J. E., Møller, H. B., Petersen, S. O., Sørensen, P., Nyord, T. og Sommer, S. G., *Bæredygtig biogas – klima og miljøeffekter af biogasproduktion*, DCA, Aarhus Universitet, 2020.
- ⁹³ IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management, 2019.

- ⁹⁴ Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B., & Baldock, J., *Greenhouse Gas Inventory Model for Biochar Additions to Soil*, 2021, *Environmental Science & Technology*, 55(21), 14795–14805.
- ⁹⁵ Niras, *Kortlægning af biomasser til biokul og CO₂-potentialer*, 2023, (https://cipfonden.dk/wp-content/uploads/2023/06/NIRAS-biomasse-rapport_til-udgivelse.pdf).
- ⁹⁶ Elsgaard, L., Adamsen, S. A. P., Henrik, B., Møller, B. H., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, Ø. E., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, N. M., Thers, H., Sørensen, P., Dilnessa, A. A., Elofsson, K., *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ⁹⁷ Niras, *Kortlægning af biomasser til biokul og CO₂-potentialer*, 2023, (https://cipfonden.dk/wp-content/uploads/2023/06/NIRAS-biomasse-rapport_til-udgivelse.pdf); Kamp, A., Karlson, M. B., Thomsen, T. P., *Styrket grundlag for vurdering af klimaeffekter ved pyrolyse af tre forskellige typer af biomasse*, 2023, Roskilde Universitet; Personlig kommunikation med Jesper Ahrenfeldt, Stiesdal Skyclean.
- ⁹⁸ CIP fonden, *Vejen til effektiv CO₂-lagring med biokul*, 2024.
- ⁹⁹ Kamp, A., Karlson, M. B., Thomsen, T. P., *Styrket grundlag for vurdering af klimaeffekter ved pyrolyse af tre forskellige typer af biomasse*, 2023, Roskilde Universitet.
- ¹⁰⁰ Personlig kommunikation med Tobias Pape Thomsen, RUC.
- ¹⁰¹ CIP fonden, *Vejen til effektiv CO₂-lagring med biokul*, 2024.
- ¹⁰² Elsgaard, L., Adamsen, S. A. P., Henrik, B., Møller, B. H., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, Ø. E., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, N. M., Thers, H., Sørensen, P., Dilnessa, A. A., Elofsson, K., *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁰³ Energistyrelsen, *KP22 Teknisk Reduktionspotentiale og Omstillingshastighed, TRP27: Biokul fra pyrolyse af halm mm.*, 2022.
- ¹⁰⁴ Elsgaard, L., Adamsen, S. A. P., Henrik, B., Møller, B. H., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, Ø. E., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, N. M., Thers, H., Sørensen, P., Dilnessa, A. A., Elofsson, K., *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁰⁵ Data fra Stiesdal.
- ¹⁰⁶ Kamp, A., Karlson, M. B., Thomsen, T. P., *Styrket grundlag for vurdering af klimaeffekter ved pyrolyse af tre forskellige typer af biomasse*, 2023, Roskilde Universitet.
- ¹⁰⁷ Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B., & Baldock, J., *Greenhouse Gas Inventory Model for Biochar Additions to Soil*, 2021, *Environmental Science & Technology*, 55(21), 14795–14805.
- ¹⁰⁸ Elsgaard, L., Adamsen, S. A. P., Henrik, B., Møller, B. H., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, Ø. E., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, N. M., Thers, H., Sørensen, P., Dilnessa, A. A., Elofsson, K., *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁰⁹ Niras, *Kortlægning af biomasser til biokul og CO₂-potentialer*, 2023, (https://cipfonden.dk/wp-content/uploads/2023/06/NIRAS-biomasse-rapport_til-udgivelse.pdf).
- ¹¹⁰ Jensen, J.L., Thers, H., Elsgaard, L., *Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biokul i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser*, 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹¹¹ Jensen, J.L., Elsgaard, L., *Data om kulstoflagring fra udbragt husdyrgødning*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹¹² Taghizadeh-Toosi, A., *C-TOOL, A simple tool for simulation of soil carbon turnover - Technical report*, 2015, Aarhus Universitet.
- ¹¹³ Seges, *Viden om kulstofbalancemodellen C-TOOL*, 2021, (https://projekter.seges.dk/-/media/projectreport/projectdocuments/promilleafgiftsfonden-for-landbrug/promilleafgiftsfonden-for-landbrug---2021/7854/pm_21_7854_ap2_viden_om_kulstofbalancemodellen_ctool.ashx).
- ¹¹⁴ UNFCCC, *Report of the individual review of the annual submission of Denmark submitted in 2010*, 2011, (<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2011/arr/dnk.pdf>).
- ¹¹⁵ UNFCCC, *Report of the individual review of the annual submission of Denmark submitted in 2011*, 2012, (<https://unfccc.int/sites/default/files/resource/docs/2012/arr/dnk.pdf>).
- ¹¹⁶ IPCC, *2019 Refinements to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volumen 4, Appendix 4 Method for Estimation the Change in Mineral Soil Organic Carbon Stocks from Biochar Amendments: Basis for Future Methodological Development*, 2019.
- ¹¹⁷ Jensen, J.L., Thers, H., Elsgaard, L., *Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biokul i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser*, 2022.
- ¹¹⁸ Jensen, J.L., Elsgaard, L., *Data om kulstoflagring fra udbragt husdyrgødning*, 2023.
- ¹¹⁹ Energistyrelsen, *KP22 Teknisk Reduktionspotentiale og Omstillingshastighed, TRP27: Biokul fra pyrolyse af halm mm.*, 2022.
- ¹²⁰ Personlig kommentar fra Tobias Pape Thomsen, RUC.
- ¹²¹ Elsgaard, L., Adamsen, S. A. P., Henrik, B., Møller, B. H., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, Ø. E., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, N. M., Thers, H., Sørensen, P., Dilnessa, A. A., Elofsson, K., *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture* 2022, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹²² SEGES Innovation: *Vejledning i anvendelse af biokul på landbrugsjord*, 2023.
- ¹²³ CIP fonden, *Regulering mv. af biokul, Baggrundsnotat nr. 1*, 2024.
- ¹²⁴ Miljøministeriet, *Vandområdeplanerne 2021-2027*, 2023, (<https://mim.dk/media/njvlvhax/vandomraadeplanerne-2021-2027-22-9-2023.pdf>).

- ¹²⁵ Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Bentsen, N. S., *Kulstofbinding ved skovrejsning 2020: Sagsnotat*, 2020, IGN, Københavns Universitet.
- ¹²⁶ Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Bentsen, N. S., *Kulstofbinding ved skovrejsning 2020: Sagsnotat*, 2020, IGN, Københavns Universitet.
- ¹²⁷ Bentsen, N. S., Nord-Larsen, T., *Konsulenthjælp til skovmodellering – input til BioRES*, 2023
- ¹²⁸ Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Bentsen, N. S., *Kulstofbinding ved skovrejsning 2020: Sagsnotat*, 2020, IGN, Københavns Universitet.
- ¹²⁹ Bentsen, N. S., Nord-Larsen, T., *Konsulenthjælp til skovmodellering – input til BioRES*, 2023
- ¹³⁰ Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Bentsen, N. S., *Opdatering af skoufremskrivning: Forventet drivhusgasregnskab for de danske skove 2020-2050*, 2022, IGN, Københavns Universitet.
- ¹³¹ Nord-Larsen, T., Brownell II, P. H., Johannsen, V. K., *Forest Carbon Pool Projections 2024*, 2024, IGN, Københavns Universitet.
- ¹³² IPCC, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use*, 2006.
- ¹³³ Bentsen, N. S., Nord-Larsen, T., *Konsulenthjælp til skovmodellering – input til BioRES*, 2023.
- ¹³⁴ Niclas Scott Bentsen, personlig kommunikation i mail af 30. Januar 2024.
- ¹³⁵ Besserer, A.; Troilo, S.; Girods, P.; Rogau, Y.; Brosse, N. *Cascading Recycling of Wood Waste: A Review*. Polymers 2021.
- ¹³⁶ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrechtsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Levin, L., Callisen, L.W., Andersen, T.A., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Baunbæk, L., & Hansen, M.G. *Denmark's National Inventory Report 2024. Emission Inventories 1990-2022*, 2024, DCE, Aarhus Universitet.
- ¹³⁷ Petersen, J.K., Bruhn, A., Behrens, J.W., Dalskov, J., Larsen, E., Thomsen, M. & Vinther, M., *Vidensyntese om blå biomasse. Potentialer for ny og bæredygtig anvendelse af havets biologiske ressourcer*, 2021, Institut for Akvatiske Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet.
- ¹³⁸ Petersen, J.K., Bruhn, A., Behrens, J.W., Dalskov, J., Larsen, E., Thomsen, M. & Vinther, M., *Vidensyntese om blå biomasse. Potentialer for ny og bæredygtig anvendelse af havets biologiske ressourcer*, 2021, Institut for Akvatiske Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet.
- ¹³⁹ Petersen, J.K., Bruhn, A., Behrens, J.W., Dalskov, J., Larsen, E., Thomsen, M. & Vinther, M., *Vidensyntese om blå biomasse. Potentialer for ny og bæredygtig anvendelse af havets biologiske ressourcer*, 2021, Institut for Akvatiske Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet.
- ¹⁴⁰ Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, Fiskeristyrelsen, *Statistik for akvakultur i Danmark*, 2020.
- ¹⁴¹ Bruhn, A., Maar, M., Holbach, A. M. & Thomasen, M., *Arealanvendelse og bioøkonomi – forudsætninger for og beregninger af 2030-scenarier. Marin biomasse*. 2022, DCE, Aarhus Universitet.
- ¹⁴² Petersen, J.K., Bruhn, A., Behrens, J.W., Dalskov, J., Larsen, E., Thomsen, M. & Vinther, M., *Vidensyntese om blå biomasse. Potentialer for ny og bæredygtig anvendelse af havets biologiske ressourcer*, 2021, Institut for Akvatiske Ressourcer, Danmarks Tekniske Universitet.
- ¹⁴³ Landbrug og Fødevarer, *Dyrkning af sukkerroer*, u.å., (<https://lf.dk/viden-om/landbrugsproduktion/planter/dyrkning-af-sukkerroer/>).
- ¹⁴⁴ Borum, A., Mogensen, L., Kristensen, T., Hammershøj, M., Jørgensen, J.R., Bertelsen, M.G., Sørensen, J.N., Edelenbos, M., Kidmose, U., *Food Waste in the Danish Primary Production and Food Industries*, 2018, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁴⁵ Naturli', *Produkter*, 2024, (<https://www.naturli-foods.dk/produkter/>).
- ¹⁴⁶ Juul, L., Møller, A.H., Dalsgaard, T.K., *Analyse af 'grønne' proteiner til fødevarer*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁴⁷ United Nations Environment Programme, *What's Cooking? An assessment of the potential impacts of selected novel alternatives to conventional animal products – Frontiers 2023*, 2023.
- ¹⁴⁸ Rønning, S. B., *Precision food production – tomorrows sustainable food production with less land use*, Agri-Food & Climate Circle May 2023 (konference), 2023.
- ¹⁴⁹ United Nations Environment Programme, *What's Cooking? An assessment of the potential impacts of selected novel alternatives to conventional animal products – Frontiers 2023*, 2023.
- ¹⁵⁰ Juul, L., Møller, A.H., Dalsgaard, T.K., *Analyse af 'grønne' proteiner til fødevarer*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁵¹ Tuomisto, H., Ellis, M., Haastrup, P., *Environmental impacts of cultured meat: alternative production scenarios*, 2014, In Conference Proceedings: R. Schenck, D. Huizenga, editor(s). Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment in the Agri-Food Sector. Vashon, WA, (USA): ACLCA; p. 1360-1366, JRC91013.
- ¹⁵² Sinke, P., Swartz, E., Sanctorum, H., van der Giesen, C. & Odegard, I., *Ex-ante life cycle assessment of commercial-scale cultivated meat production in 2030*, 2023, The International Journal of Life Cycle Assessment, 28, 234-254.
- ¹⁵³ Tuomisto, H. L., Allan, S. J., & Ellis, M. J., *Prospective life cycle assessment of a bioprocess design for cultured meat production in hollow fiber bioreactors*, 2022, Science of the Total Environment, 851, 158051; Mattick, C. S., Landis, A. E., Allenby, B. R., & Genovese, N. J., *Anticipatory life cycle analysis of in vitro biomass cultivation for cultured meat production in the United States*, 2015, Environmental science & technology, 49(19), 11941-11949.
- ¹⁵⁴ Juul, L., Møller, A.H., Dalsgaard, T.K., *Analyse af 'grønne' proteiner til fødevarer*, 2023, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁵⁵ New Culture, *How we do it*, 2023, (<https://www.newculture.com/how/>).

- ¹⁵⁶ Rønning, S. B., *Precision food production – tomorrows sustainable food production with less land use*, Agri-Food & Climate Circle May 2023 (konference), 2023.
- ¹⁵⁷ Good Food Institute, *The science of fermentation*, 2023, (<https://gfi.org/science/the-science-of-fermentation/>).
- ¹⁵⁸ DTU, *Vi kan fremstille alt*, 2023, (<https://www.dtu.dk/newsarchive/2023/03/vi-kan-fremstille-alt>).
- ¹⁵⁹ Good Food Institute, *Excutive summary, 2021 state of the industry report, Fermentation: Meat, seafood, eggs, and dairy*, (https://gfi.org/wp-content/uploads/2022/04/Executive-summary_Fermentation_2021-State-of-the-Industry-Report.pdf).
- ¹⁶⁰ Hamelin L, Cellier C., *Life Cycle Assessment of animal-free whey protein production by fermentation*, 2022.
- ¹⁶¹ Pedersen, A. N., Christensen, T., Matthiessen, J., Knudsen, V. K., Sørensen, M. R., Biltoft-Jensen, A. P., Hinsch, H., Ygil, K. H., Kørup, K., Saxholt, E., Trolle, E., Søndergaard, A. B., Fagt, S., *Danskernes kostvaner 2011-2013*, 2015, DTU Fødevareinstituttet.
- ¹⁶² Fagt, S., Langwagen, M., Biltoft-Jensen, A., *Mere bæredygtighed i hverdagen? Det går langsomt med at købe mere grønt og mindre kød og mælk*, 2023, DTU Fødevareinstituttet.
- ¹⁶³ Danmarks Tekniske Universitet, *Fødevarerdata Version 5.0*, 2023.
- ¹⁶⁴ Jørgensen, U., Kristensen, T., Jensen, S. K., Ambye-Jensen, M., *Bidrag til MOF spg. 8 i forbindelse med beslutningsforslag 15*, 2020, DCA, Aarhus Universitet.
- ¹⁶⁵ Jespersen, L. M., *Perspektivering af analyserne om "Næringsstofforsyning- og recirkulering i økologisk jordbrug", "Markedet for økologiske produkter", "Grønne proteiner til fødevarer og foder", samt "Plantebranchens virksomheder og udviklingsbehov" i relation til en fordobling af det økologiske areal og marked*, 2023, Aarhus Universitet, 2023, (https://icrofs.dk/fileadmin/icrofs/Vidensynteser_2023/Perspektiveringsrapport_rapport_3_01.pdf).
- ¹⁶⁶ Seges, *Klimafoderdatabase*, (www.klimafoderdatabase.dk).
- ¹⁶⁷ Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Faostat Production Crops and livestock products*, 2023, (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>).
- ¹⁶⁸ Avitabile V m.fl.: *Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. Integrated assessment*, 2023, Publications Office of the European Union.
- ¹⁶⁹ Klimarådet, *Kommentering af Klimastatus og -fremskrivning 2022*, 2022.
- ¹⁷⁰ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ¹⁷¹ Nielsen, O.-K., Plejdrup, M. S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M. H., Albrektsen, R., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H. G., Levin, L., Callisen, L. W., Andersen, T. A., Johannsen, V. K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S. B., Baunbæk, L., Hansen, M. G., *Denmark's National Inventory Report 2023*, 2023, DCE, Aarhus Universitet.
- ¹⁷² Danmarks Statistik, *Statistikbanken NIO1*, 2023.