

Notat

10.03.2025

Projekt nr.: 1012695
+45 2540 0190

sem@arteliagroup.dk
asno@arteliagroup.dk

Projekt: TRÆ Sydhavn
Emne: Opsummering af LCA på bygningsniveau
Projekt nr.: 1012695



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

Indhold

1	Notats formål	3
2	Projektet TRÆ	3
3	Sammenfatning	4
4	Metode	6
4.1	Bygningsmodel	6
4.2	Miljødata	6
4.3	Systemafgrænsninger	7
4.3.1	A1-A3 Produkt	7
4.3.2	A4+A5 Byggeproces – Medregnes ikke jf. nuværende bygningsreglementet	7
4.3.3	B4 og B6 Brug	7
4.3.4	C3+C4 Endt levetid	7
4.3.5	D Næste levetid	7
4.4	Referenceenhed	8
4.5	Beskrivelse af sammenligningsgrundlag	8
4.6	Forudsætninger for genbrugsmaterialer	9
5	LCA resultater	10
5.1	Detaljeret oversigt over LCA resultater	11
5.1.1	Sammenligning – Det samlede resultat	12
5.1.2	Genbrug og genanvendelse	14
5.1.3	Sammenligning – Over tid	16
5.1.4	Det statiske system	18
5.2	Betydning af bygningsudformning	22
5.2.1	Det statiske system, T1, T2 og T3	22
5.2.2	Klimaskærm betydning	25
5.3	Vægt	26
5.3.1	A4-A5 – Transport og spild	27
5.4	Miljødata – CLT	31
6	Bevidste valg i designet af TRÆ	32
7	Opsamling på LCA-analyser	32

1 Notats formål

I nærværende notat opsummeres resultater for klimapåvirkning jf. bygningsreglementet gældende fra 2025 for projektet TRÆ i Sydhavn. Foruden en opsummering af bygningens endelige CO₂ aftryk, har notatet til formål at synliggøre, hvilke bygningsdele og specifikke materialer, der bidrager mest til bygningens samlede miljøbelastning.

2 Projektet TRÆ

TRÆ beliggende i Sydhavnsområdet i Aarhus bliver Danmarks højeste træ-kontorhus. Byggeriet består af et tårn i 20 etager og to mindre tårne i 6 etager - alle tre tårne med træ som det primære materiale for de bærende konstruktioner (søjler og dæk samt tværafstivninger). De bærende trækonstruktioner suppleres med beton/stål, hvor dette af konstruktive eller brandmæssige hensyn er nødvendigt. Byggeriet opføres med særlig fokus på bæredygtighed, sundhed og genanvendte materialer.

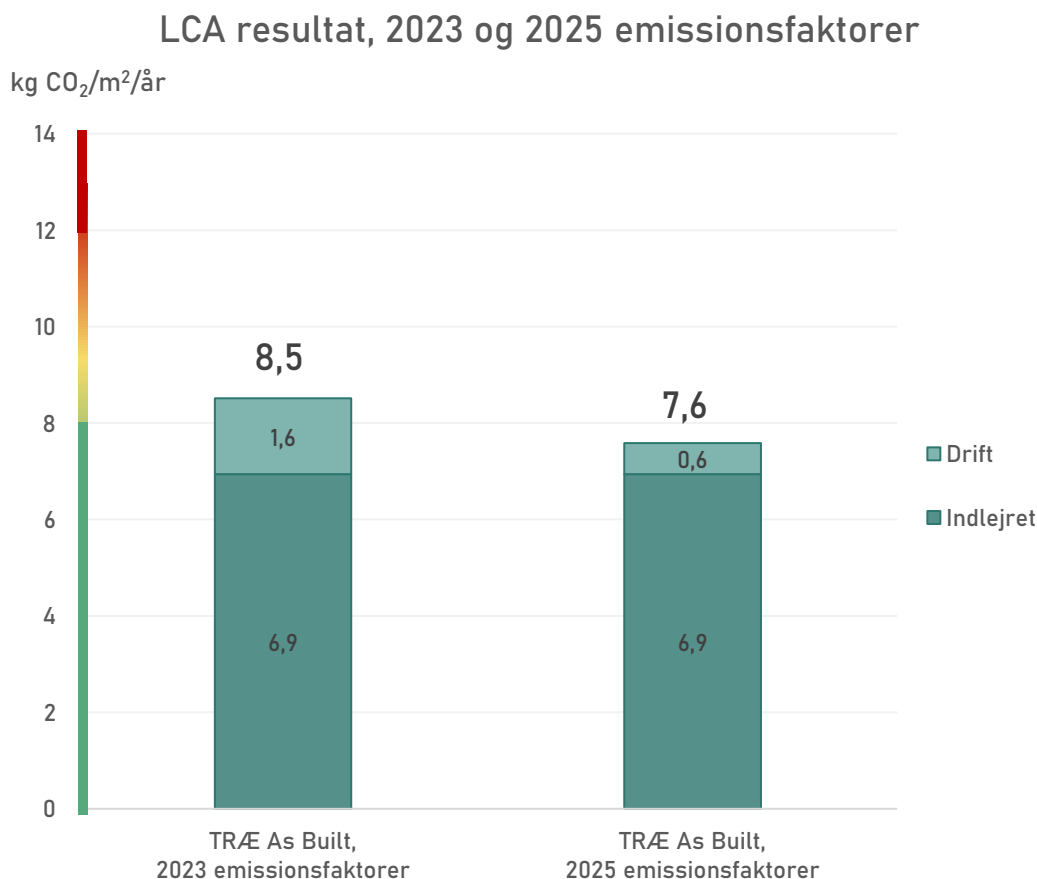
Tanken med projektet TRÆ udspringer af et innovativt samarbejde mellem Kilden & Hindby, PFA og Aarhus Kommune, hvor der er dannet et cirkulært partnerskab, hvor fokus er at skabe et innovativt og bæredygtigt projekt. Her har partnerskabet til hensigt at understøtte arbejdet med at mindske byggeriets klimaaftryk, og forsøge at finde nye løsninger til at gøre klimaaftrykket så lavt som muligt. På den måde er partnerskaber og projektet TRÆ i frontlinjen ift. at skubbe til gældende lovgivning og stille sig kritisk over for de krav, som er med til at modvirke den grønne omstilling.

Med opførelse af TRÆ i Aarhus Kommune er der mulighed for at teste strategier af, som senere kan anvendes på et national plan ift. at mindske bygningernes klimaaftryk og skabe et klimaneutralt samfund.

Visionen for projektet er at rykke ved grænserne for hvordan der bygges i dag. Der eksperimenteres i hvordan man kan genanvende produkter, og projektet er et stort læringsprojekt i at bygge i træ generelt. LCA-beregningen og nærværende notat er med til at skabe vidensgrundlag for fremtidige byggemetoder og belyser både fordele og ulemper ved de tiltag der er erfaret gennem projektet.

3 Sammenfatning

Klimapåvirkningen (via en LCA-beregning) viser et resultat på 8,5 kg CO₂eq./m²/år regnet med gældende emissionsfaktorer (2023 emissionsfaktorer). Heraf udgør materialerne 6,9 kg CO₂eq./m²/år og drift svarer til 1,6 CO₂-eq./m²/år. Regnes med 2025 emissionsfaktorer, er det samlede resultat på 7,6 CO₂eq./m²/år, hvoraf driften udgør 0,6 CO₂-eq./m²/år



Figur 1 LCA resultat for TRÆ As Built. 2023 emissionsfaktorer og 2025 emissionsfaktorer, opdelt i indlejret (A1-A3, B4, C3, C4) og drift (B6). Den røde markering beskriver overskridelse af bygningsreglementets krav og den grønne markering viser overholdelse af den frivillige CO₂ klasse gældende ved året for ibrugtagning (2024).

Sammenligning med TRÆ As Built og Benchmark-byggeri i beton, viser en klar fordel og store potentialer ved at bygge i træ.

LCA'en har yderligere givet et indblik i forskellen på vægt for hhv. træbyggeri og betonbyggeri. Denne vægtforskel har ligeledes indvirken på CO₂ besparelse, hhv. i form af mindre dimensioner på bærende elementer.

Notatet er ligeledes med til at belyse effekten af genbrugsmaterialer i byggeriet. Genbrug er beregnet som foreskrevet i bygningsreglementet. Dvs. direkte genbrug er regnet med en miljøpåvirkning

på 0. Beregningen for genbrug resulterer i en besparelse på ca. 4,9% for CO₂-udledningen sammenlignet med samme byggeri uden genbrug. Foruden besparelsen ved anvendelse af genbrug, kommer besparelsen ved at anvende produkter fra restproduktion og anden genanvendelse. I As Built LCA'en er disse materialer ligeledes beregnet som foreskrevet i Bygningsreglementet, dvs. ved specifikke miljødata eller tilsvarende for et nyt materiale. Her ses ikke en stor CO₂ besparelse, med derimod er det store mængder, som potentielt har erstattet behovet for produktion af nye produkter. Der er anvendt 179 ton genanvendt træ i projektet.

Afslutningsvis opsamles der i nærværende notat på udfordringer og læringer i processen, hvor én af de største potentialer for yderligere at skulle have nedbragt det samlede LCA-resultat, skulle have været optimering af bygningsgeometrien. Ydermere er der forsat mulighed for at nedbringe den endelige udledning, ved at vælge specifikke produkter med gode miljødata.

Med TRÆ er det lykkedes at reducere udledningerne betydeligt ift. et konventionelt byggeri. Projektet er med til give stor læring ift. at bygge højt i træ og belyser betydningen af bæredygtigt materialevalg herunder genanvendelse og genbrug.

Læringer fra dette projekt er med til at ligge til grund for kommende både større og mindre byggerier. Projektet bidrager til at det kan blive mere normalt at bygge i træ i Danmark.

4 Metode

Livscyklusvurderingerne er udført i henhold til klimakravene, som blev indført i bygningsreglementet d. 1. januar 2023.

Gennemgående i nærværende notat, forekommer følgende sammenligninger/scenarier.

- TRÆ as built: LCA beregning på baggrund af as built materiale
- TRÆ Uden genbrug: Som ovenstående, men direkte genbrug er udskiftet med nye materialer
- TRÆ Benchmark: Referenceprojekt, hvor TRÆ er skitseprojekteret som et betonbyggeri

Disse er yderligere beskrivelse af scenarierne i afsnit **4.5**.

LCA-beregningen for det samlede byggeri er udført i programmet LCAByg2023 (5.4.0.5).

4.1 Bygningsmodel

Der er taget udgangspunkt i as built Revit ARK- og KON-modeller for at bestemme mængder af materialerne. AGAIN har leveret estimeret miljødata på de produkter de har leveret på projektet, og det er disse der er anvendt i beregningen. Direkte genbrug er regnet med en miljøpåvirkning på 0.

Mængder, der ikke er modelleret i ovenstående modeller, er estimeret, herunder mængden af træ/isolering i trækassetter, betonmængde til trapper, stålsamlinger ved søjler, ophængningssystemer af lofter og facader, lim- og overfladebehandlinger, materialemængder i fyldninger i facade mm. Disse er estimeret ved håndberegning på baggrund af detaljetegninger og øvrige beregninger, såsom energirammeberegning (U-værdier). Mængder kan også være bestemt ud fra generisk opbygning af samme konstruktionstype fra LCAByg2023.

4.2 Miljødata

Miljødata er valgt hierarkisk, dvs. ved materialer, hvor den specifikke producent er kendt, er specifikke miljødata anvendt, hvis der foreligger et gyldigt. Hvis ikke producenten er kendt, eller der ikke foreligger en specifik EPD på produktet, er det valgt dansk brancheEPD. Hvis en sådan ikke foreligger, er der valgt generiske data, som foreskrives af LCAByg2023. Dette er data fra Ökobaumat.de. Generisk miljødata er udvalgt, så der er bedst mulig overensstemmelse i forhold til byggevarens funktionalitet og ydeevne. De præsenterede CO₂-belastninger er betinget af de valgte materialer og dertilhørende datakvalitet.

4.3 Systemafgrænsninger

En bygnings livscyklus kan opdeles i moduler i henhold til EN 15978. Projektet baserer sig på tilgangen beskrevet af bygningsreglementet og derfor anvendes denne systemafgrænsning for nærværende projekt. Definition samt forudsætning af de medregnede moduler beskrives i de følgende afsnit.

Livscyklus stadier	Produkt			Bygge-proces		Brug							Endt levetid				Udenfor projekt
Moduler	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Processer	Råmaterialer	Transport	Fremstilling	Transport	Opførelse/montering	Brug	Vedligehold	Reparation	Udskiftning	Renovering	Energiforbrug til drift	Vandforbrug til drift	Nedtagning/nedrivning	Transport	Affaldsbehandling	Bortskaffelse	Potentiale for genbrug, gen-anvendelse og nyttiggørelse

Tabel 1 - Livscyklusfaser iht. EN 15978. Systemafgrænsningen anvendt for resultaterne præsenteret i nærværende notat er markeret med mørk

4.3.1 A1-A3 Produkt

Modul A1-A3 beskriver processerne relateret til produktfasen, herunder udvinding af råstoffer og brug af sekundære materialer, transport til fabrikken samt fremstilling af den færdige byggevarer eller det præfabrikerede system.

4.3.2 A4+A5 Byggeproces – Medregnes ikke jf. nuværende bygningsreglementet

Modul A4 indeholder transport af byggevarer til byggeplads. Modul A5 omfatter både klimapåvirkninger fra energiforbrug, transport og materialespild i forbindelse med byggeprocessen. Miljøpåvirkning herfra er opgivet særskilt fra det samlede resultat for de øvrige faser i nærværende notat.

4.3.3 B4 og B6 Brug

I brugsfasen medtages den energi, der er koblet til udskiftning af byggematerialer gennem bygningens levetid (B4) samt driftsenergien til bygningens varme- og elforbrug (B6). Hertil er data for driftsenergi baseret på seneste revision af energirammeberegningen udført i forbindelse med udbuds- og udførelsesprojektet anvendt.

4.3.4 C3+C4 Endt levetid

Efter endt levetid indregnes den energi, som kræves til affaldsbehandling (C3) samt bortskaffelse af dette (C4).

4.3.5 D Næste levetid

Modul D angiver potentialet for genbrug, genanvendelse og nyttiggørelse af byggevarer efter endt levetid. Det er derfor bidraget fra byggevarer, som udskiftes i løbet af betragtningsperioden samt bidraget ved nedrivning af bygningen. I nærværende notat er resultatet for bygningens klimabelastning angivet eksklusivt bidraget fra modul D.

4.4 Referenceenhed

Den europæiske standard EN 15978 angiver en række miljøpåvirkningskategorier og ressourceindikatorer, som resultater for en livscyklusanalyse. I nærværende notat fokuseres på klimapåvirkningen som en indikator for global opvarmning. På graferne angives denne indikator som GWP – Global Warming Potential. Enheden for klimapåvirkningen angives i kg CO₂-ækv. og opgøres derudover per arealenhed og år.

Arealenheden referer både til bygningens etageareal og det opvarmede etageareal, som beregnes efter BR18, hhv. SBI-anvisning 213. Materialernes påvirkninger (A, B4, C og evt. D) skal referere til etagearealet, mens påvirkningerne fra driftsenergien (B6 og evt. D) skal referere til det opvarmede etageareal.

Livscyklusberegningerne udføres over en betragtningsperiode på 50 år. Der er ikke tale om bygningens reelle forventede levetid, men en standard betragtningsperiode for at sikre sammenlignelighed mellem forskellige projekter.

Alle resultater præsenteret i nærværende notat er derfor angivet med følgende referenceenhed for klimapåvirkningen evalueret over en betragtningsperiode på 50 år:

Referenceenhed: kg CO₂-ækv./m² år

4.5 Beskrivelse af sammenligningsgrundlag

For at præsentere og kommunikere resultaterne på bedst mulig vis, er det valgt at holde resultaterne op imod sammenlignelige resultater. De forskellige scenarier beskrives her:

TRÆ As Built er resultaterne for den LCA, der er beregnet på baggrund af as built materialet. Direkte genbrug er regnet med en miljøpåvirkning på 0.

Resultatet viser den reelle performance af byggeriet regnet efter metode foreskrevet i Bygningsreglementet.

TRÆ Uden Genbrug er lig ovenstående scenarie, bortset fra at direkte genbrugsmaterialer er erstattet af nye materialer. Det betyder at vindmøllevinger anvendt til solafskærmninger erstattet af tilsvarende solafskærmning i aluminium. Facadebeklædning af genbrugsaluminium er ligeledes erstattet af tilsvarende nye aluminiumsplader.

TRÆ Benchmark repræsenterer TRÆ som opført ved konventionelle byggemetoder og –materialer. Der er med udgangspunkt i samme randbetingelser vedr. geometri, beliggenhed, anvendelse mv. udført en skitseprojektering af TRÆ udført i traditionelle byggematerialer. Det vil sige, at de bærende elementer af træ er erstattet af beton (kombination af elementer, huldæk og insitu-beton) og stål,

facadeopbygningen er ændret fra at være en trækassetteopbygning til en curtain-wall opbygning og funderingen er tilpasset de nye laster, ændringerne har medført. Desuden er gulv og loftopbygning ændret til hvad der oftest anvendes i dag. Der er udført overslagsberegninger, for at resultaterne skal være så reelle som muligt, uden at projektet bygningen fra bunden. Driften, B6, antages lig as built. Benchmarkmodellen er baseret på LCA-beregningen fra hovedprojektet, dog med opdateret opvarmet areal, generiske værdier for installationer og driftsværdier som as built modellen. Resultatet fra denne beregning afspejler hvordan performance ville se ud, hvis projektet havde været opført med konventionelle materialer.

4.6 Forudsætninger for genbrugsmaterialer

Genbrug er beregnet ud fra definitionen i bygningsreglementet. Genbrugte byggematerialer skal forstås som materialer, der har været brugt før. Der skiltres ligeledes mellem genbrug og genanvendelse. Som genanvendelse forstås at materialet har været omforarbejdet ved affaldsbehandling.

Genbrug er regnet med en miljøpåvirkning på 0 i alle faser i as built modellen.

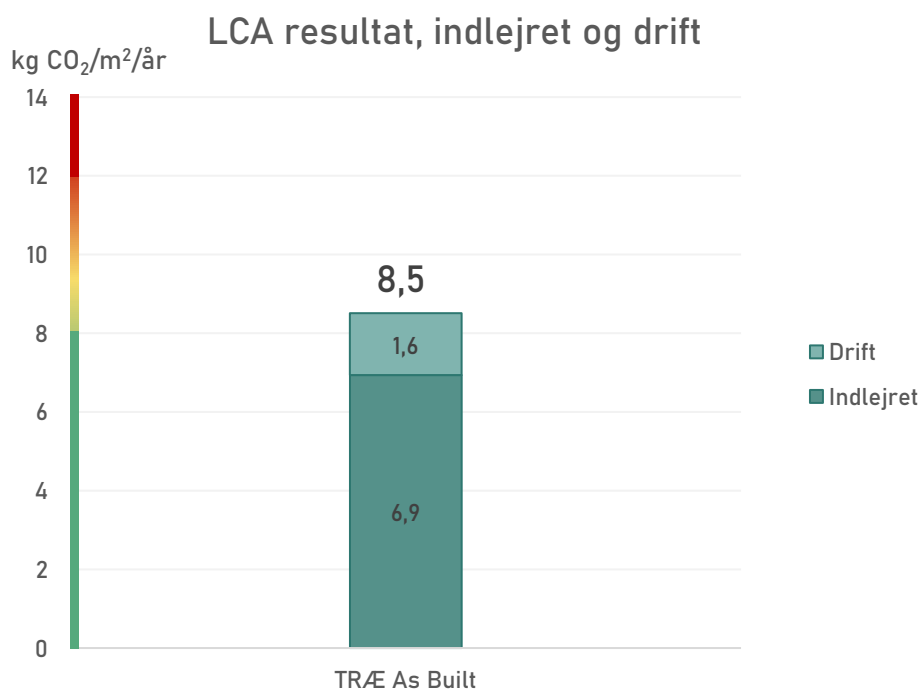
Genanvendte produkter er regnet ud fra oplyste specifikke miljødata for det specifikke produkt, det samme gælder produkter fra afskær/restproduktion, da dette ikke kategoriseres som genbrug. Hvor det ikke har været muligt at skaffe specifikke miljødata, er der anvendt branchedata eller generiske værdier.

TRÆ As Built følger dermed retningslinjerne beskrevet i Bygningsreglementet.

5 LCA resultater

As Built livscyklusanalyse med gældende emissionsfaktorer viser, at TRÆ Sydhavn har et samlet klimaftryk på 8,5 kg CO₂-ækv./m²/år. Heraf udgør bygningsdelene 6,9 CO₂-ækv./m²/år og drift udgør 1,6 CO₂-ækv./m²/år.

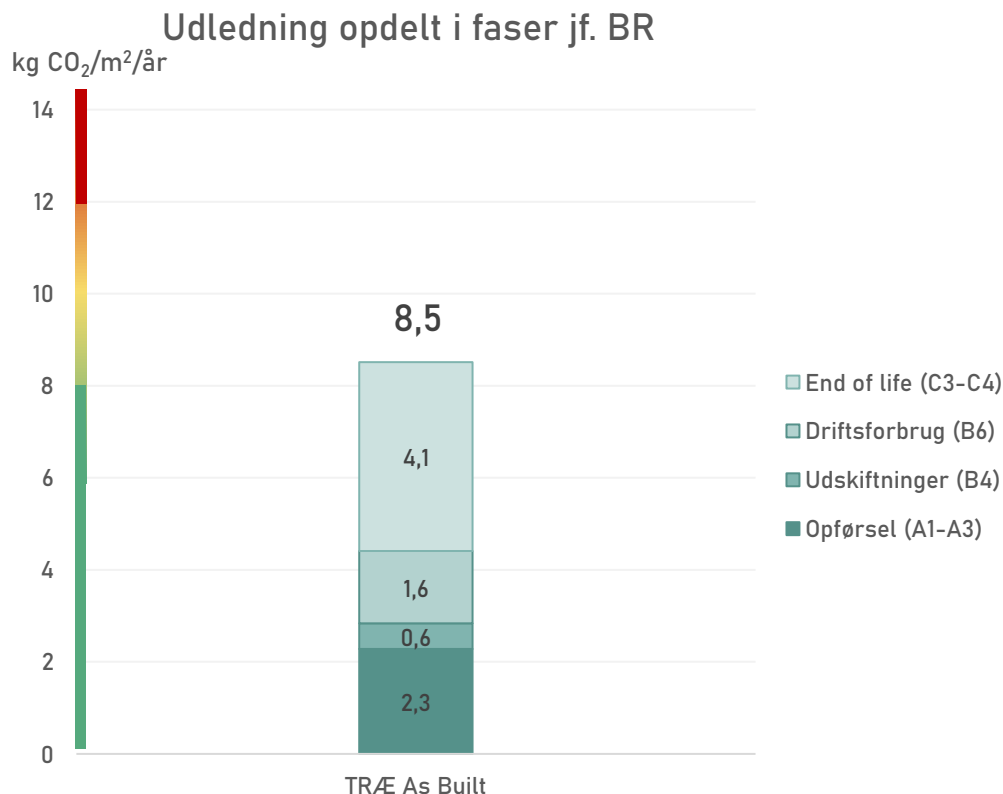
1. januar 2023 blev indført et krav på maks. 12 kg CO₂-ækv./m²/år til nybyggeri, der er større end 1.000 m², imens den frivillige lavemissionsklasse lyder på 8 kg CO₂-ækv./m²/år uafhængig af byggeriets størrelse. TRÆ Sydhavn overholder gældende lovgivning, men overskrider den frivillige lavemissionsklasse.



Figur 2 - LCA resultat med miljøpåvirkning opdelt efter indlejret og drift

5.1 Detaljeret oversigt over LCA resultater

I dette afsnit, vil LCA-resultatet blive udredt på flere forskellige parametre, samtidig med at det vil blive holdt op i mod sammenlignelige LCA-resultater, for bedre at sætte tallene ind i en kontekst. Afsnittet har til formål at belyse hvorfra tallene kommer og give en generelt bedre forståelse af resultatet.

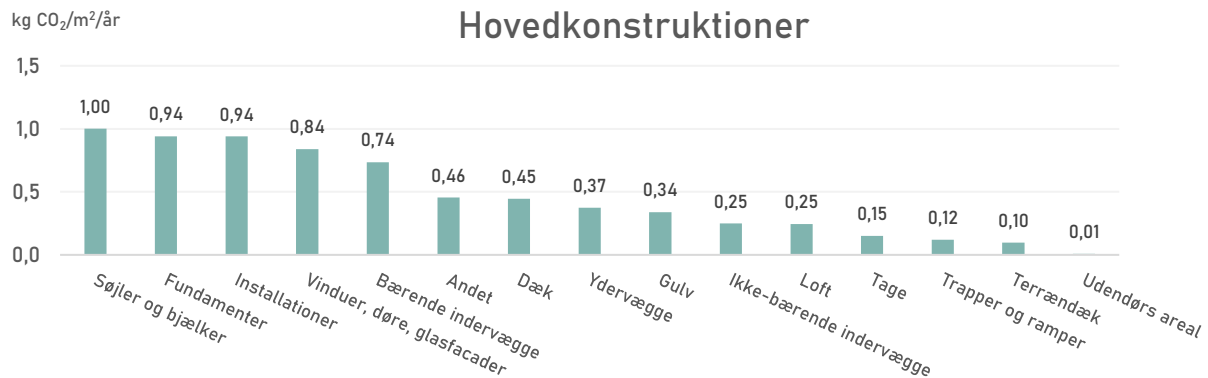


Figur 3 TRÆ Nuværende m. genbrug - LCA resultat opdelt i faser jf. BR18

Figur 3 illustrerer LCA resultatet opdelt i faser jf. BR18. Resultat er opdelt på hhv. produktionsfasen A1-A3, udskiftninger i B4, drift i B6, og til sidst end-of-life, C3-C4. End-of-life er den fase, der bidrager mest til det samlede resultat på 8,5 kg CO₂/m²/år.

Nedenfor ses de indlejrede udledningner opgivet på hovedkonstruktionsniveau. Figuren illustrerer hvordan det især er de bærende konstruktioner, der har den største klimabelastning. På trods af at søjler og bjælker hovedsageligt består af træ, indgår her også store stålsamlingerne ved søjlerne samt stålbjælker, der bl.a. sørger for fastgørelse af de lette facader. Dette giver en betydelig andel stål i projektet, som vejer tungt i en LCA-mæssig kontekst. Beton, i form af fundamenter og bærende indervægge, som er valgt frem for biobaserede materialer af statiske og brandmæssige årsager, har ligeledes en stor andel af miljøpåvirningen. Installationer som er baseret på generiske værdier, er også

blandt de tungeste udledere. Kategorien 'Andet' dækker over solceller (generisk), elevatorer og udvendig solafskærmning.



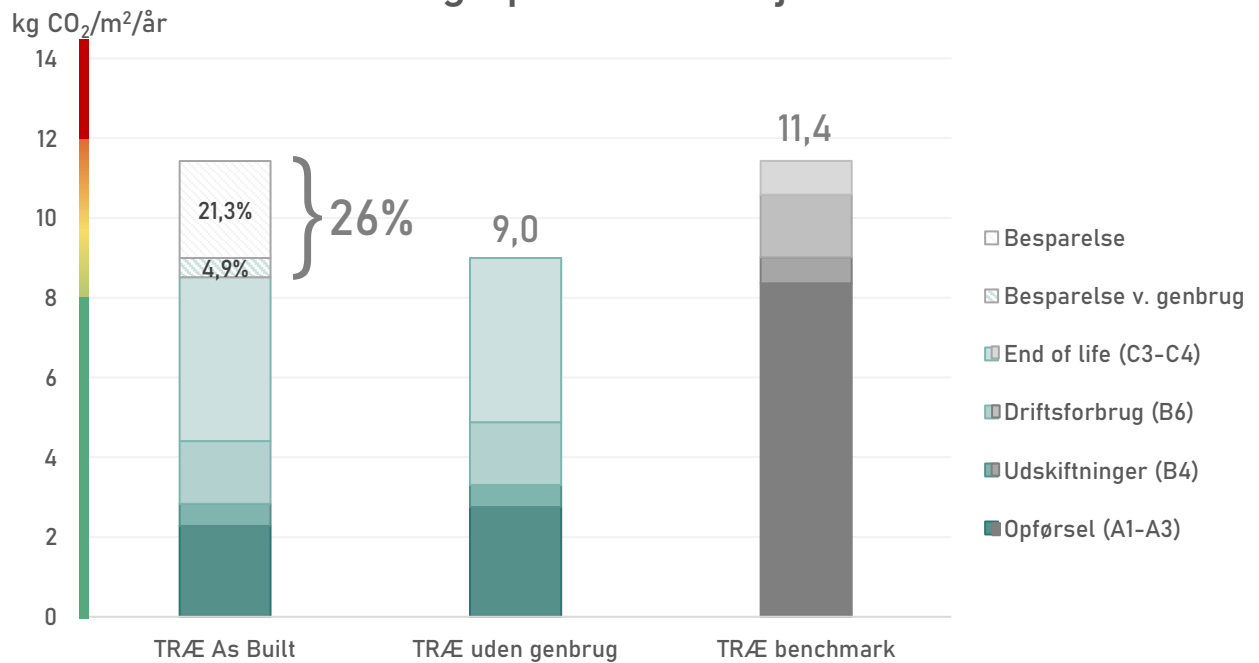
Figur 4 - LCA resultat opdelt på hovedkonstruktioner (A1-A3, B4, C3, C4)

5.1.1 Sammenligning – Det samlede resultat

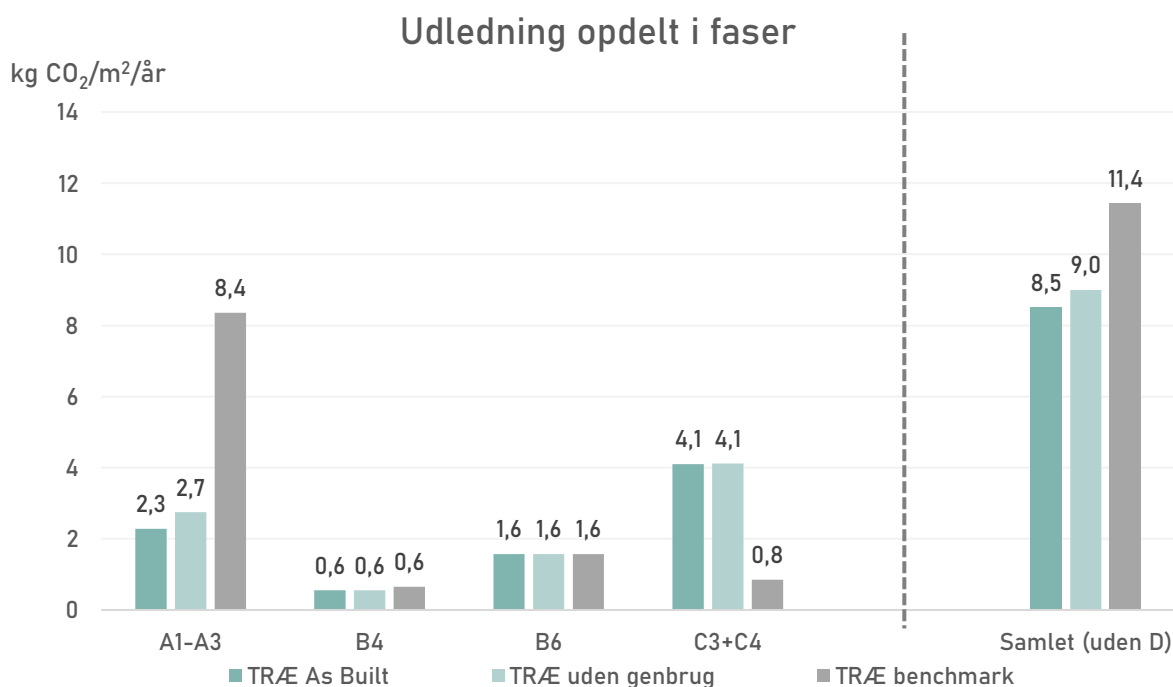
For at belyse den store forskel på biobaserede materialer og konventionelle materialer, er der i Figur 5 og Figur 6 lavet en sammenligning på tværs af de 3 forskellige scenarier, som er benævnt i 4.5. Det er tydeligt hvordan konventionelle materialer bidrager til øget GWP sammenlignet med projektet TRÆ. Grafen viser, at GWP besparelsen er på 26% sammenlignet med scenariet, hvor projektet havde været udført i konventionelle materialer. I dette scenarie havde resultatet været 11,4 CO₂/m²/år. Ved at have fokus på at bygge i mere miljøvenlige materialer end de konventionelle, har man altså i TRÆ opnået en besparelse på hele 2,2 millioner kg CO₂.

Figur 6 viser sammenligningen tydeligt opdelt på faseniveau. A1-A3 for As Built lyder på 2,3 kg CO₂/m²/år, imens den for konventionelle materialer (Benchmark) er helt oppe på 8,4 kg CO₂/m²/år. Det er altså udledning af CO₂ der er gældende her-og-nu, i produktionsfasen. Derimod er end-of-life fasen en langt større faktor i As Built sammenlignet med Benchmark, hvor tallene er hhv. 4,1 kg CO₂/m²/år for As Built mod 0,8 kg CO₂/m²/år for Benchmark. Denne store forskel ligger hovedsageligt i de biobaserede materialer (træ), som oplagrer CO₂ under vækst, men som frigiver alt den oplagrede CO₂ ved afbrænding. Jf. BR18, skal det antages, at træ afbrændes i end-of-life fasen.

Udledning opdelt i faser jf. BR



Figur 5 - LCA resultat inkl. besparelse sammenlignet med forskellige scenarier / referencer



Figur 6 - LCA-resultat sammenligning på faseniveau

5.1.2 Genbrug og genanvendelse

Genbrug er og genanvendte produkter er indarbejdet flere steder i projektet. Direkte genbrug ses i bygningen i form af vindmøllevinger som solafskærmning, og aluminiumsplader som facadebeklædning.

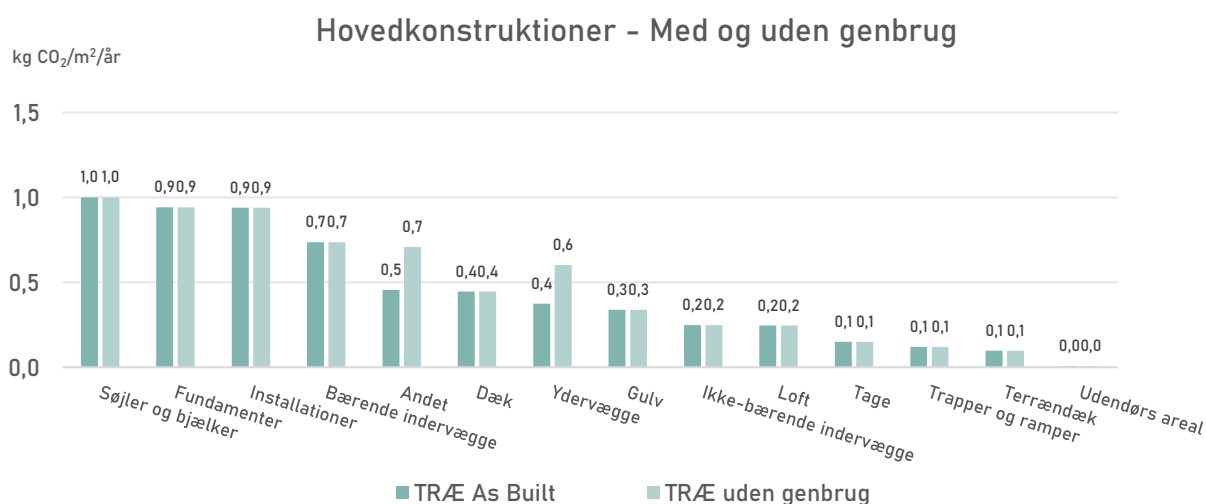
Udover direkte genbrug, ses sekundære ressourcer i stor stil repræsenteret i byggeriet. I nedenstående skema er angivet hvilke mængder der er anvendt i LCA-beregningen af hhv. genbrug, genanvendelse og frasorterede / off-cut bygningsdele. Mængderne er fra As Built Arkitekt Revitmodellen eller Byggningsdelskortet udarbejdet af Kaj Ove Madsen A/S.

Vindmøllevinger som solafskærmning			
Små vinger	219	stk	Genbrug 1:1
Lange vinger	64	stk	Genbrug 1:1
Metalfacader (projekteret omfang semi-kendt)			
Aluminiumsplader (<i>ingen behandling</i>)	5.115	m2	Genbrug 1:1
Glas			
Frasorterede / fejlproducerede ruder i stuefacaden (kun mod nord) 3-lags (mængden angiver indtastningen for 'nye trævinduer')	110 (260)	m2	Frasorteret
Tystø Upcycle glasindervæg	90	m2	Genanvendt
Indvendig komplettering			
Loft			
Akustiklofter af PET- tykkelse 40 mm	9.153	m2	Genanvendt

Genbrugstroldekt	216	m2	Genbrug 1:1
Væg			
Vægakustik med lamelpaneler (genbrugstekstil og genbrugstræ):	2.087	m2	Genanvendt
Gulv			
Klodsegulve med genbrugstræ - tykkelse 22 mm	1.515	m2	Afskær
Massive parketgulve - tykkelse 22 mm	9.015	m2	Afskær
Off cut rhombeparket	210	m2	Afskær

Tabel 2 Oversigt over genbrug og genanvendelse i LCA-beregningen

Nedenstående graf viser i hvor høj grad miljøpåvirkningen ændrer sig i de hovedkonstruktioner de indgår i. Solafskærmning (vindmøllevingerne) indgår under 'Andet', sammen med elevatorer. Solafskærmning har stadig en vis påvirkning, selvom selve vindmøllevingerne regnes med 0 GWP, dette skyldes de beslag af stål der er anvendt til ophæng af vindmøllevingerne. Under 'Ydervæggen' ses besparelsen ved at anvende aluminiumsplader af genbrug frem for nye aluminiumsplader til facadebeklædning. Grafen illustrer ikke genanvendte materialer og afskær.

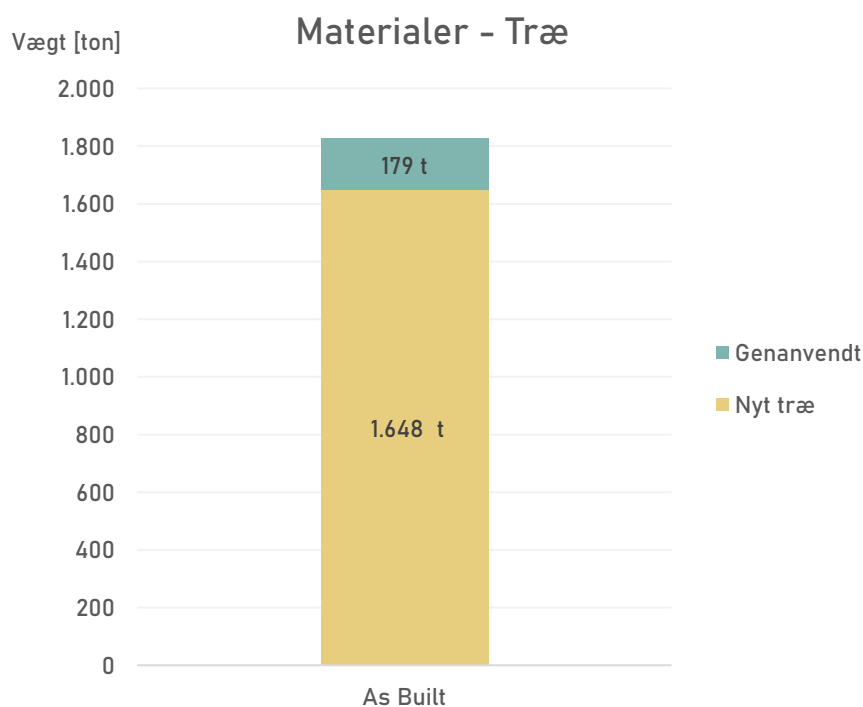


Figur 7 Genbrug opdelt på hovedkonstruktioner - Sammenligning ml. TRÆ Nuværende og TRÆ u. genbrug

I Tabel 3 er mængden af genanvendt træ i projektet opgjort i kg (gulve og vægbeklædning). Ved at anvende træ, der allerede har været en del af en tidligere livscyklus, er behovet for produktion og anvendelse af nyt træ i dette projekt reduceret med 179 ton.

	Beskrivelse	m ²	kg
Flarø	Trælameller - Væg	2.087	56.354
Funderø	Upcycle / off-cut - Gulv	9.015	103.673
Hjælmø	Off-cut træ - Gulv	1.515	17.418
Wiking	Off cut Wiking	210	1.691
Samlet			179.134 kg

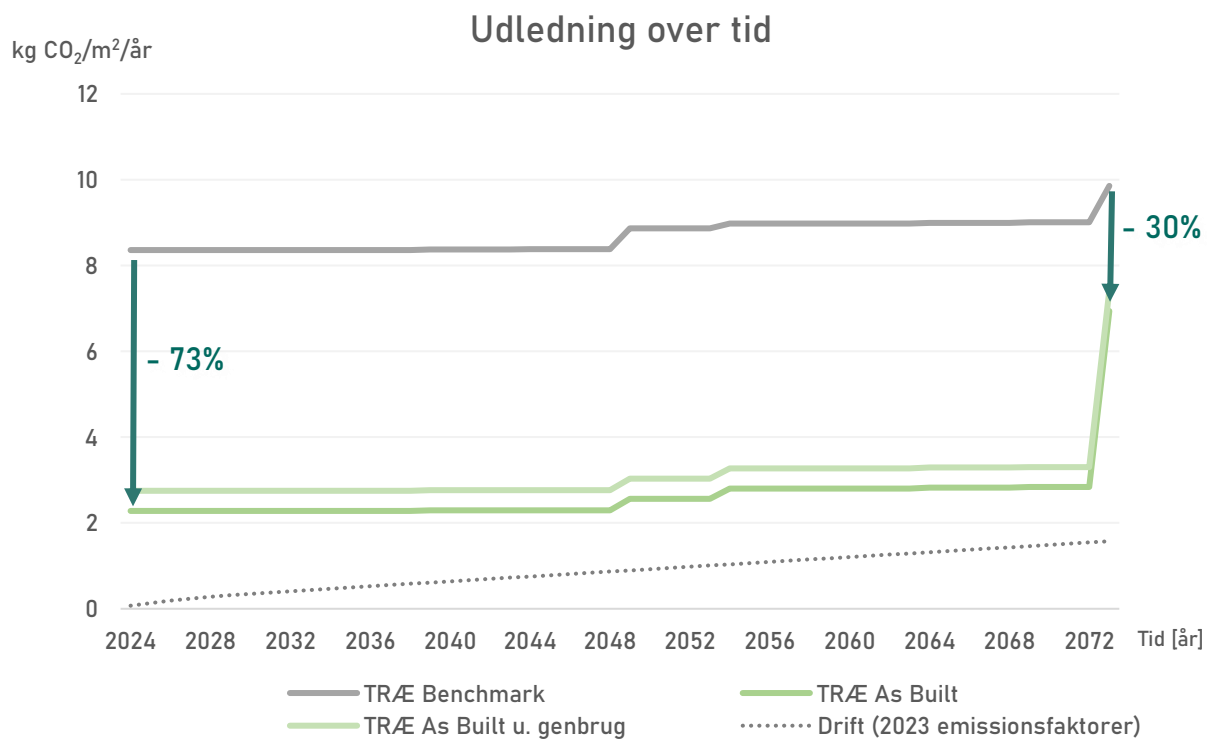
Tabel 3 - Mængde af genbrugstræ i projektet, mængder fra LCA beregning (modellerede mængder)



Figur 8 Mængde af træ og genbrugstræ i projektet

5.1.3 Sammenligning – Over tid

Når man ser på det samlede resultat for alle faserne, er der 2,9 kg CO₂/m²/år i forskel ift. Benchmarkmodellen. Denne forskel er endnu større, hvis man kun ser på udledningen her og nu, altså udledningen fra produktionsfaserne A1-A3. Her er forskellen mere end det dobbelte, ca. 6 kg CO₂/m²/år. Dette er især på grund af træets evne til at optage CO₂ imens det gror, hvorfor denne CO₂ indlejres i trækonstruktionerne i byggeriet og først frigives i end-of-life fasen, når det afbrændes. End-of-life fasen (C3-C4) bygger desuden på at byggevarerne håndteres som de gør i dag, hvorfor der her ikke er taget højde for eventuelle ændringer og forbedringer der kan være sket over en 50-årig periode. Derfor er udledningen i denne ende langt mere usikker, end de tal der foreligger for produktionsfasen (A1-A3).



Figur 9 Udledning over tid – Viser forholdet i reduktion imellem TRÆ Benchmark og TRÆ As Built

5.1.4 Det statiske system

Beregningerne i dette afsnit bygger på resultater fra LCA beregninger lavet i hovedprojektet. "TRÆ Nuværende" henviser til LCA'en for hovedprojektet.

I dette afsnit undersøges det statiske system isoleret set. Det statiske system står alene for over halvdelen af alle materialernes udledning. Det er i det statiske system for TRÆ, hvor de klassiske danske byggemetoder for alvor udfordres. At udføre så højt et byggeri hovedsageligt med træ i det statiske system er ikke tidligere set i Danmark.

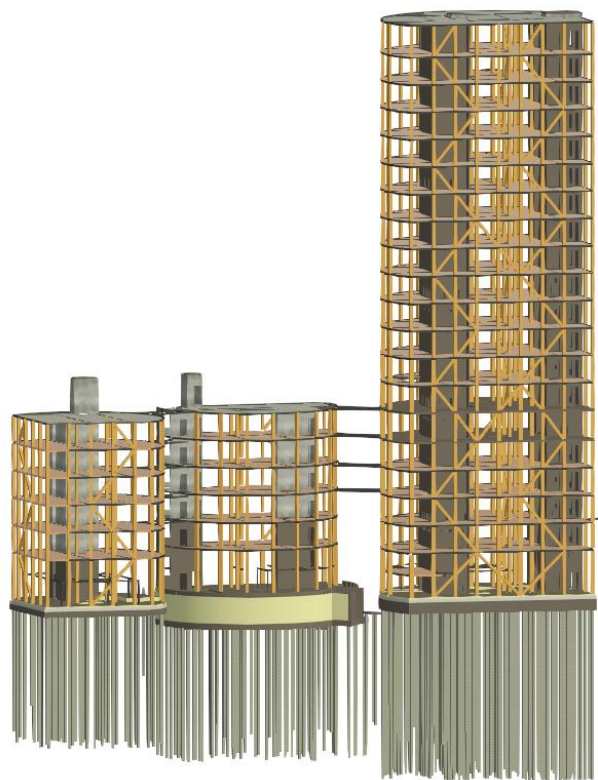
Det statiske system består af en søjle- og dækopbygning i træ suppleret med stålbjælker i nødvendigt omfang samt stålforstærkninger i knudepunktssamlinger. Trappekerne vægge, som både er bærende og stabiliserende, udføres i beton. Det afstivende system udgøres af en kombination mellem trappekerne vægge i beton og afstivningsgitre i limtræ.

Facaden udføres i ikke-bærende trækassetter, som fastgøres etagevist til hovedkonstruktionen.

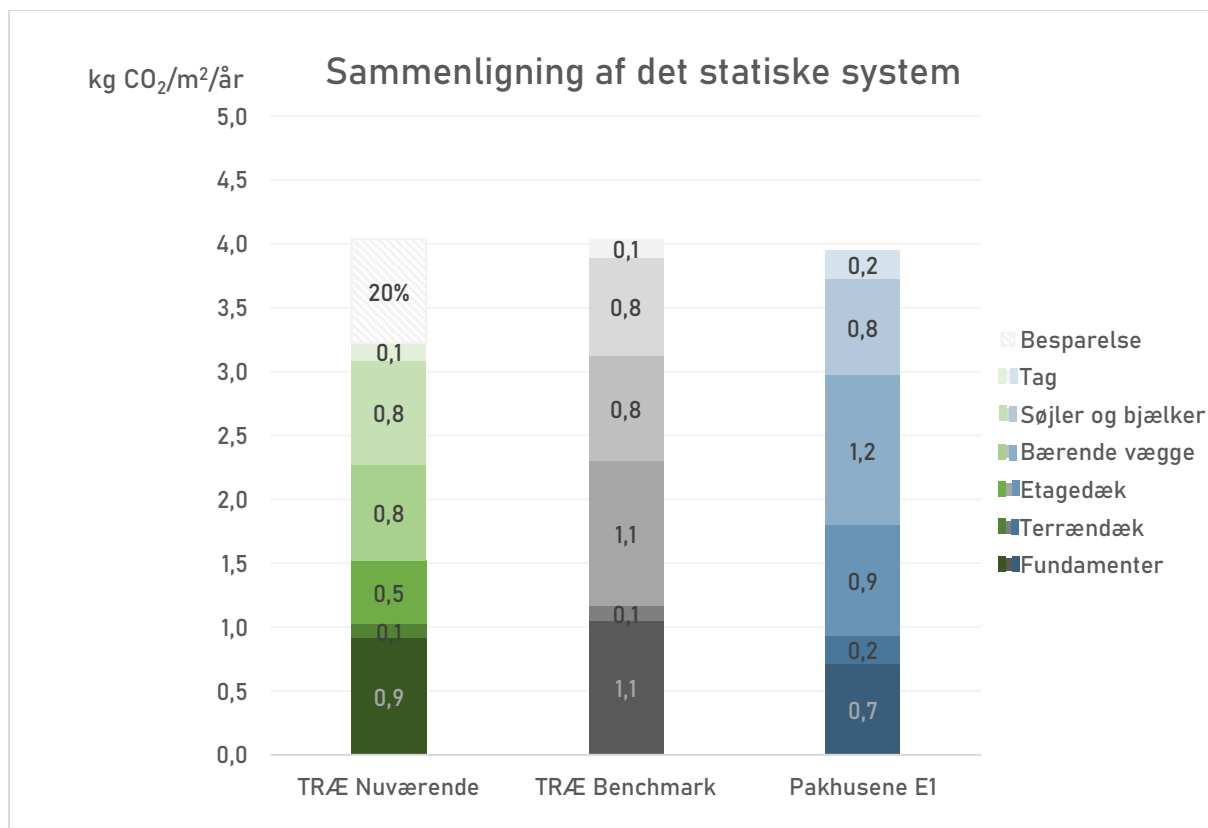
De tre bygninger understøttes af bundplader (fundamenter) i beton, som grundet jordbundsforholdene udføres pælefunderede.

Figur 10 viser den 'rå' konstruktion.

Figur 11 illustrerer udledning fordelt på hovedelementerne i det statiske system. Her sammenlignes TRÆ Nuværende med samme byggeri udført med beton som de bærende elementer, TRÆ Benchmark. Ligeledes ses udledning fra det statiske system for Pakhusene, et højhus udført ud fra klassisk dansk byggemethode, med beton som det bærende element og ydervægge hovedsageligt bestående af sandwichelementer og etagedæk af beton huldæk. I kategorien 'Bærende vægge' indgår de bærende indervægge og for Pakhusene også betonbagemuren i ydervæggens sandwichelement.



Figur 10 - Visualisering af det statiske system - Revit



Figur 11 - Sammenligning af det statiske system, Nuværende, Benchmark og Pakhusene (A1-A3, B4, C3, C4)

Nuværende løsning sammenlignet med benchmark giver en besparelse på 20% - hvilket er svarende til ca. 626 tons CO₂.

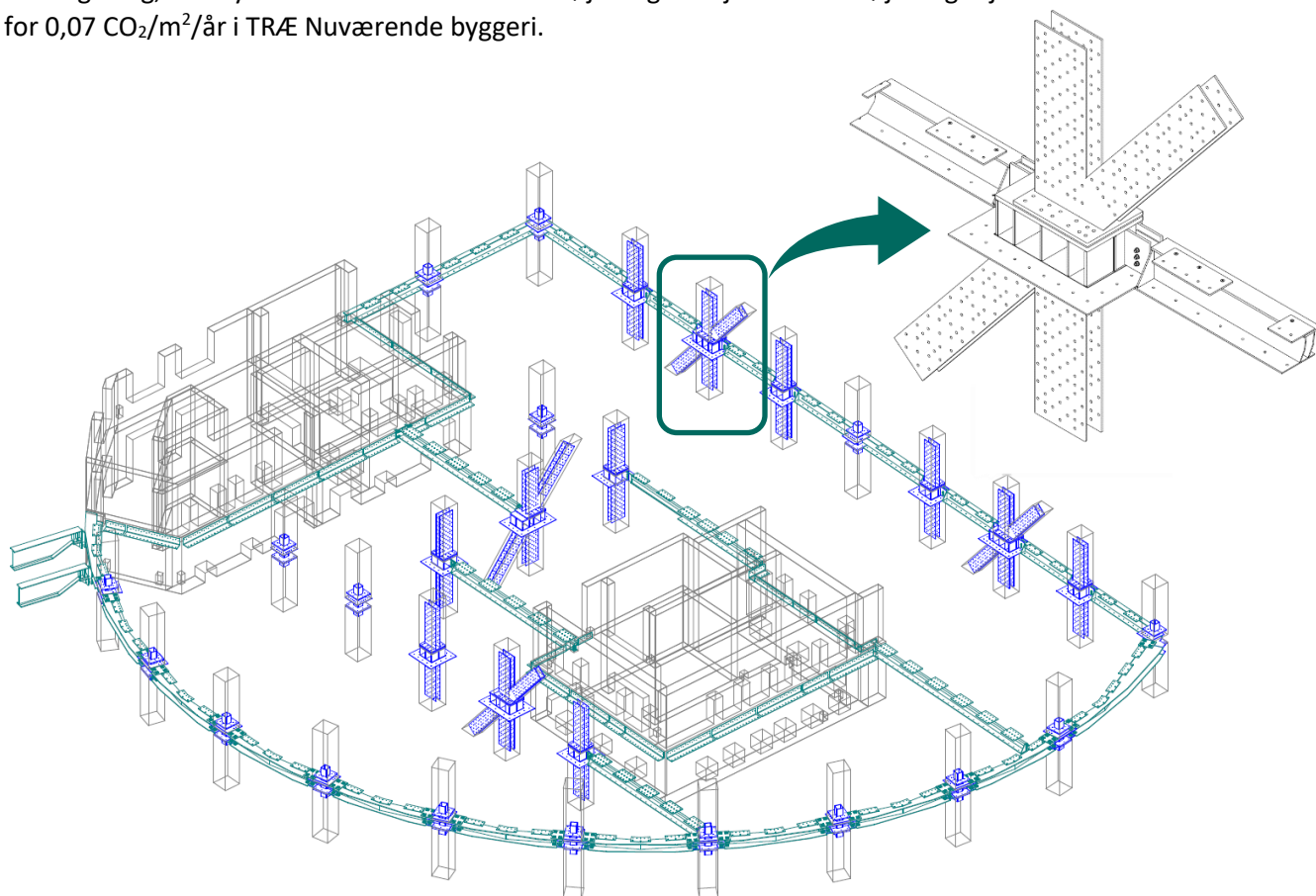
I benchmark er de bærende CLT-søjler udskiftet med beton, imens CLT-afstiverne i gitterkonstruktionen er erstattet med HEB-bjælker (stål). Umiddelbart kunne man fristes til at tro, at dette vil give en markant forskel på udledning for søjler/bjælker, som dog i ovenstående begge viser 0,8 kg.

CO₂/m²/år. Den manglende forskel i udledningen kan forklares i af de store stålsamlinger, der er nødvendigt og derfor medregnet i TRÆ Nuværende.

Nødvendigheden af den store stålmængde i samlingerne er markant udtalt i samlinger mellem skråafstivere og søjler. Stålet er nødvendigt for at overføre kræfter mellem skråafstivere, søjler og dæk samt videre ned til næste etages skråafstivere. Forbindelser mellem træ og stål udføres i en kombination mellem dorne og skruer og som en konsekvens af regler for kantafstande mellem forbindelsesmidlerne, er omfanget af stål markant (i særdeleshed i de nederste niveauer af T1, hvor stabilitetskræfter i skråafstiverne er størst).

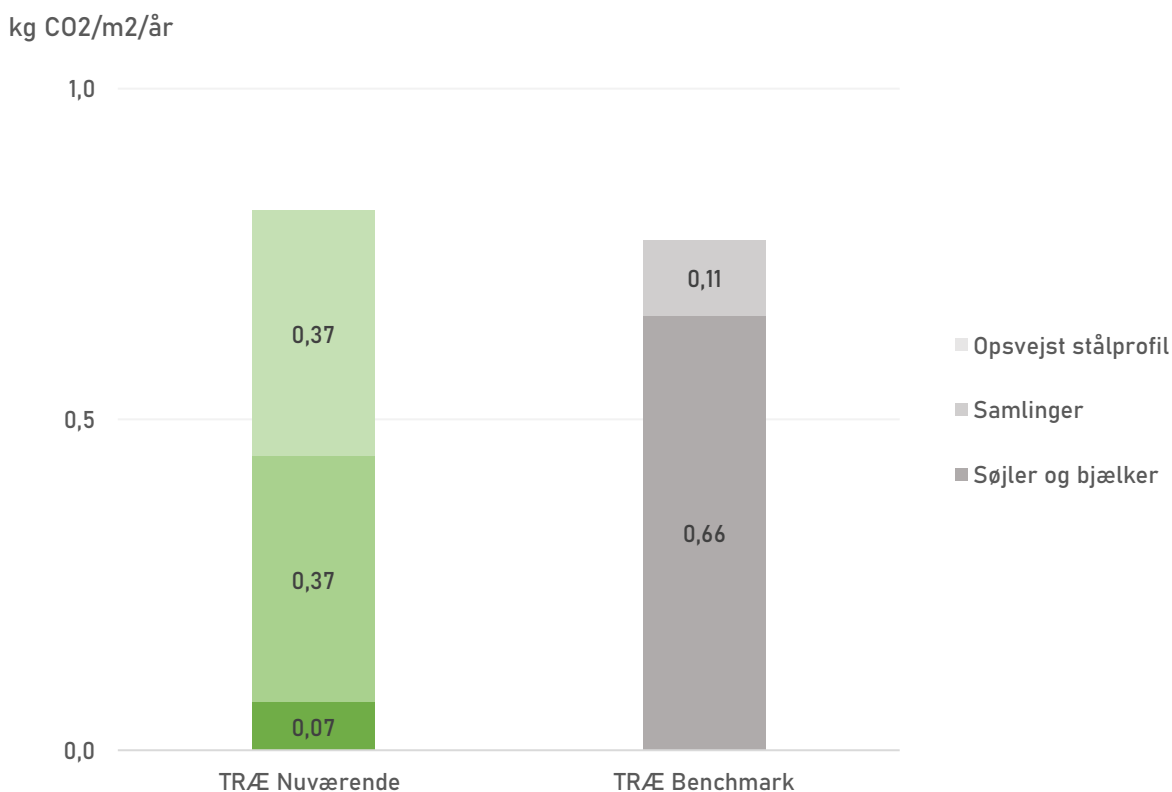
Nedenfor ses en visualisering af samlingerne på et etagedæk i T1. Det giver et bedre indblik i hvor meget stål der rent faktisk indgår i de forskellige samlinger. Desuden er der stålbjælker langs hele facaden samt imellem CLT dækkene. I Figur 13 ses udledning for søjler og bjælker opdelt på søjler,

bjælker og samlinger. Denne graf belyser hvordan stålsamlinger- og bjælker ender med at gøre udledningen lig, hvis systemet havde været betonsøjler og stålbjælker. Træsøjler og -bjælker står kun for 0,07 CO₂/m²/år i TRÆ Nuværende byggeri.



Figur 12 - Visualisering af stålsamlinger, dæk, T1. Af RICHARD THOMSEN A/S

Sammenligning af søjler og bjælker Det statiske system



Figur 13 - Sammenligning af søjler og bjælker, TRÆ Nuværende og TRÆ Benchmark

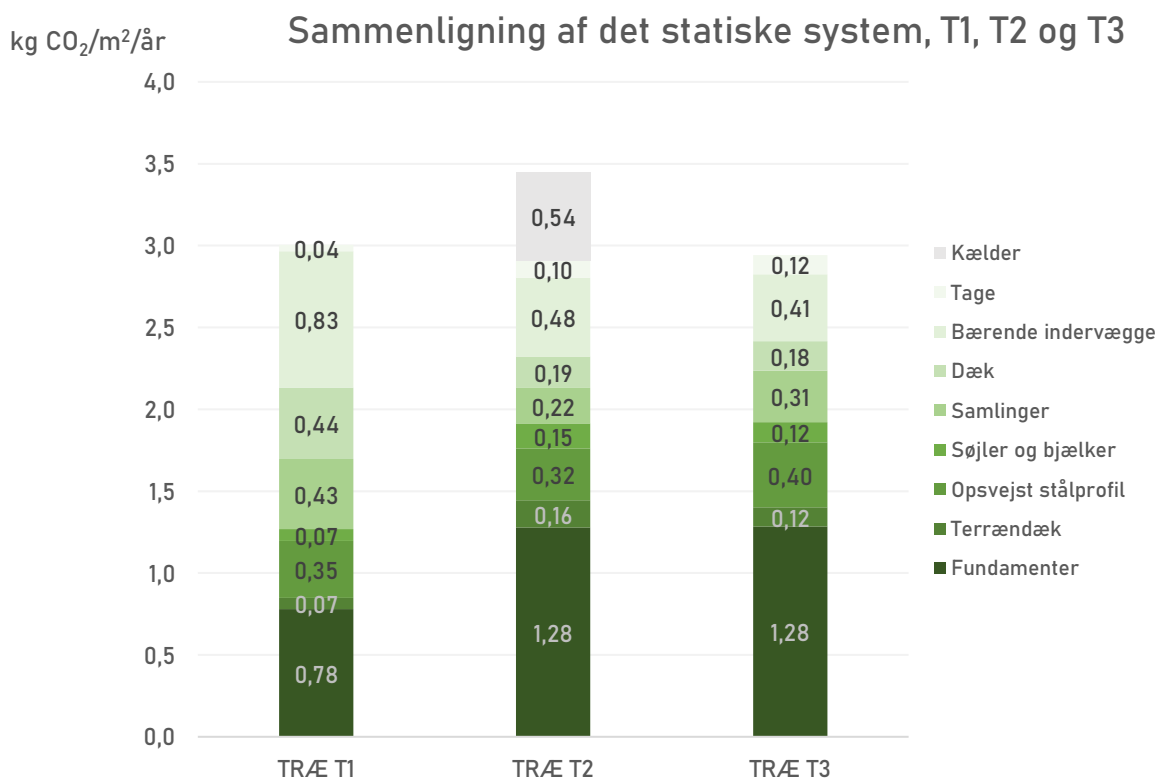
5.2 Betydning af bygningsudformning

I følgende afsnit undersøges hvilken påvirkning den/de valgte bygningsudformning(er) har gjort for det endelige LCA-resultat. Da bygningen består af tre forskellige bygninger, er det oplagt at undersøge dem indbyrdes, da de er opbygget af de samme materialer, men har forskellige opbygninger. De største forskelle, er at bygning T1 er 20 etager høj, T2 er 6 etager høj og har en kælder, imens T3 er 6 etager høj uden kælder.

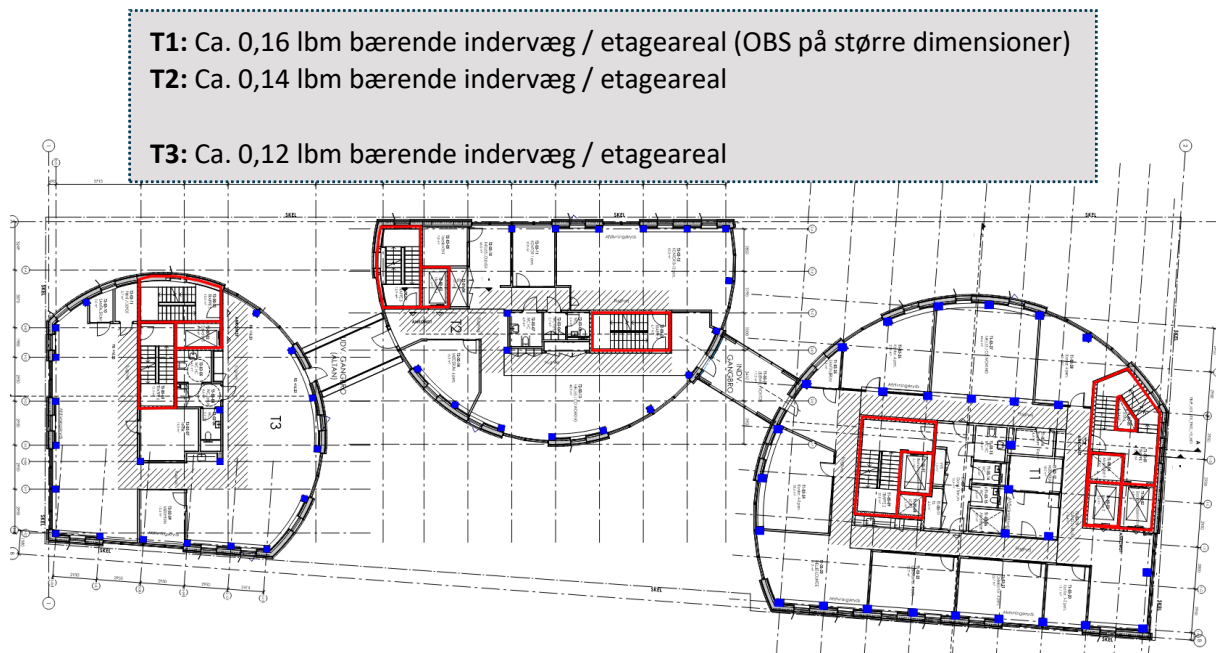
5.2.1 Det statiske system, T1, T2 og T3

På Figur 14 ses en sammenligning af det statiske system på tværs af de 3 bygninger. Her ses bl.a. hvordan fundamentet har en mindre betydning for T1 sammenlignet med de to lavere bygninger – man kan konkludere at fundamentet er bedre udnyttet ved de mange etager i T1. Til gengæld har højden af bygningen krævet et 'stærkere' statisk system, da det skal holde betydeligt mere vægt. Både vægge, søjler og samlinger har en større dimension i de nederste etager, imens de bliver

mindre højere oppe i bygningen. Kun på de øverste 7 etager er dimensionerne lig dem der findes i T2 og T3. Grundet placeringen og udformning af trappekerner, ses desuden større andel bærende indervæg pr. etageareal i T1 end i T2 og T3. I T3 er trappekernerne ikke opdelt i to, hvilket giver den mindste mængde betonindervæg pr. m².



Figur 14 - Sammenligning af det statiske system, T1, T2 og T3 (LCA fra hovedprojekt)



Figur 15 Plantegning, 3. sal. Betonkerner markeret med rød, søjler markeret med blå

5.2.2 Klimaskærm betydning

TRÆ består af tre separate tårne. Dette betyder, at kompaktheden af byggeriet er lavere end normalt, hvilket både har betydning for energirammen og transmissionstabet. En kompakt bygning med mindre fodaftryk vil have en højere andel af klimaskærm per opvarmet kvadratmeter etageareal, hvorfor varmetabet derved også forøges. TRÆ er ligeledes et let byggeri i form af trækassetteopbygning, hvilket giver en lavere termisk masse.

Nedenfor ses en sammenligning mellem TRÆ og andre højhuse til erhverv i Danmark. Her er forskellige faktorer/ratioer sammenlignet for at illustrere udfordringerne ved bygningsgeometrien i relation til både energiforbrug og forøget materialeforbrug fra klimaskærmen pr. etageareal.

Data fra energimærkning	Opførelsessår	Antal etager	Opvarmet etageareal [m ²]	Klimaskærm inkl. vinduer / opvarmet etageareal [-]	Klimaskærm / opvarmet etageareal [-]
Ferringbygningen	2002	20	15.099	0,67	0,36
Prismet	2002	18	13.104	0,71	0,38
Kobbertårnet	2004	16	13.942	0,86	0,62
Axel Towers	2016	16	24.200	0,92	0,66
Mærsk Tårnet	2016	15	42.703	0,85	0,50
Pakhusene	2017	11	10.074	0,63	0,39
TRÆ	2024	20	15.064	0,80	0,54

Tabel 4 Sammenligning med andre kontorhøjhuse i Danmark. Data er hentet fra energimærkningsdatabasen.

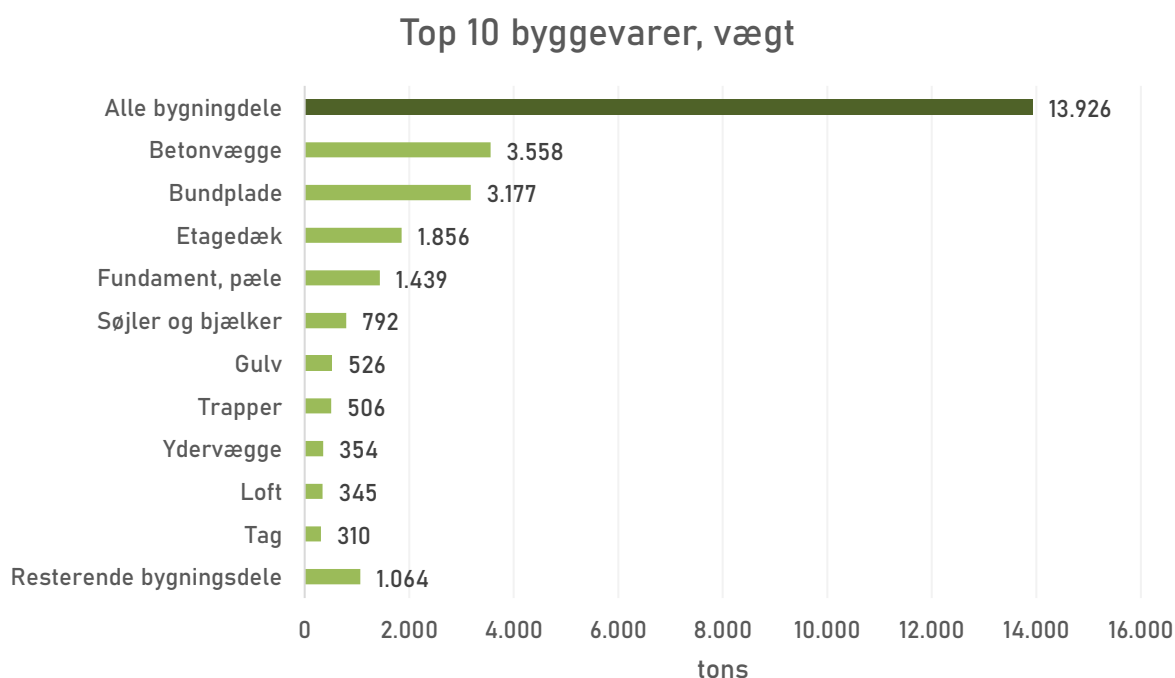
Generelt ligger klimaskærmsarealet (både med/uden vinduer) ift. opvarmet etageareal for TRÆ i den høje ende af de undersøgte erhvervsbygninger.

5.3 Vægt

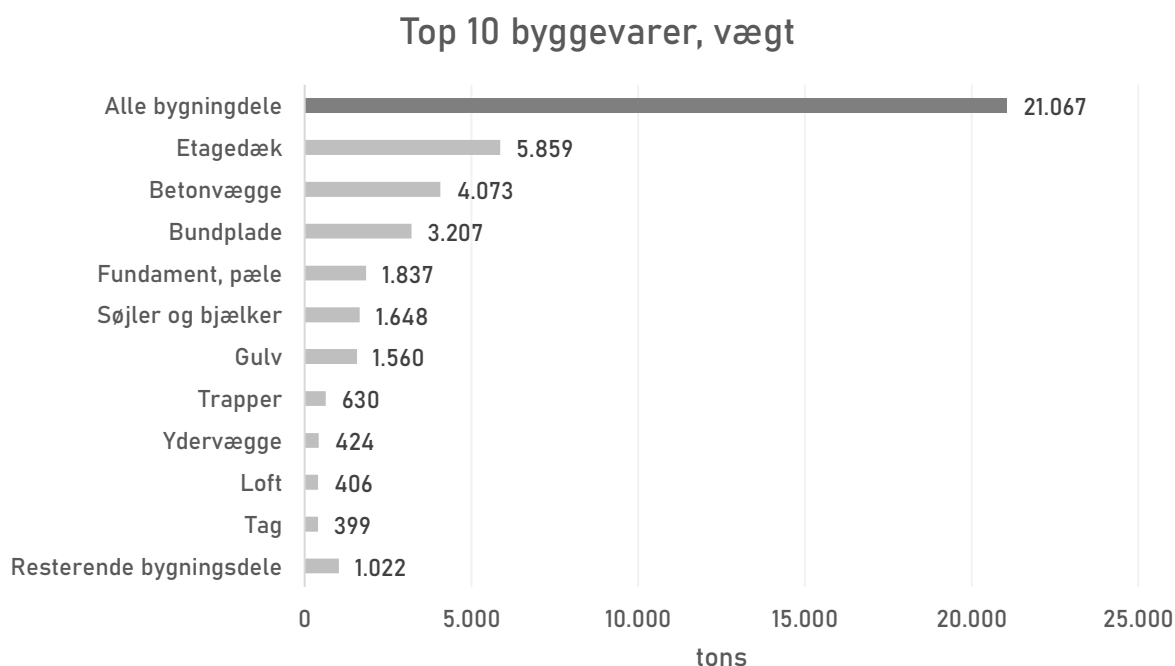
Beregningerne i dette afsnit bygger på resultater fra LCA beregninger lavet i hovedprojektet. "TRÆ Nuværende" henviser til LCA'en for hovedprojektet.

Ved at bygge i træ opnår man et lettere byggeri end konventionelle betonbyggerier. Dette er belyst i nedenstående tabeller. For TRÆ Nuværende vejer bygningen 0,9 ton pr. m², imens TRÆ Benchmark vejer 1,4 ton pr. m². TRÆ Nuværende sammenlignet med TRÆ benchmark giver altså en besparelse på hele 34% (7.140 ton).

Vægten er opgjort på baggrund af den oplyste vægt i de anvendte EPD'er samt data som Lendager har leveret ift. genbrugsmaterialer. Genbrugsmaterialer, som ikke var opgjort i vægt, er i nedenstående opgjort med vægten for et sammenligneligt, nyt produkt.



Figur 16 Oversigt over de tungeste byggevarer i TRÆ Nuværende



Figur 17 Oversigt over de tungeste byggevarer i TRÆ Benchmark

5.3.1 A4-A5 – Transport og spild

A4 dækker transport til/fra byggepladsen, og A5 dækker over forbrug på pladsen, herunder byggeaffald.

Alt forbrugsdata er opgivet af Kaj Ove Madsen A/S. Der er oplyst følgende forbrug på pladsen:

- 830.620 kWh fjernvarmeforbrug
- 405.391 kWh elforbrug
- 3000 t jord (transporteret 200 km, generisk værdi)

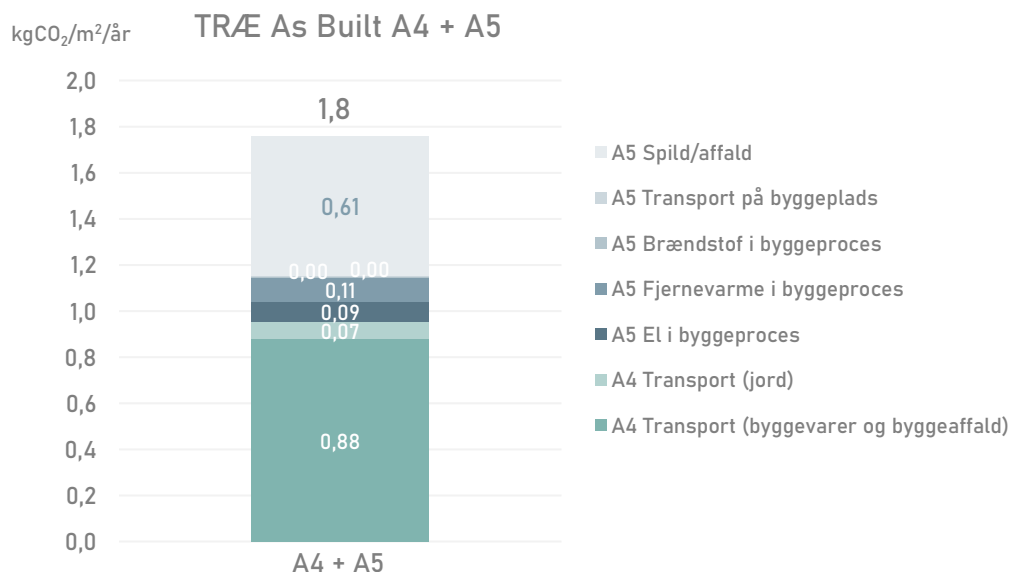
Affaldsmængder er opgjort af Marius Pedersen A/S.

Der er ikke opgivet brændstofforbrug på pladsen, og der har ikke været angivet transport på byggepladsen. Begge er angivet til 0.

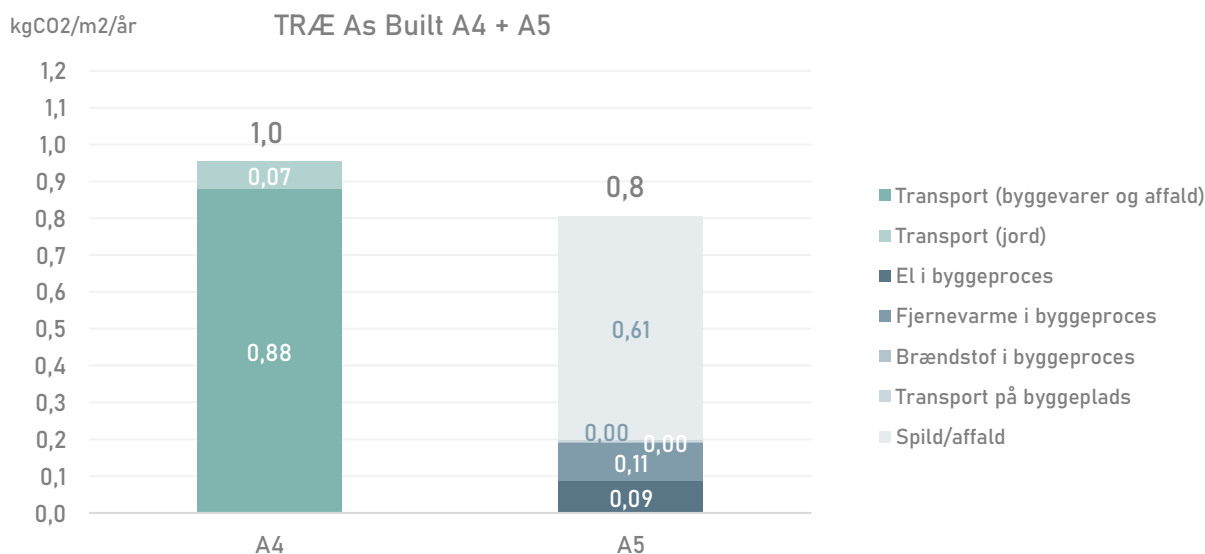
Transport af byggevarer er beregnet ud fra generisk afstand på 500 km. Miljøpåvirkningen for affaldsfraktionerne tager udgangspunkt i emissionsfaktorerne beskrevet i tabel 14 i BUILD-rapporten "Resourceforbrug på byggepladsen Klimapåvirkning af bygningers udførelsesfase"¹

Det samlede miljøpåvirkning fra A4 + A5 er 1,8 kgCO₂/m²/år.

¹ https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/611626468/BUILD-rapport_2023_14_Ressourceforbrug_p_byggepladsen.pdf



Figur 18 A4 + A5 for TRÆ As Built med specifikke affaldsmængder.

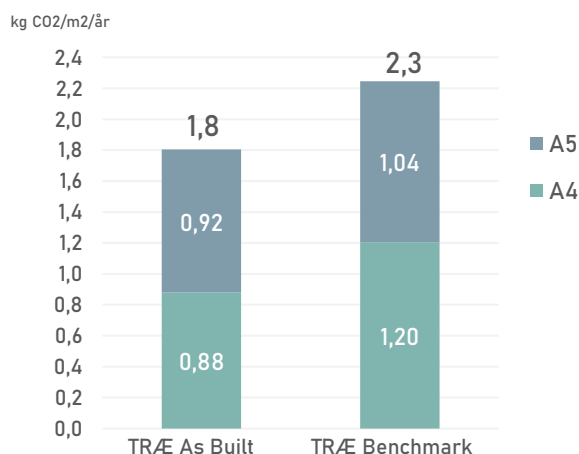


Figur 19 A4 + A5 opdelt for TRÆ As Built med specifikke affaldsmængder.

Det er især spild (affaldsmængder) og transport af byggevarer, der er de store udledere i for ressourcforbrug i byggeprocessen.

Mindre vægt i byggeriet giver mindre udledning ift. maskiner til håndtering af materialet. Fx kan der anvendes betydeligt mindre kraner til håndtering af træ, frem for hvis de skulle have håndteret beton. Dette forventes at have haft en positiv indflydelse på elforbruget på pladsen, som har en påvirkning på mindre end 0,1 kgCO₂/m²/år.

TRÆ As Built vs Benchmark A4 + A5, generiske værdier



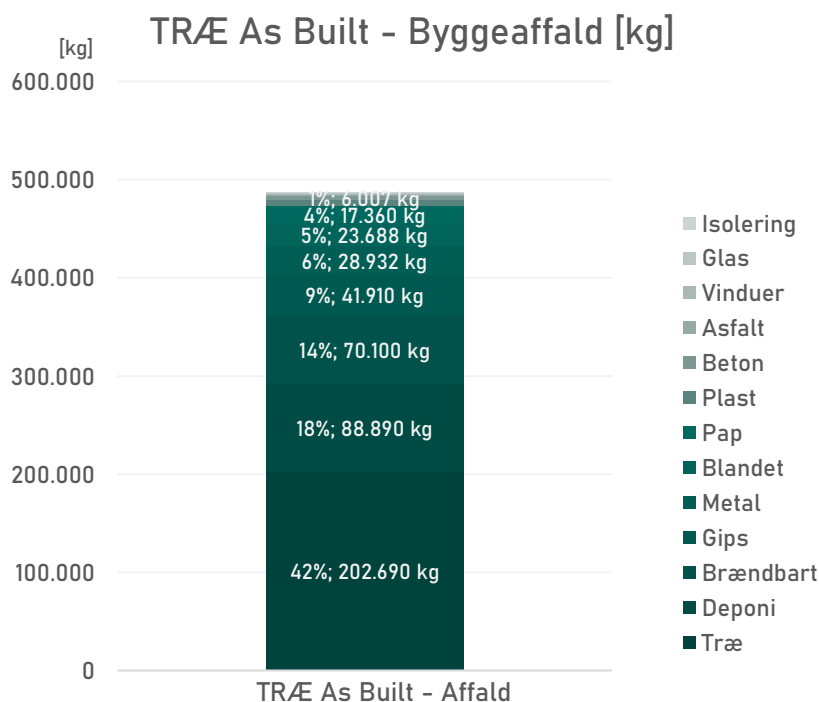
Figur 20 A4 + A5 TRÆ As Built sammenligning med Benchmark. Her er anvendt generiske værdier for spild/byggeaffald (10% spild på alle byggevarer)

Det er valgt at regne transport af byggevarer med generisk afstand på 500 km for at have et sammenligningsgrundlag med TRÆ Benchmark, som ikke har specifikke afstande. For TRÆ As Built står transport af byggevarer for 0,88 kg/CO2/m2, imens tilsvarende generisk transport på TRÆ Benchmark er svarende til 1,13 kg/CO2/m2. Dette tilskrives, at bygningen er markant tungere, hvorfor der skal transporteres flere kg på vejene. Besparselsen på transport er på ca. 27% ved det lette træbyggeri, sammenlignet med det tungere benchmark. For Benchmarkberegningen er antaget samme værdier for forbrug til el og fjernvarme som TRÆ As Built. Tungere løft i benchmarkbyggeriet må dog formodes at bidrage til øget elforbrug, men dette er ikke undersøgt nærmere.

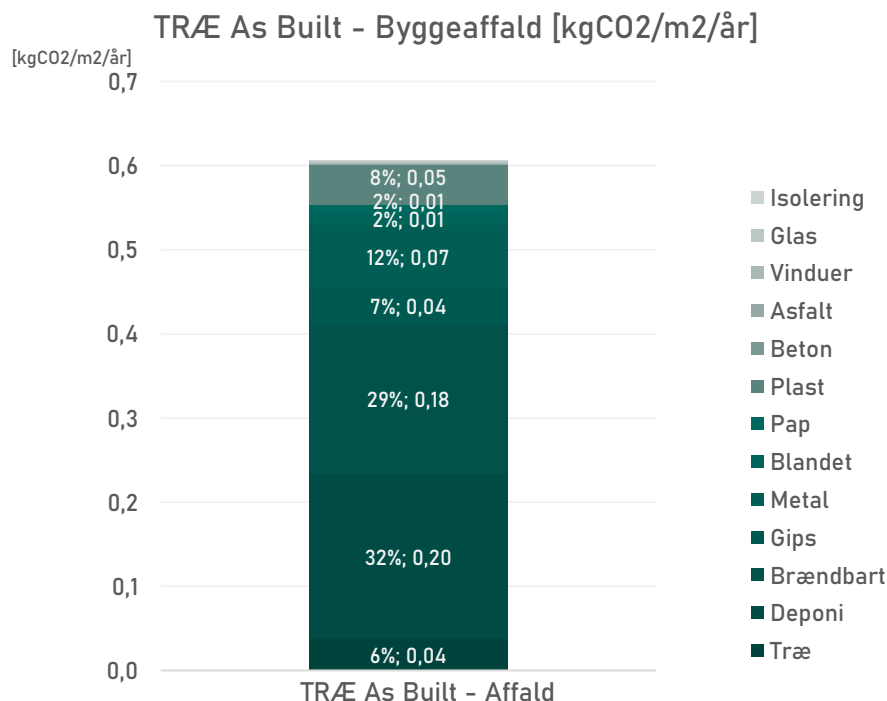
I realiteten har der været 3% spild (vægt af affald sammenlignet med vægt af TRÆ As Built), som er lavt, sammenlignet med den generiske værdi på 10%, når man sammenligner vægten af affald med vægten af TRÆ As Built byggeriet. Men grundet fordelingen af affaldet, herunder en stor andel til deponi og brændbart, bliver den samlede miljøpåvirkning fra affaldet næsten lige så høj, som ved generisk 10% spild. Fordelingen af affaldsfraktioner og dertilhørende miljøpåvirkning er illustreret på Figur 21 og Figur 23.

Generelt er fordeling af affaldsmængderne således iht. affaldsbehandling:

- Genanvendelse 67%
- Forbrænding 15%
- Deponi 18%



Figur 21 Byggeaffald for TRÆ As Built opgjort på hhv. kg og procent af den totale mængde affald. Affaldsfraktionerne isolering, glas, vinduer, asfalt og beton udgør til sammen 7.470 kg affald, svarende til 2% af den totale mængde affald. Disse tal fremgår ikke i Figur 22



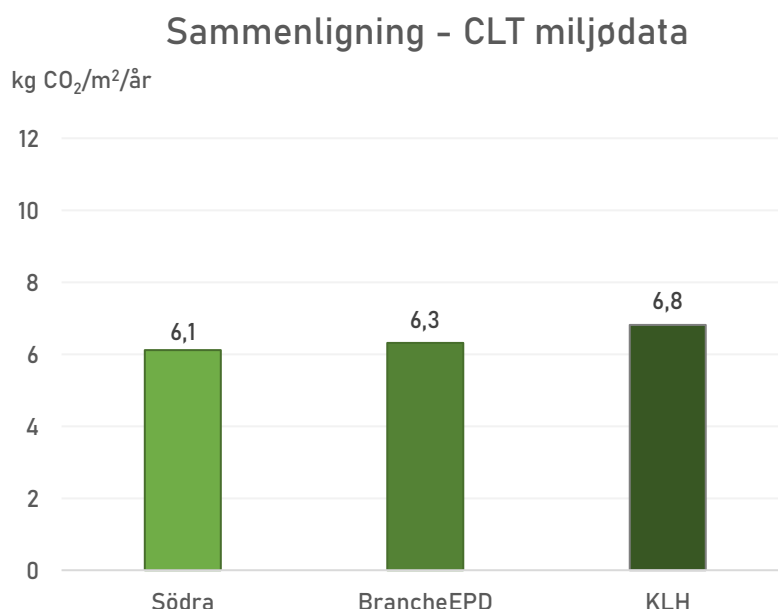
Figur 23 Byggeaffald for TRÆ As Built opgjort på hhv. kgCO₂/m²/år og procent af den totale GWP for affald. Affaldsfraktionerne isolering, glas, vinduer, asfalt og beton udgør til sammen 0,01 kgCO₂/m²/år, svarende til 1% af den totale udledning fra affald. Disse tal fremgår ikke i Figur 24

5.4 Miljødata – CLT

Beregningerne i dette afsnit bygger på resultater fra LCA beregninger lavet i hovedprojektet. "TRÆ Nuværende" henviser til LCA'en for hovedprojektet.

Der er stor forskel på miljødata for CLT. I TRÆ Nuværende er branche-EPD'en for krydslamineret træ anvendt. Nedenfor ses en analyse af hvor stor betydning en ændring af miljødata for CLT har for det samlede resultat. Det er undersøgt ved en udskiftning af CLT fra hhv. Södra, branche-EPD (nuværende scenarie) og KLH.

KLH er valgt som leverandør af CLT til projektet TRÆ.



Figur 25 - CLT sammenligning, samlet betydning for udledning fra materialer anvendt i TRÆ

I Figur 25 sammenlignes betydningen af ændret miljødata på CLT for den samlede udledning fra materialerne (faserne A1-A3, B4, C3-C4). Det har markant betydning, hvilken CLT der anvendes i byggeriet. Hvis Södra anvendes frem for KLH, ser man en besparelse på hele 0,7 kg CO₂/m²/år. Det svarer til ca. 536 ton CO_{2e}.

KLH har siden ovenstående beregninger udgivet en ny EPD, hvor miljødata lægger sig tæt op ad miljødata for brancheEPD'en, dog fortsat højere. Den nye KLH EPD er anvendt i LCA As Built beregningerne.

6 Bevidste valg i designet af TRÆ

Trappekerner i beton

I Figur 16 ses det hvordan beton fortsat spiller en stor rolle i træbyggeriet. De bærende indervægge af beton udgør alene 0,7 kg/CO₂/m² af det samlede resultat. De bærende indervægge består hovedsageligt af trappekernerne af beton. Det er især brandkrav der skyldes at trappekerner ikke er udført i træ. Hvis de skulle være udført i træ, ville det have betydet store dimensioner, altså vægge med en tykkelse på en halv meter. Trappekerner af træ havde givet en lavere CO₂ udledning, men havde ikke bidraget positivt til den arkitektoniske kvalitet og funktionaliteten af etagerne.

Bygningshøjde

Højere bygninger kræver øgede dimensioner og i dette tilfælde mere stål. Desuden introduceres et robusthedskrav for byggerier over 15 etager over terræn, som yderligere har bidraget til en øget mængde af stål og derfor øget CO₂ udledning pr. m².

Offentlig park på taget frem for solceller

Solceller på tag har større effekt end solceller på facader. Derfor havde det været en CO₂-mæssig fordel at anvende alle tagflader til solceller frem for park. Der er dog valgt at lave en offentlig park til fordel for bygningens brugere og lokalsamfundet.

Samlet set er det afgørende at balancere funktionalitet, æstetik og bæredygtighed i bygningsdesign. Ved at skabe brugbare og trivselsfremmende bygninger kan det sikres, at bygninger er mere holistisk bæredygtige, da levetiden forventeligt vil forlænges. Mulighed for bedre at tilpasse kontorlandskabet individuelle og skiftende behov, kan være med til at give tilfredse brugere. Desuden kan udsigt, dagslys og sociale områder, som f.eks. byparken på taget, bidrage til social bæredygtighed. Hvis bygningen ikke er attraktiv for brugeren efter opførsel, ville det på ingen måde bidrage til den bæredygtige dagsorden.

7 Opsamling på LCA-analyser

Inddrag de relevante aktører tidligt i designfasen:

Oprindelige opdrag fra bygherre samt lokation har haft væsentlig betydning for valg af bygningsgeometri, hvilket udfordrer LCA'en på mange parametre. Konsekvensen af valg af geometri skal belyses tidligere i processen, hvorfor konstruktionsingeniører og producenter med relevante erfaringer inden for typen af byggeriet bør inddrages tidligt i designprocessen. Desuden skal bygherre oplyses om konsekvenser ift. CO₂ udledning ved fastsættelse af designparametre, så beslutninger træffes på et oplyst grundlag.

Desuden er det vigtigt at have brandrådgivere med på banen helt tidligt i designfasen, når man arbejder med alternative løsninger ift. gængs byggeri, da det ofte kan være brandkrav der bliver designgivende parameter.

Minimér overfladearealet:

Bygningsudformningen giver øget klimaskærmsareal per. etageareal, hvilket leder til større CO₂-udledning i driften. Når andelen af klimaskærmsareal er stort per m² og mængden af materialer per m² ydervæg er stor vil det betyde en større CO₂-udledning.

Et forslag til optimering ift. nærværende projekt kunne f.eks. være at bygge de tre bygninger sammen fremfor at holde dem adskilt. Desuden at holde udformningen symmetrisk frem for irregulære former, hvor man har kombineret lige og buede vægge.

Bygningslayout bør følge optimalt konstruktionsprincip:

Det statiske system står for over halvdelen af den samlede udledning fra materialerne. Statikken kunne have været optimeret ved at samle de tunge betonkerner til én betonkerne i midten af bygningen. Dette vil give øgede dimensioner, dog stadig betydeligt mindre beton end nu, hvor der er to kerner. Grundet brandkrav, ville dette dog især gå ud over indretning i stueetagen, da brandtrapperne skal have direkte adgang til terræn.

Ved at have optimeret placering af betonkerner, ville det potentielt være muligt at undgå gitterkonstruktionen. Dette ville ligeledes nedbringe den samlede udledning, da samlingerne i gitterkonstruktionen indeholder store mængder stål.

De CO₂-tunge stålbjælker langs de buede facader kunne have været undværet, hvis der i stedet var bygget med lige facader. Langs de buede facader er der specialudformede stålbjælker til at understøtte CLT-dækkene samt for at 'gribe' ydervæggen. I T1 er der dog også stålbjælker langs de lige facader, disse er indarbejdet som følge af øget robusthedskrav. Hvis T1 havde været lavere end 15 etager, ville der ikke have været behov for stålbjælkerne langs de lige facader.

Hvis man ønskede at optimere efter en så lav CO₂-udledning som muligt, ville det have været optimalt at placere søjlerne i et mere systematisk grid for optimal udnyttelse af CLT-dækkene. CLT-dæk bærer – i modsætning til eksempelvis huldæk – i to retninger, hvorfor det ved optimal placering af søjler ikke er nødvendigt med supplerende stålbjælker for bæring af CLT-dækkene.

En optimering af grundform og søjlegrid ville således have mindsket behovet for mellemliggende stålbjælker i alle bygninger. En mere kompakt og symmetrisk bygningsudformning havde bidraget til en mere ligelig fordeling af laster.

Vinduer og glasfacader står for en stor procentdel af den samlede udledning:

Når der bygges i biobaserede materialer, er det ikke længere beton, der bliver den største udleder. Vinduer og glasfacader kommer til at stå for en stor procentdel. I gennemsnit udleder 1 m² vinduesareal ca. 40% mere CO₂ end en 1 m² ydervæg – og denne difference er endnu større, når vinduernes udledning sammenholdes med en trækassette frem for en betonydervæg. Desuden bør man have fokus på glasfacade-og-vinduesareal/facadeareal ratioen og ikke øge glasarealet unødigt. Dette er også til fordel for driften, da mindre vinduesareal giver mindre varmetab. Optimal balance mellem glasareal og daglysforhold bør prioriteres i designfasen.

Nuværende beregningsmetoder bidrager ikke til incitament til brug af genanvendte materialer:

Det er svært at belyse fordelene ved genanvendte materialer ved LCA-beregning, da BR18 foreskriver at kun direkte genbrug kan regnes til en miljøpåvirkning på 0.

Som genbrug forstås ikke overskudsprodukter fra byggepladser eller restprodukter, da disse materialer ikke har været brugt før. Dvs. de store mængder af gulv af restproduktion ikke regnes med en fordel i LCA'en.

Analysen af genbrugsmaterialer viser, at fokuseret genbrug/genanvendelse giver en større fordel end at tænke mængdemæssigt, når det kommer til LCA-beregningerne. Især at anvende alternativer til jomfrueligt aluminium og glasvægge har en stor betydning, når man ser på LCA resultater.

Det skal understreges, at det i langt de fleste tilfælde vil være en fordel at anvende genbrug, hvor man kan, for at spare på Jordens ressourcer, selvom det ikke nødvendigvis giver en stor CO₂ besparelse.

Anvendelse af restproduktion kan ligeledes erstatte behovet for nyproducerede varer, og derved spare på Jordens ressourcer – denne gevinst ser man ikke i LCA-beregningerne, da metoden for beregninger af materialer fra restproduktion følger beregningsmetoden for nye varer.

Fundamentet udnyttes bedre, når der bygges højt:

Fundament står for en større procentdel af udledningen på de lave bygninger (T2 og T3) vs. den høje bygning (T1). Selvom T1 har flere og længere pæle samt tykkere bundplade, opvejer bygningens større udledning fra disse. Fundamentets størrelse stiger ikke proportionelt med størrelsen af bygningen.

Små kældre er ikke en fordel:

Beregningerne viser, at kælderen øger udledningen betydeligt, på trods af at den giver flere kvadratmeter at dele den samlede CO₂-udledning ud på. Samtlige elementer i kælderen er af beton, som udleder markant mere CO₂ end biobaserede materialer. Det er kælderen alene, der gør at T2 performer dårligst af de tre bygninger. Små kældre har store materialemængder pr. kvadratmeter, hvorimod vi i mange tilfælde ser at større kælder har en bedre performance.

Brug af specifikke EPD'er, giver lavere CO₂-udledning:

Man når langt ift. at nedbringe udledning ved at vælge biobaserede materialer, men selvom man bygger i træ, er det stadig vigtigt at vælge det bedste materiale inden for kategorien. Nærværende notat belyser betydningen af miljødata, hvor Södra vs. KLH gav en forskel på hele 0,7 kg/CO₂/m² for det samlede byggeri (baseret på KLH EPD der var gældende i Q1 2023)

Minimér ressourceforbrug i byggeprocessen ved fokus på at minimere transportafstande for tunge byggevarer, samt ved at reducere spild og sortere hensigtsmæssigt:

Betydelige byggematerialer, såsom CLT og stål er transporteret over store afstande til byggeriet. For minimering de reelle udledninger i A4 (transport af byggevarer) er det vigtigt at have øje for hvor de tungeste byggevarer er produceret. For minimering af udledninger i A5 er det især vigtigt at have fokus på at anvende eldrevne maskiner hvor det er muligt, hvilket også er efterlevet ved opførelsen af TRÆ, samt at minimere spild og sortere rigtigt, så mindst muligt sorteres som blandet, til forbrænding eller til deponi.

Robusthedskrav udløser øget CO₂:

Ved at bygge højt, udnyttes det betontunge fundament på bedst mulig vis, da mængden af

fundament ikke stiger proportionelt med bygningshøjden. Ved maks. at bygge 15 etager, undgår man derimod øgede krav til det statiske system i form af skærpede robusthedskrav, som bl.a. introduceres ved kontorbyggerier, med mere end 15 etager over terræn. Det skærpede robusthedskrav har i nærværende projekt bidraget til øgede dimensioner af bærende elementer og flere stålbjælker. I nærværende projekt kunne det have været en fordel at bygge samtlige tre bygninger til lige under robusthedskravet, altså 15 etager over terræn. Dette ville bidrage til både bedre udnyttelse af fundament samt undgå det øgede materialeforbrug som følge af robusthedskravet