



**TRÆ I
BYGGERIET**
DET NATURLIGE VALG

tmi Træ- og
Møbelindustrien
En del af DI



RAMBOLL



RAPPORT

Foto: © Adam Mørk

Dato:
Maj 2024

Udarbejdet af:
Rambøll

Udarbejdet for:
Foreningerne Træ i Byggeriet, Træ- og Møbelindustrien og Dansk Træforening

Støttet af:
Træets Uddannelses- og Udviklingsfond - TUUF

CO₂-BESPARELSER OG OMKOSTNINGSEFFEKTIVITET VED TRÆBYGGERI

CO2-BESPARELSER OG OMKOSTNINGSEFFEKTIVITET VED TRÆBYGGERI

SAMMENLIGNINGSSTUDIE AF TRÆBYGGERI OG KONVENTIONELT BYGGERI

Projekt navn	CO ₂ -besparelser og omkostningseffektivitet ved træbyggeri
Projektnr.	1100057355
Modtager	Lauritz Rasmussen
Dokumenttype	Rapport
Version	1.3
Dato	15-05-2024
Udarbejdet af	Sara Føns Steffen og Morten Stistrup
Kontrolleret af	Lise Horup Koch-Søfeldt
Godkendt af	Andreas Qvist Secher
Beskrivelse	Sammenligningsstudie af konventionelt byggeri og træbyggeri, baseret på seks casestudier Case 1: Enfamiliehus Case 2: Etagebolig Case 3: Produktionshal Case 4: Kontor Case 5: Rækkehus Case 6: Institution

INDHOLDSFORTEGNELSE

1.	Forord	3
2.	Summary	4
3.	Sammenfatning	5
4.	Afgrænsning	6
5.	LCA Metode	7
5.1	Systemafgrænsning	7
5.2	Funktionel enhed	8
5.3	Mængdeopgørelse	8
5.4	Betragtningsperiode	8
5.5	LCA-værktøj og data	8
5.6	Vurdering og afgrænsning af miljøpåvirkningspotentialer	8
5.7	Biogent carbon	8
5.8	Emissioner forbundet med driften af bygningerne	9
5.9	Statisk og dynamisk LCA	9
6.	LCA Resultater	10
6.1	Case 1 - Enfamiliehus	12
6.2	Case 2 - Etageboliger	16
6.3	Case 3 - Produktionshal	20
6.4	Case 4 - Kontor	24
6.5	Case 5 - Rækkehus	28
6.6	Case 6 - Institution	32
6.7	Diskussion og perspektivering	36
7.	Skyggeprisberegninger	41
7.1	Metode	41
7.2	Resultater	44
7.3	Diskussion og perspektivering	46
8.	Konklusion	48
9.	Referencer	50
10.	Appendix	51

1. FORORD

Globalt står byggeriet for omkring 37% af de samlede klimapåvirkninger, hvoraf 9% stammer fra forbruget af materialer til nybyggeri (UNEP, 2022). Forskning offentliggjort af FN's Klimapanel påviser derudover, at det er nødvendigt at reducere enhver form for klimabelastning markant over de næste ti år for at forhindre en global temperaturstigning på over 1,5 grader celsius (IPCC, 2018). Som følge af Danmarks klimamål om at reducere udledningen af drivhusgasser herunder begyndende opgørelse af Danmarks forbrugsbaserede udledninger, lancerede Bolig- og Planstyrelsen i 2021 en National Strategi for Bæredygtigt Byggeri (Indenrigs- og Boligministeriet, 2021). I strategien indgår indfasningen af beregninger af bygningers klimapåvirkning, samt en øvre grænseværdi for klimapåvirkningen. Pr. 1. januar 2023 fremgår det af Bygningsreglementet, at alt nybyggeri skal have dokumenteret dets klimapåvirkning ved en LCA (BR18, 2024). Derudover skal byggeri med et opvarmet etageareal over 1.000 m² overholde en grænseværdi på 12 kg CO₂e/m²/år. Fra 2025 bliver grænseværdien skærpet og gælder for al nybyggeri, uanset størrelsen.

Formålet med denne rapport er at belyse de mulige klimamæssige besparelser (baseret på reduceret CO₂e), der kan opnås ved at øge brugen af træ og træbaserede produkter i nybyggeri i Danmark. Rapporten er en opdatering samt væsentligt udvidelse af rapporten Rambøll i 2020 udarbejdede for Træ i Byggeriet (Sørensen, Schack, & Collin, 2020). Indeværende rapport inkluderer tre nye byggerier samt skyggeprisberegninger på byggerierne. Derudover er de eksisterende cases opdateret således, at beregningerne stemmer overens med gældende krav til klimaberegninger i BR18. For alle seks cases er der udover den statiske LCA udført dynamiske LCA'er for de seks casebyggerier.

Formålet med projektet er at perspektivere, hvilke CO₂ besparelser der kan opnås ved at konvertere konventionelle løsninger til tilsvarende træbaserede løsninger, og hvilken påvirkning det har på økonomien i projektet.

Rapporten er udarbejdet af Rambøll i 2024 for foreningerne Træ i Byggeriet, Dansk Træforening og Træ- og Møbelindustrien, TMI. Analysen henvender sig til beslutningstagere omkring byggeri, herunder bygherrer, arkitekter, ingeniører, entreprenører og håndværkere og interessenter som brancheorganisationer, politikere og offentlige myndigheder.

Rapportens hovedforfatter er Sara Føns Steffen.

Analysearbejdet er kvalitetssikret af Lise Horup Koch-Søfeldt som var hovedforfatter bag 2020 rapporten, mens Andreas Qvist Secher har været projektleder på projektet.

Følgende specialister fra Rambøll bidrager til rapporten:

Sara Føns Steffen, Rambøll Byggeri, har stået for dataindsamling og LCA-beregninger

Morten Stistrup, Rambøll Byggeri, har stået for konvertering af energirammeberegningerne og LCA-beregninger

Michael Gadegaard Espersen, Rambøll Management Consulting, har stået for skyggeprisberegningerne

Frederik Hedetoft, Rambøll Byggeri, har stået for de statiske beregninger

Tim Møller, Rambøll Byggeri, har som certificeret statiker kvalitetssikret de statiske beregninger

Rambøll takker for muligheden for at arbejde med dette vigtige emne, og for at kunne bidrage til vidensgrundlaget om bygningers klimapåvirkning.

2. SUMMARY

This report presents life cycle assessments of six specific building cases with four steps, increasing the use of wood. The six case buildings are a single-family house, a multi-storey residential building, a production facility, an office building, a row house complex, and a daycare institution. The life cycle assessments are conducted in accordance with the current requirements for LCA in the Danish Building Regulations §297-298. All the case buildings are, to varying degrees, wooden buildings and originate from member companies of *Træ i Byggeriet*. Ramboll has gradually converted each case to equivalent conventional buildings and performed life cycle assessments for all steps. The variations of the case buildings correspond in load-bearing capacity and thermal resistance to the actual buildings, allowing for comparison between the different steps.

The report consists of two main sections: LCA results and shadow pricing.

In the section on LCA results, it is examined through the six specific cases how large CO₂e savings can be achieved with different types of wooden buildings. The report highlights the potential CO₂e savings of converting to wood-based products in different building categories and components. The case studies are first analysed as conventional steel and concrete structures (Step 1) and are then gradually converted to wood-based structures and building parts. For five out of six cases, the conversion of the load-bearing structure shows the greatest potential CO₂e saving. The total savings from Step 1 to Step 2 vary between 7-31% for the six cases, corresponding to a saving of 0.28-1.92 kg CO₂e/m²/year. The calculations are carried out as static LCAs according to BR18. Three of the six cases could, in the wood-based Step 4, comply with the draft limit value for 2029 of 7.5 kg CO₂e/m²/year proposed by the Social and Housing Authorities.

Additionally, dynamic life cycle assessments for each of the six cases are included. The dynamic LCA is an alternative method to the static LCA, utilizing a dynamic projection of future emissions. Overall, the results show that more bio-based material leads to a greater reduction when switching from a static to a dynamic calculation, because the bio-based materials have the highest emissions at the end of life and are thus weighted lower in the dynamic calculation. The dynamic life cycle assessments for the six cases show results close to 0 kg CO₂e/m²/year and even negative results for one case. The use of dynamic LCA in the report raises an important discussion about methodology but also highlights the time perspective of when emissions actually occur and assumptions about future emissions.

The section on shadow pricing presents an estimate of the costs per reduced ton of CO₂e compared to Step 1, and thus conventional buildings, as the baseline. Shadow pricing provides an indication of which CO₂e-reducing initiatives are most cost-effective for each of the six cases. The analyses for shadow pricing show that the sensitivity of the results is highly dependent on the price data used and therefore the results are considered largely indicative. The results indicate that transitioning to wood-based materials can lead to cost savings while achieving CO₂e reduction. The results suggest that it may be cost-effective to use wood-based materials, with several of the case buildings even having negative shadow pricing, and it should therefore always be assessed whether it is a possibility in each individual project to use wood-based products for the benefit of both climate and economy.

This report highlights the significant potential CO₂e savings through the use of wood-based materials, which in many instances are cost-effective.

Further background information for the results can be found in the Appendix of the supplementary report.

3. SAMMENFATNING

I denne rapport præsenteres livscyklusvurderinger af seks konkrete bygningscases med hver fire variationer med tiltagende træanvendelse. De seks casebyggerier er et enfamiliehus, en etageejendom, en produktionshal, et kontorbyggeri, en rækkehusbebyggelse og en børneinstitution. Livscyklusvurderinger er lavet således, at de følger gældende lovkrav til LCA i BR18 §297-298. Alle casebygningerne er i mindre eller større omfang træbyggerier, som stammer fra Træ i Byggeriets medlemsvirksomheder. Rambøll har trinvis omregnet hver case til tilsvarende konventionelle byggerier, og har udført livscyklusvurderinger for samtlige trin. Variationerne over casebygningerne har tilsvarende konstruktive bæreevne og isoleringsegenskaber som den reelle case således, at sammenligning trinene imellem er mulig.

Rapporten består er opdelt i to hovedafsnit: LCA resultater og skyggeprisberegninger.

I afsnittet om LCA resultater undersøges det gennem de seks konkrete cases, hvor store CO₂e-besparelser der kan opnås ved forskellige typer af byggeri i træ. Rapporten belyser den potentielle CO₂e-besparelse ved at konvertere til træbyggevarer i forskellige bygningskategorier og bygningskomponenter. Casestudierne analyseres først som konventionelle stål- og betonkonstruktioner (Trin 1), og konverteres herefter trinvist til træbaserede konstruktioner og bygningsdele. For fem ud af seks cases udgør konverteringen af den bærende konstruktion den største potentielle CO₂e-besparelse. Den samlede besparelse fra Trin 1 til 2 varierer mellem 7-31% for de seks cases, svarende til en besparelse på 0,28-1,92 kg CO₂e/m²/år. Beregningerne er foretaget som statiske LCA'er jf. BR18. Tre af de seks cases ville i de træbaserede Trin 4 kunne overholde grænseværdiudkastet til 2029 på 7,5 kg CO₂e/m²/år fremsat af Social- og Boligstyrelsen. Derudover er dynamiske livscyklusvurderinger for hver af de seks cases inkluderet. Den dynamiske LCA er en alternativ metode til den statiske LCA og benytter en dynamisk fremskrivning af fremtidige emissioner. Overordnet viser resultaterne, at mere biobaseret materiale medfører større reduktion ved at skifte fra en statisk til en dynamisk beregning, grundet at de biobaserede materialer har størst udledninger ved endt levetid, og dermed vægtes lavere ved den dynamiske beregning. De dynamiske livscyklusvurderinger for de seks cases viser resultater tæt på 0 kg CO₂e/m²/år og endda negative resultater for en case. Brugen af dynamisk LCA i rapporten rejser en vigtig diskussion om metode, men fremhæver også tidsperspektivet i, hvornår udledninger i realiteten forekommer og antagelserne om udledninger i fremtiden.

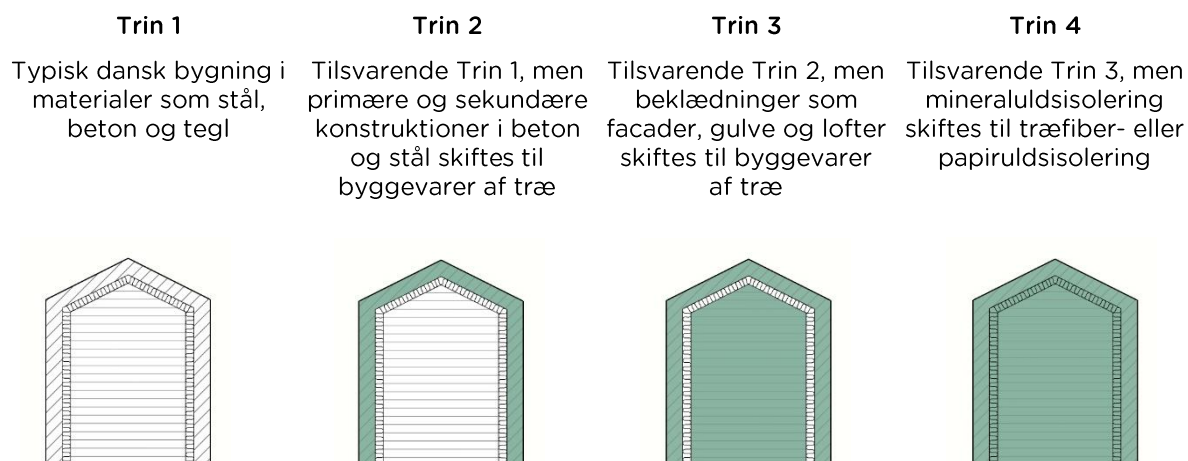
Afsnittet om skyggeprisberegninger præsenterer et skøn for omkostningerne pr. reduceret ton CO₂e i forhold til baseline, hvor baseline er Trin 1 og dermed konventionelle bygninger. Skyggepriserne giver en indikation af, hvilke CO₂e-reducerende initiativer, der er mest omkostningseffektive for hver af de seks cases. Analysen for skyggepriser viser, at følsomheden af resultaterne er meget afhængig af de anvendte prisdata og derfor anses resultaterne i høj grad som indikativ. Resultaterne indikerer, at man ved overgang til træbaserede materialer kan opnå en omkostningsbesparelse samtidig med, at man kan opnå en CO₂e-reduktion. Resultaterne indikerer, at det kan være omkostningseffektivt at bruge træbaserede materialer, hvor flere af casebyggerierne endda har negative skyggepriser, og det bør derfor altid vurderes, om det er en mulighed i det enkelte byggeri at anvende træbaserede produkter til gavn for klima og økonomi.

Med denne rapport fremhæves store potentielle CO₂e-besparelserne ved brug af træbaserede materialer, som i mange tilfælde omkostningseffektive.

Yderligere baggrundsinformation for resultaterne fremgår af Appendix i bilagsrapporten.

4. AFGRÆNSNING

Nærværende rapport indeholder 24 LCA'er fordelt på seks forskellige case-baserede byggerier. De seks faktiske træbyggerier, der er grundlag for analysen, er gennem mængdeopgørelser og tegninger blevet konverteret til tilsvarende typisk dansk byggeri af beton, stål og tegl af Rambølls ingeniører med speciale i konstruktioner og statik. Casestudierne er, som skitseret i Figur 1, analyseret først med udgangspunkt i en typisk dansk bygning bestående af fx stål, beton og tegl (Trin 1) og er herefter trinvist blevet konverteret til konstruktioner og bygningsdele i træ. For hvert trin skiftes fortsat flere bygningsdele ud med alternativer i træ.



Figur 1 - Bygningerne konverteres gradvist fra konventionelt til træbaseret byggeri

Bygningerne sammenlignes på deres klimamæssige konsekvenser gennem LCA, og på deres økonomiske omkostninger gennem skyggeprisberegninger.

Casestudierne er konkrete træbygninger, som lever op til bygningsreglementets krav om brandsikkerhed og akustiske forhold, hvilket der også er taget hensyn til i konverteringen til de fire trin. Tekniske installationer er medtaget som standardværdier jf. BR18 Bilag 2 Tabel 7 (BR18, 2022), og er dermed ens på tværs af de fire trin.

5. LCA METODE

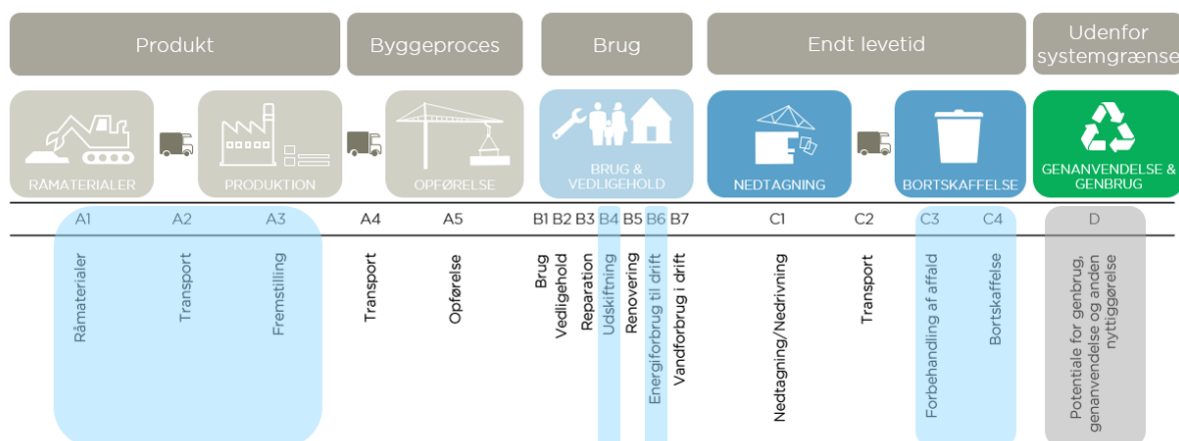
Livscyklusvurdering (LCA) er en metode, der anvendes bredt til at afklare miljømæssige påvirkninger fra produkter, processer eller systemer. LCA kan udføres i henhold til en række forskellige internationale standarder. En LCA for byggevarer udføres i henhold til den europæiske standard EN15804 (DS/EN 15804:2021+A2:2019), der beskriver metoden, som anvendes til at afklare miljøpåvirkningen for en byggevarer gennem hele dens livscyklus. LCA medtager miljøpåvirkninger over hele byggevarens livscyklus, fra udvinding af råmateriale, transport og produktion, over vedligehold og udskiftninger mens byggevareren bruges i byggeriet, til byggevareren skal bortskaffes ved nedrivning eller udskiftning.

Beregningerne i denne analyse tager udgangspunkt i metoden for klimaberegning af bygninger beskrevet i BR18 §297-298, der generelt refererer til (DS/EN 15978:2012), der beskriver beregningsmetoden for vurdering af bygningers miljømæssige kvalitet. Den eneste miljøindikator der indgår i §297-298 i BR18 er *Global Warming Potential* (GWP), på dansk refereret til som klimapåvirkning. Eftersom der kun indgår denne ene miljøindikator, er beregningerne i denne rapport ikke fulde LCA'er i henhold til EN15804, som beskrevet ovenfor. Ved beslutningstagning bør de øvrige miljøpåvirkningspotentialer også analyseres og inddrages.

De seks cases er analyseret uafhængigt af hinanden, men følger alle metoden beskrevet i dette afsnit.

5.1 Systemafgrænsning

En LCA kan inkludere både indlejrede påvirkninger, som er de påvirkninger, der relateres til bygningens materialeforbrug, samt operationelle påvirkninger, herunder varme-, el- og vandforbrug. I beregningerne i indeværende rapport medtages de livscyklusfaser, der indgår i beskrivelsen i BR18 §297-298, og som er markeret med blå på Figur 2. Bemærk at B6 – Energiforbrug til drift er medtaget for de tre nye cases, men ikke for de eksisterende cases, der er taget med fra 2020-rapporten.



Figur 2 - Byggeriets livscyklus. Livscyklusfaser markeret med blå indgår i beregningen jf. BR18. Fase D er udenfor systemafgrænsningen og indgår ikke i de samlede resultater.

5.2 Funktionel enhed

For at sikre korrekt sammenligningsgrundlag bestemmes den funktionelle enhed for hver case. Den funktionelle enhed beskriver og kvantificerer de egenskaber ved bygningen, der skal være til stede, for at den undersøgte substitution kan finde sted. Der er her valgt at fokusere på funktionen af bygningen, antal kvadratmeter, samt klimaskærmens isoleringsevne (u-værdier).

5.3 Mængdeopgørelse

Mængdeopgørelser er leveret af case-projekternes arkitekter, leverandører og entreprenører, samt baseret på mængdeudtræk fra 3D-modeller. Mængder for de øvrige trin er beregnet af Rambølls konstruktionsingeniører således, at de alle opfylder bæreevnekrav. Isoleringstykkelser er desuden reguleret for at opnå samme isoleringsevne i de undersøgte trin, se Appendix 7-12. Se desuden Appendix 1-6 LCI (Life Cycle Inventory) for inventarlistor over materialer og mængder.

5.4 Betragtningstidsperiode

Bygningens betragtningstidsperiode er sat til 50 år jf. betragtningstidsperioden i BR18. Byggematerialernes levetider er baseret på BUILD Levetidstabel Version 2021 (Haugbølle, Mahdi, Morelli, & Wahedi, 2021), hvilket også er de levetider, som er indlejret i beregningsværktøjet LCAbyg. Se Appendix 1-6 for LCI'er, hvor materialernes levetider er angivet.

5.5 LCA-værktøj og data

Analyserne er lavet i LCAbyg 2023.2 (5.4.0.1), som er et værktøj til at beregne LCA for bygninger, udviklet af Statens Byggeforskningsinstitut, SBI. Til beregningerne anvendes generisk data fra BR18 Bilag 2, Tabel 7 (BR18, 2022), der indeholder danske branche EPD'er¹, samt miljødata fra den tyske database ökobaudat (ÖKOBAUDAT, 2023). Se Appendix 1-6 for anvendte ökobaudat-processer og branche EPD'er.

5.6 Vurdering og afgrænsning af miljøpåvirkningspotentialer

Indeværende rapport fokuserer udelukkende på miljøindikatoren Global Warming Potential (GWP), på dansk kaldet klimapåvirkning. GWP måles i CO₂e, hvor "e" står for ækvivalenter, hvilket betyder, at enheden også indeholder påvirkningspotentialet fra andre drivhusgasser. CO₂e dækker bl.a. over CO₂, metan og nitrogen, der alle er drivhusgasser, der bidrager til global opvarmning.

Tabel 1 – Påvirkningspotentialer

Miljøpåvirkningskategorier	
Global opvarmning, GWP* [CO ₂ e]	 Når mængden af drivhusgasser i atmosfæren øges, opvarmes de jordnære luftlag med klimaændringer til følge.

5.7 Biogent carbon

Biobaserede materialer kan optage, lagre og frigive kulstof igennem deres levetid. Dette kulstof betegnes også som biogent carbon. Med det nuværende datagrundlag i BR18 Bilag 2, Tabel 7 er det ikke muligt at adskille den biogene carbon og den carbon, der relaterer sig til bl.a. fossile brændsler i biobaserede materialer. Jævnfør den opdaterede produktstandard (EN 15804:2012+A2:2019) bør

¹ En tredjepartsverificeret LCA for et produkt efter gældende EN standard kaldes en miljøvaredeklaration eller en EPD, som står for 'Environmental Product Declaration'.

den lagrede biogene carbon rapporteres særskilt, men da vi fortsat arbejder med nogle data, der følger den gamle standard EN15804+A1:2013, har dette ikke været muligt i denne rapport.

I den danske byggesektor benyttes -1/+1 reglen ved beregning af biogent carbon jf. (DS/EN 16485:2014). -1/+1 reglen foreskriver, at den CO₂ der lagres i biogene materialer under fotosyntese krediteres med en negativ klimapåvirkning, der udlignes ved endt levetid, hvor biogene byggematerialer antages at blive afbrændt, hvorved den lagrede CO₂ frigives i atmosfæren.

5.8 Emissioner forbundet med driften af bygningerne

For et mere retvisende billede af bygningernes klimapåvirkninger, er driftsemissionerne for de tre nye cases tilføjet. Her er taget udgangspunkt i de aktuelle og udleverede energirammeberegninger, hvor case-bygningernes varmeakkumuleringskapacitet er blevet tilpasset ud fra konstruktionerne i de pågældende trin. Generelt vil dette medføre en højere varmeakkumulering i Trin 1, da traditionelt byggeri oftere har termisk tunge materialer som eksponerede indvendige overflader. En stor termisk masse resulterer i større varmeakkumulering. Varmeakkumulering påvirker bygningens varmebalance, hvor en højere varmeakkumulering vil medføre en mere energieffektiv opvarmning og nedkøling af bygningen. Se Appendix 13-15 for driftsemissioner.

5.9 Statisk og dynamisk LCA

LCA bygger på antagelser, både hvad angår levetider og materialer. Ved en statisk LCA, som den der beregnes til BR18, baseres produktionsmetoder og materialevalg på nuværende praksisser, også ved udskiftninger og endt levetid, selvom disse først ligger 25-50 år ude i fremtiden. Den potentielle udvikling, der måtte forekomme i løbet af bygningens levetid, tages der dermed ikke højde for. Derudover vægtes udledningerne ligeligt uanset hvornår i løbet af byggeriets livscyklus, de finder sted. Det vil sige, at fremtidige udledninger, der er langt mere usikre end udledninger, der sker i dag, vægtes på lige fod med udledninger, der sker nu og i nær fremtid.







For at tage højde for den potentielle teknologiske udvikling, der sker over de kommende 50 år, samt tidspunktet for, hvornår udledningerne finder sted, er der i indeværende rapport inkluderet en dynamisk beregning som tillæg til den statiske LCA. Den dynamiske beregning er baseret på den videnskabelige artikel *Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings – Timing, uncertainty, and emissions sources* (Resch, Andresen, Cherubini, & Brattebø, 2020), som indgår i den danske DGNB pilotmanual 2025, hvor det er den dynamiske beregning, der er pointgivende i kriteriet MILJØ 1 – Global opvarmning (Rådet for Bæredygtigt Byggeri, 2024).

Den dynamiske beregning inkluderer to fremskrivninger, der vægter klimapåvirkningen alt efter, hvornår i løbet af bygningens livscyklus, den finder sted. Det gælder en teknologisk fremskrivning og en tidsbestemt fremskrivning. Den teknologiske fremskrivning antager en årlig forbedring i produktionen og affaldsbehandlingen af byggematerialer på 1%. Den tidsbestemte fremskrivning antager, at vi kun skal kigge på drivhusgassernes effekt de næste 100 år. Det vil sige, at jo senere i byggeriets levetid, udledningen sker, des kortere tid vil drivhusgasserne være til stede i atmosfæren, og vil derfor have en lavere akkumuleret klimapåvirkning. Udskiftes et materiale i år 30, vil materialet kun blive beregnet med en klimapåvirkning svarende til, at drivhusgassen har været i atmosfæren i 70 år. Denne antagelse adskiller sig fra statiske LCA'er, da disse tager højde for påvirkningspotentialet i 100 år fra udledningen sker og ikke fra byggeriets år 0.

6. LCA RESULTATER

I indeværende afsnit er resultaterne for Trin 1-4 præsenteret for hver af de seks cases. I Tabel 2 nedenfor vises den procentvise besparelse for Trin 2-4 sammenlignet med Trin 1 for hver af de seks cases.

Tabel 2 – Procentvis besparelse i klimapåvirkning for hvert trin for hver af de seks cases. Procentvise besparelser vist med parentes er resultaterne fra rapporten "CO2-besparelse ved træbyggeri" udgivet i juni 2020.

	Trin 1 Typisk dansk bygning i materialer som stål, beton og tegl	Trin 2 Tilsvarende Trin 1, men primære og sekundære konstruktioner i beton og stål skiftes til byggevarer af træ	Trin 3 Tilsvarende Trin 2, men beklædninger som facader, gulve og lofter skiftes til byggevarer af træ	Trin 4 Tilsvarende Trin 3, men mineralulds-isolering skiftes til træfiber- eller papirulds-isolering	
	Case 1: Enfamiliehus	--	10% (13%)	27% (27%)	34% (35%)
	Case 2: Etagebolig	--	25% (28%)	35% (41%)	39% (45%)
	Case 3: Produktionshal	--	31% (41%)	32% (42%)	32% (43%)
	Case 4: Rækkehus	--	19%	22%	22%
	Case 5: Kontor	--	16%	17%	18%
	Case 6: Institution	--	7%	11%	12%

For alle seks cases opnås den største samlede besparelse i Trin 4, hvor både konstruktioner, beklædninger og isolering er udskiftet med træbaserede produkter hvor muligt. Trinene imellem ses den største besparelse fra Trin 1 til 2 for Case 2-6. For Case 1 er den største besparelse fra Trin 2 til 3. Resultaterne for hver enkelt case bliver yderligere uddybet i de følgende afsnit.

Sammenlignes resultaterne for 2020 med 2024 som vist i Tabel 2 ses det, at procentsatserne generelt ligger en smule lavere i 2024. Det skyldes blandt andet, at der er medtaget flere elementer i beregningen i 2024, såsom puds, grunder og maling på alle indvendige overflader og damp- og radonspærre. Eftersom disse er ens på tværs af alle fire trin, resulterer det i en øget klimapåvirkning i alle beregningerne, og dermed er den procentvise besparelse faldet. Trods en smule lavere procentsatser, ligger besparelserne for både enfamiliehuset og etageboligbyggeriet i 2024 relativt tæt på den beregnede besparelse fra 2020. Den største forskel ses for produktionshallen, hvor besparelsen i Trin 2-4 er faldet med 10-11 procentpoint. Det skyldes, at der i 2024 er medtaget sokkel og murkrone, som ikke var med i 2020. Både sokkel og murkrone er også ens på tværs af alle fire trin, og dermed er den procentuelle besparelse fra trin til trin også reduceret her.



6.1 Case 1 - Enfamiliehus

Denne LCA er baseret på et casestudie af et etplans fritliggende enfamiliehus med et bruttoareal på 116 m². Det faktiske scenarie er et træbyggeri med tagkonstruktion og ydervægge af træ og mineraluldsisolering. Dette scenarie svarer til Trin 3 (se 6.1.2 Scenariebeskrivelser). Med afsæt i dette scenarie har konstruktionsingeniører fra Rambøll regnet mængder og materialer på tilsvarende konstruktioner med ydervægge bestående af en porebetonbagmur og skalmursfacade, samt porebeton indervægge. Taget har samme opbygning i alle fire trin. For at sikre sammenligningsgrundlaget er isoleringsevnen (U-værdier) beregnet for ydervægge og tagkonstruktioner (se Appendix 7: Case 1 – Enfamiliehus – U-værdiberegninger).

6.1.1 Funktionel enhed

For at sikre et korrekt sammenligningsgrundlag for de fire trin bestemmes den funktionelle enhed for de analyserede systemer til

116 m² fritliggende enfamiliehus med en konstruktion, som opfylder de gældende bæreevnekrav og ydervægge og tag med minimums U-værdier på hhv. 0,15 og 0,09 i 50 år.

6.1.2 Scenariebeskrivelser

Samtlige scenarier har betonfundamenter og armerede terrændæk, en tagkonstruktion af træ med tegltag og træ-alu vinduer og -døre med 3-lagsruder.

Trin 1 består af en tagkonstruktion af træ med mineraluldsisolering og gipsloft. Ydervæggene er opbygget af en porebeton bagmur, hulmursisolering af mineraluld og en skalmursfacade. Indervæggene er af porebeton.

Trin 2 består af en tagkonstruktion af træ med mineraluldsisolering og gipsloft. Ydervæggene er opbygget i træ med mineraluld og en skalmursfacade. Indervæggene er en trækonstruktion med mineraluldsisolering og gipsbeklædning. Fundamentterne tilpasses i størrelse efter ydervæggene.

Trin 3 består af en tagkonstruktion af træ med mineraluldsisolering og træloft. Ydervæggene er opbygget i træ med mineraluldsisolering og facadebeklædning af træ. Indervæggene er en trækonstruktion med mineraluldsisolering og gipsbeklædning.

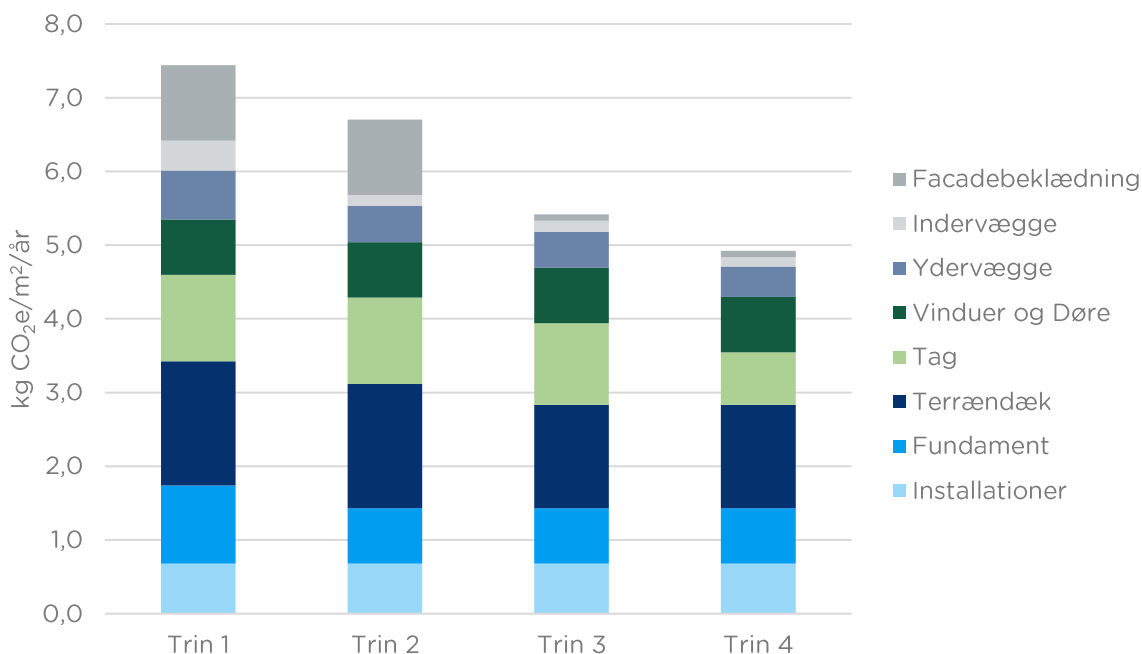
Trin 4 består af en tagkonstruktion af træ med træfiberisolering og trælofter. Ydervæggene er opbygget i træ med træfiberisolering og facadebeklædning af træ. Indervæggene er en trækonstruktion med træfiberisolering og gipsbeklædning. Isoleringen i taget er papiruldsisolering.

Tabel 3 – Scenarieoversigt Case 1 – Enfamiliehus

Bygningstype		Trin 1	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Fritliggende enfamiliehus					
Brutto etageareal	116 m ²	Basis	Træbaserede bærende konstruktioner	Træbaseret beklædning	Træfiber- og papiruldsisolering
Antal etager	1				
Etagehøjde	2,3				
Statisk princip	Bærende facader				
Randfundament	Beton + lecablokke	x	x (tilpasset i størrelse)	x (tilpasset i størrelse)	x (tilpasset i størrelse)
Terrændæk	Beton + EPS + klinkegulv	x	x	Beton + EPS + træstrøgulv	Beton + EPS + træstrøgulv
Ydervægge	Porebeton + skalmur	x	Træskelet + skalmur	Træskelet + træbeklædning	Træskelet + træbeklædning
Ydervægge isolering + indvendig overflade	Mineraluld + gips	x	x	x	Træfiberisolering + gips
Indervægge	Porebeton	x	Træskelet + mineraluld + gips	Træskelet + mineraluld + gips	Træskelet + træfiberisolering + gips
Tagkonstruktion	Saddeltag, gitterspær, gipsloft	x	x	Saddeltag, gitterspær, træløf	Saddeltag, gitterspær, træløft
Tagisolering	Mineraluld	x	x	x	Papiruldsisolering
Tagbelægning	Tegl	x	x	x	x
Vinduer og døre	Træ-alu, 3-lags	x	x	x	x

6.1.3 Klimapåvirkning

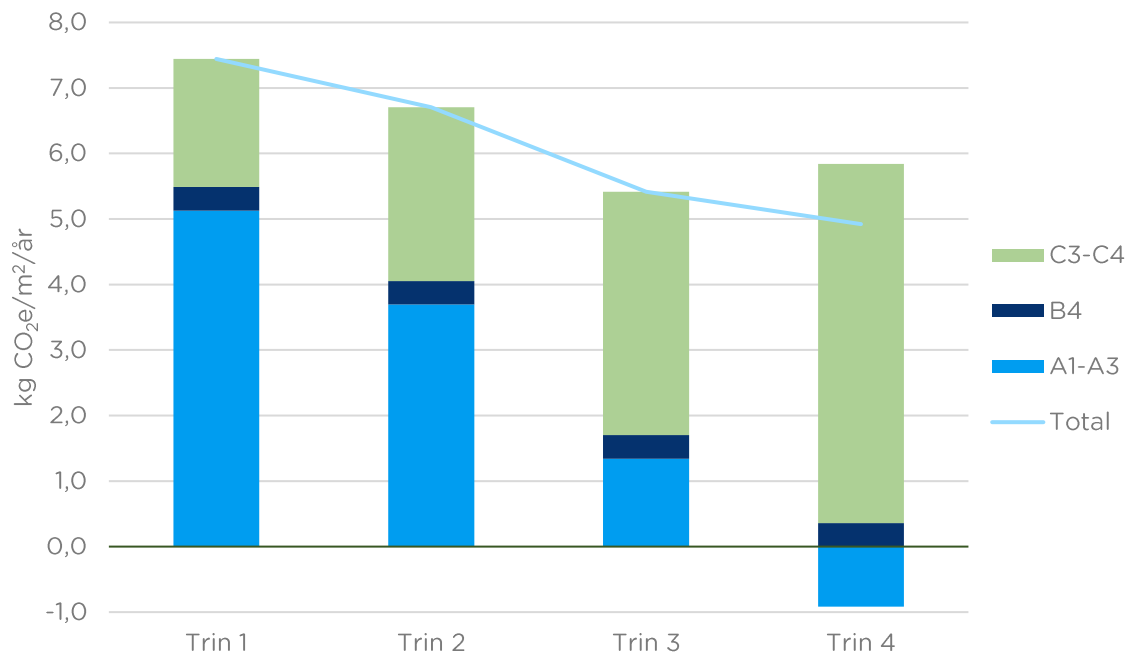
I dette afsnit vises resultater for klimapåvirkningen for hver af de fire trin. Alle resultater er præsenteret i kg CO₂e/m²/år. Klimapåvirkningen fordeles således ligeligt over bygningens bruttoareal over en betragtningsperiode på 50 år. Resultaterne præsenteret nedenfor er baseret på Appendix 1: Case 1 – Enfamiliehus – Life Cycle Inventory.



Figur 3 – Klimapåvirkning for Case 1 – Enfamiliehus for hvert trin fordelt på bygningsdele

Det ses af resultaterne i Figur 3, at klimapåvirkningen er højest for Trin 1, hvor den samlede klimapåvirkning er 7,44 kg CO₂e/m²/år. Klimapåvirkningen falder gennem alle fire trin, og er lavest i Trin 4, hvor den er 4,92 kg CO₂e/m²/år. Den største reduktion ses i facadebeklædningen, der i Trin 1

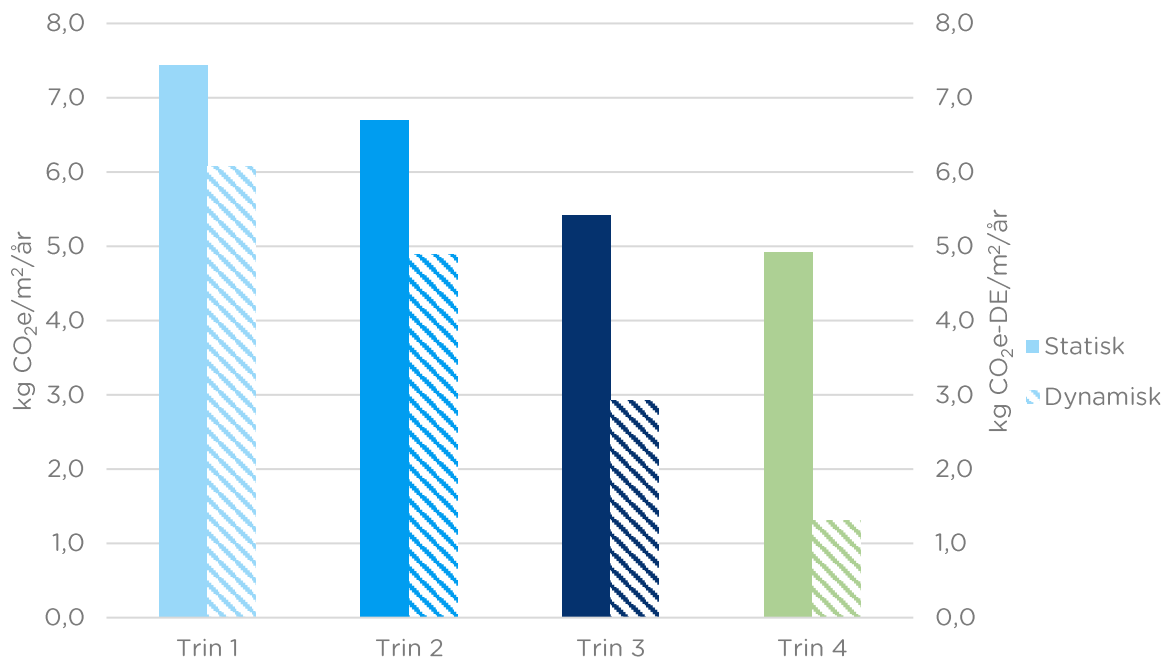
og 2 er i tegl, hvilket udskiftes med træbeklædning i Trin 3 og 4. Klimapåvirkningen fra fundamentet falder fra Trin 1 til Trin 2, da det tilpasses i størrelse efter ydervæggene. Derudover ses en betydelig reduktion i tagkonstruktionen fra Trin 3 til Trin 4, hvilket skyldes udskiftningen fra mineraluldsisolering til papiruldsisolering.



Figur 4 - Klimapåvirkning for Case 1 - Enfamiliehus for hvert trin fordelt på livscyklusfaser

Figur 4 viser klimapåvirkningen fordelt på de forskellige livscyklusfaser. Det ses, at størstedelen af klimapåvirkningen i Trin 1 sker *upfront* i produktionsfasen (A1-A3). I takt med at mængden af træbaserede materialer øges, skifter den primære udledning fra produktionsfasen til *End-of-Life* (C3-C4). For Trin 4 ses en negativ klimapåvirkning i produktionsfasen, hvilket skyldes de store mængder af biogene materialer, der i produktionsfasen lagrer CO₂. Den øgede klimapåvirkning ved endt levetid skyldes ligeledes de biogene materialer, der antages at blive afbrændt ved endt levetid. Klimapåvirkningen fra udskiftninger (B4) er ens på tværs af alle fire trin, da det kun er vinduer og døre, der udskiftes i løbet af betragtningsperioden, og disse er ens for alle fire trin.

6.1.4 Dynamisk beregning



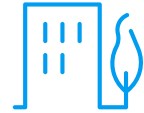
Figur 5 - Statiske og dynamiske resultater for Case 1 - Enfamiliehus for hvert trin. Den venstre y-akse indikerer den statiske klimapåvirkning og den højre den dynamiske.

I Figur 5 ses den samlede klimapåvirkning for hvert trin beregnet henholdsvis som statisk og dynamisk LCA. De dynamiske resultater ligger generelt lavere end de tilsvarende statiske grundet fremskrivningsfaktorerne. For Trin 1 ses en reduktion på 18% fra de statiske til de dynamiske resultater. For de resterende trin er reduktionen henholdsvis 26%, 45% og 73%. Den øgede reduktion skyldes den øgede mængde af biogene materialer i byggeriet, som har en lav udledning i produktionsfasen, men en relativt høj udledning ved endt levetid. Som Figur 4 viser, resulterer en øget mængde biogene materialer i, at en større andel af klimapåvirkningen sker ved endt levetid, og eftersom udledningen ved endt levetid vægtes lavere i den dynamiske beregning, ses der en større reduktion i de dynamiske resultater, når mængden af biogene materialer øges.

6.1.5 Delkonklusion

Resultaterne for enfamiliehuset viser, at klimapåvirkningen reduceres, når flere af materialerne udskiftes til at være træbaserede. Den laveste klimapåvirkning ses for Trin 4, der ligger på 4,92 kg CO₂e/m²/år, hvilket svarer til en besparelse på 34% sammenlignet med Trin 1. Den største reduktion ses fra Trin 2 til Trin 3, hvor facadebeklædningen skiftes fra teglskaller til træbeklædning. For Trin 1 og 2 kommer størstedelen af klimapåvirkningen fra produktionsfasen, da konventionelle byggematerialer som tegl og beton, som indgår i Trin 1 og 2, har en energikrævende produktion. For Trin 3 og 4 sker størstedelen af udledningen ved endt levetid, da træbaserede produkter antages at blive brændt ved endt levetid, og dermed frigives den CO₂, der er lagret i træet.

De dynamiske resultater viser en reduktion fra Trin 1 til Trin 4 på 78%. Her er reduktionen betydeligt større sammenlignet med de statiske resultater, da forskydningen af klimapåvirkningen fra produktion til endt levetid, som ses ved øget brug af træbaserede materialer, giver en større besparelse i den dynamiske beregning.



6.2 Case 2 - Etageboliger

Denne analyse er et LCA-studie af en karrébebyggelse bestående af otte blokke med henholdsvis tre og fire etager. Bebyggelsen består af 66 familieboliger og et fælleshus med et bruttoareal på 6.235 m². Det faktiske scenarie er et træbyggeri med tagkonstruktion og ydervægge af træ og mineraluldsisolering – dette scenarie svarer til trin 3 (se 6.2.2 Scenariebeskrivelser). Med afsæt i dette scenarie, har konstruktionsingeniører fra Rambøll regnet mængder og materialer på tilsvarende konstruktioner med ydervægge bestående af henholdsvis porebeton og beton bagmur og et facadesystem med skifer, indervægge af henholdsvis beton og stålelementer og tag og etagedæk bestående af huldækelementer. Derudover indeholder analysen scenarier, hvor træbyggeriet i stedet for mineraluldsisolering anvender træfiberisolering, hvor det kan lade sig gøre i forhold til brandkrav. For at sikre sammenligningsgrundlaget er isoleringsevnen (U-værdier) beregnet for ydervægge og tagkonstruktioner (Appendix 8: Case 2 – Etagebolig – U-værdiberegninger).

6.2.1 Funktionel enhed

For at sikre et korrekt sammenligningsgrundlag for de 4 trin bestemmes den funktionelle enhed for de analyserede systemer til

6.235 m² karrébebyggelse, som opfylder de gældende bæreevnekrav og ydervægge og tag med minimums U-værdier på hhv. 0,12 og 0,09 i 50 år.

6.2.2 Scenariebeskrivelser

Samtlige scenarier har betonfundamenter og 3-lags træ-alu vinduer og -døre.

Trin 1 er en tagkonstruktion bestående af huldæk, mineraluldsisolering og tagpap. Der er to typer ydervægge; en opbygget af en armeret betonbagmur, mineraluldsisolering og en facade af keramisk skifer, og en bestående af en porebeton bagmur, mineraluldsisolering og en facade af keramisk skifer. Der er ligeledes to typer indervægge; tunge og lette indervægge. De tunge indervægge består af armeret beton. De lette indervægge er opbygget af stålelementer med mineraluldsisolering beklædt med gips. Terrændækket består af armeret beton med laminatgulv. Etageadskillelser er opbygget af et huldæk beklædt med laminatgulv.

Trin 2 er en tagkonstruktion af træ med mineraluldsisolering, tagpap og gipsloft. Ydervæggene er opbygget i træ med mineraluld og gipsplader og en facade af keramisk skifer. Indervæggene er en trækonstruktion med mineraluldsisolering og gipsbeklædning. Terrændækket er opbygget af en trækonstruktion med laminatgulv. Etageadskillelserne består af en trækonstruktion med mineraluldsisolering, gipsloft og laminatgulv.

Trin 3 er en tagkonstruktion af træ med mineraluldsisolering, tagpap og træloft. Ydervæggene er opbygget i træ med mineraluld og gipsplader og en facade med træbeklædning. Indervæggene er en trækonstruktion med mineraluldsisolering og gipsbeklædning. Terrændækkets bærende konstruktion er af træ, mens etageadskillelserne består af en trækonstruktion med mineraluldsisolering, træloft og træparketgulv.

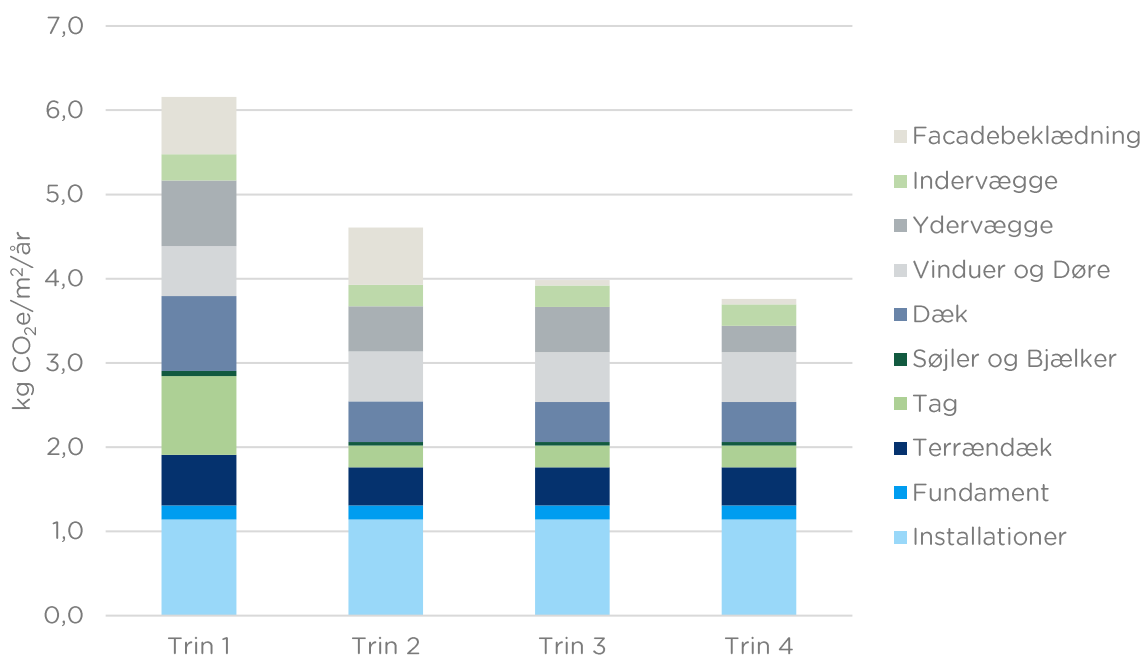
Trin 4 er en tagkonstruktion af træ med mineraluldsisolering, tagpap og træloft. Ydervæggene er opbygget i træ med træfiberisolering og gipsplader og en facade med træbeklædning. Indervæggene er en trækonstruktion med mineraluldsisolering og gipsbeklædning. Terrændækket er opbygget af en trækonstruktion med parketgulv. Etageadskillelserne består af en trækonstruktion med mineraluldsisolering, træloft og træparketgulv.

Tabel 4 – Scenarieoversigt Case 2 – Etageboliger

Bygningstype		Trin 1	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Etagebolig					
Brutto etageareal	6.235 m ²	Basis	Træbaserede bærende konstruktioner	Træbaseret beklædning	Træfiber- og papiruldsisolering
Antal etager	3-4				
Etagehøjde	2,53 m				
Statisk princip	Rammekonstruktion				
Fundament	Stribefundament	x	x	x	x
Terrændæk og gulvopbygning	Armeret beton m. trykfast isolering + laminatgulv	x	Trækonstruktion + laminatgulv	Trækonstruktion + parketgulv	Trækonstruktion + parketgulv
Ydervægge	Armeret beton + mineraluld + keramisk skifer og Porebeton + mineraluld + montageskinne + keramisk skifer	x	Trækonstruktion + gips + mineraluld + keramisk skifer	Trækonstruktion + gips + mineraluld + træbeklædning	Trækonstruktion + gips + træfiberisolering + træbeklædning
Tunge indervægge	Armeret beton	x	Trækonstruktion + gips	Trækonstruktion + gips	Trækonstruktion + gips
Lette indervægge	Stål + gips	x	Trækonstruktion + gips	Trækonstruktion + gips	Trækonstruktion + gips
Indervægsisolering	Mineraluld	x	x	x	x
Etagedæk	Huldæk + laminatgulv + gipsloft	x	Trækonstruktion + laminatgulv	Trækonstruktion + parketgulv + træloft	Trækonstruktion + parketgulv + træloft
Kantbjælker i dæk	Stål	x	Inkluderet i trækonstruktionen i etagedæk	Inkluderet i trækonstruktionen i etagedæk	Inkluderet i trækonstruktionen i etagedæk
Tag	Huldæk, mineraluld, tagpap	x	Trækonstruktion + gipsloft + mineraluld + tagpap	Trækonstruktion + træloft + mineraluld + tagpap	Trækonstruktion + træloft + mineraluld + tagpap
Vinduer og døre	Træ-alu, 3-lags	x	x	x	x

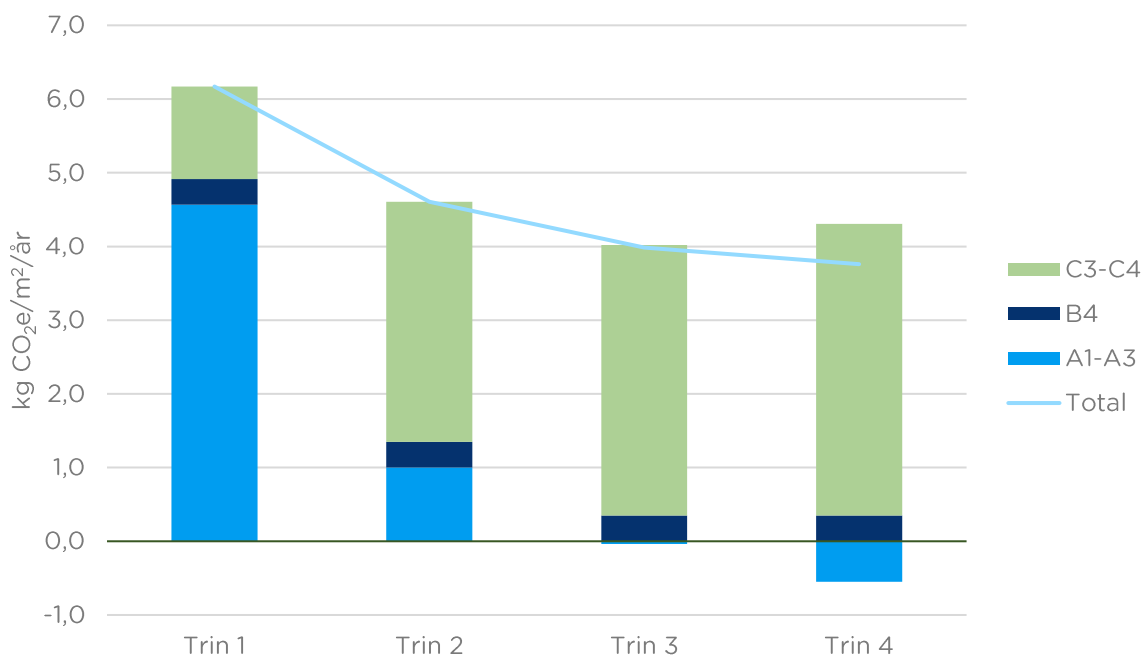
6.2.3 Klimapåvirkning

I dette afsnit analyseres klimapåvirkningen (GWP) for hver af de fire trin. Alle resultater er præsenteret i kg CO_{2e}/m²/år. Klimapåvirkningen fordeles således over bygningens bruttoareal over en betragtningsperiode på 50 år. Resultater præsenteret i de følgende afsnit ses i Appendix 2: Case 2 – Etagebolig – Life Cycle Inventory.



Figur 6 - Klimapåvirkning for Case 2 - Etegebolig for hvert trin fordelt på bygningsdele

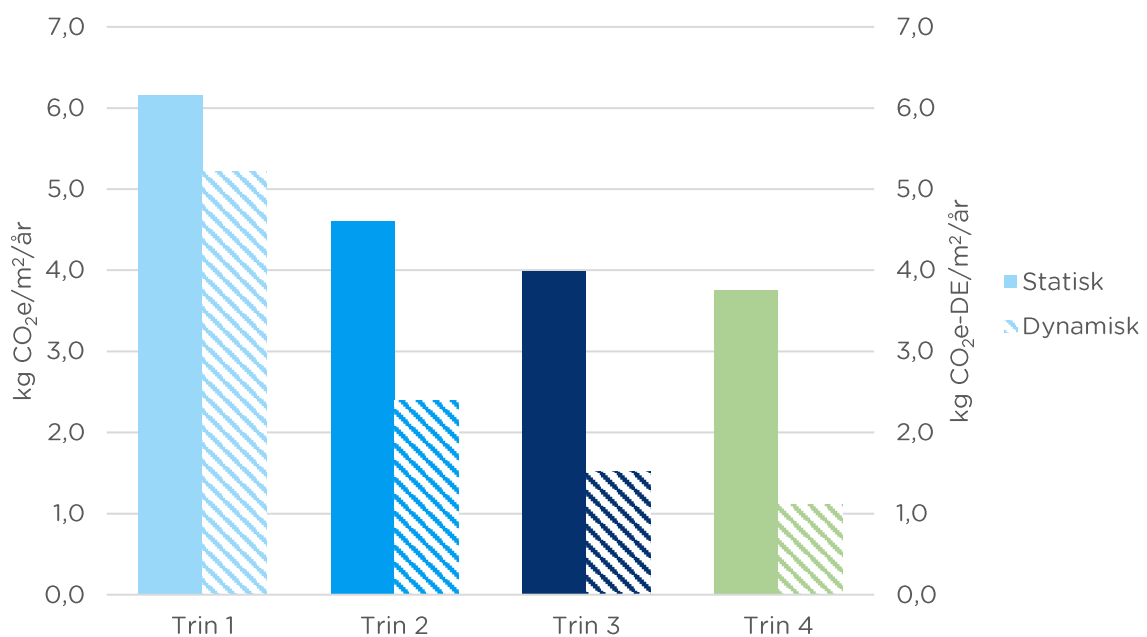
Figur 6 viser klimapåvirkningen fordelt på de forskellige bygningsdele for hver af de fire trin. Den højeste klimapåvirkning ses for Trin 1, og det er også fra Trin 1 til Trin 2, at den største reduktion ses. Reduktionen skyldes primært ændringen af tagkonstruktionen samt etagedæk, der i Trin 1 er et huldæk, hvor det i Trin 2 udskiftes til en trækonstruktion. Derudover ses der en reduktion fra Trin 2 til Trin 3, hvor facadebeklædningen ændres fra keramisk skifer til træbeklædning. Reduktionen fra Trin 3 til Trin 4 skyldes primært udskiftningen af isoleringsmaterialet i ydervæggene, hvor mineraluldsisoleringen erstattes af træfiber.



Figur 7 - Klimapåvirkning for Case 2 - Etegebolig for hvert trin fordelt på livscyklusfaser

Af Figur 7 ses klimapåvirkningen fordelt på de forskellige livscyklusfaser. *Upfront* udledningerne (A1-A3) fylder mest for Trin 1, hvilket skyldes at der primært indgår mineralske byggematerialer i dette Trin. I takt med at der udskiftes til flere træbaserede byggematerialer skifter fordelingen, således at størstedelen af udledningen sker ved endt levetid (C3-C4), hvilket er tilfældet i både Trin 2, 3 og 4. I Trin 4 er andelen af træbaserede materialer så stor, at der ses en negativ påvirkning i produktionsfasen, grundet den store mængde biogent carbon, der lagres i de træbaserede materialer i produktionsfasen.

6.2.4 Dynamisk beregning



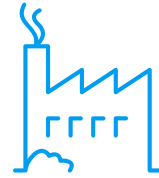
Figur 8 - Statiske og dynamiske resultater for Case 2 - Etageløst for hvert trin. Den venstre y-akse indikerer den statiske klimapåvirkning og den højre den dynamiske.

De statiske og dynamiske resultater for hvert trin er præsenteret i Figur 8. For Trin 1 ses en reduktion på 15% fra den statiske til den dynamiske beregning. Reduktionen for Trin 2, 3 og 4 er henholdsvis 48%, 62% og 71%. Igen skyldes den øgede reduktion fra Trin 1 mod Trin 4, at mængden af træbaserede materialer i byggeriet øges, og at klimapåvirkningen ved endt levetid dermed øges, hvilket resulterer i en lavere klimapåvirkning for den dynamiske beregningers fremskrivninger.

6.2.5 Delkonklusion

For etageboligbyggeriet ses den største reduktion fra Trin 1 til Trin 2, hvor tag- og etagedæk ændres fra huldæk til en trækonstruktion. Den laveste samlede klimapåvirkning ses for Trin 4, der ligger på 3,76 kg CO₂e/m²/år, hvilket svarer til en reduktion på 39% sammenlignet med Trin 1. For Trin 1 sker udledningen primært i produktionsfasen, hvorimod størstedelen af udledningen for Trin 2-4 sker ved endt levetid, grundet den øgede mængde af træbaserede materialer. For både Trin 3 og 4 ses en negativ klimapåvirkning i produktionsfasen, grundet den CO₂, der lagres i de biogene materialer under produktionen, og som først frigives ved endt levetid, hvor det antages at materialerne afbrændes.

Den øgede mængde træbaserede materiale kommer også til udtryk i den dynamiske beregning, hvor der ses en betydeligt større forskel mellem de statiske og dynamiske resultater for hvert trin.



6.3 Case 3 - Produktionshal

Denne analyse er et LCA-studie af et halbyggeri med et bruttoareal på 4.954 m². Det faktiske scenarie er et træbyggeri, med tagkonstruktion og ydervægge af træ og mineraluldsisolering med facadeplader i fibercement – dette scenarie svarer til Trin 2 (se 6.3.2 Scenariebeskrivelser). Med afsæt i dette scenarie, har konstruktionsingeniører fra Rambøll regnet mængder og materialer på en tilsvarende konstruktion med tag- og ydervægge opbygget af stål og fibercement facadeplader. Derudover indeholder analysen scenarier, hvor træbyggeriet i stedet for mineraluldsisolering anvender træfiberisolering i facaden og papiruldsisolering i tagkonstruktionen (Trin 4). For at sikre sammenligningsgrundlaget er isoleringsevnen (U-værdier) beregnet for ydervægge og tagkonstruktioner (se Appendix 9: Case 3 – Produktionshal – U-værdiberegninger).

6.3.1 Funktionel enhed

For at sikre korrekt sammenligningsgrundlag for de fire trin bestemmes den funktionelle enhed for de analyserede systemer til

4.954 m² halbyggeri med en konstruktion, som opfylder de gældende bæreevnekrav og ydervægge og tag med minimums U-værdier på hhv. 0,24/0,35 og 0,25 i 50 år.

6.3.2 Scenariebeskrivelser

Alle scenarierne har armerede fundamenter og terrændæk og 3-lags træ-alu vinduer.

Trin 1 er en rammekonstruktion i stål med et tagelement af en trapezplade og mineraluldsisolering. Ydervæggene er opbygget af facadeelementer af stålskelet med mineraluldsisolering og fibercement facadeplader.

Trin 2 er en rammekonstruktion i træ med et tag bygget op af træbaserede kassetter og mineraluldsisolering. Ydervæggene er opbygget i træ med mineraluldsisolering og fibercement facadeplader.

Trin 3 er en rammekonstruktion i træ med et tag bygget op af træbaserede kassetter og mineraluldsisolering. Ydervæggene er opbygget i træ med mineraluldsisolering og udvendig træbeklædning.

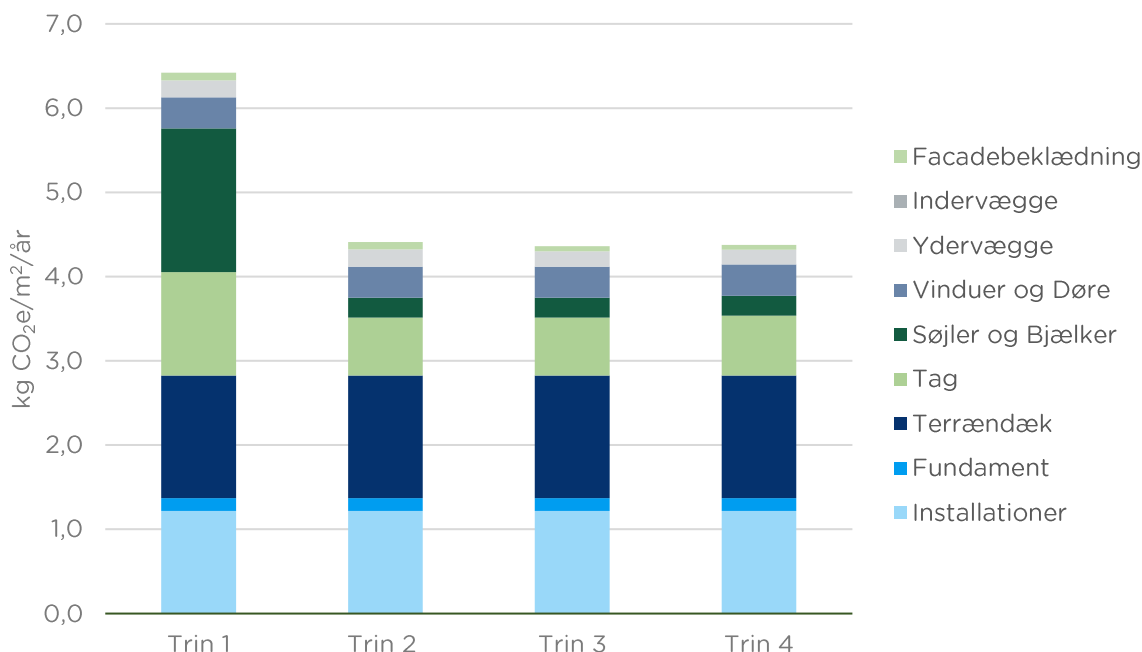
Trin 4 er en rammekonstruktion i træ med et tag bygget op af træbaserede kassetter og papiruldsisolering. Ydervæggene er opbygget i træ med træfiberisolering og udvendig træbeklædning.

Tabel 5 – Scenarieoversigt Case 3 – Produktionshal

Bygningstype		Trin 1	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Halbyggeri					
Brutto etageareal	4.954 m ²	Basis	Træbaserede bærende konstruktioner	Træbaseret beklædning	Træfiber- og papiruldsisolering
Antal etager	1				
Etagehøjde	8 m				
Statisk princip	Rammekonstruktion				
Bærende konstruktion	Stålkonstruktion	x	Limtræskonstruktion	Limtræskonstruktion	Limtræskonstruktion
Fundament	Armeret beton	x	x	x	x
Terrændæk	Armeret beton + EPS-isolering	x	x	x	x
Ydervæg	Facadeelementer af stålskelet + mineraluldsisolering + fibercement facadeplader	X	x	Facadeelementer af træ + mineraluldsisolering + træbeklædning	Facadeelementer af træ + træfiberisolering + træbeklædning
Tag	Tagelement med trapezplade + mineraluldsisolering	x	Træbaseret kassettelement + mineraluldsisolering	Træbaseret kassettelement + mineraluldsisolering	Træbaseret kassettelement + papiruldsisolering
Vinduer og døre	Træ-alu, 3-lags	x	x	x	x

6.3.3 Klimapåvirkning

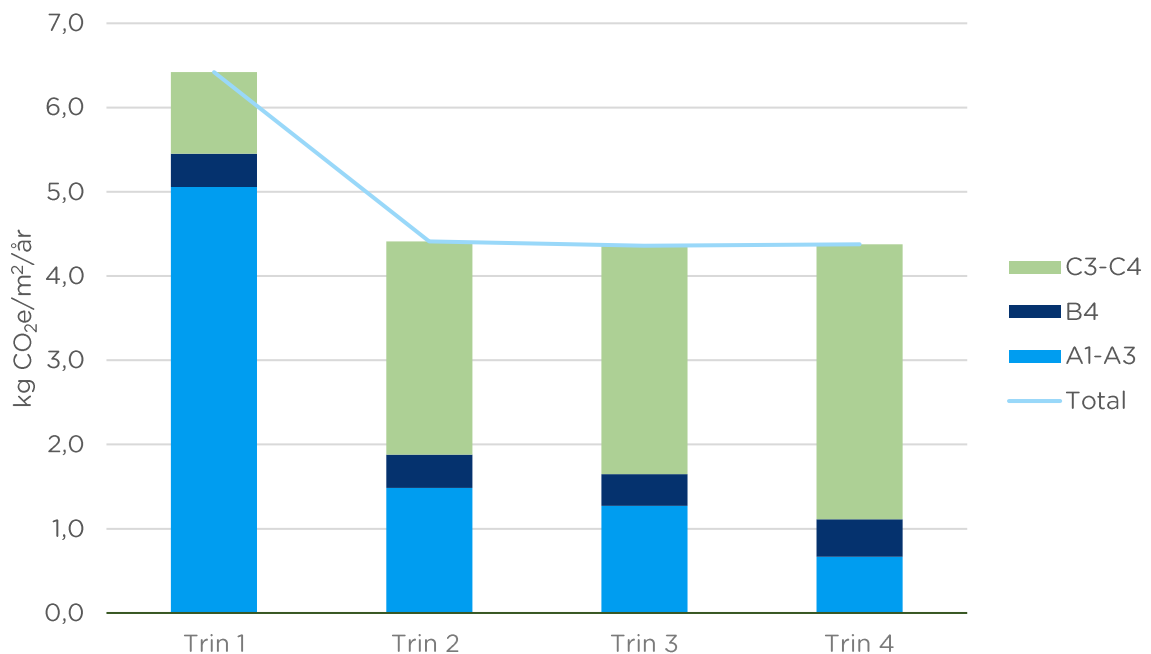
I dette afsnit analyseres klimapåvirkningen (GWP) for hver af de fire trin. Alle resultater er præsenteret i kg CO₂e/m²/år. Klimapåvirkningen fordeles således over bygningens bruttoareal over en betragtningsperiode på 50 år. Resultater præsenteret i de følgende afsnit ses i Appendix 3: Case 3 – Produktionshal – Life Cycle Inventory.



Figur 9 – Klimapåvirkning for Case 3 – Produktionshal for hvert trin fordelt på bygningsdele

Figur 9 viser klimapåvirkningen for hvert trin for produktionshallen. Den samlede klimapåvirkning i Trin 1 er 6,40 kg CO₂e/m²/år. Den mest betydelige reduktion i klimapåvirkning ses fra Trin 1 til Trin 2, hvor især ændringen fra en stålkonstruktion til limtræskonstruktionen bidrager til reduktionen. Derudover ses en betydelig reduktion grundet udskiftningen fra trapezplader til trækassetter i tagkonstruktionen. Fra Trin 2 til Trin 4 er forskellen i klimapåvirkning forsvindende lille. Der ses en reduktion på 0,05 kg CO₂e/m²/år fra Trin 2 til Trin 3 grundet ændringen fra fibercement

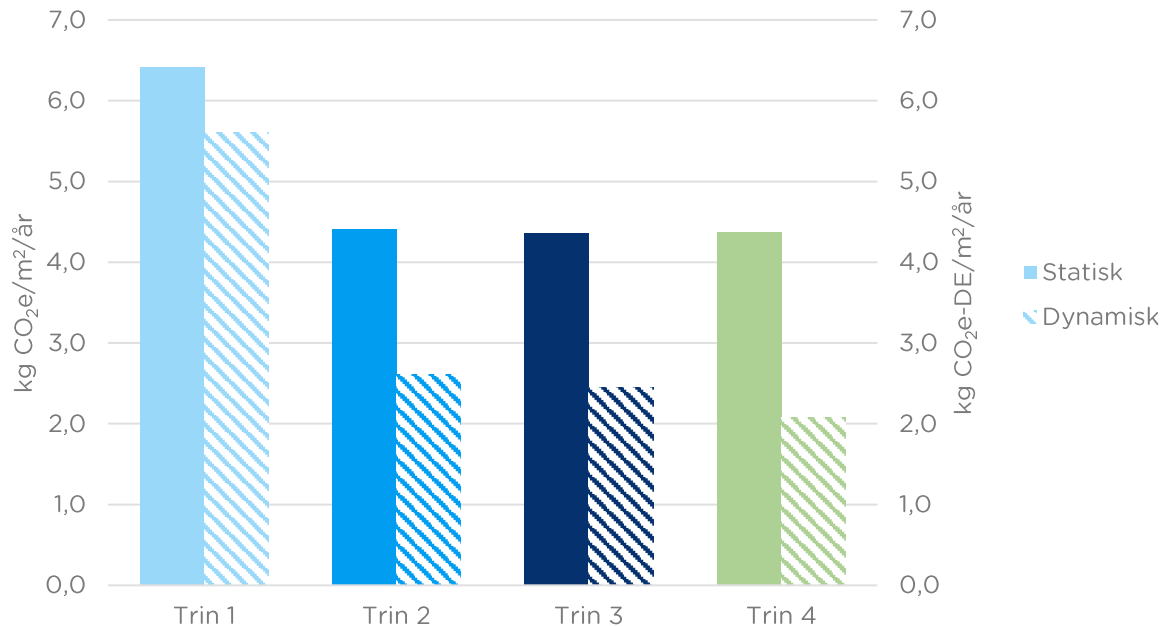
facadeplader til træbeklædning og en stigning på 0,02 kg CO₂e/m²/år fra Trin 3 til Trin 4 grundet udskiftningen til papiruldsisolering i taget.



Figur 10 - Klimapåvirkning for Case 3 - Produktionshal for hvert trin fordelt på livscyklusfaser

Figur 10 viser klimapåvirkningen fordelt på livscyklusfaser. Her ses det, at størstedelen af udledningen for Trin 1 sker i produktionsfasen (A1-A3). Selvom Trin 2 til Trin 4 har stort set samme totale klimapåvirkning, er der forskel på, hvornår klimapåvirkningen sker. I Trin 2 er udledningen fra produktionsfasen 1,49 kg CO₂e/m²/år, hvilket falder til 1,27 kg CO₂e/m²/år og 0,67 kg CO₂e/m²/år for henholdsvis Trin 3 og Trin 4. I Trin 4 er klimapåvirkningen fra udskiftninger (B4) en smule højere, da papiruldsisoleringen i taget har en levetid på 40 år, og dermed skal udskiftes i løbet af byggeriets levetid, hvorimod mineraluldsisoleringen i taget i Trin 1-3 har en levetid på 50 år, og ikke udskiftes undervejs. Mængden af biobaserede materialer stiger gradvist fra Trin 1-4, men dog ikke i et omfang, der resulterer i en negativ klimapåvirkning i produktionsfasen, som det var tilfældet med de to tidligere cases.

6.3.4 Dynamisk beregning



Figur 11 - Statiske og dynamiske resultater for Case 3 - Produktionshal for hvert trin. Den venstre y-akse indikerer den statiske klimapåvirkning og den højre den dynamiske.

I den dynamiske beregning vist i Figur 11 kommer forskellen imellem Trin 2-4 også til udtryk. Den samlede klimapåvirkning i den statiske beregning er tæt ved ens for alle tre Trin, men reduceres med henholdsvis 41%, 44% og 53% i den dynamiske beregning, grundet den øgede mængde af biobaserede materialer i Trin 3 og Trin 4. For Trin 1 er reduktionen fra den statiske til den dynamiske beregning 13%.

6.3.5 Delkonklusion

For produktionshallen er reduktionen i klimapåvirkning mest betydeligt fra Trin 1 til 2, hvor stålkonstruktionen udskiftes med en limtræskonstruktion, og trapezpladerne i taget udskiftes til trækassetter. Fra Trin 2 til 4 er den samlede klimapåvirkning stort set ens. Der ses en lille stigning fra Trin 3 til Trin 4, hvilket skyldes udskiftningen til papiruldsisolering i tagkonstruktionen. Trods den lille forskel i den samlede klimapåvirkning, er der dog forskel på, hvornår i løbet af livscyklussen, udledningen sker. For Trin 2 kommer 33% af udledningen fra produktionsfasen, for Trin 2 er det 29% og for Trin 4 kommer kun 13% af udledningen fra produktionsfasen.

For de dynamiske resultater ses den største reduktion også fra Trin 1 til Trin 2. Der ses dog fortsat en reduktion fra Trin 2 til Trin 4, og trods at de statiske resultater viser en højere påvirkning i Trin 4 end Trin 3, er det omvendt for de dynamiske resultater, hvilket skyldes den øgede mængde af biogene materialer i Trin 4, hvis påvirkning ved endt levetid vægtes lavere end påvirkningen i produktionsfasen.



6.4 Case 4 – Kontor

Denne analyse er et LCA-studie af et toetagers kontorbyggeri med kælder og et bruttoareal på 2.145 m². Det faktiske scenarie er et træbyggeri med en rammekonstruktion i limtræ, etagedæk bestående af trækassetter med mineraluld, tagkassetter og ydervægge af træ og mineraluldsisolering og facadebeklædning af aluminium og træ. Etagedæk over kælder og kælderydervægge består af beton og terrændæk af beton isoleret med polystyren, svarende til Trin 3 (se 6.4.2 Scenariebeskrivelser). Med udgangspunkt i dette scenarie har Rambølls konstruktionsingeniører regnet mængder og materialer på et tilsvarende byggeri bestående af rammekonstruktion i stål, etagedæk i beton og ydervægge og tagelementer i stål isoleret med mineraluld. Derudover indeholder analysen scenarier, hvor træbyggeriet i stedet for mineraluldsisolering anvender træfiberisolering i ydervæggene (Trin 4). For at sikre sammenligningsgrundlaget er isoleringsevnen (U-værdien) beregnet for ydervægge og tagkonstruktioner (Appendix 10: Case 4 – Kontor – U-værdiberegninger).

I denne case indgår også driftsenergi. Her er etagedækket den eneste ændrede konstruktion, der har indflydelse på varmeakkumuleringen og dermed driftsenergien (se Appendix 13: Case 4 – Kontor – Driftsemissioner).

6.4.1 Funktionel enhed

For at sikre korrekt sammenligningsgrundlag for de fire trin bestemmes den funktionelle enhed for de analyserede systemer til

2.145 m² kontorbyggeri med en konstruktion, der opfylder gældende bæreevnekrav og ydervægge og tag med minimums U-værdier på hhv. 0,16 og 0,09 i 50 år.

6.4.2 Scenariebeskrivelser

Alle trin har armerede fundamenter og terrændæk samt 3-lags træ-alu vinduer.

Trin 1 er en rammekonstruktion i stål med etagedæk i beton med mineraluldsisolering, gipsloft og delvist vinylgulv og fliser. Tagelementerne består af trapezplader og mineraluld. Ydervæggene er opbygget af facadeelementer i stål med mineraluldsisolering. Facaden er beklædt med aluminiumsplader.

Trin 2 er en rammekonstruktion i limtræ med etagedæk bestående af trækassetter med mineraluldsisolering, gipsloft og delvist fliser og vinylgulv. Tagkassetter og ydervægge består af trækonstruktioner med mineraluldsisolering. Facaden er beklædt med aluminiumsplader.

Trin 3 er en rammekonstruktion i limtræ med etagedæk bestående af trækassetter med mineraluldsisolering, gipsloft og delvist laminatgulv og fliser. Tagkassetter og ydervægge består af trækonstruktioner med mineraluldsisolering. Tagkassetter og ydervægge består af trækonstruktioner og mineraluldsisolering. Facaden er beklædt med træ og aluminiumsplader.

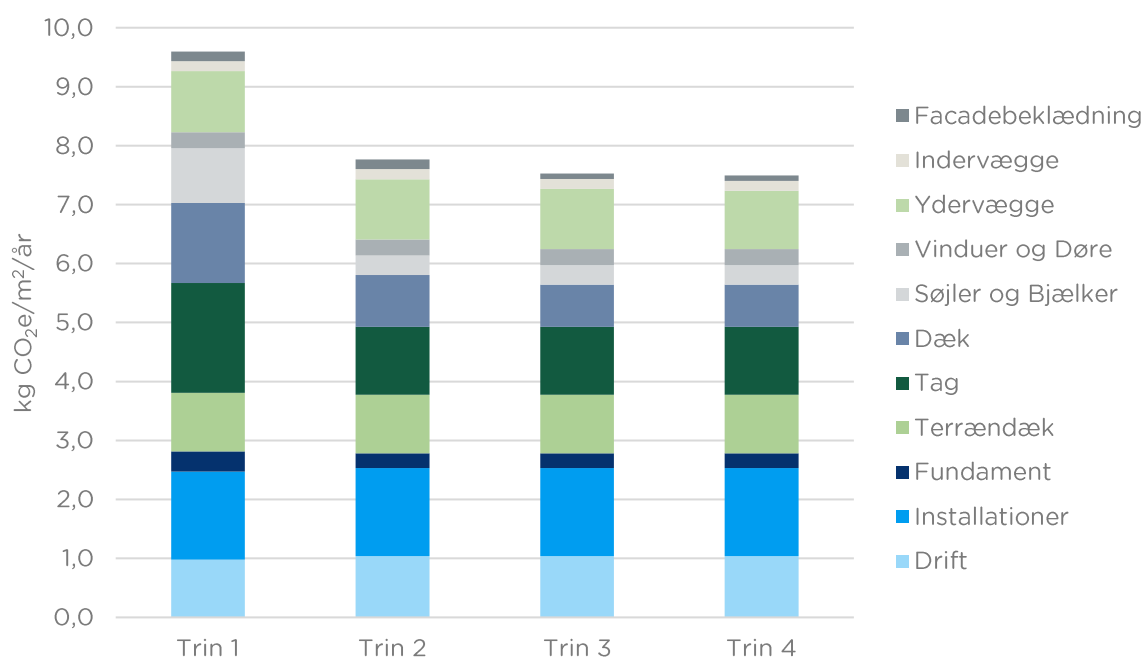
Trin 4 er en rammekonstruktion i limtræ med etagedæk bestående af en trækonstruktion med mineraluldsisolering, gipsloft og delvist laminatgulv og fliser, og tagkassetter i træ med mineraluldsisolering. Ydervæggene består af trækonstruktioner med træfiberisolering og er beklædt med træ og aluminiumsplader. Taget består af trækassetter med mineraluldsisolering.

Tabel 6 – Scenarieoversigt Case 4 - Kontor

Bygningstype		Trin 1	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Kontor					
Brutto etageareal	2.145 m ²	Basis	Træbaserede bærende konstruktioner	Træbaseret beklædning	Træfiber- og papiruldsisolering
Antal etager	3 inkl. kælder				
Etagehøjde	2,5-3,3 m				
Statisk princip	Rammekonstruktion				
Bærende konstruktion	Stålkonstruktion	x	Limtræskonstruktion	Limtræskonstruktion	Limtræskonstruktion
Fundament	Stribe- og punktfundamenter i armeret beton	x	x (tilpasset i størrelse)	x (tilpasset i størrelse)	x (tilpasset i størrelse)
Terrændæk	Armeret beton + EPS	x	x	x	x
Ydervæg	Stålelementer + mineraluldsisolering + aluminiumsbeklædning	x	Trækassetter + mineraluld + aluminium	Trækassetter + mineraluld + aluminium/træbeklædning	Trækassetter + træfiberisolering + aluminium/træbeklædning
Kældervægge	Armeret beton + EPS	x	x	x	x
Tunge indervægge	Porebeton og Træelement + mineraluld	x	x	x	x
Lette indervægge	Trækonstruktion + mineraluld + gips	x	x	x	x
Etagedæk	Betondæk + mineraluld + vinylgulv + gipsloft	x	Trækassetter + mineraluld + vinylgulv + gipsloft	Trækassetter + mineraluld + laminatgulv + gipsloft	Trækassetter + mineraluld + laminatgulv + gipsloft
Tag	Trapezplade + mineraluld + tagpap + gipsloft	x	Trækonstruktion + mineraluld + tagpap + gipsloft	Trækonstruktion + mineraluld + tagpap + gipsloft	Trækonstruktion + mineraluld + tagpap + gipsloft
Vinduer og døre	Træ-alu, 3-lags	x	x	x	x

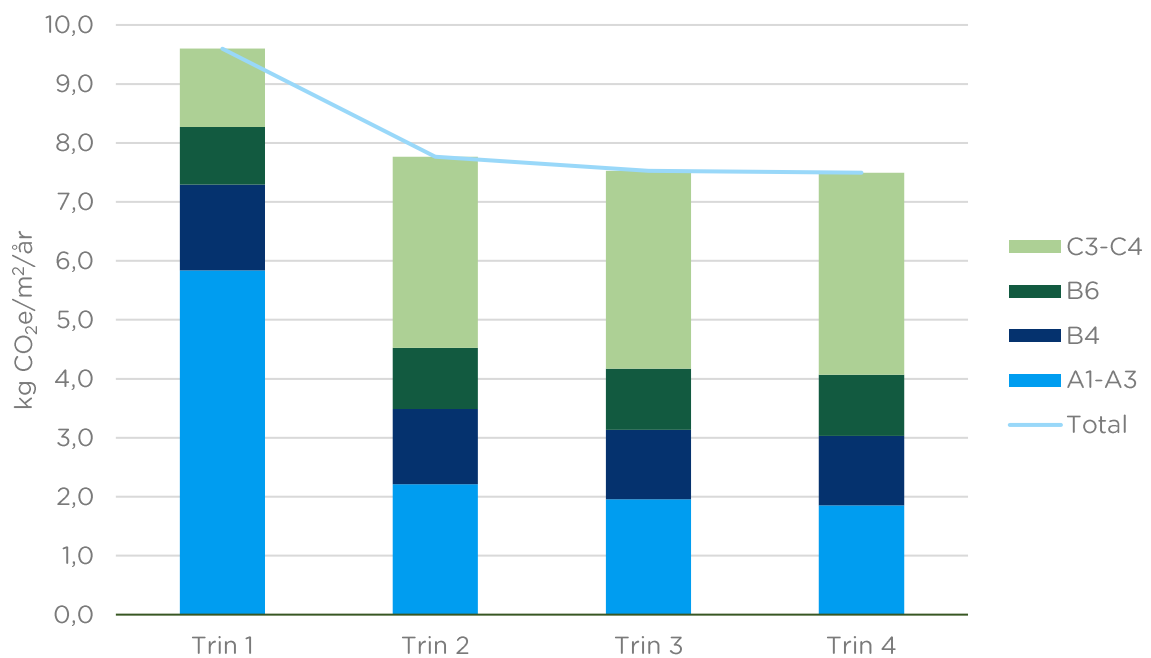
6.4.3 Klimapåvirkning

I dette afsnit analyseres klimapåvirkningen (GWP) for hver af de fire trin. Alle resultater er præsenteret i kg CO₂e/m²/år. Klimapåvirkningen fordeles således over bygningens bruttoareal over en betragtningsperiode på 50 år. Resultater præsenteret i de følgende afsnit ses i Appendix 4: Case 4 - Kontor - Life Cycle Inventory.



Figur 12 – Klimapåvirkning for Case 4 - Kontor for hvert trin fordelt på bygningsdele

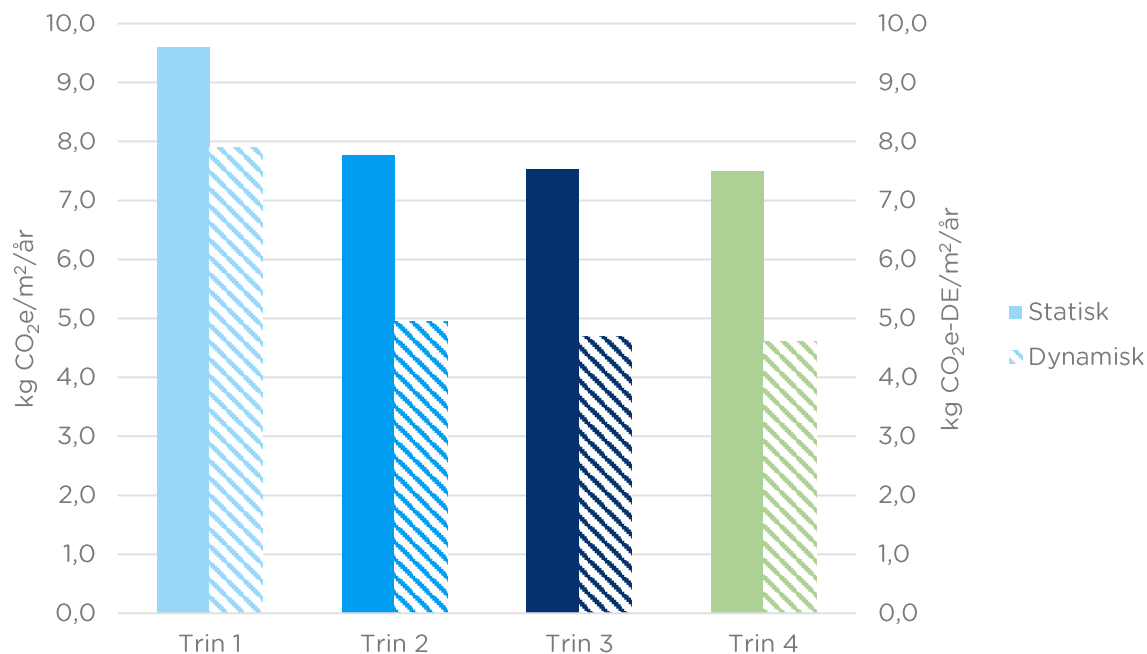
Af Figur 12 ses klimapåvirkningen for hvert af de fire trin fordelt på bygningsdele. Til forskel fra de tre tidligere cases er der i denne case inkluderet driftsemissioner. Driftsemissionerne er omregnet baseret på den termiske masse af byggeriet i hvert trin. Dog ses det for den specifikke case, at det ikke udgør en stor forskel i klimapåvirkningen fra driften. Ses der på den samlede klimapåvirkning, sker den største reduktion fra Trin 1 til Trin 2, hvilket primært skyldes tre parametre: at tagkonstruktionen ændres fra trapezplader til en trækonstruktion, at etagedækkene udskiftes fra betondæk til trækassetter, samt at stålsøjler og -bjælker udskiftes med en limtræskonstruktion. Fra Trin 2 til Trin 3 falder klimapåvirkningen fra 7,76 kg CO₂e/m²/år til 7,53 kg CO₂e/m²/år, hvilket skyldes udskiftning af gulvbelægningen fra vinyl til laminatgulv, samt at facadebeklædningen går fra at være en ren aluminiumsfacade til at være delvist træ og delvist aluminium, som svarer til det byggede scenarie. Grundet brandkrav er der kun udskiftet til træfiberisolering i ydervæggene i Trin 4, hvilket resulterer i en reduktion på 0,03 kg CO₂e/m²/år.



Figur 13 - Klimapåvirkning for Case 4 - Kontor for hvert trin fordelt på livscyklusfaser

Figur 13 viser klimapåvirkningen fordelt på livscyklusfaser. Til forskel fra de tidligere cases er driftsemissionerne (B6) også inkluderet. Den største forskel ses igen fra Trin 1 til Trin 2, hvor størstedelen af udledningen går fra at ligge i produktionsfasen (A1-A3) til at ligge ved endt levetid (C3-C4). For Trin 2-4 er fordelingen mellem udledningen i de forskellige livscyklusfaser stort set ens. Ændringen i termisk masse fra Trin 1 til Trin 2 resulterer i en lille forøgelse på 0,06 kg CO₂e/m²/år fra driftsemissionerne.

6.4.4 Dynamisk beregning



Figur 14 – Statiske og dynamiske resultater for Case 4 – Kontor for hvert trin. Den venstre y-akse indikerer den statiske klimapåvirkning og den højre den dynamiske.

Sammenligningen mellem de statiske og dynamiske resultater er præsenteret i Figur 14. Reduktion for Trin 1 er 18%, hvorefter den stiger betydeligt til henholdsvis 36%, 38% og 38% for Trin 2-4, hvilket stemmer overens med resultaterne præsenteret i Figur 13, hvor vi så det største skift i tidspunktet for udledningerne fra Trin 1 til Trin 2. De dynamiske resultater for Trin 2-4 ligger relativt tæt, hvilket også var at forvente, eftersom udledningen for de tre trin fordeler sig nogenlunde jævnt på tværs af livscyklusfaser.

6.4.5 Delkonklusion

For kontorbyggeriet ses overordnet en reduktion i den samlede klimapåvirkning fra Trin 1 til Trin 4. Den største reduktion sker fra Trin 1 til Trin 2, hvor tagkonstruktionen ændres fra trapezplader til en trækonstruktion, at etagedækkene udskiftes fra betondæk til trækassetter, samt at stålsøjler og -bjælker udskiftes med en limtræskonstruktion. Fra Trin 1 til Trin 2 ses en lille stigning fra driftsemissionerne, hvilket skyldes ændringen i den termiske masse af byggeriet. For Trin 1 er størstedelen af udledningen relateret til produktionsfasen, hvilket fra Trin 2 og frem skifter til, at udledningen ved endt levetid udgør den største andel.

Dette afspejles også i de dynamiske resultater, hvor forskellen mellem statisk og dynamisk går fra 18% i Trin 1 til 36-38% for Trin 2-4, grundet den øgede mængde af udledningen, der først sker ved endt levetid.



6.5 Case 5 – Rækkehus

Denne analyse er et LCA-studie af en rækkehusbebyggelse bestående af et- og toplanskædehuse med et samlet bruttoareal på 6.701 m². Det faktiske scenarie er et træbyggeri med tag og ydervægge i trækassetter med mineraluldsisolering, facadebeklædning i træ og etagedæk i træ med trægulv. Lodrette boligadskillelser er også udført som trækassetter med mineraluldsisolering. Fundamenter og terrændæk er udført i armeret beton og med EPS-isolering, svarende til Trin 3 (se 6.5.2 Scenariebeskrivelser). Med udgangspunkt i dette scenarie har Rambølls konstruktionsingeniører regnet mængder og materialer på et tilsvarende byggeri bestående af ydervægselementer i letbeton og mineraluldsisolering med teglskaller som facadebeklædning, etagedæk udført som huldæk, tagkassetter i træ med mineraluldsisolering og boligadskillelser i letbeton og mineraluldsisolering. Derudover indeholder analysen scenarier, hvor træbyggeriet i stedet for mineraluldsisolering anvender træfiberisolering i ydervægge og indervægge, hvor brandkravene tillader det (Trin 4). For at sikre sammenligningsgrundlaget er isoleringsevnen (U-værdien) beregnet for ydervægge (se Appendix 11: Case 5 – Rækkehus – U-værdiberegninger).

I denne case indgår også driftsenergi, hvor ændringer i etagedæk, terrændæk og ydervægge har indflydelse på varmeakkumuleringen og dermed driftsenergien. Driftsemissionerne for rækkehusene er bestemt ud fra en arealvægtet summering af energirammeresultater for et repræsentativt hus af hver boligtype (se Appendix 14: Case 5 – Rækkehus – Driftsemissioner).

6.5.1 Funktionel enhed

For at sikre sammenligningsgrundlaget for de fire trin bestemmes den funktionelle enhed for de analyserede systemer til

6.701 m² rækkehusbebyggelse med en konstruktion, der opfylder gældende bæreevnekrav og ydervægge med en minimums U-værdi på 0,15 i 50 år.

6.5.2 Scenariebeskrivelser

Alle trin har armerede fundamenter og terrændæk samt 3-lags træ-alu vinduer.

Trin 1 består af ydervægselementer i letbeton og mineraluldsisolering beklædt med teglskaller og etagedæk bestående af huldæk. Gulvet er belagt med laminat og fliser, og lofter er udført i træbeton. Taget består af trækassetter med mineraluldsisolering, og boligadskillelser er udført som letbetonvægge med mineraluldsisolering.

Trin 2 består af ydervægselementer i træ med mineraluldsisolering beklædt med teglskaller og etagedæk i konstruktionstræ med mineraluldsisolering. Gulvet er belagt med laminat og fliser, og lofter er udført i træbeton. Taget består af trækassetter med mineraluldsisolering, og boligadskillelser er trækassetter med mineraluldsisolering.

Trin 3 består af ydervægselementer i træ med mineraluldsisolering og træbeklædning og etagedæk i konstruktionstræ med mineraluldsisolering. Gulvet er delvist trægulv og delvist fliser, og lofter er udført i træbeton. Taget består af trækassetter med mineraluldsisolering, og boligadskillelser er trækassetter med mineraluldsisolering.

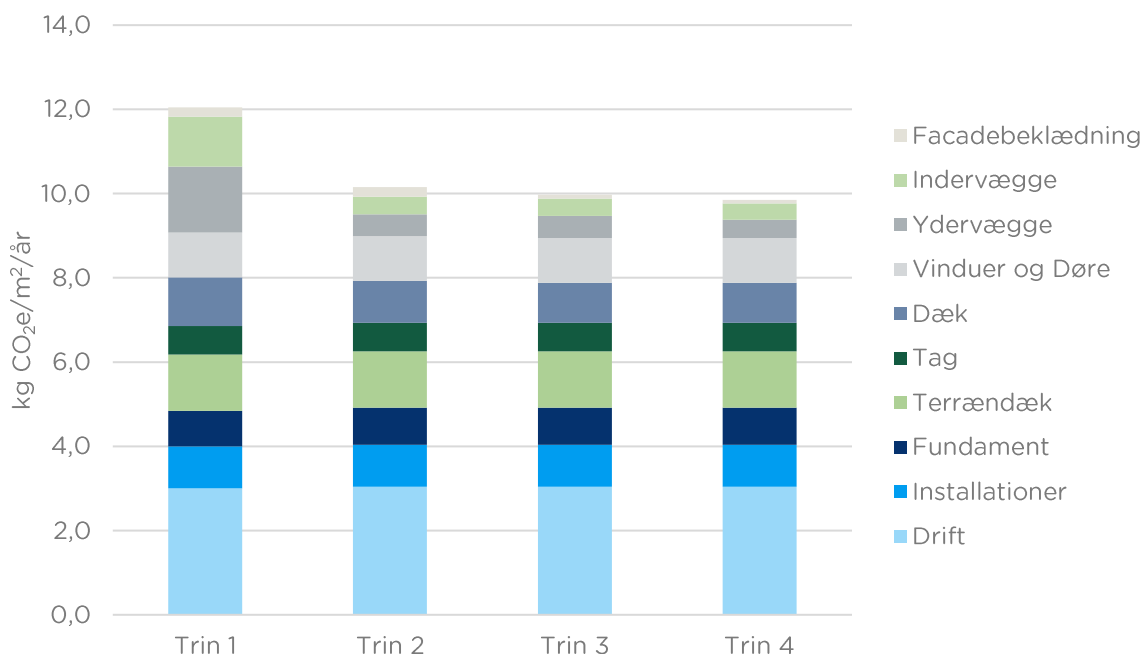
Trin 4 består af ydervægselementer i træ med træfiberisolering og træbeklædning og etagedæk i konstruktionstræ med mineraluldsisolering. Gulvet er delvist trægulv og delvist fliser, og lofter er udført i træbeton. Taget består af trækassetter med mineraluldsisolering, og boligadskillelser er trækassetter med mineraluldsisolering.

Tabel 7 - Scenarieoversigt Case 5 - Rækkehus

Bygningstype		Trin 1	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Rækkehus					
Brutto etageareal	6.701 m ²	Basis	Træbaserede bærende konstruktioner	Træbaseret beklædning	Træfiber- og papiruldsisolering
Antal etager	1-2				
Etagehøjde	2,5-3,5 m				
Statisk princip	Elementbyggeri				
Fundament	Stribe- og punktfundamenter i armeret beton	x	x (tilpasset i størrelse)	x (tilpasset i størrelse)	x (tilpasset i størrelse)
Terrændæk	Armeret beton + EPS	x	x	x	x
Ydervæg	Letbeton + mineraluld + teglskaller	x	Trækassetter + mineraluld + teglskaller	Trækassetter + mineraluld + træbeklædning	Trækassetter + træfiberisolering + træbeklædning
Boligadskillelse	Letbeton + mineraluld	x	Trækassetter + mineraluld	Trækassetter + mineraluld	Trækassetter + mineraluld
Lette indervægge	Trækonstruktion + mineraluld + gips	x	x	x	Trækonstruktion + træfiberisolering + gips
Etagedæk	Huldæk + træbetonloft + laminatgulv/fliser	x	Trækassetter + træbetonloft + laminatgulv/fliser	Trækassetter + træbetonloft + trægulv/fliser	Trækassetter + træbetonloft + trægulv/fliser
Tag	Trækassetter + mineraluldsisolering	x	x	x	x
Vinduer og døre	Træ-alu, 3-lags	x	x	x	x

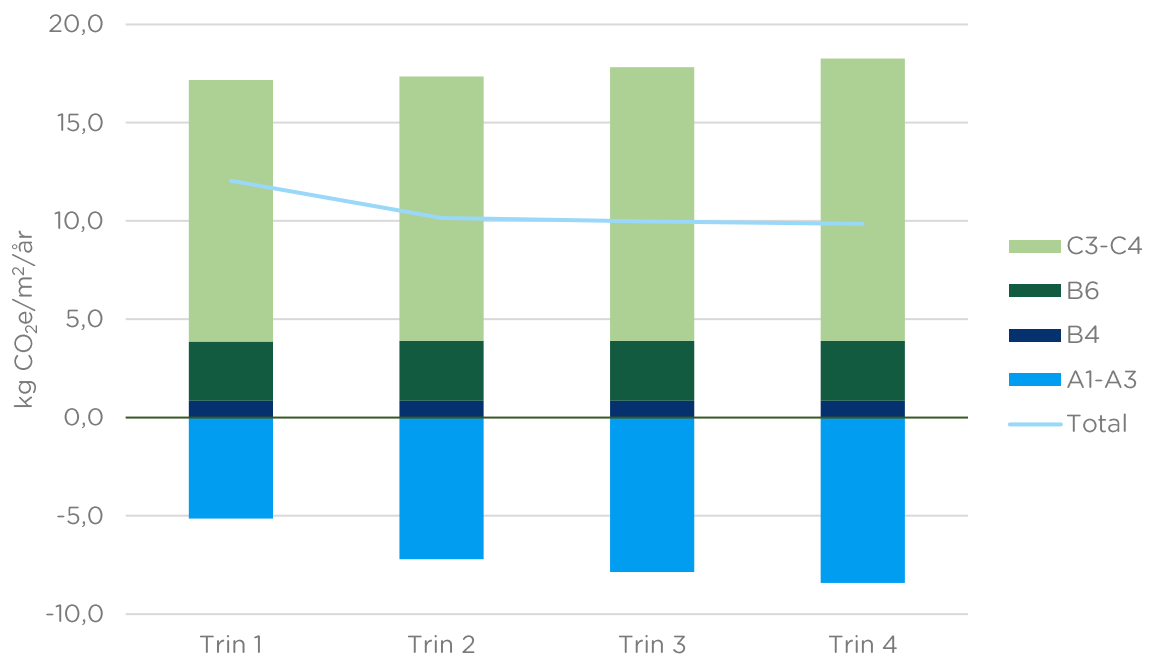
6.5.3 Klimapåvirkning

I dette afsnit analyseres klimapåvirkningen (GWP) for hver af de fire trin. Alle resultater er præsenteret i kg CO₂e/m²/år. Klimapåvirkningen fordeles således over bygningens bruttoareal over en betragtningsperiode på 50 år. Resultater præsenteret i de følgende afsnit ses i Appendix 5: Case 5 - Rækkehus - Life Cycle Inventory.



Figur 15 - Klimapåvirkning for Case 5 - Rækkehus for hvert trin fordelt på bygningsdele

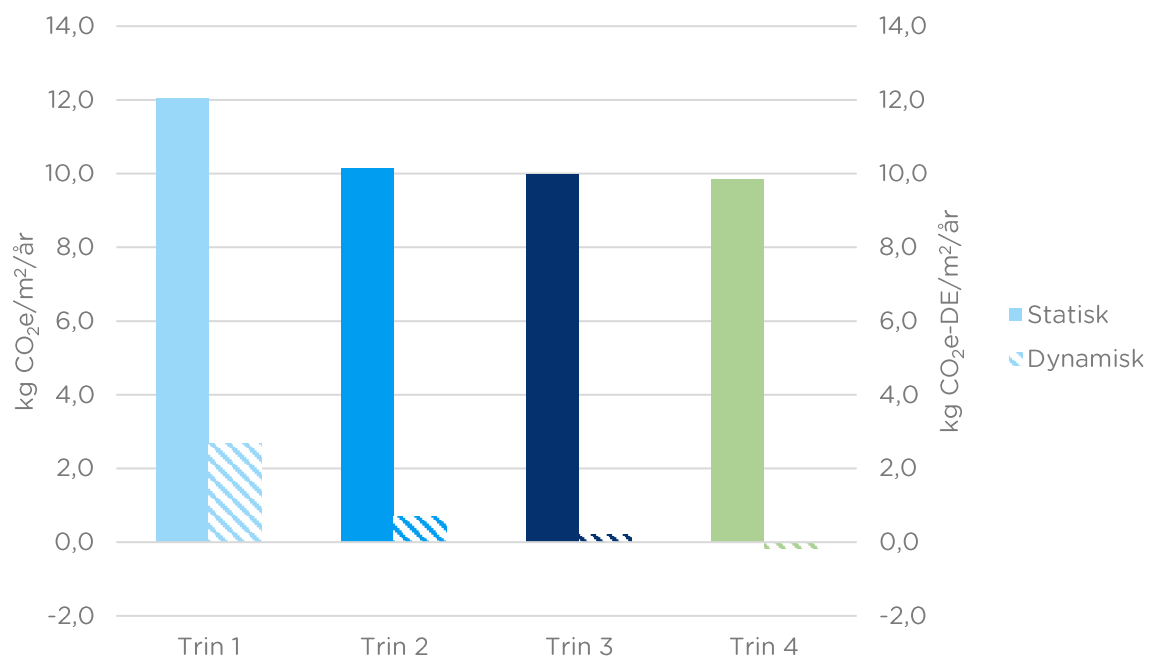
Resultaterne i Figur 15 viser den samlede klimapåvirkning for hvert trin fordelt på de forskellige bygningsdelskategorier og drift. For Trin 1 er den samlede klimapåvirkning 12,05 kg CO₂e/m²/år, hvilket er over grænseværdien fra BR18, der pr. 1. januar 2023 er sat til 12 kg CO₂e/m²/år. Klimapåvirkningen falder til 10,15 kg CO₂e/m²/år i Trin 2, hvilket primært skyldes udskiftningen fra letbeton til trækassetter i både ydervægge og boligadskillelser. Fra Trin 2 til Trin 3 ses en reduktion på 0,18 kg CO₂e/m²/år, hvilket primært skyldes udskiftningen fra teglskaller på facaden til træbeklædning. Fra Trin 3 til Trin 4 ses en yderligere reduktion på 0,12 kg CO₂e/m²/år, som følge af udskiftningen til træfiberisolering i ydervægge og lette indervægge.



Figur 16 - Klimapåvirkning for Case 5 - Rækkehus for hvert trin fordelt på livscyklusfaser

Af Figur 16 ses det, at der for alle fire trin er en negativ klimapåvirkning fra produktionsfasen (A1-A3). Det skyldes den relativt store mængde træbaserede materialer, der indgår på tværs af alle trin, herunder tagkassetterne. Mængden af træbaserede materialer øges gradvist fra Trin 1-4, og dermed bliver den negative klimapåvirkning i produktionsfasen også større fra Trin 1 mod Trin 4. Tilsvarende øges klimapåvirkningen ved endt levetid (C3-C4) fra Trin 1 til Trin 4, da de træbaserede materialer antages at blive afbrændt efter endt levetid, og dermed udleder den CO₂, der blev lagret i produktionsfasen.

6.5.4 Dynamisk beregning



Figur 17 - Statiske og dynamiske resultater for Case 5 - Rækkehus for hvert trin. Den venstre y-akse indikerer den statiske klimapåvirkning og den højre den dynamiske.

Figur 17 viser de statiske og dynamiske beregninger for hvert Trin. Grundet den store mængde træbaseret materiale ses en stor reduktion fra den statiske til den dynamiske beregning allerede fra Trin 1, hvor reduktionen er 78%. For Trin 2 og Trin 3 er reduktionen henholdsvis 93% og 98%, hvor der for Trin 4 ses en reduktion på 102%. At reduktionen er over 100% skyldes, at den dynamiske beregning ender med at give et negativt resultat. Den negative udledning i produktionsfasen er, grundet fremskrivningsfaktorerne i den dynamiske beregning, høj nok til at udligne den påvirkning, der sker fra drift, udskiftninger og ved endt levetid, og dermed ender den dynamiske beregning for Trin 4 på -0,17 kg CO₂e/m²/år.

6.5.5 Delkonklusion

For rækkehusbebyggelsen ses den største reduktion fra Trin 1 til Trin 2, hvor ydervægge og boligadskillelser skiftes fra letbeton til trækassetter, hvilket medfører en reduktion på 16%. Der ses mindre reduktioner fra både Trin 2 til 3 og Trin 3 til 4. Allerede ved Trin 1 ses en negativ klimapåvirkning i produktionsfasen, hvilket skyldes den store mængde træbaserede materialer. Denne øges gennem alle fire trin. Den store mængde træbaserede materialer afspejles også i de dynamiske resultater, hvor der ses de største forskelle mellem statiske og dynamiske resultater på tværs af alle seks cases. Her ses en reduktion på 78-102% fra statisk til dynamisk. For Trin 4 opnås et negativt resultat i den dynamiske beregning, hvilket skyldes, at mængden af biogene materialer, der lagrer CO₂ i produktionsfasen, sammen med fremskrivningsfaktorerne, er stor nok til at udligne den udledning, der kommer under antagelse af afbrænding af materialerne ved endt levetid.

6.6 Case 6 – Institution



Denne analyse er et LCA-studie af en etplans børneinstitution med et bruttoareal på 2.472 m². Byggeriet består af en rammekonstruktion i limtræ og stål og et spærtag i limtræ isoleret med mineraluld. Ydervæggene er delvist trækassetter med mineraluldsisolering og delvist betonelementvægge med mineraluldsisolering og træbeklædning. De stabiliserende indervægge er udført i beton. Fundament og terrændæk består af armeret beton og EPS-isolering med gummi- og vinylgulv. Eftersom byggeriet indeholder både konventionelle og træbaserede løsninger, er det specifikke byggeri ikke repræsenteret i nogen af de fire trin. I stedet har Rambølls konstruktionsingeniører med afsæt i dette scenarie regnet mængder og materialer på tilsvarende konstruktioner, hvor alle ydervæggene består af beton og mineraluldsisolering beklædt med teglsten. I Trin 2 konverteres samtlige ydervægge og stabiliserende indervægge til trækassetter med mineraluldsisolering (se 6.6.2 Scenariebeskrivelser). Fundamentet er ikke reduceret som følge af ændringen af ydervægskonstruktionen. Der ligger en potentiel yderligere besparelse på forventeligt 3% for Trin 2-4 i reduktionen af størrelsen på fundamentet, som ikke er inkluderet i nedenstående resultater. Derudover indeholder analysen scenarier, hvor der anvendes træfiberisolering i ydervægge og indervægge, hvor brandkravene tillader det (Trin 4). For at sikre sammenligningsgrundlaget er isoleringsevnen (U-værdien) beregnet for ydervægge (se Appendix 12: Case 6 – Institution – U-værdiberegninger).

I denne case indgår også driftsenergi. Her er dog ingen ændrede konstruktioner, der har indflydelse på varmeakkumuleringen og dermed ingen forskelle i driftsenergien (se Appendix 15: Case 6 – Institution – Driftsemissioner).

6.6.1 Funktionel enhed

For at sikre sammenligningsgrundlag for de fire trin bestemmes den funktionelle enhed for de analyserede systemer til

2.472 m² børneinstitution med en konstruktion, der opfylder gældende bæreevnekrav og ydervægge med minimums U-værdi på 0,13 i 50 år.

6.6.2 Scenariebeskrivelser

Alle scenarier har armerede fundamenter og terrændæk og 3-lags træ-/aluvinduer.

Trin 1 er en rammekonstruktion i limtræ og stål med tag af limtræsspær. Ydervæggene består af betonelementer isoleret med mineraluld og facadebeklædning i teglsten. De bærende indervægge består af betonelementer.

Trin 2 er en rammekonstruktion i limtræ og stål med tag af limtræsspær. Ydervæggene består af trækassetter isoleret med mineraluld og med facadebeklædning i teglsten. De bærende indervægge er en trækonstruktion med mineraluldsisolering og brandgips.

Trin 3 er en rammekonstruktion i limtræ og stål med tag af limtræsspær. Ydervæggene består af trækassetter isoleret med mineraluld og med facadebeklædning i træ. De bærende indervægge er en trækonstruktion med mineraluldsisolering og brandgips.

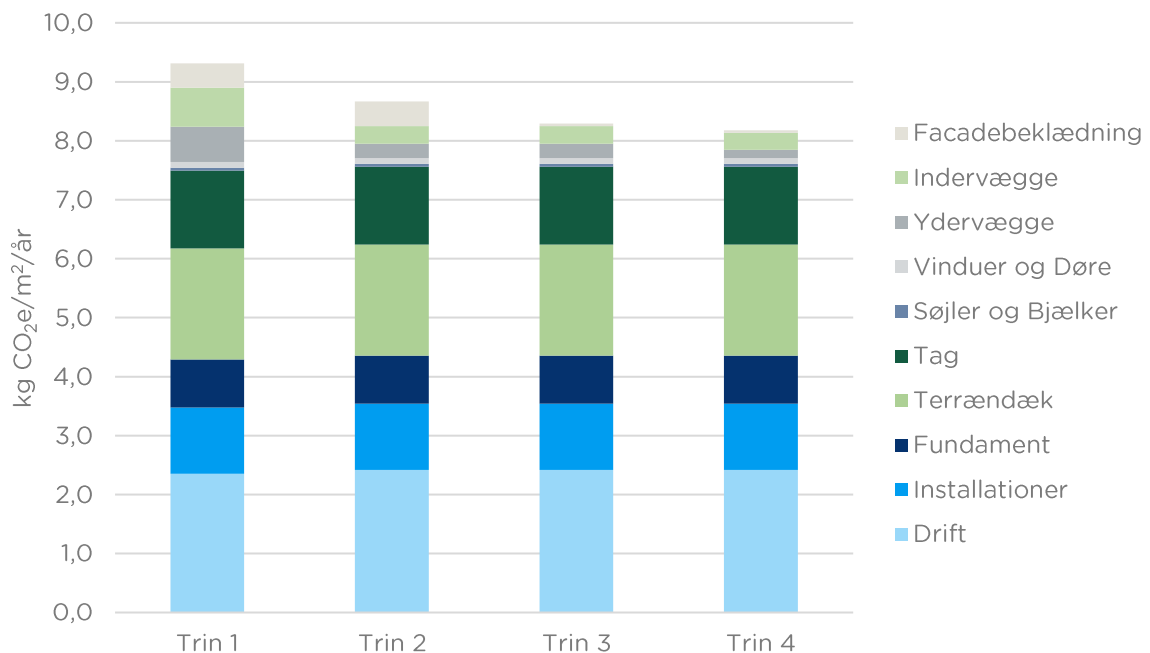
Trin 4 er en rammekonstruktion i limtræ og stål med tag af limtræsspær. Ydervæggene består af trækassetter isoleret med træfiberisolering og med facadebeklædning i træ. De bærende indervægge er en trækonstruktion med mineraluldsisolering og brandgips.

Tabel 8 – Scenarieoversigt Case 6 - Institution

Bygningstype		Trin 1	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Institution					
Brutto etageareal	2.472 m ²	Basis	Træbaserede bærende konstruktioner	Træbaseret beklædning	Træfiber- og papiruldsisolering
Antal etager	1				
Etagehøjde	2,6 m				
Statisk princip	Rammekonstruktion				
Bærende konstruktion	Stål- og limtrækonstruktion	x	x	x	x
Fundament	Stribefundament armeret beton	x	x	x	x
Terrændæk	Armeret beton + EPS	x	x	x	x
Ydervæg	Betonelementvæg + mineraluld	x	Trækassetter + mineraluld	Trækassetter + mineraluld	Trækassetter + træfiberisolering
Ydervægsbeklædning	Teglsten	x	x	Træbeklædning	Træbeklædning
Tunge indervægge	Beton	x	Trækassetter + mineraluld	Trækassetter + mineraluld	Trækassetter + mineraluld
Lette indervægge	Træ-/stålskelet + mineraluld + gips	x	x	x	Træ-/stålskelet + træfiberisolering + gips
Tag	Spærtag + tagpap + træbeton	x	x	x	x
Vinduer og døre	Træ-alu, 3-lags	x	x	x	x

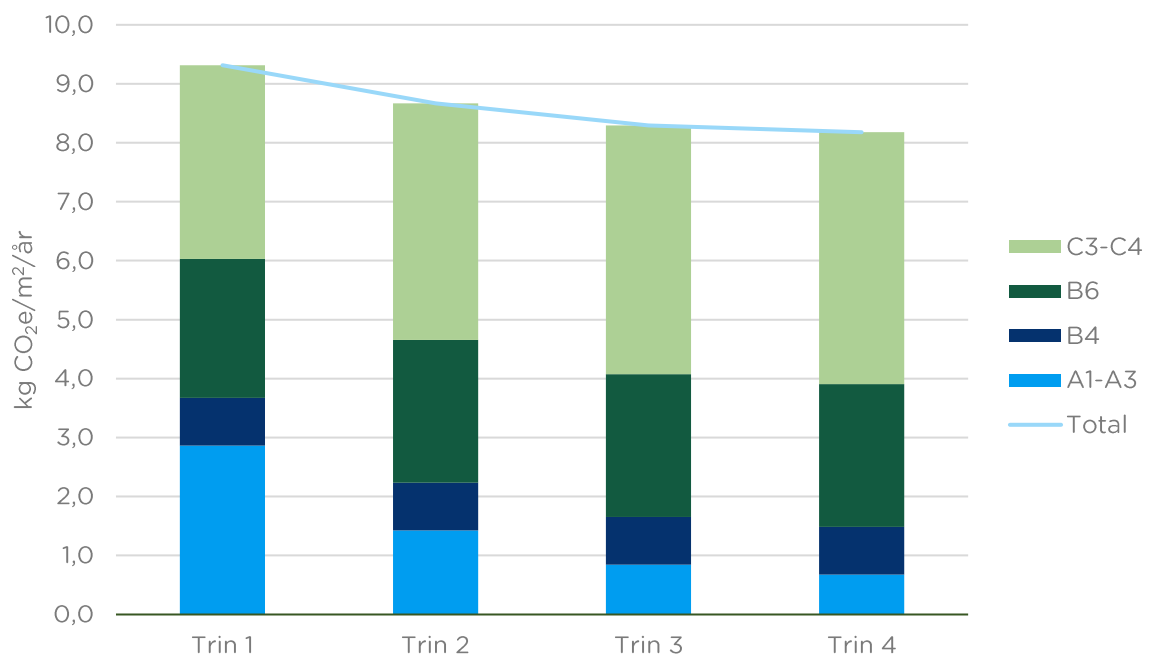
6.6.3 Klimapåvirkning

I dette afsnit analyseres klimapåvirkningen (GWP) for hver af de fire trin. Alle resultater er præsenteret i kg CO₂e/m²/år. Klimapåvirkningen fordeles således over bygningens bruttoareal over en betragtningsperiode på 50 år. Resultater præsenteret i de følgende afsnit ses i Appendix 6: Case 6 - Institution - Life Cycle Inventory.



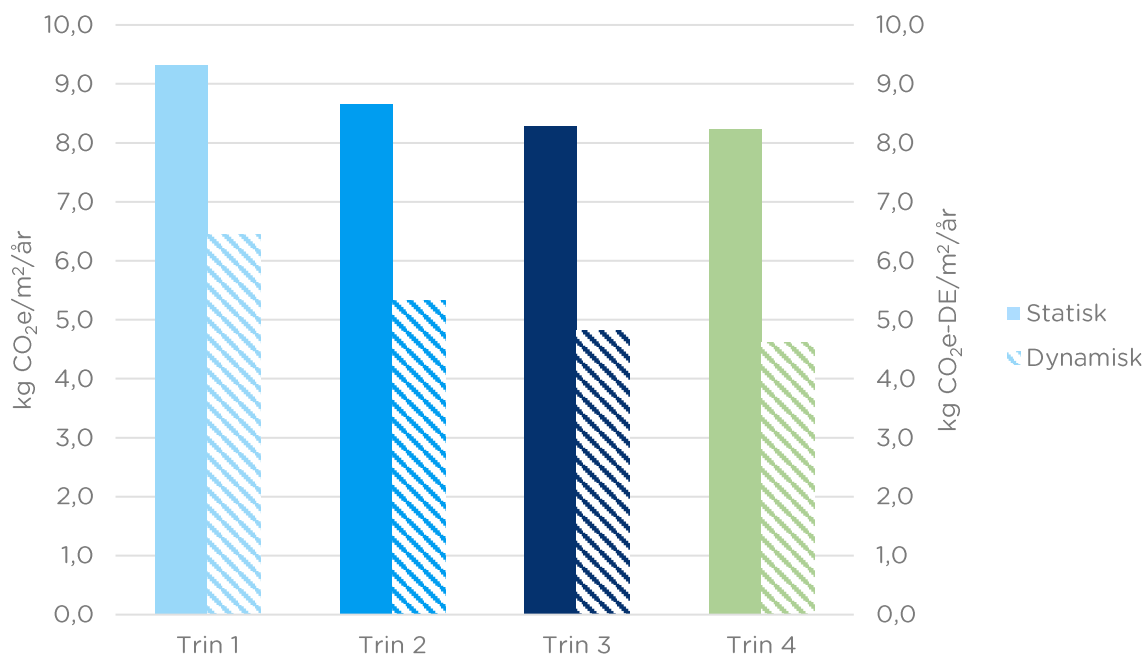
Figur 18 – Klimapåvirkning for Case 6 - Institution for hvert trin fordelt på bygningsdele

Figur 18 viser den samlede klimapåvirkning for hvert trin fordelt på bygningsdelskategorier og drift. Reduktionen de fire trin i blandt er mindre end det har været tilfældet i de tidligere cases. Det skyldes, at flere af de bygningsdele, der har den største klimapåvirkning – herunder terrændæk, tag og installationer – er ens for alle fire trin. Tagkonstruktionen er ens for alle fire trin, da trækonstruktionen på det eksisterende byggeri vurderes at være den mest sandsynlige løsning for denne type byggeri. Den største reduktion ses fra Trin 1 til Trin 2, hvor klimapåvirkningen går fra 9,32 kg CO₂e/m²/år til 8,66 kg CO₂e/m²/år, hvilket skyldes at både yder- og indervægge udskiftes fra at være betonkonstruktioner til trækassetter. Fra Trin 2 til Trin 3 ses en reduktion på 0,37 kg CO₂e/m²/år, hvilket skyldes udskiftningen af facadematerialet fra teglskaller til træbeklædning. Fra Trin 3 til Trin 4 sker også en lille reduktion som følge af udskiftningen af mineraluld med træfiberisolering i yder- og indervægge.



Figur 19 – Klimapåvirkning for Case 6 - Institution for hvert trin fordelt på livscyklusfaser

Ses der på klimapåvirkningen fordelt på livscyklusfaser som vist i Figur 19, sker størstedelen af udledningen ved endt levetid (C3-C4) for alle fire trin. For Trin 1 udgør udledningen ved endt levetid 35% af den samlede udledning, hvilket stiger til 46%, 51% og 52% for henholdsvis Trin 2, 3 og 4 som følge af den øgede mængde af træbaserede materialer. Trods at den største del af udledningen sker ved endt levetid indeholder alle fire trin fortsat en vis mængde materialer med en energikrævende produktion, og dermed ses der ingen negativ påvirkning i produktionsfasen (A1-A3). Udledningen fra driften (B6) er for Trin 1 2,36 kg CO₂e/m²/år, svarende til 25% af den samlede udledning. Ved udskiftningen fra beton til træbaserede ydervægge stiger driften en smule, og er for Trin 2-4 2,42 kg CO₂e/m²/år, hvilket svarer til 28-29% af den samlede klimapåvirkning.



Figur 20 - Statiske og dynamiske resultater for Case 6 - Institution for hvert trin. Den venstre y-akse indikerer den statiske klimapåvirkning og den højre den dynamiske.

6.6.4 Dynamisk beregning

I Figur 20 sammenlignes de statiske og dynamiske resultater for Case 6. Forskellen mellem den statiske og dynamiske beregning er 31%, 39%, 42% og 44% for henholdsvis Trin 1-4. Den øgede reduktion resultaterne imellem skyldes den øgede mængde af træbaserede materialer, der leder til et lavere resultat for den dynamiske beregning, grundet fremskrivningerne, der tilgodeser udledninger længere ude i fremtiden, fremfor *upfront* udledningerne. Eftersom Trin 4 har størst procentvis udledning ved endt levetid, afspejles dette også i de dynamiske resultater.

6.6.5 Delkonklusion

For institutionen ses en gradvis reduktion af klimapåvirkningen fra Trin 1 til Trin 4. Sammenlignet med de andre cases er reduktionen mindre, hvilket skyldes, at flere af de bygningsdele, der har den største klimapåvirkning, er ens igennem alle fire trin. Den mest betydningsfulde reduktion er fra Trin 1 til 2, hvor betonydervægge og -indervægge udskiftes med trækassetter. Ses der på, hvornår i livscyklusfasen, udledningerne sker, gælder det for alle fire trin, at størstedelen af udledningen sker ved endt levetid. Den stiger dog gradvist, så hvor det for Trin 1 er 35% af udledningen, der sker ved endt levetid, er det for Trin 4 52%.

Dette afspejles også i resultaterne for den dynamiske beregning, hvor den øgede mængde af udledning ved endt levetid resulterer i den største forskel mellem den statiske og den dynamiske beregning for Trin 4, der ligger på 44%.

6.7 Diskussion og perspektivering

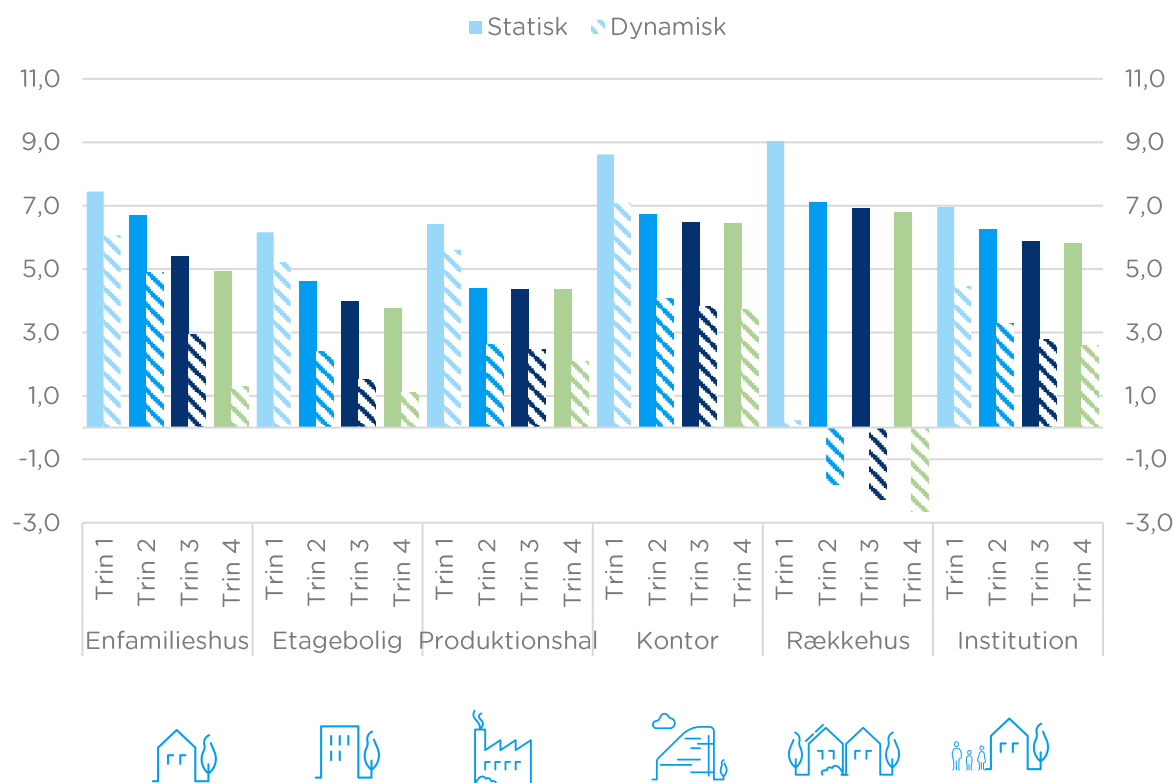
I de foregående afsnit er hvert enkelt af de seks typologiers livscyklusvurderinger præsenteret ved deres statiske og dynamiske resultater. Med hensyn til driften ses der i et følgende afsnit nærmere på, hvilken indflydelse udskiftningen fra konventionelle til træbaserede materialer har på driftsenergi i byggerierne.

Derudover sammenholdes resultaterne for samtlige 24 beregninger, hvor fordele og ulemper ved de to beregningsmetoder diskuteres. Der ses nærmere på, hvordan livscyklusvurderingerne ved dynamiske beregninger kan føre til negative resultater

Endeligt perspektiveres både til brancheresultater samt til bygningsreglementets klimakrav og hvordan de seks cases performer i den sammenhæng.

Det bemærkes at klimapåvirkningen på tværs af alle seks cases udgør drift, installationer, fundamenter og terrændæk en betydelig del. For de indlejrede emissioner fra installationer, fundamenter og terrændæk er der potentielt store besparelser at hente for alle byggerierne, hvis der udvikles på optimeringen af disse, for eksempel gennem brugen af skruefundamenter. Ses der alene på udskiftning af bygningsdele over fundament vil der være en potentiel besparelse ved brugen af træbaserede bygningsdele på op over 50 %.

6.7.1 Statiske og dynamiske resultater



Figur 21 – Statiske og dynamiske resultater for Trin 1-4 for hver typologi for den indlejrede CO₂ i materialer. Den venstre y-akse indikerer den statiske klimapåvirkning og den højre den dynamiske. Det bemærkes at resultaterne er opgjort uden B6 – driftsemissioner.

I Figur 21 er de statiske og dynamiske resultater præsenteret for alle seks typologier. Det bemærkes, at resultaterne for Case 4-6 er opgjort uden driftsemissionerne. For alle cases gælder

det, at byggeriet har en lavere akkumuleret påvirkning i den dynamiske LCA angivet i kg CO₂e-DE/m²/år end den tilsvarende statiske beregning angivet i kg/CO₂e/m²/år.

Overordnet viser resultaterne, at mere biobaseret materiale medfører større reduktion ved at skifte fra en statisk til en dynamisk beregning, grundet at de biobaserede materialer har størst udledninger ved endt levetid og dermed vægtes lavere ved den dynamiske beregning.

Grunden til, at den dynamiske beregning tilgodeser biogene materialer, skyldes som tidligere nævnt, at der i den danske byggesektor benyttes -1/+1 reglen for beregning af biogent carbon, hvilket betyder, at den CO₂ der lagres i biogene materialer under fotosyntese krediteres med en negativ klimapåvirkning. Den negative påvirkning udlignes ved endt levetid, da biogene byggematerialer antages at blive afbrændt, hvorved den lagrede CO₂ frigives i atmosfæren. Metoden bygger på en antagelse om, at træet kommer fra bæredygtigt skovbrug, hvor mængden af CO₂ lagret i skoven forbliver den samme, således at den kan opfattes som værende CO₂ neutral (Andersen, Hoxha, Rasmussen, Sørensen, & Birgisdottir, 2024).

I tilfældet for Case 5 – Rækkehus, Trin 2-4, ses en negativ påvirkning for den dynamiske beregning som følge af den store mængde af biobaseret materiale. Det resultat indikerer dermed, at et byggeri kan have en negativ indlejret klimapåvirkning over dets levetid, hvis der tages højde for teknologisk udvikling og forsinkelsen af udledningerne. Det kan diskuteres, hvorvidt det giver mening at tilskrive byggeri, der opføres i dag, en negativ påvirkning, idet det implicerer, at vi ved at bygge med måske unødvendigt meget træ, kan være med til at reducere vores samlede klimapåvirkning. Der skal i øvrigt i bæredygtigt byggeri også tages højde for andre miljøpåvirkninger, som påvirker de planetære grænser, herunder biofysiske påvirkninger.

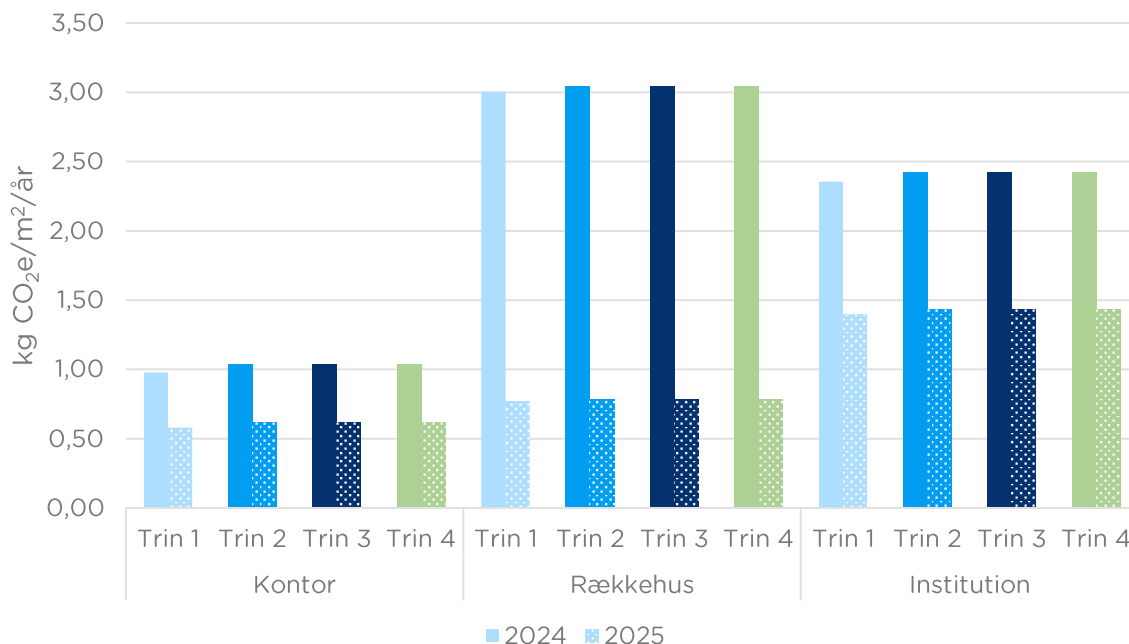
Yderligere inkluderes samtlige udledninger ikke i den LCA, som i dag er lovpligtig jf. BR18. Først og fremmest er det ikke alle livscyklusmoduler, der er inkluderet i systemafgrænsningen i det danske bygningsreglement. For eksempel udelades modul A4 – Transport til byggeplads og A5 – Opførelse, der begge bidrager til udledningen ved opførelse af byggeriet. For A4 – Transport vil vægten af materialerne spille en stor rolle, hvor lettere byggematerialer vil have en lavere klimapåvirkning relateret til transporten. Derudover er der flere bygningsdele, der ikke inkluderes, herunder mindre elektriske installationer og udnyttede tagflader og udendørsarealer. Det er altid vigtigt at have in mente, at en bygnings LCA har metodiske og faktiske begrænsninger og dermed ikke inkluderer samtlige udledninger relateret til byggeriet. Dette er i endnu højere grad vigtigt, når vi opnår resultater med negative udledninger, som det her er tilfældet med den dynamiske beregning for rækkehusbebyggelsen, så vi *ikke* kommer til den konklusion, at vi ved at bygge mere, kan reducere vores samlede klimapåvirkning.

Den dynamiske beregning er inkluderet i denne rapport for at belyse, hvordan teknologisk udvikling i produktionen af vores byggematerialer og tidspunktet for, hvornår udledningerne finder sted, kan påvirke resultatet. Den dynamiske metode, der er anvendt i indeværende rapport kan kritiseres for at forsimple fremskrivningerne, blandt andet for at antage, at der er den samme teknologiske udvikling på tværs af alle materialer og dermed produktionsmetoder, men ligeledes kan den statiske LCA kritiseres for *ikke* at tage højde for nogen teknologisk udvikling de kommende 50 år, samt at negligere aspektet af, hvornår udledningerne finder sted.

6.7.2 Driftsemissioner

Livscyklusfase B6 - Energiforbrug til drift er med i beregningen af Case 4-6. Ved at inddrage B6 står sammenligningen imellem Trin 1 og Trin 2-4 og validiteten af resultaterne stærkere, da resultaterne for hvert trin medtager den termiske masses indflydelse på energiforbruget. Som det ses af

resultaterne i Case 4-6, er forskellen i driftsemissionerne de fire trin iblandt ganske lille. Besparelsen i Trin 1 er 0,03-0,06 kg CO₂e/m²/år sammenlignet med Trin 2-4 for de tre cases, hvor driften er inkluderet.



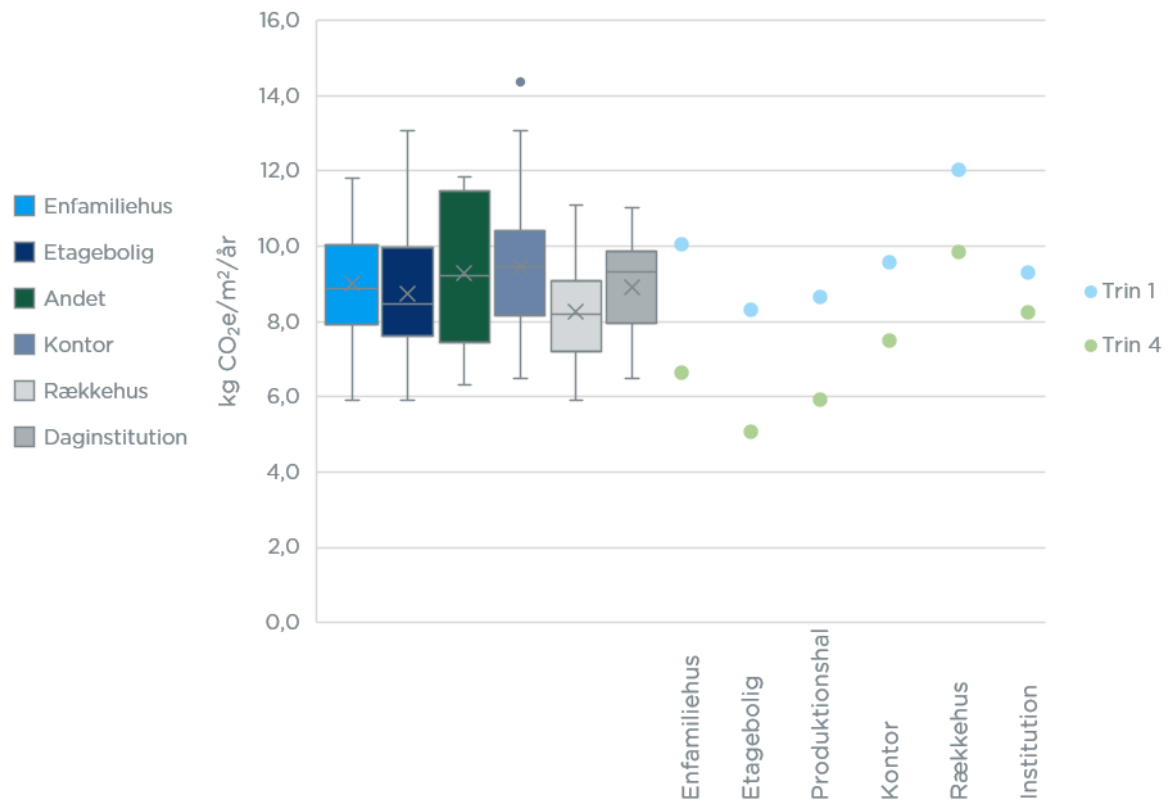
Figur 22 - Driftsemissioner for hvert trin for Case 4-6 beregnet med emissionsfaktorer for henholdsvis 2024 og 2025.

Driftsemissionerne er beregnet med de i 2024 aktuelle emissionsfaktorer for el, fjernvarme og ledningsgas. Fra 2025 opdateres emissionsfaktorerne, der anvendes til beregning af driftsemissionerne (Nilsson, Høibye, & Maagaard, 2023). Med de nye emissionsfaktorer fra 2025 er klimapåvirkningen beregnet i kg CO₂e/kWh reduceret for både el, fjernvarme og ledningsgas sammenlignet med de nuværende emissionsfaktorer. Det betyder, at den beregnede klimapåvirkning fra driften reduceres, og dermed udgør en mindre del af den samlede klimapåvirkning for det enkelte byggeri. I Figur 22 vises driftsemissionerne for Case 4-6 beregnet med henholdsvis 2024 og 2025 emissionsfaktorer. Det ses, at forskellen mellem resultatet i 2024 og 2025 er størst for Case 5 – Rækkehus, hvilket skyldes, at byggeriet opvarmes med fjernvarme, og at der for fjernvarme ses en større forskel i opdateringen af emissionsfaktorerne, end der gør for el. Både Case 4 – Kontor og Case 6 – Institution er opvarmet med varmepumper, og dermed er reduktionen mindre for begge disse cases. Det ses dog, som forventet, at klimapåvirkningen er betydeligt lavere for alle tre cases, når der regnes med 2025 faktorerne. Dermed spiller driften en endnu mindre rolle i sammenligningen mellem konventionelt og træbaseret byggeri, taget de opdaterede emissionsfaktorer i betragtning, og materialevalget vægter endnu højere.

6.7.3 Sammenligning med referenceværdier

Resultaterne for de seks cases er sammenlignet med resultaterne fra rapporten *Klimapåvirkning fra nybyggeri* (Tozan, et al., 2023) (herefter refereret til som BUILD-rapporten), hvor klimapåvirkningen for 163 casebygninger fordelt på otte typologier er opgjort. Produktionshallen sammenlignes med byggeri, der i BUILD-rapporten er opgjort som 'andet'. BUILD-rapporten indeholder resultater for 35 enfamiliehuse, 42 etageboliger, 22 rækkehuse, 35 kontorbyggerier, syv institutionsbyggerier og otte byggerier, der falder under kategorien 'andet'. Disse resultater er vist i boxplottet til venstre i Figur 23. Resultaterne i BUILD-rapporten er opgjort inklusive drift, hvilket kun er tilfældet for Case 4-6 i indeværende rapport. For også at kunne sammenligne Case 1-3, er der tillagt en

gennemsnitsværdi for driften. I følge BUILD-rapporten udgør driften i gennemsnit 26% af den samlede klimapåvirkning for et byggeri, når der regnes med emissionsfaktorerne fra 2024. Resultaterne, inklusive drift, for Trin 1 og 4 for hver af de seks cases er præsenteret til højre i Figur 23.

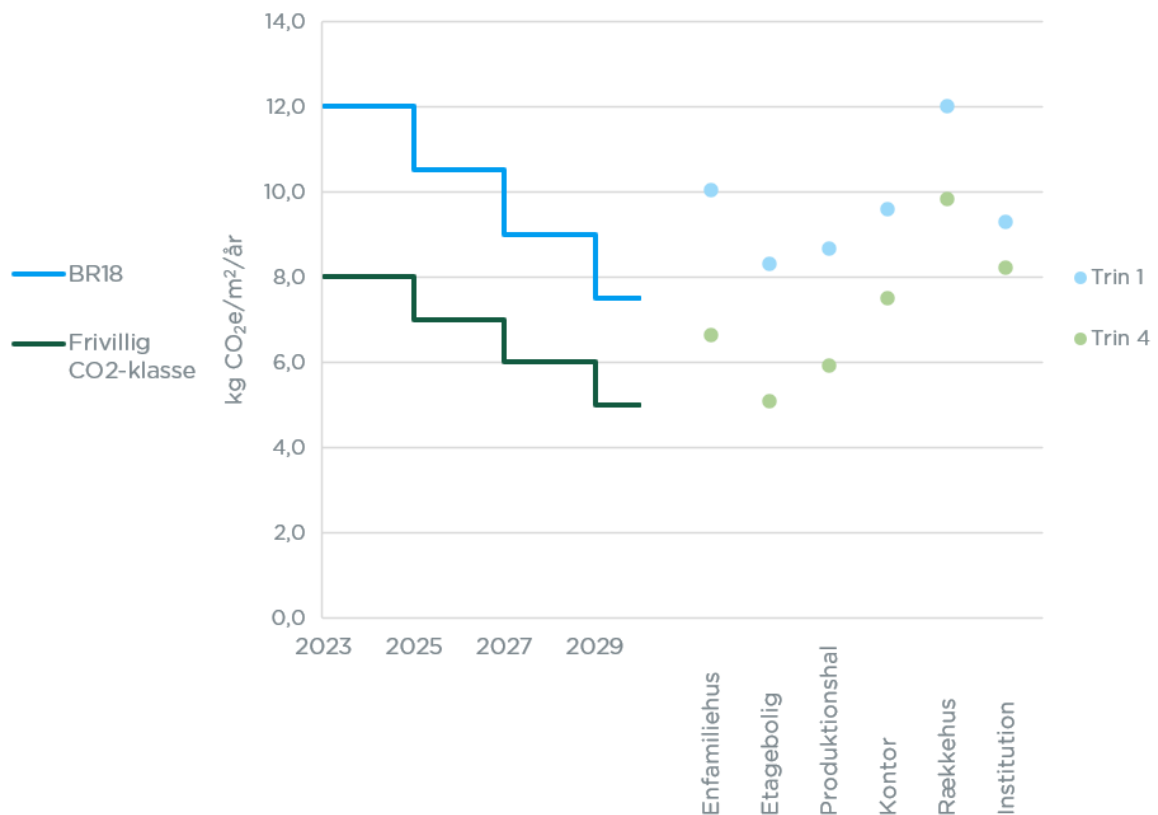


Figur 23 – Sammenligning af klimapåvirkning. Venstre: Resultater fra BUILD-rapporten for de seks typologier: enfamiliehus, etagebolig, andet, kontor, rækkehus og daginstitution. Højre: Resultater for Trin 1 og 4 for hver af de seks cases i indeværende rapport. Resultaterne er præsenteret inklusive drift.

For Trin 1 ligger fire af byggerierne – etagebolig, produktionshal, kontor og institution – mellem den øvre og nedre kvartil for den tilsvarende typologi i BUILD-rapporten. Ses der på Trin 4, ligger fem ud af seks cases – med undtagelse af rækkehuset – lavere end den nedre kvartil for den tilsvarende typologi. Generelt har træbyggerierne i Trin 4 en lavere klimapåvirkning end tilsvarende byggeri indenfor samme typologi, når der sammenlignes med resultaterne i BUILD-rapporten, dog med undtagelse af rækkehuset, der for Trin 1 og 4 ligger højere end den øvre kvartil. For produktionshallen bør der tages højde for, at der sammenlignes med byggeri i kategorien 'andet', hvilket dækker over en bredere vifte af bygningstypologier, der ikke passer ind i de resterende kategorier, som er medtaget i BUILD-rapporten.

I National Strategi for Bæredygtigt Byggeri (Indenrigs- og Boligministeriet, 2021) beskrives det, at grænseværdien for bygningers klimapåvirkning skal strammes hvert andet år. Som tidligere nævnt er grænseværdien pr. 1. januar 2023 fastsat til 12 kg CO₂e/m²/år. Som led i Strategien indgår eksempler på, hvad den reviderede grænseværdi kan sættes til i henholdsvis 2025, 2027 og 2029. Disse eksempler er sat til 10,5 kg CO₂e/m²/år, 9 kg CO₂e/m²/år og 7,5 kg CO₂e/m²/år i henholdsvis år 2025, 2027 og 2029. Det er vigtigt at understrege, at dette er *forslag* til grænseværdier i de

kommende år. De endelige grænseværdier for 2025, 2027 og 2029 er på nuværende tidspunkt ikke fastlagt.



Figur 24 - Sammenligning af klimapåvirkning. Venstre: Forslag til trinvis stramning af kravet om klimapåvirkning i BR18 som beskrevet i National Strategi For Bæredygtigt Byggeri. Højre: Resultater for Trin 1 og 4 for hver af de seks cases i indeværende rapport. Resultaterne er præsenteret inklusive drift.

I Figur 24 er forslagene til den reviderede grænseværdi fra National Strategi for Bæredygtigt Byggeri vist til venstre, og resultaterne for Trin 1 og 4 for hver af de seks cases er vist til højre. Med den nuværende grænseværdi på 12 kg CO₂e/m²/år er det kun Case 5 - Rækkehus, Trin 1, der ikke kan overholde kravet. For Trin 1 kan fem af byggerierne overholde den foreslåede grænseværdi for 2025, to af byggerierne kan overholde den foreslåede grænseværdi for 2027, mens ingen af byggerierne på Trin 1 kan overholde den foreslåede grænseværdi for 2029. Ses der på Trin 4, kan alle seks byggerier overholde den foreslåede grænseværdi i 2025, fem af dem kan overholde værdien i 2027, og tre af dem - enfamiliehus, etagebolig og produktionshal - kan på Trin 4 overholde den foreslåede grænseværdi i 2029.

I ovenstående afsnit er resultaterne for potentielle besparelser i klimapåvirkning ved træbyggeri fremlagt. For at give et indblik i, hvilke potentielle meromkostninger eller besparelser, der følger med reduktionen i klimapåvirkningen, er der i det følgende afsnit foretaget skyggeprisberegninger for hver af de seks cases for Trin 1-4, som kan give en indikation af hvilke tiltag der er omkostningseffektive.

7. SKYGGEPRISSBEREGNINGER

7.1 Metode

7.1.1 Skyggeprisberegninger

Skyggepriser præsenterer et skøn for omkostningerne pr. reduceret ton CO₂e i forhold til en baseline. Det betyder, at en lav skyggepris er fordelagtig, da man 'betaler' mindre per besparet ton CO₂e. Skyggepriser giver en indikation af, hvilke CO₂e-reducerende initiativer, som bedst kan betale sig; det vil sige, hvilke CO₂e-reducerende tiltag, som er mest omkostningseffektivt i forhold til baseline.

Skyggeprisen vises som forholdet mellem CO₂e-besparselsen og den meromkostning, som besparelsen medfører. Jo lavere en skyggepris, desto lavere er meromkostningen per reducerede ton CO₂e. Dermed er scenarier med lave skyggepriser de mest omkostningseffektive². Som referenceramme for de positive skyggepriser henviser Finansministeriets Nøgletalskatalog (Finansministeriet, 2023) til Klimarådets sti for CO₂e-priser, som i 2030 anbefales fastsat til 1.730 kr./ton i 2023-priser (faktorpriser).

Skyggepriser anvendes typisk for at afdække den samfundsøkonomisk mest rentable vej til at opnå en klimamålsætning. Ved at sammenholde skyggeprisen for forskellige reduktionstiltag er det muligt at finde den vej til målet, som er mest omkostningseffektiv. Typisk udarbejdes et virkemiddelkatalog, hvori CO₂e-skyggeprisen for forskellige virkemidler er beregnet (jf. Regeringens seneste Klimaprogram fra 2023) med udgangspunkt i Finansministeriets vejledning i samfundsøkonomiske analyser. På den baggrund kan samfundet prioritere de virkemidler, som er forbundet med de laveste skyggepriser. Det vil sige, at den samfundsoptimale løsning er den, hvor 'billige' indsatser prioriteres over de 'dyre'. Er en skyggepris negativ kan klimareduktioner opnås uden ekstraomkostninger.

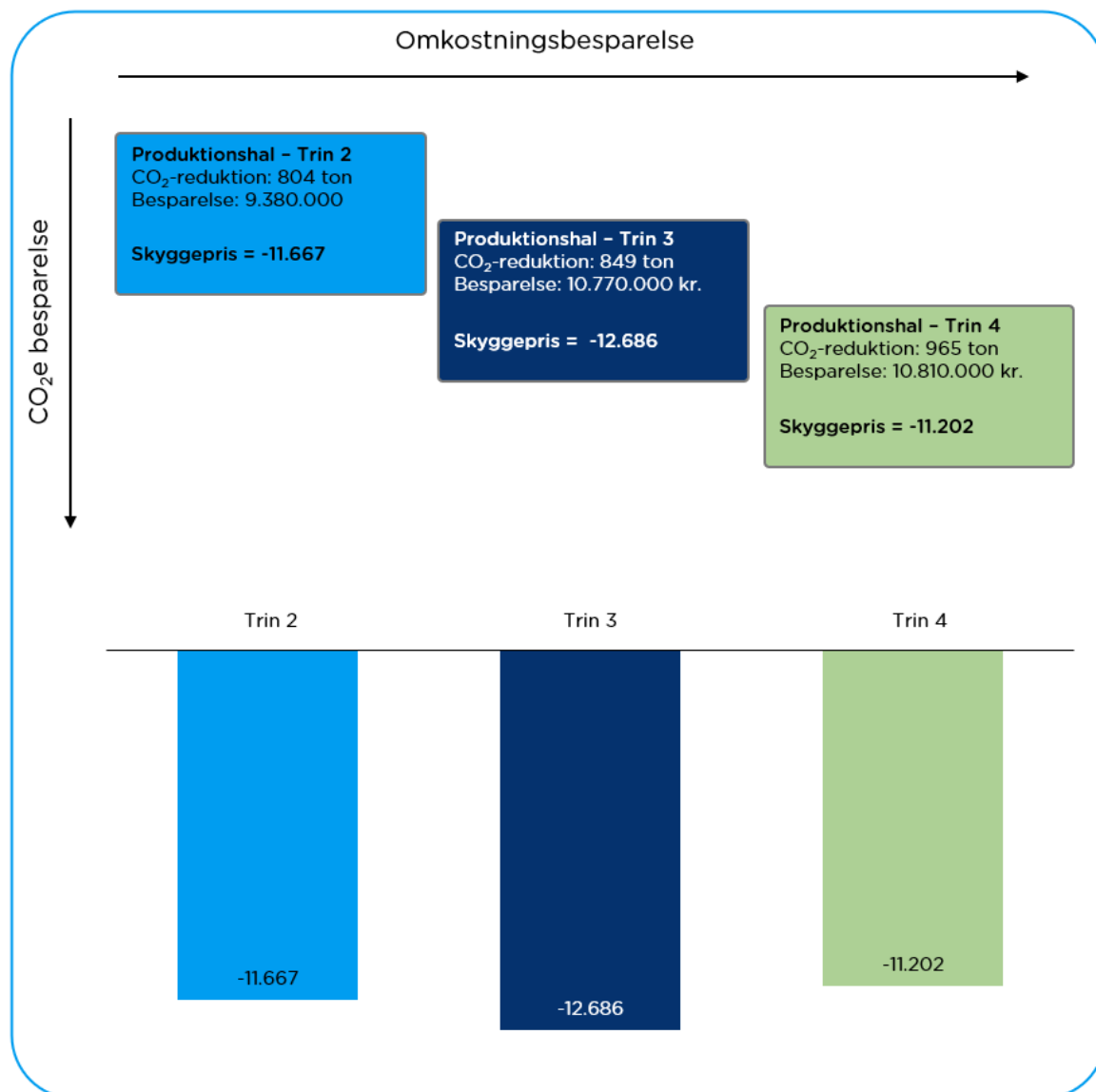
7.1.2 Negative skyggepriser

Hvis et CO₂e-reducerende initiativ også er forbundet med en prisbesparelse i forhold til baseline, bliver skyggeprisen negativ. Derved kan man opnå en CO₂e- og en omkostningsbesparelse samtidig, hvilket entydigt er positivt. Skyggeprisberegninger er dog ikke designet til at afklare hvilken indsats blandt flere med negative skyggepriser, som er fordelagtig, og det er derfor ikke meningsfuldt at sammenligne indsatser med negative skyggepriser. De negative skyggepriser vil derfor blot fremgå som 'negativ', og afspejler ikke en konkret negativ værdi. Til gengæld præsenteres omkostningsbesparelsen og CO₂e-reduktionen, så man på baggrund af disse parametre kan sammenholde trinnene.

Figur 25 er et eksempel på, hvorfor negative skyggepriser *ikke* kan afdække, hvilket alternativ, som er mest fordelagtigt. I eksemplet er resultaterne for skyggeprisberegningen for Case 3 – Produktionshal vist. Trin 4 har både den største CO₂e-reduktion og størst besparelse ift. baselinen, og er derfor det strengt bedste alternativ. Skyggeprisen for Trin 4 er dog den laveste, hvis man anskuer skyggeprisen Tilsvarende har Trin 2 den mindste CO₂e-reduktion og den mindste besparelse, men skyggeprisen placerer sig mellem Trin 3 og Trin 4. Eftersom skyggeprisen kun

² I nogle tilfælde kan CO₂e-besparselsen også være forbundet med en omkostningsbesparelse, hvilket vil medføre en negativ skyggepris. Dette vil alt andet lige være at foretrække sammenholdt med positive skyggepriser. For en diskussion af skyggeprisens anvendelighed for prioritering i dette tilfælde, se afsnit 7.1.2.

tager højde for forholdet, men ikke for volumen af CO₂e-reduktion og omkostningsbesparelsen, repræsenterer den negative skyggepris altså ikke, hvilken af de tre løsninger, der er mest effektiv, målt på både CO₂e- og omkostningsbesparelser.



Figur 25 - Eksempel på negative skyggepriser og hvorfor disse IKKE kan sammenlignes på samme vis

7.1.3 Opstilling af baseline

For at beregne skyggepriser skal der opstilles en baseline som de CO₂e-reducerende initiativer kan sammenholdes med. I denne rapport udgør Trin 1 (de konventionelle byggerier) den baseline, som de øvrige trin holdes op imod. Det vil sige, at skyggeprisen ved Trin 2, Trin 3 og Trin 4 viser meromkostningen pr. reduceret ton CO₂e sammenholdt med Trin 1. F.eks. viser skyggeprisen for Trin 2 meromkostningerne pr. reduceret ton CO₂e, hvis man alternativt byggede konventionelt som i Trin 1. Hvis skyggeprisen eksempelvis er 1.000 kr./pr. ton CO₂e, betyder det, at de reducerede ton CO₂e ved Trin 2 koster 1.000 kr. pr. ton CO₂e.

Skyggeprisen ved Trin 3 viser ligesom ved skyggeprisen for Trin 2 meromkostningerne pr. reduceret ton CO₂e i forhold til, hvis man alternativt byggede konventionelt som i Trin 1. Da Trin 3

indeholder træ-udskiftningerne fra Trin 2, kan man ved sammenligning af Trin 2 og Trin 3 se, om den yderligere materialeudskiftning ved Trin 3 er mere eller mindre fordelagtigt end den indledende. Hvis skyggeprisen er højere ved Trin 3 end Trin 2, betyder det, at de yderligere materialer, som udskiftes i Trin 3, har en højere skyggepris end de første materialer, som også udskiftes i Trin 2. En lavere skyggepris betyder modsat, at de yderligere materialeudskiftninger har en lavere skyggepris end de første materialeudskiftninger, som også udskiftes i Trin 2.

7.1.4 Beregning og data

Beregningen af skyggepriser består i denne rapport i at dele livstidsomkostningerne med livstidsudledningerne over 50 år opgjort i nutidsværdier – det vil sige, at der diskonteres med diskonteringsraterne fra Finansministeriets nøgletalskatalog (Finansministeriet, 2023). Den samlede klimapåvirkning over hele livscyklussen, som indgår i skyggeprisberegningen, tager udgangspunkt i LCA-beregningerne, og er ligeledes diskonteret med diskonteringsraterne fra Finansministeriets Nøgletalskatalog.

I beregningerne ses der bort fra evt. forskelle i byggeriernes efterfølgende værdi, som antages at være ens på tværs af trinnene. Beregningerne tager ikke højde for standardværdier for installationer, da der ikke findes priser for standardværdierne – derudover er disse antaget at være ens for alle fire trin, og prisen for disse vil derfor ikke have indflydelse på prisforskellen de fire løsninger imellem.

Livstidsomkostningerne består af materialepriser, materielleje og løn ved opførelse, genopretning og løbende vedligehold af bygningerne. Priserne er opgjort på baggrund af prisdata fra Molio Priskalk (Molio, u.d.), og er derefter inflationskorrigeret og regnet til nutidsværdier. Molio Priskalk er et værktøj, der benyttes til at udføre overslagsberegninger inden for bygge- og anlægsbranchen.

Af Molio Priskalk fremgår ingen pris på træfiberisolering, og markedsprisen herfor er derfor indhentet fra producenter. For at korrigere prisen for eventuelle forskelle mellem markedspriser og priser i Molio Priskalk, er der bestemt en omregningsfaktor baseret på forskellen mellem prisen på papiruldsisolering på markedet med prisen i Molio Priskalk. Denne omregningsfaktor er benyttet til at omregne træfiberisolering fra markedspris til 'Molio' pris. Se Appendix 22-27 for Inventories, hvor de anvendte datasæt fra Molio Priskalk er angivet.

7.2 Resultater

Nedenfor i Tabel 9 – Tabel 14 er resultaterne for skyggeprisberegningerne for alle seks typologier præsenteret. Jo lavere skyggepriserne er i tabellerne, desto færre meromkostninger er der forbundet med en CO₂e-reduktion. Derfor er scenarier med lave skyggepriser også de mest omkostningseffektive. De trin og bygningstyper, som er forbundet med negative skyggepriser, har både lavere diskonteret CO₂e-udledning gennem hele livscyklussen og lavere diskonteret livstidsomkostninger, hvorfor man trinnene imellem bør betragte de konkrete omkostnings- og CO₂e-besparelser.

Tabel 9 – Skyggeprisberegning for Case 1 – enfamiliehus med Trin 1 som baseline. Meromkostningerne og CO₂e besparelsen er afrundet. Skyggepriserne beregnes pba. Ikke-afrundede tal.

	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Meromkostning (diskonteret) i livstidsomkostninger sammenholdt med Trin 1 [DKK]	310.000	250.000	240.000
Diskonteret CO ₂ e-besparelse sammenholdt med Trin 1 [t CO ₂ e]	7	20	30
Skyggepris med Trin 1 som baseline [DKK/t reduceret CO ₂ e]	44.210	12.320	7.750

I Tabel 9 vises resultaterne af skyggeprisberegningen for Case 1 – Enfamiliehus. Der ses en lille CO₂e-besparelse i sammenligning med meromkostningen. Særligt Trin 2 har en høj skyggepris, men også Trin 3 og 4 har relativt høje skyggepriser. Ud fra denne beregning ses der altså ikke en økonomisk fordel, da der med hvert ton sparet CO₂e følger en stor meromkostning for byggeriet.

Tabel 10 – Skyggeprisberegning for Case 2 – Etagebolig med Trin 1 som baseline. Meromkostningerne og CO₂e besparelsen er afrundet. Skyggepriserne beregnes pba. Ikke-afrundede tal.

	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Meromkostning (diskonteret) i livstidsomkostninger sammenholdt med Trin 1 [DKK]	7.970.000	2.600.000	2.920.000
Diskonteret CO ₂ e-besparelse sammenholdt med Trin 1 [t CO ₂ e]	980	1.275	1.415
Skyggepris med Trin 1 som baseline [DKK/t reduceret CO ₂ e]	8.150	2.040	2.070

Resultaterne i Tabel 10 viser resultaterne for Case 2 – Etagebolig. Her ses en stor meromkostning i forbindelse med Trin 2, hvilket resulterer i en høj skyggepris. Både Trin 3 og 4 ligger omkring 2.000 DKK/t reduceret CO₂e, hvorfor det anbefales, at man på projektniveau foretager en konkret vurdering af, om skyggeprisen vurderes tilfredsstillende i forhold til at udskifte til træ.

Tabel 11 – Skyggeprisberegning for Case 3 – Produktionshal med Trin 1 som baseline. Meromkostningerne og CO₂e besparelsen er afrundet. Skyggepriserne beregnes pba. Ikke-afrundede tal.

	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Meromkostning (diskonteret) i livstidsomkostninger sammenholdt med Trin 1 [DKK]	-9.380.000	-10.770.000	-10.810.000
Diskonteret CO ₂ e-besparelse sammenholdt med Trin 1 [t CO ₂ e]	804	849	965
Skyggepris med Trin 1 som baseline [DKK/t reduceret CO ₂ e]	Negativ	Negativ	Negativ

For Case 3 – Produktionshal er resultaterne præsenteret i Tabel 11. For samtlige trin ses en besparelse i livstidsomkostninger og CO₂e-udledning i sammenligning med Trin 1, og dermed er skyggeprisen negativ. Som tidligere beskrevet kan negative skyggepriser ikke illustreres, hvorfor der i stedet bør ses på besparelsen i henholdsvis livstidsomkostninger og CO₂e.

Tabel 12 – Skyggeprisberegning for Case 4 – Kontor med Trin 1 som baseline. Meromkostningerne og CO₂e besparelsen er afrundet. Skyggepriserne beregnes pba. Ikke-afrundede tal.

	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Meromkostning (diskonteret) i livstidsomkostninger sammenholdt med Trin 1 [DKK]	-3.280.000	-2.400.000	-1.380.000
Diskonteret CO ₂ e-besparelse sammenholdt med Trin 1 [t CO ₂ e]	350	375	385
Skyggepris med Trin 1 som baseline [DKK/t reduceret CO ₂ e]	Negativ	Negativ	Negativ

Tabel 12 viser resultaterne for Case 4 – Kontor, som også alle har en negativ skyggepris. Hvilket scenarie der vurderes mest fordelagtigt, er en afvejning af besparelsen i henholdsvis livstidsomkostninger og CO₂e. Den største CO₂e besparelse ses i Trin 4, hvorimod den største besparelse i livstidsomkostninger ses i Trin 2.

Tabel 13 – Skyggeprisberegning for Case 5 – Rækkehus med Trin 1 som baseline. Meromkostningerne og CO₂e besparelsen er afrundet. Skyggepriserne beregnes pba. Ikke-afrundede tal.

	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Meromkostning (diskonteret) i livstidsomkostninger sammenholdt med Trin 1 [DKK]	-6.760.000	-3.630.000	-2.340.000
Diskonteret CO ₂ e-besparelse sammenholdt med Trin 1 [t CO ₂ e]	560	743	898
Skyggepris med Trin 1 som baseline [DKK/t reduceret CO ₂ e]	Negativ	Negativ	Negativ

For Case 5 – Rækkehuse er resultaterne vist i Tabel 13. Her opnås også negative skyggepriser for alle tre trin. Den største besparelse i livstidsomkostninger ses for Trin 2, hvorimod den største besparelse i CO₂e opnås ved Trin 4.

Tabel 14 – Skyggeprisberegning for Case 6 – Institution med Trin 1 som baseline. Meromkostningerne og CO₂e besparelsen er afrundet. Skyggepriserne beregnes pba. Ikke-afrundede tal.

	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Meromkostning (diskonteret) i livstidsomkostninger sammenholdt med Trin 1 [DKK]	-720.000	-520.000	-220.000
Diskonteret CO ₂ e-besparelse sammenholdt med Trin 1 [t CO ₂ e]	112	159	180
Skyggepris med Trin 1 som baseline [DKK/t reduceret CO ₂ e]	Negativ	Negativ	Negativ

Tabel 14 viser resultaterne for Case 6 – Institution. Beregningen resulterer i negative skyggepriser for alle tre trin. Trin 2 resulterer i den største besparelse i livstidsomkostninger og Trin 4 i den største CO₂e besparelse.

7.3 Diskussion og perspektivering

Resultaterne for hver af de seks cases varierer i høj grad. For fire ud af seks cases er skyggeprisen negativ, og indikerer altså, at der i disse tilfælde er en økonomisk besparelse forbundet med CO₂e-besparelsen. For de to første cases – enfamiliehus og etagebolig – ligger skyggepriserne mellem 2.070 og 44.210 DKK/t reduceret CO₂e. I nedenstående afsnit dykkes der ned i resultaterne for enfamiliehuset for at se nærmere på, hvilke parametre, der påvirker resultaterne.

Ses der på datainputtet for ydervæggene, er der forskel i det årlige vedligehold. Det årlige vedligehold er fastsat for hver bygningsdel i Molio Priskalk, og er for ydervæggen i Trin 1, 3 og 4 1%, hvorimod vedligehold for ydervæggen i Trin 2 er 2%. Det er ikke nærmere uddybet, hvordan vedligeholdelsesprocenten er fastsat. Ændres vedligeholdelsesprocenten i Trin 2 til 1%, falder skyggeprisen til 21.310 DKK/t reduceret CO₂e. Altså har vedligeholdelsesprocenten stor indflydelse på resultatet, og det kan diskuteres, hvorvidt der er mere vedligehold forbundet med netop den ene type væg, end der er for de andre trin.

I Tabel 15 er den procentvise meromkostning for Trin 2-4 vist, både for opførelse af huset og for de samlede omkostninger, der inkluderer vedligehold og genopretning. For opførelse alene er omkostningen for Trin 2 omtrent 13% højere end for Trin 1. Trin 3 er cirka 23% dyrere og Trin 4 cirka 16% dyrere, men hvorvidt meromkostningerne for Trin 2-4 stemmer overens med de reelle meromkostninger, vides ikke. Ses der på de samlede omkostninger – inklusive vedligehold og genopretning – er Trin 2 16% dyrere og Trin 3 og 4 13% dyrere end Trin 1. Her ses igen de øgede omkostninger til vedligehold, som er forbundet med ydervæggen i Trin 2, hvilket øger den samlede meromkostning for Trin 2 sammenlignet med Trin 1.

Tabel 15 – Procentvis meromkostning for opførelse og samlede udgifter for Enfamiliehuset, Trin 2-4

	Trin 2	Trin 3	Trin 4
Procentvis meromkostning ved opførelse	13%	23%	16%
Procentvis meromkostning for samlede omkostninger	16%	13%	13%

Med afsæt i omkostningstallene fra Molio Priskalk og LCA-resultaterne er skyggeprisen for Trin 2-4 beregnet med Trin 1 som baseline for hver typologi. Skyggeprisberegningerne er dermed ikke baseret på reelle prisdata, hvilket kan have en indflydelse på resultaterne.

For flere af typologierne opnås en negativ skyggepris, hvilket betyder, at både CO₂e-udledninger og livstidsomkostninger for det givne trin er lavere end for Trin 1. Dette gælder for alle trin for Case 3-6. Resultaterne indikerer altså, at man ved overgang til træbaserede materialer, kan opnå en omkostningsbesparelse samtidig med, at man kan opnå en CO₂e-reduktion, for disse specifikke cases.

For Case 4, 5 og 6 er det ved udskiftning af den bærende konstruktion fra Trin 1 til Trin 2, at der ses den største omkostningsbesparelse, hvorimod den største CO₂e besparelse for samme tre cases ses ved Trin 4.

Skyggepriserne er højest for enfamiliehuse, hvor særligt Trin 2 er forbundet med en høj skyggepris, mens også Trin 3 og 4 har forholdsvis høje skyggepriser.

For Case 2 - Etagebolig har Trin 3 og 4 lavest og forholdsvis ens skyggepriser omkring 2.050 kr. pr. reduceret ton CO₂e. Det samme gælder for Trin 4 for Case 6 - Institution.

Analysen af resultaterne for skyggepriserne og efterfølgende dialog med leverandører af træbyggerier fremhævede en tydelig oplevet forskel på de generiske prisdata og de faktiske priser. Resultaterne i denne rapport har derfor medført større indsigt i en potentiel forbedring af generisk data samt potentiale for bedre sammenhæng mellem det byggede og de teoretiske økonomiske beregninger i tidlig bygningsprojektering og -design.

8. KONKLUSION

For at reducere klimapåvirkningerne fra byggeriet er der fra 1. januar 2023 indført klimakrav i bygningsreglementet. Det betyder også, at alt nybyggeri skal dokumentere deres klimapåvirkning gennem livscyklusvurderinger. I 2021 dannede 60 casestudier grundlag for den første grænseværdi, på 12 kg CO_{2e}/m²/år, som blev indført d. 1. januar 2023. Siden 2021 er der udført langt flere livscyklusvurderinger på byggeri i branchen. I 2023 fulgte BUILD op med en række repræsentative casestudier, 163 casestudier i alt, i deres rapport *Klimapåvirkning fra nybyggeri* (Tozan, et al., 2023). Casestudierne viste stor variation på klimapåvirkninger for alle bygningstypologier, hvor eksempelvis klimapåvirkninger fra bygningsdelene varierer fra 4,85 til 13,15 kg CO_{2e}/m²/år. Klimapåvirkningen fra materialerne i byggeriet har den største påvirkning. Klimapåvirkningen fra bygningsdele bidrager i gennemsnit med 74%, mens emissioner forbundet med energiforbrug til driften i gennemsnit bidrager med 26%. Tager man højde for de kommende emissionsfaktorer for henholdsvis el, fjernvarme og ledningsgas ændrer billedet sig yderligere, idet 91% af klimapåvirkningerne vil være forbundet med materialerne i byggeriet. Der er og vil derfor fortsat være stor opmærksomhed på, hvordan man kan reducere CO_{2e} påvirkninger i byggeriet gennem valget af byggematerialer.

Denne rapport viser tydeligt potentielle CO_{2e}-besparelser ved brug af træmaterialer fremfor konventionelle materialer i forskellige udvalgte danske bygningstypologier. Analyserne fra de seks casestudier for henholdsvis enfamiliehus, etagebolig, produktionshal, kontor, rækkehus og institution viser en samlet potentiel besparelse varierende mellem 12% og 39% svarende til 1,08-2,52 kg CO_{2e}/m²/år. For fem ud af de seks casestudier viste de største potentielle CO_{2e}-besparelser sig at stamme fra de bærende konstruktioner.

Den største samlede reduktion ses for Case 2 – Etagebolig, som har en samlet besparelse på 39% fra Trin 1 til Trin 4. Den primære årsag til denne reduktion ses allerede i Trin 2, hvor etagedæk og tagkonstruktionen skiftes fra huldæk til trækonstruktioner. Dernæst bidrager udskiftningen af facadebeklædningen fra keramisk skifer til træ og udskiftningen af isolering i ydervæggene fra mineraluld til træfiber også til reduktionen. Det kan desuden udledes, at hvis man blot betragter bygningsdelene over jord og udelader installationer vil de potentielle besparelser kunne komme op over 50 %.

Med den nuværende grænseværdi på 12 kg CO_{2e}/m²/år i bygningsreglementet vil alle Trin 4 cases kunne overholde kravene. De fuldt ud træbaserede Trin 4 cases kan også alle seks overholde den foreslåede grænseværdi i 2025 på 10,5 kg CO_{2e}/m²/år, fem af dem kan overholde grænseværdien i 2027 på 9 kg CO_{2e}/m²/år, og tre af dem – enfamiliehus, etagebolig og produktionshal – kan på Trin 4 overholde den foreslåede grænseværdi i 2029 på 7,5 kg CO_{2e}/m²/år. Det bemærkes også at én af projekterne vil kunne overholde kravene i Reduction Roadmap³ på 5,8 kg CO_{2e}/m²/år selv med nuværende emissionsfaktorer, mens tre af casene vil kunne overholde kravene med emissionsfaktorerne gældende fra 2025.

For tre af caseprojekterne blev driftsenergien inkluderet ved at tilpasse energirammeberegningerne fra de eksisterende byggerier til de fire trin med det formål at se, hvor stor betydning den termiske masse ved konventionelt byggeri har i forhold til træbyggeri. Forskellen mellem emissioner forbundet med driften mellem konventionelt byggeri og træbyggeri er på blot 0,03-0,06 kg CO_{2e}/m²/år sammenligner man Trin 1 med Trin 2-4. Tilføjer man derudover de kommende emissionsfaktorer for el, fjernvarme og ledningsgas bliver besparelsen endnu mindre. Det kan derfor konkluderes, at de konstruktionsmæssige forskelle mellem konventionelt byggeri og træbyggeri ikke har nogen betydelig påvirkning på CO_{2e}-påvirkningen forbundet med driften af casebygningerne.

Som perspektivering blev en alternativ metode og dermed resultater for livscyklusvurderingerne inkluderet. Selvom alle trin, herunder også konventionelt byggeri, har lavere klimapåvirkninger ved dynamisk LCA end ved statisk LCA, så er den største forskel forbundet med mængden af træ der

³ <https://reductionroadmap.dk/>

introduceres og derfor ved Trin 4. Overordnet viser resultaterne, at mere biobaseret materiale medfører større reduktion ved at skifte fra en statisk til en dynamisk beregning, grundet at de biobaserede materialer har størst udledninger ved endt levetid og dermed vægtes lavere ved den dynamiske beregning. Resultaterne tydeliggjorde også, at det ved brug af den dynamiske LCA-metode, er muligt at opnå resultater tæt på 0 kg CO₂e/m²/år og endda negative resultater. Brugen af dynamisk LCA i rapporten rejser en vigtig diskussion om metode, men fremhæver også tidsperspektivet i, hvornår udledninger i realiteten forekommer. Et er i hvert fald sikkert - vi kan være mere præcise om de *upfront* emissioner (A1-A3), der udledes i forbindelse med produktionen af materialer til byggerierne og mindre om fremtidige udledninger forbundet med udskiftninger, vedligeholdelse og ved endt levetid.

Denne rapport har inkluderet skyggeprisberegninger, som er en klassisk beregningsmetode der bruges til at vise omkostningerne forbundet med potentielle CO₂e-reduktioner. For flere af typologierne opnås en negativ skyggepris, hvilket betyder, at både CO₂e-udledninger og livstidsomkostninger for de træbaserede trin er lavere end det konventionelle byggeri repræsenteret i Trin 1.

Resultaterne indikerer altså, at man ved overgang til træbaserede materialer, kan opnå en omkostningsbesparelse samtidig med, at man kan opnå en CO₂e-reduktion for disse specifikke cases. For fire ud af de seks cases er den samlede skyggepris for konvertering til træbyggeri negativ, hvilket vil sige at det både kan betale sig klimamæssigt og økonomisk at udskifte til træbaserede materialer. Omkostningseffektiviteten er meget kontekstafhængig og der er for få cases til entydigt at kunne sige noget generelt om, hvorvidt bygningsdelsudskiftninger til træbaserede materialer generelt vil være omkostningseffektive eller endda have negative skyggepriser. Resultaterne indikerer dog, at det i rigtig mange tilfælde vil være omkostningseffektivt at bruge træbaserede materialer og det bør derfor altid vurderes om det er en mulighed i det enkelte byggeri.

Analysen for skyggepriser viste samtidig at følsomheden af resultaterne er meget afhængig af de anvendte prisdata (fra Molio), herunder særligt vedligeholdelsesprocenterne. Ud fra analysens følsomheder og bemærkninger til datagrundlaget, bør disse undersøges nærmere.

Selvom casene baserer sig på nybyggeri, kan rapporten også bruges til inspiration til renoveringsprojekter, særligt for de renoveringsprojekter som har bygningsdele der bliver udskiftet på samme vis som i de seks udvalgte casebyggerier.

Byggebranchen, både hvad angår renoveringer og nybyggeri, er kontinuerligt i søgen efter de gode løsninger for at reducere klimapåvirkningerne i byggeriets værdikæde. Med denne rapport fremhæves store potentielle CO₂e-besparelserne ved brug af træbaserede materialer og som i mange tilfælde er omkostningseffektive. Det kan derfor med fordel for klima og økonomi være gavnligt at undersøge mulighederne for brug af træbaserede byggematerialer i det enkelte byggeprojekt.

9. REFERENCER

- Andersen, C. E., Hoxha, E., Rasmussen, F. N., Sørensen, C. G., & Birgisdottir, H. (2024). *Temporal considerations in life cycle assessments of wooden buildings: implications for design incentives*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652624007078>
- B. B. (2023). *ÖKOBAUDAT*. Retrieved from https://www.oekobaudat.de/no_cache/en/database/search.html
- BR18. (2022). *Bilag 2: Tabeller til kapitel 11 - Energiforbrug*. Retrieved 05 14, 2024, from https://bygningsreglementet.dk/Bilag/B2/Bilag_2/Tabel_7
- BR18. (2024). *Energiforbrug og klimapåvirkning (§250-§298)*. Retrieved 05 14, 2024, from <https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/Krav>
- Dansk Standard. (2012). *DS/EN 15978:2012*. Retrieved from <https://webshop.ds.dk/standard/M240512/ds-en-15978-2012>
- Dansk Standard. (2014). *DS/EN 16485:2014*. Retrieved from <https://webshop.ds.dk/standard/M265361/ds-en-16485-2014>
- Dansk Standard. (2019). *DS/EN 15804:2021+A2:2019*. Retrieved from <https://webshop.ds.dk/standard/M335258/ds-en-15804-2012-a2-2019>
- Finansministeriet. (2023, June). *Nøgletalskatalog*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320307642>
- Haugbølle, K., Mahdi, V., Morelli, M., & Wahedi, H. (2021). *BUILD Levetidstabel Version 2021*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. Retrieved from https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/465276076/BUILD_Levetidstabel_version_2021.pdf
- Indenrigs- og Boligministeriet. (2021). *National Strategi for Bæredygtigt Byggeri*. Retrieved from <https://www.sbst.dk/Media/638248402790994130/National%20strategi%20for%20b%C3%A6redygtigt%20byggeri.pdf>
- IPCC. (2018). *IPCC 2018 Report, Global warming of 1.5°C*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Molio. (n.d.). *Molio Prisdata*. Retrieved 05 14, 2024, from <https://molio.dk/produkter/digitale-vaerktojer/prisdata>
- Nilsson, M. S., Høibye, L., & Maagaard, S. E. (2023). *Emissionsfaktorer: el, fjernvarme og ledningsgas, 2025-2075*. Retrieved from <https://www.sbst.dk/Media/638282171394687135/Emissionsfaktorer%20for%20el%20fjernvarme%20og%20ledningsgas%20for%202025-2075.pdf>
- Resch, E., Andresen, I., Cherubini, F., & Brattebø, H. (2020). Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings - Timing, uncertainty, and emission sources. *Building and Environment*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320307642>
- Rådet for Bæredygtigt Byggeri. (2024). *DGNB Renovering og Nybyggeri 2025 (Pilot)*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132320307642>
- Sørensen, L. H., Schack, R., & Collin, C. (2020). *CO2-besparelse ved træbyggeri: sammenligningsstudie af træbyggeri og konventionelt byggeri*. Retrieved from https://traeibyggeriet.dk/media/va5icbto/resume_juni2020_opdateret.pdf
- Tozan, B., Olsen, C., Sørensen, C., Kragh, J., Rose, J., Aggerholm, S., & Birgisdottir, H. (2023). *Klimapåvirkning fra nybyggeri: Analytisk grundlag til fastlæggelse af ny LCA baseret grænseværdi for bygningers klimapåvirkning 2025*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. Retrieved from https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/611654176/2023_21_Klimap_virkning_fra_nybyggeri.pdf
- UNEP. (2022). *Global Status Report for Buildings and Construction: towards a Zero-Emission, Efficient, and Resilient Buildings and Construction Sector*. Retrieved from <https://globalabc.org/>

10. APPENDIX

Følgende Appendices fremgår af den separate bilagsrapport:

- Appendix 1: Case 1 – Enfamiliehus – Life Cycle Inventory
- Appendix 2: Case 2 – Etagebolig – Life Cycle Inventory
- Appendix 3: Case 3 – Produktionshal – Life Cycle Inventory
- Appendix 4: Case 4 – Kontor – Life Cycle Inventory
- Appendix 5: Case 5 – Rækkehus – Life Cycle Inventory
- Appendix 6: Case 6 – Institution – Life Cycle Inventory
- Appendix 7: Case 1 – Enfamiliehus – U-værdiberegninger
- Appendix 8: Case 2 – Etagebolig – U-værdiberegninger
- Appendix 9: Case 3 – Produktionshal – U-værdiberegninger
- Appendix 10: Case 4 – Kontor – U-værdiberegninger
- Appendix 11: Case 5 – Rækkehus – U-værdiberegninger
- Appendix 12: Case 6 – Institution – U-værdiberegninger
- Appendix 13: Case 4 – Kontor – Driftsemissioner
- Appendix 14: Case 5 – Rækkehus – Driftsemissioner
- Appendix 15: Case 6 – Institution – Driftsemissioner
- Appendix 16: Case 1 – Enfamiliehus – LCA Resultater
- Appendix 17: Case 2 – Etagebolig – LCA Resultater
- Appendix 18: Case 3 – Produktionshal – LCA Resultater
- Appendix 19: Case 4 – Kontor – LCA Resultater
- Appendix 20: Case 5 – Rækkehus – LCA Resultater
- Appendix 21: Case 6 – Institution – LCA Resultater
- Appendix 22: Case 1 – Enfamiliehus – Skyggeprisberegning
- Appendix 23: Case 2 – Etagebolig – Skyggeprisberegning
- Appendix 24: Case 3 – Produktionshal – Skyggeprisberegning
- Appendix 25: Case 4 – Kontor – Skyggeprisberegning
- Appendix 26: Case 5 – Rækkehus – Skyggeprisberegning
- Appendix 27: Case 6 – Institution – Skyggeprisberegning