

An aerial photograph of a large agricultural field divided into numerous rectangular plots. The plots contain various types of crops, including tall green grasses, golden-brown harvested crops, and rows of corn. The field is bordered by a dense line of green trees in the background under a clear blue sky.

Potentiale ved produktion af biobaserede byggematerialer i Danmark

Potentialeanalyse i et LCA-perspektiv
En del af Veje til biobaseret byggeri

Denne rapport er udarbejdet af Artelia Rådgivende Ingeniører som et led i indsatsen 'Veje til biobaseret byggeri'. Her undersøges, hvordan biobaserede byggematerialer kan få en central plads i fremtidens danske byggeri og hvad det vil betyde for den fremtidige arealanvendelse, miljøpåvirkning. Dette sker sammen med eksperter og brancheaktører fra Aarhus Universitet, Københavns Universitet, Aalborg Universitet, Det Kongelige Akademis Arkitektskole, Smith Innovation, Artelia rådgivende ingeniører og JAJA Architects.

Realdania skal have en tak for deres støtte til projektet, som har muliggjort tilblivelsen af rapporten.



Forside: AU Viborg Foulum.

Kreditering: Steffen Stamp for Realdania.

Udarbejdet af: Mathilde Sørensen Nilsson, Kasper Brodersen Møller, Maria Rosenberger Petersen, Lars Broder Lindgren og Steffen Maagaard

Dato: 27.09.2024

Artelia A/S
Mariane Thomsens Gade 1C, 1.
DK-8000 Aarhus C
+45 8750 8700
CVR: 64 04 56 28
www.arteliagroup.dk

Indholdsfortegnelse

Sammenfatning	5
Hovedrapport	8
1 Forord	8
2 Indledning og metode	8
2.1 Indledning	8
2.2 Bidrag til studiet.....	9
2.3 Metode: Livscyklusvurdering (LCA).....	10
2.4 Forudsætninger.....	11
3 Formål og afgrænsning af Veje til Biobaseret Byggeri	12
3.1 Reference Service Life (RSL) - levetid.....	13
3.2 Biogent kulstof.....	13
3.3 Sensitivitetsanalyser - scenarier	14
5 Resultater og perspektivering	16
5.2 Resultater for biogene byggematerialer.....	17
5.3 Udledning, lagringspotentialer og transport.....	23
5.4 Sammenligning af isoleringsprodukter i ydervæg	25
5.5 Perspektivering	28
Appendiks	31
1 Kortlægning (LCI)	31
1.1 Elektricitetsmix	31
1.2 Kulstofindhold i biomasse.....	31
1.3 Direkte udledninger fra husdyrgødning.....	31
1.4 Halm	32
1.5 Græs.....	37
1.6 Hamp.....	46
1.7 Træfiberisolering.....	52
1.8 Konstruktionstræ	56
1.9 Oversigt over modellerede scenarier	60
1.10 Transport fra produktion til byggeplads (A4)	62
1.11 Affaldsscenarier for biogene ressourcer.....	67
1.12 Biogent kulstof.....	69
2 Resultater (LCIA)	70
2.1 Halmelement	72
2.2 Græsisolering.....	76
2.3 Hampisolering.....	83
2.4 Træfiberisolering.....	90

2.5	Konstruktionstræ	94
3	Fortolkning	97
3.1	Allokering	97
3.2	Gødskning: kunstgødning vs. husdyrgødning	98
3.3	Vejsidegræs vs. kultiveret græs	99
3.4	Betydning af produktionsforhold og -lokation	99
3.5	Affaldshåndtering	100
4	Diskussion.....	101
4.1	Datakvalitet.....	101
4.2	Teknologier	103
4.3	Afgrøder	105
4.4	EN 15804:2012 + A2:2019	106
4.5	ALCA vs. CLCA.....	107
5	Opsamling.....	109
6	Data.....	110
6.1	LCI-datasæt	110
6.2	Betydning af allokeringsfaktorer	115
6.3	GWP-bidrag ved afgrødekultivering	117
7	Referencer	121

Sammenfatning

Denne publikation, udarbejdet af Artelia, omfatter en livscyklusbaseret miljøvurdering (LCA) af potentialet for anvendelsen af biogene ressourcer i byggematerialer i en dansk kontekst. De biobaserede byggematerialer sammenlignes med konventionelle for at belyse forskelle og eventuelle optimeringsmuligheder for de biogene ressourcer.

Fokus for vurderingen er klimaaftryk, CO₂-ækvivalenter, i overensstemmelse med det overordnede formål af hovedprojektet *Veje til Biobaseret Byggeri*.

Det er desuden undersøgt hvorvidt den metodiske tilgang påvirker potentialet for de biobaserede byggematerialer, gennem anvendelsen af den harmoniserede standard til kvantificering af miljøpåvirkninger for byggevarer, EN 15804:2012+A2:2019.

De undersøgte biogene ressourcer er halm, græs, hamp, og træ med primær anvendelse i isoleringsmaterialer.

For de mineralske isoleringsprodukter (Rockwool og Isover) ses at de generelt performer godt i forhold til GWP, hvilket bl.a. skyldes meget optimerede produktionsforhold med anvendelse grøn strøm og biogas, med meget lave udledninger tilknyttet. Der ses, at der ikke er noget (eller meget lille) lagringspotentiale.

Halmisolering har generelt et lavt fossilt klimaaftryk sammenlignet med de øvrige biobaserede isoleringsprodukter, dette skyldes særligt, at det ikke er nødvendigt med nogle former for tilsætning og at en mindre andel af miljøpåvirkning fra kultivering allokeres halmen, da den er en sidestrøm til kornproduktion. Der ses, at halmisoleringen har et meget stort lagringspotentiale, dette skyldes at halmen kan komprimeres tættere end i de resterende produkter samt at der skal anvendes et tykkere element pr. funktionsenhed ($R=1\text{m}^2\text{K/W}$).

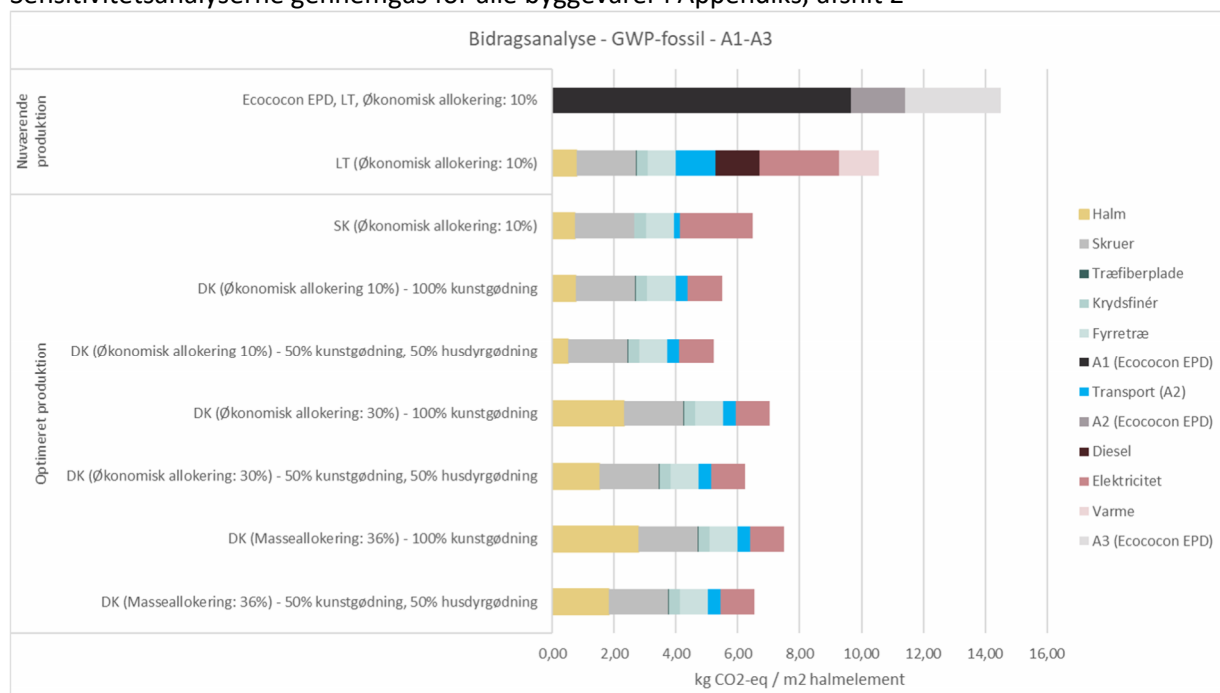
På grund af den større mængde halm, ses transporten fra Litauen også at have en væsentlig betydning.

For græs-, træ- og hampisolering ses, der at have et mindre nettolagringspotentiale. Der ses generelt, at for isoleringsprodukterne produceret i udlandet forøger transporten til byggepladsen miljøpåvirkningen med ca. 50%.

Overordnet set har vurderingen vist, at anvendes den gældende metode for vurdering af byggevarers miljøpåvirkning, EN 15804:2012 + A2:2019 har de biobaserede byggematerialer har svært ved at konkurrere med konventionelle byggematerialer, i forhold til klimaaftryk.

Flere parametre har vist sig at have indflydelse på de biobaserede byggevarers klimaaftryk, herunder allokeringsmetode, gødskningsstype samt transportafstande. Som eksempel vises resultaterne for halm i Figur 1. Her ses en varians på op til 26 % ved samme gødskningsfordeling men med forskellig økonomisk allokering. For gødskningsfordelingen ses en varians på op til 14 % med samme allokering.

Sensitivitetsanalyserne gennemgås for alle byggevarer i Appendiks, afsnit 2



Figur 1: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A3 for produktionen af 1 m² halmelement i hhv. LT, SK og DK med forskellige scenarier for allokering af miljøpåvirkninger til halm.

Allokeringsmetoden, som angiver hvorledes miljøpåvirkninger fra produktionen fordeles på produkter, er særlig vigtig for de biobaserede byggematerialer. Dette skyldes at de biobaserede byggematerialer er afhængige af produktion af afgrøder og hvorvidt miljøpåvirkninger fra kultiveringen tilskrives den primære anvendelse i bl.a. foder, eller den sekundære - i dette tilfælde byggematerialer. I denne rapport har vi anvendt en økonomisk allokering baseret på hvordan afgrøden afsættes i dag på det nationale marked.

De biogene ressourcer er i høj grad afhængig af gødskningsstype der fordeler sig på husdyrgødning og kunstgødning. Kunstgødning fremstilles i jomfruelige, fossile værdikæder hvorfor anvendelsen af kunstgødning har en negativ effekt på det samlede klimaaftryk for byggematerialet. Derfor er det relevant at kigge på muligheden for optimeret gødningsforbrug, rotationsafgrøder samt regenerativ dyrkningsmetode, hvorved der kan opnås en reduktion af behovet for gødskning. Vigtig for gødskningsoptimering er naturligvis den primære anvendelse af den biogene ressource, således udbyttet eller kvaliteten af denne ikke reduceres og dermed vil forårsage i skift i bl.a. allokering af miljøpåvirkninger fra kultivering mod byggematerialet.

Qua den lave densitet af isoleringsmaterialerne kommer transporten af de færdige byggevarer til at have en forholdsvis stor betydning for det samlede klimaaftryk. Se Figur 2.

Producenter af sammenlignelige konventionelle byggevarer kompenserer i udstrakt grad deres energiforbrug, i form af elektricitet og termisk energi, med indkøb af grønne certifikater, *guarantees of origin* (GO) og biogas. Dette fører til en signifikant sænkning af det samlede klimaaftryk for byggevareren da emissioner for den fornybare energi, særligt biogas, er signifikant lavere end det fossile

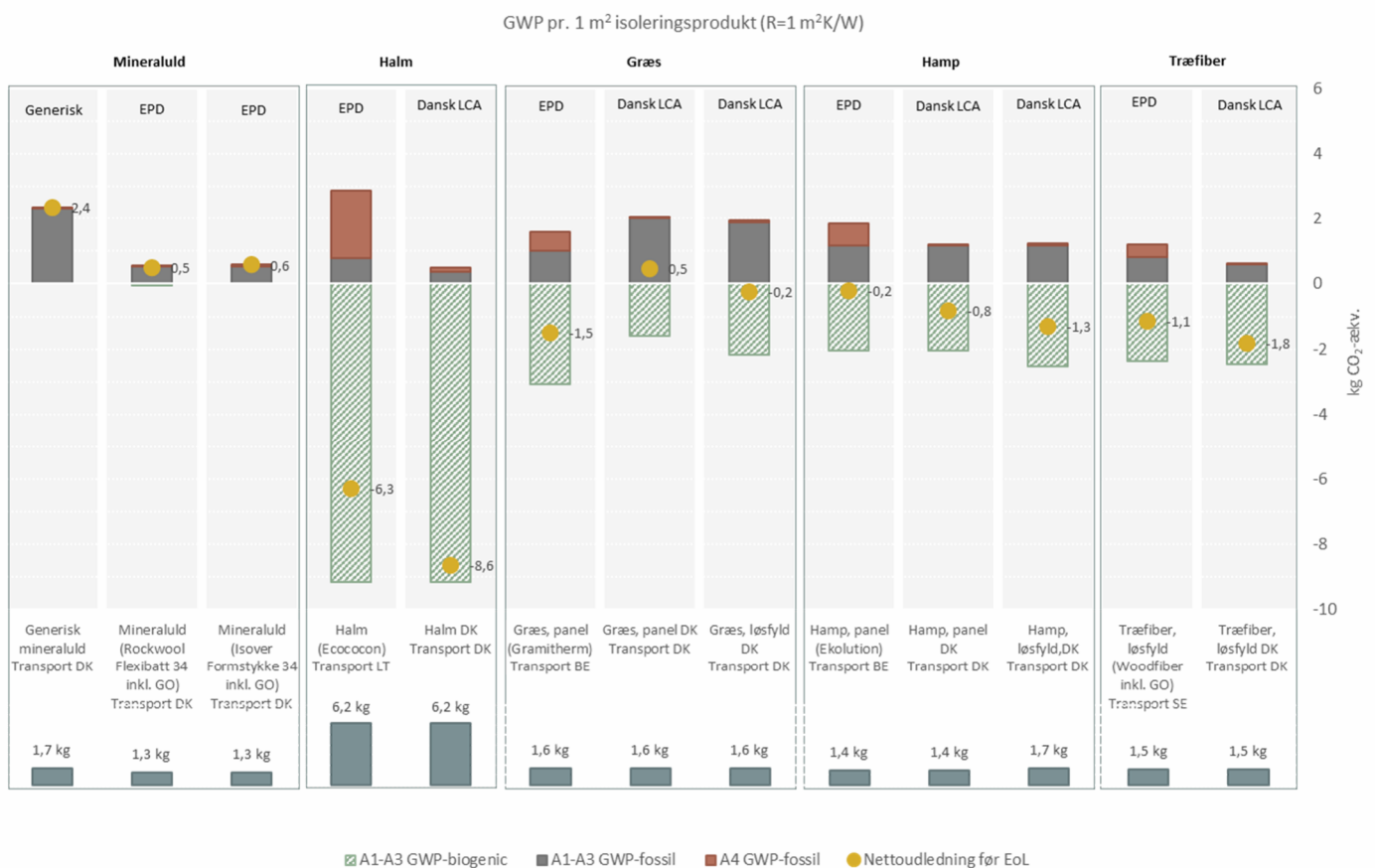
alternativ. Dette vurderes at være den primære årsag til den observerede forskel på klimaaftrykket for de biobaserede hhv. de konventionelle byggevarer.

For de biobaserede byggevarer vil elektricitet samt termisk energi ligeledes kunne kompenseres og dermed opnå en relativ reduktion i det samlede klimaaftryk, men dette er ikke undersøgt i nærværende rapport.

Om end fossile materialer (bl.a. plast-baserede bindere) anvendes i et begrænset omfang i de biobaserede byggematerialer, udgør de ofte en signifikant del af det samlede klimaaftryk grundet deres oprindelse i den fossile værdikæde. Derfor vil det være relevant at undersøge muligheden for at anvende biobaserede eller genanvendte bindere, med hensyntagen til de afledte miljøpåvirkninger heraf.

Sammenholdes ovenstående observationer og perspektiver, findes at potentialet for at anvende tilgængelige danske biogene ressourcer er stort, særligt for anvendelsen af halm, græs og hamp som isoleringsmateriale. Det forudsættes at de afledte effekter på eksisterende værdikæder samt eventuelle forskydninger belyses gennem en ændret metodisk tilgang til vurdering af potentialet.

Den gældende metode til vurdering af byggevarers miljøpåvirkninger EN 15804, tilbyder på nuværende tidspunkt ikke en kvantificering af forskydningspotentialet for udledningen af CO₂e, fanget gennem fotosyntese i de biogene ressourcer, omend det indlejrede biogene kulstof visualiseres igennem den senest opdaterede version af EN 15804:2012 +A2:2019.



Figur 2: Klimapåvirkning for isoleringsmaterialer for produktionen (A1-A3), Endt levetid (C3-C4) og Transport fra produktion til byggeplads (DK)

Hovedrapport

1 Forord

Denne minipublikation er en del af det større projekt "Veje til Biobaseret Byggeri" (VtBB), som er støttet af Realdania. Fokus i denne publikation er at foretage en livscyklusvurdering (LCA) af biogene byggematerialer.

I overensstemmelse med den nuværende praksis for LCA i byggeriet, anvendes de metodiske tilgange, som foreskrives i EN 15804:2012 + A2:2019 samt DS/EN ISO-standarderne for livscyklusvurdering 14040 og 14044, dog med en række undtagelser som uddybes i rapporten. Publikationen er udarbejdet af Artelia Danmark i 2024. Livscyklusvurderingen er udført i *LCA for Experts* som er et LCA-værktøj der anvendes bredt til udarbejdelse af bl.a. miljøvaredeklarationer (EPDer) i byggebranchen.

Der er foretaget en intern kvalitetssikring af publikationen hos Artelia Danmark. Desuden er publikationen gennemgået og tilrettet med bidrag fra Realdania.

Det ønskes at belyse hvilke mulige barrierer der eksisterer i gældende metoder for en øget implementering af biobaserede byggematerialer i en dansk kontekst. Det er ikke hensigten at resultaterne i nærværende publikation skal anvendes på linje med en EPD, som kommercielt sammenlignings- eller beslutningsgrundlag, men skal ses i en større sammenhæng som en del af VtBB på bygningsniveau.

Rapporten er opbygget i to dele, **Hovedrapport** samt **Appendiks**. Hovedrapporten beskriver de væsentlige antagelser, datagrundlag og metode for LCA, samt resultater og perspektivering. I Appendiks findes uddybende beskrivelser, argumentation, data, samt antagelser.

2 Indledning og metode

2.1 Indledning

Som en del af projektet "Veje til Biobaseret Byggeri" (VtBB), støttet af Realdania, er formålet med nærværende publikation at belyse potentialet for at anvende biogene ressourcer i en dansk kontekst gennem livscyklusvurdering, med fokus på klimapåvirkninger. VtBB ønsker at fremme sundt og bæredygtigt byggeri gennem en reduktion af CO₂-udledningen af dansk byggeri ved bl.a. renovering af eksisterende bygninger, øget genbrug og genanvendelse af byggematerialer samt en introduktion af byggevarer som understøtter målet (Veje til Biobaseret Byggeri, Realdania, 2024). Det ønskes at undersøge hvorvidt en dansk produktion, forarbejdning samt anvendelse af biobaserede byggevarer, kan bidrage til at reducere klimaftrykket i den danske byggebranche, samt hvilke eventuelle udfordringer nuværende strukturer og metoder udgør i denne hensigt.

Der er taget udgangspunkt i eksisterende, tilgængelige biobaserede byggevarer, der som hovedregel ikke er baseret på danske ressourcer. EPDer for de eksisterende byggevarer med aktuelle produktionslande er i livscyklusvurderingen anvendt som en baseline og udgør fundamentet for, hvordan byggevarer er modelleret i en dansk kontekst. Der varieres på en række parametre i livscyklusvurderingen, herunder produktionsland, allokeringsmetode, oprindelse af den biogene ressource samt gødsningsfordelingen for at kunne belyse effekten af disse på den beregnede klimapåvirkning.

I Tabel 1 ses en oversigt over de modellerede biogene ressourcer, deres anvendelse i byggevarer samt de varierede parametre i de forskellige LCA-scenarier. Se Tabel 2 for en fyldestgørende oversigt over de modellerede LCA-scenarier.

Tabel 1: Oversigt over modellerede biogene ressourcer, deres anvendelse i byggevarer samt hvilke parametre der er varieret i de forskellige LCA-scenarier.

Biogen ressource	Anvendelse i byggevarer	Varierede parametre i LCA			
		Geografi	Allokering	Oprindelse af biogen ressource	Gødningstype
Halm	Isoleringspanel	- Litauen	- Økonomisk	- Kultivering af halm	- Kunstgødning
	Løsfyld isolering	- Slovakiet - Danmark	- Masse		- Husdyrgødning
Græs	Isoleringspanel	- Belgien	- Økonomisk	- Vejsidegræs	- Kunstgødning
	Løsfyld isolering	- Danmark	- Masse	- Kultivering af græs	- Husdyrgødning
Hamp	Isoleringspanel	- Tjekkiet	- Økonomi	- Kultivering af fiberhamp	- Kunstgødning
	Løsfyld isolering	- Danmark	- Masse		- Husdyrgødning
Træ	Fiberisolering	- Sverige	- Økonomisk	- Skov i Sverige	n/a
	Konstruktionstræ	- Danmark	- Masse	- Skov i Danmark	

2.2 Bidrag til studiet

I arbejdet med denne publikation har flere aktører bidraget med værdifuld viden og dermed gjort det muligt at udvikle så realistiske modeller som overhovedet muligt. Derfor skal der lyde en stor tak til AU Agro, som har leveret information og data på hhv. afgrødekultivering og bioraffinering. En stor tak skal lyde til Københavns Universitet, som har leveret data vedr. kulturetablering og hugst af skov. En stor tak skal også lyde til EcoCocon, Gramitherm, Woodfiber og Nordic Wood Industries, som alle har leveret data til modellering af de forskellige produktioner af biogene byggevarer.

2.3 Metode: Livscyklusvurdering (LCA)

Livscyklusvurderingen (LCA) udføres i overensstemmelse med gældende internationale standarder i ISO 14040-serien samt specifikke produkt-kategori-regler for byggevarer angivet i EN 15804:2012 + A2:2019.

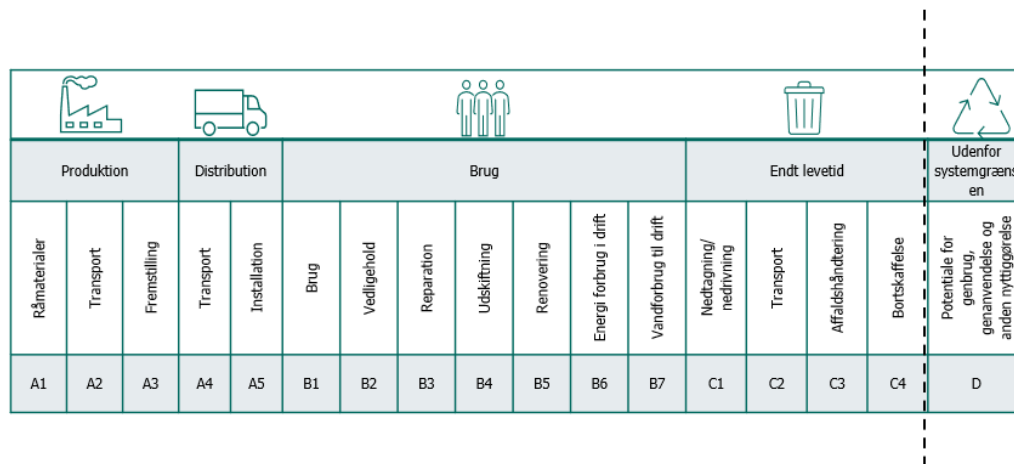
I LCA er der to overordnede metodiske tilgange; tilskrivnings (ALCA) og konsekvens LCA (CLCA), som kan anvendes til at besvare følgende spørgsmål:

- *ALCA: Hvilke miljøpåvirkninger er forbundet med produktion, anvendelse og bortskaffelse af et givent produceret produkt?*
- *CLCA: Hvad er de miljømæssige konsekvenser af at købe et givent produkt?*

Tilskrivnings LCA (attributional)

ALCA fokuserer primært på at identificere og kvantificere de miljømæssige påvirkninger, der er direkte forbundet med produktets livscyklus. Denne tilgang undersøger typisk de faktiske indvirkninger, der opstår under produktion, distribution, brug og bortskaffelse af et produkt ved hjælp af historiske data. Fokus i ALCA er bagudrettet og overvejende statisk, hvor miljøpåvirkninger allokeres (eks. via masse eller økonomi). Denne tilgang kan derfor anvendes til at beregne miljøpåvirkninger forbundet med produktionen af et produkt, uden at tage højde for fremtiden (eks. ændringer i adfærd eller politikker).

For byggevarer anvendes EN 15804:2012 + A2:2019 hvor ALCA foreskrives. Ligeledes opstilles der specifikke kriterier og vejledning til hvordan LCA skal anvendes med henblik på at fremstille en miljøvaredeklaration (EPD). Livscyklus for byggevarer opdeles i moduler, jf. Figur 3, hvor livscyklus opdeles i hovedfaserne *A – Produktion, B – Brugsfase, C – endt levetid samt D – påvirkninger udenfor sy-*



Figur 3: Inddeling af livscyklusfaser for byggevarer efter EN 15804:2012 + A2:2019 stemgrænsen.

Konsekvens LCA (consequential)

I modsætning til ALCA, tager CLCA hensyn til de mulige ændringer i systemet, der kan opstå som respons på ændringer i efterspørgsel eller produktion af et produkt. I CLCA anvendes systemudvidelse, hvor de faktisk påvirkede markeder (marginale markeder) inkluderes i studiet. Denne tilgang stræber efter at forudsige de miljømæssige konsekvenser, der kan forekomme som følge af ændringer i

produktions- eller forbrugsmønstre. Qua fremtidsperspektivet i CLCA er denne systemiske tilgang essentiel i beslutningsprocesser.

For begge typer LCA foreskriver ISO 14040 og 14044 den overordnede tilgang i følgende trin:

- Trin 1: Formål og afgrænsning (goal and scope)
- Trin 2: Kortlægning (life cycle inventory analysis (LCI))
- Trin 3: Vurdering af miljøpåvirkninger (life cycle impact assessment (LCIA))
- Trin 4: Fortolkning (life cycle interpretation)

I de fleste industrielle processer fremstilles mere end ét produkt og generelt anvendes mere end ét inputmateriale til fremstillingsprocessen. Miljøpåvirkninger fra inputmaterialerne og fremstillingsprocessen skal dermed fordeles, *allokeres*, på de forskellige produkter.

ISO 14044 og EN 15804:2012 + A2:2019 foreskriver at allokering i videst mulige omfang skal undgås, men følge den fysiske strøm og fordeling af input og output. Hvis allokering ikke kan undgås, skal der anvendes masseallokering, såfremt biprodukterne udgør under 25 % af den samlede økonomiske værdi. I alle andre tilfælde foreskrives økonomisk allokering, da det vil være det produkt med den største økonomiske værdi der skal tilskrives størstedelen af miljøpåvirkningerne.

Livscyklusvurderingerne i publikationen tager en tilskrivningstilgang, og kigger derfor ikke på eventuelle forskydninger en ændret anvendelse af biogene ressourcer vil have, i en dansk kontekst.

2.4 Forudsætninger

Resultaterne i nærværende studie bygger på en række forudsætninger og antagelser.

En vigtig forudsætning for tolkningen af resultaterne af nærværende publikation er, at fokus for VtBB er på klimaaftrykket af dansk byggeri, hvorfor dette er fokus i de præsenterede resultater. Dette betyder at andre miljøpåvirkningskategorier som ifølge EN 15804 + A2 skal angives i en EPD, ikke er inkluderet. Dermed kan det ikke udelukkes at anvendelsen af de biogene ressourcer i danske byggevarer vil have en negativ effekt i andre miljøpåvirkningskategorier.

Baseret på tilgængelig information i EPDer og litteratur antages det, at ingen af byggevarerne skal udskiftes i bygningernes levetid på 50 år. Dette er en vigtig antagelse som har betydning for det overordnede mål om at anvende biobaserede byggevarer som midlertidigt lager for biogent kulstof og dermed det samlede klimaaftryk for dansk byggeri.

Der er i videst mulige omfang anvendt primære data til modellering af LCA-scenarierne. Hvor der er anvendt databasedata, litteraturdata eller andre kilder er dette angivet. I visse tilfælde er der anvendt proxy-data hvor det ikke har været muligt at fremskaffe data for den specifikke proces, dette er ligeledes angivet.

Kvaliteten af LCI-data har været svingende på tværs af byggevarerne. Dette betyder også, at resultaterne for visse byggevarer vil være forbundet med en vis usikkerhed. På trods af dette, så giver resultaterne indikationer på en given biogen byggevarers klimaaftryk i et ALCA perspektiv. Modellerne udgør dermed et fundament, som kan forbedres løbende, når ny og bedre data på produktionskæderne findes. Den begrænsede transparens i de eksisterende EPDer gør, at det ikke har været muligt at pege på hvilke processer og metodiske valg der har størst indflydelse på resultaterne.

3 Formål og afgrænsning af Veje til Biobaseret Byggeri

'Veje til Biobaseret Byggeri' (VtBB) har til formål at undersøge potentialet i at anvende dansk biomasse i byggeriet, hvormed bygninger anvendes som forsinkelsesmekanismer for udledningen af drivhusgasser i form af CO₂.

Formålet i nærværende publikation er at modellere miljøpåvirkningen af byggevarer fremstillet af lokalproducerede biogene ressourcer i Danmark. Identifikation samt udvælgelse af danske, biogene ressourcer er foretaget i samarbejde med Institut for Agroøkologi på Aarhus Universitet (AU Agro). I udvælgelsen er der blevet fokuseret på udbredelsen af afgrøden i dansk landbrug, udbyttet samt kulstoflagringskapaciteten. I forlængelse heraf er det også vurderet, hvilke biogene ressourcer der i dag er etableret en produktionskæde for, for at sikre en mulig skalering af produktionen af byggematerialerne.

Udvælgelsen har resulteret i de biogene ressourcer med anvendelse i byggevarer som ses i Tabel 1 .

Som nævnt i Indledningen, 2.1, ønskes det at belyse hvordan produktionsland, allokeringsmetode, oprindelse af biogen ressource samt gødskningsfordeling påvirker det beregnede klimaaftryk. Derudover, belyses mulige affaldsscenariers indflydelse på miljøpåvirkninger relateret til biobaserede byggevarer samt identificere mulige barrierer i gældende standarder for øget brug af biobaserede byggevarer i Danmark.

Ved fastsættelse af deklareret enhed, i henhold til kravene i EN 15804:2012 + A2:2019, tages udgangspunkt i eksisterende EPDer fra hhv. EcoCocon, Gramitherm, Woodfiber, og Palsgaard Spær A/S, da disse baseres på faktiske produktionsdata – se Tabel 2. Dette betyder, at der tages udgangspunkt i de deklarerede enheder samt in- og outputs, som oplyses i EPDerne.

Tabel 2: Oversigt over inkluderede byggevarer i dette studie

Biogen ressource	Byggevarer	EPD	Deklareret enhed	Reference service life (RSL)
Halm	Isoleringspanel	EcoCocon	1m ² halmelement (40 cm tyk, U-værdi: 0,123 W/m ² K)	75
Græs	Isoleringspanel	Gramitherm	1 m ² isoleringspanel (10 cm tyk, U-værdi: 2,47 m ² K/W) ¹	60
	Løsfyld isolering		1 kg	60 ²
Hamp	Isoleringspanel	Ekolution	1 m ² isoleringspanel (10 cm tyk, termisk modstand: 0,04 W/(m ² K)	60
	Løsfyld isolering		1 kg	60
Træ	Løsfyld isolering	Woodfiber	1 kg	60
	Konstruktionstræ	Palsgaard Spær A/S	1 m ³ med densitet 470-490 kg/m ³	120 ³

Miljøpåvirkningerne for hver byggevarer udregnes desuden per kg da det ønskes at belyse i hvilken type anvendelse, som panel eller løsfyld i bygningsdele, det største potentiale er.

I nærværende publikation deklarerer modulerne A1-A3 samt C3-C4, Figur 3, da disse anvendes i bygnings-LCA. Jævnfør krav i bygningsreglementet, så inkluderes B4 og B6 også i bygnings-LCA (Bygningsreglement, BR18). I dette tilfælde er disse moduler dog ikke relevante, da der ikke forventes en udskiftning af materialerne i bygningens levetid da samtlige RSL overstiger de 50 år der modelles i en bygnings-LCA. Se afsnit 3.1 nedenfor for forventet levetid.

3.1 Reference Service Life (RSL) - levetid

Jf. kravene i EN 15804:2012 + A2:2019 skal den forventede levetid for byggevarer deklarerer, kaldet *reference service life* (RSL). RSL er fastsat ud fra de i EPDerne anførte RSL for de enkelte byggevarer.

3.2 Biogent kulstof

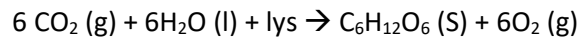
Præmissen for at anvende biogene ressourcer til bl.a. byggevarer som en mekanisme til at opnå en overordnet CO₂ reduktion for byggeriet er, at der gennem vækstfasen for afgrøderne forløber fotosyntese. Gennem fotosyntesen optager planterne CO₂ fra atmosfæren og omdanner det, i kombination med vand og sollys, til sukker som omsættes til vækst i planten samt ilt som frigives til atmosfæren. Se nedenstående reaktionsskema for fotosyntese.

¹ Resultater beregnes per kg panel for at kunne sammenligne med løsfyld isolering

² Ikke baseret på eksisterende EPD, antaget samme RSL som panel

³ Levetidstabeller fra BUILD anvendes som reference:

- Ydervægge - Ydervægge, fugt- og varmeisolering - træfibre
- Tage – Tagværker - konstruktionstræ



Gennem fotosyntesen bindes kulstof fra atmosfærisk CO₂ i planten og kaldes derfor *biogent kulstof* eller carbon. Man kan dermed argumentere for, at byggevarer baseret på biogene ressourcer har et CO₂-optag, som er baseret på vækstfasen af den anvendte ressource. Over livscyklus kan det biogene CO₂ ifølge EN 15804:2012 + A2:2019 betragtes som neutralt, da det ved endt levetid frigives til atmosfæren, enten i en forbrændings- eller nedbrydningsproces.

Jf. EN 15804:2012 + A2:2019 skal specifikke regneregler for byggevarer anvendes, *core Product Category Rules (c-PCR)*, såfremt disse foreligger. Formålet med c-PCR er at ensrette LCA modellering af byggevarer, således disse bliver sammenlignelige i anvendelsesscenarioer. Der foreligger en c-PCR for træ og træbaserede produkter, EN 16485⁴, som angiver hvordan det biogene kulstofindhold skal beregnes og hvilke forudsætninger der skal være opfyldt.

For at det biogene CO₂ kan betragtes som neutralt, skal en række betingelser være opfyldt, således den kulstof-pulje man høster fra forvaltes bæredygtigt og dermed bevares.

Der stilles krav til, at træet er dyrket og høstet i henhold til Kyoto-protokollens artikel 3.4 eller besidder en tredjeparts bæredygtighedscertificering, herunder bl.a. Forest Stewardship Council.

Der findes dog ikke tilsvarende standarder til udregning af biogent kulstofindhold eller krav til dyrkning eller oprindelse for de andre afgrøder og værdierne er fastsat efter vejledning fra AU Agro. Se afsnit 1.2 i Appendiks.

Flerårige afgrøder kan i udgangspunktet bidrage til at holde kulstof-puljen konstant.

1-årige afgrøder vil kræve en vis robusthed samt planlagt sædskifte for at undgå udpining af jorden samt et øget brug af bl.a. pesticider og gødning som vil have en negativ effekt på de samlede miljøpåvirkninger.

For at sikre det biogene CO₂-regnskab foreskriver EN 15804:2012 + A2:2019 at enhver fysisk materialestrøm med biogent kulstof deklarerer separat, således det samlede biogene CO₂ optag og udledning er ækvivalent.

Den nuværende primære anvendelse af de undersøgte biogene ressourcer til bl.a. energiformål, fører til en kort levetid og kan dermed ikke tjene som en forsinkelsesmekanisme til lagring af biogent kulstof.

Derimod vil anvendelsen af de biogene ressourcer i byggevarer med en levetid på over 50 år kunne opnå en semi-permanent opbevaring af det biogene kulstof. Dette forhold afspejles dog ikke såfremt gældende standarder, EN 15804:2012 + A2:2019 samt EN 16485 anvendes da den biogene kulstofbalance, som før nævnt, skal gå i nul.

3.3 Sensitivitetsanalyser - scenarier

Da det ønskes at belyse et fremtidigt potentiale for de undersøgte ressourcer, inkluderes sensitivitetsanalyser. For bl.a. at undersøge effekten af forskellige metodiske tilgange varieres

⁴ EN 16485:2014 *Round and sawn timber – Environmental Product Declarations – Product category rules for wood and wood-based products for use in construction*

allokeringsprincip samt affaldsscenarier. Desuden varieres parametre som geografi for afgrødeproduktion samt gødsknings sammensætning.

Det undersøges desuden hvilken betydning det vil have, at de biogene ressourcer produceres i en dansk kontekst frem for at blive importeret.

Sensitivitetsanalyser gennemføres for følgende parametre:

- Metodisk
 - Allokeringsprincip
 - Affaldsscenarier
- Inputdata
 - Geografi
 - Gødsknings sammensætning

Modulerne *A1 - Råmaterialer*, *A2 - Transport* og *A3 – Fremstilling* er præsenteret i de enkelte materialeafsnit. Affaldsmodulerne *C3 – Affaldshåndtering* samt *C3 - Bortskaffelse* er præsenteret separat i afsnit 1.10 i Appendiks.

I Tabel 45 i Appendiks, afsnit 1.9 ses en komplet oversigt over undersøgte scenarier indenfor de forskellige byggevarer.

I afsnit 1.10 i Appendiks er transporten til byggeplads, modul A4 i henhold til EN 15804:2012 + A2:2019 undersøgt og hvorledes denne bidrager til det samlede fossile klimaaftryk for de biogene byggevarer, med fokus på isoleringsmaterialerne.

5 Resultater og perspektivering

I de følgende afsnit præsenteres resultaterne for de biogene ressourcer, tolkning af resultaterne samt en perspektivering.

Resultaterne er angivet som Global Warming Potential – fossil (GWP) per m² eller kg byggevare og omtales også som klimaaftrykket. Det biogene kulstof er ikke inkluderet i resultaterne, da det som udgangspunkt vil være det samme uanset oprindelse og produktionsland for de enkelte ressourcer.

For alle præsenterede resultater i dette afsnit, er anvendt en allokeringsmetode eller oprindelse i overensstemmelse med den der er anvendt i EPDerne, for at kunne sammenligne på et rimeligt grundlag. Der er ligeledes inkluderet det scenarie som, på baggrund af sensitivitetsanalyserne er vurderet at være det mest realistiske i en fremtidig dansk kontekst.

I afsnit 5.5 diskuteres allokeringsmetoden og betydningen af denne i et fremtidigt perspektiv. Det er angivet i alle figurer hvilken allokeringsmetode der er anvendt.

Alle afgrøder er præsenteret med en gødskningsfordeling på 50 % husdyrgødning og 50 % kunstgødning, da dette antages at være mest realistisk, baseret på kommunikation med AU Agro.

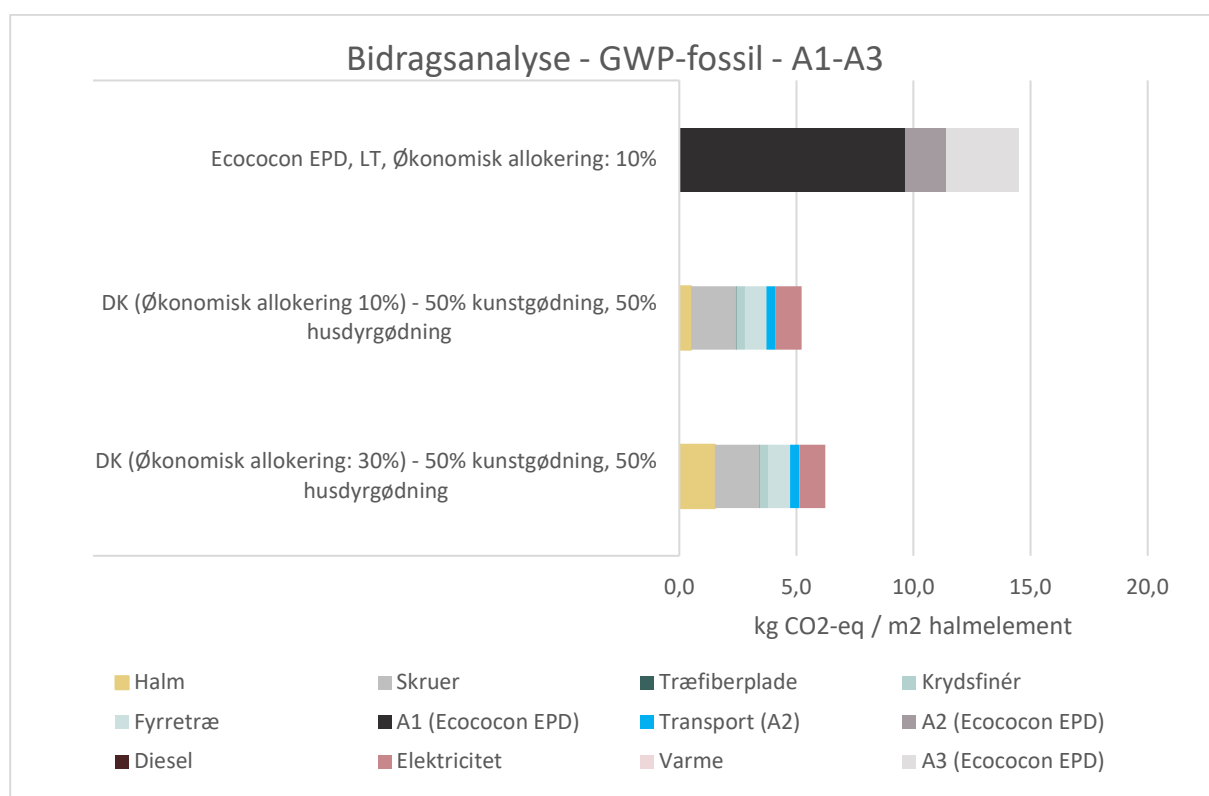
For alle præsenterede resultater er påvirkninger fra transport fra produktion til byggeplads, modul A4, antaget en byggeplads i Aarhus, Danmark. Produktionen af byggevarer varierer jf. oprindelsesland for de anvendte EPDer. Der er tilføjet et særskilt afsnit vedr. transporten fra produktion til byggeplads, da det ønskes at belyse effekten af hvordan modul A4 beregnes og hvilken betydning det kan have for de biogene byggevarer. Her er der taget udgangspunkt i et dansk scenarie med den mest realistiske allokeringsmetode, for at kunne anskueliggøre hvordan en fremtidig produktion vil se ud.

Affaldsscenerier er i de præsenterede resultater modelleret som forbrænding for alle de biobaserede byggevarer, da dette i henhold til kravene i EN 15804 + A2 anses som værende mest økonomisk og teknisk realistiske på nuværende tidspunkt

5.2 Resultater for biogene byggematerialer

5.2.1 Halm

For halm er resultaterne angivet per m² panel, da halm ikke egner sig til løsfyldisolering og derfor ikke er beregnet.



Figur 4: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A3 for produktionen af 1 m² halmelement for hhv. EcoCocon EPD, DK med økonomisk allokering 10 % og 30%

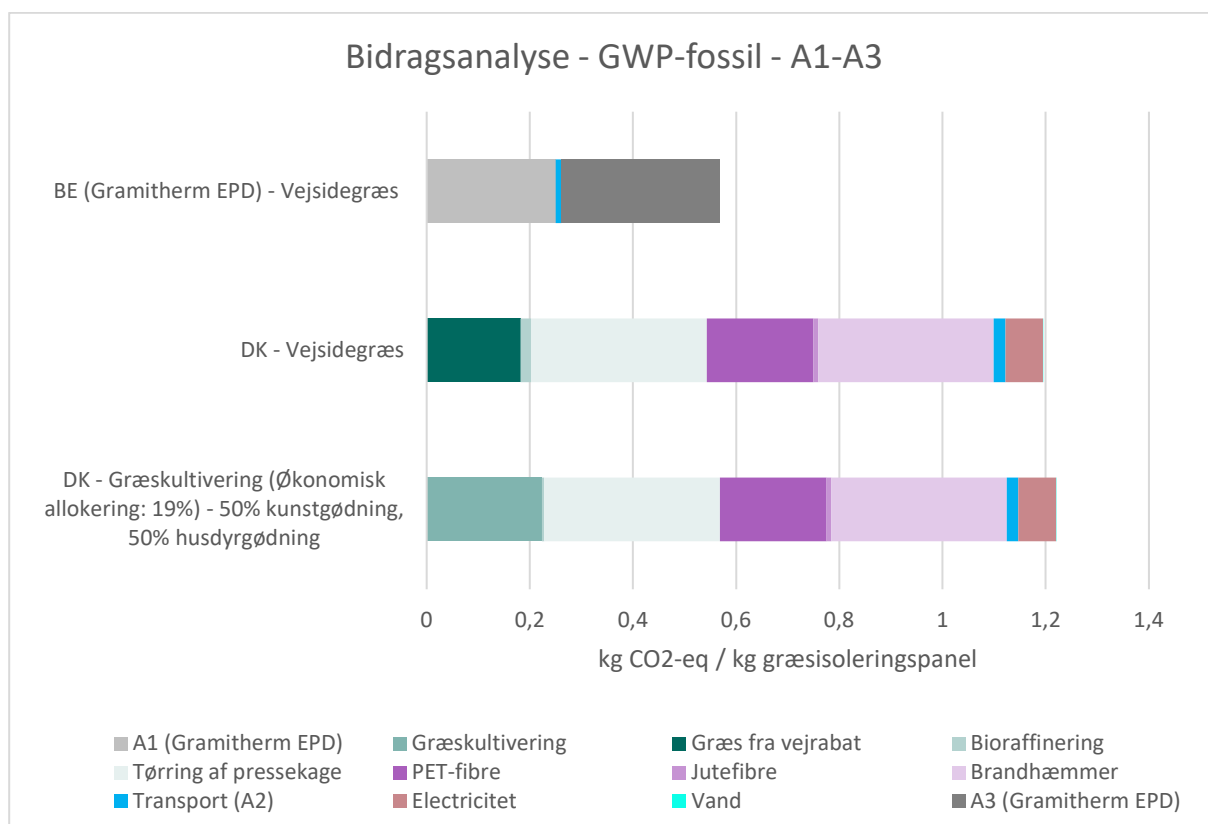
Sammenlignes EcoCocons EPD med det danske scenarie hvor der er anvendt samme allokeringsmetode ses et fald i det fossile klimaaftryk (GWP-Fossil) på 64% hhv. på 57% for en økonomisk allokering på 30% som anses som mest realistisk i et fremtidigt scenarie.

Denne reduktion kan først og fremmest tilskrives energiforbruget i modul A3, hvor man jf.

(EcoCocon) skærer forbruget af diesel og varme fra naturgas ud af produktionen og dermed alene benytter elektricitet. Den samlede transportdistance for materialer i modul A2 har man desuden også reduceret fra 1707 km i LT til 1225 km i DK. Her skal det understreges, at distancerne for DK er baseret på antagelser. Optimeringerne i både modul A2 og A3 fører til en forskydning af klimapåvirkningen mod modul A1. Dette betyder samtidig, at allokeringsfaktoren for halm vil få større betydning for halmelementets samlede klimapåvirkning i A1-A3.

Det danske forbrugsmix for el (0,163 kgCO₂eq/kWh) indeholdt i 2023 over 60 % elektricitet fra fornybare kilder (Energinet, 2023) hvilket betyder, at selv ved en fuldt elektrificeret produktion for EcoCocon ikke resultere i en A1-A3 GWP-fossil der er bedre end det danske scenarie, grundet forbrugsmixet i produktionslandet.

5.2.2 Græs



Figur 5 Bidrag til GWP-fossil i modul A1-A3 for produktionen af 1 kg græsisoleringspanel i hhv. BE og DK for vejsidegræs, kultiveret græs med økonomisk allokering.

På Figur 5 ses en stor forskel imellem BE og DK, når man sammenligner produktionen af græsisoleringspaneler fra vejsidegræs hhv. kultiveret græs. Det fossile klimaaftryk for kultiveret græs i DK er 156 % højere relativt til produktionen i BE. Derudover er der inkluderet et dansk vejsidescenario for at have en ækvivalent oprindelse af den biogene ressource til sammenligning. Her ses en ikke en signifikant forskel fra det kultiverede DK-scenario og dermed en tilsvarende forskel fra Gramitherms EPD.

For kultiverings scenariet er der anvendt en økonomisk allokering på 19 % da det antages at græsproteinet som udvindes af brunsaften, fortsat vil have den største økonomiske værdi og dermed bære størstedelen af miljøpåvirkningerne.

Det er ikke muligt, ud fra resultaterne i EPDen (Gramitherm, 2023), at identificere de specifikke processer i fremstillingen af græsisoleringspanelet og deres bidrag til den samlede miljøpåvirkning. Dog ses det i Gramitherms EPD at de jutefibre der anvendes, stammer fra brugte kakaobønnesække, indsamlet på havnen i Antwerpen. Jutefibrene antages at være modelleret som et affaldsprodukt og har dermed ingen miljøpåvirkninger tilskrevet i anvendelsen i græsisoleringspanelet fra Gramitherm. I det danske scenarie er der modelleret jomfruelige jutefibre, hvorfor produktionen og oparbejdningen fra afgrøde til fiber er inkluderet i miljøpåvirkningerne i isoleringspanelet. Dette for at tage højde for en fremtidig skalerbarhed, som i en dansk kontekst ikke nødvendigvis kan bero på en tilgængelighed af genanvendte jutefibre. Jutefibrene udgør op til 20 vægt% af det færdige isoleringspanel og

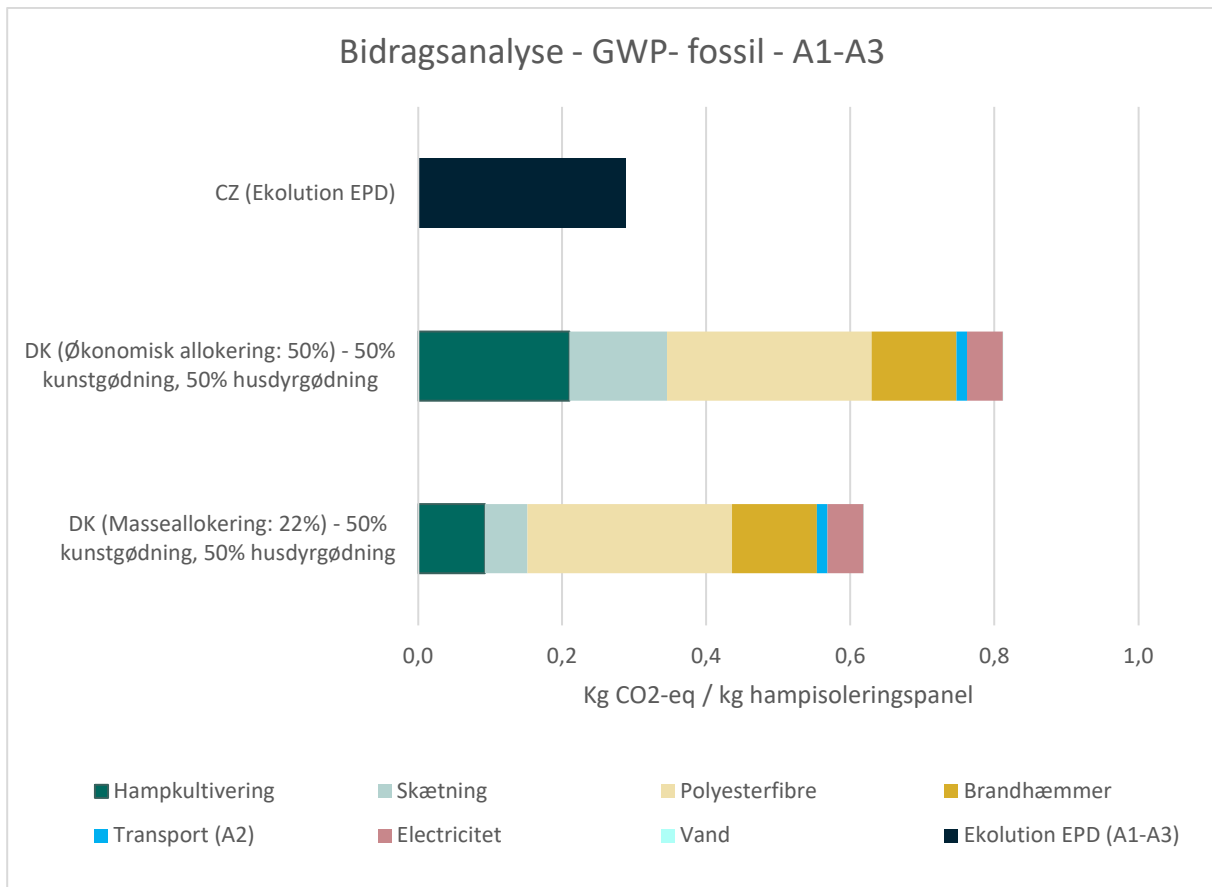
hvis de dermed ikke tilskrives nogen miljøpåvirkning, kan dette forklare en del af forskellen mellem produktionen i BE versus DK.

For produktionen i DK ses det, at selve tørringsprocessen af 'pressekage' fra bioraffinering udgør en stor del af klimaftrykket. Dette skyldes, at tørringen antages at ske ved brug af naturgas. Fra (Gramitherm, 2023) kan det læses, at 'pressekagen' tørres ved brug af varme produceret fra biogas genereret fra fermentering af brunsaft fra bioraffineringen. Udsiftning af naturgas med biogas til tørring af pressekagen i det danske scenarie resulterer i en reduktion på 42%-point af det samlede klimaaftryk. Dette betyder dog stadigvæk, at produktionen i DK er 49% højere relativt til BE.

Det største potentiale for anvendelsen af græsfiberisolering i en dansk kontekst vil være afhængig af muligheden for at anvende vejsidegræs, som ikke skal kultiveres og dermed gødskes. Derudover skal tørringsprocessen af græsfibrene optimeres. Således der er videst mulige omfang anvendes fornybar energi.

Anvendelsen af vejsidegræs i en dansk kontekst afføder nogle yderligere overvejelser, da proteinproduktion fra vejsidegræs sandsynligvis ikke er mulig, da man kunne forestille sig at græs fra vejsider kan indeholde en grad af forurening fra transportmidler. Dette vil føre til en ændring af allokeringen af miljøpåvirkningerne for græsproduktionen, som vil have en negativ effekt på græsfibrene, grundet den lavere værdi af de resterende produkter, pga. et reduceret potentiale for anvendelse.

5.2.3 Hamp



Figur 6 Bidrag til GWP-fossil i modul A1-A3 for produktionen af 1 kg hampisoleringspanel i hhv. CZ og DK.

På Figur 6 ses en forskel mellem Ekolutions EPD og DK-scenarierne på hhv. 181 % og 114 % for økonomisk- og masseallokering. Altså er det fossile klimaaftryk i begge tilfælde mere end fordoblet i forhold til CZ-scenariet.

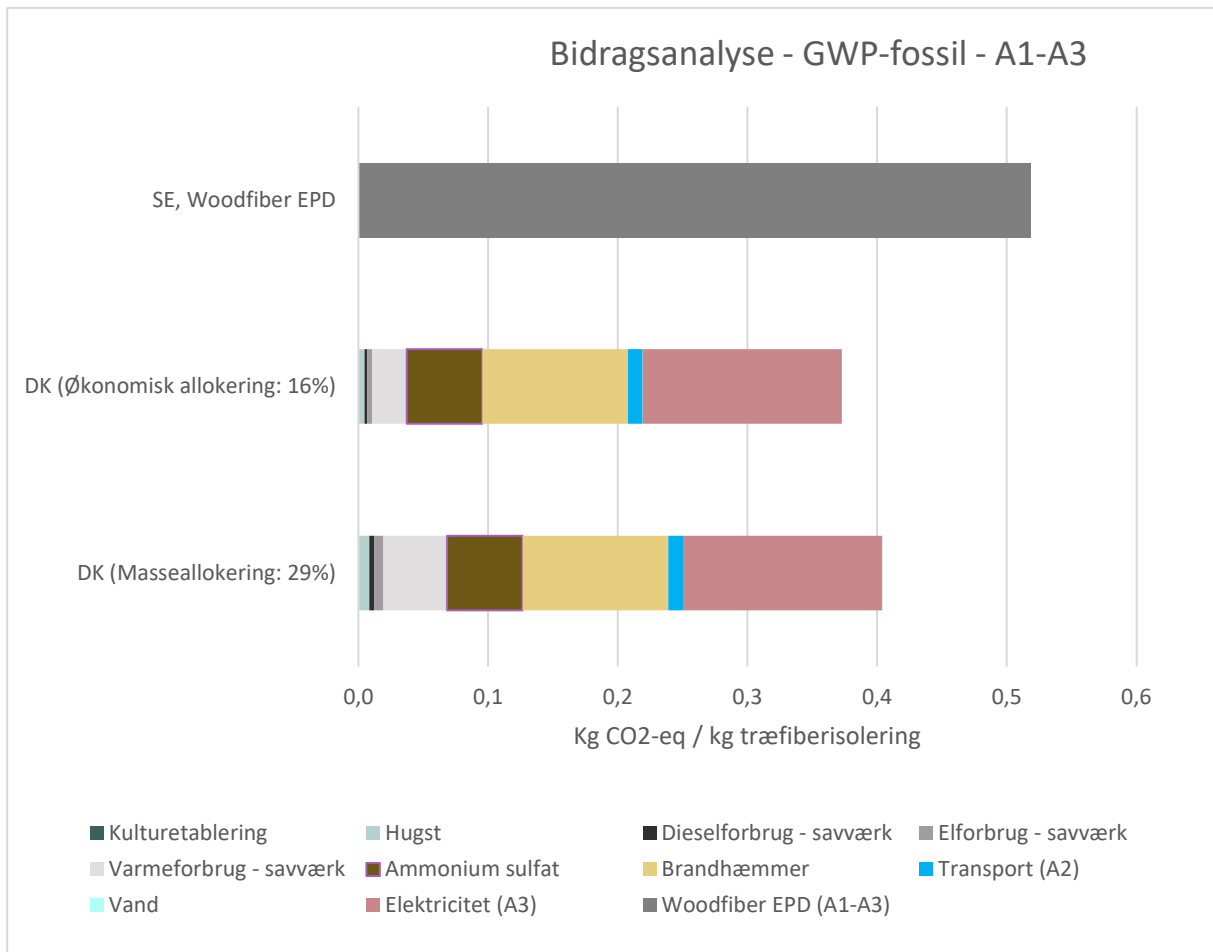
I Ekolutions EPD er det angivet, at der ikke er foretaget allokering ved produktionen af Ekolution isoleringspaneler. Dette dækker dog ikke opstrøms-allokering fra hampkultivering, og derfor er det ikke muligt at se hvordan man har allokeret miljøpåvirkninger fra kultiveringen til fibrene.

Dette gør, at en sammenligning af et DK-scenarie med Ekolutions EPD ikke kan foretages på et sammenligneligt grundlag.

Jf. Jørgensen et al. (Jørgensen, Boelt, & Kristensen, 2020) vil der ved produktionen af fiberhamp vil der være et mark-udbytte fordelt på skæver (53wt%), fibre (22wt%) samt rest på mark (25wt%), altså skal der foretages en allokering af miljøpåvirkningerne fra kultiveringen enten baseret på økonomi eller masse. Derfor er der for DK-scenariet medtaget resultater for både masse- og økonomisk allokering.

I DK-scenarierne udgør tilsætningen af PET-fibre og brandhæmmer tilsammen mere end det samlede fossile klimaaftryk angivet i Ekolutions EPD, hvor det oplyses at der er brugt genanvendte PET-fibre fra tekstilindustrien, som dermed er tilskrevet meget lave eller ingen miljøpåvirkninger. I DK-scenarierne er modelleret med jomfruelige PET-fibre.

5.2.4 Træfiber

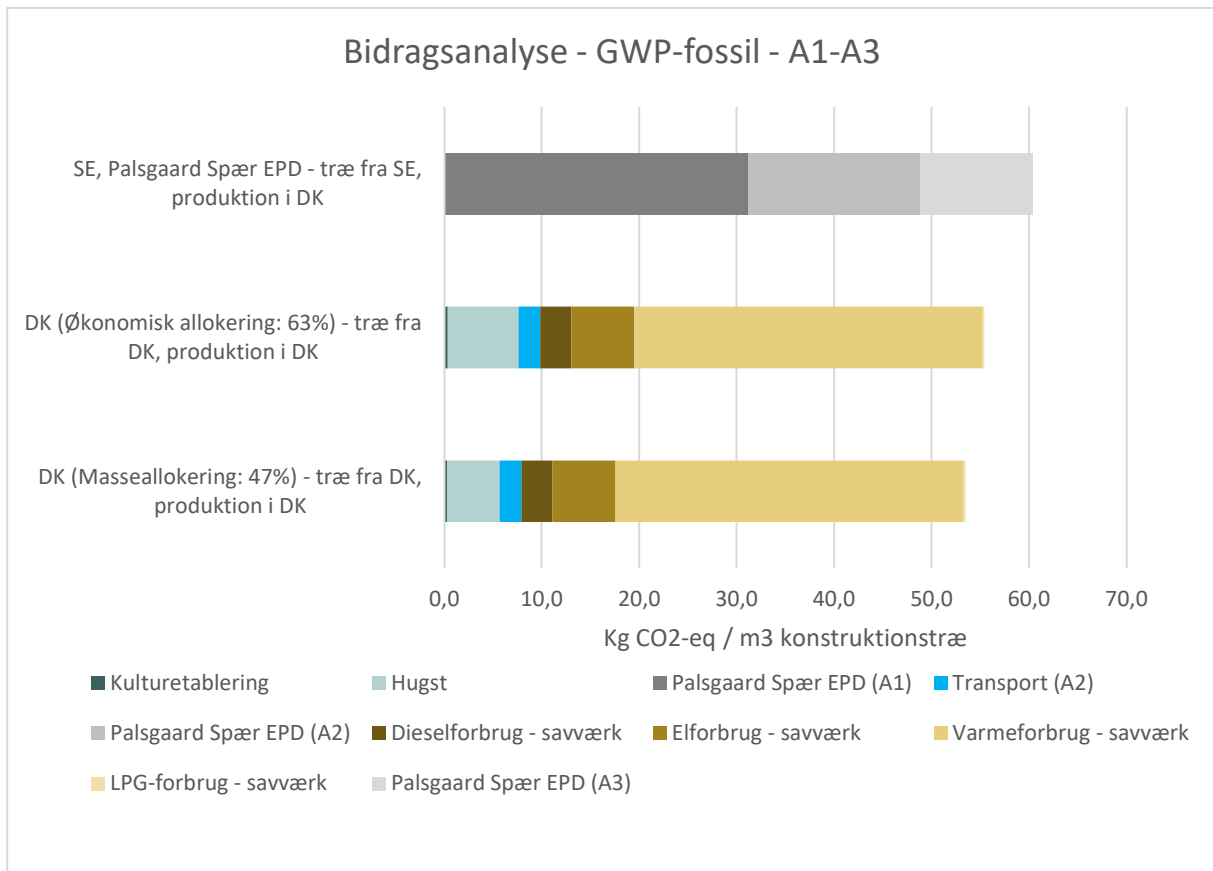


Figur 7 Bidrag til GWP-fossil i modul A1-A3 for produktionen af 1 kg træfiberisolering i SE og DK.

Figur 7 indikerer, at en produktion af træfiberisolering i DK vil reducere det fossile klimaaftryk med hhv. 22% og 28% alt efter om der antages masseallokering eller økonomisk allokering. Da træfiberpulpen udgør 16 % af den samlede værdi foretages masseallokering hvor 29 % af miljøpåvirkningerne ved kultivering og høst tilskrives pulpen, jf. EN 15804+A2.

I Woodfibers EPD oplyses det, at den træpulp der anvendes til isoleringsmateriale betragtes som affaldstræ, hvorfor der ingen miljøpåvirkninger tilskrives denne ressource. Det har ikke muligt at identificere årsagen til forskellen i DK-scenarierne og Woodfibers EPD. Dog medregnes der emballage i EP-Den i form af LDPE (plastfilm), som **mvarienueligvis** kan tilskrives en del af det højere klimaaftryk, da det samlede klimaaftryk er meget lavt og dermed vil en jomfruelig fossil plastemballage kunne have en forholdsmæssigt stor indflydelse, selvom emballagen ikke udgør en signifikant del af den samlede vægt.

5.2.5 Konstruktionstræ



Figur 8 Bidrag til GWP-fossil i modul A1-A3 for produktionen af 1 m³ konstruktionstræ i SE og DK ved forskellige allokeringsscenarier for miljøpåvirkninger fra kulturretablering, hugst og energi-forbrug.

For konstruktionstræ kultiveret og forarbejdet i et DK-scenarie ses et 8 % lavere fossilt klimaaftryk sammenlignet med EPDen fra Palsgaard Spær. Denne variation må antages at være inden for usikkerheden i henhold til anvendte data. Forskellen i transport afspejler at transporten af råtræ til Danmark, A2, mindskes i det danske scenarie. Modsat tidligere præsenterede biogene ressourcer, udgør transporten dog en forholdsvis mindre del pga. træets højere densitet og dermed bedre udnyttelse af det tilgængelige transportvolumen.

Konstruktionstræ er afhængig af en primærproduktion af træ og resultaterne er dermed mindre påvirkelige af allokeringsmetoden end de øvrige undersøgte biogene ressourcer.

5.3 Udledning, lagringspotentiale og transport

Af

Figur 9 ses klimapåvirkningen (GWP-fossil) for isoleringsmaterialer for produktionen (A1-A3) og Transport fra produktion til byggeplads (A4). Den biogene andel (GWP-biogen) er angivet separat på den negative akse. GWP-biogen er den mængde CO₂-ækv. som er lagret i det biogene materiale og vil blive frigivet ved afbrænding eller nedmuldning.

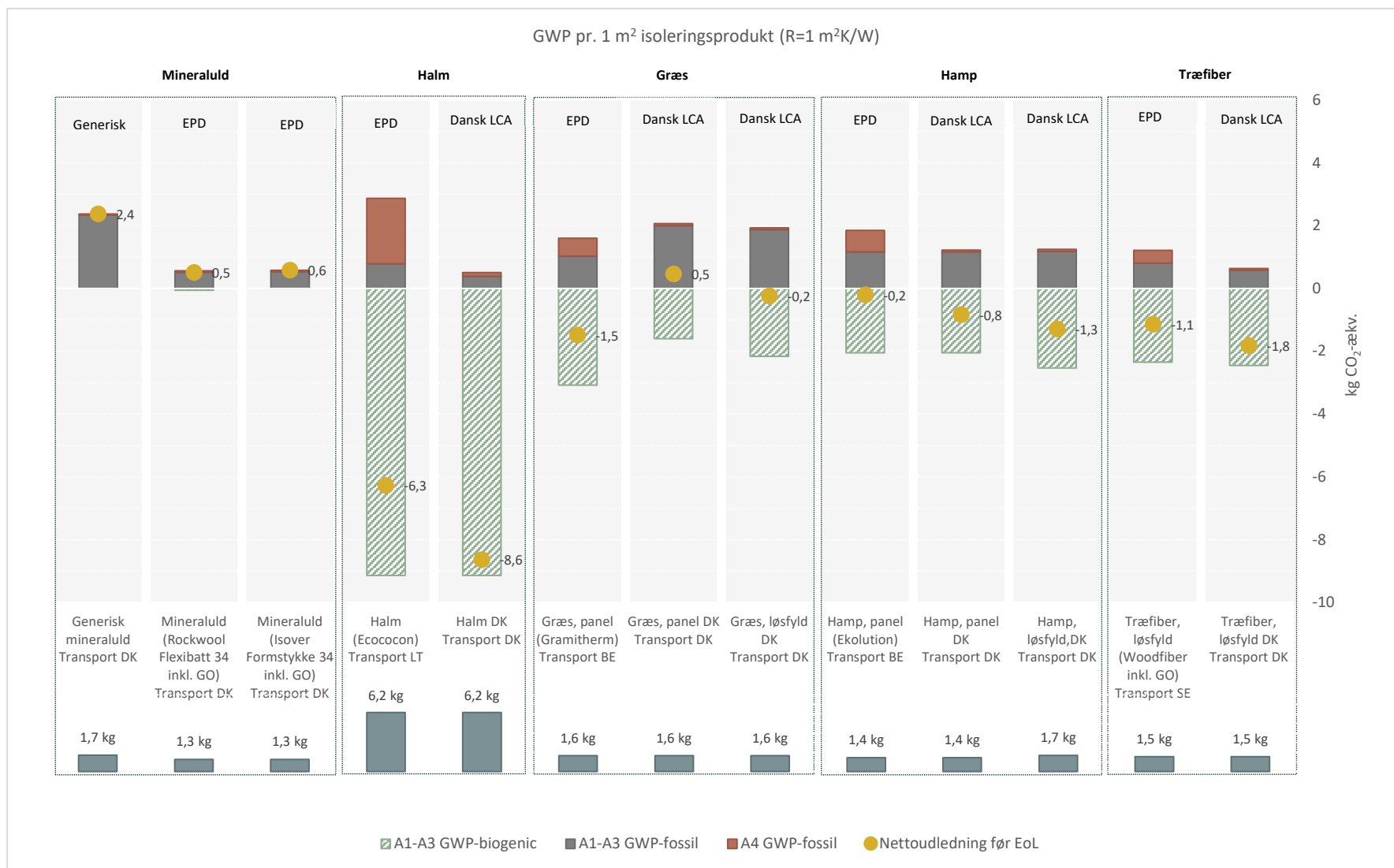
Nettoudledningen før EoL angiver den samlede mængde CO₂-ækv. der er hhv. optaget og udledt frem til nedrivningen af bygningen og siger dermed noget om isoleringsproduktets evne til lagre og forskyde CO₂-udledningen.

For de mineralske isoleringsprodukter (Rockwool og Isover) ses at de generelt performer godt i forhold til GWP, hvilket bl.a. skyldes meget optimerede produktionsforhold med anvendelse grøn strøm og biogas, med meget lave udledninger tilknyttet. Der ses, at der ikke er noget (eller meget lille) lagringspotentiale.

Halmisolering har generelt et lavt fossilt klimaaftryk sammenlignet med de øvrige biobaserede isoleringsprodukter, dette skyldes særligt, at det ikke er nødvendigt med nogle former for tilsætning og at en mindre andel af miljøpåvirkning fra kultivering allokeres halmen, da den er en sidestrøm til kornproduktion. Der ses, at halmisoleringen har et meget stort lagringspotentiale, dette skyldes at halmen kan komprimeres tættere end i de resterende produkter samt at der skal anvendes et tykkere element pr. funktionsenhed ($R=1\text{m}^2\text{K/W}$).

På grund af den større mængde halm, ses transporten fra Litauen også at have en væsentlig betydning.

For græs-, træ- og hampisolering ses, der at have et mindre nettolagringspotentiale. Der ses generelt, at for isoleringsprodukterne produceret i udlandet forøger transporten til byggepladsen miljøpåvirkningen med ca. 50%.



Figur 9: Klimapåvirkning for isoleringsmaterialer for produktionen (A1-A3), Endt levetid (C3-C4) og Transport fra produktion til byggeplads (DK)

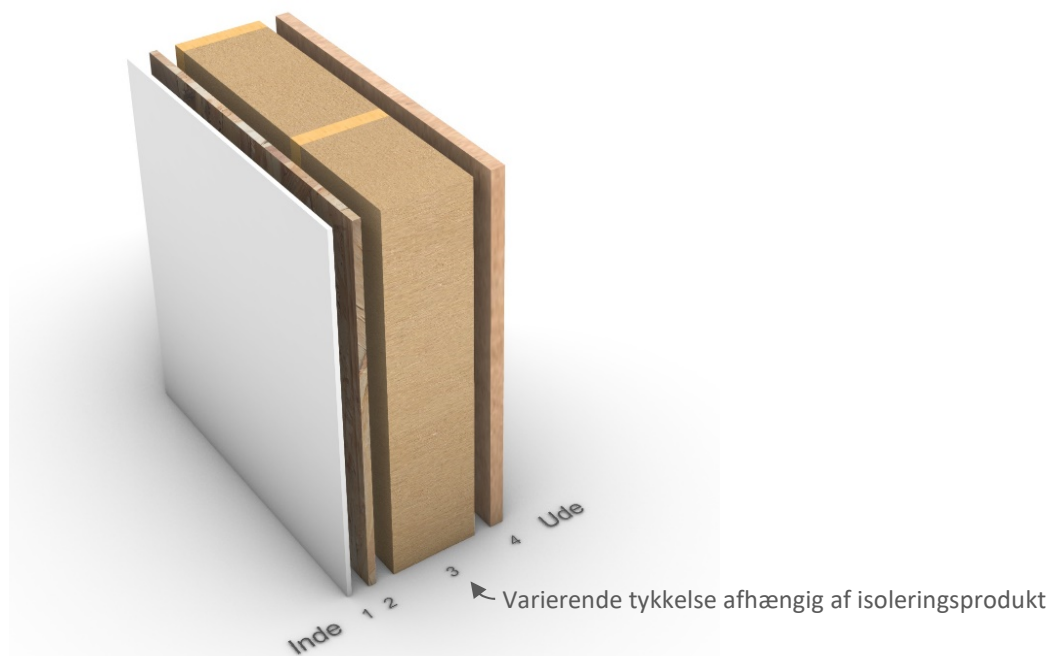
5.4 Sammenligning af isoleringsprodukter i ydervæg

For at kunne sammenligne de forskellige isoleringsprodukter på tværs, er det nødvendigt, at de omdannes til en funktionsbestemt enhed. Der er i projektet valgt en funktionsenheden på 1 m^2 ydervæg (ekskl. regnskærm) med en samlet U-værdi $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. På denne måde tages der højde, at de forskellige isoleringsprodukter komprimeres til forskellige densitet og har forskellige varmeledningsevner. Der vil sige, at et isoleringsprodukt med en ringere varmeledningsevne vil resultere i en øget vægtykkelse for at opnå funktionskravet med en U-værdi på $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ og derfor vil have et øget materialeforbrug. Derudover vil et behov for en tykkere væg (aht. isolansen) også afføde et øget træbehov i skeletvæggen.

Der er i sammenligningen udvalgt de scenarier for danskproducerede byggevarer, som vurderes mest realistisk. Derudover er også inkluderet isoleringsprodukter, der er på markedet med EPDer som referenceprodukter til sammenligning.

Standardkonstruktionen består af (fra indvendig side):

1. 13 mm gipsplade
2. 22 mm OSB4 plade
3. Træskelet (udgør 15%) med isolering (tykkelse varierer afhængig af isoleringsprodukt)
4. 40 mm Træfiberplade som vindspærre
5. Regnskærm er ikke inkluderet



Figur 10: Standardkonstruktion anvendt i sammenligning af isoleringsprodukter.

Af nedenstående tabel ses forudsætninger for materialeanvendelse ved de forskellige isoleringsprodukter. For faktiske byggevarer er anvendt deres respektive materialeegenskaber (varmeledningsevne og densitet), mens der for de undersøgte scenarier i dansk kontekst er anvendt materialeegenskaber svarende til de isoleringsprodukter på markedet de minder mest om.

Tabel 3: Oversigt over materialeegenskaber for isoleringsprodukter i sammenligningsanalyse.

Isoleringsstype	Varmelednings- evne [W/mK]	Densitet [kg/m ³]	Tykkelse for U=0,14 W/m ² K [m]	Materiale- anvendelse isolering [kg/m ²]
Generisk mineraluld	0,034	50	0,280	11,9
Rockwool Flexibatt 34 inkl. GO	0,034	37	0,280	8,8
Rockwool Flexibatt 34 ekskl. GO	0,034	37	0,280	8,8
Gramitherm	0,041	40	0,315	10,7
Ekolution	0,041	35	0,315	9,4
Ecococon*	0,067*	151*	0,40	60,8
DK Halm	0,056	110	0,391	36,6
DK Græsisolering (panel)	0,041	40	0,315	10,7
DK Græsisolering (løsfyld)	0,041	40	0,315	10,7
DK Hampisolering (panel)	0,041	35	0,315	9,4
DK Hampisolering (løsfyld)	0,042	40	0,320	10,9
DK Træfiberisolering (løsfyld)	0,036	43	0,290	10,6
Woodfiber	0,036	43	0,290	10,6

* Ecococon-element er inkl. træ.

Af Figur 11 ses en sammenligning af forskellige isoleringsprodukter i en standard ydervægskonstruktion. Der ses, at isoleringens bidrag til konstruktionens samlede GWP varierer væsentligt mellem de forskellige isoleringsmaterialer.

Konstruktionerne med den samlet laveste miljøpåvirkning ift. GWP er med Rockwool Flexibatt (inkl. GO), Dansk halmisolering og Dansk træfiberisolering.

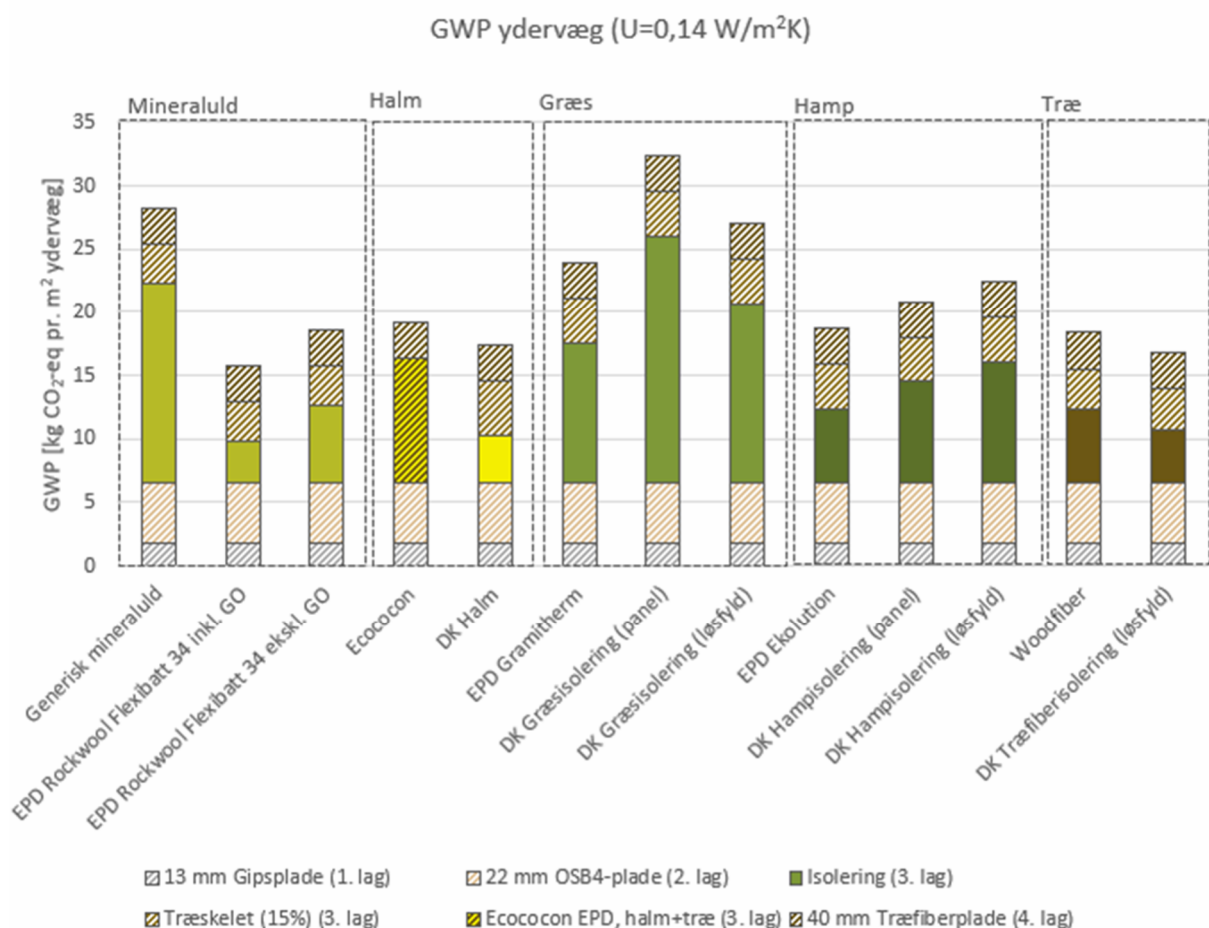
Konstruktionerne med den samlede største miljøpåvirkning ift. GWP er generisk mineraluld og dansk produceret græsisolering.

For græs og hamp ses generelt, at de danskproducerede isoleringsprodukter performer dårligere end deres reference EPDer fra faktiske produktioner. Dette skyldes særligt kultiveringsmetoder i den danske kontekst samt forudsætning om anvendelse af jomfruelige tilsætningsfibre. Grundet den manglende transparens vedrørende opstrømsallokering af de biogene ressourcer i reference EPDerne er det ikke muligt at vurdere indflydelsen af denne på resultaterne.

Halm- og træfiberisolering ses at være meget sammenlignelig med reference EPDen.

Rockwools isoleringsprodukter performer generelt godt i forhold til GWP, hvilket bl.a. skyldes meget optimerede produktionsforhold med anvendelse grøn strøm og biogas.

For halmisoleringspaneler kræves ingen tilsætning af brandhæmmer da materialet stemples meget hårdt under produktionen, hvilket bevirker en høj brandmodstand.



Figur 11: Sammenligning af isoleringsprodukter i standardydervægskonstruktion med en U-værdi=0,14 W/m²K.

5.5 Perspektivering

Det underliggende studie har vist at følgende parametre har størst indflydelse på byggevarens samlede klimaaftryk:

- Allokeringsmetode
- Gødskningstype
- Geografi

I de følgende afsnit gennemgås betydningen af nævnte parametre for de forskellige undersøgte biogene ressourcer.

5.5.1 Allokeringsmetode

Allokeringsmetoden har vist sig betydningsfuld ift. de undersøgte byggevarers klimaaftryk. Biogene værdikæder udgør som oftest multifunktionelle systemer og allokeringsmetoden kan have en signifikant betydning for de tilskrevne miljøpåvirkninger af de forskellige produkter.

Der bør skelnes mellem opstrøms- og nedstrøms-allokering. Opstrøms-allokering er relevant for kultiveringen af de biogene ressourcer og hvorledes miljøpåvirkningerne ved kultivering fordeles på de forskellige output fra marken. Nedstrøms-allokering er relevant for produktionen af byggevarerne og hvorledes miljøpåvirkningerne fra denne fordeles på de forskellige output i produktionen. I de anvendte EPDer er der som udgangspunkt ikke flere output end byggevaren, og fokus bør derfor være på opstrøms-allokering da denne dermed har størst betydning for det samlede klimaaftryk.

Da det som udgangspunkt vil være økonomiske incitamenter der driver kultiveringen af afgrøder, anses økonomisk allokering for at være en retvisende metodik og derfor præsenteres resultaterne for transport til byggeplads samt anvendelse i en ydervæg, med en økonomisk allokeringsfaktor. Se afsnit 7 for en fyldestgørende argumentation for dette argument og for sensitivitetsanalyser for varierede allokeringsmetoder og faktorer.

EN 15804:2012 + A2:2019 stiller ikke krav om, at allokeringsmetoden for opstrøms-produktion skal deklareres i en EPD hvorved der opstår en risiko for, en sammenligning af byggevarer ikke foretages på et sammenligneligt grundlag.

5.5.2 Gødskningstype

Resultaterne er præsenteret med en 50/50 fordeling af husdyrgødning og kunstgødning da denne anses mest realistisk grundet den store husdyrproduktion i Danmark og bekræftet af AU Agro. Ved en halvering af kunstgødningsforbruget viser resultaterne at der kan opnås væsentlige klimamæssige fordele, da produktionen af kunstgødning er forbundet med et relativt stort klimaaftryk grundet afhængigheden af fossile råmaterialer. For græsisolering vil man opnå de største reduktioner i klimaaftrykket ved halvering af kunstgødning, da kultivering af græs har et relativt stort input af N- og K-gødning sammenlignet med hamp og vinterhvede. Man bør dog også være opmærksom på, at estimater på direkte udledninger af klimagasser fra husdyrgødning er forbundet med en stor usikkerhed.

Følgende afsnit er forfattet af AU Agro, Uffe Jørgensen med kilde (Nielsen, 2023).

I dag udnyttes husdyrgødning langt mere effektivt i landbruget end tidligere. Det er opnået via stramninger i krav til både opbevaring (gylletanke) og udbringning (slæbeslanger og nedfældning fremfor bredspredning) igennem en længere række af Vandmiljøplaner over de sidste 30-40 år. Derfor udgør husdyrgødning nu ca. halvdelen af gødningstilførslen til landbruget, mens resten er i form af handelsgødning. Der sker tillige en stigende recirkulering af madaffald via kommunal indsamling og bioforgasning, som yderligere kan skubbe til udviklingen væk fra import af næringsstoffer. Et helt cirkulært jordbrug kan dog ikke opnås, hvis ikke det lykkes at recirkulere flere af de næringsstoffer, som sælges med maden og ender i vores spildevandsanlæg. Disse er udviklet til effektivt at fjerne nitrat og ammonium via denitrifikation, og kun en mindre mængde recirkuleres med slam. Kalium er et andet vigtigt næringsstof, som i høj grad udledes fra spildevandsanlæg, da det ikke umiddelbart har negative effekter på vandmiljøet. Det er derfor i dag kun en yderst begrænset mængde af næringsstoffer fra spildevand, som bliver recirkuleret.

Kvælstof kan forholdsvis nemt sikres af landbruget selv via dyrkning af flere afgrøder med biologisk N-fiksering (bælgplanter såsom kløver, lucerne, ærter og hestebønner). Hvis afgrøderester herfra udnyttes i biogasanlæg, kan gødningen fordeles til de afgrøder i sædskifterne, som ikke selv kan fikse N. I marker, hvor der har været fx kløvergræs, vil der kunne frigøres kvælstof til den følgende afgrøde, som dermed har et reduceret gødningsbehov. Dette kan forholdsvis nemt implementeres, hvis prisen på handelsgødning øges, eller der på anden måde skabes incitament for landmanden. Samdyrkning af bælgplanter og andre afgrøder er en anden mulighed for at sikre N-forsyningen, hvilket allerede praktiseres i kløvergræsmarker og med byg/ært blandinger. Der er dog potentialer for at øge forskellige former for nye former for samdyrkning, som kan bidrage med forsyning med N, men ikke de andre næringsstoffer.

5.5.3 Geografi

Den geografiske placering af en produktion viser sig at have indflydelse på byggevarens klimaaftryk. Dette skyldes dels, at der - selv indenfor Europa - ses stor forskel i klimaaftrykket for forskellige landes el-mix, men også at transport af tunge byggematerialer over lange afstande kan bidrage med markante klimaaftryk. Derudover har tilgængeligheden af fornybare energikilder i form af bl.a. biogas også have en signifikant betydning, da der for bl.a. græs anvendes meget energi på tørringsprocessen.

Transporten af byggevarer til byggeplads får en forholdsvis større betydning for nogle biogene byggevarer i nærværende publikation (se Figur 14 i Appendiks) end hvad man traditionelt ser for byggevarer. Dette ses især for halm, hvor den økonomiske allokering af miljøpåvirkninger fra halmproduktionen primært tilskrives det mest værdifulde produkt, korn, hvormed halmen får en meget lav miljøpåvirkning. Derudover, er anvendelse af de biogene ressourcer i nærværende publikation fokuseret på isoleringsmaterialer, som ikke udnytter det fragtpotentialet optimalt, da densiteten af isoleringsmaterialer som udgangspunkt er lav. Altså transporterer man mere volumen end masse, hvilket har en negativ effekt på klimaaftrykket for transporten i modul A4.

Derudover har den geografiske placering betydning i et fremtidigt perspektiv for visse biogene ressourcer. I Danmark findes der ikke en skaleret, eksisterende produktion af hamp og en fremtidig hampproduktion til byggevarer vil være afhængig af at en anden afgrøde mindskes. Da størstedelen af dyrkede afgrøder i Danmark i dag anvendes til husdyrfoder, vil det kræve at husdyrproduktionen mindskes for at hamp kan anvende det tilgængelige areal (AU Agro).

5.5.4 Affaldsscenerier

I dette studie er affaldshåndteringsmetoder af forskellig teknologisk modenhedsgrad undersøgt som alternativ til forbrænding. Heraf er flere at teknologierne i stand til at indfange og lagre kulstof, enten som rent kulstof eller i form af CO₂ fra røggasser.

I henhold til kravene i EN 15804, som foreskriver, at kun ibrugtaget affaldshåndteringsmetoder må inkluderes i en EPD samtidig med, at det biogene kulstof skal være neutralt over produktets levetid, er disse bortskaffelsesscenerier ikke i overensstemmelse med standarden. Studiet har dog imidlertid et undersøgende formål, hvorfor alternative affaldshåndteringsmetoder er medtaget.

Fælles for de præsenterede affaldsscenerier er, at de skal vurderes ud fra deres fremtidige potenti-ale. Først og fremmest skal infrastrukturen for at understøtte et givent affaldsscenerie være tilgæn-gelig og sandsynlig, hvorved perspektivet for nedmuldning samt pyrolyse af byggevarer, efter endt levetid, må antages at være urealistiske. Det må anses som usandsynligt at byggevarerne ved endt levetid opsamles, adskilles og transporteres tilbage til marken. Derudover vil tilstedeværelsen af bl.a. bindere og brandhæmmere medføre at materialet ikke er muligt at bringe tilbage til marken. Ved py-rolyse opkoncentreres eventuelle kemikalier og tilstedeværelsen af bindere og brandhæmmere gør ligeledes at denne bortskaffelse ikke er mulig.

Det største potentiale for affaldsscenerier er forbrænding med CCS hvorved CO₂ fra forbrændingsan-lægget opfanges og opbevares. Dette affaldsscenerie er dog uafhængigt af de biogene ressourcer og byggevarer og vil kræve en samfundsmæssig investering i teknologi, fornybar energi samt infrastruk-tur til at understøtte dette.

Uanset affaldsscenerie vil den forskydning af udledningen af den biogene CO₂ muliggøres gennem anvendelsen af biogene ressourcer i byggevarer, sammenlignet med nuværende scenerier.

5.5.5 Fremtidigt dansk potentiale

For at kunne vurdere et fyldestgørende fremtidigt potentiale for de biogene byggevarer i en dansk kontekst, er det vigtigt at tage højde for de gensidigt afhængige værdikæder og afledte konsekvenser ved en ændret anvendelse. I nærværende studie er der ikke regnet på konsekvenserne af omlagte anvendelser af de undersøgte biogene ressourcer. I det følgende afsnit gennemgås nogle af de per-spektiver der skal tages højde for ved en evt. omlægning i en dansk kontekst.

Det dyrkede landbrugsareal udgør i dag ca. 60 % af Danmarks samlede areal hvor produktionsskov udgør ca. 12 % (<https://www.altinget.dk>, 2023). For hamp og træ, som i dag ikke dyrkes udbredt i Danmark til anvendelse i byggevarer, er den danske arealanvendelse relevant. Enhver øgning af en ny afgrøde, i dette tilfælde hamp eller træ, vil påvirke tilgængeligheden af en anden afgrøde da der ikke er disponibelt areal til rådighed i Danmark. Der vil derfor være konkurrence om arealet i Danmark og det økonomiske incitament for en ændret anvendelse kan afgøre det fremtidige potentiale for dyr-kelsen af en ny afgrøde.

CLCA er konklusionsvis muligvis en bedre metodik end ALCA når de miljømæssige konsekvenser af en ændret anvendelse af biogene ressourcer skal vurderes. Såfremt en ændret anvendelse skaber en øget efterspørgsel på et meget miljøbelastende alternativ, skal konsekvenserne ved dette belyses så-ledes at anvendelsen af danske biogene ressourcer i byggevarer ikke fører til en større samlet miljø-belastning for samfundet.

Appendiks

1 Kortlægning (LCI)

Antallet af producenter som producerer byggematerialer af biogene ressourcer, er fortsat stigende grundet ressourcernes egenskab i at lagre kulstof. Historisk set har træ været et traditionelt byggemateriale og har været bredt anvendt i bygningskonstruktioner. De senere år er producenter begyndt at anvende alternative biogene ressourcer såsom halm, hamp, græs mv. I Danmark er deri dag kun få etablerede producenter af biogene byggematerialer og selve anvendelsen af biogene ressourcer, på nær træ, kan fortsat betragtes som en niche. Der anvendes i videst mulige omfang direkte data fra en række kilder, herunder databaser, EPDer, litteraturstudier, interviews og målinger. Alle LCA scenarier er modelleret i værktøjet *LCA for Experts*, udgivet af Sphera. Anvendt databasedata er *Sphera Professional Database 2023.1* og *Ecoinvent v.3.9.1*

1.1 Elektricitetsmix

Elektricitet modelleres i dette studie med forbrugsmixet, som angiver den nationale elproduktion inklusive import, men fratrukket eksport. Dette er en afvigelse fra metoden beskrevet i EN 15804:2012 + A2:2019, hvor det foreskrives, at elektricitetsmixet skal modelleres som residualmix, hvis ikke producenten har grønne certifikater på den benyttede strøm. Argumentet for at bruge forbrugsmixet er, at studiet kigger på potentialerne i at etablere en produktion af de biogene byggematerialer i DK og altså ikke hos en bestemt producent. På denne måde er det mere retvisende at bruge forbrugsmixet, da man ikke kan sige noget om, hvorvidt byggematerialerne produceres med eller uden grønne certifikater.

1.2 Kulstofindhold i biomasse

Kulstofindholdet i de anvendte biogene ressourcer er modelleret på baggrund af oplysninger fra AU Agro. Disse kan findes i Tabel 4.

Tabel 4: Kulstofindhold i biomasse – fastsat efter oplysninger fra AU Agro

Kulstofindhold (C) i biomasse	%
Halm fra korn, raps og frøgræshalm	44
Biomasseafgrøder, efterafgrøder, grødeskæring og høst af vejrabatter	45
Træ	47
Hamp	45

1.3 Direkte udledninger fra husdyrgødning

For halm, græs og hamp inkluderes der jf. **Fejl! Henvisningskilde ikke fundet.** to forskellige scenarier for gødskning. Det ene scenarie antager anvendelse af 100% kunstgødning, imens det andet scenarie antager anvendelse af 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning. 100%-scenariet kan ses som et *worst case* scenarie, da produktionen af kunstgødning er forbundet med et relativt højt klimaaftryk. For et dansk scenarie er antagelsen om 100% kunstgødning dog ikke fuldt ud repræsentativ, da godt halvdelen af den anvendte gødning i Danmark kommer fra husdyr. Tabel 2 i (Rolighed, Thorsen, & Blicher-Mathiesen, 2023) viser, at det totale forbrug af N-gødning i 2021 lå på 200 kt N for

kunstgødning og 216 kt N for husdyrgødning. Ved at udskifte halvdelen af kunstgødningen med husdyrgødning må man derfor forvente at se et væsentligt lavere klimaaftryk. Dette skyldes dels, at man kun får 50% af miljøaftrykket fra produktion af kunstgødning og dels, at husdyrgødning jf. ALCA vil ses som et restprodukt fra et andet system, hvorfor det kommer med et lavt aftryk. Ved introduktion af husdyrgødning skal der dog stadig tages højde for direkte udledninger af drivhusgasser. Ifølge figur 17.9 fra (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, 2024) ligger de direkte lattergasudledninger for kunst- og husdyrgødning dog på nogenlunde samme niveau. Dette betyder altså, at man formentligt ikke vil se en væsentlig ændring i klimaaftrykket relateret til direkte udledninger ved en udskiftning til husdyrgødning. Den primære forskel i klimaaftrykket ml. gødningstyperne forventes derfor at ligge i selve produktionen af kunstgødning.

I samarbejde med AU Agro er direkte udledninger for husdyrgødning bestemt, som et vægtet gennemsnit af udledninger fra svine- og kvæggylle (opgjort per kg tørstof, TS). Emissionsfaktoren kan ses i Tabel 5.

Tabel 5: Emissionsfaktor for direkte udledninger fra husdyrgødning

Emissionsfaktor: Direkte udledninger fra kvæg- og svindegylle (2017-2018)		
	Kvæg	Svin
Udledning (kg CO ₂ -eq/kg TS gylle)	0,27	0,61
Vægtning	0,69	0,31
Vægtet gennemsnit (kg CO₂-eq/kg TS gylle)	0,38	

1.4 Halm

I dag (2023) udgør korn den største produktion af danske afgrøder (Danmarks Statistik, 2024). Korn dyrkes primært til husdyrfoder, hvor halm er en sidestrøm fra produktionen. Halm anses som et restprodukt, hvorfor halmen historisk er blevet bortskaffet bl.a. ved afbrænding/bioforgasning i energisektoren eller nedpløjning for på denne måde bringe kulstof samt næringsstoffer tilbage i jorden. (Mortensen & Jørgensen, 2022) har analyseret scenarier for biomasse fra landbruget. Af analysen fremgår det, at der er op til 3 mio tons tilgængelig, uudnyttet halm, hvis man kigger på et *business-as-usual* scenarie for 2030, som antager en fortsættelse af de nuværende forhold for produktion af biomasse i Danmark.

Til byggevarer kan halm i dag anvendes i produktionen af halmelementer.

Halm er ikke egnet som løsfyldisolering og derfor er dette ikke inkluderet.

Til modellering af halmelementet, anvendes informationer fra en EPD på en eksisterende halmelementproduktion (EcoCocon, 2022). Den deklarerede enhed er følgende:

- 1m² m. tykkelse på 40cm
- U=0,12W/m²K
- Presset halm: 110 kg/m³

Jf. (EcoCocon, 2022) er fordelingen af materialer følgende:

Tabel 6: Materialeliste for produktion af 1 m² halmelement (EcoCocon, 2022)

Materialer	Enhed	Mængde
------------	-------	--------

Halm	kg	41,22
Træfiberplade (684 kg/m ³)	kg	0,27
Krydsfinér (birk) (640/m ³)	kg	2,47
Fyrretræ (490 kg/m ³)	kg	16,01
Skruer	kg	0,60
Samlet vægt af panel	kg	60,57

Materiemængder angivet i Tabel 6 er anvendt i modellering af halmelement i *LCA for Experts*. For halmelementet modelleres der et scenarie for Litauen (LT), Slovakiet (SK) og Danmark (DK). LT er anvendt som baseline, da det er her, at EcoCocon på nuværende tidspunkt (juni, 2024) producerer deres halmelement. EcoCocon planlægger dog at flytte produktionen til SK inden for kort tid og derfor medtages et scenarie med produktion i SK. Til sidst inkluderes naturligvis et scenarie for en dansk produktion. Den danske produktion undersøges i et fremtidigt scenarie, hvor der antages samme produktionsmåde som i SK.

I de følgende afsnit er angivet kilder til data anvendt i modulerne A1, A2 og A3 jf. EN 15804:2012 + A2:2019.

1.4.1 Allokering af miljøpåvirkninger til halm

Ved anvendelse af masse, som allokeringens nøgle skal 36% af miljøpåvirkningerne fra produktionen af korn tilskrives halmen jf. udbyttmængder pr. ha oplyst af AU Agro.

Som tidligere påpeget anvendes halm til forskellige formål. Ifølge Danmarks Statistik sælges halm til energisektoren typisk til ca. 53 kr. pr. 100 kg (gennemsnit fra 2015-2022), mens korn sælges til ca. 126 kr. pr. 100 kg (gennemsnit fra 2015-2022) (Danmarks Statistik, 2024). Ifølge EN 15804+A2 skal miljøpåvirkningerne allokere efter økonomiske kriterier, hvis indtægten udgør 25% eller mere, såfremt der ses bort fra kravet om masseallokering.

Tabel 7 illustrerer, hvor stor en andel af den økonomiske gevinst ved dyrkning af 1 ha korn, som halm udgør.

Tabel 7: Udbytte og priser på halm og korn

	Udbytte i alt	Udbytte halm	Udbytte korn	Reference
Korn (tons TS/ha)	8,47	3,07	5,4	AU Agro
Priser (DKK/100kg) - gennemsnit 2015-2022	178,94	52,88	126,06	(Danmarks Statistik, 2023)
Økonomisk allokering (%), baseret på pris per 100 kg	100%	30%	70%	Egen udregning
Masse allokering (%)	100%	36%	64%	Egen udregning
Økonomisk allokering i eksisterende EPD	100%	10%	90%	(EcoCocon, 2022)

Af

Tabel 7 fremgår det, at halm udgør mere end 25% af den samlede økonomiske værdi, hvilket anses for at være grænsen for, hvornår en økonomisk allokering metode bør anvendes.

Nedenfor oplystes de scenarier som undersøges for produktion af halmelementet:

1. Ecocon EPD. Økonomisk allokering: 10%. Resultater direkte fra EPD.
2. Nuværende produktion i LT. Økonomisk allokering: 10%. 100% kunstgødning til kultivering af afgrøde.
3. Optimeret produktion i SK. Økonomisk allokering: 10%. 100% kunstgødning til kultivering af afgrøde.
4. Optimeret produktion i DK. Økonomisk allokering: 10%. 100% kunstgødning til kultivering af afgrøde.
5. Optimeret produktion i DK. Økonomisk allokering: 10%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af afgrøde.
6. Optimeret produktion i DK. Økonomisk allokering: 19%. 100% kunstgødning til kultivering af afgrøde.
7. Optimeret produktion i DK. Økonomisk allokering: 19%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af afgrøde.
8. Optimeret produktion i DK. Masseallokering: 38%. 100% kunstgødning til kultivering af afgrøde.
9. Optimeret produktion i DK. Masseallokering: 38%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af afgrøde.

I Tabel 52 ses resultaterne for A1-A3 i ovenstående scenarier.

1.4.2 A1 - Råmaterialer

Ecoinvent databasen indeholder et datasæt for kornproduktionen. Dog vurderes dette at være af ældre dato samtidig med, at det er et globalt gennemsnit, hvorfor det i mindre grad er repræsentativt for Danmark. LCI-data for kornproduktionen er anvendt til at beregne miljøpåvirkninger af produktionen af 1 ton korn. Tabel 8 lister LCI anvendt til modellering af kornproduktionen.

Tabel 8: LCI-data på korn kultivering (Parajuli, Kristensen, Knudsen, Mogensen, & Corona, 2017)

Flow		Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow				
Vinterhvede kultivering		Ha	1	
Inputs				
Frø		kg	179	
Kulstofoptag under vækst		kg C	-3993	(AU Agro, VtBB_ AU agro Udbyttmængder [Excel])
Gødning	N	kg	144	
	P		19	
	K		71	

Kalk		kg	167	
Pesticider		kg	1,72	
Smøreolie		kg	14	
Direkte primær energi (diesel)		MJ	3126	
Tørring	El	kWh	111	
	Varme	MJ	364	
Outputs				
Netto biomasse (tørstof)		T DM	9,1	
Udvaskning af N		kg	51,5	(AU Agro, Udvaskning kornsædskifte [Excel]), Gns. af kornrigt sædskifte på JB1 ⁵ og JB6 ⁶
Udvaskning af P		kg	0,9	

LCI-data præsenteret i Tabel 8 er benyttet til modellering af vinterhvede kultivering i både LT, SK og DK. Alle flows af gødning (N, P og K) samt varme og elektricitet til tørring er modelleret m. landespecifikke datasæt. Elektriciteten er modelleret med et datasæt på forbrugsmixet og varmemeforbruget er modelleret med et datasæt for varmeproduktion fra naturgas. Alle øvrige flows er modelleret med ens datasæt på tværs af de to lande, som enten har global eller europæisk repræsentativitet. De benyttede datasæt i modul A1 kan findes i sektion 6.1.1 i appendiks.

Træfiberplade, krydsfinér, og fyrretræ er også modelleret med identiske datasæt for de to lande. Dette kan tilmed findes i sektion 6.1.1.

1.4.3 A2 - Transport

I Tabel 9 findes distancerne benyttet til modellering af modul A2 for produktion af halmpaneler i LT, SK og DK. Distancerne benyttet for LT er baseret på den eksisterende EPD (EcoCocon, 2022), hvorimod distancerne for SK er baseret på forventede fremtidige produktionsforhold i SK (EcoCocon). Halmen leveres af lokale landmænd i både LT og SK. Træfiberpladen kommer fra en leverandør i Polen (PL). Krydsfinér leveres fra Letland til LT-produktionen og fra Tjekkiet til SK-produktionen. Fyrretræ leveres fra Estland til LT og fra en lokal producent i SK-scenariet. Skruer kommer fra en leverandør i hhv. LT og SK.

Distancerne i DK er baseret på antagelser, da det ikke har været muligt at få estimater for en produktion i DK. Halmen antages at have en transport på 25 km, hvilket er et konservativt estimat sammenlignet med de andre produktionsscenarier. Antagelsen er baseret ud fra viden om DKs samlede dyrkningsareal af korn, som i 2022 udgjorde omkring 30% af Danmarks samlede areal (Danmarks Statistik, korn, u.d.). Denne relativt store arealandel betyder, at transportdistancen for halm forventes at være lav (<25 km). Samtidig forventes det også, at produktionsfaciliteter for halmelementet placeres på en lokation, hvor koncentrationen af kornmarker er høj. For fyrretræ er der antaget en distance på 50 km, da udbredelsen af danske savværker og trælastere bør kunne opfylde denne betingelse, baseret på en simpel Google søgning på placering af danske savværker. For de øvrige materialer er der antaget konservative estimater for transportdistancerne – se Tabel 9.

⁵ Sandjord

⁶ Lerjord

Tabel 9: Landespecifikke transportdistancer (modul A2)

Flow	LT			SK			DK		
	Distance (km)	Transportmiddel	Reference	Distance (km)	Transportmiddel	Reference	Distance (km)	Transportmiddel	Reference
Halm	10	20-26 t, Truck	(EcoCocon, 2022)	9	20-26 t, Truck	(EcoCocon), For træfiberpladen er der antaget samme leverandør som for LT og distancen er opmålt vha. Google Maps	25	20-26 t, Truck	Antagelse
Træfiberplade	610			658			500		
Krydsfinér (birk)	319			115			500		
Fyrretræ	567			42			50		
Skruer	201	3,5 t, Let køretøj		38	3,5 t, Let køretøj		150	3,5 t, Let køretøj	

1.4.4 A3 - Fremstilling

Tabel 10 viser LCI-data for produktionen af 1 m² halmelement i LT jf. (EcoCocon, 2022) . I Tabel 11 ses LCI-data for produktionen i SK, hvor der jf. oplysninger fra EcoCocon kun vil blive benyttet elektricitet (EcoCocon). Hvordan en fremtidig produktion i SK præcist vil se ud, er endnu uklart og dette skal der tages forbehold for. EcoCocon forventer, at produktionens energiforbrug vil blive dækket af egne solceller, men i dette tilfælde er der modelleret et konservativt scenarie, hvor elektriciteten antages oprindelse fra forbrugsmixet. Dette scenarie er modelleret som *Optimeret produktion* – se Tabel 11 . For DK-scenariet benyttes samme LCI-data som angivet for SK.

Tabel 10: LCI for produktion af 1 m² halmelement i LT (baseline) (EcoCocon, 2022)

Produktion af halmelement, LT			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Halmelement*	m ²	1	
Inputs			
Halm	kg	41,22	
Træfiberplade (684 kg/m ³)	kg	0,27	
Krydsfinér (birk) (640/m ³)	kg	2,47	
Fyrretræ (490 kg/m ³)	kg	16,01	
Skruer	kg	0,60	
Elektricitet	kWh	7,5	
Varme	MJ	18	
Diesel	MJ	14,4	
Outputs			
Halmelement	m ²	1	

*Halmelement har samlet vægt på 60,57 kg

Tabel 11: LCI for produktion af 1 m² halmelement i SK og DK (optimeret produktion) EcoCocon)

Produktion af halmelement, SK og DK			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Halmelement*	m ²	1	
Inputs			
Halm	kg	41,22	
Træfiberplade (684 kg/m ³)	kg	0,27	
Krydsfinér (birk) (640/m ³)	kg	2,47	
Fyrretræ (490 kg/m ³)	kg	16,01	
Skruer	kg	0,60	
Elektricitet	kWh	7,2	
Outputs			
Halmelement	m ²	1	

*Halmelement har samlet vægt på 60,57 kg

For den nuværende produktion af halmelementer modelleres der kun et scenarie for LT, imens der for den optimerede, fremtidige produktion både modelleres scenarier for SK og DK.

Energi i form af elektricitet, varme og diesel benyttet til fremstilling af halmelementet modelleres m. landespecifikke datasæt for produktion af elektricitet (forbrugsmix) og varme (naturgas). Diesel modelleres med et globalt datasæt for diesel benyttet i maskineri. Specifikke datasæt kan ses i sektion 6.1.1 i appendiks.

Jf. (EcoCocon, 2022) træspildet 5% af de specifikke materialeinputs. Hovedparten af træresterne (99%) forbrændes mens det resterende (1%) deponeres. Træresterne er dog udeladt i modelleringen da det antages, at de udgør <5 % af de samlede miljøpåvirkninger for halmelementet.

De specifikke datasæt kan ses i sektion 6.1.1 i appendiks.

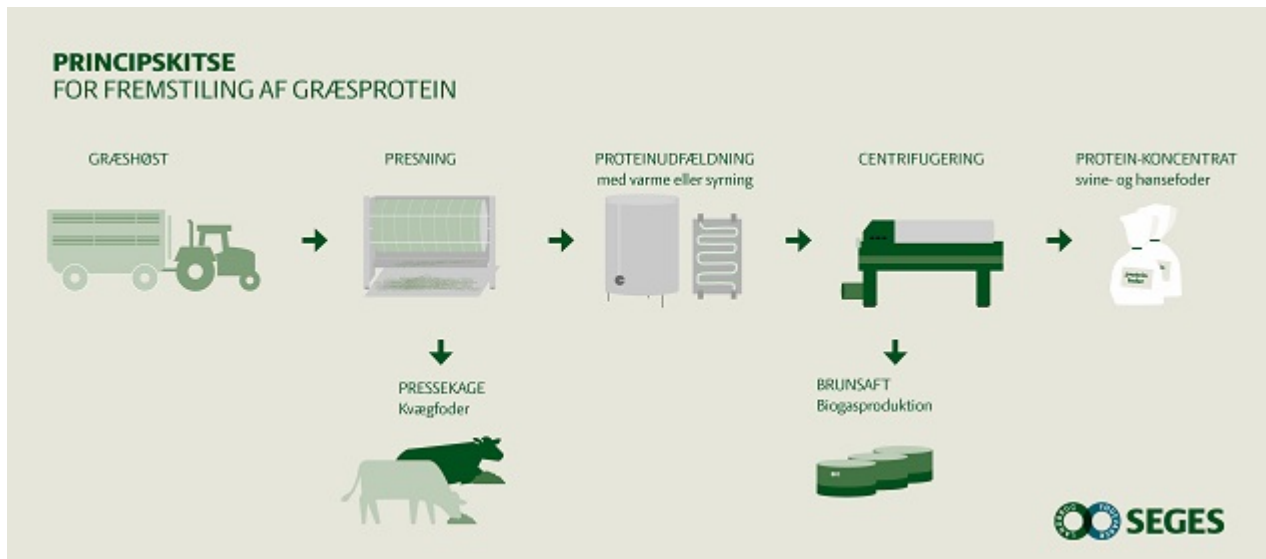
1.5 Græs

I landbruget er der igennem tiden blevet peget på forskellige kriser. En af disse er bl.a. belastningen af vandmiljøer. Græs og kløvergræs er flerårige afgrøder, som bl.a. kan anvendes ved sædskifte og som efterafgrøde med positive effekter såsom øget udbytte og reduktion af udvaskning af kvælstof (nitrat) samt bidrage til at opbygge muldlag (Effektivt Landbrug, 2019), (SEGES INNOVATION, 2020). Græs kan på denne måde anvendes, som et middel til at reducere belastningen på vandmiljøet. Samtidig indeholder græs afgørende proteiner, som kan anvendes i husdyrfoder.

Processen til udtrækning af protein sker ved bioraffinering – se Figur 12. Ved bioraffinering produceres en primærstrøm i form af grønsaft indeholdende proteinet som videreforarbejdes for at udfælde og opkoncentrere proteinet. I denne proces fremkommer et restprodukt/sidestrøm i form af brunsaft, som anvendes til biogasproduktion. Derudover fremkommer under den første presning en

sidestrøm kaldet pressekage, som kan tørres og anvendes i bl.a. isoleringsproduktion. I dag anvendes pressekagen primært til foder.

Figur 12: Sempel skematisk skitse for produktsystemet til fremstilling af græsprotein (SEGES, 2021).



Pressekagen kan, som nævnt ovenfor, også anvendes i produktionen af græsisolering. Til modellering af produktionen af græsisoleringspaneler anvendes information fra (Gramitherm, 2023). Udover dette undersøges der også et scenarie for græsisolering som løsfyld. Til modellering af dette benyttes samme LCI-data som for produktionen af træfiberisolering baseret på (Woodfiber, 2022). Input af træ vil naturligvis være udskiftet med pressekage/græspulp.

I Gramitherms EPD er der anvendt vejsidegræs som kilde til isoleringspanelerne, dermed er der ingen miljøpåvirkninger fra dyrkningen af græs inkluderet. I afsnit 3.3 vurderes perspektivet for anvendelsen af vejsidegræs i en dansk kontekst.

De deklarerede enheder er som følgende:

- Græsisoleringspanel: 1 m² til vægge, gulve, flade eller skrå tage, 100 batts (100 mm tyk), med termisk modstand på 2,47 m².K/W og en levetid på 60 år⁷
- Løs græsisolering: 1 kg græsisolering med ukendt densitet.

Fordelingen af materialer i græsisoleringspanelet ser ud som følgende:

Tabel 12: Materialeliste for produktion af 1 m² græsisoleringspanel (Gramitherm, 2023)

Græsisoleringspanel		
Materialer	Enhed	Mængde
Pressekage fra bioraffinering af græs	kg	2,88

⁷ For at kunne sammenligne græsisoleringspanelet med løs græsisolering, så omregnes denne i resultatafsnittet til 1 kg græsisoleringspanel

Jutefibre	kg	0,8
PET-fibre	kg	0,32
Brandhæmmer ⁸	kg	0,4
Samlet vægt af panel	kg	4,4

Tabel 12 er anvendt i modellering af græsisoleringspanelet.

Fordelingen af materialer i græsisolering som løsfyld ser ud som følgende:

Tabel 13: Materialeliste for produktion af 1 kg græsisolering (løsfyld) (Woodfiber, 2022)

Græsisolering (løsfyld)		
Materialer	Enhed	Mængde
Pressekage fra bioraffinering af græs	kg	0,92
Ammonium sulfat (binder)	kg	0,05
Brandhæmmer	kg	0,03
Vand	kg	0,03
Samlet vægt af isolering	kg	1

1.5.1 Allokering af miljøpåvirkninger til græs

Der foretages ligeledes en økonomisk allokering for at belyse hvordan allokeringmetoden kan påvirke miljøpåvirkningen. (Khoshnevisan, Fog, Baladi, Chan, & Birkved, 2023) lister forskellige allokeringfaktorer for masse og økonomi, som fremgår af Tabel 14.

Tabel 14 Allokeringfaktorer til fordeling af miljøpåvirkninger i produktionen af kløvergræs protein (Khoshnevisan, Fog, Baladi, Chan, & Birkved, 2023).

Biprodukter	Masse allokering (%)	Økonomisk allokering (%)
Pressekage	38	19
Brunsaft	59	7
GPC	3	74

Tabel 14 illustrerer en stor forskel mellem masse og økonomi som allokeringfaktorer. Anvendes en økonomisk allokering tilskrives størstedelen af miljøpåvirkningerne (74%) græsprøteinet (GPC). Modsat vil den største andel af miljøpåvirkninger blive tilskrevet brunsaft ved masseallokering, trods det er GPC, som er hovedproduktet. Pressekagen lægger sig allokeringmæssigt i mellem GPC og brunsaften. Det ses, at der ved masseallokering også tilskrives en væsentlig del af miljøpåvirkninger (38%) til

⁸Det antages, at der indgår 10% brandhæmmer i isoleringspanelet. Dette er IKKE inkluderet i Gramitherms EPD.

pressekagen. I Tabel 54 og Tabel 56 ses resultaterne for græsisolering m. forskellige allokeringsscenerier.

Ved anvendelse af allokering tages der højde for græssets primære formål/anvendelse. Ved en økonomisk allokering på 19% forstås det, at græs' primære anvendelse er til proteinproduktion og at pressekagen dermed udgør en sidestrøm fra bioraffinering, som kan anvendes i isolering. Dette betyder, at 19% af miljøpåvirkningerne relateret til kultivering, høst og bioraffinering tilskrives pressekagen og dermed isoleringen. De resterende miljøpåvirkninger fra kultivering, høst og bioraffinering tilskrives hhv. brunsaften og græsproteinet.

For scenariet med vejsidegræs antages det, at græsset behandles i et biogasanlæg og dermed allokeres miljøpåvirkningerne mellem biogas og digestat (fibre). I (Gramitherm, 2023) allokeres der på baggrund af masse med 91% til fibrene og 9% til biogas. Samme allokeringsfaktorer benyttes til modellering af vejsidegræs. Scenariet med vejsidegræs er desuden modelleret med samme processer som bioraffinering. Dette betyder altså, at bioraffineringen benyttes, som en proxy for biogasanlægget. Dette vurderes som acceptabelt, da processen bidrager med under 5% til de samlede miljøpåvirkninger fra græsisoleringen.

For græsisoleringspanelet undersøges følgende scenarier:

1. Gramitherm EPD. Produktion i Belgien (BE). Høst af vejsidegræs. Masseallokering: 91%. Resultater direkte fra EPD.
2. Produktion i DK. Høst af vejsidegræs. Masseallokering: 91%.
3. Produktion i DK. Kultivering af græs. Økonomisk allokering: 19%. 100% kunstgødning til kultivering af græs.
4. Produktion i DK. Kultivering af græs. Økonomisk allokering: 19%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af græs.
5. Produktion i DK. Kultivering af græs. Økonomisk allokering: 38%. 100% kunstgødning til kultivering af græs.
6. Produktion i DK. Kultivering af græs. Økonomisk allokering: 38%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af græs.

For græsisolering som løsfyld undersøges scenarierne:

1. Produktion i DK. Kultivering af græs. Økonomisk allokering: 19%. 100% kunstgødning til kultivering af græs.
2. Produktion i DK. Kultivering af græs. Økonomisk allokering: 19%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af græs.
3. Produktion i DK. Kultivering af græs. Økonomisk allokering: 38%. 100% kunstgødning til kultivering af græs.
4. Produktion i DK. Kultivering af græs. Økonomisk allokering: 38%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af græs.

1.5.2 A1- Råmaterialer

I Tabel 15, Tabel 16, Tabel 17 og Tabel 18 ses LCI-data for hhv. kultivering af kløvergræs, høst af græs i vejrabatter, bioraffinering af kløvergræs og tørring af pressekage. Disse data er benyttet til modellering af det græs, som benyttes til produktion af græsisolering.

Data i Tabel 15 repræsenterer kultivering af 1 ha kløvergræs i DK. Som det var tilfældet for kultivering af halm, så er der benyttet landespecifikke datasæt for gødning (N, P og K). For de øvrige flows er der benyttet datasæt med global eller europæisk repræsentativitet. De benyttede datasæt findes i sektion 6.1.2 i appendiks. LCI-data i Tabel 16 repræsenterer høst af 1 ha græs i vejrabatter. Dette er medtaget som et scenarie, da EPDen fra Gramitherm (Gramitherm, 2023) benytter vejsidegræs. På denne måde fås et dansk scenarie for græsisolering produceret fra vejsidegræs. Input af diesel og smøreolie til høstning er baseret på samme kilde som for kløvergræskultiveringen (Parajuli, Kristensen, Knudsen, Mogensen, & Corona, 2017). Mængden af smøreolie kan ses som et konservativt estimat, da det i kilden repræsenterer hele arbejdet fra markkultivering til høst. Kultivering er der naturligvis ikke noget af, når der er tale om græs fra vejrabatter.

Tabel 15 LCI-data på kløvergræs kultivering (Parajuli, Kristensen, Knudsen, Mogensen, & Corona, 2017)

Flow				Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow						
Kløvergræs kultivering			Ha	1		
Inputs						
Frø			kg	8		
Kulstofoptag under vækst			kg C	-3382		(AU Agro, VtBB_ AU agro Udbyttmængder [Excel])
Gødning	N		kg	193		
	P			33		
	K			327		
Kalk			kg	84		
Pesticider			kg	0,03		
Smøreolie			kg	11		
Direkte primær energi (diesel)			MJ	3644		
Outputs						
Netto biomasse (tørstof)			T DM	7,71		
Udvaskning af N			kg	43,2		(Olsen, Larsen, & Jørgensen, IFRO Udredning, 2024) Gns. af sædskifte 6 i tabel 10 og 11
Udvaskning af P			kg	1,6		

Tabel 16 LCI data på høst af græs i vejrabatter (Parajuli, Kristensen, Knudsen, Mogensen, & Corona, 2017)

Flow				Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow						
Græs i vejrabat			Ha	1		Reference flow

Inputs			
Kulstofoptag under vækst	kg C	-3382	(AU Agro, VtBB_ AU agro Udbyttmængder [Excel])
Smøreolie	kg	11	
Direkte primær energi (diesel) til høst	MJ	2652	
Outputs			
Netto biomasse (tørstof)	T DM	7,71	

I Tabel 17 ses LCI-data til modellering af bioraffinering af kløvergræs. For elektricitet og naturgas benyttes landespecifikke datasæt. Vand, diesel og alkalisk rengøringsmiddel er modelleret med datasæt repræsentative for Europa, imens det syreholdige rengøringsmiddel modelleres med et datasæt repræsentativt for en produktion i Tyskland. Ifølge (Chan, et al., 2024) benyttes der også 0,03 kg 'anti-foam oil' per ton kløvergræs. Det har dog ikke været muligt at finde et repræsentativt datasæt i Sphera og Ecoinvent og derfor er dette flow udeladt af modelleringen. I sektion 6.1.2 i appendicet ses de benyttede datasæt.

Tabel 17 LCI data på bioraffinering af kløvergræs (Chan, et al., 2024)

Bioraffinering			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Kløvergræs	Ton	1	Reference flow
Inputs			
Syreholdigt rengøringsmiddel	kg	0,06	
Alkalisk rengøringsmiddel	kg	0,3	
Vand	kg	14,4	
Diesel	kg	1,7	
Naturgas	kg	1,6	
Elektricitet	kWh	11,9	
Outputs			
GPC	Ton	0,03	
Brunsaft	Ton	0,57	
Pressekage	Ton	0,37	

Tabel 18 viser varmebehovet for tørring af pressekagen. Varmeforbruget modelleres med et landespecifikt datasæt for varmeproduktion med naturgas. Se evt. sektion 6.1.2 i appendiks.

Tabel 18 LCI data for tørring af pressekage (Chan, et al., 2024), (Corona, Morten, Croxatto, Hauschild, & Birkved, 2018)

Tørring af pressekage			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Inputs			

Pressekage (tørstof 29%)	kg	1	
Drying heat	MJ/kg input	2,41	Mail fra AU Agro & Biological and Chemical Engineering ved AU ⁹
Outputs			
Pulp (tørstof 88%)	kg	0,33 kg	

Øvrige materialer til produktion af 1 m² græsisoleringspanel

I produktionen af græsisoleringspanelet benyttes jutefibre, som modelleres med et globalt datasæt for begge lande. PET-fibre modelleres for begge lande med det datasæt, som repræsenterer en produktion i Tyskland, hvilket anses som acceptabelt.

Øvrige materialer til produktion af 1 kg græsisolering som løsfyld

Til produktionen af græsisolering (løsfyld) benyttes der ammonium polyphosphat. Da det ikke har været muligt at finde et datasæt for produktionen af ammonium polyphosphat, er datasættet for en europæisk produktion af ammonium sulfat valgt som en proxy.

Brandhæmmer er modelleret med en EPD fra Burnblock ApS (Burnblock ApS, 2023), som repræsenterer en produktion i Polen.

I sektion 6.1.2 kan alle de benyttede datasæt til modelleringen af græsisolering findes.

1.5.3 A2 - Transport

I Tabel 19 findes distancerne benyttet til modellering af modul A2 i Gramitherms EPD samt produktion i DK af græsisoleringspaneler. I Tabel 20 findes transportdistancer for materialer benyttet i græsisolering som løsfyld. For produktionen af græsisolering (både panel og løsfyld) i et dansk scenarie antages pressekagen at have en transportdistance på 100 km. Argumentet for dette er, at produktionsfaciliteten for græsisolering forventes at blive placeret relativt tæt på bioraffineriet for derved at minimere transportomkostninger samt begrænse klimaaftrykket. For jutefibre og PET-fibre antages en transportdistance på 250 km, hvilket er konservativt sammenlignet med produktionen i BE. For ammonium sulfat benyttet i løsfyld antages en transport distance på 250 km, imens der for brandhæmmeren antages en distance på 1100 km fra produktionsstedet i Polen til Aarhus, Danmark.

Tabel 19: Landespecifikke transportdistancer for materialer til græsisoleringspanelet

Flow	BE, baseline			DK		
	Distance (km)	Transportmiddel	Reference	Distance (km)	Transportmiddel	Reference
Pressekage	110	28-32 t truck	(Gramitherm, 2023)	100	28-32 t, Truck	Antagelse
Jutefibre	125	28-32 t truck		250	28-32 t, Truck	Antagelse

⁹ Tommelfingerregel siger 3,6 MJ/kg vand fordampet. Obs på at energiforbruget i tabellen er angivet per kg input.

PET fibre	190	12 t truck		250	12 t truck	
Brandhæmmer	-	-	(Woodfiber, 2022)	1100	26-28 t truck	Antager transport fra Bydgoszcz (PL) til Aarhus (DK) jf. (Burnblock ApS, 2023)

Tabel 20: Transportdistancer for materialer til græsisolering som løsfyld

Råmateriale	Distance (km)	Transportmiddel	Reference
Pressekage	100	28-32 t, truck	Antagelse
Ammonium sulfat	250	26-28 t truck	Antagelse
Brandhæmmer	1100	26-28 t truck	Antager transport fra Bydgoszcz (PL) til Aarhus jf. (Burnblock ApS, 2023)

1.5.4 A3 - Fremstilling

Tabel 21 viser LCI-data for produktionen af 1 m² græsisoleringspanel jf. (Gramitherm, 2023).

1 m² græsisoleringspanel

For elektricitet benyttes landespecifikke datasæt for forbrugsmix imens, at der for vand benyttes en proces med europæisk repræsentativitet.

Tabel 21: LCI for produktion af 1 m² græsisoleringspanel

Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Græsisoleringspanel	m ²	1	
Inputs			
Pressekage fra bioraffinering af græs	kg	2,88	
Jutefibre	kg	0,8	
PET-fibre	kg	0,32	
Brandhæmmer	kg	0,4	
Vand	kg	0,48	
Elektricitet	kWh	2,08	
Outputs			
Græsisolering	m ²	1	Vægt: 4,4 kg

I resultat afsnittet bestemmes GWP per kg græsisoleringspanel jf. formål og afgrænsning af nærværende projekt (Afsnit 3). 1m² græsisoleringspanel vejer 4,4 kg.

1 kg græsisolering som løsfyld

I Tabel 22 ses input til produktionen af 1 kg græsisolering som løsfyld. For elektricitet benyttes landespecifikke datasæt for forbrugsmix imens, at der for vand benyttes en proces med europæisk repræsentativitet.

Tabel 22: LCI for **produktion af 1 kg græsisolering (løsfyld)**

Produktion af græsisolering (løsfyld)			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Græsisolering (løsfyld)	kg	1	Reference flow
Inputs			
Pulp fra bioraffinering af græs	kg	0,92	
Ammonium sulfat (binder)	kg	0,05	
Brandhæmmer	kg	0,03	
Vand	kg	0,03	
Elektricitet	kWh	0,99	
Outputs			
Græsisolering (løsfyld)	kg	1	

1.6 Hamp

Hamp er en hurtigvoksende etårig afgrøde, hvor der skelnes mellem to overordnede kategorier i sorterne ift. deres anvendelse som hhv. frøhamp og fiberhamp. Fiberhamp besidder stort potentiale for anvendelse i isoleringsprodukter, da udbyttet er relativt højt hvor frøhamp primært anvendes til fødevareproduktion. I 2017 lå de officielle udbytter for fiberhamp på mellem 7,35 og 8,10 t/ha i Holland, Frankrig og Polen (Jørgensen, Boelt, & Kristensen, 2020). I DK er der i kultiveringsforsøg blevet påvist et gennemsnitligt udbytte på 10 t TS/ha (Dansk Landbrugsrådgivning, 2009) og en fordeling på 53% skæver, 22% fibre og 25% rest på mark (Jørgensen, Boelt, & Kristensen, 2020).

Hamp er en robust afgrøde med en høj tolerance for fluktuationer i nedbørsmængder, samt et lavt behov for pesticider, da hampen fortrænger ukrudt i markerne pga. sin hurtige vækst og store dække.

I følgende afsnit ses der på produktionen af et hampisoleringspanel og hampisolering som løsfyld.

Til modellering af modul A1 til A3 for hampisolering anvendes information fra flere kilder, som løbende citeres nedenfor.

De deklarerede enheder ser ud som nedenstående. Isoleringspanelet er baseret på Ekolutions EPD (Ekolution AB, 2024) og hampisolering som løsfyld baseres på de mængdemængder som angives for træfiberisolering (Woodfiber, 2022).

- 1 m² hamp isoleringspanel med en vægt på 3,5 kg og tykkelse på 100 mm. $U=0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$
- 1 kg hampisolering som løsfyld. Ukendt densitet.

Jf. (Ekolution AB, 2024) er fordelingen af materialer i isoleringspanelet følgende:

Tabel 23: Materialeliste for **produktion af 1 m² hampisoleringspanel**

Materialer	Hampisoleringspanel Enheden	Mængde
Hampefibre	kg	3,05
Polyesterfibre	kg	0,35
Brandhæmmer	kg	0,11
Samlet vægt af panel	kg	3,5

Fordelingen af materialer i hampisolering som løsfyld ser ud som nedenstående:

Tabel 24: Materialeliste for **produktion af 1 kg hampisolering (løsfyld)**

Materialer	Hampisolering (løsfyld) Enheden	Mængde
Hampefibre	kg	0,92
Ammonium sulfat (binder)	kg	0,05
Brandhæmmer	kg	0,02
Samlet vægt af panel	kg	1

1.6.1 Allokering af miljøpåvirkninger til hamp

Med udgangspunkt i Zampori et al. (2013) og (Jørgensen, Boelt, & Kristensen, 2020) er der opstillet følgende allokeringfaktorer for masse og økonomi. Som det fremgår af Tabel 25 udgør fibre mere end 25% af den samlede værdi og derfor må man jf. EN 15804 gerne allokere på baggrund af økonomi.

Tabel 25 Allokeringfaktorer til fordeling af miljøpåvirkninger i produktionen af hampefibre

Hampfraktioner	Masse allokering (%)	Økonomisk allokering (%)
Skæver	53%	50%
Fibre	22%	50%
Rest på mark	25%	0%

For hampisoleringenspanelet undersøges følgende scenarier:

1. Ekolution EPD. Produktion i Tjekkiet (CZ). Ingen allokering.
2. Produktion i DK. Økonomisk allokering: 50%. 100% kunstgødning til kultivering af fiberhamp.
3. Produktion i DK. Økonomisk allokering: 50%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af fiberhamp.
4. Produktion i DK. Masseallokering: 22%. 100% kunstgødning til kultivering af fiberhamp.
5. Produktion i DK. Masseallokering: 22%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af fiberhamp.

For hampisolering som løsfyld undersøges følgende scenarier:

1. Produktion i DK. Økonomisk allokering: 50%. 100% kunstgødning til kultivering af fiberhamp.
2. Produktion i DK. Økonomisk allokering: 50%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af fiberhamp.
3. Produktion i DK. Masseallokering: 22%. 100% kunstgødning til kultivering af fiberhamp.
4. Produktion i DK. Masseallokering: 22%. 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning til kultivering af fiberhamp.

1.6.2 A1 - Råmaterialer

Til modellering af hampkultivering tages der udgangspunkt i et studie fra Italien (Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013), som er tilpasset ift. at repræsentere et dansk scenarie. I Tabel 26 ses LCI-data for kultivering af hamp.

Tabel 26: LCI for kultivering af 1 ha fiberhamp

Kultivering			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Hamp kultivering	Ha	1	
Inputs			
Frø	kg	50	(Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013)

Kulstofoptag under vækst		Kg C	-4454	(Vosper)
Gødning	N	Kg	91,7	(Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013)
	P		40,5	
	K		105	
Vand		Kg	250060	(Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013) ¹⁰
Direkte primær energi (diesel)		MJ	4245	(Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013), (Agrotech, 2009) & Institut for Elektro- og Computerteknologi på AU ¹¹
Outputs				
Hamp til videre forarbejdning (tørstof)		Ton TS	7,5	(Landbrugsrådgivning, 2009), (Jørgensen, Boelt, & Kristensen, 2020)
Hamprester på mark (tørstof)			2,5	
Udvaskning af N		kg	47	(De Notaris, Rasmussen, Sørensen, & Olesen, 2018)
Udvaskning af P		kg	-	

Efter at hampen er høstet udvindes fibrene via en skætningsproces. LCI-data for denne proces baseres også på det italienske studie (Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013). Fraktionsopdeling af hhv. skæver og repræsenterer et dansk scenarie. I Tabel 27 nedenfor ses energiforbruget til skætning.

Tabel 27 LCI-data på skætning af hamp

Skætning			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Hamp	Ton TS	7,5	
Inputs			
Diesel til maskiner	MJ	6886	(Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013)
Outputs			
Skæver (tørstof)	Ton TS	5,30	

¹⁰ Vandforbrug modificeret til dansk scenarie ved en skalering på baggrund af danske nedbørsmængder i vækstsæsonen

¹¹ samarbejde med AU er energiforbruget for markprocesserne; høst, pløjning, harvning, ballepresning blevet modificeret til danske forhold.

Fibre (tørstof)		2,20	(Landbrugsrådgivning, 2009), (Jørgensen, Boelt, & Kristensen, 2020)
-----------------	--	------	---

Input af frø og diesel er modelleret med et globalt datasæt, imens vandforbruget modelleres med et datasæt med europæisk repræsentativitet. Input af gødning er modelleret med datasæt, som repræsenterer et dansk scenarie.

Som angivet i Tabel 23 og Tabel 24, benyttes der polyesterfibre og brandhæmmer i produktionen af hampisoleringspanelet. Polyesterfibre er modelleret med et datasæt for PET-fiberproduktion og har tysk repræsentativitet. Brandhæmmer er modelleret med en EPD fra Burnblock ApS (Burnblock ApS, 2023), som repræsenterer en produktion i Polen. Ammonium sulfat er modelleret med et datasæt, som har europæisk repræsentativitet. De benyttede datasæt kan ses i sektion 6.1.3.

1.6.3 A2 – Transport

Transportafstande er baseret på antagelser, da kultivering af hamp samt produktion af hampisolering endnu ikke er implementeret i DK. Transporten af hampefibre antages konservativt til 100 km. For transport af brandhæmmer antages der transport fra produktionsstedet i Polen. For ammonium sulfat i hampisolering (løsfyld) antages samme distance som i (Woodfiber, 2022). Transportafstande kan ses i Tabel 28 og Tabel 29.

Tabel 28: Transportafstande for materialer til **produktion af hampisoleringspanel**

Flow	Distance (km)	Transportmiddel	Reference
Hampefibre	100	28-32 t, Truck	Antagelse
Polyesterfibre	250	26-28 t, Truck	Antagelse
Brandhæmmer	1100	26-28 t, Truck	Antager transport fra Bydgoszcz (PL) til Aarhus jf. (Burnblock ApS, 2023)

Tabel 29: Transportafstande for materialer til produktion af hampisolering (løsfyld)

Flow	Distance (km)	Transportmiddel	Reference
Hampefibre	100	28-32 t, Truck	Antagelse
Ammonium sulfat	501	26-28 t, Truck	(Woodfiber, 2022)
Brandhæmmer	1100	26-28 t, Truck	Antager transport fra Bydgoszcz (PL) til Aarhus jf. (Burnblock ApS, 2023)

1.6.4 A3 – Fremstilling

Tabel 30 viser LCI-data for produktionen af 1 m² hampisoleringspanel. Materiale-mængder er bestemt med udgangspunkt i Ekolutions EPD (Ekolution AB, 2024) for et hampisoleringspanel produceret i CZ. Energi- og vandforbrug er baseret på det italienske studie (Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013). Fra (Ekolution AB, 2024) kan det udledes, at produktionen kun benytter sig af elektricitet, men ikke i hvilke mængder. I (Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013) angives det, at produktionen både har et el- og

varmeforbrug. Med disse to observationer in mente er det valgt at modellere produktionen alene med det el-forbrug, som angives i (Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013). Grundet usikkerhed omkring energiforbruget er det fordoblet ift. det som er angivet i (Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013). Derved fås et mere konservativt estimat.

Tabel 30: LCI-data for **produktion af 1 m2 hampisoleringspanel**

Produktion af hampisoleringspanel			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Hampisoleringspanel	m2	1	
Inputs			
Hampefibre	kg	3,05	(Ekolution AB, 2024)
Polyesterfibre	kg	0,35	
Brandhæmmer	kg	0,11	
Elektricitet (Blanding af fibre)	kWh	0,013	(Zampori, Dotelli, & Vernelli, 2013)
Vandforbrug (Blanding af fibre)	kg	0,003045	
Elektricitet (Panelproduktion)	kWh	1,12	
Outputs			
Hampisoleringspanel	m2	1	Vægt på 3,5 kg

Tabel 31 viser LCI-data for produktionen af hampisolering som løsfyld. Materiale- og energiinput følger det, som er angivet i (Woodfiber, 2022).

Tabel 31: LCI-data for **produktion af 1 kg hampisolering (løsfyld)**

Produktion af hampisolering (løsfyld)			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Hampisolering (løsfyld)	kg	1	
Inputs			
Hampefibre	kg	0,92	Mængder baseret på (Woodfiber, 2022)
Ammonium sulfat	kg	0,05	
Brandhæmmer	kg	0,02	
Vandforbrug	kg	0,03	
Elektricitet	kWh	0,99	

Outputs			
Hampisolering (løsfyld)	kg	1	

For både isoleringspanel og løsfyldisolering modelleres elektricitet med et datasæt på det danske forbrugsmix og vand modelleres med et europæisk datasæt. De benyttede datasæt kan ses i sektion 6.1.3.

I resultatafsnittet bestemmes GWP per kg hampisoleringspanel j.f. formål og afgrænsning af nærværende projekt (Afsnit 3). 1m² hampisoleringspanel vejer 3,5 kg.

1.7 Træfiberisolering

Resttræ fra skovningsprocesser og afskær fra savværker kan benyttes som råmateriale for produktionen af træfiberisolering. I produktionen af træfiber benyttes resttræ, som forarbejdes til en træfiberpulp. Pulpen makuleres og opblandes med flammehæmmer samt støvbinder, hvorefter den er klar til brug som et alternativ til konventionelle isoleringsmaterialer (Woodfiber, 2022).

Til modellering af træfiberisoleringen anvendes data fra (Woodfiber, 2022).

Den deklarerede enhed er heri:

- 1 kg træfiberisolering
- Densitet: 26-43 kg/m³

Jf. (Woodfiber, 2022) er fordelingen af materialer som følgende:

Tabel 32: Materialeliste for produktion af 1 kg træfiberisolering (Woodfiber, 2022)

Træfiberisolering		
Materialer	Enhed	Mængde
Træpulp	Kg	0,92
Ammonium sulfat	Kg	0,05
Brandhæmmer	Kg	0,03
Vand	Kg	0,03

For træfiberisoleringen undersøges følgende scenarier:

1. Woodfiber EPD. Produktion i Sverige (SE). Ingen allokering. Resultater tages direkte fra EPD.
2. Produktion i DK. Økonomisk allokering: 16%.
3. Produktion i DK. Masseallokering: 29%.

1.7.1 Allokering af miljøpåvirkninger til træfiber

I Woodfibers EPD oplyses det, at den træpulp der anvendes til isoleringsmateriale betragtes som affaldstræ, hvorfor der ingen miljøpåvirkninger tilskrives denne ressource.

Processer i modul A1 omfatter kulturetablering, hugst af træ og processering af træ på savværk. Miljøpåvirkningerne fra disse processer er estimeret på baggrund af data fra (Nord-Larsen & Thybring, 2024) og (Erlandsson, 2022). Allokering af miljøpåvirkninger til celluloseflis, er bestemt ud fra data på svenske savværker præsenteret i (Erlandsson, 2022). Det er valgt at benytte den svenske kilde, da det ikke har været muligt at finde lignende data for danske savværker. Desuden benyttes de samme allokeringsfaktorer for både kulturetablering, hugst og savværk. Dette skyldes, at det ikke har været muligt at finde allokeringsfaktorer specifikt for kulturetablering og hugst. Allokeringsnøglerne kan ses i Tabel 33.

Tabel 33: Allokeringssnøgle til miljøpåvirkninger for kulturetablering af skov, hugst og energiforbrug på savværk

Produkter fra savværk	Masseallokering	Økonomisk allokering	Kilde
Savet træ	47%	63%	(Erlandsson, 2022)
Celluloseflis	29%	16%	
Spåner	14%	11%	
Bark	10%	11%	

1.7.2 A1 - Råmaterialer

Kulturetablering og hugst af træ inklusive transport til savværk modelleres med udgangspunkt i data fra (Nord-Larsen & Thybring, 2024). LCI-data kan ses i Tabel 34, Tabel 35 og Tabel 36 nedenfor. Klimapåvirkning for kulturetablering, hugst og transport er allokeres til celluloseflis på baggrund af oplysningerne i Tabel 33.

Tabel 34: LCI-data for etablering af 1 ha rødgranbevoksning

Kulturetablering			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Kulturetablering (rødgran)	Ha	1	
Inputs/udledninger			
Jordbearbejdning	kg CO2-eq	85	(Nord-Larsen & Thybring, 2024)
Plantning	kg CO2-eq	163	
Kulturpleje	kg CO2-eq	3	
Kulstofoptag under vækst	kg C	92864	
Outputs			
Træ	m3	420	(Nord-Larsen & Thybring, 2024)

Tabel 35: LCI-data for hugst af 1 m3 træ

Hugst			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Træ	m3	1	
Inputs/udledninger			
Tynding	kg CO2-eq	4,6	(Nord-Larsen & Thybring, 2024)
Udkørsel	kg CO2-eq	2,7	
Flishugning	kg CO2-eq	4,2	
Outputs			
Træ	m3	1	

Tabel 36: LCI-data for transport af træ fra skov til savværk

Transport til savværk			
Flow	Distance (km)	Transportmiddel	Reference
Træ	50 km	28-32 t, Truck	(Nord-Larsen & Thybring, 2024)

Det primære input til træfiberisoleringen er træpulp. Træpulp er blevet modelleret i *LCA for Experts*, som afskær i form af celluloseflis fra et savværk. Tabel 37 viser energiforbrug på savværket allokeret hhv. med masse og økonomi til celluloseflis på baggrund af oplysninger i Tabel 33. Elektricitet benyttet på savværket modelleres med et datasæt for dansk elektricitet (forbrugsmix). Dieselforbruget modelleres med et globalt datasæt for diesel benyttet i maskiner. Varmeproduktionen modelleres med et dansk datasæt, som repræsenterer varmeproduktion fra afbrænding af naturgas.

Indholdet/optagelsen af biogent kulstof i celluloseflisen er modelleret med værdien $-1,61 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ celluloseflis. Det antages desuden, jf. kravene i EN 15804:2012 + A2:2019 at træet er dyrket og høstet i henhold til Kyotoprotokollens artikel 3.4 eller besidder en tredjeparts bæredygtigheds-certificering.

Det antages, at celluloseflisen har en densitet på 384 kg/m^3 . Dette benyttes til konvertering fra m^3 til kg, da produktionen af træfiberisolering har et masseinput af træpulp.

Tabel 37: LCI-data for energiforbrug på savværk allokeret på baggrund af hhv. masse og økonomi til celluloseflis

Savværk				
Flow	Enhed	Mængde		LCI-data
Reference flow				
Celluloseflis	m ³	1		
Inputs/udledninger				
		Økonomisk allokering	Masseallokering	
Brændsel til varme	kWh	45,0	82,7	(Erlandsson, 2022)
Elektricitet	kWh	10,3	18,9	
Diesel til maskiner	kWh	2,5	4,6	
Outputs				

Celluloseflis	m3	1
---------------	----	---

Ammonium sulfat modelleres med et datasæt, som repræsenterer en europæisk produktion af ammonium sulfat. Brandhæmmer modelleres ved brug af en EPD fra Burnblock (Burnblock ApS, 2023), som produceres i Polen. I sektion 6.1.3 kan alle de benyttede datasæt til modelleringen i modul A1 findes.

1.7.3 A2 - Transport

I Tabel 38 ses transportdistancerne for træflis, ammonium sulfat og brandhæmmer til produktionsstedet i DK. For ammonium sulfat antages samme distance som i (Woodfiber, 2022) . For træpulp sættes distancen til 50 km med antagelsen om, at en produktionsfacilitet til træfiberisolering vil blive placeret relativt tæt på et savværk. For brandhæmmer antages en transport distance fra produktionsstedet i Polen til Aarhus.

Tabel 38: Transportafstande for materialer til **produktion af træfiberisolering**

Flow	DK		
	Distance (km)	Transportmiddel	Reference
Træflis/Træpulp	50	26-28 t, Truck	Antagelse
Ammonium sulfat	501	26-28 t, Truck	(Woodfiber, 2022)
Flammehæmmer	1100	26-28 t, Truck	Fra produktionssted for Burnblock til Aarhus

1.7.4 A3 - Fremstilling

Tabel 39 angiver LCI-data for produktionen af 1 kg træfiberisolering. Vandforbruget modelleres med et datasæt repræsentativt for Europa. Elektriciteten er modelleret med et datasæt, som repræsenterer det danske forbrugsmix. I sektion 6.1.3 kan de benyttede datasæt til modelleringen ses.

Tabel 39: LCI for **produktion af 1 kg træfiberisolering**

Produktion af træfiberisolering			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Træfiberisolering	kg	1	Reference flow
Inputs			
Træpulp	kg	0,92	
Ammonium sulfat	kg	0,05	
Brandhæmmer	kg	0,02	
Vand	kg	0,03	
Elektricitet	kWh	0,99	

Outputs			
Træfiberisolering	kg	1	

1.8 Konstruktionstræ

Konstruktionstræ er et udbredt materiale benyttet i dansk byggeri. I 2020 blev det estimeret, at træbyggeri udgjorde 9% af det samlede danske byggeri og 11% af boligbyggeriet. Disse estimater inkluderede kun træ i bærende konstruktioner (Rambøll Management Consulting, 2021). Andelene må forventes at stige, da træbyggeri anses som en af nøglerne til effektivt at reducere byggesektorens klimabelastning med et forventet reduktionsbidrag på 14,5% ud af den danske målsætning på 70% reduktion frem mod 2030 (Rambøll Management Consulting, 2021). Omtrent 15% af det danske areal udgøres til skov (Einfeldt, u.d.). Dette er en af forklaringerne på, at 82% af træ i eksisterende byggeri stammer fra import fra især Sverige, Tyskland og Finland (Rambøll Management Consulting, 2021), (Dansk Skovforening, 2022). Til trods for den begrænsede udbredelse af skovarealer i Danmark undersøges scenarier for produktionen af konstruktionstræ med råtræ fra dansk skov. Disse scenarier vil dog have mindre relevans, da der forventeligt vil være en naturlig begrænsning på, hvor meget træ man kan få fra danske skove.

Til modellering af miljøpåvirkninger ved anvendelse af konstruktionstræ, tages der udgangspunkt i en eksisterende EPD for konstruktionstræ (Palsgaard Spær A/S, 2023).

Den deklarerede enhed er som følgende:

- 1 m³ konstruktionstræ
- Densitet: 490 kg/m³

I (Palsgaard Spær A/S, 2023) benyttes der baggrundsdata fra *LCA for Experts* database version 2021.2 og en EPD for svensk råtræ. Produktionen i modul A3 inkluderer opskæring af træet, hvorefter det samles, bundtes og klargøres til levering.

1.8.1 Allokering af miljøpåvirkninger til træ

Processer i modul A1 omfatter kulturetablering og hugst af træ. Miljøpåvirkningerne fra disse processer er estimeret på baggrund af data fra (Nord-Larsen & Thybring, 2024). Allokering af miljøpåvirkninger til konstruktionstræ er bestemt på baggrund af data fra svenske savværker (Erlandsson, 2022). Allokeringsnøglerne kan ses i Tabel 40.

Tabel 40: Allokeringsnøgle til miljøpåvirkninger for kulturetablering af skov og hugst

Produkter fra savværk	Masseallokering	Økonomisk allokering	Kilde
Savet træ	47%	63%	(Erlandsson, 2022)
Flis	29%	16%	
Spåner	14%	11%	
Bark	10%	11%	

1.8.2 A1 – Råmaterialer

I Tabel 41 og Tabel 42 ses LCI-data relateret til skovprocesser. Denne data baseres på information fra (Nord-Larsen & Thybring, 2024).

Jf. (Nord-Larsen & Thybring, 2024) modelleres kulstofoptag i træet til 0,47 kg C/kg biomasse, hvilket kan omregnes til 1,72 kg CO₂-eq/kg biomasse. Det antages desuden, jf. kravene i EN 15804:2012 + A2:2019 at træet er dyrket og høstet i henhold til Kyotoprotokollens artikel 3.4 eller besidder en tredjeparts bæredygtighedscertificering.

Tabel 41: LCI-data for kulturetablering af rødgran

Kulturetablering			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Kulturetablering (rødgran)	Ha	1	Reference flow
Inputs/udledninger			
Jordbearbejdning	kg CO ₂ -eq	85	(Nord-Larsen & Thybring, 2024)
Plantning	kg CO ₂ -eq	163	
Kulturpleje	kg CO ₂ -eq	3	
Kulstofoptag under vækst	kg C	92778 ¹²	
Outputs			
Træ	m ³	420	(Nord-Larsen & Thybring, 2024) Antages en densitet på 470 kg/m ³

Tabel 42: LCI-data for hugst af træ

Hugst			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Træ	m ³	1	Reference flow
Inputs/udledninger			
Tynding	kg CO ₂ -eq	4,6	(Nord-Larsen & Thybring, 2024)
Udkørsel	kg CO ₂ -eq	2,7	
Flishugning	kg CO ₂ -eq	4,2	

¹² 420 m³ * 470 kg/m³ * 0,47 = 92778 kg C

Outputs			
Træ	m3	1	

1.8.3 A2 – Transport

I Tabel 43 ses transportdistancer for råtræet. Distancen angivet i (Palsgaard Spær A/S, 2023) baseres på en gennemsnitlig distance fra Sverige til forskellige produktionslokationer i DK. For det modelle-rede scenarie med træ fra dansk skov benyttes distancen på 50 km, som angivet i (Nord-Larsen & Thybring, 2024).

Tabel 43: Transportdistancer for råtræ til savværk

Flow	Palsgaard Spær EPD			DK		
	Distance (km)	Transport-middel	Reference	Distance (km)	Transportmiddel	Reference
Træ	567	27 t, Truck	(Palsgaard Spær A/S, 2023)	50 km	28-32 t, Truck	(Nord-Larsen & Thybring, 2024)

1.8.4 A3 – Fremstilling

Energiforbrug til processering af råtræ til konstruktionstræ er estimeret på baggrund af LCA-rapporten for EPDen fra Palsgaard Spær (Palsgaard Spær A/S, 2023). Herudover er der tilføjet et ekstra var-meforbrug, da EPDen fra Palsgaard Spær benytter sig af svensk råtræ, som har gennemgået en tør-ringsproces inden det ender på de danske savværker. Varmeforbruget er estimeret på baggrund af data fra en anden producent og kan derfor ikke nævnes i denne rapport. LCI-data for fremstilling af konstruktionstræ kan ses i Tabel 44.

Tabel 44: LCI-data for fremstilling af konstruktionstræ

Fremstilling af konstruktionstræ			
Flow	Enhed	Mængde	LCI-data
Reference flow			
Træ	m3	1	Reference flow
Inputs/udledninger			
Elforbrug	kWh	42	Baggrundsrapport for Palsgaard Spær EPD på konstruktionstræ (Palsgaard Spær A/S, 2023)
Naturgas til varme	kWh	144 ¹³	
Diesel til maskiner	MJ	32	
LPG gas til trucks	kg	0,19	
Outputs			
Konstruktionstræ	m3	1	

¹³ Her er der tilføjet et ekstra varmemeforbrug ift. data i baggrundsrapporten for Palsgaard Spær EPDen.

Elektricitet og varme modelleres med datasæt for hhv. det danske forbrugsmix af el og dansk produceret varme fra naturgas. Diesel til maskiner modelleres med et globalt datasæt og LPG-gas med et europæisk datasæt. De benyttede datasæt fremgår af 6.1 i appendiks.

1.9 Oversigt over modellerede scenarier

Tabel 45 Oversigt over undersøgte scenarier

Byggemateriale	EPD eller modellering i LCA for Experts	Geografi	Allokerings-type	Allokering til produkt (%)	Oprindelse af biogen ressource	Gødningstype til kultivering
Halmpanel	EcoCocon EPD	Litauen	Økonomisk	10,00%	Kultivering af halm	
	Modellering	Litauen	Økonomisk	10,00%	Kultivering af halm	100% kunstgødning
	Modellering	Slovakiet	Økonomisk	10,00%	Kultivering af halm	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Økonomisk	10,00%	Kultivering af halm	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Økonomisk	10,00%	Kultivering af halm	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
	Modellering	Danmark	Økonomisk	30,00%	Kultivering af halm	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Økonomisk	30,00%	Kultivering af halm	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
	Modellering	Danmark	Masse	36,00%	Kultivering af halm	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Masse	36,00%	Kultivering af halm	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
Græsisoleringspanel	Gramitherm EPD	Belgien	Masse	91,00%	Vejsidegræs	
	Modellering	Danmark	Masse	91,00%	Vejsidegræs	
	Modellering	Danmark	Økonomi	19,00%	Kultivering af græs	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Økonomi	19,00%	Kultivering af græs	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
	Modellering	Danmark	Masse	38,00%	Kultivering af græs	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Masse	38,00%	Kultivering af græs	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
Græsisolering (løsfyld)	Modellering	Danmark	Økonomi	19,00%	Kultivering af græs	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Økonomi	19,00%	Kultivering af græs	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning

	Modellering	Danmark	Masse	38,00%	Kultivering af græs	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Masse	38,00%	Kultivering af græs	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
Hampisoleringspanel	Ekolution EPD	Tjekkiet	Ingen	Ingen	Kultivering af hamp	
	Modellering	Danmark	Økonomi	50,00%	Kultivering af fiberhamp	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Økonomi	50,00%	Kultivering af fiberhamp	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
	Modellering	Danmark	Masse	22,00%	Kultivering af fiberhamp	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Masse	22,00%	Kultivering af fiberhamp	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
Hampisolering (løsfyld)	Modellering	Danmark	Økonomi	50,00%	Kultivering af fiberhamp	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Økonomi	50,00%	Kultivering af fiberhamp	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
	Modellering	Danmark	Masse	22,00%	Kultivering af fiberhamp	100% kunstgødning
	Modellering	Danmark	Masse	22,00%	Kultivering af fiberhamp	50%/50% kunstgødning/husdyrgødning
Træfiberisolering	Woodfiber EPD	Sverige	Ingen	Ingen	Skov i Sverige	
	Modellering	Danmark	Økonomisk	16,00%	Skov i Danmark	
	Modellering	Danmark	Masse	29,00%	Skov i Danmark	
Konstruktionstræ	Palsgaard Spær EPD	Træ fra Sverige, produktion i Danmark			Skov i Sverige	
	Modellering	Danmark	Økonomisk	63%	Skov i Danmark	
	Modellering	Danmark	Masse	47%	Skov i Danmark	

1.10 Transport fra produktion til byggeplads (A4)

For biobaserede byggevarer med lavt klimaaftryk vil transport over længere afstand have en ikke uvæsentlig betydning for byggevarens samlede klimabelastning.

I nærværende afsnit belyses effekten af transport fra produktionssted til byggeplads (A4) for byggevarens klimaaftryk. For transportresultater er der taget udgangspunkt i et dansk scenarie med den mest realistiske allokeringemetode, for at kunne anskueliggøre hvordan et fremtidigt produktions-scenarie kunne se ud.

Der er i analysen fokuseret på isoleringsprodukter. Dette skyldes dels, at der her ses et stort potentiale i en dansk produktion med danske afgrøder samt at der på grund af materialets forholdsvis lave vægt ses at transport ikke er uvæsentlig.

For at tage højde for isoleringsmaterialernes forskellige isoleringsevne opgøres resultaterne med funktionsenheden $R=1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, svarende til at der skal anvendes en isoleringsmængde til at opnå en isolans på $1 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. Det betyder at der for generisk mineraluld med en varmeledningsevne på $0,034 \text{ W}/\text{mK}$ anvendes $0,034 \text{ m}^3/\text{m}^2$, mens der for halm med en varmeledningsevne anvendes $0,056 \text{ m}^3/\text{m}^2$. For Ecococon-elementet som produceres i Litauen er det kun halm-isolerings bidrag til transporten der er medtaget i analysen.

Tabel 46: Forudsætninger for materialeanvendelse og funktionelenhed.

Isoleringstype	Varmeledningsevne [W/mK]	Densitet [kg/m ³]	Materialeanvendelse [kg pr. R=1 m ² K/W]
Generisk mineraluld Transport DK	0,034	50	1,70
Mineraluld (Rockwool Flexibatt 34 inkl. GO) Transport DK	0,034	37	1,26
Mineraluld (Rockwool Flexibatt 34 ekskl. GO) Transport DK	0,034	37	1,26
Græsisolering, panel (Gramitherm) Transport BE	0,041	40	1,64
Hampisolering, panel (Ekolution) Transport BE	0,041	35	1,44
Halm (Ecococon) Transport LT	0,056	110	6,16
Halm DK Transport DK	0,056	110	6,16
Græsisolering, panel DK Transport DK	0,041	40	1,64
Græsisolering, løsfyld DK Transport DK	0,041	40	1,64
Hampisolering, panel DK Transport DK	0,041	35	1,44
Hampisolering, løsfyld,DK Transport DK	0,042	40	1,68
Træfiberisolering, løsfyld DK Transport DK	0,036	43	1,55

Træfiberisolering, løsfyld (Woodfiber)			
Transport SE	0,036	43	1,55

For alle præsenterede resultater er påvirkninger fra transport fra produktion til byggeplads, modul A4, antaget en byggeplads i Aarhus, Danmark. Produktionen af byggevarer varierer jf. oprindelsesland for de anvendte EPDer. Ved scenarier med forudsat produktion i Danmark er der regnet med 100 km transport.

For udledning ved transport er forudsat lastbiltransport (diesel). Udledningstal er baseret på BUILD rapport 2023-14, hvor den totale klimapåvirkning er et gennemsnit af transportmidlets energiforbrug per transporteret ton fragt inklusive tomgang, tomkørsel og returkørsel. Udledningen gradueres efter udnyttelse af lastbilens maksimal kapacitet.

Tabel 47: Klimapåvirkning ved lastbiltransport (BUILD 2023-14).

Transportmiddel	GWP [kg CO2/ton pr. km]
Lastbil 3,5-7,5 t	0,370
Lastbil 7,5-20 t	0,200
Lastbil >20 t	0,092

Der er forudsat, at lastbilen kører med to gardintrailere med en samlet volumenkapacitet på 182 m³ (2 x 91 m³).¹⁴ Voluminet udnyttes 90%. Og der antages, at isoleringsprodukterne komprimeres til den densitet, de har, når isoleringen anvendes i byggeriet.

¹⁴ <https://www.dsv.com/da-dk/loesninger/transport/vejtransport/dimensioner-trailere/gardintrailer>



Figur 13: Transport af biobaseret isolering.

Tabel 48: Forudsat indhold i lastbil ved forskellige isoleringsprodukter, samt deres respektive transportafstande.

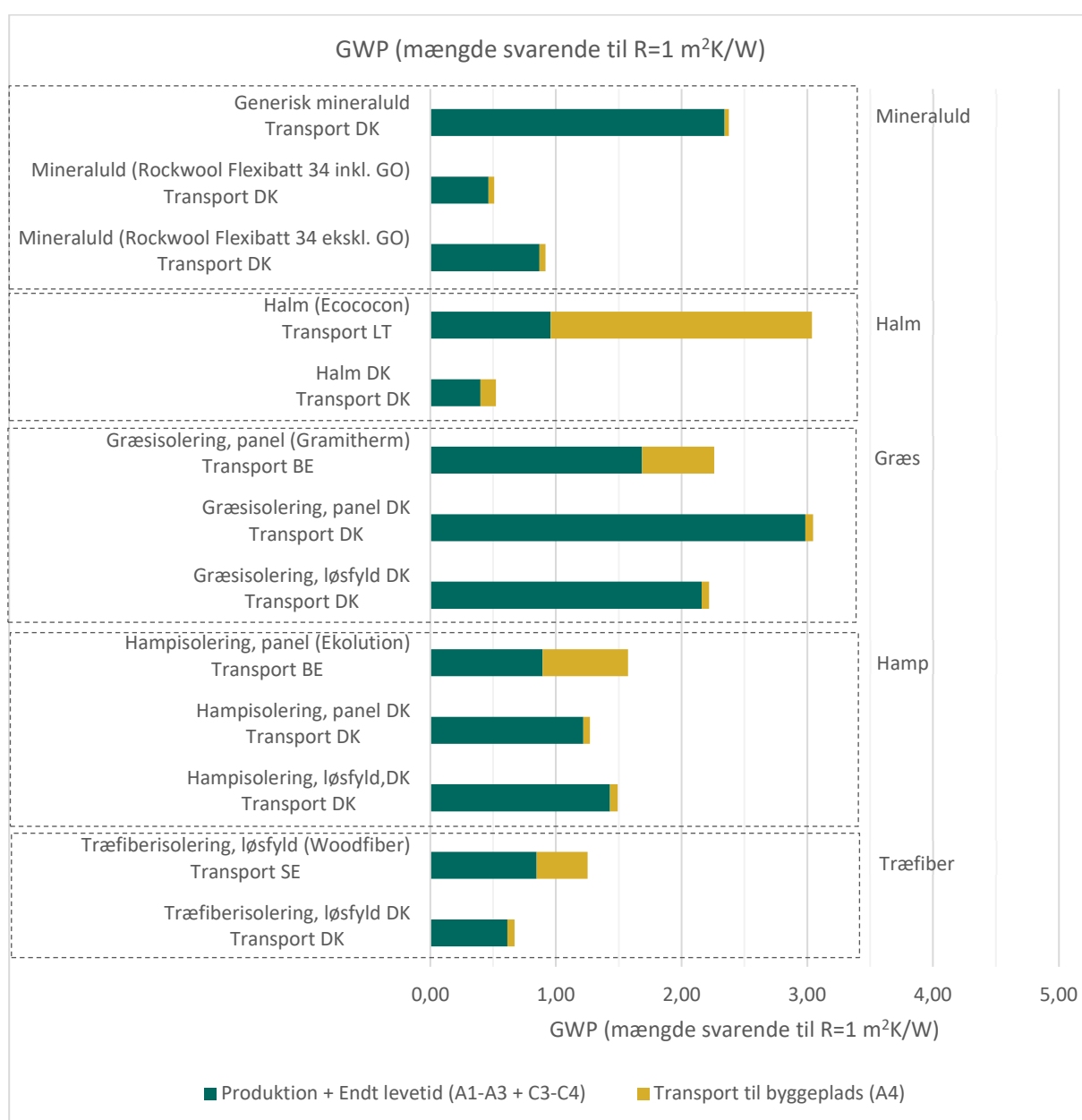
Isoleringstype	Indhold lastbil (ton)	GWP pr. ton pr. km	Produktionssted	Transportafstand
Generisk mineraluld Transport DK	8,2	0,20	DK	100
Mineraluld (Rockwool Flexibatt 34 inkl. GO) Transport DK	6,1	0,37	DK	100
Mineraluld (Rockwool Flexibatt 34 ekskl. GO) Transport DK	6,1	0,37	DK	100
Græsisolering, panel (Gramitherm) Transport BE	6,6	0,37	BE	944
Hampisolering, panel (Ekolution) Transport BE	5,7	0,37	CZ	1281
Halm (Ecocon) Transport LT	18,0	0,20	LT	1687
Halm DK Transport DK	18,0	0,20	DK	100
Græsisolering, panel DK Transport DK	6,6	0,37	DK	100
Græsisolering, løsfyld DK Transport DK	6,6	0,37	DK	100
Hampisolering, panel DK Transport DK	5,7	0,37	DK	100

Hampisolering, løsfyld,DK Transport DK	6,6	0,37	DK	100
Træfiberisolering, løsfyld DK Transport DK	7,0	0,37	DK	100
Træfiberisolering, løsfyld DK Transport DK	7,0	0,37	SE	710

Af Figur 14 ses klimapåvirkningen for isoleringsmaterialer for produktionen (A1-A3), Endt levetid (C3-C4) og Transport fra produktion til byggeplads (A4). Der ses tydeligt, at transporten med lastbil har en væsentlig betydning for isoleringsprodukternes samlede klimabelastning, når de importeres fra udlandet.

Der ses generelt, at for de isoleringsprodukter, hvor danske beregnede produktion ikke har været lige så fordelagtig som den udenlandske udjævnes denne forskel når transporten inkluderes.

Særligt for halmen ses transporten af have meget stor betydning. Det skyldes dels at der skal anvendes mere halm pr. funktionsenhed ($R=1\text{m}^2\text{K/W}$) og dermed transporteres mere. Derudover er transporten fra Litauen også den længste.



Figur 14: Klimapåvirkning for isoleringsmaterialer for produktionen (A1-A3), Endt levetid (C3-C4) og Transport fra produktion til byggeplads (A4)

1.11 Affaldsscenerier for biogene ressourcer

I henhold til EN 15804:2012 + A2:2019 kræves, at de modellerede affaldsscenerier er aktuelle og repræsentative. Dette resulterer typisk i konservative scenarier for fremtidig håndtering af biogene byggematerialer, da størstedelen i øjeblikket modelleres som afbrænding. Formålet med denne publikation er blandt andet at undersøge virkningen af forskellige affaldsscenerier for byggematerialer. Det antages at modulerne C1 – nedbrydning og C2 – transport er ens for de undersøgte byggevarer og vil udgøre en ikke-signifikant del af affaldssceneriet og udelades derfor.

Tabel 49: Affaldsscenerier inkluderet i analysen

Affaldsscenerier	Nedmuldning	Forbrænding	Forbrænding med CCS	Pyrolyse
Halm	X	X	X	X
Græs		X	X	
Hamp				
Træfiber		X	X	
Konstruktionstræ		X	X	

1.11.1 Nedmuldning

I dag anvendes halm til nedmuldning i landbruget, da dette, i kombination med næringsstoffer, bidrager til opbygning af kulstof i jorden. (Landbrugsavisen, Nedmuldning af halm: Har du husket at fodre dine jordbakterier?, 2020). Særligt for økologiske landmænd er det essentielt at anvende den overskydende halm fra kornproduktionen qua de skærpede/højere krav til forarbejdning af jorden.

Jf. AU Agro bindes 3% af kulstoffet fra halmen i jorden ved nedmuldning (GWP100) (Elsgaard, et al., 2022). Et konservativt scenarie sættes op for halmelementet, hvor kun 3% af kulstoffet formodes at blive bundet i jorden, og det resterende kulstof antages frigivet til atmosfæren i form af CO₂.

1.11.2 Forbrænding

I Danmark er biomasse i stigende grad blevet anvendt i energisektoren til energiudvinding. Det har været/er lukrativt at anvendes biomasse i energisektoren, da denne kan regnes som 0 jf. Renewable Energy Directive (RED). Ifølge publikation **XX** indikerer fremskrivninger, at biomassens rolle i energiforsyningen vil aftage over tid, men at den ikke vil blive fuldstændig udfaset. På baggrund af dette etableres der et affaldsscenerie, hvor de biogene byggematerialer afbrændes.

1.11.3 Forbrænding med CCS

I Energistyrelsens klimafremskrivninger implementeres *Carbon Capture and Storage* (CCS) som et initiativ til CO₂-opsamling. I forlængelse af forrige affaldsscenerier, inkluderes et affaldsscenerie, der tager højde for forbrænding af biogene ressourcer med CCS-implementering. Da udbredelsen af CCS i øjeblikket er begrænset, har det ikke været muligt at anvende faktiske LCI-data i nærværende studie. I stedet benyttes litteratur til at evaluere effektiviteten og de miljømæssige påvirkninger forbundet med CCS. (Kähler, Carus, Berg, & Stratmann, 2022) lister 'energy demand' ved punktkilde CCS i forskellige typer af kraftanlæg. Der er ikke oplyst energiforbrug specifikt for affaldsforbrændingsanlæg. I stedet anvendes energiforbrug ved CCS på et kulkraftværk, med antagelsen om, at Danmark historisk

har brændt kul af på kraftværkerne (Energistyrelsen, 2023). Flere kilder nævner en CCS-effektivitet på 90%, som værende realistisk og derfor er dette benyttet i modelleringen af CCS (Facchino, et al., 2022) (Climate Portal, 2021). Herudover er der også inkluderet konservativt scenarie med en CCS-effektivitet på 60%.

Tabel 50: LCI-data på CCS-anlæg

CCS			
Reference flow			
Fangst af CO2 (konvertering)			
Inputs			
Forbrug af elektricitet	kWh	339	(Kähler, Carus, Berg, & Stratmann, 2022)
Opførsel af anlæg	p	0,0068*	Ecolnvent data 'synthetic gas factory construction'

*Ecolnvent data på 'synthetic gas factory construction' er anvendt som en proxy for et CCS-anlæg, levetid på 50 år, antagelse af årlig fangst (1,7 mio. t CO2) (Facchino, et al., 2022), effektivitet 90% (Facchino, et al., 2022).

1.11.4 Pyrolyse

Pyrolyse af biomasse resulterer i dannelse af biokul, hvor kulstoffet fra biomassen bindes i en stabiliseret form. Biokullet er karakteriseret ved dets høje kulstofindhold og stabilitet, hvilket gør det til et attraktivt materiale til kulstofbinding og jordforbedring. Pyrolyse af biomasse foregår typisk ved temperaturer mellem 300°C og 750°C under anaerobe forhold. Denne proces resulterer i produkter som biokul, bioolie og syntesegas, som kan anvendes som vedvarende energikilder eller råmaterialer til forskellige industrielle formål (Elsgaard, et al., Knowledge synthesis on biochar in danish agriculture, 2022).

I Danmark er den førende aktør på markedet Stiesdal SkyClean A/S i Skive. I pyrolyseprocessen omdannes biomasse til biokul, gas og olie. Stiesdal SkyClean A/S har oplyst følgende data for pyrolysning af 1 ton halm (10% fugt) (Elsgaard, et al., Knowledge synthesis on biochar in danish agriculture, 2022):

Tabel 51: Massebalance for pyrolyse af 1 ton halm

	Mængde (kg)	Mængde (%)	Carbon (kg C)	Carbon (%)
Input				
Halm	1000	100	426	100
Halm (TS)	900	90	426	100
Fugt	100	10	0	0
Output				
Biokul	263	26	189	44
Bioolie	107	11	76	18
Syntesegas	630	63	161	38

Jf. (Elsgaard, et al., Knowlegde synthesis on biochar in danish agriculture, 2022) bindes 62,7% af C i biokul (GWP100), hvor det for halm uden forarbejdning kun er 3% C, der er bundet og stabilt efter 100 år. Summeres C, som bindes efter 100 år, for 1 ton pyrolyseret halm, opnås en værdi på 27,6%¹⁵.

Biokuls egenskaber i at stabilisere kulstof gør det attraktivt for forskellige brancher. Særligt vurderes biokul at have et stort potentiale til at reducere CO₂ udledninger fra landbruget, da biokullet kan anvendes som gødning. Dog er der visse negative virkninger, som skal vurderes og overvejes, når biokul udbringes på landbrugsjord. Jf. (Elsgaard, et al., Knowlegde synthesis on biochar in danish agriculture, 2022) bør der være fokus på de kortsigtede og langsigtede virkninger herunder nævnes potentielle giftige elementer, såsom polycykliske aromatiske kulbrinter, tungmetaller og flygtige organiske forbindelser, som biokul frigiver. Tungmetallerne stammer fra materialet, hvor polycykliske aromatiske kulbrinter stammer fra rekondensering af pyrolysevæsker og gasser (Elsgaard, et al., Knowlegde synthesis on biochar in danish agriculture, 2022).

Ved anvendelse af restprodukter til jordbrugsformål er BEK nr 1001 af 27/06/2018¹⁶ gældende. Bekendtgørelsen har til formål at fastsætte 'regler om, i hvilket omfang affald, jf. § 2, kan anvendes til jordbrugsformål uden skadelige virkninger på miljøet, mennesker, planter og dyr'. I bekendtgørelsen omfatter affald bl.a. biopulp, flydende affald, fysiske urenheder, husdyrgødning, spildevandsslam mv. Dermed anvendes denne lovgivning bl.a. ved udbringning af biopulp fra biogasanlæg. Jf. bilag 2 fastsættes strenge grænseværdier for fysiske urenheder i den forbehandlede biopulp:

- *Grænseværdien for fysiske urenheder (plast, glas og kompositmaterialer) større end 2 mm er 0,5 vægtprocent/tørstof.*
- *Grænseværdien for indhold af plast større end 2 mm er 0,15 vægtprocent/tørstof og 1 cm² pr. procent tørstof målt i 1 liter biopulp.*

Idet der, som tidligere beskrevet, ikke er nogle specifikke lovgivninger, som varetager udbringningen af biokul, kan der refereres til førnævnte grænseværdier. Ved anvendelse af biogene ressourcer i byggematerialer, kombineres disse ofte med brandhæmmer, plastik samt anden kemi for at opnå lignende egenskaber, som mineralske byggematerialer har. Pyrolyse af byggematerialer indeholdende disse stoffer er fortsat et opmærksomhedspunkt, som skal undersøges nærmere. Det er ukendt, hvorvidt dette vil skabe problematiske forbindelser og have større konsekvenser for nærmiljøet. Dette indikerer således, at såfremt der er plastik i de biogene byggematerialer, som efterfølgende kan spores i biokullet, er der en risiko for at sprede fysiske urenheder, som overskrider grænseværdier. Qua de førnævnte problematiske stoffer skal der jf. §6 i BEK nr 1001 af 27/06/2018 gives tilladelse til udbringe biokul på landbrugsjord jf. miljøbeskyttelsesloven §19.

1.12 Biogent kulstof

Jf. EN 15804:2012 + A2:2019 skal en c-PCR anvendes, såfremt der foreligger sådan en. En c-PCR er en standard, som beskriver de specifikke regneregler for en given byggevarer. Et eksempel herpå er etablering af affaldsscenerier. C-PCR fornemmeste opgave er at ensrette LCA modellering af byggevarer, således disse bliver sammenlignelige. Idet byggematerialer af biogene ressourcer fra landbruget er et relativt nyt punkt på dagsorden, eksisterer der ingen c-PCR, som foreskriver konkrete retningslinjer

¹⁵ 44%*62,7%=27,6%

¹⁶ Bekendtgørelse om anvendelse af affald til jordbrugsformål

for modelleringen af produktet. Dog foreligger der en c-PCR for træ og træbaserede produkter¹⁷, som agerer guideline ift. modellering af biogene ressourcer. Jf. EN 16485 skal den biogene kulstofbalance gå i nul over livscyklussen. Dette aspekt er ligeledes implementeret for andre biogene materialer, da dette mindsker incitamentet for at overudnytte biogene ressourcer.

2 Resultater (LCIA)

Følgende kapitel præsenterer resultater af nærværende analyse. LCIA-metoderne, som anvendes i EN 15804:2012 + A2:2019, benyttes til at beregne miljøpåvirkninger. Dette omfatter følgende miljøpåvirkningskategorier:

Miljøpåvirkningskategorier, metode

- **Global warming potential total [GWPt], IPCC 2013 AR5**
- **Global warming fossil [GWPf], IPCC 2013 AR5**
- **Global warming biogenic [GWPb], IPCC 2013 AR5**
- **Global warming land use and land use change [GWPluluc], IPCC 2013 AR5**
- Ozone depletion [ODP], WMO (2014) + integrations
- Acidification for soil and water [AP], Seppälä et al. (2006); Posch et al. (2008)
- Eutrophication fresh water [EP F], EUTREND model (Struijs et al, 2009b) as implemented in ReCiPe 2008
- Eutrophication marine [EP M], EUTREND model (Struijs et al, 2009b) as implemented in ReCiPe 2008
- Eutrophication terrestrial [EP T], Seppälä et al. (2006); Posch et al. (2008)
- Photochemical ozone creation [POCP], LOTOS-EUROS model (Van Zelm et al, 2008) as implemented in ReCiPe 2008
- Depletion of abiotic resources-elements [ADPe], van Oers et al. (2002) (based on Guinée et al. 2002)
- Depletion of abiotic resources-fossil fuels [ADPf], van Oers et al. (2002) (based on Guinée et al. 2002)
- Water use [WDP], Available Water Remaining (AWARE) Boulay et al. (2016)

I dette studie er det valgt udelukkende at fokusere på miljøpåvirkningskategorierne vedr. GWP (markeret ovenfor). De øvrige miljøpåvirkningskategorier udelukkes således fra studiet med argumentationen om, at vi i bygningsreglementet ikke kigger på disse (Bygningsreglement, BR18).

Det skal nævnes, at der ligger en problematik i at udelukke de øvrige miljøpåvirkningskategorier fra studiet. Dette skyldes, at man ved at lægge fokus på én miljøpåvirkning kan ende ud i det der betegnes som 'burden shifting', hvor man ved optimering af én påvirkningskategori øger byrden på en anden kategori. Da der i dette studie arbejdes med afgrøder fra landbrugssektoren, vil det være oplagt også at fokusere på miljøindikatorer relateret til eutrofiering (belastning med næringssalte) af akvatiske miljøer. Dette skyldes, at landbrugssektoren står for op imod 70% af kvælstofudledningen og 40% af fosforudledning i DK (Danmarks Naturfredningsforening, 2023), (Landbrugsavisen, Udledning fra landbruget påvirker vandmiljøet, 2023).

Det vil være muligt også at generere A1-A3 resultater for de øvrige påvirkningskategorier, men ikke for modul C3-C4. Dette skyldes, at der i C3-C4 er benyttet datasæt, hvor der er blevet foretaget en manuel korrigerende af det biogene kulstof således, at det repræsenterer den specifikke afgrøde. Et eksempel er afbrænding af halmelementet, hvor forbrænding af halmfraktionen er modelleret med et datasæt for afbrænding af træ. Det biogene kulstof er her korrigeret således, at det repræsenterer

¹⁷ EN 16485:2014 Round and sawn timber – Environmental Product Declarations – Product category rules for wood and wood-based products for use in construction

afbrænding af halm og ikke træ. Denne korrigerende har dog ingen effekt på de øvrige påvirkningskategorier, hvorfor datasættet for disse påvirkningskategorier stadig vil repræsentere afbrænding af træ.

2.1 Halmelement

Tabel 52: Klimapåvirkning for produktionen af 1 m2 halmelement opgjort efter EN15804 + A2

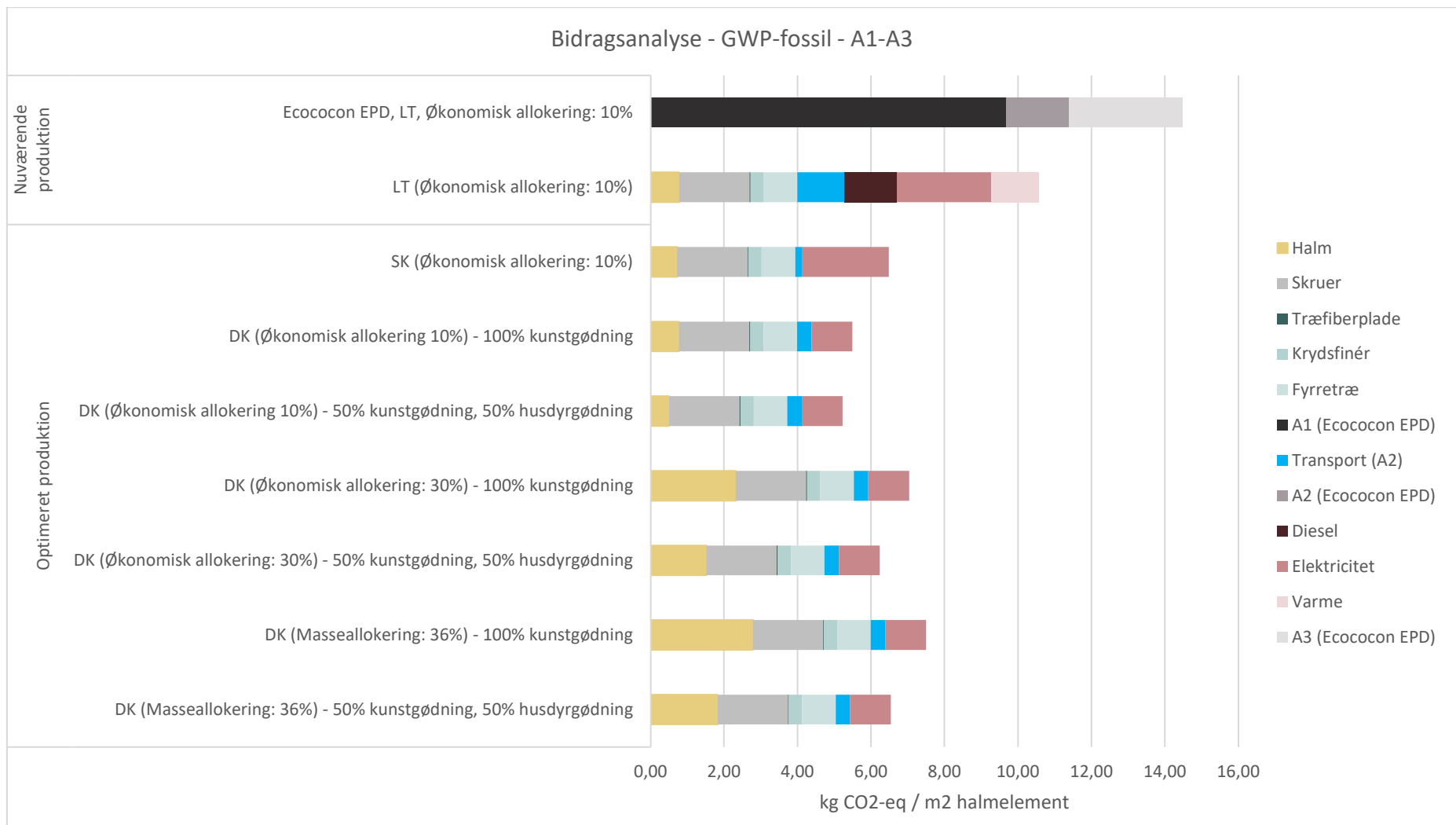
Klimapåvirkninger per m ² halmelement (A1-A3)										
Indikator	Enhed	Nuværende produktion		Optimeret produktion						
		EcoCocon EPD, LT - Økonomisk allokering: 10%	LT - Økonomisk allokering: 10%	SK - Økonomisk allokering: 10%	DK - Økonomisk allokering: 10%	DK - Økonomisk allokering: 10%	DK - Økonomisk allokering: 30%	DK - Økonomisk allokering: 30%	DK - Masseallokering: 36%	DK - Masseallokering: 36%
					100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning
GWP-total	kg CO ₂ eq	-109	-87	-91	-92	-93	-91	-92	-91	-92
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	14	10,6	6,4	5,5	5,2	7,0	6,2	7,5	6,5
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	-123	-98	-98	-98	-98	-98	-98	-98	-98
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0	0,04	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use									
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.									

Tabel 53: Klimapåvirkning for bortskaffelsen af 1 m2 halmelement i DK opgjort efter EN15804 + A2

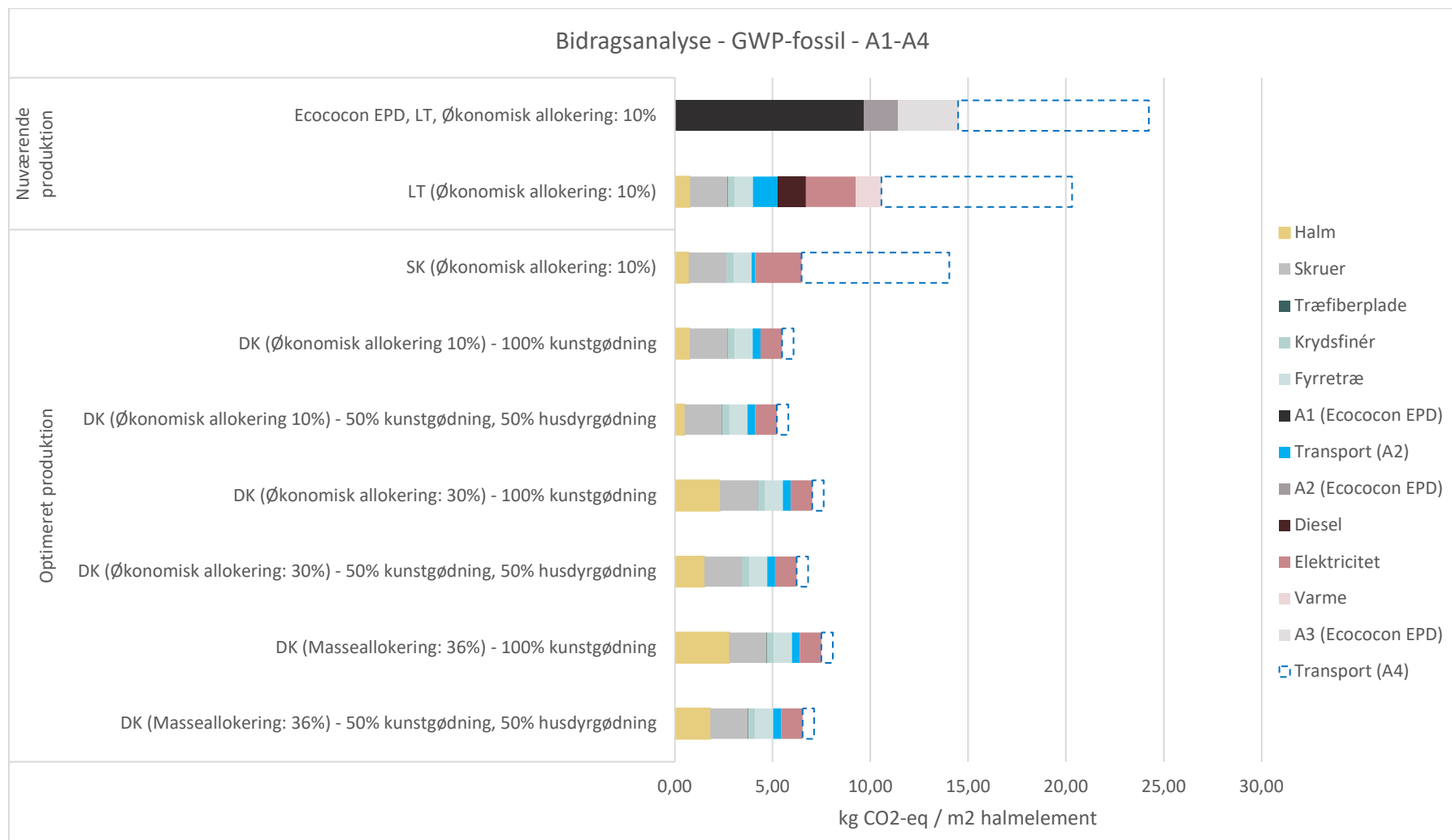
Klimapåvirkninger per m ² halmelement (C3-C4)						
Indikator	Enhed	Danmark				
		Nedmuldning	Forbrænding	Forbrænding m. CCS	Forbrænding m. CCS	Pyrolyse
				CCS effektivitet: 60%	CCS effektivitet: 90%	Eksl. emissioner fra syngas og bioolie
GWP-total	kg CO ₂ eq	99	93	42	15	29
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	9,6	2,0	5,9	5,3	3,4
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	89	91	37	9	26
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use					
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.					

2.1.1 Bidragsanalyse – Fossil GWP - (A1-A3 + A4)

Figurerne i dette afsnit angiver alene GWP-fossil (samt direkte biogene emissioner fra husdyrgødning) og dermed er lagringen af biogent kulstof i materialerne trukket ud af graferne. Dette er gjort med henblik på at sammenligne GWP relateret til produktionsforhold. Figur 15 og Figur 16 sammenligner bidrag til GWP-fossil for de forskellige scenarier oplyst tidligere. I Figur 16 er modul A4 tilføjet med henblik på at belyse hvad transporten fra produktionssted til byggeplads har af betydning for GWP-fossil og deraf hvilke fordele, som ligger i at have lokalt producerede byggevarer.



Figur 15: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A3 for produktionen af 1 m² halmelement i hhv. LT, SK og DK med forskellige scenarier for allokering af miljøpåvirkninger til halm.



Figur 16: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A4 for produktionen af 1 m² halmelement i hhv. LT, SK og DK med forskellige scenarier for allokering af miljøpåvirkning til halm. I A4 antages der transportdistancer på 1687 km, 1307 km og 100 km for hhv. LT, SK og DK.

2.2 Græsisolering

Denne sektion omfatter resultater for 1 kg græsisoleringspanel samt 1 kg græsisolering som løsfyld.

2.2.1 Græsisoleringspanel

Tabel 54: Klimapåvirkning for produktionen af 1 kg græsisoleringspanel i BE og DK opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger per kg græsisoleringspanel (A1-A3)							
		Gramitherm EPD, BE - vejsidegræs	DK - vejsidegræs	DK - Økonomisk allokering: 19%	DK - Økonomisk allokering: 19%	DK - Masseallokering: 38%	DK - Masseallokering: 38%
				100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning
GWP-total	kg CO ₂ eq	-1,25	0,21	0,40	0,25	0,81	0,49
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,62	1,20	1,39	1,22	1,80	1,45
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	-1,88	-0,99	-0,99	-0,98	-0,99	-0,96
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use						
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.						

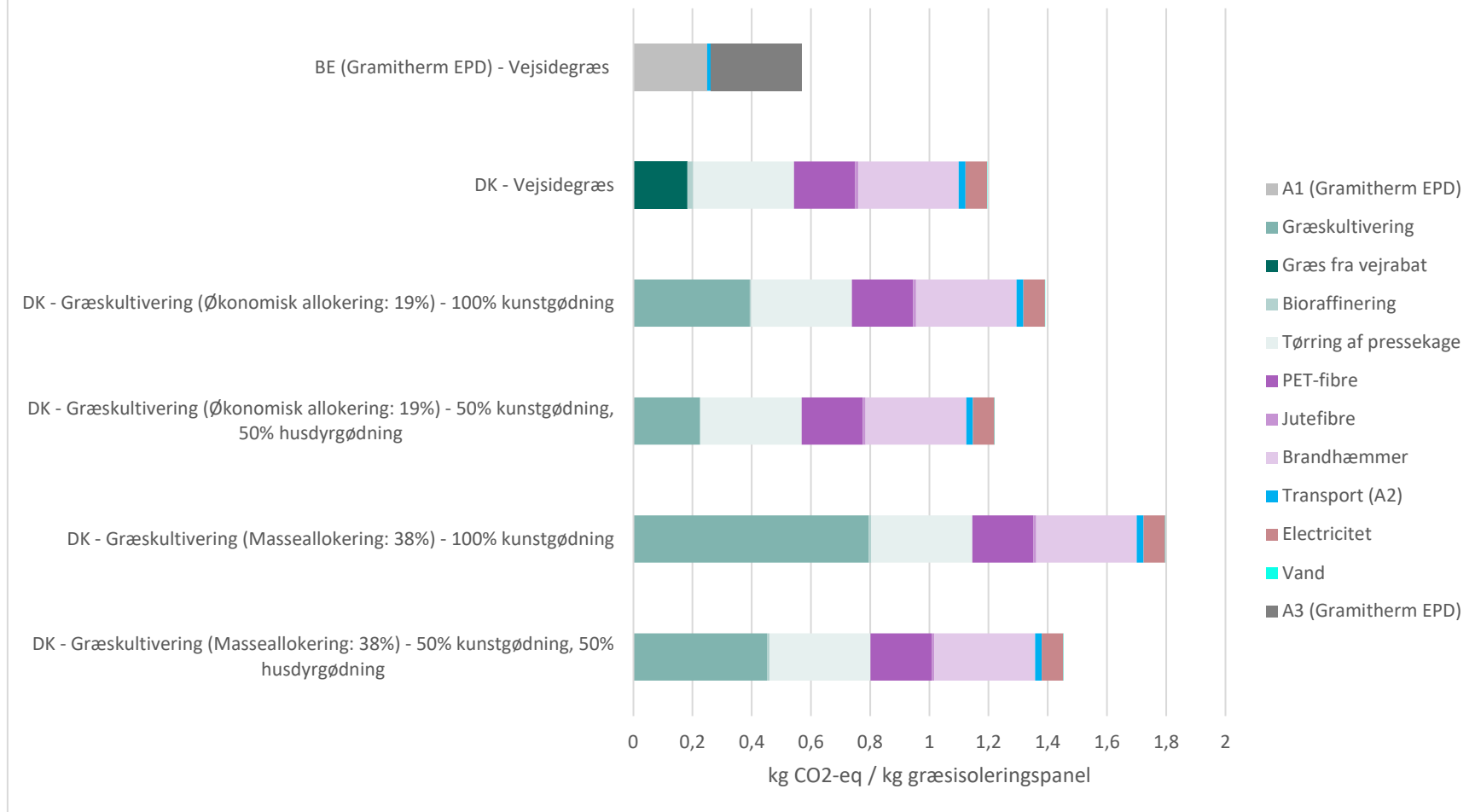
Tabel 55: Klimapåvirkning for bortskaffelsen af 1 kg græsisoleringspanel i DK opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger per kg græsisoleringspanel (C3-C4)				
		DK, affaldsscenario: forbrænding	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (60% effektivitet)	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (90% effektivitet)
			CCS effektivitet: 60%	CCS effektivitet: 90%
GWP-total	kg CO ₂ eq	1,57	0,74	0,26
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,21	0,20	0,14
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	1,36	0,54	0,13
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,000	0,000	0,000
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use			
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.			

2.2.1.1 Bidragsanalyse – Fossil GWP (A1-A3 + A4)

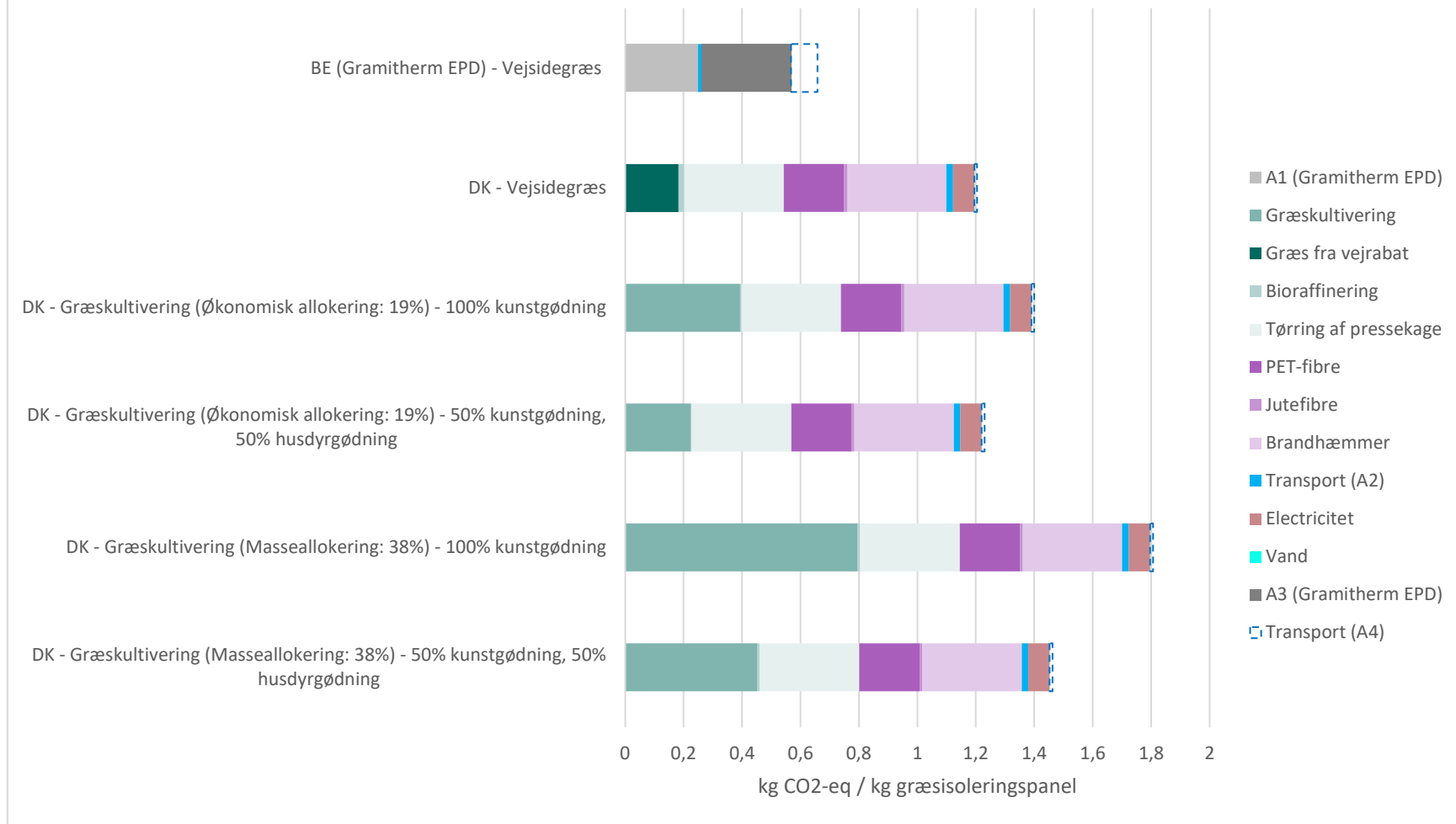
Figurerne i dette afsnit angiver alene GWP-fossil (samt direkte biogene emissioner fra husdyrgødning). Lagringen af biogent kulstof i materialerne er derfor trukket ud af graferne. Dermed sammenlignes alene GWP relateret til produktionsforhold. Figur 17 og Figur 18 sammenligner bidrag til GWP-fossil for de forskellige scenarier oplyst tidligere. I Figur 18 er modul A4 tilføjet med henblik på at belyse hvad transporten fra produktionssted til byggeplads har af betydning for GWP-fossil.

Bidragsanalyse - GWP-fossil - A1-A3



Figur 17: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A3 for produktionen af 1 kg græsisoleringspanel i hhv. BE og DK ved forskellige allokeringsscenarier for miljøpåvirkninger fra græskultivering og bioraffinering.

Bidragsanalyse - GWP-fossil - A1-A4



Figur 18: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A4 for produktionen af 1 kg græsisoleringspanel i hhv. BE og DK ved forskellige allokeringsscenarier for miljøpåvirkninger fra græskultivering og bioraffinering. I A4 antages der transportdistancer på 944 km og 100 km for hhv. BE og DK.

2.2.2 Græsisolering (løsfyld)

Tabel 56: Klimapåvirkning for produktionen af 1 kg græsisolering (løsfyld) i DK opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger per kg græsisolering, løsfyld (A1-A3)					
		DK - Økonomisk allokering: 19%	DK - Økonomisk allokering: 19%	DK - Masseallokering: 38%	DK - Masseallokering: 38%
		100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning
GWP-total	kg CO ₂ eq	0,04	-0,18	0,6	0,2
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	1,4	1,1	1,9	1,5
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	-1,3	-1,3	-1,3	-1,3
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,002	0,001	0,0	0,0
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use				
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.				

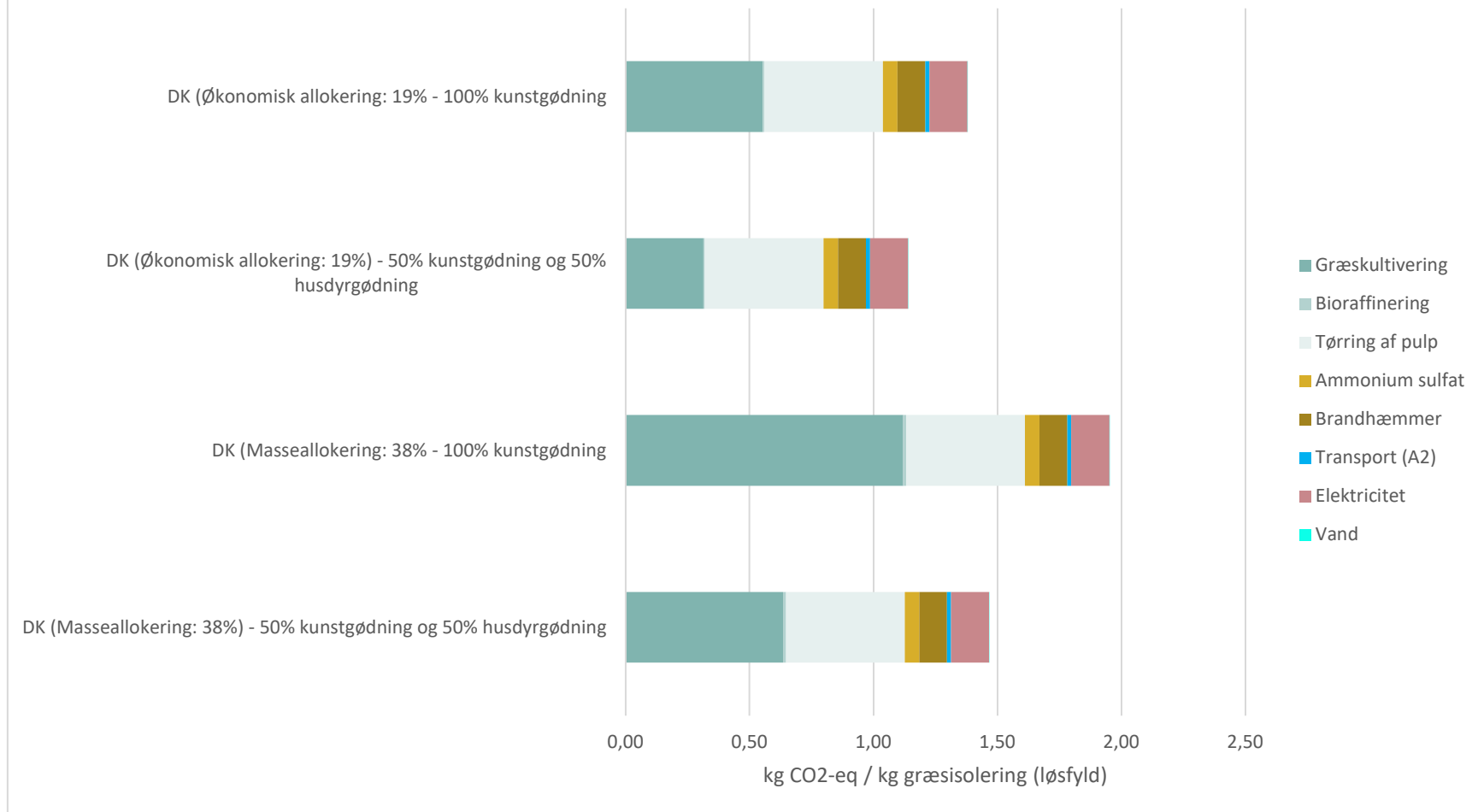
Tabel 57: Klimapåvirkning for bortskaffelsen af 1 kg græsisolering (løsfyld) i DK opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger per kg græsisolering, løsfyld (C3-C4)				
		DK, affaldsscenario: forbrænding	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (60% effektivitet)	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (90% effektivitet)
			CCS effektivitet: 60%	CCS effektivitet: 90%
GWP-total	kg CO ₂ eq	1,50	0,68	0,23
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,03	0,09	0,09
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	1,46	0,59	0,15
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,00	0,00	0,00
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use			
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.			

2.2.2.1 Bidragsanalyse (A1-A3)

Fokus lægges i denne sektion på GWP-fossil (samt direkte biogene emissioner fra husdyrgødning) relateret til produktionsforhold. Figur 19 sammenligner bidrag til GWP-fossil for de scenarier, som er oplyst tidligere.

Bidragsanalyse - GWP-fossil - A1-A3



Figur 19: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A3 for produktionen af 1 kg græsisolering (løsfyld) i DK med forskellige allokerings-scenarier for miljøpåvirkninger fra græskultivering og bioraffinering.

2.3 Hampisolering

Denne sektion omfatter resultater for 1 kg hampisoleringspanel samt 1 kg hampisolering som løsfyld.

2.3.1 Hampisoleringspanel

Tabel 58: Klimapåvirkninger for produktionen af 1 kg hampisoleringspanel opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger per kg hampisoleringspanel (A1-A3)						
		Ekolution EPD, CZ	DK - Økonomisk allokering: 50%	DK - Økonomisk allokering: 50%	DK - Masseallokering: 22%	DK - Masseallokering: 22%
			100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning
GWP-total	kg CO ₂ eq	-1,95	-0,52	-0,62	-0,81	-0,76
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,29	0,92	0,81	0,67	0,62
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	-2,25	-1,44	-1,43	-1,43	-1,43
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use					
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.					

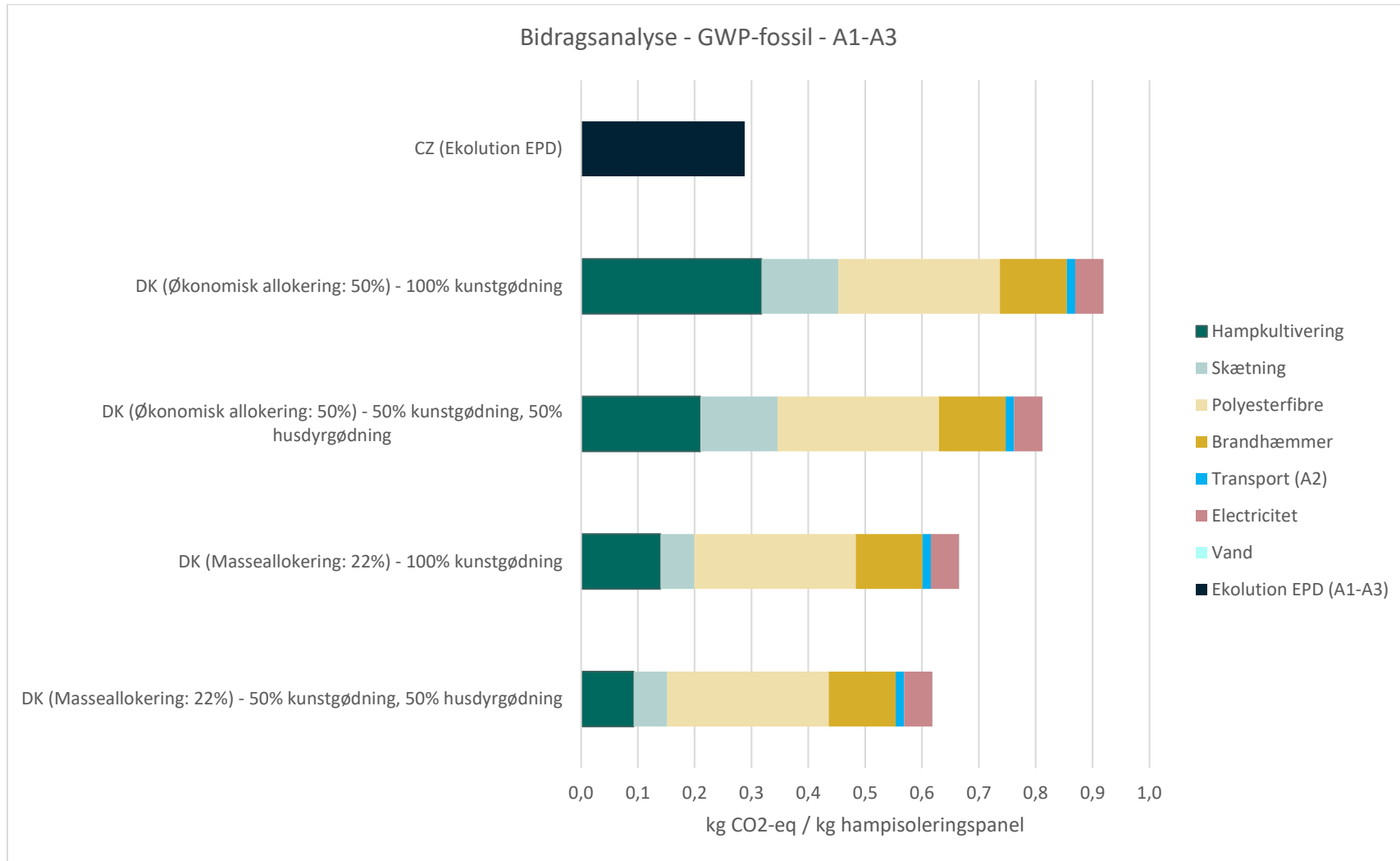
Tabel 59: Klimapåvirkning for bortskaffelsen af 1 kg hampisoleringspanel i DK opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger per kg hampisoleringspanel (C3-C4)				
		DK, affaldsscenario: forbrænding	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (60% effektivitet)	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (90% effektivitet)
			CCS effektivitet: 60%	CCS effektivitet: 90%
GWP-total	kg CO ₂ eq	1,47	0,66	0,22
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,22	0,16	0,10
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	1,24	0,49	0,12
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,000	0,000	0,000
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use			
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.			

2.3.1.1 Bidragsanalyse – Fossil GWP (A1-A3 + A4)

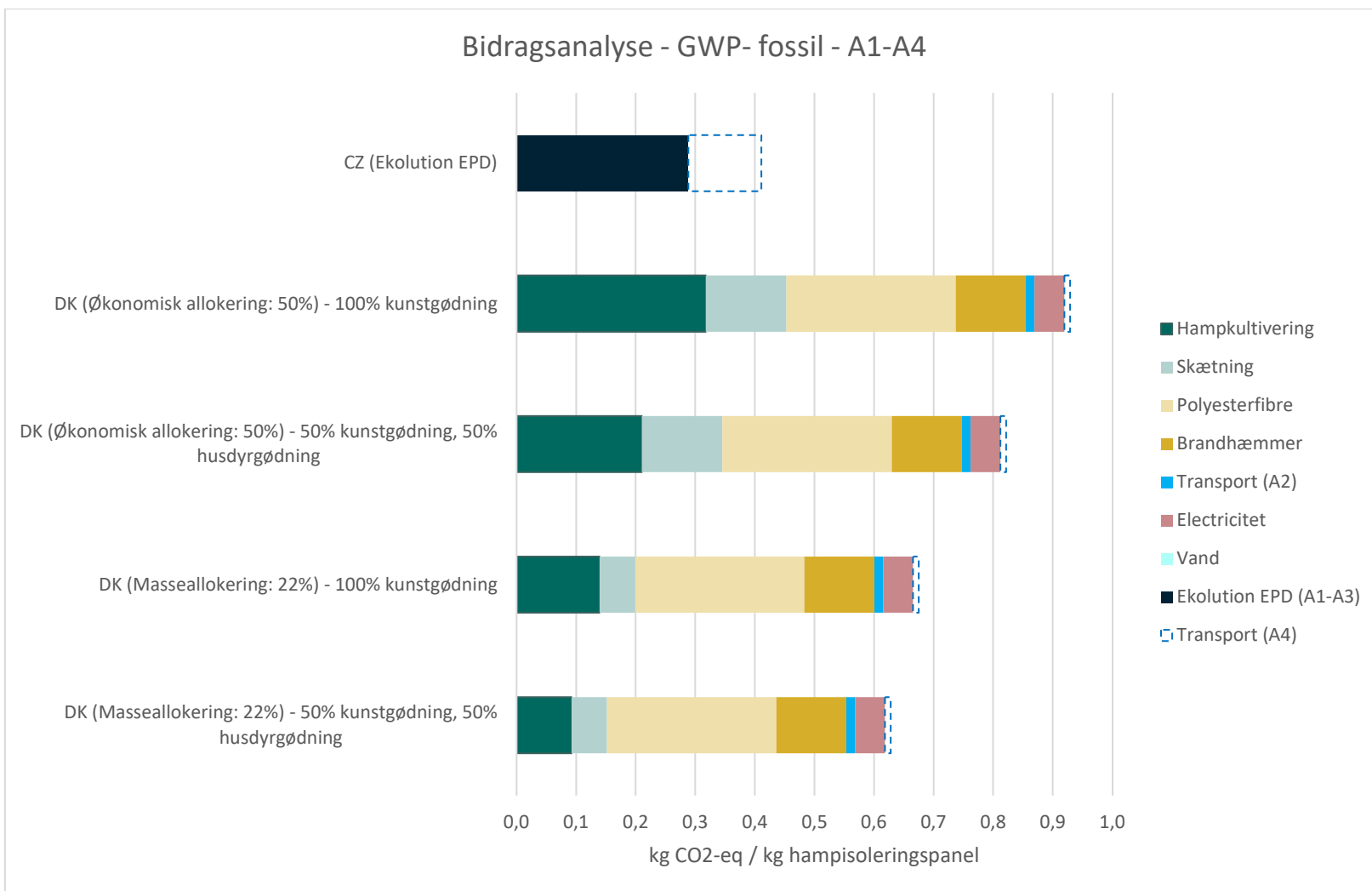
Fokus lægges i denne sektion på GWP-fossil (samt direkte biogene emissioner fra husdyrgødning) relateret til produktionsforhold. Figur 20 og Figur 21 sammenligner bidrag til GWP-fossil for de forskellige scenarier oplistet tidligere. I Figur 21 er modul A4 tilføjet med henblik på at belyse hvad transporten fra produktionssted til byggeplads har af betydning for GWP-fossil.

Bidragsanalyse - GWP-fossil - A1-A3



Figur 20: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A3 for produktionen af 1 kg hampisoleringspanel i hhv. CZ og DK ved forskellige allokeringsscenarier for miljøpåvirkninger fra hampkultivering og skætning

Bidragsanalyse - GWP- fossil - A1-A4



Figur 21: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A4 for produktionen af 1 kg hampisoleringspanel i hhv. CZ og DK ved forskellige allokerings-scenarier for miljøpåvirkninger fra hampkultivering og skætning. For A4 antages transportdistancer til 1281 km og 100 km for hhv. CZ og DK.

2.3.2 Hampisolering (løsfyld)

Tabel 60: Klimapåvirkninger for produktionen af 1 kg hampisolering (løsfyld) opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger per kg hampisolering, løsfyld (A1-A3)					
		DK - Økonomisk allokering: 50%	DK - Økonomisk allokering: 50%	DK - Masseallokering: 22%	DK - Masseallokering: 22%
		100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	100% kunstgødning	50% kunstgødning, 50% husdyrgødning
GWP-total	kg CO ₂ eq	-0,70	-0,81	-0,96	-1,01
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,82	0,70	0,55	0,50
GWP-biogen	kg CO ₂ eq	-1,52	-1,51	-1,51	-1,51
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,00	0,00	0,00	0,00
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use				
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.				

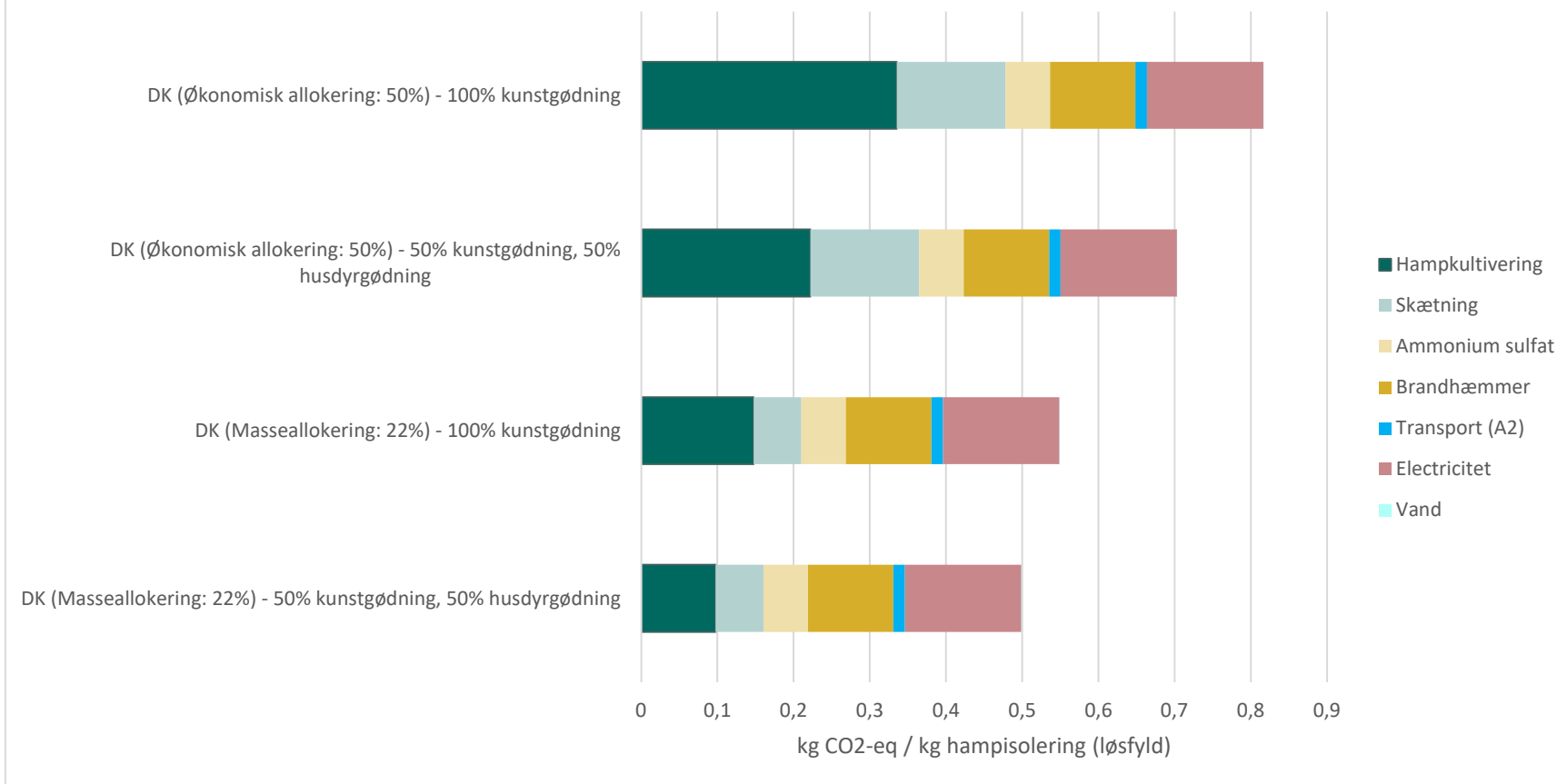
Tabel 61: Klimapåvirkninger for bortskaffelsen af 1 kg hampisolering (løsfyld) opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger per kg hampisolering, løsfyld (C3-C4)				
		DK, affaldsscenario: forbrænding	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (60% effektivitet)	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (90% effektivitet)
			CCS effektivitet: 60%	CCS effektivitet: 90%
GWP-total	kg CO ₂ eq	1,66	0,75	0,25
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,03	0,10	0,09
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	1,63	0,65	0,16
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,000	0,000	0,000
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use			
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.			

2.3.2.1 Bidragsanalyse – Fossil GWP (A1-A3)

Fokus lægges i denne sektion på GWP-fossil (samt direkte biogene emissioner fra husdyrgødning) relateret til produktionsforhold. Figur 22 sammenligner bidrag til GWP-fossil for de forskellige scenarier oplistet tidligere.

Bidragsanalyse - GWP- fossil - A1-A3



Figur 22: Bidrag til GWP-fossil (og direkte emissioner fra husdyrgødning) i modul A1-A3 for produktionen af 1 kg hampisolering (løsfyld) i DK ved forskellige allokeringsscenarier for miljøpåvirkninger fra hampkultivering og skætning

2.4 Træfiberisolering

Tabel 62: Klimapåvirkninger for produktionen af 1 kg træfiberisolering opgjort efter EN15804 + A2

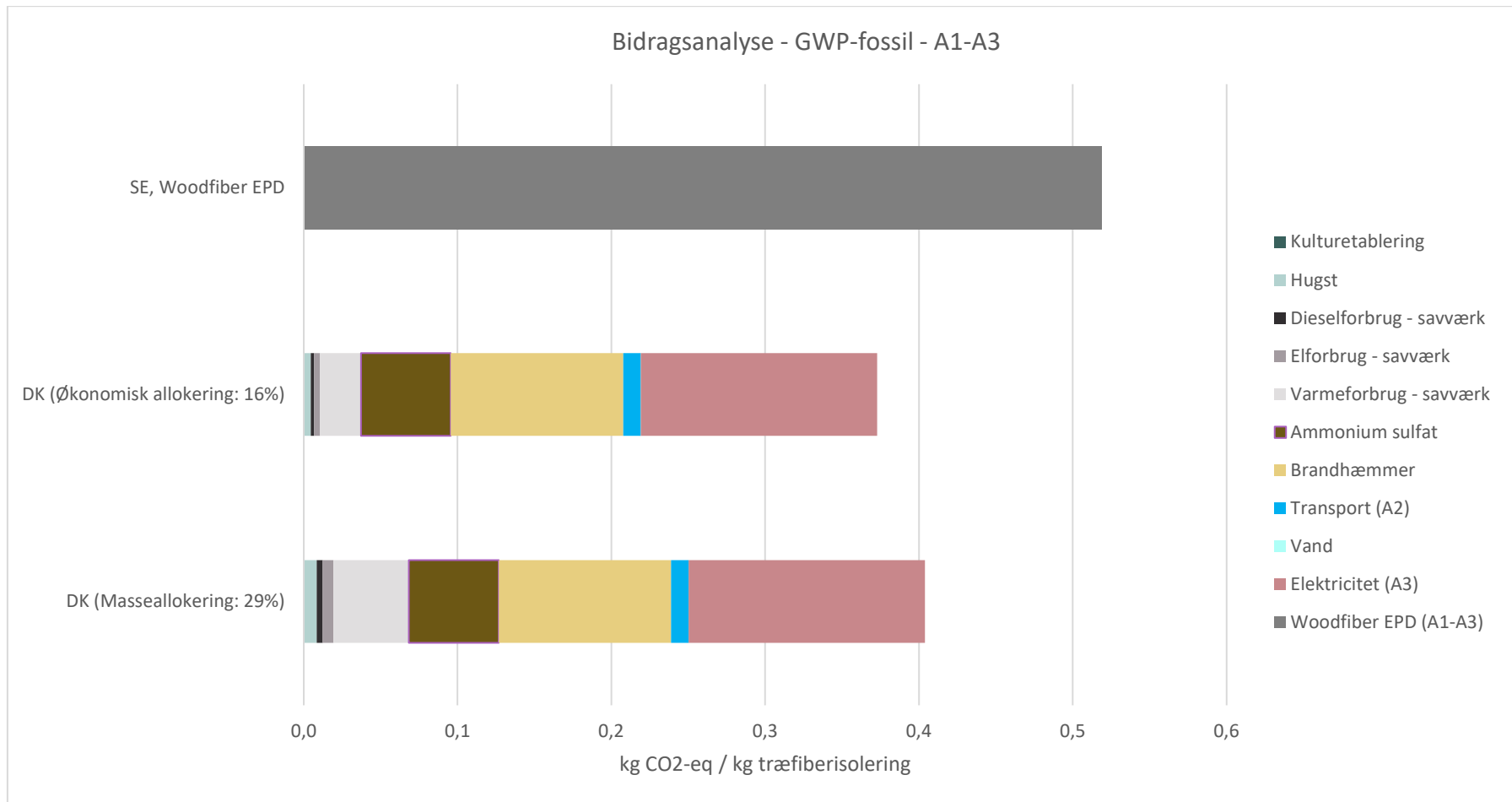
Klimapåvirkninger per kg træfiberisolering (A1-A3)				
		Woodfiber EPD	DK (Økonomisk allokering: 16%)	DK (Masseallokering: 29%)
		Træ fra SE, produktion i SE	Træ fra DK, produktion i DK	Træ fra DK, produktion i DK
		Ingen allokering	Økonomisk allokering af udledninger fra kulturreablering, hugst og energiforbrug på savværk	Masseallokering af udledninger fra kulturreablering, hugst og energiforbrug på savværk
GWP-total	kg CO ₂ eq	-1,00	-1,21	-1,18
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,52	0,37	0,40
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	-1,52	-1,59	-1,59
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,001	0,001	0,001
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use			
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.			

Tabel 63: Klimapåvirkninger for bortskaffelse af 1 kg træfiberisolering opgjort efter EN15804 + A2

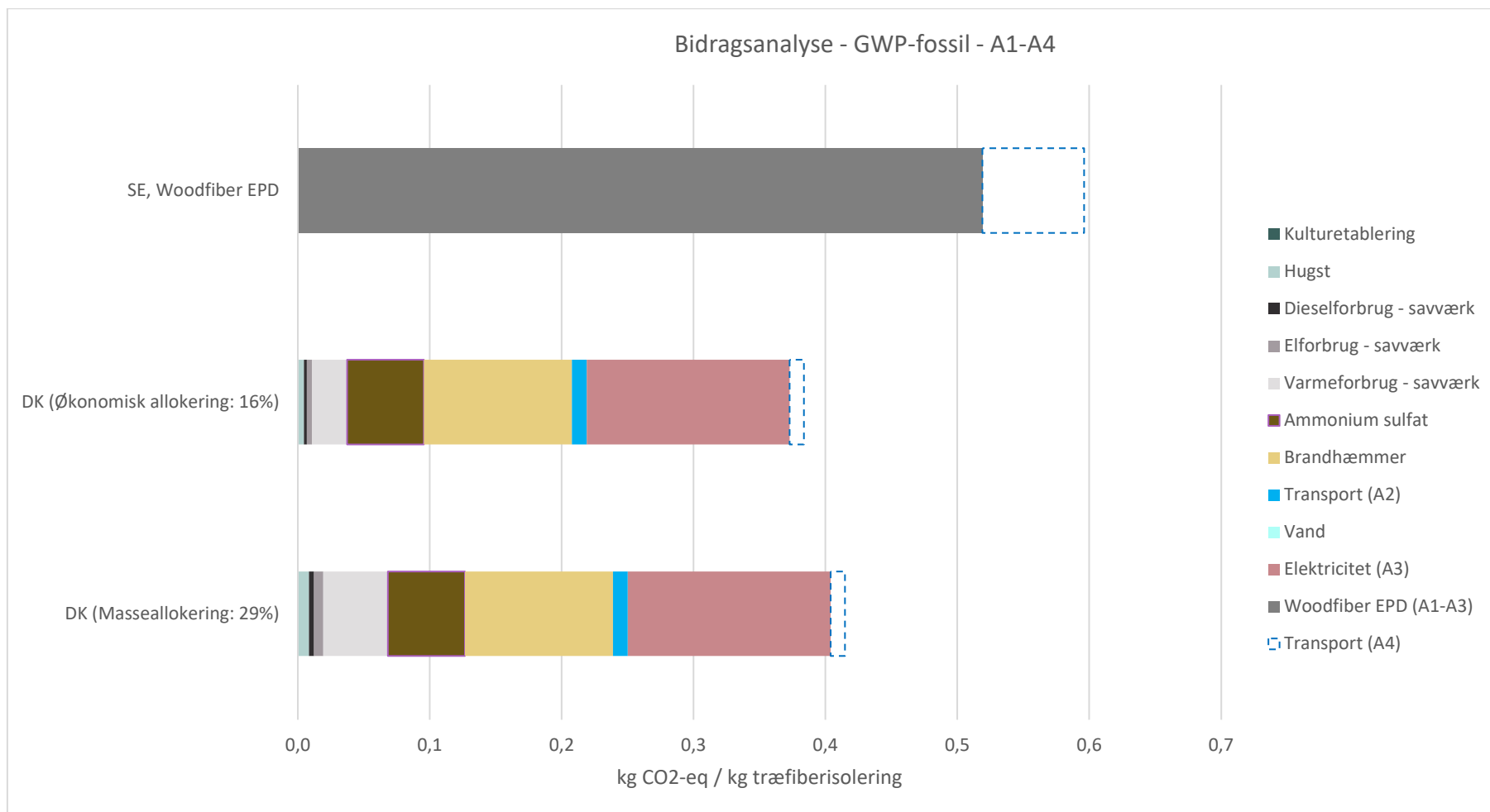
Klimapåvirkninger for bortskaffelse af 1 kg træfiberisolering (C3-C4)				
		DK, affaldsscenario: forbrænding	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (60% effektivitet)	DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (90% effektivitet)
			CCS-effektivitet: 60% effektivitet	CCS-effektivitet: 90% effektivitet
GWP-total	kg CO ₂ eq	1,6	0,8	0,3
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	0,0	0,1	0,1
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	1,6	0,6	0,2
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,0	0,0	0,0
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use			
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.			

2.4.1 Bidragsanalyse - Fossil GWP (A1-A3 + A4)

Fokus lægges i denne sektion på GWP-fossil (samt direkte biogene emissioner fra husdyrgødning) relateret til produktionsforhold. Figur 23 og Figur 24 sammenligner bidrag til GWP-fossil for de forskellige scenarier oplistet tidligere. I Figur 24 er modul A4 tilføjet med henblik på at belyse hvad transporten fra produktionssted til byggeplads har af betydning for GWP-fossil.



Figur 23: Bidrag til GWP-fossil i modul A1-A3 for produktionen af 1 kg træfiberisolering i SE og DK ved forskellige allokeringsscenarier for miljøpåvirkninger fra kulturetablering, hugst og energiforbrug på savværk.



Figur 24: Bidrag til GWP-fossil i modul A1-A4 for produktionen af 1 kg træfiberisolering i SE og DK ved forskellige allokeringsscenarier for miljøpåvirkninger fra kulturretablering, hugst og energiforbrug på savværk. I A4 antages transportdistancer til 710 km for SE og 100 km for DK.

2.5 Konstruktionstræ

Tabel 64: Klimapåvirkninger for produktionen af 1 m³ konstruktionstræ opgjort efter EN15804 + A2

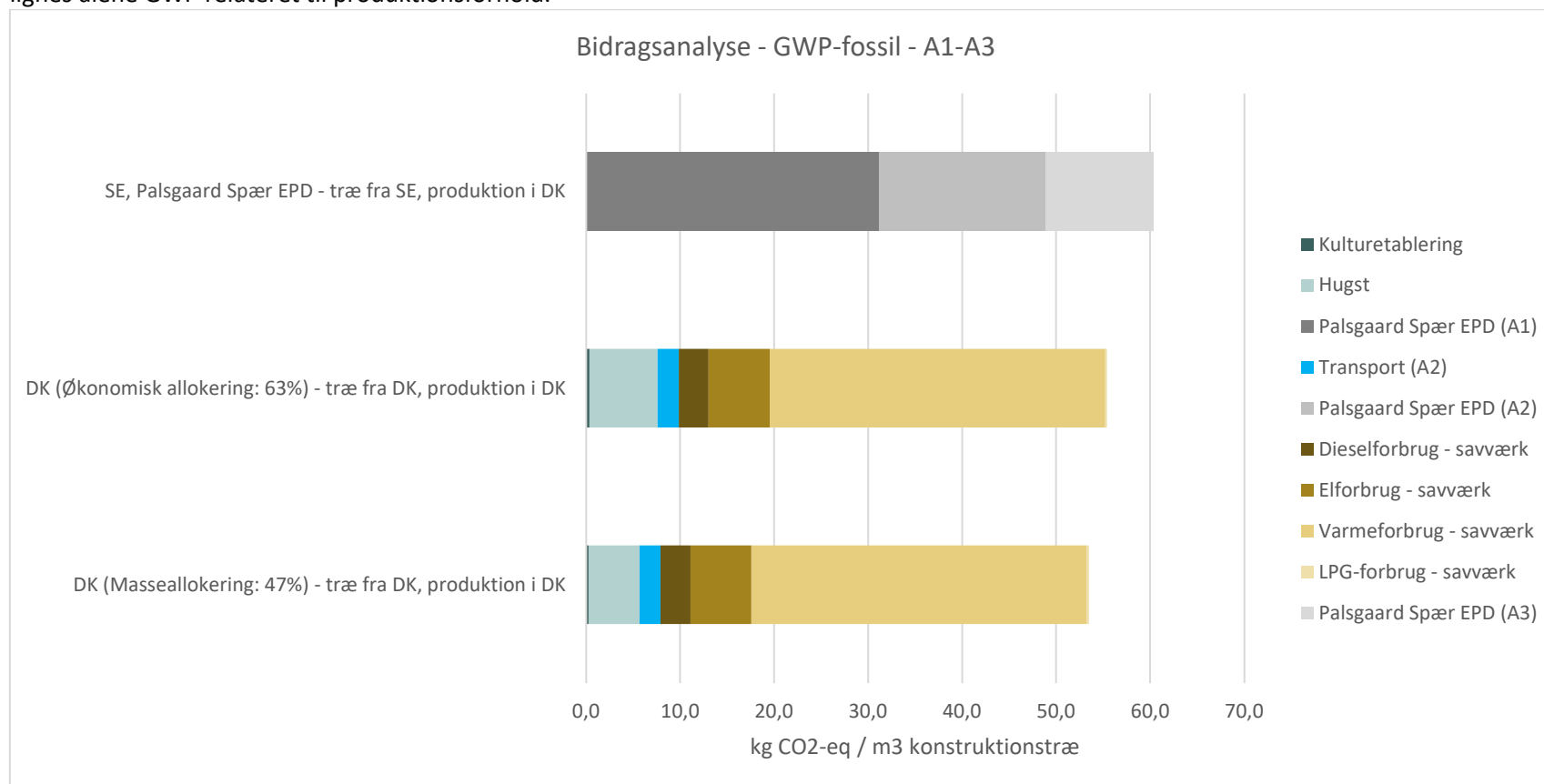
Klimapåvirkninger per m ³ konstruktionstræ (A1-A3)				
		Palsgaard Spær EPD	DK - Økonomisk allokering: 63%	DK - Masseallokering: 47%
		Træ fra SE, produktion i DK	Træ fra DK, produktion i DK	Træ fra DK, produktion i DK
GWP-total	kg CO ₂ eq	-686	-755	-756
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	60	55	53
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	-745	-810	-810
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0,4	0	0
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use			
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.			

Tabel 65: Klimapåvirkninger for bortskaffelsen af 1 m³ konstruktionstræ opgjort efter EN15804 + A2

Klimapåvirkninger for bortskaffelse af 1 m ³ konstruktionstræ (C3-C4)				
		C3-C4: DK, affaldsscenario: forbrænding	C3-C4: DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (60% effektivitet)	C3-C4: DK, affaldsscenario: forbrænding m. CCS (90% effektivitet)
			CCS-effektivitet: 60%	CCS-effektivitet: 90%
GWP-total	kg CO ₂ eq	796	373	134
GWP-fossil	kg CO ₂ eq	13	59	55
GWP-biogenic	kg CO ₂ eq	782	313	79
GWP-luluc	kg CO ₂ eq	0	0	0
Caption	GWP-total = Global Warming Potential - total; GWP-fossil = Global Warming Potential - fossil fuels; GWP-biogenic = Global Warming Potential - biogenic; GWP-luluc = Global Warming Potential - land use and land use change; ODP = Ozone Depletion; AP = Acidification; EP-freshwater = Eutrophication – aquatic freshwater; EP-marine = Eutrophication – aquatic marine; EP-terrestrial = Eutrophication – terrestrial; POCP = Photochemical zone formation; ADPm = Abiotic Depletion Potential – minerals and metals; ADPf = Abiotic Depletion Potential – fossil fuels; WDP = water use			
Disclaimer:	The results of this environmental indicator shall be used with care as the uncertainties on these results are high or as there is limited experienced with the indicator.			

2.5.1 Bidragsanalyse – Fossil GWP (A1-A3)

Figurerne i dette afsnit angiver alene GWP-fossil og dermed er lagringen af biogent kulstof i materialerne trukket ud af grafen. Dermed sammenlignes alene GWP relateret til produktionsforhold.



Figur 25: Bidrag til GWP-fossil i modul A1-A3 for produktionen af 1 m³ konstruktionstræ i SE og DK ved forskellige allokeringsscenarier for miljøpåvirkninger fra kulturetablering, hugst og energiforbrug.

3 Fortolkning

I dette afsnit belyses de væsentligste aspekter fra resultaterne. Det er vigtigt at nævnte at fokus lægges på GWP-fossil samt direkte udledninger af biogent kulstof fra husdyrgødning. Et mindre fokus vil derimod være på det biogene kulstof, da dette kun afviger minimalt, når man ser indenfor et specifikt byggemateriale. Dette skyldes naturligvis, at kulstofoptaget er modelleret på tilsvarende måde for alle inkluderede scenarier indenfor en specifik byggevarer. Resultaterne viser med få undtagelser, at det biogene kulstof har afgørende betydning for det samlede klimaaftryk. For alle byggematerialer med undtagelse af græsisolering (panel og løsfyld) ses således en negativ GWP-total for modul A1-A3. Der bliver altså – som forventet – lagret mere kulstof i byggematerialerne end der udledes ved produktion og det er netop dette, som er essentielt ved biogene byggematerialer. Dette leder os frem til det fossile kulstof, som i denne sammenhæng er centralt at fokusere på, når man forsøger at optimere produktionen af et biogent byggemateriale. Det er fossile CO₂-aftryk, som direkte kan påvirkes igennem produktionskæden i modsætning til det biogene kulstof, som er fastlagt af de (biogene) materialers evne til at optage CO₂ under vækst.

3.1 Allokering

Allokering af miljøpåvirkninger har generelt stor betydning for resultaterne. I Tabel 75 i appendiks undersøges allokeringens betydning for klimapåvirkning i A1 og A1-A3. Betydning af kunstgødning og husdyrgødning undersøges i et senere afsnit. Procenttallene i tabellen angiver stigning ift. scenariet med den laveste allokeringfaktor. Der sammenlignes ikke på tværs af byggematerialer.

Resultaterne viser, at allokeringens faktor især har betydning for de biogene ressourcer som kultiveres på mark. Ved disse ressourcer ses en stigning på minimum 30% i A1 og minimum 28% i A1-A3. Dette indikerer, at processer relateret til marken samt forarbejdning af afgrøde (bioraffinering og skætning) har stor indflydelse på byggematerialets aftryk. Det er således helt essentielt, at man fastlægger den korrekte allokeringfaktor for disse ressourcer, så man får et reelt tal for byggematerialets klimaaftryk.

Fastlæggelse af allokeringens faktorer er imidlertid ikke nogen nem opgave, da flere faktorer spiller ind. Et af de klareste argumenter for anvendelsen af økonomisk allokering er, at metoden fortæller noget om det primære formål med produktionen af et givent produkt – altså hvad der rent økonomisk driver produktionen. Når man taler afgrøder, så vil kultivering altid foregå ud fra et økonomisk perspektiv. Der vil således altid ligge et økonomisk incitament bag ved kultivering af afgrøden. Dette betyder også, at en økonomisk allokering af miljøpåvirkninger bør ses, som det mest retvisende, da man allokere påvirkninger hen på de produkter/det formål, som driver kultiveringen.

Det er vigtigt at påpege, at økonomisk allokering bør ses som dynamisk nærmere end statisk. Med dette menes der, at økonomiske allokeringens faktorer må forventes at ændre sig, når nye formål for kultivering/produktion opstår. I denne publikation undersøges det, hvordan man kan benytte alternative biogene ressourcer i produktionen af byggematerialer. Der er således tale om scenarier, som enten er på tegnebrættet eller som endnu kun har begrænset udbredelse. Hvis man i fremtiden får udfoldet potentialet i de forskellige afgrøder, så er man også nødt til at validere de allokeringens faktorer man benytter for en given afgrøde. Dette skyldes, at incitamentet for kultivering af en afgrøde kan være ændret med introduktionen af nye produkter, hvori afgrøden kan bruges.

For byggematerialer som træfiberisolering og konstruktionstræ har allokeringmetoden jf. Tabel 75 kun en mindre indflydelse. Dette skyldes, at den største andel af klimapåvirkningen for træfiberisoleringen kan tilskrives produktionen af brandhæmmer, ammonium sulfat og elektricitet. For konstruktionstræ kan klimapåvirkningen primært tilskrives varmekonsumet i modul A3.

3.2 Gødsning: kunstgødning vs. husdyrgødning

Byggematerialer baseret på landbrugsafgrøder undersøges med forskellige scenarier for gødsning. Som nævnt tidligere kan scenariet med 100% kunstgødning ses som et *worst case* scenarie. Scenariet med 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning er medtaget, da dette anses som et mere relevant scenarie i dansk kontekst jf. (Rolighed, Thorsen, & Blicher-Mathiesen, 2023). Det skal nævnes, at estimering af direkte udledninger fra husdyrgødning er forbundet med stor usikkerhed, da forhold som vejr og jordbundsforhold spiller ind i dette og kan ændre udledningerne relativt meget (AU Agro).

Tabel 77 viser gødningstypens betydning for klimaaftrykket i hhv. A1 og A1-A3. Først og fremmest kan det udledes, at effekten af at halvere kunstgødning vil stige med stigende allokeringfaktor grundet at netop kultivering har en stor betydning for resultaterne. Dette betyder, at man ved en stigende allokeringfaktor tilskriver en større del af miljøpåvirkningerne fra kultivering til produktet, som dermed betyder, at man vil se en større effekt fra halvering af kunstgødning.

I Tabel 77 ses der desuden tendens til, at man ved løsfyldisolering vil opnå en større effekt ved halvering af kunstgødning relativt til isoleringspanelet. For græs (økonomisk allokering: 19%) ser man således en reduktion på 13% for panelet, men 20% for løsfyld. For hamp (økonomisk allokering: 50%) er reduktionen 13% for panelet og 17% for løsfyld. Den øgede miljøpåvirkning i paneler må antages at skyldes at der generelt tilføjes flere materialer til panelerne, herunder bl.a. polyester og krydsfinér, som har en højere belastning end selve fibermaterialet, og dermed på masse-basis vil bidrage til en højere miljøpåvirkning.

I Figur 28 vises klimapåvirkning fra kultivering af 1 ha fiberhamp, vinterhvede (halm) og kløvergræs fordelt på bidrag og ved forskellige scenarier for anvendelsen af kunst- og husdyrgødning. Træ er ikke inkluderet da der som udgangspunkt ikke anvendes gødsning til kultivering af træ. I figuren er der kun medtaget fossile CO₂-bidrag samt direkte udledninger fra husdyrgødning. I Tabel 76 vises de procentvise bidrag til klimapåvirkning per kultiveret ha. Uanset scenariet for gødsning, så har kultivering af 1 ha kløvergræs det højeste klimaaftryk af alle tre afgrøder. For scenariet med 100% kunstgødning ligger det samlede klimaaftryk for kløvergræs på 2902 kg CO₂-eq/ha og hertil kan hhv. 37% og 46% af klimaaftrykket tilskrives N- og K-gødning. For scenariet med 50% kunstgødning ligger bidragene på hhv. 30% og 38% for de samme gødningsfraktioner.

Kultivering af vinterhvede og fiberhamp har miljøpåvirkninger, som ligger relativt tæt op ad hinanden, men væsentligt lavere sammenlignet med kløvergræs. I scenariet med 100% kunstgødning har vinterhvede et aftryk på 1666 kg CO₂-eq/ha sammenlignet med 1546 kg CO₂-eq/ha for fiberhamp. For vinterhvede kan klimaaftrykket primært tilskrives N-gødning (48% og 35%, afhængigt af scenarie) og diesel til maskiner (19% og 27%, afhængigt af scenarie). For fiberhamp kommer det største aftryk fra hhv. N-gødning (33% og 23%, afhængigt af scenarie) og diesel til maskiner (27% og 38%, afhængigt af scenarie).

Selvom dette studie ikke medtager miljøpåvirkningskategorierne for eutrofiering, er det alligevel relevant at kigge på forskellen i udvaskning af næringsstoffer fra kunstgødning kontra husdyrgødning. Generelt varierer næringsstofudvaskning som funktion af afgrødetyper, jordtyper, klima og flere andre faktorer. På side 257 i (Eriksen, Thomsen, Hoffmann, Hasler, & Jacobsen, 2020) har man dog estimeret en merudvaskning på 3-5% af den totale tilførte husdyrgødnings-N sammenlignet med gødskning med kunstgødning. Dermed vil man altså forvente en lidt større påvirkning af akvatiske økosystemer ved anvendelse af husdyrgødning sammenlignet med kunstgødning.

3.3 Vejsidegræs vs. kultiveret græs

For græsisoleringspanelet er der inkluderet et scenarie, hvor græsset er høstet fra vejsider fremfor at være kultiveret. Medtagelsen af dette scenarie skyldes – som tidligere nævnt – at Gramitherm benytter sig af vejsidegræs. Vejsidegræs er modelleret med udgangspunkt i den samme kilde, som er benyttet til modellering af græskultivering. Forskellen ligger i, at der for vejsidegræs kun er medtaget diesel- og olieforbrug til maskiner. Det er således også antaget, at man har samme græsudbytte, hvilket må ses som en forsimpning af virkeligheden. Klimapåvirkningen for høst af vejsidegræs er 277 kg CO₂-eq/ha. Sammenlignet med kultiveret græs er dette væsentligt lavere, da kultivering m. 100% kunstgødning jf. forrige afsnit har en klimapåvirkning på 2902 kg CO₂-eq/ha, imens et scenarie med 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning giver et aftryk på 1752 kg CO₂-eq/ha. Alene baseret på disse tal vil anvendelsen af vejsidegræs være mest gavnligt at benytte rent klimamæssigt. Man bør dog have med sig i overvejelserne, at vejsidegræs sandsynligvis ikke kan benyttes i proteinproduktion, da man kunne forestille sig at græs fra vejsider kan indeholde en grad af forurening fra transportmidler. Herudover skal man have in mente at høst af vejsider kan modarbejde forøgelsen af biodiversitet.

3.4 Betydning af produktionsforhold og -lokation

Nedenfor kommenteres der kun på byggevarer, hvor grundlaget for en fair sammenligning på tværs af produktionslokation er til stede. Dette betyder, at der kun ses på byggevarer, hvor der eksisterer en EPD (med stor nok detaljegråd til at det har været muligt at modellere et lignende dansk scenarie) eller hvor det har været muligt at få baggrundsdata. De øvrige byggevarer kommenteres i et senere afsnit vedr. datakvalitet.

3.4.1 Halmelement

Sammenlignes det nuværende produktionsscenarie i LT med optimerede produktionsscenarier placeret i SK og DK ses det, at fremtidige produktionsforhold medfører en reduktion i A1-A3 på 39% og 48% i hhv. SK og DK relativt til LT-produktionen. Denne reduktion kan først og fremmest tilskrives energiforbruget i modul A3, hvor man jf. (EcoCocon) skærer forbruget af diesel og varme fra naturgas ud af produktionen og dermed alene benytter elektricitet. Den samlede transportdistance for materialer i modul A2 har man desuden også reduceret væsentligt fra 1707 km i LT til hhv. 862 km og 1225 km i SK og DK. Her skal det understreges, at distancerne for DK er baseret på antagelser. Optimeringerne i både modul A2 og A3 har den effekt at en større andel af klimapåvirkningen findes i modul A1. Dette betyder samtidig, at allokeringsfaktoren for halm vil få større betydning for halmelementets samlede klimapåvirkning i A1-A3.

Sammenligner man den fremtidige produktion i SK og DK ses det, at man med en dansk produktion reducerer de samlede udledninger med 15% relativt til SK-scenariet til trods for at

transportudledningerne er højere for DK-scenariet (Figur 15). Reduktionen kan dermed primært tilskrives et grønnere forbrugsmix for dansk el sammenlignet med slovakisk el.

Ved tilføjelse af modul A4 er det muligt at belyse hvilken effekt transport fra produktionssted til byggeplads har for byggevarens klimaaftryk. I Figur 16 ses det, at transporten i modul A4 har en markant betydning for halmelementer produceret i hhv. LT og SK. Lokationen af byggepladsen antages at være placeret i Aarhus og transporten fra LT og SK er sat til hhv. 1687 km og 1307 km. Distancen er opmålt fra den by, hvor produktionen ligger placeret jf. oplysninger fra EcoCocon. For DK antages en transportdistance på 100 km. Det er herudover antaget, at transporten sker med en 28-32 t lastbil. Umiddelbart virker det usandsynligt, at transport kan udgøre næsten halvdelen af udledningerne i modul A1-A4, da man normalt forventer den største påvirkning i A1, hvor råmaterialerne udvindes. Derfor er tallene blevet verificeret ved brug af emissionsfaktorer fra BUILD (Kanafani, Magnes, Garnow, Lindhard, & Balouktsi, 2023)). I denne rapport har en lastbil (>20t) en udledning på 0,92 kg CO₂-eq/ton km. Hvis man benytter denne faktor for transporten af 1 m² halmelement (med vægt på 60,57 kg) og en transportdistance på 1687 km, så ender A4-udledningen på 9,40 kg CO₂-eq. Dette ligger utroligt tæt på de 9,75 kg CO₂-eq/m² halmelement, som er estimeret for LT-scenariets A4-modul i denne rapport. Som konklusion kan man sige, at en produktion i DK vil være fordelagtig, da der kan fraskæres markante klimapåvirkninger fra transport af halmelementet.

3.4.2 Græsisoleringspanel

Figur 17 indikerer en stor forskel imellem BE og DK, når man sammenligner produktionen af græsisoleringspaneler fra vejsidegræs. Klimaaftrykket for DK er 91% højere relativt til produktionen i BE. Da tallet fra BE er taget fra en EPD (Gramitherm, 2023), er det kun muligt at opdele tallet på de forskellige moduler. Det er derfor ikke muligt at forklare præcist, hvori den store forskel ligger. For produktionen i DK ses det, at selve tørringsprocessen af 'pressekage' fra bioraffinering udgør en stor del af klimaaftrykket. Dette skyldes, at tørringen antages at ske ved brug af naturgas. Fra (Gramitherm, 2023) kan det læses, at 'pressekagen' tørres ved brug af varme produceret fra biogas genereret fra fermentering af brunsaft fra bioraffineringen. Dette kan være en forklaring på den store forskel. Udskiftning af naturgas med biogas til tørring af pressekagen resulterer i en reduktion på 42%-point. Dette betyder dog stadigvæk, at produktionen i DK er 49% højere relativt til BE. Inkludering af modul A4 vil ikke ændre ved konklusionen, da BE-scenariet stadig vil have lavere klimapåvirkning relativt til DK (Figur 18).

3.4.3 Træfiberisolering

Figur 23 indikerer, at en produktion af træfiberisolering i DK vil reducere det fossile CO₂-aftryk med hhv. 22% og 28% alt efter om der antages masseallokering eller økonomisk allokering. Medtages A4 vil man jf. Figur 24 se reduktion på hhv. 30 og 36% for træfiberisolering produceret i DK sammenlignet med en produktion i SE. Forskellen skyldes her, at træfiberisoleringen antages en transportdistance på 710 km i SE-scenariet og 100 km i DK-scenarierne.

3.5 Affaldshåndtering

I Tabel 53, Tabel 55, Tabel 57, Tabel 59, Tabel 61, Tabel 63, Tabel 65 ses klimapåvirkning for bortskaffelse af de forskellige byggevarer. Dette studie undersøger - som tidligere nævnt - alternative affaldshåndteringsmetoder af forskellig teknologisk modenhedsgrad. I tillæg til dette er nogle af teknologierne i stand til at indfange og lagre kulstof. Dette strider mod EN15804, som foreskriver, at kun ibrugtaget affaldshåndteringsmetoder må inkluderes i en EPD samtidig med, at det biogene kulstof skal

nulstilles over produktets levetid. Dette betyder således, at man jf. standarden ikke må medtage indfangning af kulstof vha. teknologi. Studiet har dog imidlertid et undersøgende formål, hvorfor flere potentielle affaldshåndteringsmetoder er medtaget.

Klimaaftrykket for bortskaffelse af en byggevarer bør ses i et livscyklusperspektiv, hvor udledninger forbundet med A1-A3 medtages. Dette studier inkluderer dog så mange forskellige scenarier, at det vil være en omfattende opgave at kommentere på alle de forskellige kombinationer af scenarier. Læseren opfordres derfor selv til at sammenligne produktions- og bortskaffelsesscenarier i et livscyklusperspektiv. Dette kan gøres ved at summere klimaaftryk i A1-A3 og C3-C4. På denne måde er det muligt at se på om en byggevarer under et givent produktionsscenario vil medføre et klimaaftryk som er netto-negativt eller netto-positivt. Et netto-negativt klimaaftryk betyder at byggevareren lagrer kulstof over hele dens levetid, hvorimod et netto-positivt aftryk betyder, at byggevareren i de fleste tilfælde vil lagre kulstof i bygningen, men ved nedrivning af bygningen og bortskaffelse vil kulstoffet frigives til atmosfæren.

4 Diskussion

I modelleringen af livscyklusvurderinger skal der foretages forskellige afgrænsninger, antagelser mv, som har betydning for resultaterne. Følgende afsnit beskriver kvaliteten på den benyttede data samt andre aspekter af modelleringen ift. overvejelser, antagelser og metoder.

4.1 Datakvalitet

4.1.1 Halmelement

Generelt anses datakvaliteten for halmelementet som værende fornuftigt. Afgrødekultiveringen er modelleret med en kilde på hvedekultivering og medtager alle relevante flows for kultivering. Selve produktion af halmelementet er baseret på EPDen fra EcoCocon og dermed må den benyttede data anses som repræsentativ. Sammenlignes resultater (A1-A3) fra EcoCocons EPD med resultater fra modellering af LT-produktionen i *LCA for Experts* (LCAFE), så ligger LCAFE-modellen 27% lavere relativt til EPDen. Dette strider mod forventningen om, at disse to resultater burde være mere eller mindre ens, da modellen er bundet op på data angivet i EPDen.

Fra Figur 15 kan det udledes, at forskellen skal findes i modul A1, hvor klimapåvirkningen er 59% lavere for LCAFE-modellen relativt til EPDen. Da størstedelen af klimapåvirkningen kan tilskrives afgrødekultivering og produktion af skruer formodes det, at forskellen skal findes heri. I EPDen er kultivering modelleret med et generisk datasæt for halm fra hvedeproduktion, som har global repræsentativitet. Den globale repræsentativitet kan være en del af forklaringen på forskellen, da man må forvente, at der medtages produktion i lande, som har en mindre bæredygtig kultivering end den man ser i europæiske lande. I EPDen fremgår det tilmed, at skruerne stammer fra et globalt datasæt fra Nationale Milieudatabase v3.3. Til sammenligning antages det i LCAFE-modellen, at skruerne har europæisk repræsentativitet. Dette kan spille ind i forskellen, da et globalt datasæt må forventes også at inkludere produktion af skruer i lande, som benytter flere fossile energikilder sammenlignet med Europa.

4.1.2 Græsisolering

Produktion af græsisoleringspanelet er modelleret ved brug af data fra Gramitherm. Det har dog ikke været muligt at få data på selve energiforbruget til produktion af panelet. Som løsning på dette er der anvendt et energiforbrug fra en presse-proces, da det anses som værende repræsentativt for

produktionen af isoleringspaneler. Sammenlignes resultater fra EPDen med det danske scenarie for vejsidegræs, så er DK-scenariet 52% højere relativt til EPDen.

Jf. information i Gramitherms EPD (Gramitherm, 2023) ses det, at den lave GWP for A1 skyldes at Gramitherms leverandør af græs anvender biogas, genereret ved fermentering af brunjuicen, til tørring af græsfibre. Denne må derfor antages at være neutral. Derudover anvender Gramitherm kasserede jutesække, tidligere anvendt til kakaobønner. Jutefibre i Gramitherms EPD har dermed et lavt aftryk, da det udelukkende er elektricitet til neddeling af fibre der er inkluderet.

I det modellerede danske scenarie, er der anvendt naturgas til tørring af græsfibre samt jomfruelige jutefibre.

Produktion af græsisolering som løsfyld er modelleret med udgangspunkt i Woodfibers EPD for træfiberisolering. Dette er gjort med antagelsen om, at produktionen og sammensætning af træfiberisolering og græsisolering som løsfyld må følge nogenlunde samme fremstillingsproces. Dette betyder også, at der ikke har været en baseline – i form af en eksisterende EPD - at holde resultatet op imod. Resultatet kan derfor alene bruges som en indikation på det klimaaftryk som løsfyld græsisolering vil have.

Det største potentiale for anvendelsen af græsfiberisolering i en dansk kontekst vil være afhængig af muligheden for at anvende vejsidegræs, som ikke skal kultiveres og dermed gødskes. Derudover skal tørringsprocessen af græsfibre optimeres. Således der er videst mulige omfang anvendes fornybar energi.

4.1.3 Hampisolering

Materialiesammensætningen for hampisoleringspanelet er modelleret med udgangspunkt i Ekolutions EPD (Ekolution AB, 2024) på en tjekkisk produktion af hampisoleringspaneler. Fra denne EPD har det hverken været muligt at se energiforbrug til produktion eller detaljer vedr. kultivering af hamp. Dette betyder, at der ikke eksisterer et fair sammenligningsgrundlag mellem LCAFE-modellerne på en dansk produktion og EPDen. Hampisolering som løsfyld følger samme modelleringstilgang som træfiberisoleringen. Dette betyder, at resultaterne udelukkende kan ses som en indikation på, hvordan klimaaftrykket for en sådan isoleringstype vil kunne se ud.

For klimaaftrykket relateret til kultivering af fiberhamp skal der tages forbehold for, at modelleringen er baseret på et italiensk studie, som er forsøgt tilpasset til et dansk scenarie. Dette skyldes, at fiber- og frøhamp ikke er en særligt udbredt afgrøde i Danmark, hvorfor det generelt har vist sig at være sparsomt med data.

4.1.4 Træfiberisolering

Træfiberisolering produceret i DK udviser – som tidligere nævnt – et væsentligt lavere klimaaftryk relativt EPDen fra Woodfiber på en produktion i SE. Woodfiber har stillet baggrundsdata til rådighed og dermed er LCAFE-modellerne blevet lavet så tæt på EPDen som overhovedet muligt. Til trods for dette varierer LCAFE-modellerne stadig markant fra EPDen. Det har ikke været muligt at se de forskellige modulers bidrag til klimaaftrykket for EPDen, da denne kun opgør resultater samlet for A1-A3. Dette besværliggør naturligvis en dybere sammenligning af LCAFE-modellerne og EPDen.

For LCAFE-modellerne skal det nævnes, at energiforbrug på savværk og allokering af dette til træflis følger en svensk kilde og dermed er denne allokering ikke fuldt ud repræsentativ for et dansk

scenarie. Der må dog kun forventes en mindre variation af energiforbrug og allokeringsfaktorer ved sammenligning af et dansk og svensk savværk.

4.1.5 Konstruktionstræ

Til modellering af konstruktionstræ har baggrundsrapporten for Palsgaard Spærs EPD været tilgængelig. Fra baggrundsrapporten har det være muligt at se det specifikke energiforbrug til produktion af konstruktionstræ, hvilket dermed er anvendt i LCAFE-modellerne for konstruktionstræ produceret i DK. Der har dog vist sig et problem i, at EPDen på konstruktionstræ benytter sig af en anden EPD på svensk råtræ. I denne EPD kan det læses, at råtræ gennemgår tørring og opskæring, men ikke hvor meget energi som benyttes til disse processer. For at få en fair sammenligning mellem Palsgaard Spærs EPD og LCAFE-modellerne er det valgt at tilføje et ekstra varmemeforbrug i A3 i LCAFE-modellerne.

Det skal desuden nævnes, at EPDen og LCAFE-modellerne udviser en relativt stor forskel i kulstofoptag fra træet (745 kg CO₂-eq vs. 810 kg CO₂-eq). Denne forskel skyldes, at det benyttede data for træ, varierer mellem EPDen og LCAFE-modellerne. Som læser skal man derfor være varsom, når man sammenligner enten GWP-biogenic eller GWP-total, da træets kulstofoptag har stor betydning for resultaterne. I stedet anbefales det, at man alene ser på GWP-fossil, da det som nævnt tidligere er en faktor man aktivt kan påvirke ved at lave ændringer i produktionsforhold.

4.2 Teknologier

I dette studie arbejdes der med forholdsvis nye produktionskæder og teknologier, som i nogle tilfælde endnu kun har begrænset udbredelse. Resultaterne for både produktion af byggevarer samt affaldshåndtering kan derfor udelukkende ses som en indikation på, hvordan klimaaftrykket vil se ud for et givent scenarie. Oven i dette er det også vigtigt at have in mente, at resultatet blot kan ses som et øjebliksbillede af virkeligheden. Går man et par år frem i tiden må det forventes, at teknologier som bioraffinering, pyrolyse og CCS har udviklet sig markant.

Bioraffinering

Konceptet omkring bioraffinering af grøn biomasse er undersøgt i adskillige studier. Ved Institut for Bio- og Kemiteknologi på Aarhus Universitet (AU) har man siden 2012 medvirket i omkring 60 videnskabelige udgivelser relateret til emnet. Til modellering af bioraffineringen er der i denne publikation primært taget udgangspunkt i udgivelsen fra (Chan, et al., 2024), som på dette tidspunkt (juli, 2024) er blandt de nyeste udgivelser om grøn bioraffinering fra AU. Denne kilde er suppleret med data fra (Corona, Morten, Croxatto, Hauschild, & Birkved, 2018) som er af ældre dato. Jf. Figur 17 og Figur 19 har det vist sig, at selve bioraffineringsprocessen ikke er den som bidrager med det største klimaaftryk i produktionskæden af græsisolering. Det gør derimod kultivering af græs samt selve tørringsprocessen af 'pressekage'. Til trods for dette, vurderes det alligevel vigtigt, at man kontinuerligt kortlægger de input- og outputflows man har til og fra bioraffineringsprocessen, da dette er afgørende for at forstå miljøaftrykket for en sådan produktion. Ved dokumentation af dette sikres det, at man med en rimelig nøjagtighed kan sammenligne bioraffineringsprodukterne med benchmark, som for GPC vil være konventionelt sojaprotein og for græsisolering konventionelle isoleringsmaterialer som stenuld.

Et andet vigtigt aspekt ift. bioraffinering er infrastrukturen og udviklingen af denne. På nuværende tidspunkt er der kun få anlæg til bioraffinering i DK. Dette betyder også, at man er afhængig af at

udvikle infrastrukturen, hvis man i fremtiden skal se en storskala produktion af græsisolering. Der er fra Landbrugsstyrelsen afsat en projektmodningspulje, som i 2023 fik ansøgninger til 12 nye bioraffineringsprojekter. Dette medførte, at styrelsen fremrykkede midler som først skulle være givet i 2025 (Landbrugsavisen, Stor interesse for at bygge nye grønne bioraffineringsanlæg, 2023). Dette indikerer altså, at der er en markant interesse for grøn bioraffinering, som må forventes at drive den teknologiske udvikling til fordel for miljøaftryk og økonomi.

Pyrolyse

I dette studie antages det jf. sektion 1.11.4, at 27,6% af C-indholdet i halm bindes efter pyrolyse. Med et fugt- og C-indhold i halm på hhv. 8% og 0,44 kg C/kg halm kan der estimeres en kulstofbinding i biokul på 0,41 kg CO₂-eq per kg pyrolyseret halm¹⁸. Da pyrolyseteknologien stadig befinder sig i udviklingsstadiet, må kulstofbindingseffektiviteten forventes at kunne ændre sig. Et review-studie på biokul (Li & Tasnady, 2023) viser, hvordan kulstofbindingen varierer med både råmaterialeinput samt pyrolysetemperaturen. Ved undersøgelse af optimale pyrolysetemperaturer for kulstofbindingen i forskellige biomasser ses der tendens til, at kulstofbinding i biokul fra træbiomasse stiger som funktion af pyrolysetemperaturen. Samme tendens ses ikke for majsrester og præriehirse (switchgrass). Dette indikerer vigtigheden i at kortlægge optimale pyrolysebetingelser for de biomassetyper, som man ønsker at benytte i pyrolyseanlægget. På denne måde kan man altså undgå at bruge for meget energi til pyrolyseprocessen for de biomassetyper, hvor en højere pyrolysetemperatur ikke vil resultere i højere kulstofbinding.

Det kan være omkostnings- og ressourcetungt at etablere infrastrukturen til et pyrolyseanlæg, da det omfatter alt fra indsamlingen af råmaterialer til drift og vedligehold af pyrolyseanlægget. Da teknologien er i sit tidlige stadie, eksisterer der heller ikke et betydeligt marked for handel med biokul og den gennemsnitlige markedspris på verdensplan har tidligere ligget på omkring 2,65 \$ per. kg biokul med variationer fra 0,09 til 8,85 \$ per. kg biokul. De gennemsnitlige omkostninger er på samme tidspunkt blevet estimeret til 5,0 \$ per. kg biokul, hvilket er tæt på en fordobling ift. markedsprisen (Li & Tasnady, 2023). Disse tal indikerer altså, at der skal ske væsentlige udviklinger i pyrolyseteknologien før det bliver rentabelt. Det må dog formodes, at omkostningerne vil falde med størrelsen på anlæggene jf. *Economies of Scale*-konceptet (Science Direct, 2016).

CCS

CCS er en teknologi, som er svær at vurdere, da det ikke blot omhandler fangst af CO₂ ved punktkilden, men hele proceskæden med fangst, transport og lagring (COWI, 2021). Der skal således ikke blot tages højde for energi- og brændstofforbrug til fangst og transport, men også hele den indlejrede del af CO₂ i infrastrukturen. I dette studie er der kun medtaget energiforbrug ved punktkilden (1,22 MJ/kg CO₂ indfanget) baseret på CCS på et kulkraftværk samt etablering af anlæg, modelleret med et generisk *Ecoinvent* datasæt; '*synthetic gas factory construction*'. Dette betyder altså, at der i resultaterne ikke tages højde for transport og lagring af CO₂.

Et andet aspekt at tage højde for ved vurdering af CCS er tilgængeligheden af fornybar energi. Det skal sikres, at den energi der bruges til indfangning, har oprindelse fra vedvarende energikilder. Dette er vigtigt, da man ved brug af elektricitet fra fossile brændsler risikerer at udligne effekten af den indfangede CO₂. Dette kan illustreres ved et simpelt eksempel, hvor man sammenligner anvendelsen af

¹⁸ $0,44 \text{ kg C} \cdot (44/12) = 1,61 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \rightarrow (1-0,08) \cdot 1,61 \text{ kg CO}_2\text{-eq} = 1,48 \text{ kg CO}_2/\text{kg halm} \rightarrow 1,48 \text{ kg CO}_2/\text{kg halm} \cdot 27,6\% = 0,41 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$

elektricitet fra afbrænding af kul med elektricitet fra vind. Ved brug af *Sphera* datasættet 'DK: *Electricity from hard coal*' får man en emissionsfaktor på 0,873 kg CO₂-eq/kWh. Dette kan omregnes til 0,24 kg CO₂-eq/MJ, som videre kan benyttes til at estimere en udledning på ca. 0,3 kg CO₂-eq/kg CO₂ indfanget¹⁹. Til sammenligning får man ved anvendelse af *Sphera* datasættet 'DK: *Electricity from wind power*' en emissionsfaktor på 0,01 kg CO₂-eq/kWh, som kan omregnes til 0,003 kg CO₂-eq/MJ. Dette giver et klimaaftryk på 0,0033 kg CO₂-eq/kg CO₂ indfanget²⁰, hvilket er væsentligt lavere sammenlignet med kul. Opsummeret betyder det altså, at effekten af CCS vil blive markant større ved brug af vedvarende energi.

4.3 Afgrøder

Valg af afgrøder er som tidligere nævnt begrundet med udbredelsen i dansk landbrug, kulstoflagringskapaciteten, samt eksisterende produktionskæder for anvendelsen af afgrøderne i byggematerialer. I et dansk scenarie er produktionskæderne for anvendelsen af halm og græs dog relativt uprøvede og derfor er det vigtigt at kortlægge landbrugsarealerne for derved at finde optimale placeringer for både bioraffinaderiet, men også selve produktionen af byggematerialerne.

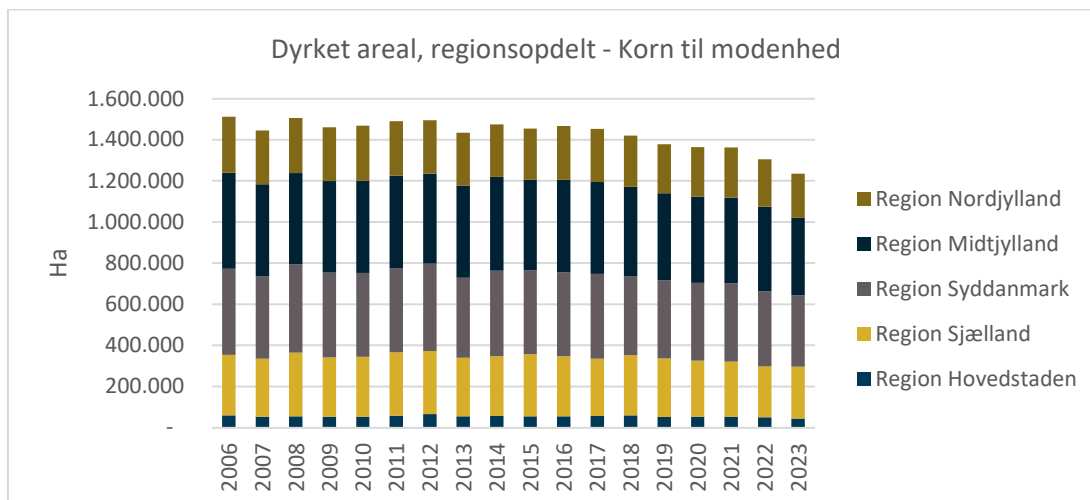
Med udgangspunkt i data fra Danmarks Statistik har det været muligt at lave Figur 26 og Figur 27, som viser det dyrkede areal for hhv. korn og kløver/græs fra 2006 til 2023. Herfra kan det udledes, at der generelt har været en høj grad af opdyrkede arealer til korn og græs svarende til hhv. 28-35% og 6-8% af Danmarks areal²¹. Der ses dog også tendens til en svagt faldende kultivering af afgrøderne frem mod 2023. Hvis der skabes et marked for halm- og græsbaseerede byggematerialer, må der forventes en stigning i de opdyrkede arealer for disse afgrøder. Dette skyldes, at der forventeligt vil komme et øget økonomiske incitament til at dyrke afgrøderne, da en større del af ressourcerne kan udnyttes i højværdi-produkter. Dette vil samtidig have en positiv effekt på klimaet, da man lagrer kulstoffet i byggematerialerne fremfor f.eks. at brænde det til energiformål, som man gør med halm. Halm udgjorde i 2022 12% af den samlede biomasse, som blev brugt til energiproduktion (Danmarks Statistik, 2022) og ligger typisk med en pris på 53 kr/100 kg (0,53 kr/kg), når det sælges til energisektoren (Danmarks Statistik, 2024). Hvis det samtidig antages, at halmisolering vil have nogenlunde samme pris, som konventionel stenuldsisolering med en forbrugerpris på ca. 146 kr./kg²² så må det forventes, at landmænd i stedet vil sælge halmen til producenter af byggematerialer. De to priser er naturligvis ikke direkte sammenlignelige, da isoleringsprisen repræsenterer et forarbejdet produkt. Man må dog formode, at råvareprisen for halm til isoleringsprodukter vil stige med efterspørgslen på byggematerialerne og derfor må det forventes, at der vil komme et større incitament til at halm sælges til byggematerialer fremfor energiproduktion.

¹⁹ 1,22 MJ/kg CO₂ indfanget * 0,24 kg CO₂-eq/MJ = 0,3 kg CO₂-eq/kg CO₂ indfanget

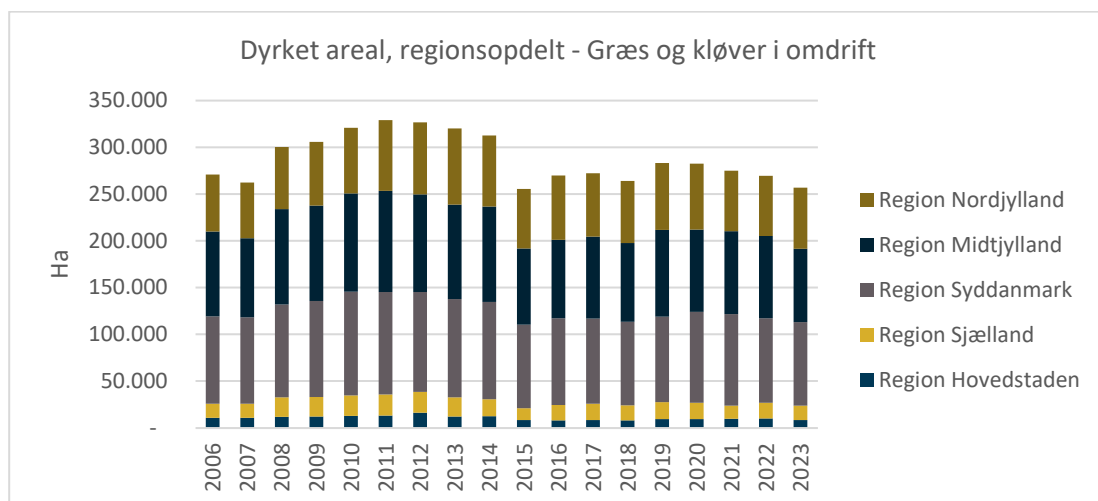
²⁰ 1,22 MJ/kg CO₂ indfanget * 0,003 kg CO₂-eq/MJ = 0,0033 kg CO₂-eq/kg CO₂ indfanget

²¹ Danmarks areal ≈ 4.295.200 ha

²² Baseret på prisen for en pakke Rockwool A-batts med følgende parametre; volumen = 0,05 m³, pris = 224 kr./m³, densitet = 30 kg/m³



Figur 26: Opdyrkning af arealer til korn opdelt på regioner (Danmarks Statistik, korn, u.d.)



Figur 27: Opdyrkning af arealer til græs og kløver opdelt på regioner (Danmarks Statistik, Græs og kløver, u.d.)

Ser man igen på Figur 26 og Figur 27 er det tydeligt, at Region Midtjylland og Syddanmark har de største arealer af opdyrket jord til halm, græs og kløver. Dette indikerer, at den optimale placering af bioraffinaderier og produktionsfaciliteter må være i disse regioner. Man er dog nødt til at gå et spadestik dybere og se på, om der er steder i regionerne, hvor der er en større koncentration af opdyrkede arealer. Til denne opgave vil brugen af et GIS-værktøj²³ vil være til stor hjælp, da man med dette værktøj kan danne sig et overblik over afgrøderne og samtidig analysere optimale transportveje til og fra markerne. En sådan undersøgelse ligger dog udenfor omfanget af denne publikation.

4.4 EN 15804:2012 + A2:2019

I dette studie læner vi os op ad EN 15804:2012 + A2:2019, men samtidig er der også visse afvigelser, da studiet har til formål at udfordre de nuværende standarder, hvor det bl.a. foreskrives, at det biogene kulstof skal gå i nul over livscyklussen.

²³ Geografiske Informations Systemer

En væsentlig afvigelse fra standarden er, at der alene kigges på GWP og dermed ekskluderes øvrige miljøpåvirkningskategorier. Samtidig lægges der fokus på bevægelsen af det biogene kulstof, da formålet med studiet er at undersøge potentialet ift. lagring af kulstof i de forskellige byggematerialer. En væsentlig afvigelse fra EN 15804:2012 + A2:2019 er samtidig, at det biogene kulstof ikke går i nul over livscyklussen. I stedet belyses potentialet for forskellige affaldshåndteringer ift. at bevare lagringen af kulstoffet efter at byggematerialet er udtjent.

En anden væsentlig afvigelse fra EN 15804:2012 + A2:2019 er de opstillede affaldshåndteringsscenerier. Standarden foreskriver, at scenarier for affaldshåndtering skal være repræsentative for materialet og samtidig veletablerede. I dette studie arbejdes der med teknologier som pyrolyse og CCS, som endnu ikke kan anses som veletablerede og udbredte. Forskning og udvikling i teknologierne er dog stor og man må forvente, at de i fremtiden bliver etablerede teknologier og dermed kan blive repræsentative scenarier.

En tredje og vigtig afvigelse fra standarden er brugen af allokeringsmetoder. Når man har en produktion med flere outputs, foreskriver EN 15804:2012 + A2:2019, at allokering af co-produkter skal baseres på masse eller volumen i tilfælde, hvor forskellen i indtægt for produkterne er lav (<25 % forskel). Ved en forskel over 25% skal allokeringen i stedet baseres på økonomi. Da dette studie som nævnt har til formål at være undersøgende, så er det valgt at inkludere forskellige allokerings-scenarier for halm, græs, hamp og træ. På denne måde er det muligt at se allokeringsmetodernes indflydelse på byggevarens klimaaftryk.

4.5 ALCA vs. CLCA

I studiet benyttes en ALCA-tilgang, da dette følger retningslinjerne for udarbejdelse af EPDer. I ALCA estimeres et produkts miljøpåvirkning på baggrund af bagudrettede produktionsdata. Man forsøger at isolere et produkt fra et større system for derved at kunne beskrive miljøpåvirkninger forbundet med fremstillingen af produktet. Det er netop i processen med at isolere produktet fra et større system, at problematikken opstår. Et produkt vil altid være en del af et større system, som må forventes også at blive påvirket enten direkte eller indirekte ved efterspørgsel på produktet. Dette er især vigtigt at have in mente, når miljøaftrykket på alternative løsninger til konventionelle byggematerialer skal bestemmes. Antages det, at efterspørgslen på biogene byggematerialer stiger, så må det forventes at have en større miljømæssig effekt end det man blot ser i produktionen af produktet. Tager man græsisolering som eksempel må det forventes, at en øget efterspørgsel vil have den effekt at større arealer henlægges til græsprødsproduktion. Dette vil medføre, at der vil være et mindre areal til dyrkning af korn eller andre afgrøder. Dette vil videre have effekten af, at andre arealer (fx skove) benyttes til landbrugsproduktion. Sådanne afledte effekter inkluderes ikke i ALCA. Til dette bør man i stedet benytte en CLCA-tilgang, hvor man tager hensyn til ændringer i systemet, der kan opstå som respons på ændringer i efterspørgsel eller produktion af et produkt. I en CLCA-tilgang medfører en øget efterspørgsel på biogene ressourcer således en øget produktion af afgrøder ved en 100% lækage effekt²⁴. Endvidere vil dette medføre en øget efterspørgsel til *land use* ved en 100% lækage effekt, med forudsætningen om, at efterspørgsel på afgrøder og foder er stigende. Dette vil blive nærmere belyst i publikation XX. Man kan således også sige, at hvor ALCA er statisk og bagudrettet, så medtager CLCA fremtidsperspektivet, når et produkts miljøaftryk bestemmes.

²⁴ Lækageeffekten opstår, når en indsats for at reducere ressourceanvendelse et sted resulterer i øget anvendelse et andet sted

5 Opsamling

Formålet med publikationen har været at udforske klimaaftrykket relateret til produktionen af biogene byggematerialer. Den geografiske placering af en produktion har vist sig at have stor indflydelse på byggevarens klimaaftryk. Dette skyldes dels, at der - selv indenfor Europa - ses stor forskel i klimaaftrykket for forskellige landes el-mix, men også at transport af tunge byggematerialer over lange afstande kan bidrage med markante klimaaftryk. Allokering af faktorer har tilmed vist sig som en betydende faktor ift. en byggevarers klimaaftryk. Det er derfor essentielt at vælge den korrekte allokering af faktorer, når man afsøger nye materialer til anvendelse i byggeri. Der kan findes stærke argumenter for hvorfor økonomisk allokering bør benyttes. Denne allokering metode anses som mest retvisende, da det er økonomiske incitament, som er med til at drive kultivering af en afgrøde. Derfor kan der argumenteres for, at allokering af miljøpåvirkninger skal ske på baggrund af priser relateret til de forskellige outputs, som kan skabes fra afgrøden.

Resultaterne har tilmed påvist, at man ved en halvering af kunstgødning kan opnå væsentlige klimamæssige fordele, da produktionen af kunstgødning er forbundet med et relativt stort klimaaftryk. For græsisolering vil man opnå de største reduktioner i klimaaftrykket, da kultivering af kløvergræs har et relativt stort input af N- og K-gødning sammenlignet med hamp og vinterhvede. Man bør dog også være opmærksom på, at estimater på direkte udledninger af klimagasser fra husdyrgødning er forbundet med en stor usikkerhed.

Generelt har kvaliteten på LCI-data været svingende på tværs af byggevarerne. Dette betyder også, at resultaterne for visse byggevarer vil være forbundet med stor usikkerhed. På trods af dette, så giver resultaterne indikationer på, hvordan et givent biogent byggemateriale vil performe ift. klimaaftryk. På denne måde kan man sige, at modellerne kan udgøre et fundament, som kan forbedres løbende, når man får ny information på produktionskæderne.

6 Data

6.1 LCI-datasæt

6.1.1 Halmelement

Tabel 66: Datasæt benyttet til modellering af halmelement (A1-A3)

Proces	Flow	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datakilde
Modul A1					
Kultivering af hvede	Frø	LT/SK/DK	market for wheat seed, for sowing	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - N		market for inorganic nitrogen fertiliser, as N	LT/SK/DK	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - P		inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	LT/SK/DK	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - K		market for inorganic potassium fertiliser, as K2O	LT/SK/DK	Ecoinvent 3.9.1
	Kalk		lime to generic market for soil pH raising agent	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Pesticider		market for pesticide, unspecified	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Smørelolie		Lubricants at refinery	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Diesel		market for diesel, burned in building machine	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Elektricitet		Electricity grid mix 1kV-60kV	LT/DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Varme		Thermal energy from natural gas	LT/DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
Øvrige materialer til halmpanel	Træfiberplade	PL	medium density fibreboard production, uncoated	Europa	Ecoinvent 3.9.1
	Krydsfiner	LV/CZ	plywood production	Europa	Ecoinvent 3.9.1
	Fyrretræ	EE/SK	planing, beam, softwood	RoW (Rest-of-world)	Ecoinvent 3.9.1
	Skruer	LT/SK	Fixing material screws galvanized (EN15804 A1-A3)	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
Modul A2					
Transport	Diesel	Ukendt	Diesel mix at filling station	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Truck	Ukendt	Truck, Euro 5, 20 - 26t gross weight / 17.3t payload capacity	Global	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Let erhvervskøretøj	Ukendt	Light duty vehicle, Euro 5, up to 3.5t gross weight / up to 1.5 t payload capacity	Global	LCA for Experts professional database version 2023.1
Modul A3					

Energi til produktion af halmpanel	Elektricitet	LT/SK/DK	<i>Electricity grid mix 1kV-60kV</i>	LT/SK/DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Varme	LT/SK/DK	<i>Thermal energy from natural gas</i>	LT/SK/DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Diesel	LT/SK/DK	<i>market for diesel, burned in building machine</i>	Global	Ecoinvent 3.9.1

6.1.2 Græsisolering

Tabel 67: Datasæt benyttet til modellering af græsisolering (A1-A3)

Proces	Flow	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datakilde
Modul A1					
Kultivering af kløvergræs	Frø	DK	market for grass seed, Swiss integrated production, at farm	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - N		market for inorganic nitrogen fertiliser, as N	DK	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - P		inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	DK	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - K		market for inorganic potassium fertiliser, as K2O	DK	Ecoinvent 3.9.1
	Kalk		lime to generic market for soil pH raising agent	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Pesticider		market for pesticide, unspecified	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Smøreolie		Lubricants at refinery	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Diesel		market for diesel, burned in building machine	Global	Ecoinvent 3.9.1
Høst af vejrabat	Smøreolie	DK	Lubricants at refinery	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Diesel		market for diesel, burned in building machine	Global	Ecoinvent 3.9.1
Bioraffinering	Syreholdigt rengøringsmiddel	DK	Acetic acid from methanol (low pressure carbonylation) (Monsanto process)	Tyskland	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Alkalisk rengøringsmiddel		Chlorine mix (chlorine production countries)	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Vand		Tap water from groundwater	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Diesel		Diesel mix at refinery	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Elektricitet		Electricity grid mix 1kV-60kV	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Naturgas		Natural gas mix	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
Tørring af pulp	Varme	DK	Thermal energy from natural gas	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
Øvrige materialer til produktion af græsisoleringelement	Jutefibre	Ukendt	fibre production, jute, retting	RoW (Rest-of-world)	Ecoinvent 3.9.1

	PET-fibre	Ukendt	Polyethylene terephthalate fibres (PET)	Tyskland	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Brandhæmmer	Ukendt	Burnblock	Polen	EPD fra Burnblock
Øvrige materialer til produktion af løs græsisolering	Ammonium sulfat	Ukendt	ammonium sulfate production	Europa	Ecoinvent 3.9.1
	Brandhæmmer	Ukendt	Burnblock	Polen	EPD fra Burnblock
Modul A2					
Transport	Diesel	Ukendt	Diesel mix at filling station	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Truck, 32 t	Ukendt	Truck, Euro 5, 28 - 32t gross weight / 22t payload capacity	Global	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Truck, 12 t	Ukendt	Truck, Euro 5, 12 - 14t gross weight / 9.3t payload capacity	Global	LCA for Experts professional database version 2023.1
Modul A3					
Energi og materialer til produktion af græsisolering (både element og løs isolering)	Elektricitet	DK	<i>Electricity grid mix 1kV-60kV</i>	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Vand	DK	<i>Europe without Switzerland: market for tap water</i>	Europa	Ecoinvent 3.9.1

6.1.3 Hampisolering

Tabel 68: Datasæt benyttet til modellering af hampisolering (A1-A3)

Proces	Flow	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datakilde
Modul A1					
Kultivering af fiberhamp	Frø	DK	market for grass seed, Swiss integrated production, at farm	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - N		market for inorganic nitrogen fertiliser, as N	DK	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - P		inorganic phosphorus fertiliser, as P2O5	DK	Ecoinvent 3.9.1
	Gødning - K		market for inorganic potassium fertiliser, as K2O	DK	Ecoinvent 3.9.1
	Diesel		market for diesel, burned in building machine	Global	Ecoinvent 3.9.1
Skætning	Diesel	Ukendt	market for diesel, burned in building machine	Global	Ecoinvent 3.9.1
Øvrige materialer til produktion af hampisoleringspanel	PET-fibre	Ukendt	Polyethylene terephthalate fibres (PET)	Tyskland	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Brandhæmmer	Ukendt	Burnblock	Polen	EPD fra Burnblock
Øvrige materialer til produktion af hampisolering (løsfyld)	Brandhæmmer	Ukendt	Burnblock	Polen	EPD fra Burnblock
	Ammonium sulfat	Ukendt	ammonium sulfate production	Europa	Ecoinvent 3.9.1
Modul A2					

Transport	Diesel	Ukendt	Diesel mix at filling station	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Truck, 32 t	Ukendt	Truck, Euro 5, 28 - 32t gross weight / 22t payload capacity	Global	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Truck, 28 t	Ukendt	Truck, Euro 5, 26 - 28t gross weight / 18.4t payload capacity (with SCR) Sphera <u-so>	Global	LCA for Experts professional database version 2023.1
Modul A3					
Energi og materialer til produktion af hampisoleringspanel og løsfyld	Elektricitet	DK	<i>Electricity grid mix 1kV-60kV</i>	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Vand	DK	<i>Europe without Switzerland: market for tap water</i>	Europa	Ecoinvent 3.9.1

6.1.4 Træfiberisolering

Tabel 69: Datasæt benyttet til modellering af træfiberisolering (A1-A3)

Proces	Flow	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datkilde
Modul A1					
Energi benyttet i savværk (allokeret til celluloseflis)	Elektricitet	DK	Electricity grid mix 1kV-60kV	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Diesel		market for diesel, burned in building machine	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Varme		Thermal energy from natural gas	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
Øvrige input til produktion af træfiberisolering	Ammonium sulfat	Ukendt	ammonium sulfate production	Europa	Ecoinvent 3.9.1
	Vand		Europe without Switzerland: market for tap water	Europa	Ecoinvent 3.9.1
	Brandhæmmer		Burnblock	Polen	EPD fra Burnblock
Modul A2					
Transport	Diesel		Diesel mix at filling station	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Truck		Truck, Euro 5, 26 - 28t gross weight / 18.4t payload capacity (with SCR)	Global	LCA for Experts professional database version 2023.1
Modul A3					
Energi og materialer til produktion af græsisolering	Elektricitet	DK	Electricity grid mix 1kV-60kV	DK	Ecoinvent 3.9.1
	Vand	DK	<i>Europe without Switzerland: market for tap water</i>	Europa	Ecoinvent 3.9.1

6.1.5 Konstruktionstræ

Tabel 70: Datasæt benyttet til modellering af konstruktionstræ (A1-A3)

Proces	Flow	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datakilde
Modul A3					
Produktion af konstruktionstræ	Elektricitet	DK	Electricity grid mix 1kV-60kV	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	Diesel		market for diesel, burned in building machine	Global	Ecoinvent 3.9.1
	Varme		Thermal energy from natural gas	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
	LPG-gas		Liquefied Petroleum Gas (LPG) (70% propane, 30% butane)	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1

6.1.6 Nedmuldning

Tabel 71: Datasæt benyttet til modellering af nedmuldning.

Proces	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datakilde
Modul A1-A3				
Dieselforbrug fra traktor	DK	diesel, burned in building machine	Global	Ecoinvent 3.9.1

6.1.7 Forbrænding

Tabel 72: Datasæt benyttet til modellering af forbrænding.

Proces	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datakilde
Modul A1-A3				
Forbrænding af træ	DK	Untreated wood in waste incineration plant (10% H2O content)	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
Forbrænding af halm, græs og hamp	DK	Untreated wood in waste incineration plant (10% H2O content) (biogen kulstof er korigeret, så det repræsenterer hhv. halm, græs og hamp)	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1

6.1.8 Forbrænding m. CCS

Tabel 73: Datasæt benyttet til modellering af forbrænding m. CCS

Proces	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datakilde
Modul A1-A3				

Forbrænding af træ	DK	Untreated wood in waste incineration plant (10% H2O content)	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
Forbrænding af halm, græs og hamp	DK	Untreated wood in waste incineration plant (10% H2O content) (biogen kulstof er korrigeret, så det repræsenterer hhv. halm, græs og hamp)	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
Elektricitet til CCS-anlæg	DK	Electricity grid mix 1kV-60kV	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
CCS-anlæg	DK	synthetic gas factory construction	Rest-of-world	Ecoinvent 3.9.1

6.1.9 Pyrolyse

Tabel 74: Datasæt benyttet til modellering af pyrolyse

Proces	Geografi (underleverandør)	Datasæt	Geografi (datasæt)	Datakilde
Modul A1-A3				
Forbrænding af træ	DK	Untreated wood in waste incineration plant (10% H2O content)	Europa	LCA for Experts professional database version 2023.1
Elektricitet til pyrolyse-anlæg	DK	Electricity grid mix 1kV-60kV	DK	LCA for Experts professional database version 2023.1
pyrolyse-anlæg	DK	synthetic gas factory construction	Rest-of-world	Ecoinvent 3.9.1

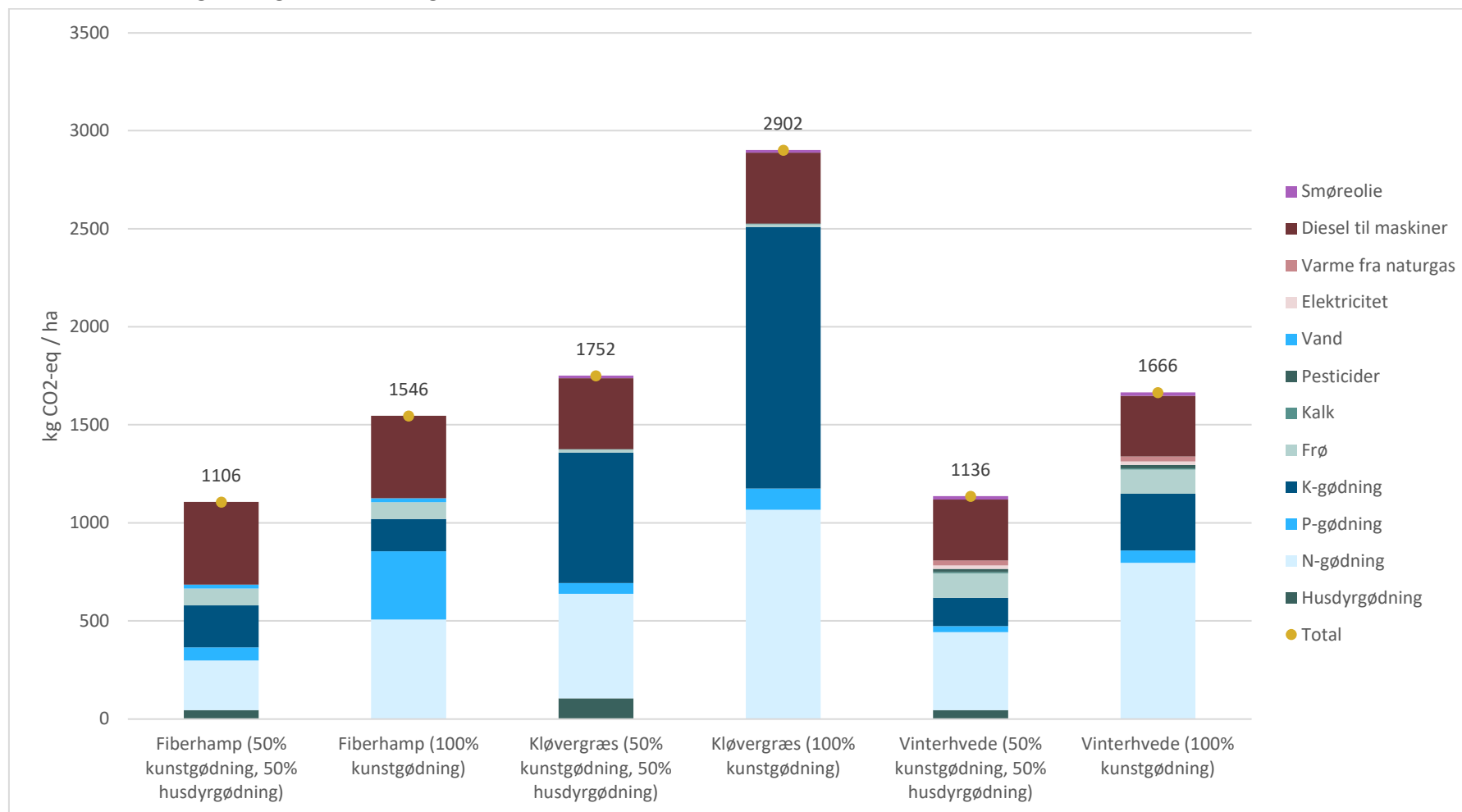
6.2 Betydning af allokeringsfaktorer

Tabel 75: Allokeringsfaktorens betydning for resultater i hhv. A1 og A1-A3. For halm, græs og hamp er der kun medtaget scenarier for 100% kunstgødning.

Allokeringsfaktorens betydning for GWP-fossil					
Byggemateriale	Scenarie	A1	Stigning i GWP-fossil for A1 relativt til laveste allokeringsværdi	A1-A3	Stigning i GWP-fossil for A1-A3 relativt til laveste allokeringsværdi
		[kg CO2-eq / deklareret enhed]		[kg CO2-eq / deklareret enhed]	
Halmpanel	DK (Økonomisk allokering 10%)	4,0		5,5	
	DK (Økonomisk allokering: 30%)	5,5	39%	7,0	28%
	DK (Masseallokering: 36%)	6,0	50%	7,5	37%
Græsisoleringspanel	DK - Græskultivering (Økonomisk allokering: 19%)	1,3		1,4	
	DK - Græskultivering (Masseallokering: 38%)	1,7	31%	1,8	29%
Græsisolering (løsfyld)	DK (Økonomisk allokering: 19%)	1,2		1,4	
	DK - Græskultivering (Masseallokering: 38%)	1,8	47%	1,9	41%

Hampisoleringspanel	DK (Masseallokering: 22%)	0,6		0,6	
	DK (Økonomisk allokering: 50%)	0,9	42%	0,9	49%
Hampisolering (løsfyld)	DK (Masseallokering: 22%)	0,4		0,5	
	DK (Økonomisk allokering: 50%)	0,6	70%	0,8	49%
Træfiberisolering	DK (Økonomisk allokering: 16%)	0,21		0,37	
	DK (Masseallokering: 29%)	0,24	15%	0,40	8%
Konstruktionstræ	DK (Masseallokering: 47%)	5,7		53,4	
	DK (Økonomisk allokering: 63%)	7,6	34%	55,4	4%

6.3 GWP-bidrag ved afgrødekultivering



Figur 28: Bidragsanalyse - Klimapåvirkning per kultiveret ha afgrøde (inkluderer fossile CO2-bidrag og direkte (biogene) emissioner fra husdyrgødning)

Tabel 76: Klimapåvirkningsbidrag for kultivering af 1 ha fiberhamp, græs og halm. Kun fossile CO₂-bidrag medtaget samt direkte (biogene) emissioner fra husdyrgødning.

Klimapåvirkningsbidrag ved kultivering af 1 ha afgrøde												
Scenarier	Husdyrgødning	Elektricitet	N-gødning	P-gødning	K-gødning	Varme fra naturgas	Kalk	Diesel til maskiner	Pesticider	Frø	Smøreolie	Vand
Fiberhamp (50% kunstgødning, 50% husdyrgødning)	4%		23%	6%	19%			38%		8%		2%
Fiberhamp (100% kunstgødning)			33%	22%	11%			27%		6%		1%
Kløvergræs (50% kunstgødning, 50% husdyrgødning)	6%		30%	3%	38%		0,2%	21%	0,02%	1%	1%	
Kløvergræs (100% kunstgødning)			37%	4%	46%		0,1%	12%	0,01%	0%	0%	
Vinterhvede (50% kunstgødning, 50% husdyrgødning)	4%	2%	35%	3%	13%	2%	1%	27%	1%	11%	2%	
Vinterhvede (100% kunstgødning)		1%	48%	4%	17%	2%	0%	19%	1%	7%	1%	

Tabel 77: Gødningstypens betydning for klimaaftrykket i A1 og A1-A3. Tabellen inkluderer fossil CO2 og de direkte (biogene) emissioner fra husdyrgødning.

Gødningstypens betydning for klimaaftrykket					
Byggemateriale	Scenarie	A1	Ændring i klimaaftryk for A1 ved halvering af kunstgødning	A1-A3	Ændring i klimaaftryk for A1-A3 ved halvering af kunstgødning
		[kg CO2-eq / deklareret enhed]		[kg CO2-eq / deklareret enhed]	
Halmpanel	DK (Økonomisk allokering 10%) - 100% kunstgødning	4,0	-7%	5,5	-5%
	DK (Økonomisk allokering 10%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	3,7		5,2	
	DK (Økonomisk allokering: 30%) - 100% kunstgødning	5,5	-14%	7,0	-11%
	DK (Økonomisk allokering: 30%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	4,7		6,2	
	DK (Masseallokering: 36%) - 100% kunstgødning	6,0	-16%	7,5	-13%
	DK (Masseallokering: 36%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	5,0		6,5	
	Græsisoleringspanel	DK - Græskultivering (Økonomisk allokering: 19%) - 100% kunstgødning	1,3	-13%	1,4
DK - Græskultivering (Økonomisk allokering: 19%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning		1,1	1,2		
DK - Græskultivering (Masseallokering: 38%) - 100% kunstgødning		1,7	-20%	1,8	-19%
DK - Græskultivering (Masseallokering: 38%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning		1,4		1,5	
Græsisolering (løsfyld)	DK (Økonomisk allokering: 19%) - 100% kunstgødning	1,2	-20%	1,4	-17%
	DK (Økonomisk allokering: 19%) - 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning	1,0		1,1	

	DK - Græskultivering (Masseallokering: 38%) - 100% kunstgødning	1,8	-27%	1,9	-25%	
	DK (Masseallokering: 38%) - 50% kunstgødning og 50% husdyrgødning	1,3		1,5		
Hampisoleringspanel	DK (Masseallokering: 22%) - 100% kunstgødning	0,60	-8%	0,7	-7%	
	DK (Masseallokering: 22%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	0,55		0,6		
	DK (Økonomisk allokering: 50%) - 100% kunstgødning	0,9	-13%	0,9	-12%	
DK (Økonomisk allokering: 50%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	0,7	0,8				
Hampisolering (løsfyld)	DK (Masseallokering: 22%) - 100% kunstgødning	0,4	-13%	0,5	-9%	
	DK (Masseallokering: 22%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	0,3		0,5		
	DK (Økonomisk allokering: 50%) - 100% kunstgødning	0,6	-17%	0,8	-14%	
DK (Økonomisk allokering: 50%) - 50% kunstgødning, 50% husdyrgødning	0,5	0,7				

7 Referencer

- Agrotech. (2009). *Metoder til måling og besparelser af energiforbrug ved transport og jordbearbejdning*.
- AU Agro. (u.d.). Udvaskning kornsædskitte [Excel].
- AU Agro. (u.d.). VtBB_ AU agro Udbyttmængder [Excel].
- Burnblock ApS. (2023). *EPD*. EPD International.
- Bygningsreglement, BR18. (u.d.).
- Chan, S. W., Marami, H., Tayo, L. L., Fog, E., Andrade, T. A., Ambye-Jensen, M., . . . Khoshnevisan, B. (2024). *Environmental impacts of a novel biorefinery platform integrated with power-to-protein technology to decrease dependencies on soybean imports*. *Science of The Total Environment*.
- Climate Portal. (23. februar 2021). *How efficient is carbon capture and storage?* Hentet fra <https://climate.mit.edu/>: <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-efficient-carbon-capture-and-storage>
- Corona, A., Morten, A.-J., Croxatto, G., Hauschild, M., & Birkved, M. (2018). *Techno-environmental assessment of the green biorefinery concept: Combining process simulation and life cycle assessment at an early design stage*. *The Science of the total environment*.
- COWI. (2021). *CCS - INTERNATIONALE ERFARINGER - SIKKERHED, NATUR OG MILJØ*. Kongens Lyngby: COWI.
- Danmarks Naturfredningsforening. (20. januar 2023). *Nye tal: Den danske kvælstofindsats er gået i stå*. Hentet fra Danmarks Naturfredningsforening: <https://www.dn.dk/nyheder/nye-tal-den-danske-kvaelstofindsats-er-gaet-i-sta/>
- Danmarks Statistik. (2022). *Energiregnskab i GJ*. Hentet fra statistikbanken.dk: <https://www.statistikbanken.dk/ENE2HO>
- Danmarks Statistik. (2023). *Priser for jordbrugets salgsprodukter*. Hentet fra <https://m.statbank.dk/>: <https://m.statbank.dk/TableInfo/LPRIS31?lang=da>
- Danmarks Statistik. (2024). *Det dyrkede areal*. Hentet fra <https://www.dst.dk/da>: <https://www.dst.dk/da/Statistik/emner/erhvervsliv/landbrug-gartneri-og-skovbrug/det-dyrkede-areal>
- Danmarks Statistik. (2024). *LPRIS10: Salgspriser på udvalgte landbrugsprodukter efter produkt og enhed*. Hentet fra www.statistikbanken.dk: <https://www.statistikbanken.dk/LPRIS10>
- Danmarks Statistik, Græs og kløver. (u.d.). *Danmarks Statistik*. Hentet fra <https://www.statistikbanken.dk/statbank5a/Graphics/MapAnalyser.asp?Maintable=AFG5&lang=0&AFGR%C3%98DE=175&ENHED=HA&OMR%C3%85DE=084>
- Danmarks Statistik, korn. (u.d.). *Det dyrkede areal - Korn til modenhed (2023)*. Hentet fra <https://www.statistikbanken.dk/statbank5a/Graphics/MapAnalyser.asp?Maintable=AFG5&lang=0&AFGR%C3%98DE=005&ENHED=HA&OMR%C3%85DE=000>
- Dansk Landbrugsrådgivning. (2009). *Oversigt over Landsforsøgene 2009*. Scanprint A/S.
- Dansk Skovforening. (8. september 2022). *Hvor skal træet til den grønne omstilling komme fra?* Hentet fra Dansk Skovforenings websted: <https://www.danskskovforening.dk/skoven/hvor-skal-traeet-til-den-groenne-omstilling-komme-fra/>
- De Notaris, C., Rasmussen, J., Sørensen, P., & Olesen, J. E. (2018). Nitrogen leaching: A crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1-11.

- EcoCocon. (2022). *Life Cycle Assessment of EcoCocon Panel*. Hedgehog Company.
- EcoCocon. (u.d.). EPD Data New Panels (Version 2) [Excel].
- Effektivt Landbrug. (10. Juli 2019). *Den grønne omstilling er på vej på græs*. Hentet fra Effektivt Landbrug: <https://effektivtlandbrug.landbrugnet.dk/artikler/klima/den-groenne-omstilling-er-paa-vej-paa-graes.aspx>
- Einfeldt, M. (u.d.). *Skovene i Danmark*. Hentet fra Træ.dk - Danmarks Træportal: <https://www.trae.dk/leksikon/danmarks-skove-en-oversigt/>
- Ekolution AB. (2024). *EPD*. EPD International.
- Elsgaard, L., Adamsen, A. P., Møller, H. B., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, E. Ø., . . . Elofsson, K. (2022). *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*. Aarhus Universitet - DCA - DANISH CENTRE FOR FOOD AND AGRICULTURE.
- Elsgaard, L., Adamsen, A. P., Møller, H. B., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, E. Ø., . . . Elofsson, K. (2022). *Knowlegde synthesis on biochar in danish agriculture*. Aarhus University - Danish centre for food and agriculture.
- Energistyrelsen. (2023). *Energistatistikken*. Energistyrelsen.
- Eriksen, J., Thomsen, I. K., Hoffmann, C., Hasler, B., & Jacobsen, B. H. (2020). *Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet*. Aarhus: DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Erlandsson, M. (2022). *Generella indata och metodantagande för att kunna beräkna miljöpåverkan från sågverkens produkter och övrig träförädlingsindustri*. Mistra Digital Forest, IVL Svenska Miljöinstitutet.
- Facchino, M., Popielak, P., Panowski, M., Wawrzynczak, D., Majchrzak-Kucęba, I., & Falco, M. D. (2022). *The Environmental Impacts of Carbon Capture Utilization and Storage on the Electricity Sector: A Life Cycle Assessment Comparison between Italy and Poland*. Energies.
- Gramitherm. (2023). *Gramitherm EPD*.
- Jørgensen, R. J., Boelt, B., & Kristensen, F. E. (2020). *Produktion af biopolymerer - Danske afgrøder der kan være relevante*. Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Kanafani, K., Magnes, J., Garnow, A., Lindhard, S. M., & Balouktsi, M. (2023). *Ressourceforbrug pp byggepladsen*. Aalborg: BUILD - Aalborg Universitet.
- Khoshnevisan, B., Fog, E., Baladi, S., Chan, S. W., & Birkved, M. (2023). *Using the product environmental footprint to strengthen the green market for sustainable feed ingredients; Lessons from a green biomass biorefinery in Denmark*. Science of The Total Environment.
- Klima- Energi- og Forsyningsministeriet. (2024). *Klimastatus og –fremskrivning 2024 - Priser og vækst - Forudsætningsnotat*. Klima- Energi- og Forsyningsministeriet.
- Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet. (2024). *Landbrugsprocesser*. Hentet fra <https://kefm.dk/Media/638500583839358855/KF24%20Kapitel%2017%20Landbrugsprocesser.pdf>
- Kähler, F., Carus, M., Berg, C. v., & Stratmann, M. (2022). *CO2 reduction potential of the chemical industry through CCU*. Renewable Carbon Initiative.
- Landbrugsavisen. (29. Januar 2020). *Nedmuldning af halm: Har du husket at fodre dine jordbakterier?* Hentet fra Landbrugsavisens hjemmeside: <https://landbrugsavisen.dk/mark/nedmuldning-af-halm-har-du-husket-fodre-dine-jordbakterier>
- Landbrugsavisen. (11. marts 2023). *Stor interesse for at bygge nye grønne bioraffineringsanlæg*. Hentet fra Landbrugsavisen: <https://landbrugsavisen.dk/stor-interesse-bygge-nye-gr%C3%B8nne-bioraffineringsanl%C3%A6g>

- Landbrugsavisen. (26. august 2023). *Udledning fra landbruget påvirker vandmiljøet*. Hentet fra Landbrugsavisen: <https://landbrugsavisen.dk/udledning-fra-landbruget-p%C3%A5virker-vandmilj%C3%B8et>
- Landbrugsrådgivning, D. (2009). *Oversigt over Landsforsøgene*.
- Li, S., & Tasnady, D. (juli 2023). Review - Biochar for Soil Carbon Sequestration: Current Knowledge, Mechanisms, and Future Perspectives. *Journal of Carbon Research*.
- Mortensen, E. Ø., & Jørgensen, U. (2022). *Danish agricultural biomass production and utilization in 2030*. Advisory memorandum from DCA – Danish Centre for Food and Agriculture, Aarhus University.
- Nord-Larsen, T., & Thybring, E. (2024). *Skove og træers klimapotentiale*. Københavns Universitet - Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning.
- Olsen, J. V., Larsen, S. U., & Jørgensen, U. (2024). *IFRO Udredning*.
- Olsen, J. V., Larsen, S. U., & Jørgensen, U. (2024). *Muligheder for at øge landbrugets produktion af biomasse til grøn bioraffinering under hensyntagen til miljø og klima: Rapport til brug for det fremadrettede arbejde i Det Nationale Bioøkonomipanel*. Københavns Universitet: Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi (IFRO).
- Palsgaard Spær A/S. (2023). *EPD på konstruktionstræ*. EPD Danmark.
- Parajuli, R., Kristensen, I. S., Knudsen, M. T., Mogensen, L., & Corona. (2017). *Environmental life cycle assessments of producing maize, grass-clover, ryegrass and*. *Journal of Cleaner Production*.
- Rambøll Management Consulting. (2021). *Performanceindikator for træets andel i byggeriet*.
- Rolighed, J., Thorsen, M., & Blicher-Mathiesen, G. (2023). *Miljøeffekten af den danske undtagelse fra nitratdirektivet til brug for afrapportering til EU-Kommissionen i 2022*. Aarhus: DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi.
- Science Direct. (2016). *Economies of Scale*. Hentet fra sciencedirect.com: <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/economies-of-scale>
- SEGES INNOVATION. (17. november 2020). *Kulstoflagring i jorden gavner klimaet*. Hentet fra SEGES INNOVATION - Landbrugsinfo: https://www.landbrugsinfo.dk/public/5/f/7/jord_jordbearbejdning_kulstoflagring_jorden_gavner_klima
- Vosper, J. (u.d.). *The Role of Industrial Hemp in Carbon Farming*.
- Woodfiber. (2022). *EPD*. EPD Danmark.
- Zampori, L., Dotelli, G., & Vernelli, V. (2013). Life Cycle Assessment of Hemp Cultivation and Use of Hemp-Based Thermal Insulator Materials in Buildings. *Environmental Science & Technology*.