

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

Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug

Claus Rasmussen¹, Esben Øster Mortensen¹, Henrik Wenzel², Morten Ambye-Jensen³ & Uffe Jørgensen¹

¹Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet, ²Institut for Grøn Teknologi, Syddansk Universitet,

³Institut for Bio- & Kemiteknologi, Aarhus Universitet

Datablad

Titel:	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
Forfatter(e):	Adjunkt Claus Rasmussen, Institut for Agroøkologi, AU; Ph.d. Studerende Esben Øster Mortensen, Institut for Agroøkologi, AU; Professor Henrik Wenzel, Institut for Grøn Teknologi, SDU; Lektor Morten Ambye-Jensen, Institut for Bio- og Kemiteknologi, AU; Professor Uffe Jørgensen, Institut for Agroøkologi, AU
Fagfællebedømmelse:	Lektor Johannes Ravn Jørgensen, Institut for Agroøkologi, AU, Seniorforsker Henrik B. Møller, Institut for Bio- og Kemiteknologi, AU
Kvalitetssikring, DCA:	Specialkonsulent Susanne Hansen, DCA Centerenheden, AU
Rekvirent:	Landbrugsstyrelsen, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM)
Dato for bestilling/levering:	22.03.2022/ 09.12.2022
Journalnummer:	2022-0354261
Finansiering:	Besvarelsen er udarbejdet som led i "Rameaftale om forskningsbaseret myndighedsbetjening" indgået mellem Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM) og Aarhus Universitet under ID nr. 6.22 i "Ydelsesaftale Planteproduktion 2022-2025". SDUs bidrag er finansieret via en særskilt kontrakt mellem Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri og SDU.
Ekstern kommentering:	Ja. Det Nationale Bioøkonomipanel har fået præsenteret foreløbige resultater ved et møde 9/6 2022. Deres kommentarer til rapporten kan findes via dette LINK .
Eksterne bidrag:	Ja. Professor Henrik Wenzel fra Institut for Grøn Teknologi ved Syddansk Universitet (SDU) har bidraget til rapporten.
Kommentarer til besvarelse:	<p>Projektet har været fulgt af Det Nationale Bioøkonomipanel, som består af en række deltager fra danske universiteter, erhvervet og interesseorganisationer.</p> <p>Besvarelsen er første gang leveret 01.09.22. I nærværende notat er tabellerne 4 og 5 reviderede som følge af en fejl i tidligere leveret notat. Yderligere er teksten enkelte steder i notatet blevet præciseret. Dette notat erstatter dermed den tidligere leverede besvarelse.</p> <p>Rapporten præsenterer resultater, som ved udgivelsen ikke har været i eksternt peer review eller er publiceret andre steder. Ved en evt. senere publicering i tidsskrifter med eksternt peer review vil der derfor kunne forekomme ændringer.</p>

Citeres som:

Rasmussen, C., Mortensen, E.Ø., Wenzel, H., Ambye-Jensen, M. & Jørgensen, U. 2022. Scenarier for anvendelse af biomasseressourcer i fremtidens produktionssystemer for fødevarer, energi og materialer inden for rammerne af gældende politik for landbrug, miljø, klima, natur og energi. 54 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 09.12.2022.

Rådgivning fra DCA:

Læs mere på <https://dca.au.dk/raadgivning/>

Forord

Landbrugsstyrelsen (LBST) har i en bestilling sendt til DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug ved Aarhus Universitet (AU) ønsket en rapport om bioressourcer, der kan anvendes til forskellige formål indenfor den grønne omstilling. Samtidig ønsker LBST, at der tages højde for eksisterende og alternative anvendelser af bioressourcer, samt mulige synergier mellem forskellige raffineringsteknologier og målsætninger indenfor CCS og CCU.

Til dette formål ønsker LBST at AU vurderer ressourcegrundlaget for biomasse nu og potentialerne i 2030 og 2050. Yderligere er AU blevet bedt om at kvantificere anvendelsen af bioressourcer nu og i 2030 samt i 2050.

Rapporten skal danne grundlag for anbefalinger fra Det Nationale Bioøkonomipanel til regeringen om bioressourcer til grøn omstilling. Analysen er således et bidrag til implementering af de tekniske reduktionspotentialer, der indgår i aftale om grøn omstilling af dansk landbrug og i regeringens strategi for Power to X (PtX) samt kulstoffangst og lagring.

Syddansk Universitet (SDU) har bidraget til arbejdet via en særskilt kontrakt med Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri.

Arbejdet blev koordineret af Professor Uffe Jørgensen, AU.

Indhold

Forord.....	4
1. Introduktion	6
2. Formål med analysen.....	6
3. Overblik over bioressourcernes nuværende anvendelse	6
Energisektoren.....	8
Materialer	8
Energienheder.....	8
4. Overordnet metodetilgang	8
5. Politikker, mål og andre styrende hensyn.....	9
6. Betydende udviklingstendenser.....	9
7. Scenarier for efterspørgsel efter kulstofholdige brændsler, brændstoffer, råvarer og materialer.....	10
8. Scenarier for biomassepotentialet	13
Globalt biomassepotentiale	17
9. Systemdesigns og konverteringsscenarier	17
9.1 Bioraffinering og kaskadeudnyttelse.....	17
9.2 Systemdesigns og konverteringsscenarier i energi- og materialesystemet.....	20
10. Effekter af biomassescenarier på natur, miljø og klima.....	26
11. Referencer	28
Appendix 1: Sankey diagrammer over kaskadeudnyttelse og bioraffinering.....	31
Appendix 2: Systemdesigns - konverteringsscenarier.....	41

1. Introduktion

Dette notat viser resultater af analyser og scenarier for anvendelse og prioritering af nationale biomasseressourcer i fremtidens natur-, energi- og materialesystem og integreret i fremtidens fødevarer-system. Der er mange mulige udviklingsveje for fremtidens arealanvendelse, og derfor er analysen baseret på forskellige scenarier, som dels indeholder en fremskrivning af den nuværende arealanvendelse, dels en bæredygtig optimering af produktionssystemerne med henblik på øget samlet kulstoffangst og produkter til bioøkonomien, og endelig et scenarie med fokus på at skabe mere plads til natur. Endvidere er analyseret effekterne af at reducere husdyrholdet med 20 og 50 % i henholdsvis 2030 og 2050. Notatet skal dermed bidrage til arbejdet med at analysere og diskutere implementeringen af udviklingsinitiativerne i *Aftale om grøn omstilling af landbruget* fra oktober 2021 (Regeringen 2021).

2. Formål med analysen

- At opstille scenarier for efterspørgslen efter kulstoffoldige brændsler, brændstoffer, råvarer og materialer i fremtidens danske energi- og materialesystemer
- At opstille scenarier for art og omfang af danske biomasseressourcer, der i fremtiden forventes at kunne være anvendelige og tilgængelige til miljø-, energi- og materialeformål – altså ressourcer ud over de, der anvendes til føde og foder
- At opstille scenarier for biomasseressourcernes rolle i at dække efterspørgslen under hensyntagen til samspillet med alternative måder at dække efterspørgslen på
- At vurdere effekter af scenarierne på natur, miljø og klima.

Alternativer til biomasse-baserede brændsler, brændstoffer, råvarer og materialer kan dels være ikke-kulstofbaserede løsninger som elektrificering eller brint- og ammoniak-baserede løsninger, dels Power-to-X (PtX) løsninger til kulstoffoldige stoffer, hvor kulstoffet hidrører fra CO₂ i røggasser, biogas og andre punktkilder eller fra atmosfæren.

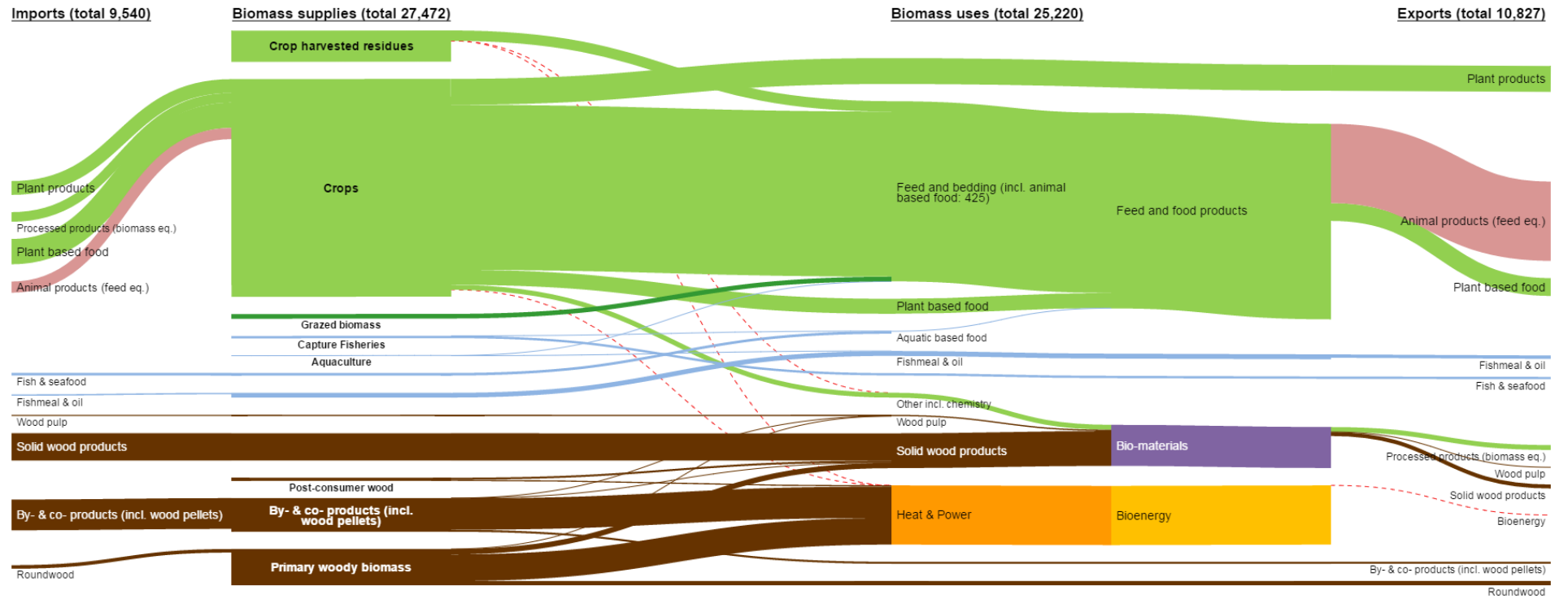
3. Overblik over bioressourcernes nuværende anvendelse

Biologiske ressourcer er fornybare og opstår ved, at planter fotosyntese omdanner solenergi, CO₂ og næringsstoffer til plantemateriale. Biologiske ressourcer, der stammer fra arealer med land- og skovbrug, kan benævnes primære bioressourcer, som herefter kan anvendes til fx fødevarer, foder, materialer, kemikalier og energi.

Primære bioressourcer, der anvendes i Danmark, stammer enten fra danske arealer eller er importeret fra andre lande. Danmark eksporterer ligeledes biomasseprodukter. I en generisk oversigt over biomassestrømme i EU28 angiver Joint Research Centre under EU Kommissionen (Gurría et al., 2017), at Danmark havde en årlig bioressourceproduktion på godt 27 mio. tons tørstof + en import på knap 10 mio. tons biomasse (tørstof), hvor træprodukter og fødevarer udgjorde ca. halvdelen hver. Den danske eksport var ca. 11 mio. tons (tørstof), hvoraf fødevarer udgjorde langt det meste og heraf udgjorde animalske produkter ca. 2/3 (Fig. 1).

Det samlede danske areal er på 4,3 mio. ha, hvoraf omkring 0,6 mio. ha. Er optaget af byer og veje, 0,6 mio. ha er skov, mens ca. 2,6 mio. ha. Er landbrugsland (www.statistikbanken.dk). Det øgede pres på bioressourcen for dels at udfylde akutte behov for energi, dels at bidrage til en langsigtet CO₂-neutralitet, gør at kampen om arealerne intensiveres. Dette skal særligt ses i lyset af et samtidigt ønske om øgede naturarealer, fx EU's 2030 Biodiversitetsstrategi med en målsætning om at 30 % af Unionens areal skal være naturbeskyttet areal, 10% af landbrugsarealet skal indeholde biodiversitetsrige elementer og 25 % af landbrugsarealet skal være dyrket efter økologiske principper.

Biomass balances in Denmark, Last data available
1000 T of dry matter



Source: data from the BIOMASS project, European Commission – Joint Research Center
Please note: Supply and use figures might not match due to estimation errors, stock changes, waste and/or loss of biomass or differences in the data sources used

Figur 1. Biomasseflow opgjort for Danmark i 2013 af JRC under EU-kommissionen (Gurría et al., 2017; https://datam.jrc.ec.europa.eu/datam/mashup/BIOMASS_FLOWS/)

Energisektoren

Energisektoren spiller en stor rolle i det samlede danske forbrug af bioressourcer. Det samlede energiforbrug i Danmark var på 656 Petajoules (PJ) i 2020 (Energistyrelsen, 2021). Heraf stod biomasse (træpiller, flis, brænde, træaffald, halm og *bionedbrydeligt* affald) for 148 PJ (svarer til ca. 7,8 mio. tons tørstof). Halm udgjorde 19 PJ, *bionedbrydeligt* affald 23 PJ og resten var træbiomasse, hvoraf hovedparten var træpiller. Der blev i 2020 importeret ca. 65 PJ træbrændsler (svarende til ca. 3,4 millioner ton træetørstof) til Danmark.

Af den samlede energiproduktion stod biogas for 21,4 PJ i 2020 og andelen har været stigende fra 4,3 PJ i 2010 (Energistyrelsen, 2021). Biogas er en vigtig spiller i den cirkulære bioøkonomi via teknologiens bidrag til recirkulering af næringsstoffer til jordbruget. Andre former for bioenergi bidrager oftest ikke til cirkularitet, fordi næringsstoffer går tabt i processen. Aske fra forbrænding kan i princippet recirkuleres og indeholder fosfor, kalium og mikronæringsstoffer, mens kvælstof tabes med røggassen. Men recirkulering af aske sker kun i meget begrænset omfang, bl.a. fordi der ofte er for høje indhold af tungmetaller.

Brændstoffer til transportsektoren aftager ligeledes bioressourcer i Danmark. Der anvendtes i 2020 10,9 PJ biodiesel og -ethanol.

Materialer

Træprodukter er allerede et betydeligt marked enten som anvendelse til møbler, konstruktion, interiør m.m. (se Figur 1). Byggeriets anvendelse af biogene materialer kan udvides ganske meget (Rasmussen et al., 2022). Forbruget af papir og pap er betydeligt og kan omregnes til en energiværdi på ca. 20 PJ, men der mangler dog nye kilder herpå. Mange andre materialer, som hidtil har været fossilt baserede, er under udvikling fx emballage, bioplast m.m., men har foreløbigt begrænset volumen.

Energienheder

I dette notat har vi opgjort biomassepotentialer i dels tørstofmængder, dels i Joule (Gigajoules, GJ).

1 ton tørstof = ca. 18 GJ = ca. 450 kg kulstof

Energiindholdet af forskellige biomasser varierer dog noget, og vi har benyttet 19 GJ/ton tørstof for træ, 18 GJ/ton tørstof for halm og 35 GJ/ton rapsolie.

4. Overordnet metodetilgang

Analysen er ikke en stringent, kriteriebaseret optimeringsmodel, dertil har budget og tidsramme ikke været tilstrækkelig. Analysen forsøger derimod at opstille nogle transparente og forudsætningsbaserede scenarier for fremtidige biomassepotentialer, og nogle lige så transparente og forudsætningsbaserede scenarier for fremtidig efterspørgsel af kulstofholdige brændsler, brændstoffer, råvarer og materialer. Disse scenarier er opstillet på baggrund af forfatterernes ekspertise og eksisterende studier og litteratur for fremtidens landbrug, skovbrug og havbrug på den ene side og fremtidens energi- og materialesystemer på den anden side.

Dernæst er disse udbuds- og efterspørgselsscenarioer kombineret til nogle systemdesignscenarier – eller konverteringsscenarier – hvor ressourcerne af biomasse, CO₂, el og brint på udbudssiden, dels anvendes til at fremme natur- og miljøhensyn, dels konverteres til brændsler, brændstoffer, råvarer og materialer til at dække efterspørgselssiden – i samspil med og integreret i fødevarer- og foderproduktion.

I bestræbelsen på at afklare biomasseressourcernes rolle, anvendelse og prioritering har indgået nogle væsentlige styrende hensyn, især de bindende politiske rammer og mål, som dansk og international klima- og energipolitik sætter for udviklingen af fremtidens energi- og materialesystemer. Men også andre politikområder og mål har fået indflydelse på både biomassepotentialernes art og størrelse og deres anvendelse, fx mål for dansk arealanvendelse, herunder politiske beslutninger om øget skovareal,

øget økologisk landbrugsareal, øget naturareal og mål for beskyttelse mod udsivning af næringsalte til vandmiljøet.

5. Politikker, mål og andre styrende hensyn

En række politiske mål og betingelser er et væsentligt grundlag for prioriteringer og opsætning af de fremtidige scenarier. Af hensyn til at udspænde et løsningsrum og etablere et godt grundlag for diskussion og fortolkning har vi dog inkluderet et spektrum af scenarier, som ikke nødvendigvis alle opfylder alle målsætninger. Vi har i mindre eller større grad i de forskellige scenarier taget afsæt i følgende mål og hensyn:

- Aftalen om grøn omstilling af dansk landbrug (Regeringen, 2021)
- Nationale danske mål for reduktion af drivhusgasudledning i 2030 og 2050 (Regeringen, 2020)
- Danske mål for omlægning af energisystemet, herunder
 - Mål om et system, der er uafhængigt af fossile brændsler i 2050 (Regeringen, 2020)
 - Regeringens PtX strategi og målet om etablering af 4-6 gigawatt (GW) elektrolysekapacitet i Danmark inden 2030 (Energy Supply, 2022)
- Internationale klimamål, inkl. behov for negativ emission inden 2050 (IPCC, 2022)
- At fastholde eller øge markjordens kulstofindhold¹ i forhold til det aktuelle niveau (dette vil dog påvirkes af stigende temperaturer i fremtiden, hvilket vi ikke har forsøgt at kvantificere)
- Bidrage til EU's vandrammedirektiv og opfyldelse de nationale vandområdeplaner 2021-2027 (EU Kommissionen, 2000)
- Gældende natur- og arealpolitik, herunder mål om at øge dansk skovareal til 20-25 % af Danmarks areal (Miljø- og Fødevarerministeriet, 2018) og EU-Kommissionens hensigt om at der på ca. 10 % af landbrugsjorden placeres høj-diversitets landskabslementer (EU Kommissionen, 2020)
- Hensyn til forsyningsikkerhed og reduceret afhængighed af import, herunder:
 - Uafhængighed af udenlandsk gas
 - Halvering af sojaimport
- Global skalerbarhed af systemdesign – Danmark som foregangsland af hensyn til både eksport og global effekt af klimaløsninger.

6. Betydende udviklingstendenser

Dansk landbrug er ikke udviklet med henblik på en optimering af kulstoffangst eller på minimering af tab af drivhusgasser, næringsstoffer og pesticider. Landbruget har derimod oprindeligt udviklet sig efter styrende markedsforhold, prisrelationer mellem input- og output og en ubeskattet naturressource. I senere år er kommet en omfattende detailregulering af næringsstofinput og -tab, pesticidforbrug og tilløb til regulering af drivhusgastab. Der er også kommet en stigende fokus på mulighederne for at øge nettoprimærproduktion (NPP) i landbruget, således at kulstoffangsten maksimeres (Manevski et al., 2017). Det kan fx ske ved at dyrke græs og/eller kløver, som med en lang vækstsæson kan udnytte solen året rundt. Det har samtidigt den gunstige sideeffekt, at nitratudvaskningen kan reduceres kraftigt, fordi det permanente plantedække holder på næringsstofferne (Manevski et al., 2018).

Foreløbigt har to virksomheder etableret bioraffinaderier til at udnytte den ressourceeffektive biomasse fra kløvergræs (www.ausumgaard.dk, www.biorefine.dk). Virksomhederne producerer foreløbigt et proteinkoncentrat til erstatning for importeret soja og råvarer til biogas. På finansloven 2022 er afsat midler til støtte af yderligere etablering af bioraffinaderier til omsætning af grøn biomasse, hvilket kan forventes implementeret i 2023. Dette bakker fint op omkring anbefalingerne fra det Nationale Bioøkonomipanel omkring Proteiner for Fremtiden (Det Nationale Bioøkonomipanel, 2018) og er i tråd med Aftalen om grøn omstilling af landbruget (Regeringen, 2021).

¹ Indholdet i jorden kan stige ved tilførsel af biokul (biochar)

I afklaringen af, hvad der er bio-løsningernes karakteristika og fremtidige rolle, er det vigtigt at forstå de udviklingstendenser, der kommer til at betyde noget for de alternative løsningers indbyrdes konkurrencedygtighed. Her tænker vi især på tekniske og økonomiske udviklingstendenser. Nogle gode systemdesigns findes i løsningsrummet mellem biobaserede løsninger på den ene side og elektrificering, andre non-carbon-løsninger samt PtX løsninger med CO₂ og brint som råvarerne på den anden side. De faktorer, der kommer til at betyde noget for, hvilke løsninger der i fremtiden kommer til at tilfredsstille hvilke efterspørgsler, er især teknologisk modenhed, omkostning/pris og klima/miljøaspekter. Samt naturligvis nationale erhvervsinteresser, men det er under alle omstændigheder hensigtsmæssigt at få klarhed for, hvilke fordele og ulemper der gør sig gældende.

Løsninger for elektrificering, kulstoffangst (carbon capture), elektrolyse og anden PtX er i hastig udvikling i disse år, og der satses store midler på dem. Som eksempel har den danske regering netop vedtaget et mål på 4-6 GW installeret elektrolysekapacitet allerede i 2030. Det er meget og vil resultere i ca. 70 PJ brint/år. Denne mængde vil kunne tilfredsstille dele af efterspørgslen, og frem mod 2050 vil denne del formentlig kunne og skulle øges væsentligt for at bringe den grønne omstilling i mål. Spørgsmålet er således blandt andet, hvilke dele af efterspørgslen, der med fordel kan tilfredsstilles af denne PtX, og hvilke dele, der med fordel kan tilfredsstilles med biomasse – og herunder, i hvilket omfang konverteringsprocesser kan opnå synergi mellem bio-løsninger og PtX. Sidstnævnte er pointen i det meget omtalte begreb 'sektorkobling', og der er også store potentialer i at opnå en sådan synergi.

Eksempler på betydende udviklingstendenser er:

- Udvikling i vindkraft og især solkraft og elprisen knyttet hertil
- Udvikling af elektrolyseteknologien og brintprisen knyttet hertil
- Udvikling i teknologier til fremstilling af kulstoffoldige forbindelser ud fra brint og CO₂
- Udvikling i biomasseprisen og prisens afhængighed af efterspørgslens størrelse globalt (da markederne for flis, træpiller og halmpiller er internationale)
- Udvikling i bio-teknologierne (membranfiltrering og separation af proteiner, aminosyrer, lipider og kulhydrater, produktion af biobaserede materialer, fermenteringsteknologi, biogasproduktion og koblede teknologier såsom termisk og hydro-termisk omdannelse af biomasse (fx pyrolyse og HTL))
- Priser på CO₂-fangst og på ovennævnte bioteknologier
- CO₂-lagring i undergrunden eller i jordbrugssystemerne

7. Scenarier for efterspørgsel efter kulstoffoldige brændsler, brændstoffer, råvarer og materialer

Der er gennem de sidste 15 år lavet et stort antal studier af, hvordan det danske energisystem kan designes som et fuldt vedvarende energisystem. Forfattere bag studierne har bl.a. været Klimarådet, Ålborg Universitet, Ingeniørforeningen i Danmark, Syddansk Universitet, Energinet og Energistyrelsen (Lund & Mathiesen, 2006; Mathiesen et al., 2009; Lund et al., 2011; Danish Energy Agency, 2014; Wenzel et al., 2014; Mathiesen et al., 2015; Energinet, 2018). Gennem disse studier er udviklet en forståelse af, hvor stor en del af vores energisystem, der kan elektrificeres eller på anden vis tilfredsstilles af ikke-kulstoffaserede løsninger, og hvor stor en del, der forventes at behøve kulstoffoldige stoffer.

Både i Danmark og internationalt er der ligeledes lavet et stort antal studier af fremtidens biomassepotentialer af mange forskellige parter. Heraf fremgår det entydigt, at når vi i fremtiden i vid udstrækning skal afholde os fra fossile brændstoffer og råvarer, så kan areal og biomasse gå hen at blive en begrænset ressource, som ikke fuldt ud kan dække efterspørgslen uden, at det går ud over naturen og biodiversiteten. Samtidig har det allerede nu vist sig, at de løsninger som er baseret på vind- og solkraft og på elektrificering som elbiler og varmepumper, er økonomisk attraktive og reelt allerede

økonomisk konkurrencedygtige ikke alene ift. bio-baserede løsninger, men også ift. de fossile løsninger. Derfor giver det i den aktuelle sammenhæng bedst mening at se på en efterspørgselsside, hvor elektrificering er gennemført i videst mulig udstrækning, således at der alene optimeres op mod de behov, der ikke kan elektrificeres. Baseret på de forskellige studier nævnt i Tabel 1 vurderes efterspørgslen i et fuldt vedvarende og fuldt elektrificeret energisystem således at udgøre størrelser som vist i nedenstående Tabel 1.

Tabel 1: Fordeling og størrelse af biomasseefterspørgslen i et fuldt vedvarende og fuldt elektrificeret energi- og materialesystem. Estimat er angivet som PJ pr år.

Brændsler og brændstoffer	Estimat (PJ/år)	Bemærkning
Luftfart	50	Dansk luftfarts eget estimat – tallet var 42 PJ/år før Corona (Klimapartnerskab for Luftfart, 2022)
Skibsfart	30-40	IDA Klimasvar (Lund et al., 2022). På sigt er luftfart og skibsfart lige store globalt set. Lund et al. (2022) estimerer imidlertid skibsfartens brændstofbehov 2045 til at være lidt mindre end luftfartens. Der er i begge tilfælde tale om både indenlandsk og udenlandsk transport relateret til danskere og dansk forbrug.
Vejtransport	0-20	Energinet og andre – i princippet ser alt med fordel ud til at kunne elektrificeres økonomisk konkurrencedygtigt (Energinet, 2018)
Industri	15	Energinet (2018), Mortensen et al., (2020) – i dag godt 70 PJ/år overvejende som naturgas, men over 75 % kan elektrificeres
El-balancering	5	Energinet (2018) – i ca. 30 % af tiden vil der ikke være <i>nok</i> vind eller sol til det ufleksible el-forbrug, men i størstedelen af disse 30 % vil der være <i>noget</i> , og vægtet er efterspørgslen efter et lagerbart brændsel til el-balancering således ret lille
Spidslast varme	20	Biogas eller biomasse kedler har mindst CAPEX pr. installeret MW effekt og er derfor attraktive som spidslast – men varmelagre vil også kunne levere spidslast. Vi vurderer et behov for 20 PJ fra biomasse, hvilket er lavere end estimeret i IDA scenarier, men her kan andre metoder såsom varmelagre komme i spil
Råvarer, materialer mm.		
Plast	50	DTU (Pivnenko et al., 2019), SDU (Ottesen and Petersen, 2021), Danmarks Statistik (Urhammer, 2021). Disse Materiale Flow Analyser siger enstemmigt 1 Mt/år netto dansk plastforbrug i 2020 – her fremskrevet til 1,2 Mt/år i 2050, hvilket svarer til 50 PJ/år i ren brændværdi. Fremstillingsenergien til plast er lige så stor som brændværdien, men omkring 75 % af energien til cracking-delen kan iflg. Shell og Dow elektrificeres
Andre materialer & kemikalier	50	BASF (Hübinger, 2021) siger, at forholdet plast:andre kulstofholdige materialer og kemikalier fordeler sig ca. 1:1 globalt set. Derfor estimeres 'andre' her til det samme som plast. Vi har ikke haft mulighed for at undersøge dette nærmere.
Bygninger/boliger	21-42	Hovedparten af biomasse i bygninger vurderes at være træ i gulve, lofter, døre, vinduer, køkkener og møbler – og dernæst konstruktionstræ samt byggematerialer som fx PIR/PUR skum og anden isolering. Rasmussen et al. (2022) anslår en lagring på 1,7 mio. tons CO ₂ /år (20,9 PJ/år) i biogene byggematerialer i 2050. Herudover skal tillægges de biogene materialer der indgår til køkkener, møbler og andet. Det samlede behov anslås at være op til det dobbelte (42 PJ/år).
Tekstiler	5-6	Beklædningstekstilerne (ca. 85.000 tons) er opgjort som dansk produktion og import fraregnet mængden der eksporteres (Watson et al., 2018). Udenrigshandelsstatistikken for import og eksport er ikke opgjort i vægt, men er omregnet ud fra den danske produktions forhold mellem værdi og vægt, da vi antager at der er samme forhold mellem værdier og vægt i den danske produktion som i

		eksporten (Watson et al., 2018). Vi antager også at halvdelen af tekstilerne er af bomuld og den anden halvdel er syntetisk og derfor en gennemsnitlig brændværdi på 30 GJ/ton. Foruden beklædningstekstiler er en lige så stor gruppe af tekstiler bl.a. gulvtæpper, parasoller, telte, hatte, møbel-betræk, sikkerhedsseler, wiper, bleer, mundbind, engangs-overtræksdragter, legetøj, tasker, sko. Derfor anslås det totale tekstilforbrug at være 170.000 tons.
Papir/pap	20	Det har ikke været muligt at finde nyere tal for papirforbruget i Danmark. Statistikbanken anfører ikke i vægt, men i stedet i ruller, ark, og andre enheder. I 2008 blev forbruget på 1,35 mio. tons opgjort som dansk produktion (0,23 mio. tons) og import (1,61 mio. tons) fraregnet eksport (0,49 mio. tons) (Tønning og Kaysen, 2010). Papir og pap antages at have en brændværdi på 15 MJ/kg.
Markjord & CCS	X ₁	Iflg. Klimapolitik og mål skal vi inden 2050 opnå negative emissioner. Derfor inkluderer vi her markjorden og CCS som en del af efterspørgslen efter kulstof. Behovet for CCS for at opnå et dansk mål om nuludledning i 2050 er beregnet som en del af systemdesign scenarierne i kapitel 9, se Tabel 6.

Totalbehovet² for kulstofholdige brændsler, brændstoffer og råvarer i fremtiden er dermed: 266-318 +X₁ PJ, dog således, at en vis del heraf potentielt kan tilfredsstilles af brint og ammoniak.

8. Scenarier for biomassepotentialer

Forskellige scenarier for det danske biomassepotentiale er beregnet for landbrugssektoren og skovbruget frem til 2050. Dertil kommer bidrag fra marin biomasse og biprodukter fra industrien, som dog ikke er forsøgt fremskrevet til 2050. Der er opstillet et 'Business as Usual' scenarie (BAU), hvor udgangspunktet (et gennemsnit af årene 2015-2019) fremskrives til henholdsvis 2030 og 2050. I to alternative scenarier sker der henholdsvis en optimering af biomasseproduktion og en prioritering af udlægning af areal til natur (Ekstensiveringsscenario) (se oversigt i Tabel 2 og for detaljer i Mortensen et al., 2022). Derudover indgår for landbrugssektoren en analyse af, hvad en reduktion i husdyrproduktionen på henholdsvis 20 % i 2030 og 50 % i 2050 betyder for produktionen og tilgængeligheden af biomasse, og hvordan dette vil påvirke arealanvendelsen af de ca. 2.630.000 ha dansk landbrugsjord vi havde i 2020. Et areal der i 2030 forventes at være reduceret til godt 2,5 millioner ha, da der løbende udtages landbrugsjord til bl.a. veje, byggeri og skovrejsning (Dalgaard og Mortensen, 2022) og ca. 2.4 millioner ha i 2050. Der knytter sig naturligvis betydelig usikkerhed til den fremtidige arealudvikling, hvor fx også arealanvendelse til solceller trænger sig på. Reduktionen i husdyrproduktionen er gennemført simpelt ved en forholdsmæssig ændring på tværs af husdyrkategorier.

² Foder og føde indgår ikke i total.

Tabel 2. Totale ændringer i forhold til Business As Usual scenarierne ved henholdsvis øget biomasseproduktion (Biomassescenarie) og øget natur og biodiversitet (Ekstensiveringsscenario) i 2030. Arealændringer i 2050 scenarierne er angivet i hård parentes [] og er med yderligere 5,2 %-point reduktion³ i det dyrkede areal. Forskelle i størrelser er angivet med understregning (fra Mortensen et al., 2022).

Biomassescenarie	Ekstensiveringsscenario
Kornsorter med 15 % mere halm.	Kornsorter med 15 % mere halm.
Øget halmopsamling med 15 % ved ændret høstteknologi (dog undtaget jorder med Dexterindeks over 10).	Øget halmopsamling med 15 % ved ændret høstteknologi (dog undtaget jorder med Dexterindeks over 10).
Ca. <u>50.000 ha</u> [50.000 ha] kulstofrige lavbundslande vådlægges.	Ca. <u>100.000 ha</u> [100.000 ha] kulstofrige lavbundslande vådlægges.
<ul style="list-style-type: none"> • <u>30 %</u> af arealet udlægges til natur (naturlig succession eller ekstensiv afgræsning). 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>70 %</u> af arealet udlægges til natur⁴ (naturlig succession eller ekstensiv afgræsning).
<ul style="list-style-type: none"> • <u>35 %</u> af de tørreste arealer til høst af græsarter, e.g. strandsvingel (<i>Festuca arundinacea</i>) og røgræs (<i>Phalaris arundinacea</i>) til biomasse. 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>10 %</u> af arealet til høst af græsarter, e.g. strandsvingel (<i>Festuca arundinacea</i>) og røgræs (<i>Phalaris arundinacea</i>) til biomasse.
<ul style="list-style-type: none"> • <u>35 %</u> af de vådeste arealer til høst af dunhammer (<i>Typha latifolia</i>) og tagrør (<i>Phragmites australis</i>) til biomasse. 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>10 %</u> af arealet til høst af dunhammer (<i>Typha latifolia</i>) og tagrør (<i>Phragmites australis</i>) til biomasse.
	<ul style="list-style-type: none"> • <u>10 %</u> af arealet til høst af naturlig vegetation (græsser).
Ca. <u>319.000 ha</u> [302.000 ha] med enårige afgrøder (korn, majs, raps) på jorder med særlig følsomhed for nitratudvaskning omlægges til <u>biomasseafgrøder</u> . Hhv. ca. 44.000 ha til roer i omdrift, mens de resterende ca. 275.000 ha omlægges til intensiv kløvergræs (med N norm på 250 kg N per ha)	Ca. <u>247.000 ha</u> [234.000 ha] med enårige afgrøder (korn, majs, raps) på jorde med særlig følsomhed for nitratudvaskning omlægges til <u>kløvergræs</u> til bioraffinering med reduceret gødskning (66 % er økologisk) (med N norm på 150 kg N per ha)
Ca. <u>99.000 ha</u> [94.000] med enårige afgrøder (korn, majs, raps) på højbundslande med lavt kulstofindhold omlægges til intensiv kløvergræs.	Ca. <u>91.000 ha</u> [86.000 ha] med enårige afgrøder (korn, majs, raps) på højbundslande med lavt kulstofindhold omlægges til kløvergræs. 80 % af arealet drives intensivt og 20 % med reduceret gødskning.
Ca. 17.000 ha [16.000 ha] med enårige afgrøder (korn, majs, raps) på pesticidfølsomme sandjorder beliggende inden for områder med særlige drikkevandsinteresser omlægges til intensiv kløvergræs til biomasse.	Ca. 17.000 ha [16.000 ha] med enårige afgrøder (korn, majs, raps) på pesticidfølsomme sandjorder beliggende inden for områder med særlige drikkevandsinteresser omlægges til 50 % kløvergræs til biomasse og 50 % til natur ⁵ (ekstensiv afgræsning + naturlig succession).
Ca. <u>198.000 ha</u> [188.000 ha] efterafgrøder høstes til biomasse. Blandinger med N ₂ -fixerende arter tillades.	Ca. <u>205.000 ha</u> [194.000 ha] efterafgrøder høstes til biomasse. Blandinger med N ₂ -fixerende arter tillades.
Roe-top fra eksisterende areal med sukkerroer (ca. 31.000 ha [29.000 ha]) høstes til biomasse.	Roe-top fra eksisterende areal med sukkerroer (ca. 31.000 ha [29.000 ha]) høstes til biomasse.
Biomasse fra vejrabatter og grødeskæring udnyttes.	Biomasse fra vejrabatter og grødeskæring udnyttes.
Skovrejsning på 5.600 ha/år. <u>Hurtigvoksende nåleskov</u> [samme stigningstakt til 2050].	Skovrejsning på 5.600 ha/år. <u>50% blandet løvskov og 50% naturlig succession</u> [samme stigningstakt til 2050].
Effektivisering af gyllehåndtering (hyppig udslusning og køling) antages at give 7,5% stigning i den	Effektivisering af gyllehåndtering (hyppig udslusning og køling) antages at give 7,5% stigning i den

³ Dette svarer til arealreduktionen ved dyrket areal indeks 0,96 (2030) til 0,91 (2050) (Dalgaard og Mortensen, 2022).

⁴ natur skal forstås som områder uden produktionsformål, hvor naturen er hovedprioriteten, bestående af restaurerede økosystemer og deres naturlige processer (EU's Biodiversitetsstrategi).

samlede mængde tørstof i husdyrgødningen tilgængeligt for biogasproduktion.	samlede mængde tørstof i husdyrgødningen tilgængeligt for biogasproduktion.
Det <u>økologiske areal fastholdes</u> som under Business As Usual.	Det <u>økologiske areal fordobles</u> fra perioden 2018 til 2030 (23.250 ha/år). Den yderligere stigning i forhold til BAU-scenariet lægges på det nye areal med græsmarksafgrøder til biomasse på nitratsensitive områder. Der øges ikke yderligt areal i perioden fra 2030-2050.
Scenarier med -20 % husdyrhold (2030)	
160.000 ha grovfoderareal ved reduktion af husdyrhold omlægges til kløvergræs	160.000 ha grovfoderareal ved reduktion af husdyrhold omlægges til natur
Scenarier med -50 % husdyrhold (2050)	
380.000 ha tidligere grovfoderareal omlægges til kløvergræs	380.000 ha tidligere grovfoderareal omlægges til natur
I alt 247.000 ha kløvergræs fra 2030-2050 på frigjort areal som følge af arealfremskrivning	I alt 247.000 ha kløvergræs fra 2030-2050 på frigjort areal som følge af arealfremskrivning
Alle scenarier (2050)	
I alt 112.000 ha yderligere skovrejsning fra 2030-2050 (fortsat 5.600 ha/år)	

I Tabel 3 er vist hovedresultater for følgende scenarier for land- og skovbrugssektorerne:

- Business as Usual
- Biomassescenarie (-20 %, -50 % husdyrhold)
- Ekstensiveringscenarie (-20 %, -50 % husdyrhold)

Det er vigtigt at bemærke, at en væsentlig forudsætning for fremskrivninger til 2030 og 2050 er forventede reduktioner i landbrugsareal som følge af større arealer med byer, veje og skove, samt forventede udbyttestigninger i plante- og husdyrproduktion. På baggrund af historiske, nært lineære, effektivitetsstigninger i fødevarsystemet har vi antaget en fortsat effektivitetsstigning frem mod 2050 på 0,65 % årligt (Mortensen et al., 2022). Da effektivitetsstigningen er større end faldet i landbrugsareal, betyder det at en stigende resurse kan frigives til bioøkonomien i Business As Usual.

Der kan stilles spørgsmålstejn ved det realistiske i fortsat stigning i effektiviteten for enkelte produktionstyper, og de kan og bør diskuteres, da de er ganske afgørende for resultaterne af scenarierne – ikke mindst over lang tid frem til 2050. Men ud over produktivitetforbedringer i enkeltafgrøder eller husdyr, kan stigningen tænkes opnået på fødevarsystemniveau via synergier mellem nye produktionsteknologier (fx insekter, mikroalger, svampe). Disse udbyttestigninger vil dog kun kunne indfries, hvis der sker en fokuseret indsats inden for forskning, udvikling og rådgivning.

Det er forventeligt, at produktionen af afgrøder til plantebaseret kost vil stige markant i de kommende år. I forhold til arealet anvendt til produktion af husdyrfoder og eksport af korn, er arealet med frugt, grønsager, kartofler og bælgssæd dog meget begrænset. Således var der i 2020/21 et samlet areal med produktion af frugt og grønt på 17.866 ha (æfter til konsum 3.150 ha, gulerødder 2.022 ha, jordbær 1.068 ha) og spisekartofler på 7.200 ha. Det kan sammenlignes med den forholdsvis begrænsede produktion af markærter og hestebønner til foder på 32.400 ha, kornproduktionen på 1.363.000 ha og det samlede landbrugsareal på 2.619.000 ha. Vi vurderer derfor, at øget produktion af plantebaseret kost vil kunne indpasses i de større arealændringer i scenarierne uden at ændre de overordnede effekter i scenarierne markant, og elementet er derfor ikke medtaget her.

Det fremgår af Tabel 3, at det i 2030 er muligt at udnytte op til over 5 gange så meget biomasse fra landbruget, sammenlignet med udnyttelsen i 2015-2019 uden at ændre markant på den nuværende fødevarerproduktion. Hvis derudover husdyrproduktionen reduceres med 20 % viser beregningerne, at udnyttelse af biomasse kan øges godt 6 gange. I 2050 kan der, som følge af de forudsatte udbytte- og effektivitetsstigninger, udnyttes 8 gange så meget biomasse som i 2015-19, mens en halvering af

husdyrproduktionen kan frigøre foderareal, således at der kan udnyttes over 10 gange så meget biomasse.

Sammenlignet med de markante stigninger i biomasse mængderne i landbrugsscenerierne, viser skovbrugsscenerierne kun begrænsede stigninger – og i Ekstensiveringsscenerierne ses endda markante fald. Dels tager det lang tid for ændringer at slå igennem i skovbruget, hvorfor Biomassescenariet først viser en stigende biomasseleverance i 2050. Dels betyder politikker om udlægning af urørt skov, at der fra en betydelig andel af skovene ikke længere kan udtrækkes biomasse. Skovene producerer også gavntræ, som på nuværende tidspunkt udgør ca. 0,8 mio. tons tørstof (Nord-Larsen & Johannsen, 2022).

Tabel 3. Dansk biomasseforbrug til bioenergi i 2015-2019 samt potentialet for udnyttelse til bioraffinering i scenarier for 2030 og 2050. For detaljer om landbrugsscenerier se Mortensen et al. (2022) og for skovbrugsscenerier se Nord-Larsen og Johannsen (2022).

	Landbrugstørstof (mio. tons)	Energi ⁵ (PJ)	Skovbrugstørstof (mio. tons)	Energi (PJ) ⁶
Baseline (2015-2019)	2,2	40	1,4	27
Business as Usual 2030 fremskrivning	6,8	117	1,4	26
Business as Usual 2050 fremskrivning	7,8	135	1,2	22
Biomassescenarier				
Biomassescenarie 2030	12,8	223	1,3	25
Biomassescenarie, -20 % (2030)	14,7	259	1,3	25
Biomassescenarie 2050	17,6	308	2,2	42
Biomassescenarie, -50 % (2050)	23,2	415	2,2	42
Ekstensiveringsscenerier				
Ekstensiveringsscenario 2030	10,6	183	0,4	7
Ekstensiveringsscenario, -20 % (2030)	10,3	179	0,4	7
Ekstensiveringsscenario 2050	15,2	266	0,3	6
Ekstensiveringsscenario, -50 % (2050)	15,4	275	0,3	6

Desuden findes i dag et biomassepotentiale i reststrømme fra industrien på ca. 2,0 mio. tons tørstof, som i nogle tilfælde allerede anvendes til foder, men andet er spildevandsslam (Gylling et al., 2022). Fra havet er beregnet potentialer på henholdsvis 0,009, 0,032 og 0,058 mio. tons tørstof i BAU, biomasse og ekstensiveringssceneriet i 2030 (Bruhn et al., 2022). Disse værdier er forholdsvis små i forhold til mængderne fra land- og skovbrug og er ikke fremskrevet til 2050. Dog er værdierne fra 2030 adderet uændret til de samlede mængder for 2050. På trods af de små mængder kan værdien af blå biomasse være høj som følge af indhold af bioaktive stoffer eller potentialet for fødevareanvendelse.

Det skal pointeres, at det biomassepotentiale, der er tilgængeligt for energi- og materialesektoren, ikke er en konstant mængde, men afhænger af hvordan biomassen anvendes, idet hensynet til markjordens kulstofindhold og tilbageførsel af kulstof til markjorden er en vigtig faktor. Hvis markjordens kvalitet og kulstofindhold skal opretholdes på samme niveau, vil *måden* hvorpå biomasse konverteres til forskellige formål afføde forskellig tilbageførsel af svært-nedbrydeligt kulstof til markjorden (Hansen et al., 2020). Biogasomsætning og pyrolyse vil fx tilføre markjorden svært nedbrydeligt kulstof, mens fx hydrothermal liquefaction (HTL) eller direkte forbrænding til el og varme ikke tilbagefører kulstof. Derfor kan man ikke

⁵ Omregning fra tørstof til energi er beregnet med faktor 18 MJ/kg tørstof.

⁶ Omregning fra tørstof til energi er beregnet med faktor 19 MJ/kg tørstof.

tale om et fast potentiale uafhængigt af systemdesign og forskellige konverteringsscenerier. Dette forhold har vi tilgodeset ved at vise de samlede kulstofbalancer i vores systemdesigns.

Globalt biomassepotentiale

Analysen inkluderer et globalt perspektiv for biomassepotentialet udtrykt som tilgængelig, bæredygtig biomasse til non-fødevarer/foder formål i GJ/person/år som gennemsnit pr. verdensborger. Dette potentiale er der efterhånden stor konsensus om, jf. fx det danske Klimaråd (Klimarådet, 2018), og IEA (International Energy Agency, 2021), nemlig omkring 10 GJ/person/år. Dette vil svare til ca. 60 PJ/år for et fremtidigt dansk system med 6 mio. indbyggere i Danmark. Grunden til at inkludere det globale perspektiv er, at det fx anbefales af Klimarådet, at vi holder os under dette, og der har også været udtrykt et ønske om at se et sådant scenarie fra Energistyrelsens side. Formålet er dels at vise et scenarie, der holder sig tæt på et globalt gennemsnitligt max-potentiale ud fra et 'fairness'- eller 'ligheds'-princip, dels at vise et scenarie, der rent teknisk, økonomisk og systemdesignmæssigt holder sig på et niveau, der er globalt skalerbart og dermed en reel model for, hvordan resten af verden også kan indrette sig. Dette har betydning for dansk industri/erhvervsliv og eksport af løsninger, idet en model, som andre kan efterfølge, er nemmere at markedsføre. Desuden vil en model, som resten af verden kan efterfølge, også få en væsentligt større klimaeffekt, end en model, som fjerner den danske udledning på 1 promille af verdens udledning af klimagasser, men som resten af verden har svært ved at lade sig inspirere af.

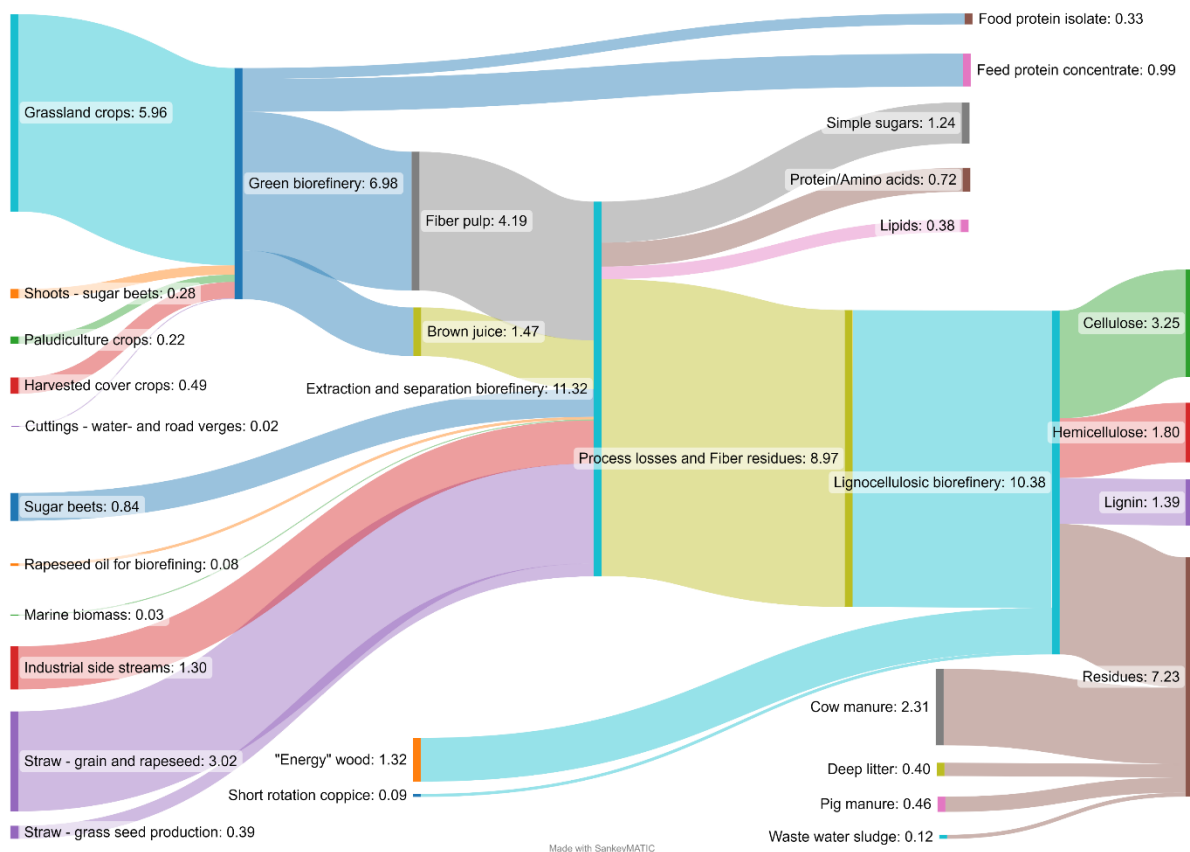
9. Systemdesigns og konverteringsscenerier

Ud fra behovet, de styrende hensyn, og fremtidige baggrundsudviklinger er opstillet en række systemdesignscenerier. Herved forstås scenarier for, hvilke ressourcer (inkl. biomasseressourcer), der konverteres til hvilke typer produkter og hvordan. Visse typer efterspørgsler har ingen præferencer for den molekylære karakter af det kulstof, de som udgangspunkt efterspørger. Dette kan fx være brændsel til spidslast varme eller råvarer til fremstilling af flybrændstof. Til disse formål bliver teknologiens modenhed, konverteringseffektivitet og omkostningen formentlig afgørende. Til andre formål forventes den molekylære karakter at være mere afgørende. Det gælder naturligvis protein og lipider til fødevarer/foder formål, og det gælder også visse typer fibre, der kan anvendes til fx beklædning og andre tekstiler, papir og pap eller til visse byggematerialer som isoleringsmaterialer, og lignin som bindingsmiddel eller til polyuretan (PUR)-lignende produkter.

9.1 Bioraffinering og kaskadeudnyttelse

Konverteringsscenerierne er bygget op omkring princippet for kaskadeudnyttelse, og viser hvordan den totale mængde biomasse fra landbrug, skov, hav, og industrielle sidestrømme kan splittes op i deres kemiske bestanddele, kvantificeres og anvendes, hvor de har mest værdi.

Princippet om kaskadeudnyttelse kan eksemplificeres gennem et diagram som i Figur 2, der viser masseflowet fra de forskellige biomasseinput gennem tre forskellige bioraffinerings platforme: 1) En grøn bioraffineringsplatform, hvor grønne biomasser splittes i proteinprodukter, fiberpulp og brunsaft. 2) En generel ekstraktion og separations platform, der ekstraherer tre processtrømme bestående af sukre, fedtstoffer og protein/aminosyrer. 3) En lignocellulosisk bioraffineringsplatform, der forarbejder biomassefibre og splitter dem ad i henholdsvis cellulose, hemicellulose og lignin. Da der både er procestab og biomasser, der ikke egner sig direkte til nogle af disse tre platforme, kommer der også en betydelig mængde restbiomasse ud af kaskadeudnyttelsen. Beregningerne for konverteringerne bygger på samme fremgangsmåde som beskrevet i notat af Ambye-Jensen (2022).



Figur 2. Masseflowdiagram givet i millioner ton tørstof (Sankey) for kaskadeudnyttelsen af biomasse fra Biomassescenariet 2030 uden ændret animalsk produktion. Tallene er beregnet på baggrund af Ambye-Jensen (2022).

Anvendelsen af de forskellige produkt- og processtrømme på outputsiden af kaskadeudnyttelsen kan være mange. I denne del af analysen er der lagt vægt på at beregne mængderne af relevante biokemiske bestanddele.

Det tiltænkes, at proteiner, sukre og fedtstoffer kan anvendes i fødevarerindustrien, enten direkte eller som foder eller substrat til anden fødevarerproduktion, men de kan ligeledes have relevans i kosmetik- og sundhedsprodukter.

Dernæst vil der være et stort biomassepotentiale karakteriseret ved højt indhold af lignocellulose, både fra grøn (fiberfraktion efter proteinekstraktion), gul og skovbiomasse. Heraf antages, at en stor andel med fordel kan gå til anvendelse i materialer, der alternativt vil være svære at producere via non-biomasse teknologier (fx cellulosestetiler, papir/pap og byggematerialer). Endvidere vil reststrømmene (residues på Figur 2) herfra efterfølgende kunne indgå i teknologier, der nedbryder biomassens struktur og samtidig producerer brændsler, brændstoffer og muliggør recirkulering af næringsstoffer og evt. kulstof (biogas, pyrolyse og HTL). Disse teknologier kan også kaskadeudnytte hinandens processtrømme, hvortil der potentielt kan opstilles mange forskellige scenarier.

I kaskadeudnyttelsen er cellulose hemicellulose og lignin splittet i hver deres strøm for at vise mængderne. Det er dog en vigtig pointe, at den reelle kvalitet og sammensætning af disse strømme kan ændre sig markant som følge af den specifikke lignocellulosiske bioraffinerings-teknologi, de er behandlet med. Da sådanne teknologier er under konstant udvikling, er det ikke til at sige, hvilke teknologier der vil være mest fordelagtige at anvende 10-30 år ud i fremtiden.

Cellulose vil være en vigtig råvare til fremtidens materialer såsom tekstiler, papir, emballage, osv., men kan også hydrolyseres til sukker og anvendes som kulstofkilde til mikrobiologisk- og kemisk produktion.

Hemicellulose kan ligeledes anvendes som råvare til materialer, men vil typisk nedbrydes i højere grad og anvendes som kulstofkilde til mikrobiologisk- og kemisk produktion, eller anvendes i deres form af kortkædede kulhydrater til prebiotisk ingrediens i foder og fødevarer. Lignin består af yderst kompleks og divers kemi og anvendelsen af lignin kan derfor være mange, inklusiv både smagsstoffer og bindemiddel i materialeproduktion. Grundet kompleksiteten er det dog en svær råvare at bruge til specialproduktion og kan evt. med fordel anvendes til brændstoffer eller som fyldmiddel i cement og asfalt.

Tabel 4 og 5 viser samtlige input og outputstrømme fra kaskadescenarierne på baggrund af de fem biomassescenarier BAU, BIO, EXT og BIO- og EXT med reduceret animalsk produktion, i hhv. 2030 og 2050, angivet i både mio. ton tørstof og PJ. Til hvert scenarie er der lavet masseflow-diagram som i eksemplet på figur 2.

Tabel 4. Input biomasse og output proces-/produktstrømme for alle biomassescenarier i 2030 givet som både millioner tons tørstof [mio. ton TS] og Petajoules [PJ]

Input- og outputstrømme til bioraffinering og kaskadeudnyttelse, Alle scenarier 2030	[mio ton TS]					[PJ]				
	BAU	BIO	BIO - 20 %	EXT	EXT - 20 %	BAU	BIO	BIO - 20 %	EXT	EXT - 20 %
Input										
Grønne biomasser		7.0	9.4	5.0	5.0	116.9	157.7	83.3	83.3	
Sukkerroer + rapsolie til bioraffinering	0.2	0.9	0.9	0.1	0.1	8.4	17.5	17.5	3.2	3.2
Halm	3.5	3.4	3.7	3.5	3.9	11,3	17,5	63,1	60,2	65,5
Marine biomasser		0.03	0.03	0.06	0.06		0.51	0.51	0.10	0.10
Industri sidestrømme	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	24.7	24.7	24.7	24.7	24.7
Ikke-materiale træ	1.4	1.4	1.4	0.5	0.5	26.0	25.4	25.4	8.2	8.2
Gylle + spildevandsslam	3.1	3.3	2.7	3.3	2.7	39.0	41.8	33.8	41.8	33.8
Output										
LPI (leaf protein isolate) til fødevarer		0.3	0.5	0.2	0.2		7.3	9.9	5.2	5.2
LPC (leaf protein concentrate) til foder		1.0	1.3	0.7	0.7		18.8	25.5	13.5	13.5
Protein/Aminosyrer	0.2	0.7	0.9	0.6	0.6	4.7	15.8	19.4	12.8	12.8
Lipider	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	12.8	14.8	16.8	12.9	12.9
Simple sukre	0.1	1.2	1.4	0.5	0.5	2.0	21.1	24.0	8.3	8.3
Cellulose	1.8	3.3	3.9	2.5	2.6	30.8	55.3	66.0	42.5	44.4
Hemicellulose	1.0	1.8	2.2	1.4	1.5	17.6	30.6	36.6	24.0	25.1
Lignin	0.9	1.4	1.6	1.0	1.1	20.5	33.4	39.1	24.8	25.9
Restbiomasse	5.2	7.2	7.2	6.4	5.9	71.3	100.9	102.5	88.6	81.8

Tabel 5. Input biomasse og output proces- og produktstrømme for alle biomassescenarier i 2050 givet som både millioner tons tørstof [mio. ton TS] og Petajoules [PJ] *Der er ikke beregnet et scenarie for marine bioressourcer i 2050, her er tallene identiske med 2030 scenariet

Input- og outputstrømme til bioraffinering og kaskadeudnyttelse, Alle scenarier 2050	[mio ton TS]					[PJ]				
	BAU	BIO	BIO - 50 %	EXT	EXT - 50 %	BAU	BIO	BIO - 50 %	EXT	EXT - 50 %
Input										
Grønne biomasser		12.0	17.7	10.1	10.1		202.7	299.5	170.6	170.6
Sukkerroer + rapsolie til bioraffinering	0.2	0.9	0.9	0.1	0.1	8.0	16.3	16.3	2.9	2.9
Halm	4.7	3.8	4.5	3.9	4.7	10.9	16.3	77.1	66.2	79.5
Marine biomasser*		0.03	0.03	0.06	0.06		0.51	0.51	0.10	0.10
Industri sidestrømme	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	24.7	24.7	24.7	24.7	24.7
Ikke-materiale træ	1.3	2.3	2.3	0.4	0.4	22.7	41.5	41.5	7.3	7.3
Gylle + spildevandsslam	2.9	3.1	1.6	3.1	1.6	37.0	39.7	20.5	39.7	20.5
Output										
LPI (leaf protein isolate) til fødevarer		0.6	0.8	0.5	0.5		12.6	18.5	10.6	10.6
LPC (leaf protein concentrate) til foder		1.7	2.5	1.4	1.4		32.5	48.0	27.4	27.4
Protein/Aminosyrer	0.2	1.1	1.5	0.9	0.9	4.7	23.6	32.4	20.8	20.7
Lipider	0.3	0.5	0.6	0.4	0.4	12.8	19.1	22.0	17.4	15.0
Simple sukre	0.1	1.6	2.0	0.9	0.9	2.0	27.0	34.1	14.9	14.5
Cellulose	2.2	4.8	6.3	3.7	4.0	36.6	81.9	107.6	63.2	68.0
Hemicellulose	1.2	2.6	3.5	2.1	2.2	21.0	44.9	58.8	35.1	37.8
Lignin	1.0	2.1	2.6	1.5	1.6	21.8	45.2	58.0	32.8	35.4
Restbiomasse	5.3	8.4	8.4	7.5	6.3	73.2	103.2	102.2	92.1	76.0

9.2 Systemdesigns og konverteringsscenarioer i energi- og materialesystemet

Det samlede udbud af biomasse til rådighed for vores fremtidige materiale- og energibehov vil variere meget efter, hvordan vi prioriterer vores arealudnyttelse til produktionsarealer eller til natur, til produktion af foder, fødevarer eller til øget leverance af biomasse til energi og materialer. Udbuddet (Tabel 3) kan variere fra 40-415 PJ/år, og inden for landbruget er der gode muligheder for at øge udbuddet fra den hidtidige anvendelse på ca. 40 PJ, idet der er uudnyttede ressourcer i fx gylle og halm, som allerede er i rivende udvikling til biogasindustrien. Der kan således udnyttes op til 117-135 PJ mere fra de eksisterende systemer (BAU scenarierne), og ved bæredygtig optimering (Hunter et al., 2017) af landbrugssystemerne kan opnås 223-308 PJ (Biomassescenarierne). Et eksempel på en sådan bæredygtig intensivisering er som nævnt et skifte til flerårige kløvergræsmærker til bioraffinering i stedet for enårige afgrøder, som typisk har stor nitratudvaskning, højt pesticidforbrug og reducerer jordens kulstofpulje (Mortensen & Jørgensen, 2022). Ved udtagning af en del af landbrugsarealet til natur i Ekstensiveringsscenarioerne og et fordoblet areal med økologi reduceres potentialerne noget til 183-266 PJ/år.

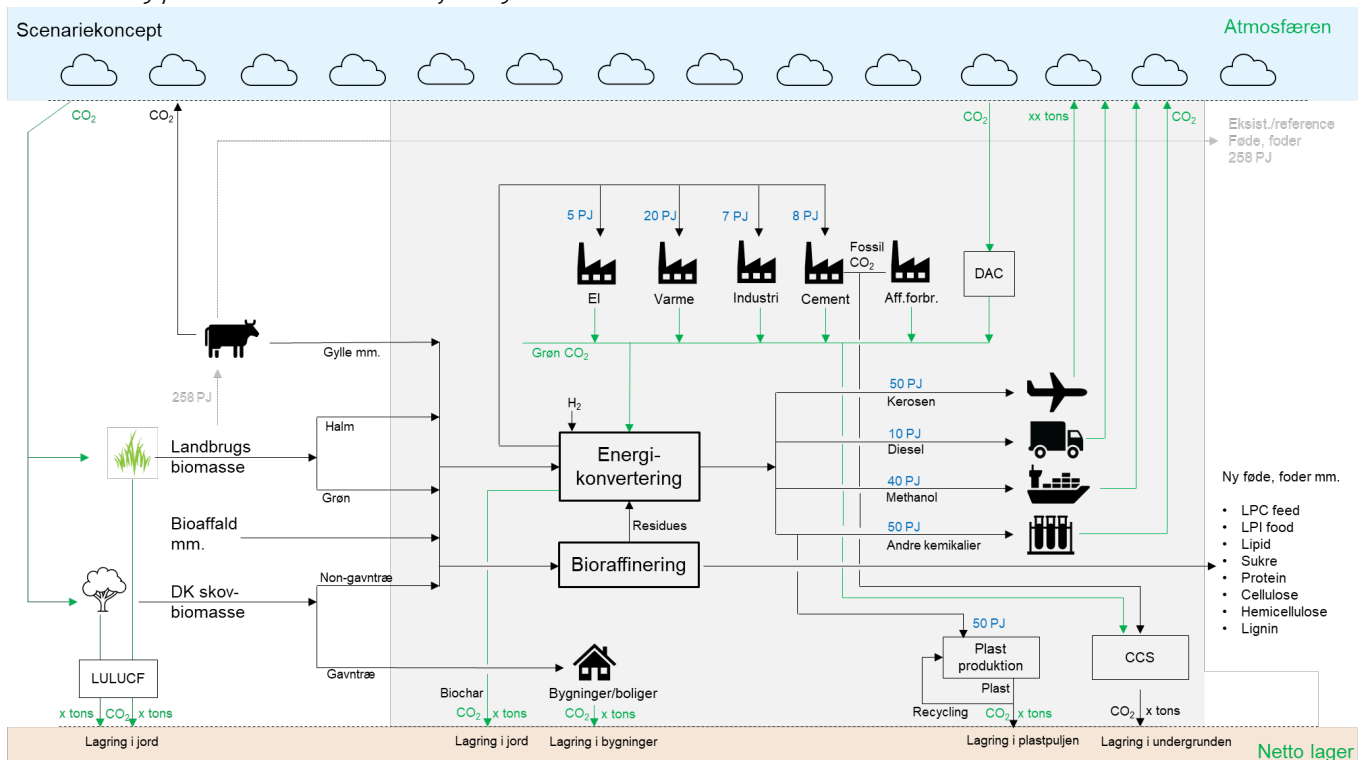
Reduktion af omfanget af husdyrproduktionen og dermed mindre behov for foder vil øge arealerne til natur, til produktion af plantebaserede fødevarer og/eller til biomasseproduktion. Udbuddet til biomasseudnyttelse øges til 259-415 PJ i biomassescenariet, mens det bliver 179-275 PJ i ekstensiveringsscenarioet, hvor en større andel af arealet prioriteres til natur. Af disse mængder bør en betydelig andel af fx proteinindholdet dog anvendes til foder og fødevarer, fremfor til energi og materialer. Den mest optimale anvendelse kan sikres via prioriteringer både i afgrødevalget og i processeringen i bioraffinaderierne.

Skovens biomasse udnyttes allerede stort set fuldt ud og kommende begrænsninger på udnyttelse af skovene betyder, at der ikke kan forventes mere udbytte i BAU scenarierne på trods af stigende skovareal. I biomassescenarierne for skov er beregnet en stigning fra i dag 27 PJ til 42 PJ, mens der i ekstensiveringsscenarierne kun forventes 6-7 PJ/år i fremtiden. Det skyldes dels at 75.000 ha udlægges til naturreservater med urørt skov med henblik på understøttelse af biodiversitet, dels at skovrejsningen i ekstensiveringsscenarierne sker ved 50 % naturlig succession og 50 % plantning af langsomt voksende arter af løvtræ (Nord-Larsen og Johannsen, 2022).

Af Tabel 1 fremgår vores estimat for efterspørgslen størrelse i det danske energi- og materialesystem. Vi vil i dette afsnit integrere de beskrevne scenarier for bioraffinering med scenarier for at tilfredsstille den efterspørgsel. Under princippet om kaskadeudnyttelse vil vi som udgangspunkt i alle scenarier anvende restfraktionen/residues fra bioraffineringen til energjudnyttelse, og i første omgang vil vi designe scenarier, hvor denne anvendes i biogas – fordi dette rent teknisk og økonomisk vurderes egnet og attraktivt, da restfraktionerne typisk er vandige og bionedbrydelige. Vi vil desuden se på scenarier, hvor halm føres direkte til energjudnyttelse.

Scenarierne laves som 'ekstrem'-scenarier forstået på den måde, at vi antager det fulde potentiale tilført en given konvertering. Fx har vi et scenarie, hvor det samlede halm-potentiale føres til biogas. I praksis vil der naturligvis altid være en andel, som af praktiske og økonomiske årsager ikke vil blive anvendt. Scenarierne viser således de maksimale potentialer. Scenarierne skal ses som 'eksplorative', dvs. de er designet til at være egnede til at fortolke og drage lære af, de er ikke ment som konkrete forslag til systemdesign – dertil har projektet manglet budget til bl.a. samfundsøkonomisk vurdering. Figur 3 viser det generelle koncept for de udviklede systemdesigns.

Figur 3. Koncept for de udviklede designs af det danske energi- og materialesystem. Biomassepotentialet føres ind i systemet fra venstre side af figuren til enten energikonvertering eller bioraffinering. Øverst i figuren ligger de anvendelser, der afgiver punktkildeemissioner af CO₂, som kan opsamles og anvendes via carbon capture. Nederst ligger de anvendelser, der omfatter netto lager i teknosfæren, jorden eller undergrunden. Bioraffineringsprodukterne føres ud til højre i figuren



Bioraffineringsprodukterne er som tidligere beskrevet fraktioneret i biomassens bestanddele og ses som et potentiale til forskellig videre forarbejdning og brug. De indgår ikke i tilfredsstillelsen af det danske energi- og materialesystems behov. Hvis fx lignocellulose-holdige biomassetyper anvendes til energikonvertering, så anvendes de direkte, ikke i form af deres fraktionerede bestanddele efter raffinering. Bioraffineringsprodukterne er således at opfatte som 'ekstra' i forhold til tilfredsstillelsen af det danske behov, dvs. de kan udgøre et eksportpotentiale. Vi har analyseret følgende varianter af konverteringsscenarier:

- A. Al biomasse raffineres – både den grønne biomasse, gylle mm., halm og træmasse
- B. Al halmen anvendes i energikonvertering

Ud over denne opdeling har vi valgt følgende varianter af energikonvertering:

1. Brændstof til skibsfart er methanol. Residues går til biogas, og biogas-CO₂'en skilles fra biogassen og anvendes sammen med brint til PtX formål andetsteds
2. Som 1, men biogassens CO₂-indhold metaniseres med brint på biogasanlæggene
3. Som 2, men tørstoffet i den afgassede biomasse anvendes i pyrolyse/forgasning, hvorefter syntesegassen herfra omdannes til metan i biogasanlægget.

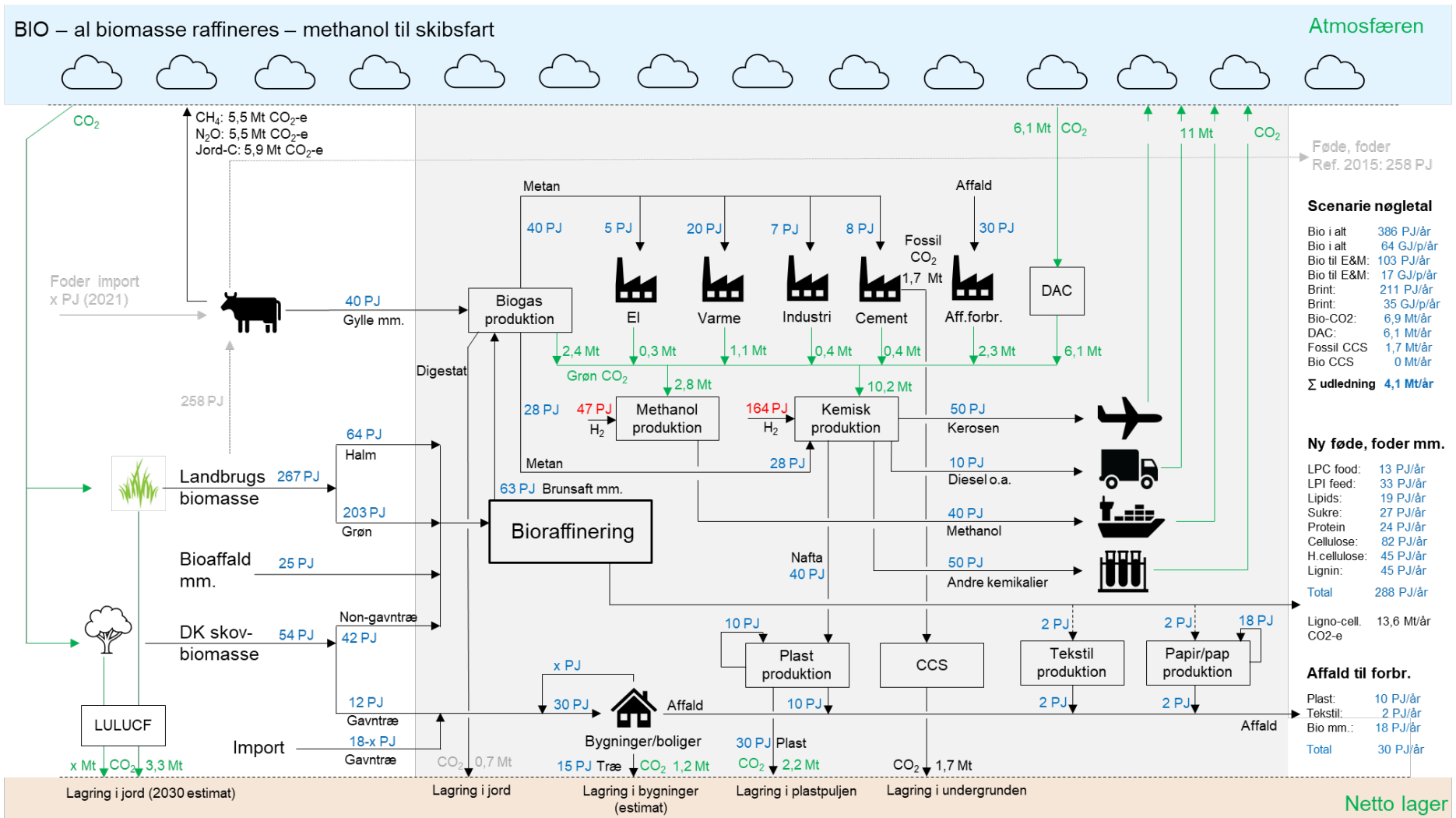
I alle varianter suppleres med anden PtX til flybrændstof, plast mm. via tilgængelig bio-CO₂ fra punktkilder og fra atmosfæren via direct air capture, DAC. Også for CO₂ punktkilder anvendes i systemerne blot det samlede potentiale uden at skele til, hvor der er praktisk og økonomisk realistisk at fange. Scenarierne viser på denne måde konsistent et øvre potentiale, og det gør dem enkle at fortolke. I praksis vil det være sådan, at biomasseressourcer hhv. CO₂ kilder, der ikke lader sig udnytte af forskellige årsager, vil føre til et større behov for DAC.

Systemerne er balancerede ud fra både hensyn til kulstof som ressource og hensyn til den samlede CO₂ balance. Det betyder at der er lavet to sæt af systemdesigns for hver variant:

- Ressource: her sikrer systemdesignet, at alle efterspørgsler efter kulstof bliver tilfredsstillet, og andelen af DAC skales således, at alle efterspørgsler lige præcis er tilfredsstillede. I disse scenarier lagres kun fossil CO₂ i undergrunden, hvorimod Bio-CO₂ i alle tilfælde anvendes i CCU
- Zero: her sikrer systemdesignet, at den samlede danske udledning af drivhusgasser er nul, og DAC (som her har en større andel) er skaleret, så dette lader sig gøre – hvilket bl.a. indebærer at også Bio-CO₂ lagres i undergrunden.

Kombinationerne af biomassescenarier, kaskadescenarier og energikonverteringsscenarier er mange, og det vil være interessant at se mange hundrede kombinationer. Vi har på nuværende tidspunkt valgt her at vise et antal varianter under rammerne af BIO scenariet 2050, se specifikationen af dette i Tabel 5. Den store forskel mellem BIO og EXT scenarierne ligger på træmassen samt i bioraffinering af grønne afgroeder, og der vil ikke være den store implikation af denne forskel ift. design af konverteringssystemet. Vi vurderer, at BIO scenariet 2050 er velegnet til at illustrere de væsentlige pointer og erkendelser, der kan uddrages.

Figur 4 viser systemdesign for BIO_{ressource}. I appendix er vist i alt 12 varianter af systemdesigns.



Figur 4. *BIO_{resource}* scenarie. Al biomasse bioraffineres. Brunsaft og andre residues (63 PJ/år) herfra føres sammen med gylle, dybstrøelse, spildevandsslam mm. (40 PJ/år) til biogas. CO₂'en herfra fanges og anvendes sammen med CO₂ fra andre punktkilder og brint i PtX. DAC anvendes til at supplere punktkilde-CO₂ op til den skala, der skal til for at tilfredsstille alle efterspørgsler efter kulstof. Fossil CO₂ lagres i undergrunden, mens bio-CO₂ anvendes i CCU, idet en andel lagres netto i bygninger og plast

Tabel 6 nedenfor samler overblikket over resultaterne af de modeller, der er sat op.

Scenarie	Bio- raffinering	Konverterings- variant	Bio i alt		Bio til DK energi og materialer		Brint		CO ₂		CCS		Σudledning _{DK} Mt CO ₂ -e/år	Raffineret lignocellulose Mt CO ₂ -e/år
			PJ/år	GJ/pers/år	PJ/år	GJ/pers/år	PJ/år	GJ/pers/år	Bio Mt/år	DAC Mt/år	Fossil Mt/år	Bio Mt/år		
BIO _{ressource}	Al biomasse raffineres	Methanol _{skibsfart}	386	64	103	17	211	35	6,9	6,1	1,7	0	4,1	13,6
		+Metanisering	386	64	103	17	211	35	6,9	6,1	1,7	0	4,1	13,6
		+Pyrolyse	386	64	103	17	200	33	6,9	5,1	1,7	0	4,7	13,6
	Al halm til biogas	Methanol _{skibsfart}	386	64	167	28	155	26	8,5	2,1	1,7	0	8,1	9,8
		+Metanisering	386	64	167	28	155	26	8,5	2,1	1,7	0	8,1	9,8
		+Pyrolyse	386	64	167	28	138	23	8,5	0,8	1,7	0	8,9	9,8
BIO _{zero}	Al biomasse raffineres	Methanol _{skibsfart}	386	64	103	17	211	35	6,9	10,2	1,7	4,1	0	13,6
		+Metanisering	386	64	103	17	211	35	6,9	10,2	1,7	4,1	0	13,6
		+Pyrolyse	386	64	103	17	200	33	6,9	9,8	1,7	4,7	0	13,6
	Al halm til biogas	Methanol _{skibsfart}	386	64	167	28	155	26	8,5	10,2	1,7	8,1	0	9,8
		+Metanisering	386	64	167	28	155	26	8,5	10,2	1,7	8,1	0	9,8
		+Pyrolyse	386	64	167	28	138	23	8,5	9,6	1,7	8,9	0	9,8

Tabel 6. Nøgletal for varianter af systemdesigns for biomasse scenariet BIO opdelt på BIO_{ressource} scenarier, der er designet til at tilfredsstille alle efterspørgsler efter kulstof og BIO_{zero} scenarier, der er designet til at opnå dansk nuludledning af drivhusgas målt som CO₂-ækvivalenter

Væsentlige erkendelser fra disse systemdesigns, jfr. BIO_{resource} scenarierne, er:

- Den til rådighed værende (iht vores BIO 2050 scenarie) danske biomasse er større end det globale gennemsnit. BIO scenariet råder over knap 400 PJ/år til brug for bioraffinering og energi og materialer tilsammen. Det er over 60 GJ/person/år eller mere end 6 gange verdensgennemsnittet
- Når al biomasse i BIO 2050 scenariet gennemgår raffinering, og kun residues herfra anvendes til energi og materialer er ressourcen 17 GJ/person/år eller knap det dobbelte af det globale gennemsnit. Hvis al halm i dette scenarie anvendes til biogas, øges bioressourcen til energi- og materialeformål til 28 GJ/person/år eller knap det tredobbelte af det globale gennemsnit
- I de fleste scenarier skal der en stor andel DAC til for at tilfredsstille alle efterspørgsler efter kulstof. Hvis al halm – udover bioraffineringsresidues – anvendes til biogas, og biogas digestatet endvidere sendes til pyrolyse/forgasning, så vil bioressourcen næsten kunne dække behovet uden DAC – men som nævnt under anvendelse af næsten 3 gange det globale biomassepotentiale til energi og materialer
- I alle scenarier er store mængder brint nødvendige for at dække efterspørgslen. Bemærk, at de godt 200 PJ brint/år, svarende til over 30 GJ/person/år, er 3 gange mere end den forventede brintproduktion fra de 4-6 GW installeret elektrolysekapacitet, der er den nuværende regerings (dvs. regeringen frem til folketingsvalget i november 2022) mål for 2030. Scenarierne med det mindste brintbehov kræver 2 gange større produktion end denne kapacitet.

Væsentlige erkendelser fra BIO_{zero} scenarierne, er:

- På trods af betydelige reduktioner i arealrelaterede drivhusgasemissioner i biomassescenariet (se LULUCF i bunden af Fig. 4) er nettoudledningerne fra landbruget i form af metan, lattergas og CO₂ fra jorden, især lavbundsjord, fortsat betydelig i 2050 og skal modsvares af DAC og CCS, hvis den danske udledning skal gå i nul. Helt op omkring DAC på 10 Mt/år og CCS af Bio-CO₂ omkring 4-9 Mt/år
- Bemærk, at lignocellulose-delen af produkterne fra bioraffineringen indeholder en mængde ækvivalent med 13,6 hhv 9,8 Mt CO₂. Hvis lignocellulose fraktionen af biomasserne således anvendes til formål med mulig efterfølgende CO₂ fangst, og hvis denne CO₂ lagredes i undergrunden, så ville det kunne stort set fjerne behovet for DAC. Men så ville systemet også være baseret på et forbrug på over 60 GJ biomasse/person/år og ville ikke være en model for en løsning for verden generelt. Desuden er det vanskeligt at se, i hvilke anvendelser i energi- og materialesystemet denne biomasse skulle indgå, hvor efterfølgende CO₂ fangst var mulig. Det fuldt elektrificerede system, som er både nødvendigt og økonomisk attraktivt, rummer kun punktkildeemissioner op til omkring 8-10 Mt/år afhængigt af konverteringsscenarie, og dette er ikke tilstrækkeligt til at tilfredsstille behovet for kulstof på efterspørgsels-siden. Det skyldes, at den store efterspørgsel ligger i transportsektoren og kemikaliesektoren, hvor emissionerne er diffuse, samt plastsektoren, hvor størstedelen lagres i teknosfæren og ikke er tilgængelig. Der er således en indbygget mangel på anvendelser, hvor det er muligt at få fat i CO₂'en igen, selv om man ville vælge at designe systemet til et overgennemsnitligt biomasseforbrug.

10. Effekter af biomassescenarier på natur, miljø og klima

I de forskellige arealscenarier tages lavbundsjord ud til oversvømmelse, tørre arealer på jorder med stor pesticidfølsomhed udtages til natur, og skovarealerne øges. I ekstensiveringsscenarier, hvor husdyrproduktionen reduceres, har vi valgt at frigjort foderareal udlægges til natur og ikke produktion. Det betyder samlet set, at betydelige arealer af de ca. 2,5 mio. ha landbrugsjord vil overgå til natur⁷ (naturlig succession eller ekstensiv afgræsning (naturpleje)), se Tabel 7. Derudover vil der specielt i ekstensiveringsscenariet komme en betydeligt øget andel skov fremkommet ved naturlig succession (Nord-Larsen og Johannsen, 2022).

Tabel 7. Landbrugsarealer (ha) omlagt til forskellige naturtyper i 2030 og 2050.

År/scenarie	BAU	Biomasse scenarie	Ekstensiverings scenarie	Biomasse scenarie -20 → 50% husdyr	Ekstensiverings scenarie -20 → 50% husdyr
2030	15.000	15.000	115.000	15.000	275.000
2050	15.000	15.000	115.000	15.000	494.000

Omfanget af omlægning af enårige afgrøder både i biomasse- og ekstensiveringsscenarierne blev i første omgang styret af en målsætning om at opfylde 60 % af det resterende behov for reduktion i nitratudvaskningen for at opfylde målene i EU's Vandrammedirektiv. Andre tiltag i scenarierne vil også påvirke nitratudvaskning, pesticidforbrug og drivhusgasemissioner. En opgørelse af de samlede effekter af scenarierne på drivhusgasudledning og nitratudvaskning er vist for 2030 i Tabel 8.

Vi finder det for usikkert at beregne scenariernes miljø- og klimaeffekter i 2050 af flere grunde. Den betydelige kulstoflagring under flerårige græsmarksafgrøder vil kunne forventes at fortsætte årligt i de første 20 år (Jensen et al., 2022). Herefter er det meget usikkert, hvor længe stigningen kan forventes at fortsætte afhængigt af management de anvendte afgrøder, men også af et forventet ændret klima. Nye teknikker ved græsdyrkning kan muligvis sikre fortsat øget lagring (Madigan et al., 2022), men mangler udvikling og dokumentation. Også nitratudvaskning kan tænkes påvirket på længere sigt af et øget indhold af organisk stof i jorden og af ændret klima.

Tabel 8. Estimer for reduktioner i nitratudvaskning fra rodzonen, udledning af drivhusgasser som følge af arealændringer og fra selve husdyrholdet (dvs. ikke fra foderproduktionen) i landbrugsscenarier for 2030 (fra Jørgensen og Mortensen, 2022).

	BAU	Biomasse	Ekstensivering	Biomasse -20 %	Ekstensivering -20 %
Reduceret nitratudvaskning (tons nitrat-N/år)	2.000	22.000	25.000	29.000	40.000
Reduceret drivhusgas-emission (mio. tons CO ₂ e/år) fra arealændringer	0,9	3,3	5,0	3,7	5,3
Reduceret drivhusgas-emission (mio. tons CO ₂ e/år) fra reduceret husdyrhold				1,6	1,6

⁷ natur skal forstås som områder uden produktionsformål, hvor naturen er hovedprioriteten, bestående af restaurerede økosystemer og deres naturlige processer (EU's Biodiversitetsstrategi).

I forhold til målsætningerne i aftalen om grøn omstilling af landbruget (Regeringen, 2021) er ovenstående miljø- og klimapotentialer signifikante. Aftalen sigter på en samlet reduktion i nitratudvaskningen til havmiljøet på 13.100 tons N årligt for at opfylde EU's Vandrammedirektiv, hvoraf aftalen skal levere 10.800 tons N. Mankoen på 2.300 tons N årligt kan således nemt opfyldes af alle de optimerede scenarier, idet en antagelse om en national retention på 70 % betyder, at alle scenarier undtagen BAU vil levere en reduktion i havmiljøet på over 6.000 tons N årligt.

For klima har aftalen en ambition om at reducere landbrugets drivhusgasudledning med 8 mio. tons CO₂-ækv. i 2030, men har en uopfyldt manko på 6,1 mio. tons CO₂-ækv., som ønskes opfyldt ved udvikling af nye teknologier. Det fremgår af Tabel 8, at implementering af biomasses scenarier vil kunne levere en stor andel heraf, og implementering af Ekstensiverings scenariet, inklusive en reduktion i husdyrproduktionen på 20 %, vil kunne overopfylde målet. Det er vigtigt at bemærke, at ovennævnte estimater udelukkende relaterer til arealanvendelsen og til selve husdyrholdet. Det vil sige, at teknologier til anvendelse af husdyrgødning, halm m.m. til bioenergi og biokul vil kunne bidrage med yderligere drivhusgasfortrængning, således som det er vist i Figur 4. Hertil kommer potentielle bidrag fra de teknologier, som undersøges med henblik på at reducere emissioner fra husdyr og fra gødskning, fx brug af metanhæmmende tilsætningsstoffer til foder og brug af nitrifikationshæmmere i planteproduktionen.

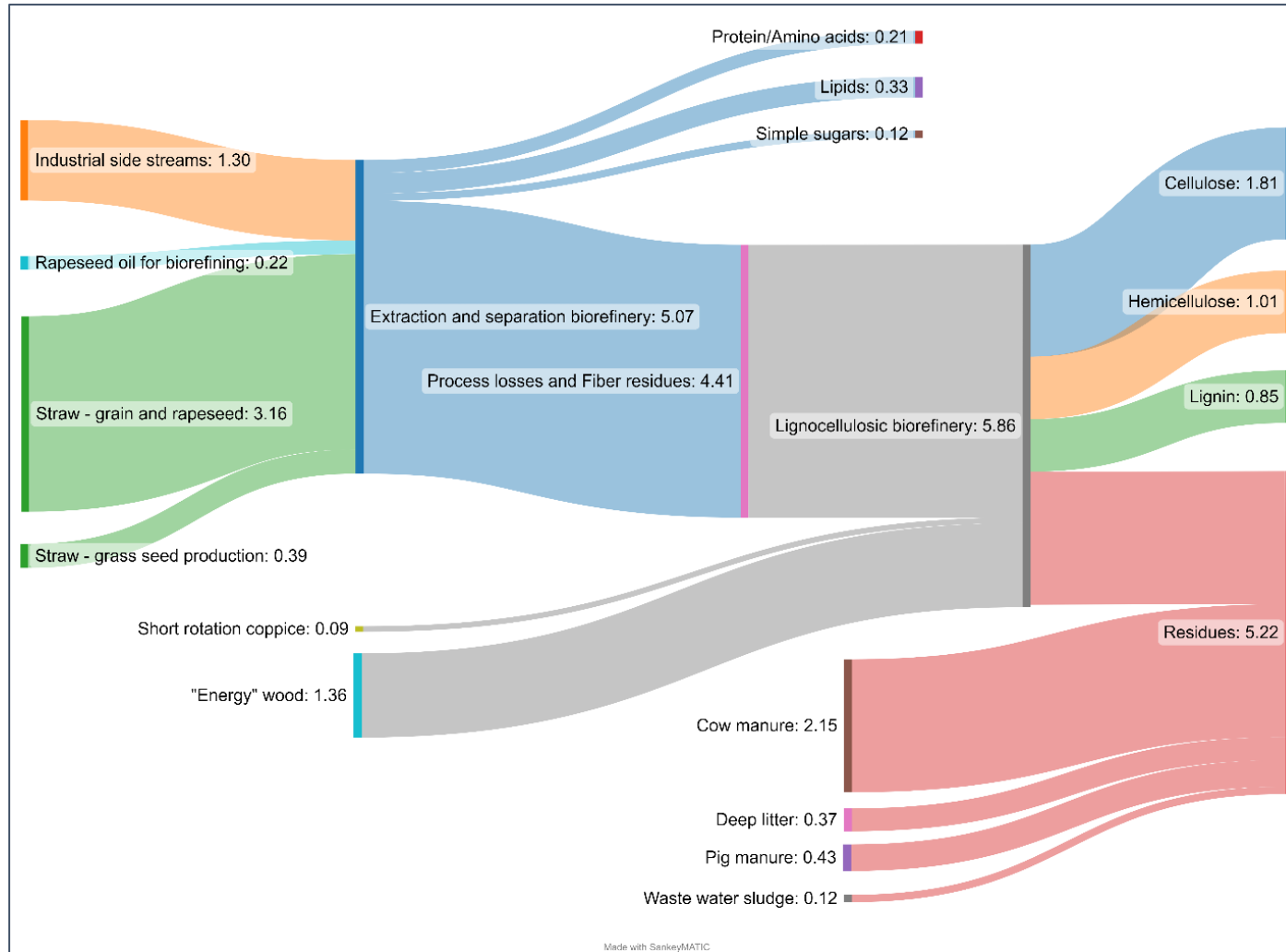
11. Referencer

- Ambye-Jensen M (2022). Arealanvendelse og bioøkonomi. Synergier og systemgevinster ved ændret arealanvendelse og bioraffinering. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, 34 p.
- Bruhn A, Maar M, Holbach AM, Thomsen M (2022). Arealanvendelse og bioøkonomi – forudsætninger for og beregninger af 2030 scenarier. Marin biomasse. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 21 s. – Fagligt notat nr. 2022|21.
- Dalgaard T, Mortensen EØ (2022). Udviklingen i udbytter, fodereffektivitet, gødningsforbrug og arealudtag ved fremskrivning af dansk landbrug til 2030. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet.
- Danish Energy Agency (2014). Energy scenarios towards 2020, 2035, and 2050 [In Danish: Energiscenarier frem mod 2020, 2035 og 2050].
- Danish Environmental Protection Agency (2019). Preliminary assessment of plastic material flows in Denmark. Editors: Pivnenko K, Damgaard A, Astrup TF. ISBN: 978-87-7038-082-9. 68 pp.
- Det Nationale Bioøkonomipanel (2018). Anbefalinger til regeringen om fremtidens proteiner. Miljø- og Fødevareministeriet.
- Energinet (2018). System perspective 2035 [In Danish: Systemperspektiv 2035]
- Energistyrelsen (2021). Energistatistik 2020. ISSN 0906-4699
- Energy Supply (2022): Her er den nye PtX-aftale: Statsligt udbud på 1,25 milliarder og bedre rammevilkår for producenter, Energy Supply, 15. marts 2022, se https://www.energy-supply.dk/article/view/840026/her_er_den_nye_ptxaftale_statsligt_udbud_pa_125_milliarder_og_bedre_rammevilkar_for_producenter?ref=newsletter&utm_medium=email&utm_source=newsletter&utm_campaign=daily
- Europakommissionen (2000). Vandrammedirektivet, Rådets og Europa-Parlamentets direktiv 2000/60/EF om fastlæggelse af en ramme for Fællesskabets vandpolitiske foranstaltninger.
- Europakommissionen (2020). EU's biodiversitetsstrategi for 2030. Meddelelse fra Kommissionen til Europa-parlamentet, Rådet, Det europæiske økonomiske og sociale udvalg og Regionsudvalget. COM(2020) 380 final.
- Gurría P, Ronzon T, Tamosiunas S, López R, García Condado S, Guillén J, Cazzaniga NE, Jonsson R, Banja M, Fiore G, M'Barek R (2017). Biomass flows in the European Union: The Sankey Biomass diagram- towards a cross-set integration of biomass, EUR 28565 EN, doi:10.2760/352412
- Gylling M, Nord-Larsen T, Bruhn A, Thomsen M, Ambye-Jensen M, Øster Mortensen E, Jørgensen U (2022). Potential Danish biomass production and utilization in 2030. DCA Report (under udgivelse).
- Hansen JH, Hamelin L, Taghizadeh-Toosi A, Olesen JE, Wenzel H. (2020). Agricultural residues bioenergy potential that sustain soil carbon depends on energy conversion pathways. *GCB Bioenergy*. 2020;00:1-12. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12733>
- Hunter MC, Smith RG, Schipanski ME, Atwood LW, Mortensen DA (2017) Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification. *BioScience* 67, 386-391.

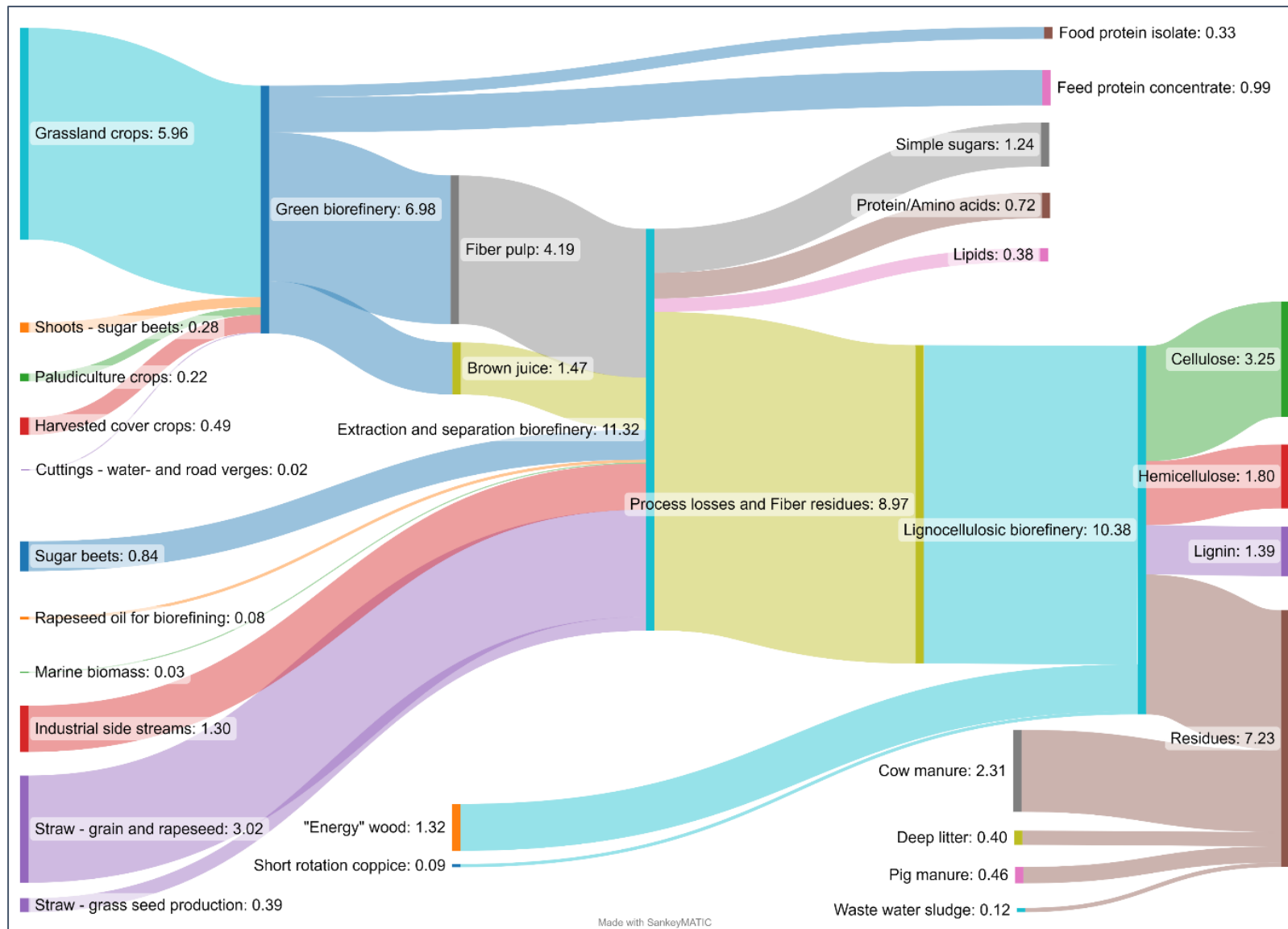
- Hübinger W (2021). Anforderungen and die Chemie im gesellschaftlichen Wandel, BASF SE, 34 pp.
- International Energy Agency (2021). Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector.
- IPCC Working Group III (2022). IPCC Sixth Assessment Report. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.
- Jensen JL, Beucher AM, Eriksen J (2022) Soil organic C and N stock changes in grass-clover leys: Effect of grassland proportion and organic fertilizer. *Geoderma* 424, 116022.
- Jørgensen U, Mortensen EØ (2022). Beregning af effekter på udledningen af klimagasser og nitratudvaskning af scenarier for arealanvendelse og biomasseproduktion i landbruget år 2030. Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet (under udgivelse).
- Klimapartnerskab for luftfart (2021). Sektorkøreplan. 29 pp.
- Klimarådet (2018). Biomassens betydning for grøn omstilling: Klimaperspektiver og anbefalinger til regulering af fast biomasse til energiformål.
- Lund H, Hvelplund F, Mathiesen BV, Østergaard P, Christensen P, Connolly D, et al. (2011). Coherent Energy and Environmental System Analysis. Department of Development and Planning, Aalborg University.
- Lund H, Mathiesen BV (2006). The Danish Society of Engineers Energy Plan 2030: Background report [In Danish: Ingeniørforeningens Energiplan 2030: baggrundsrapport]. Copenhagen: 2006.
- Lund H, Mathiesen BV, Thellufsen JZ, Sorknæs P, Chang M, Kany MS, Skov IR (2021). IDAs Klimasvar 2045: Sådan bliver vi klimaneutrale. Ingeniørforeningen IDA.
- Madigan AP, Zimmermann J, Krol DJ, Williams M, Jones MB (2022). Full inversion tillage (FIT) during pasture renewal as a potential management strategy for enhanced carbon sequestration and storage in Irish grassland soils. *Science of the Total Environment* 805, 150342.
- Manevski K, Lærke PE, Jiao XR, Santhome S, Jørgensen U (2017) Biomass productivity and radiation utilisation of innovative cropping systems for biorefinery. *Agricultural and Forest Meteorology* 233, 250-264.
- Manevski K, Lærke PE, Olesen JE, Jørgensen U (2018) Nitrogen balances of innovative cropping systems for feedstock production to future biorefineries. *Science of the Total Environment* 633, 372-390.
- Mathiesen BV, Lund H, Hansen K, Skov IR, Djørup SR, Nielsen S, et al. (2015). IDA's Energy Vision 2050.
- Mathiesen BV, Lund H, Karlsson K (2009). The Danish Society of Engineers Climate plan 2050: Background report [In Danish: IDA's Klimaplan 2050: Baggrundsrapport].
- Miljø- og Fødevarerministeriet (2018). Danmarks nationale skovprogram. ISBN: 978-87-7091-604-2.
- Mortensen EØ, Jørgensen U (2022). Danish agricultural biomass production and utilization in 2030. Advisory memorandum from DCA – Danish Centre for Food and Agriculture, Aarhus University, 24 p.
- Mortensen AW, Mathiesen BV, Hansen AB, Pedersen SL, Grandal RD, Wenzel, H (2020). The role of electrification and hydrogen in breaking the biomass bottleneck of the renewable energy system – A study on the Danish energy system. *Applied Energy* 275, 115331.

- Mortensen EØ, Rasmussen C, Jørgensen U (2022). Biomasseproduktion i land- og skovbrug frem til 2050. Rådgivningsrapport fra DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet (under udgivelse).
- Nord-Larsen T, Johannsen V (2022): Fremskrivning af danske biomasseressourcer – skovressourcen. IGN Rapport, maj 2022. Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet, Frederiksberg. 38 s. ill.
- Petersen PLF, Ottesen MR (2021). Composition, Material Quality and Market Potential of Source Separated and Post-sorted Plastic Waste. MSc-thesis Department of Green Technology, Faculty of Engineering, University of Southern Denmark, 252 pp.
- Regeringen, Venstre, Dansk Folkeparti, Radikale Venstre, Socialistisk Folkeparti, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti, Liberal Alliance og Alternativet (2020). Klimaaftale for energi og industri mv. 2020.
- Regeringen, Venstre, Dansk Folkeparti, Socialistisk Folkeparti, Radikale Venstre, Enhedslisten, Det Konservative Folkeparti, Nye Borgerlige, Liberal Alliance og Kristendemokraterne (2021). Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug.
- Rasmussen TV, Thybring EE, Munch-Andersen J, Nord-Larsen T, Jørgensen U, Gottlieb SC, Bruhn A, Rasmussen B, Beim A, Thomsen MR, Munch-Petersen P, Primdahl MB, Bentsen NS, Frederiksen N, Koch M, Beck SA, Bretner M-L, Wittchen A, 2022. Biogene materials anvendelse i byggeriet. BUILD Rapport 2022:09 Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet, 209 pp.
- Tønning K, Kaysen O (2010). Statistik for genanvendelse af emballageaffald 2008. Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 1333. <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2010/978-87-92668-17-2/html/indhold.htm>
- Urhammer E, Svantesson S, Kristensen S, Gravgård O, Møller FS 2021. Hvad bruger vi af plastik i Danmark? DST Analyse 2021:14, 12 pp.
- Watson D, Trzapacz S, Pedersen OG (2018). Kortlægning af tekstilflows i Danmark. Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 2017, 70 pp.
- Wenzel H, Høibye L, Duban Grandal R, Hamelin L, Bird DN, Olesen A (2014). Carbon footprint of bioenergy pathways for the future Danish energy system.

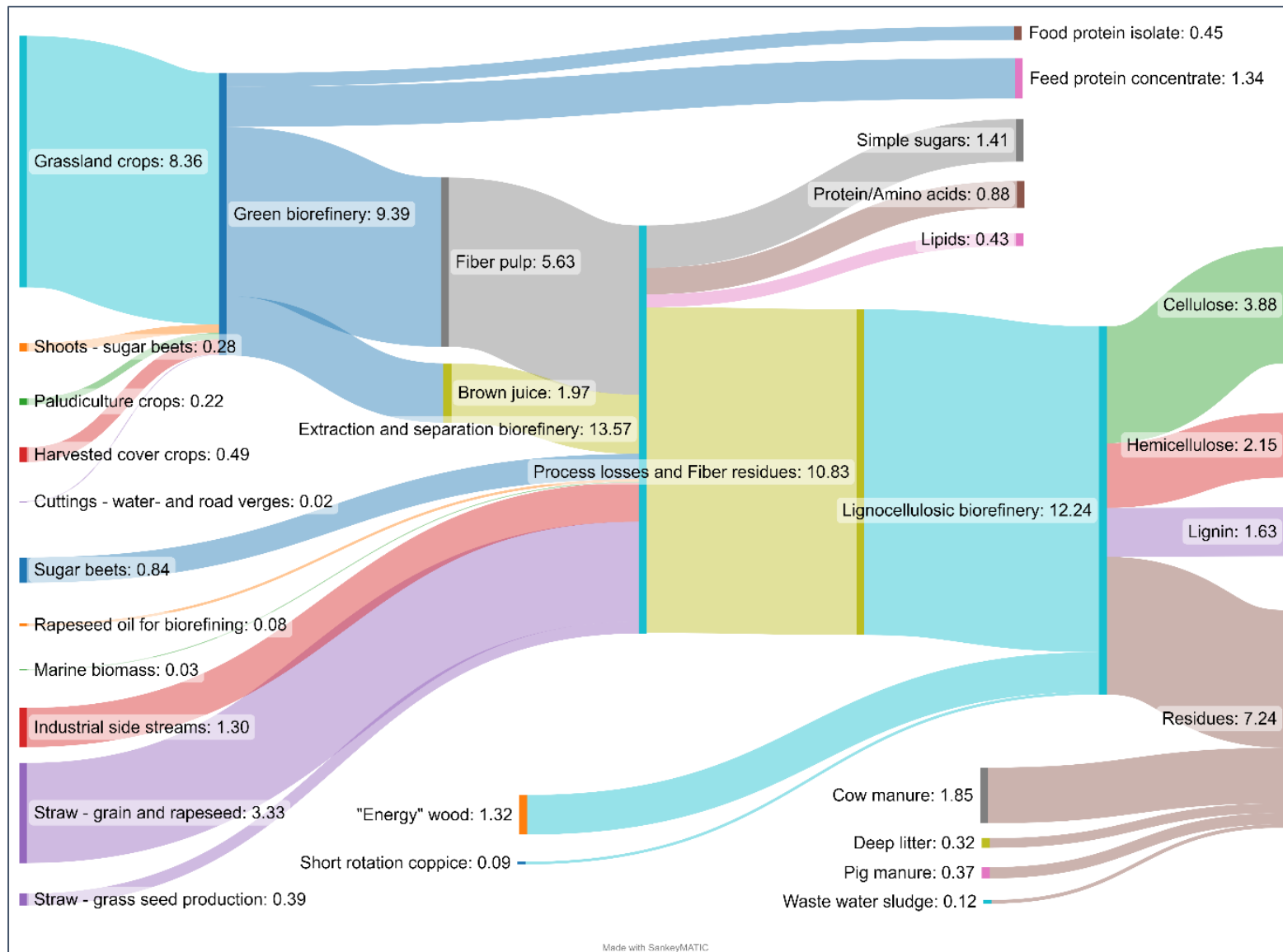
Appendix 1: Sankey diagrammer over kaskadeudnyttelse og bioraffinering



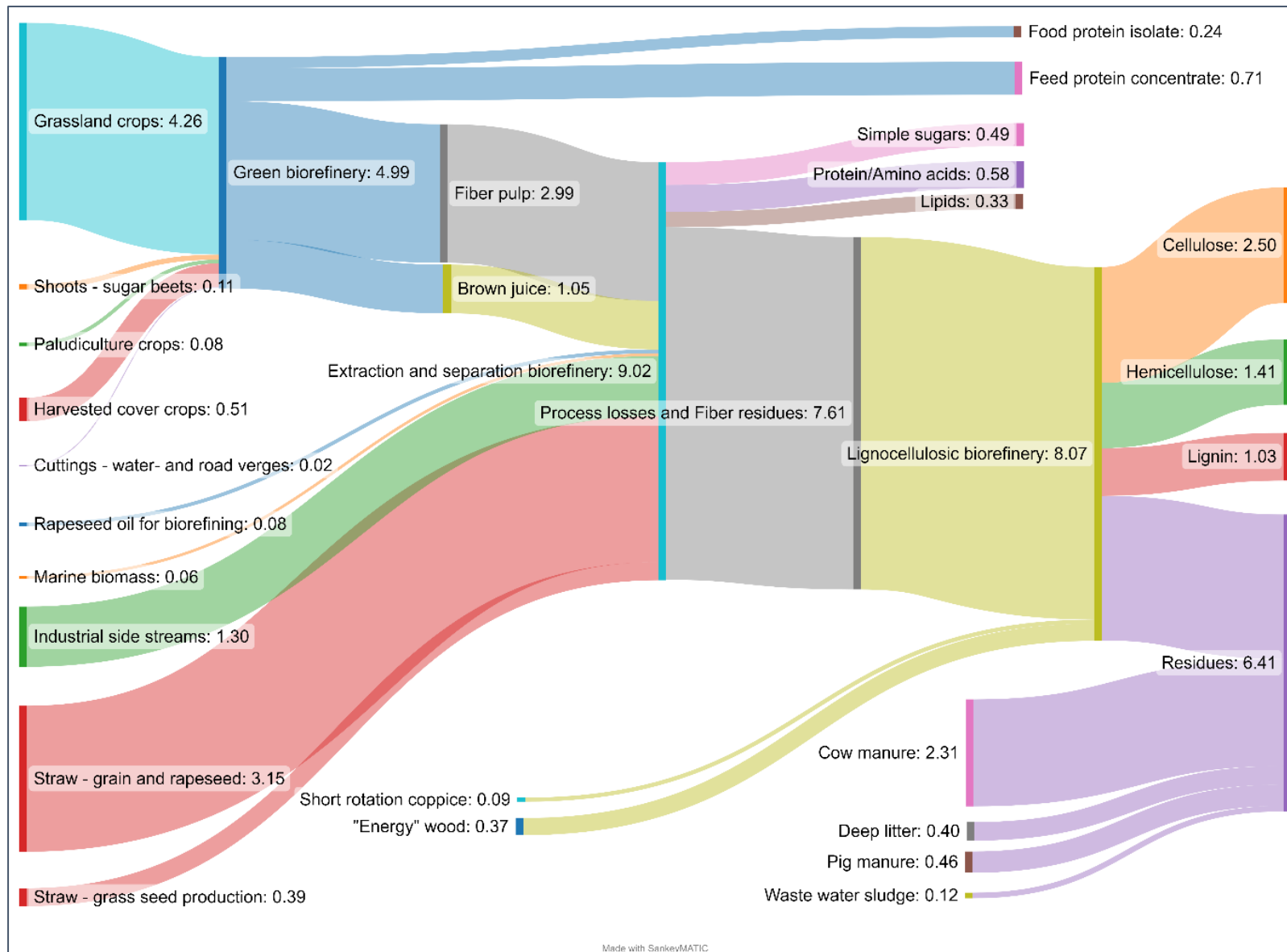
2030 - BAU



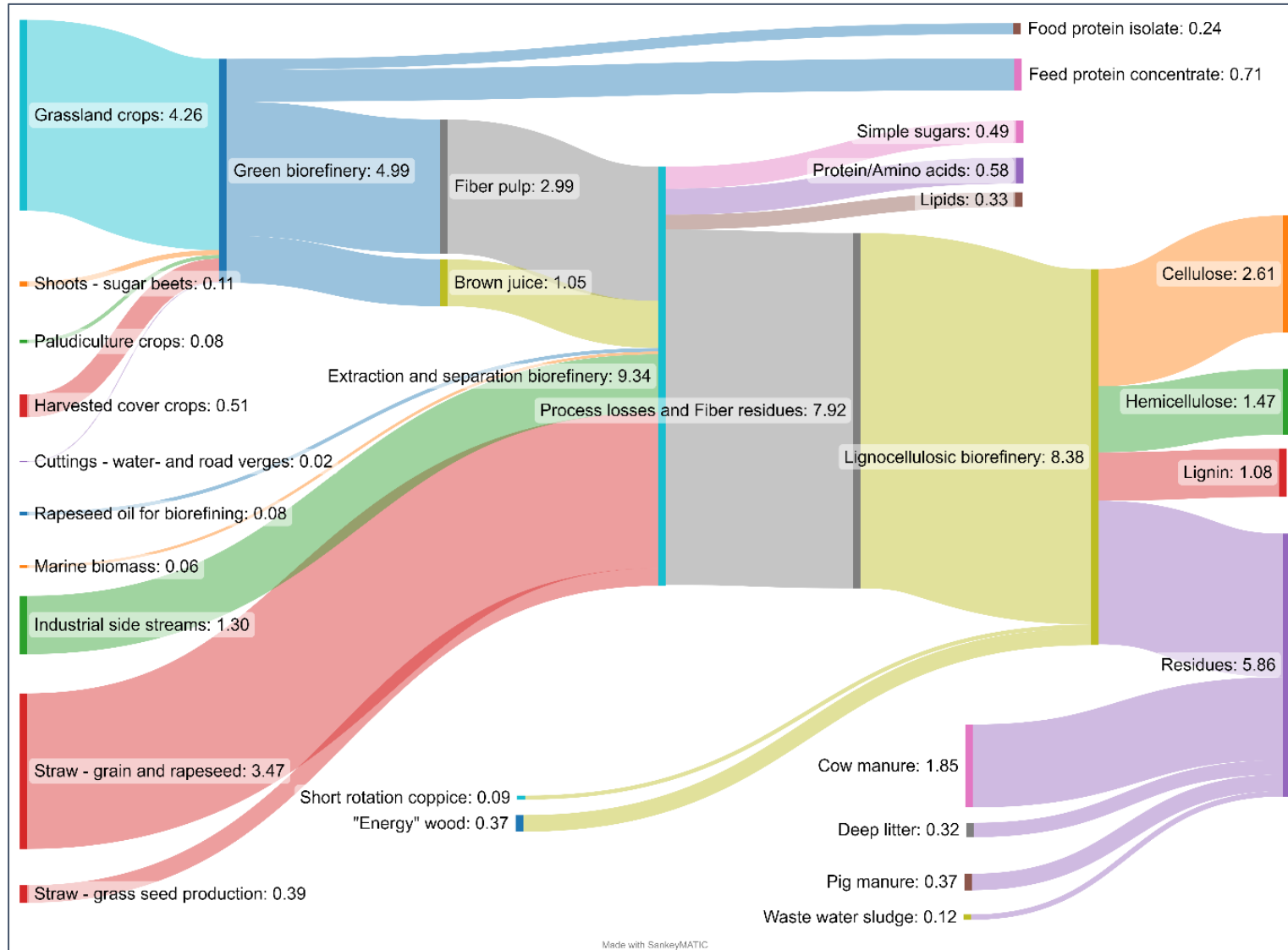
2030 - BIO



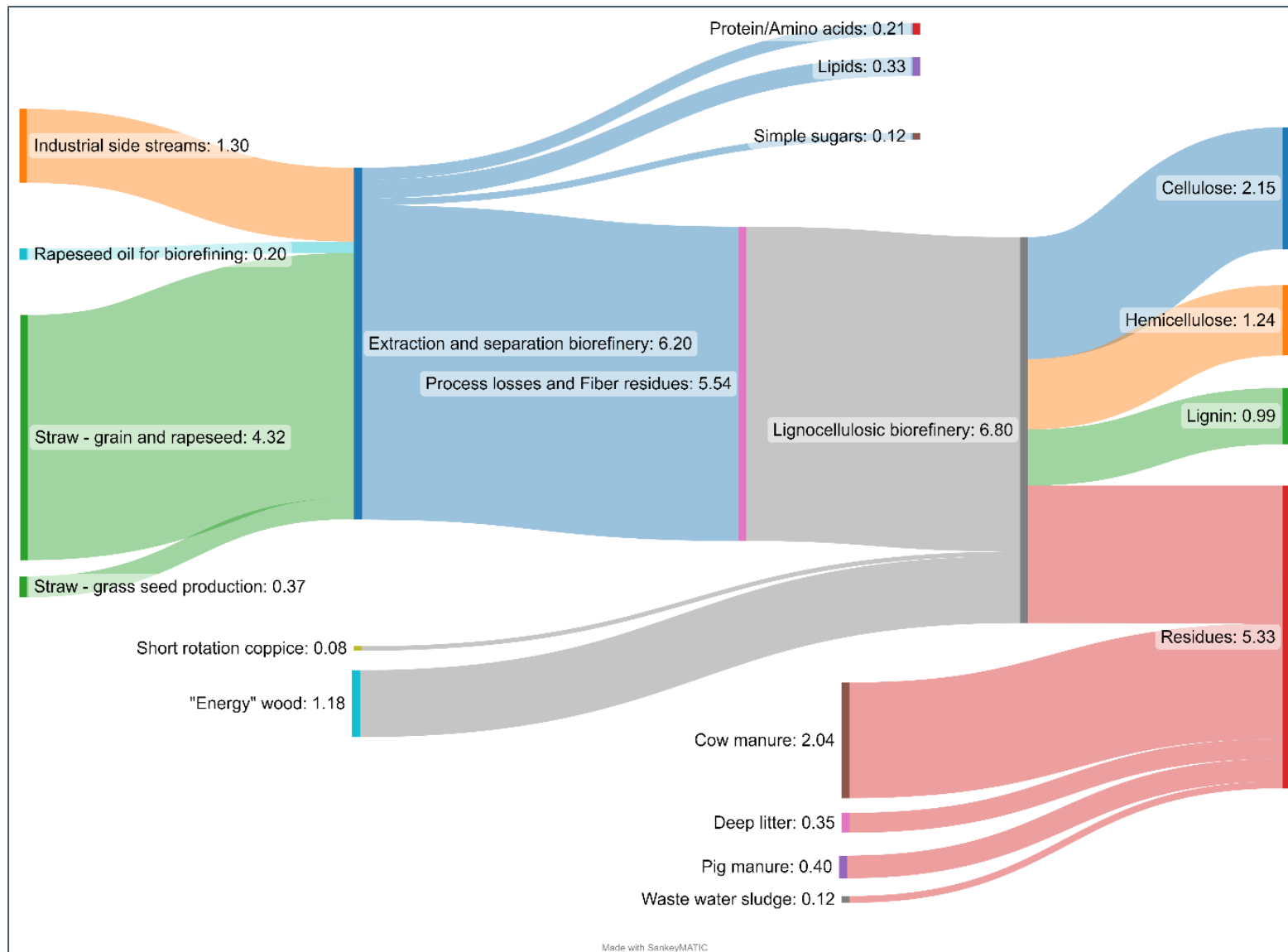
2030 - BIO -20% ANIMAL PROD.



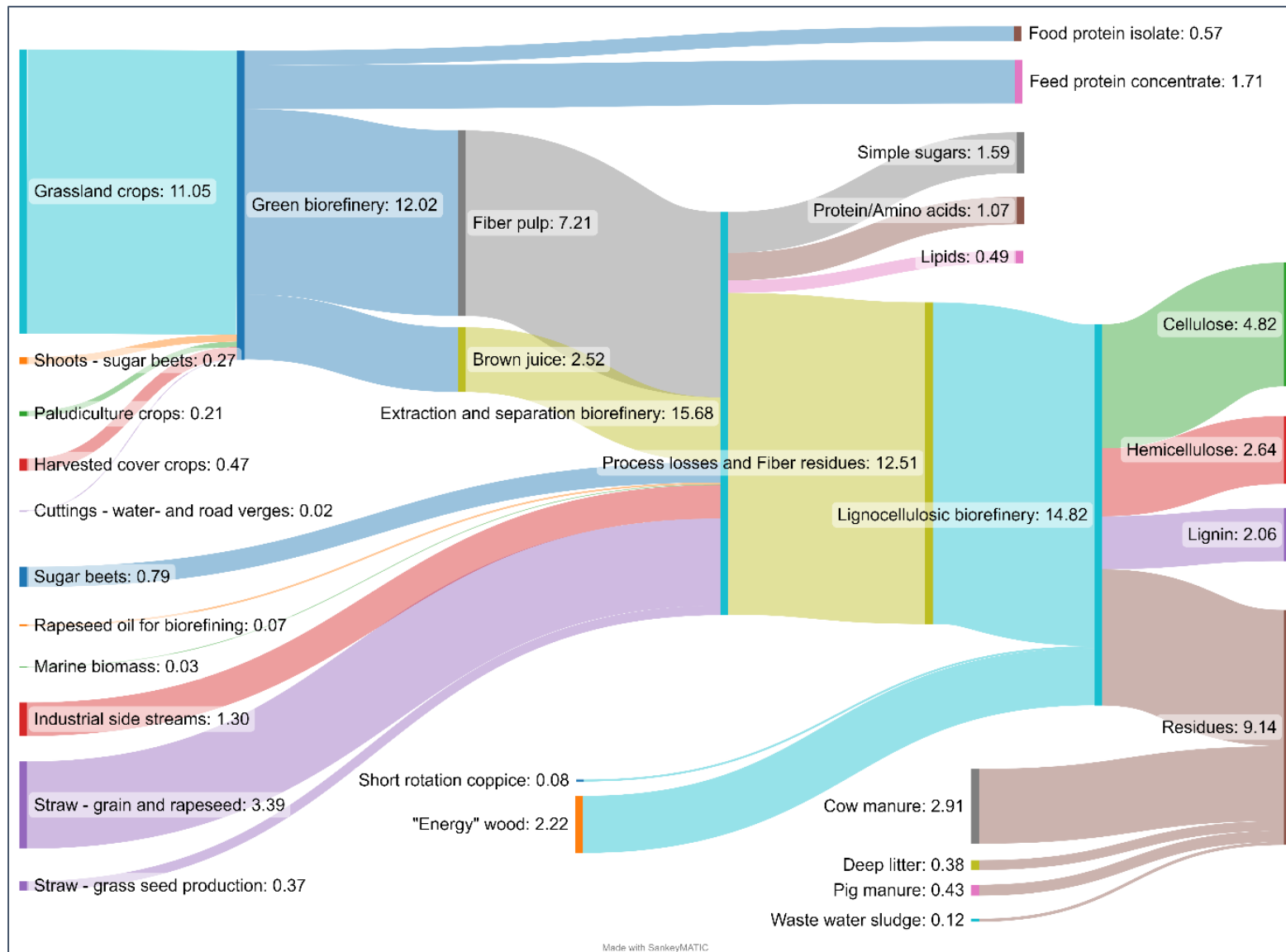
2030 – EXT



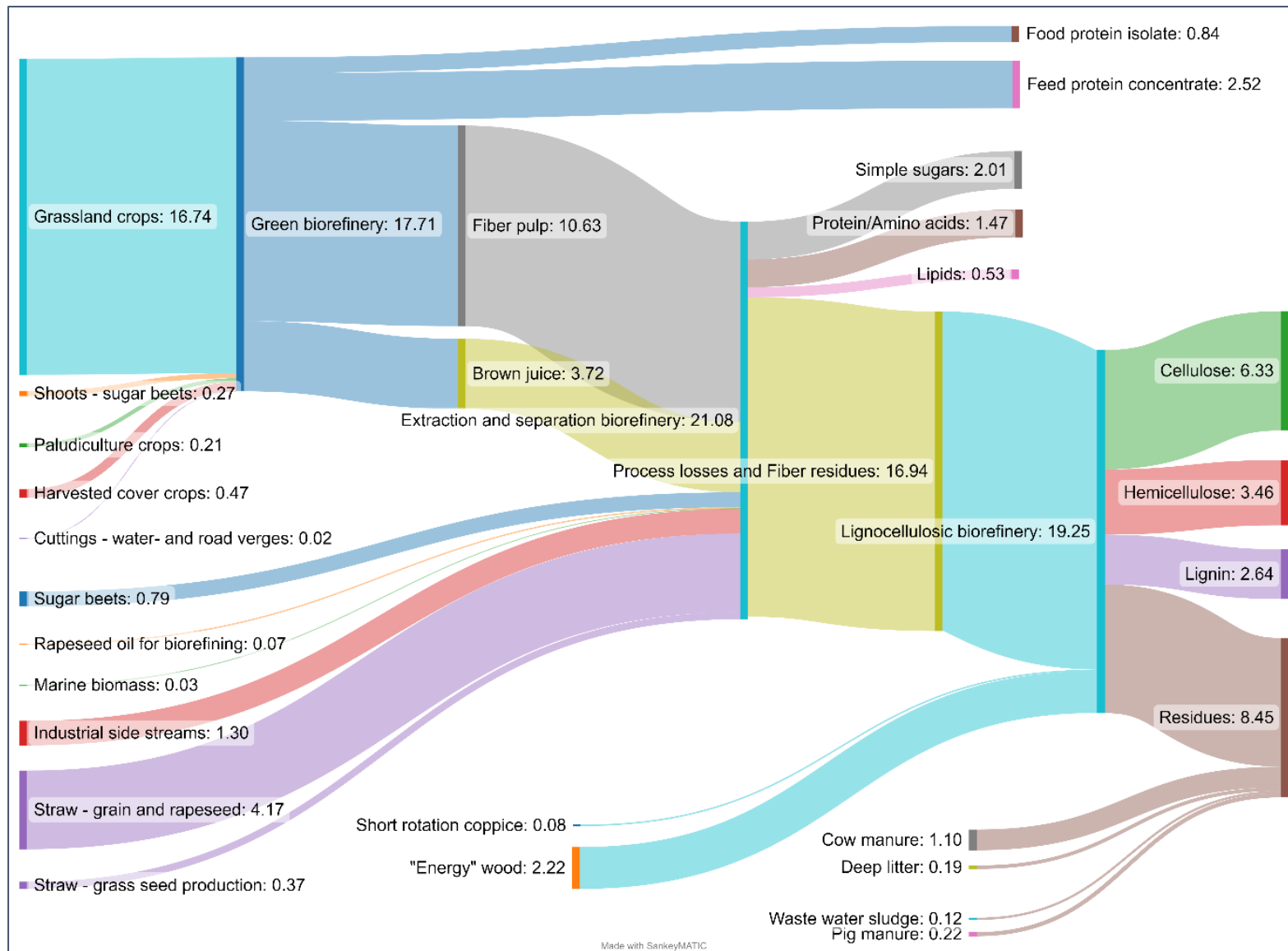
2030 – EXT -20% ANIMAL PROD.



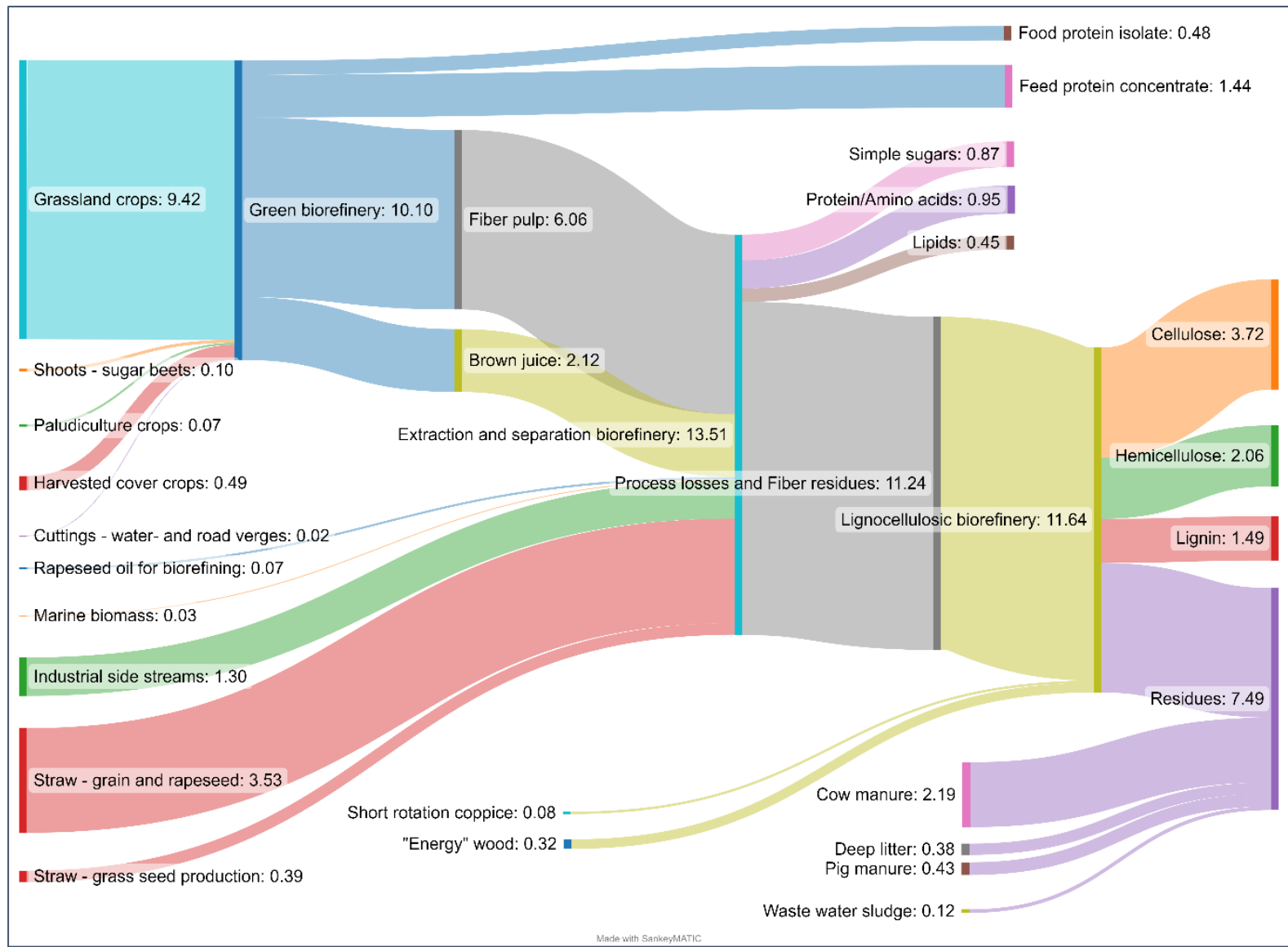
2050 - BAU



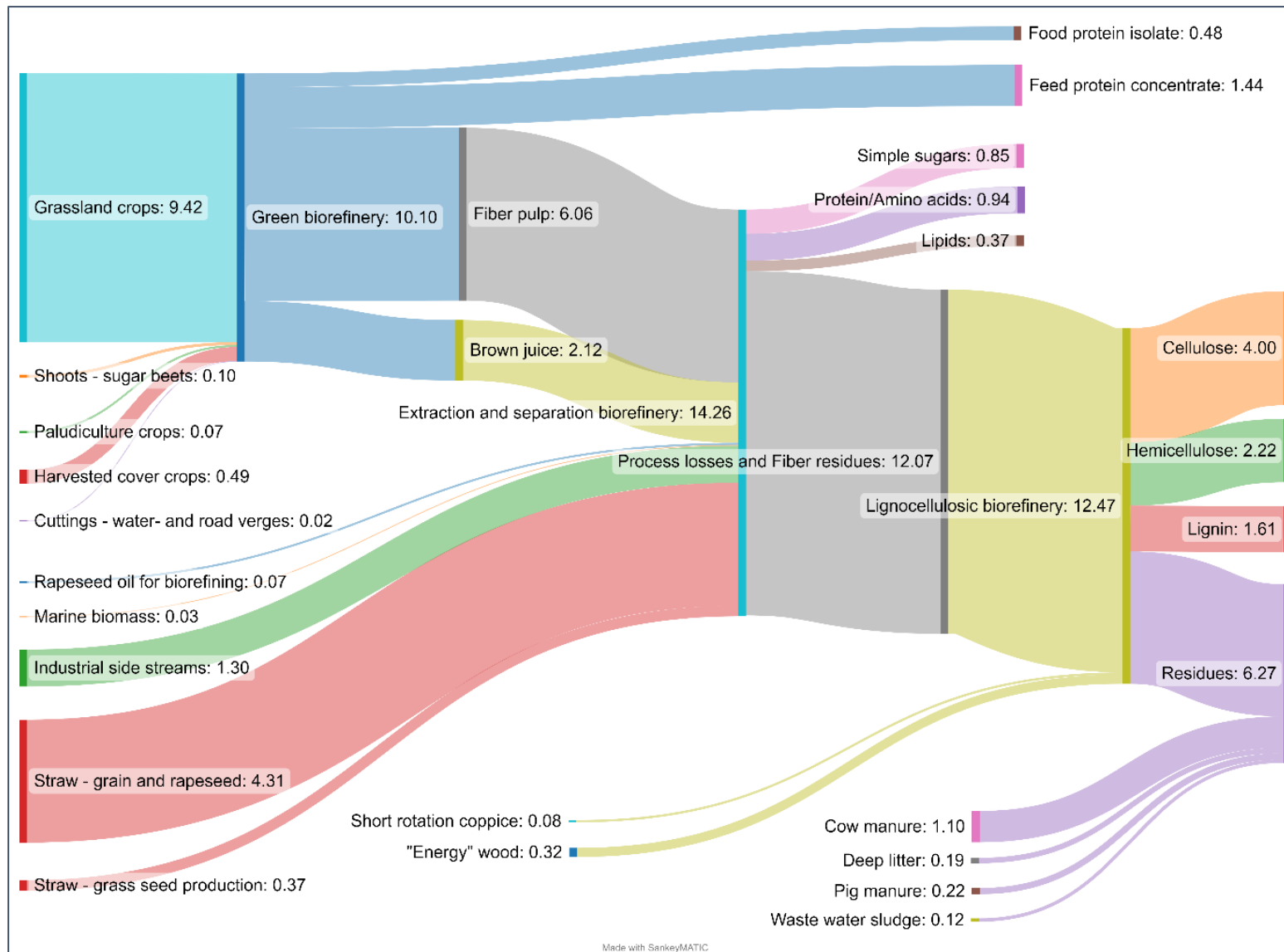
2050 – BIO



2050 – BIO -50% ANIMAL PROD.

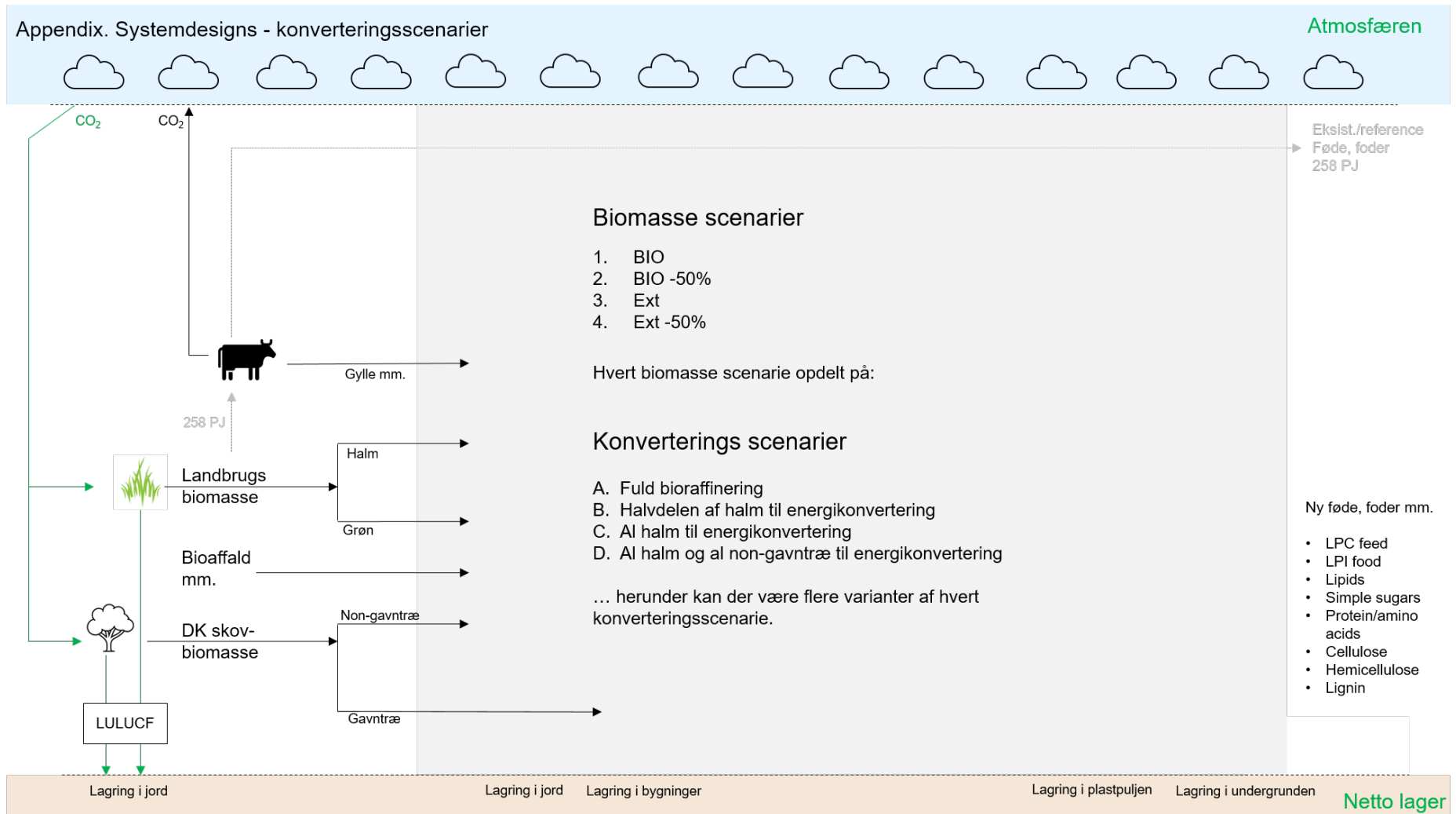


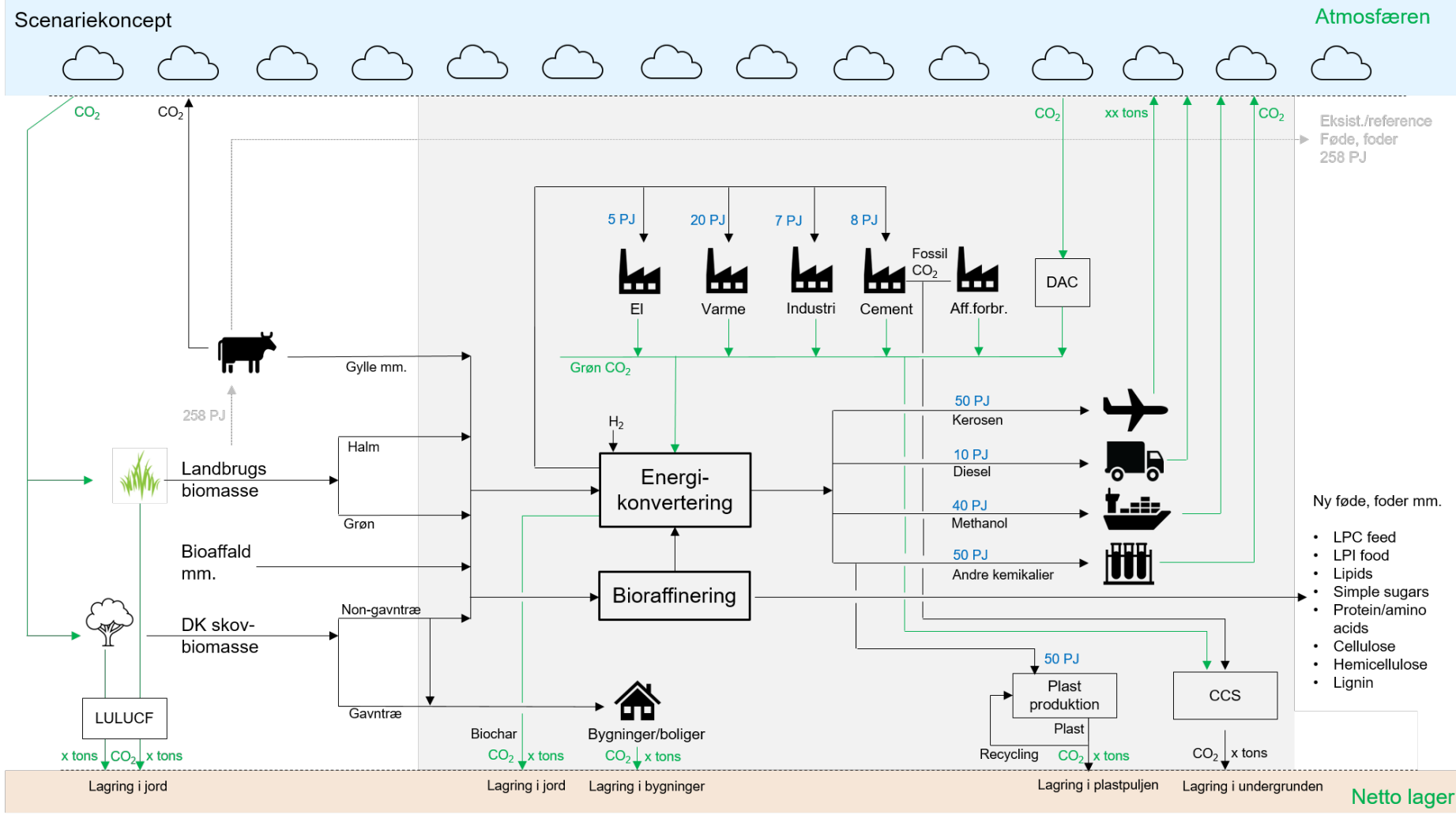
2050 – EXT



2050 – EXT -50% ANIMAL PROD.

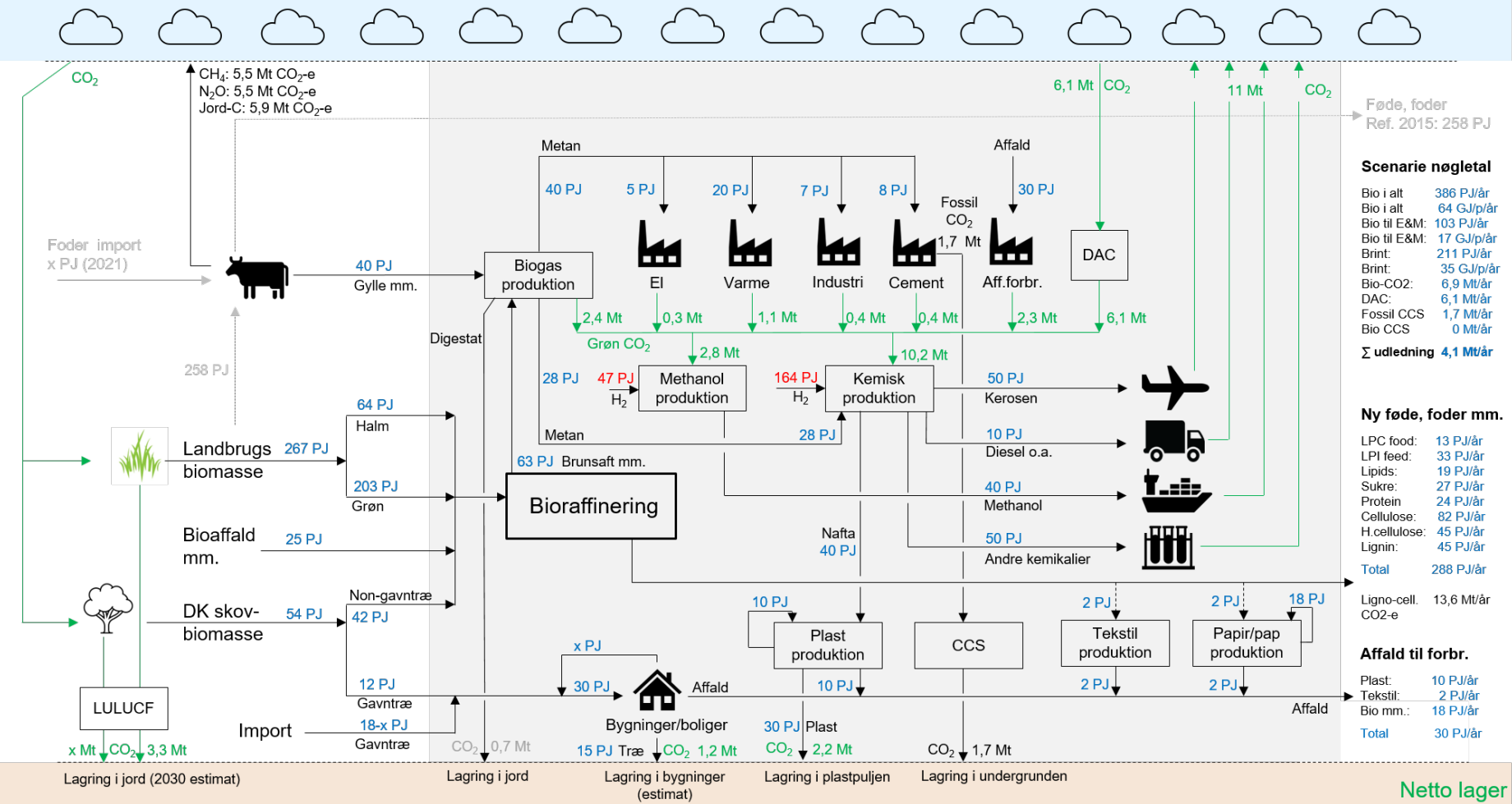
Appendix 2: Systemdesigns - konverteringsscenarier





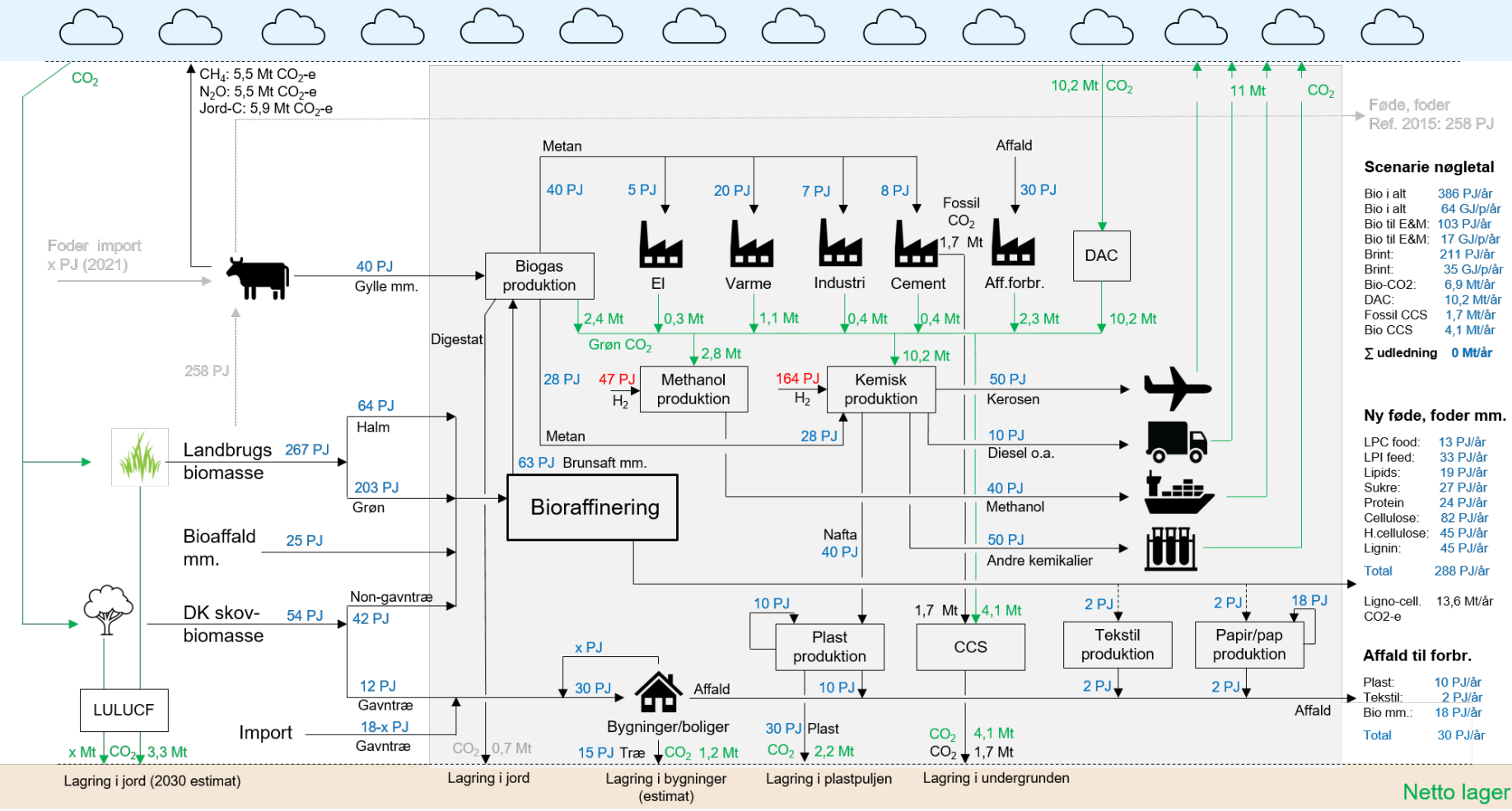
BIO – al biomasse raffineres – methanol til skibsfart

Atmosfæren



BIO_{zero} – al biomasse raffineres – methanol til skibsfart

Atmosfæren



Føde, foder
Ref. 2015: 258 PJ

Scenarie nøgletal

Bio i alt	386 PJ/år
Bio i alt	64 GJ/p/år
Bio til E&M:	103 PJ/år
Bio til E&M:	17 GJ/p/år
Brint:	211 PJ/år
Brint:	35 GJ/p/år
Bio-CO ₂ :	6,9 Mt/år
DAC:	10,2 Mt/år
Fossil CCS:	1,7 Mt/år
Bio CCS:	4,1 Mt/år
Σ udledning	0 Mt/år

Ny føde, foder mm.

LPC food:	13 PJ/år
LPI feed:	33 PJ/år
Lipids:	19 PJ/år
Sukre:	27 PJ/år
Protein:	24 PJ/år
Cellulose:	82 PJ/år
H.cellulose:	45 PJ/år
Lignin:	45 PJ/år
Total	288 PJ/år

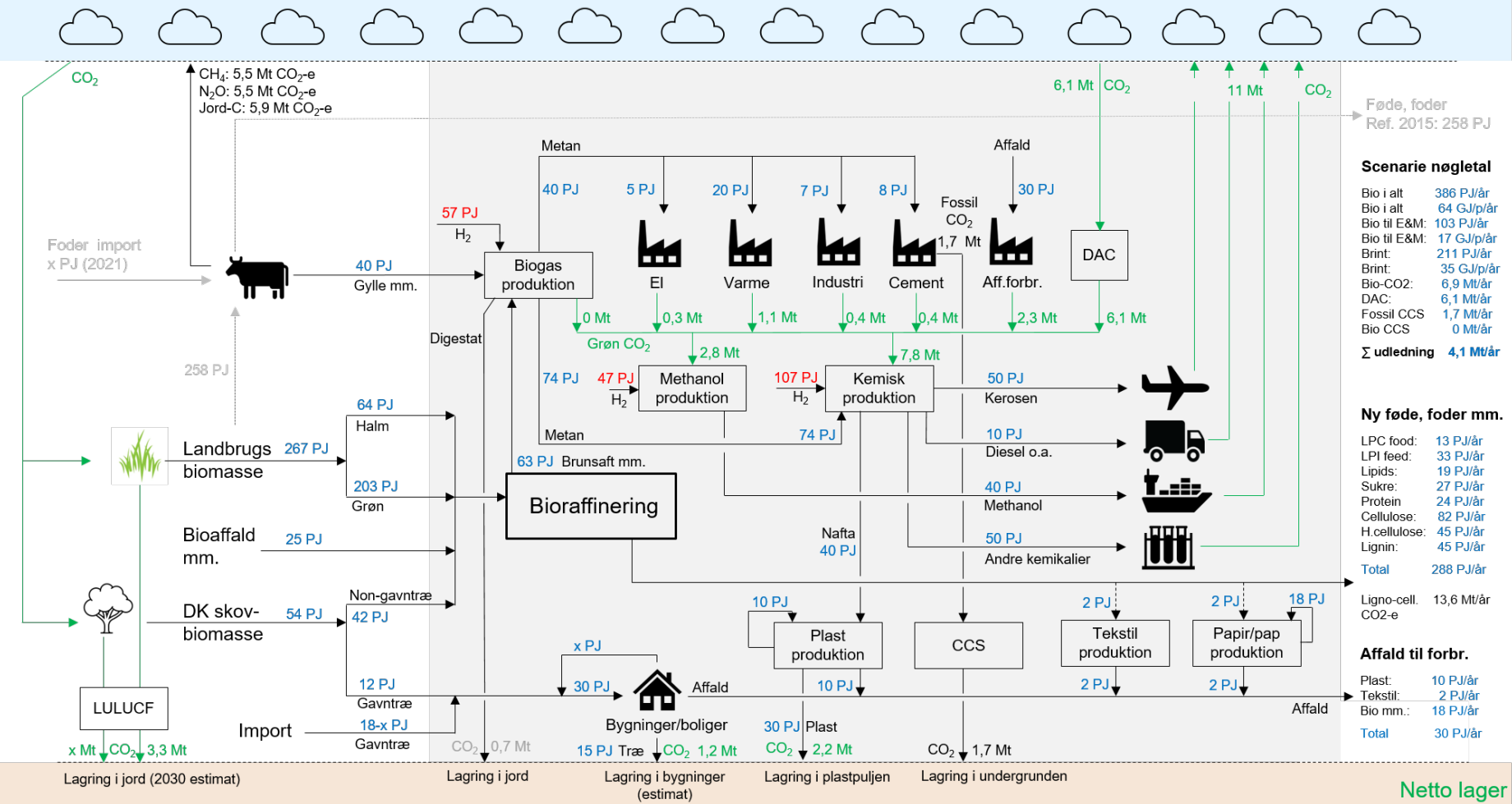
Affald til forbr.

Ligno-cell.	13,6 Mt/år
CO ₂ -e	
Plast:	10 PJ/år
Tekstil:	2 PJ/år
Bio mm.:	18 PJ/år
Total	30 PJ/år

Netto lager

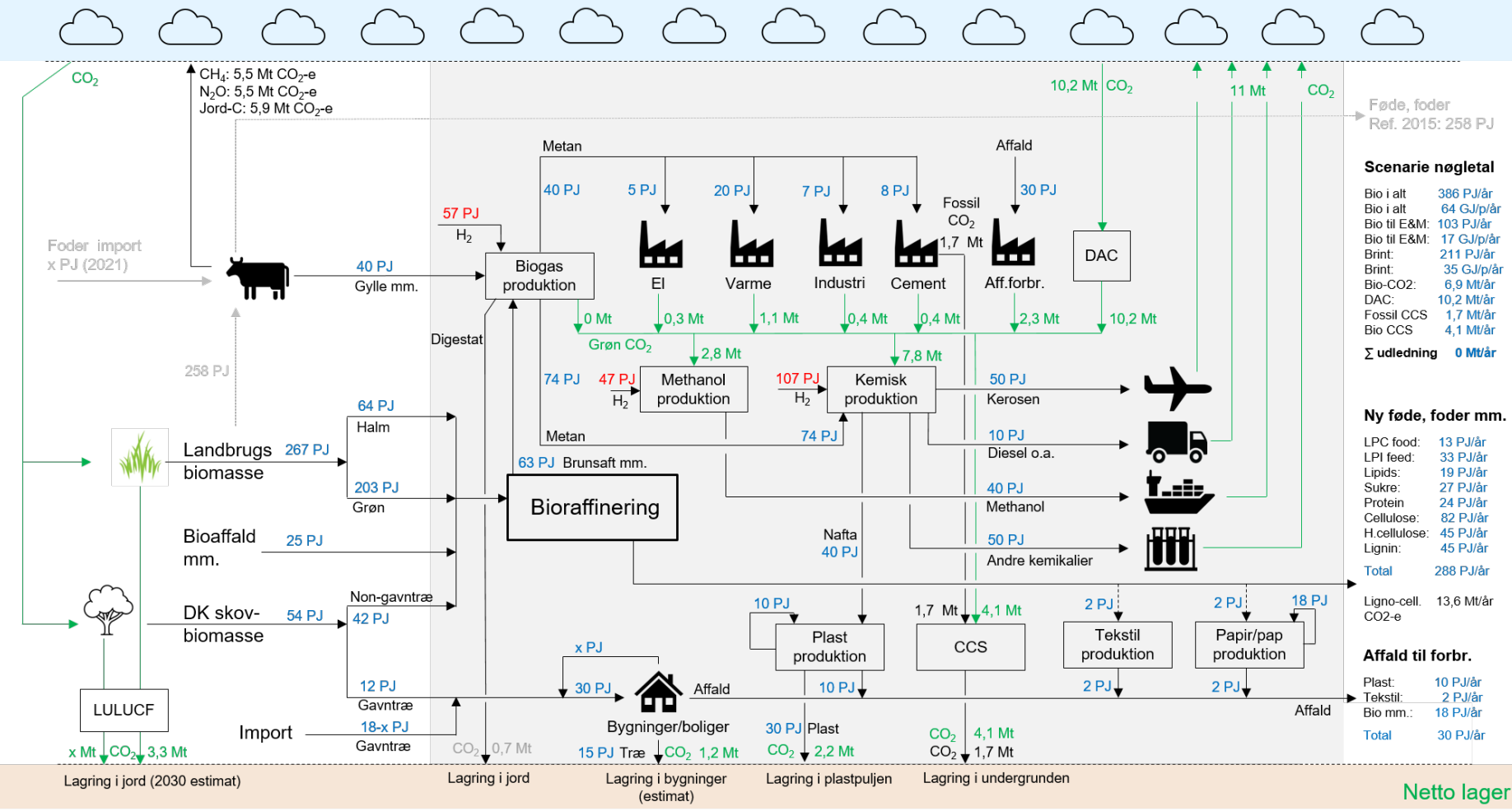
BIO – al biomasse raffineres – methanol til skibsfart – metanisering

Atmosfæren



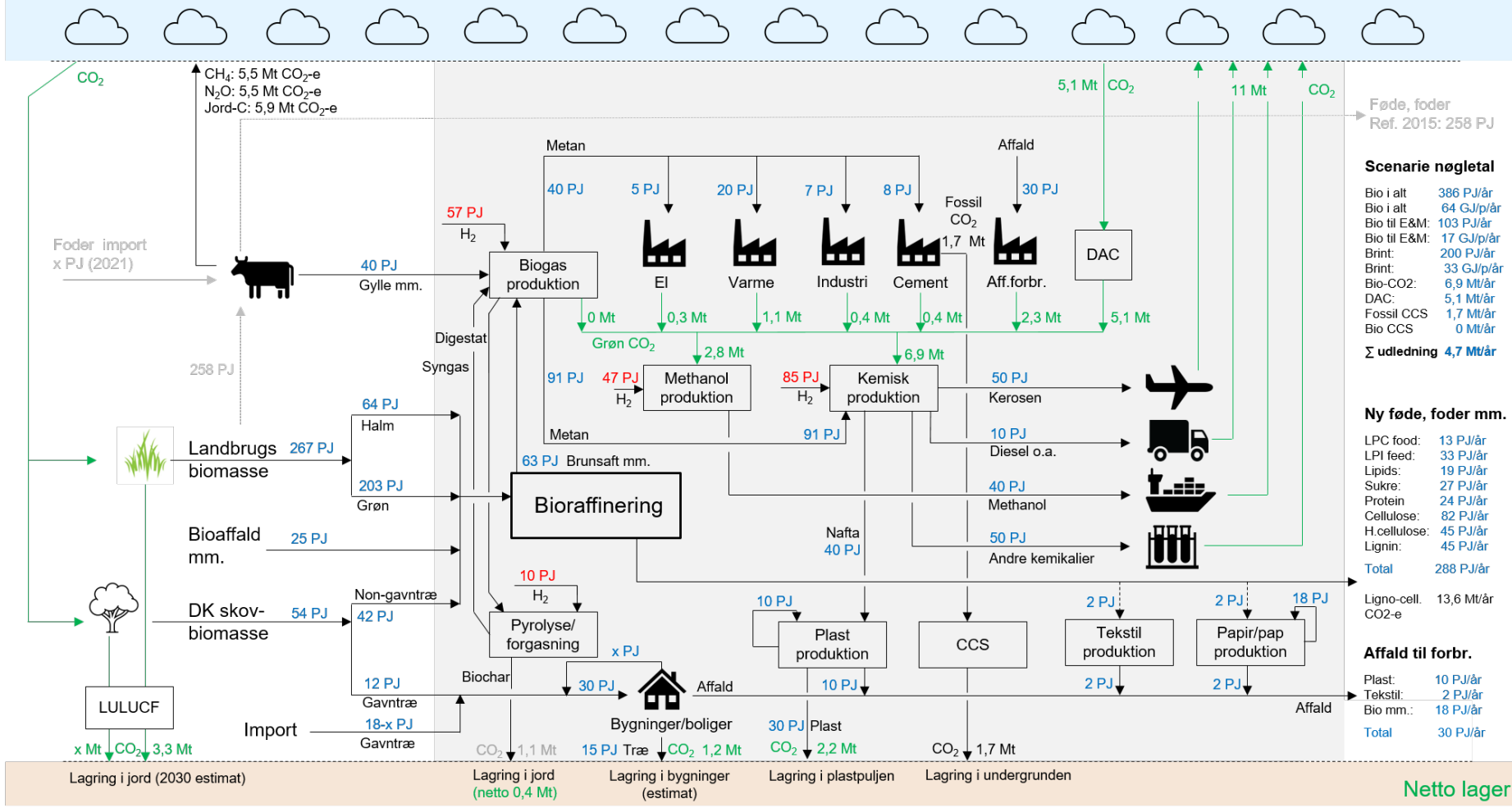
BIO_{zero} – al biomasse raffineres – methanol til skibsfart – metanisering

Atmosfæren



BIO – al biomasse raffineres – methanol til skibsfart – metanisering + pyrolyse/forgasning

Atmosfæren



Føde, foder
Ref. 2015: 258 PJ

Scenarie nøgletal

Bio i alt	386 PJ/år
Bio i alt	64 GJ/p/år
Bio til E&M:	103 PJ/år
Bio til E&M:	17 GJ/p/år
Brint:	200 PJ/år
Brint:	33 GJ/p/år
Bio-CO2:	6,9 Mt/år
DAC:	5,1 Mt/år
Fossil CCS:	1,7 Mt/år
Bio CCS:	0 Mt/år
Σ udledning	4,7 Mt/år

Ny føde, foder mm.

LPC food:	13 PJ/år
LPI feed:	33 PJ/år
Lipids:	19 PJ/år
Sukre:	27 PJ/år
Protein:	24 PJ/år
Cellulose:	82 PJ/år
H.cellulose:	45 PJ/år
Lignin:	45 PJ/år
Total	288 PJ/år

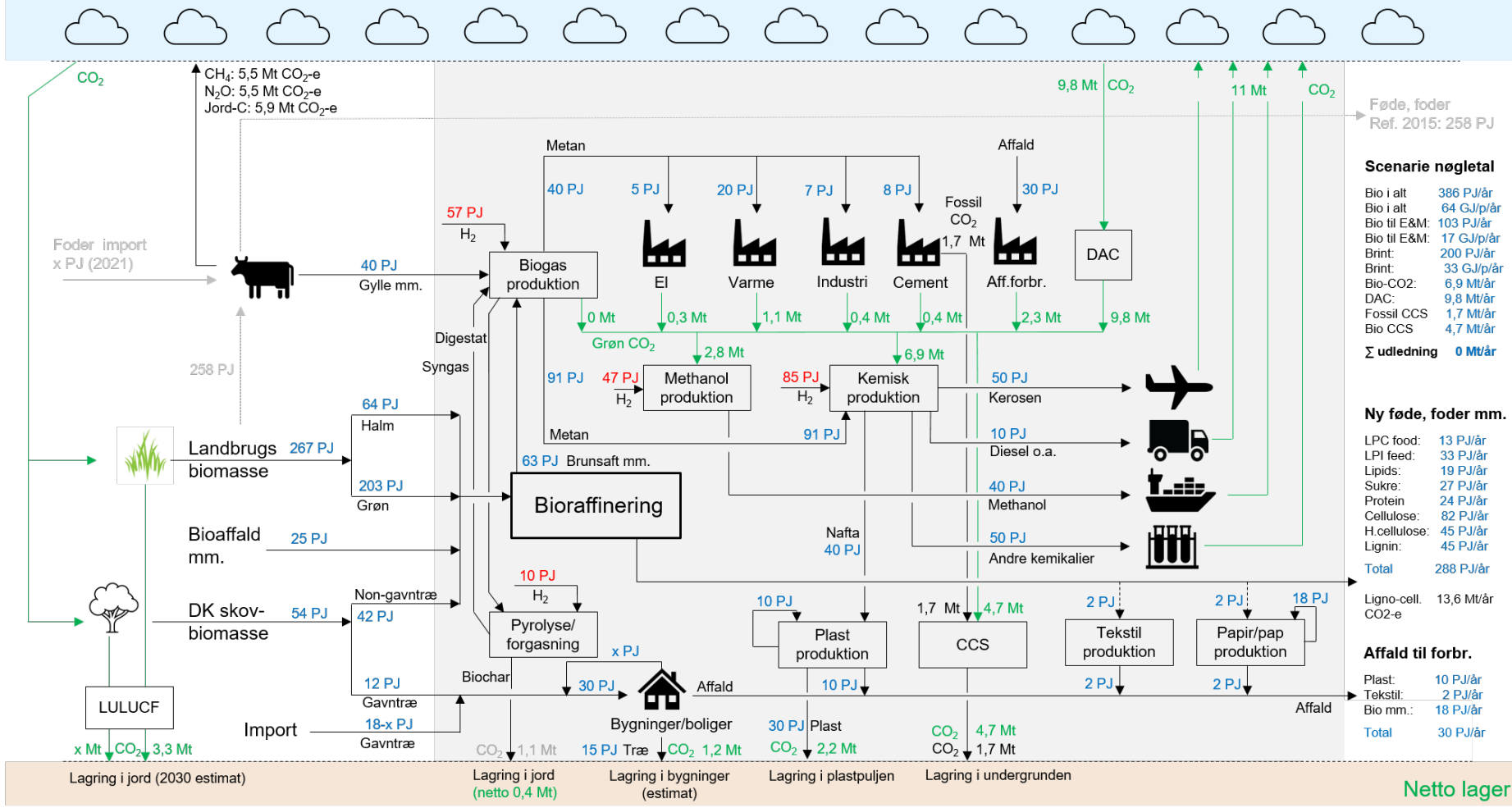
Affald til forbr.

Plast:	10 PJ/år
Tekstil:	2 PJ/år
Bio mm.:	18 PJ/år
Total	30 PJ/år

Netto lager

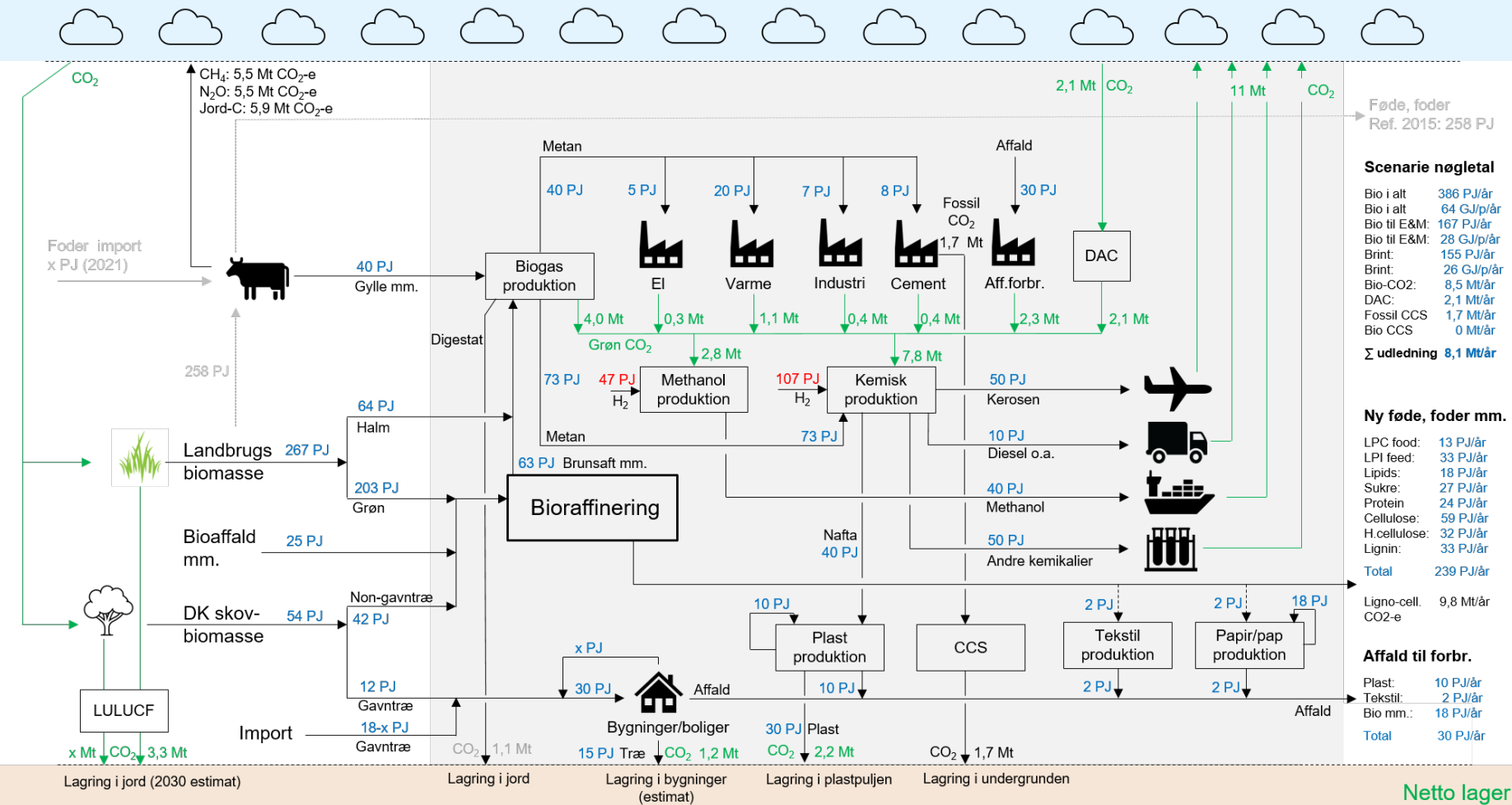
BIO_{zero} – al biomasse raffineres – methanol til skibsfart – metanisering + pyrolyse/forgasning

Atmosfæren



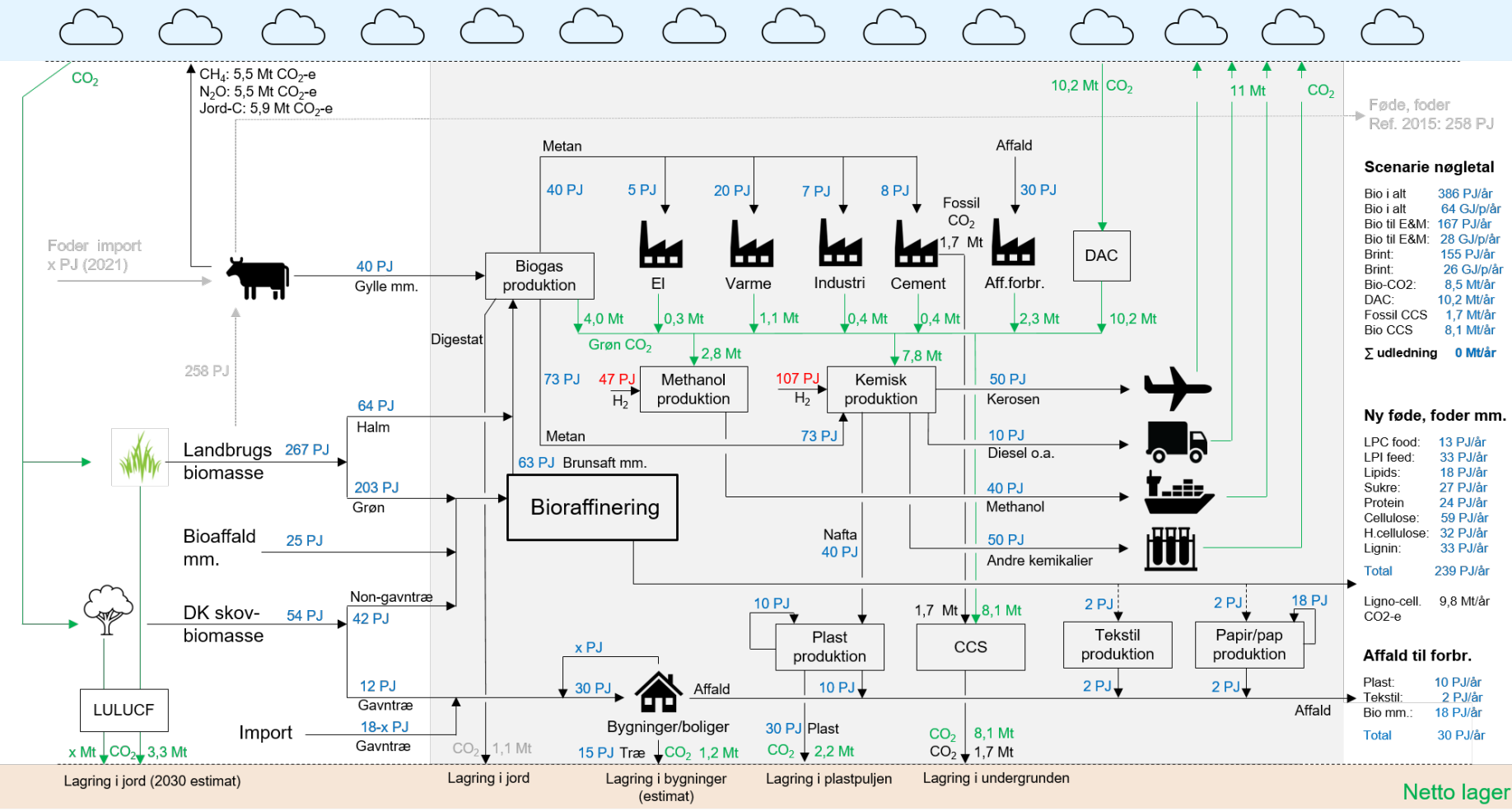
BIO – al halm til biogas – methanol til skibsfart

Atmosfæren



BIO_{zero} – al halm til biogas – methanol til skibsfart

Atmosfæren



Føde, foder
Ref. 2015: 258 PJ

Scenarie nøgletal

- Bio i alt: 386 PJ/år
- Bio i alt: 64 GJ/p/år
- Bio til E&M: 167 PJ/år
- Bio til E&M: 28 GJ/p/år
- Brint: 155 PJ/år
- Brint: 26 GJ/p/år
- Bio-CO₂: 8,5 Mt/år
- DAC: 10,2 Mt/år
- Fossil CCS: 1,7 Mt/år
- Bio CCS: 8,1 Mt/år
- Σ udledning: 0 Mt/år**

Ny føde, foder mm.

- LPC food: 13 PJ/år
- LPI feed: 33 PJ/år
- Lipids: 18 PJ/år
- Sukre: 27 PJ/år
- Protein: 24 PJ/år
- Cellulose: 59 PJ/år
- H.cellulose: 32 PJ/år
- Lignin: 33 PJ/år
- Total: 239 PJ/år**

Ligno-cell. 9,8 Mt/år CO₂-e

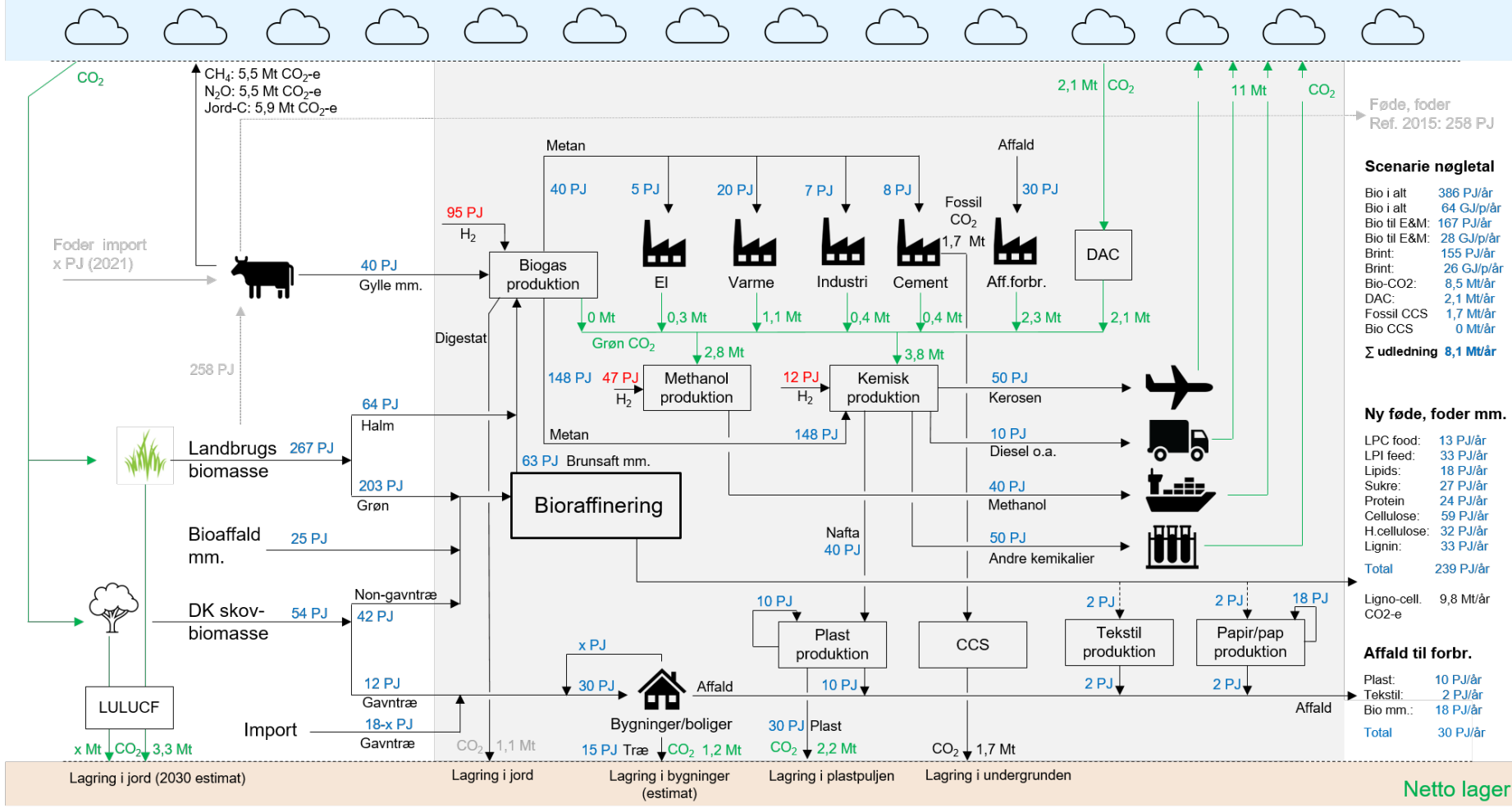
Affald til forbr.

- Plast: 10 PJ/år
- Tekstil: 2 PJ/år
- Bio mm.: 18 PJ/år
- Total: 30 PJ/år**

Netto lager

BIO – al halm til biogas – methanol til skibsfart – metanisering

Atmosfæren



Føde, foder
Ref. 2015: 258 PJ

Scenarie nøgletal

Bio i alt	386 PJ/år
Bio i alt	64 GJ/p/år
Bio til E&M:	167 PJ/år
Bio til E&M:	28 GJ/p/år
Brint:	155 PJ/år
Brint:	26 GJ/p/år
Bio-CO ₂ :	8,5 Mt/år
DAC:	2,1 Mt/år
Fossil CCS:	1,7 Mt/år
Bio CCS:	0 Mt/år
Σ udledning	8,1 Mt/år

Ny føde, foder mm.

LPC food:	13 PJ/år
LPI feed:	33 PJ/år
Lipids:	18 PJ/år
Sukre:	27 PJ/år
Protein:	24 PJ/år
Cellulose:	59 PJ/år
H.cellulose:	32 PJ/år
Lignin:	33 PJ/år
Total	239 PJ/år

Ligno-cell. 9,8 Mt/år CO₂-e

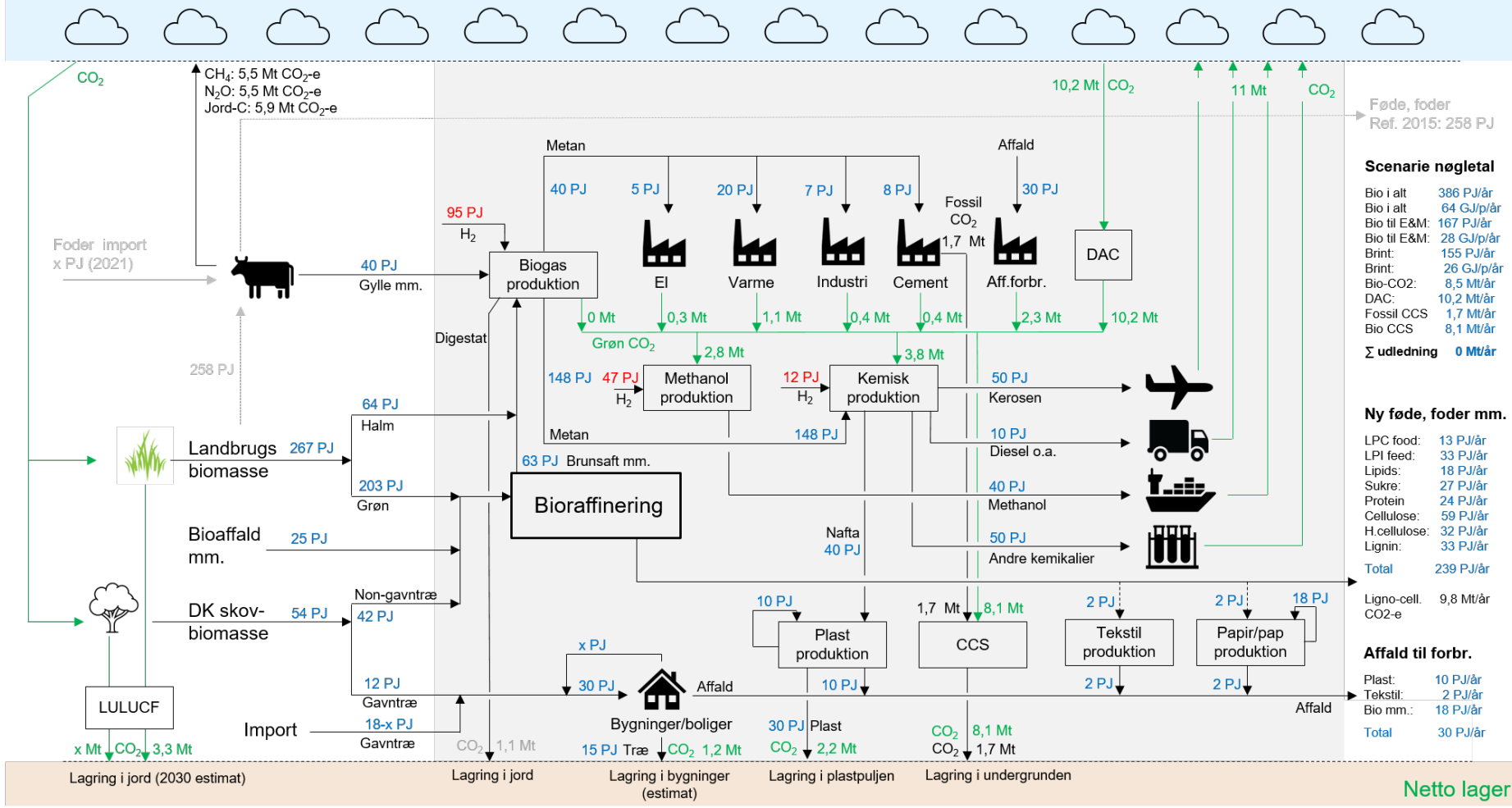
Affald til forbr.

Plast:	10 PJ/år
Tekstil:	2 PJ/år
Bio mm.:	18 PJ/år
Total	30 PJ/år

Netto lager

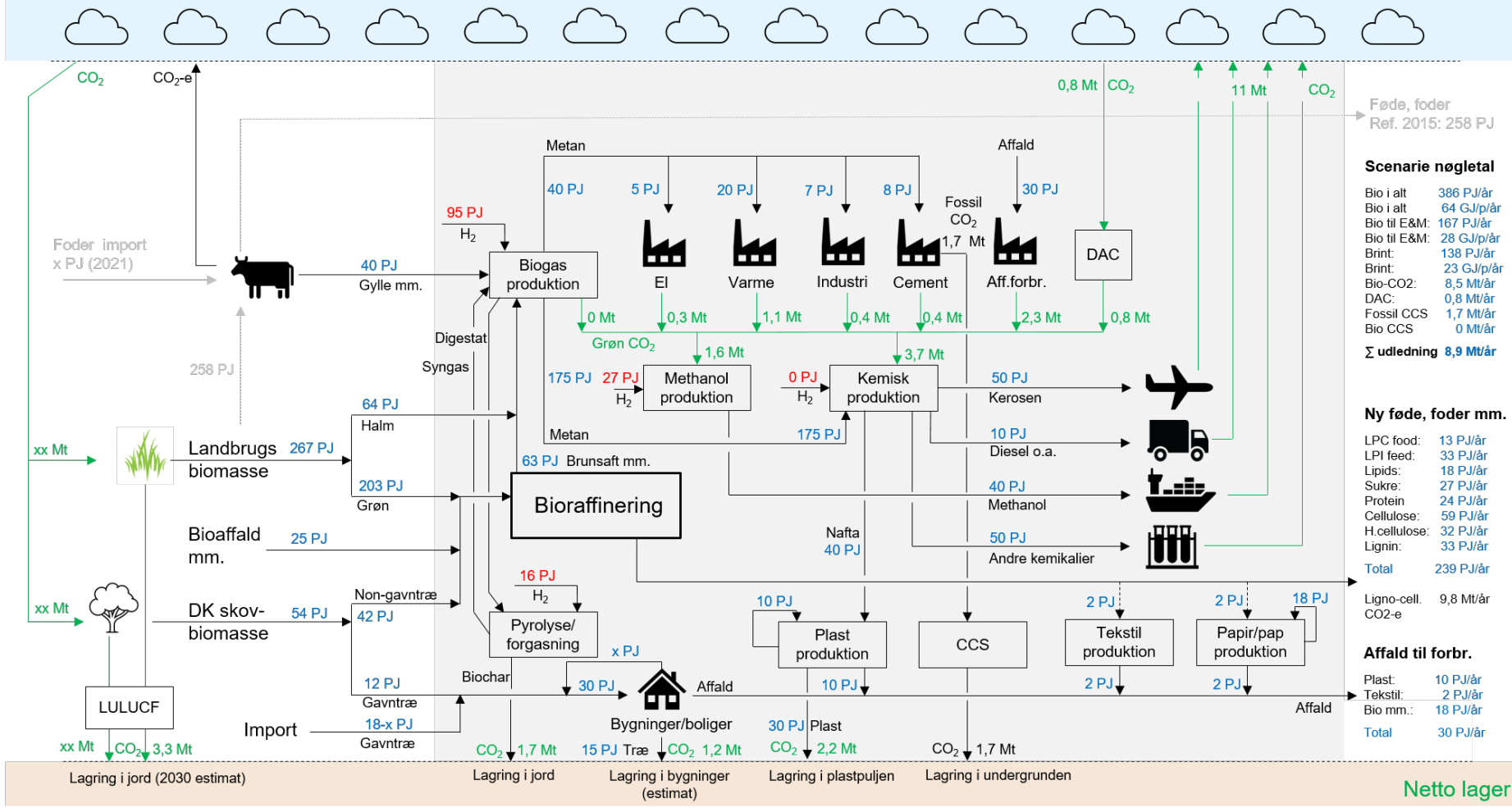
BIO_{zero} – al halm til biogas – methanol til skibsfart – metanisering

Atmosfæren



BIO – al halm til biogas – methanol til skibsfart – metanisering + pyrolyse/forgasning

Atmosfæren



Føde, foder
Ref. 2015: 258 PJ

Scenario nøgletal

Bio i alt	386 PJ/år
Bio i alt	64 GJ/p/år
Bio til E&M:	167 PJ/år
Bio til E&M:	28 GJ/p/år
Brint:	138 PJ/år
Brint:	23 GJ/p/år
Bio-CO ₂ :	8,5 Mt/år
DAC:	0,8 Mt/år
Fossil CCS:	1,7 Mt/år
Bio CCS:	0 Mt/år
Σ udledning	8,9 Mt/år

Ny føde, foder mm.

LPC food:	13 PJ/år
LPI feed:	33 PJ/år
Lipids:	18 PJ/år
Sukre:	27 PJ/år
Protein:	24 PJ/år
Cellulose:	59 PJ/år
H.cellulose:	32 PJ/år
Lignin:	33 PJ/år
Total	239 PJ/år

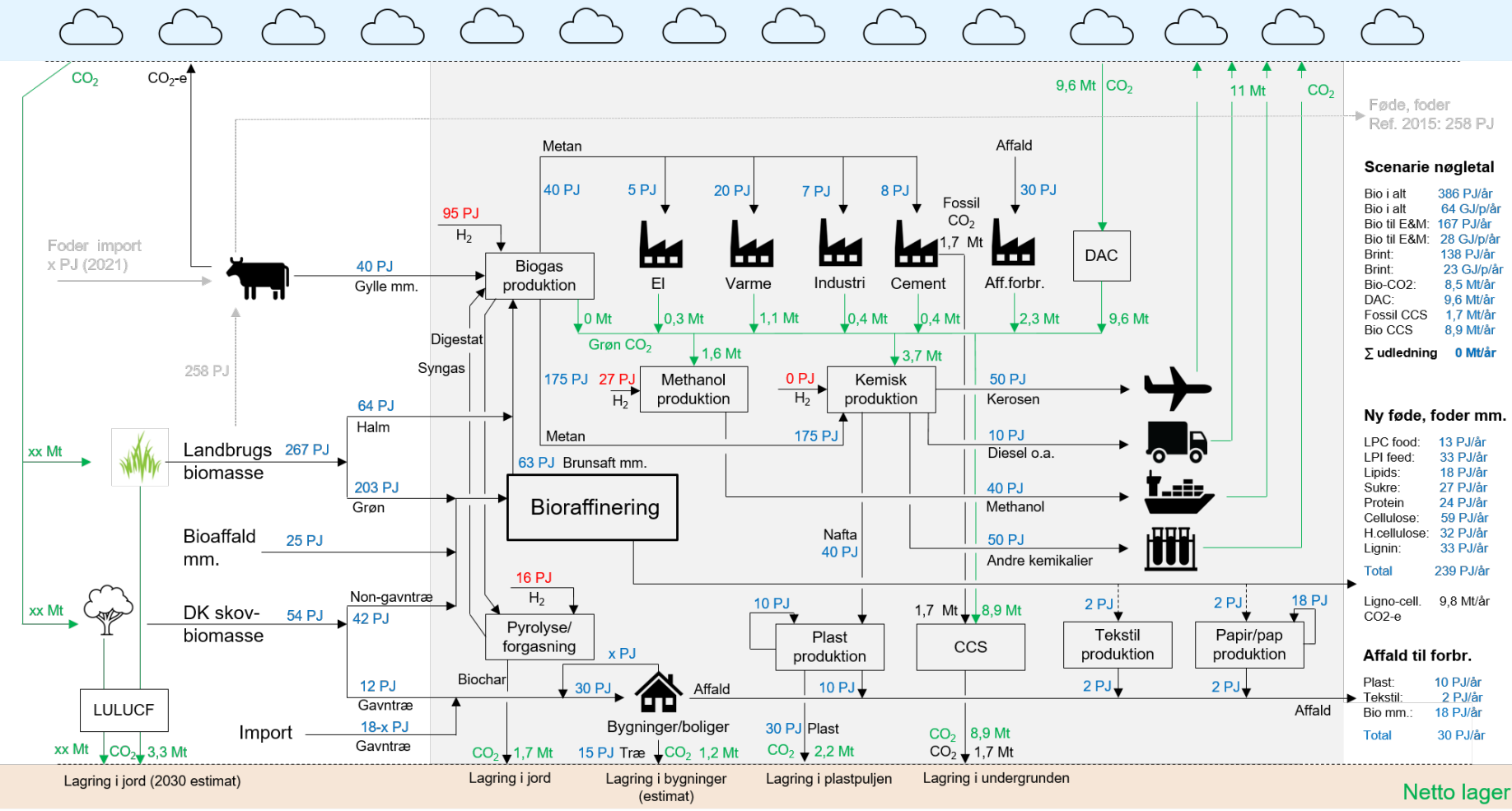
Affald til forbr.

Plast:	10 PJ/år
Tekstil:	2 PJ/år
Bio mm.:	18 PJ/år
Total	30 PJ/år

Netto lager

BIO_{zero} – al halm til biogas – methanol til skibsfart – metanisering + pyrolyse/forgasning

Atmosfæren



Føde, foder
Ref. 2015: 258 PJ

Scenario nøgletal

Bio i alt	386 PJ/år
Bio i alt	64 GJ/p/år
Bio til E&M:	167 PJ/år
Bio til E&M:	28 GJ/p/år
Brint:	138 PJ/år
Brint:	23 GJ/p/år
Bio-CO ₂ :	8,5 Mt/år
DAC:	9,6 Mt/år
Fossil CCS:	1,7 Mt/år
Bio CCS:	8,9 Mt/år
Σ udledning	0 Mt/år

Ny føde, foder mm.

LPC food:	13 PJ/år
LPI feed:	33 PJ/år
Lipids:	18 PJ/år
Sukre:	27 PJ/år
Protein:	24 PJ/år
Cellulose:	59 PJ/år
H.cellulose:	32 PJ/år
Lignin:	33 PJ/år
Total	239 PJ/år

Affald til forbr.

Ligno-cell.	9,8 Mt/år
CO ₂ -e	
Plast:	10 PJ/år
Tekstil:	2 PJ/år
Bio mm.:	18 PJ/år
Total	30 PJ/år