

DET KLIMAVENLIGE LANDBRUGSBYGGERI

- Prioritering af CO₂-belastende konstruktionsdele

Rapport 2



DET KLIMAVENLIGE LANDBRUGSBYGGERI

Prioritering af CO₂-belastende konstruktionsdele

Rapport

Januar, 2022

Af

Mikkel Brivio Volden, Lotte Bjerregaard Jensen, Morten Ryberg

Projekt udarbejdet af SEGES Innovation P/S

Projektleder Kenneth Poulsen, Byggechef, SEGES Innovation P/S

ISBN: 978-87-7475-686-6

Copyright: Reproduction af dele af eller hele denne publikation skal indeholde en reference til rapportens titel, forfattere etc.

Udgiver: DTU, Institut for byggeri og anlæg, Brovej, Building 118, 2800 Kgs. Lyngby Denmark
www.byg.dtu.dk

STØTTET AF

Promilleafgiftsfonden for landbrug

Indhold

1 Resume	1
Forkortelser	2
2 Introduktion	3
3 Metode 4	
Funktion og funktionel enhed (FU)	4
Systemgrænser	5
Fuldstændighedskrav	5
LCIA-metode	5
Beskrivelse af miljøpåvirkningskategorier	7
Datakrav og kvalitet	7
4 Baseline: Betonelementstald	7
LCA-resultater, hotspot fra Betonelementstald	9
Udvælgelse af mest miljøbelastende bygningskomponenter og bygningsdele	10
Konklusion på de mest miljøbelastende bygningskomponenter fra betonelementstald	13
5 Optimering af Betonelementstaldens design i forhold til klimapåvirkning.	13
6 Alternativt isoleringsmateriale	14
7 CLT-stalden – et alternativ i træ	15
Konklusion på LCA-resultater	22
8 Stålkonstruktionsstalden	23
LCA-resultater fra Stålkonstruktionsstalden	26
LCA-optimering af Stålkonstruktionsstaldens bygningsdesign	28
Konklusion på LCA-resultaterne	29
9 Samlede resultater og anbefalinger	31
Referencer	35

1 Resume

Rapporten benytter resultater fra livscyklusvurdering (LCA) af udvalgte bygningsdele på en typisk dansk svinestald (Betonelementstald) som baseline (arbejdspakke 1) og sammenligner med CO₂ emissionen fra en række alternative bygningskomponenter. Herudover sammenlignes en traditionel opført slagtegrisestald, i det efterfølgende kaldet "Betonelementstalden", med Konceptstaldender i det efterfølgende benævnes "Stålstalden"

Konceptstalden er udviklet af SEGES i 2019, med fokus på pris, produktionssikkerhed og -effektivitet. Konceptstalden er opbygget med en traditionel bund, det vil sige gyllekanaler og -bund udført i beton, men med stålpær som bærende konstruktion. Facader er beklædt med PIR-skumselementer, og taget er opbygget på træåse med stålplade som tagbeklædning, herunder isolering og dampspærre, og stålplade som loftbeklædning.

Resultaterne viser, at den alternative staldtype, baseret på en stålramme-konstruktion, har højere miljøpåvirkninger end betonelementstalden. Derimod demonstreres at hvis stalden i stedet for betonelementer opbygges af CLT elementer (Cross Laminated Timber) reduceres de samlede miljøpåvirkninger fra svinestalden væsentligt. Herudover konkluderes at valget af isoleringsmateriale også har en stor indvirkning på miljøpåvirkningen.

Forkortelser

LCA	Livscyklusvurdering (Life Cycle Assessment)
GWP	Klimaforandringer (Global Warming Potential)
eq.	Ækvivalenter (Equivalents)
CLT	Krydslamineret massivtræ (Cross Laminated Timber)
EPD	Miljøvaredeklaration (Environmental Product Declaration)
FU	Funktionel enhed (Functional Unit)

2 Introduktion

Formålet med rapporten er at bidrage med viden om miljøpåvirkning af konstruktionsdele i en typisk nyere landbrugsbygning, med henblik på at der kan ske en prioritering og valg af de dele, som har mindst CO2 udledning.

Denne rapport bruger LCA-resultaterne af en typisk, dansk svinestald i beton fra rapporten "DET KLIMAVENTLIGE LANDBRUGSBYGGERI, Arbejdspakke: 1, LCA og LCC Baseline for 'Betonelementstald'" (Mahdi m.fl. 2021), som baseline til at sammenligne med alternative designforslag til udvalgte bygningskomponenter. Formålet er som nævnt er at finde frem til løsninger, som har mindre miljøpåvirkning. Herudover vil analysen også resultere i en udvælgelse af bygningskomponenterne med særligt potentiale for "design for adskillelse" (c2ccertified.org 2017), hvilket vil blive belyst yderligere i rapporten ' Genanvendelse - Urban Mining og Design for Adskillelse'.

Formålet med rapporten er, at komme med konkrete designforslag til designet af en typisk dansk svinestald sådan, at det samlede bidrag til klimaforandringer mindskes.

Sådanne løsninger skal naturligvis give mening i en større sammenhæng, både for entreprenøren og landmanden. Det betyder, at en alternativ løsning nødvendigvis skal kunne måle sig med en typisk staldbygning på flere parametre – både økonomisk og i forhold til bygbarhed, holdbarhed og robusthed for at være et relevant alternativ til hvordan svine- stalde bygges i dag. Samtidig står vi over for store udfordringer i forhold til klimaforandringer, som gør det nødvendigt at finde nye løsninger inden for byggesektoren. Et relevant tiltag i kampen mod klimaforandringer, kunne netop være, at mindske miljøaftrykket fra svinestalde og øge muligheden for at genanvende dele af deres bygningskomponenter til opførelsen af nye svinestalde.

Rapporten er opbygget med først en gennemgang af "Betonelementstaldens" opbygning, bygningsdele samt LCA-resultaterne fra arbejdsopgave 1 ("DET KLIMAVENTLIGE LANDBRUGSBYGGERI, Arbejdspakke: 1, LCA og LCC Baseline for 'Betonelementstald'" (Mahdi m.fl. 2021). De efterfølgende kapitler behandler forskellige alternativer til- og mulige forbedringer af Betonelementstalden og sammenligner med den baseline, som ovenstående rapport udgør. Slutteligt sammenfattes og sammenlignes de fundne resultater, hvor der også bliver præsenteret en række anbefalinger til de forskellige designforslag, som er blevet gennemgået i rapporten. De fundne resultater, hvor der også bliver præsenteret en række anbefalinger til de forskellige designforslag, som er blevet gennemgået i rapporten.

3 Metode

Denne rapport bruger LCA-beregninger til at vurdere og sammenligne forskellige designs for Svinestalde i forhold til miljøpåvirkninger. Der findes to standarder som beskriver principper og rammer (ISO 14040 1) samt krav og vejledning (ISO 140442) for LCA'er. Alle LCA-beregninger i denne rapport er foretaget i programmet LCAByg 3.2 3, som er et frit tilgængeligt program til LCA-beregninger, udgivet af Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København, der følger den europæiske standard for udførelse af LCA på bygninger – DS/EN 15978 4.

LCA-resultaterne fra rapporten "DET KLIMAVENLIGE LANDBRUGSBYGGERI, Arbejdspakke: 1, LCA og LCC Baseline for 'Betonelementstald'" (Mahdi m.fl. 2021) fra DTU, som præsenterer LCA-beregninger for en svinestald, benyttes i denne rapport som baseline til sammenligning med alternative designforslag. For at begrænse omfanget er der udvalgt de seks mest betydningsfulde bygningsdele – terrændæk, loft, ydervæg, indervæg, tag, fundament – der vurderes i alle sammenligningerne med alternative løsninger. Øvrige bygningsdele, som døre, vinduer, inventar i svinestalden etc. vurderes og sammenlignes således ikke i denne rapport.

Formålet med rapporten er som nævnt at finde måder at nedbringe danske svinestaldes klimaaftryk, og der fokuseres således kun på klimaforandringer (GWP) når forskellige designløsninger vurderes. Der bruges som allerede beskrevet en typisk, dansk svinestald som baseline, benævnt "Betonelementstald", til sammenligning med alternative designforslag. Der er således tale om et sammenlignende case studie (Hauschild, Rosenbaum og Olsen 2018).

LCA-analysen udføres på DTU byg, som en del af et projekt mellem SEGES og DTU, der omhandler måder at gøre danske svinestalde mere bæredygtige i fremtiden. SEGES har sammen med Gråkjær A/S leveret data angående detaljer og mængder, som indgår i casestudierne.

Funktion og funktionel enhed (FU)

Det der reelt sammenlignes i de forskellige scenarier, er forskellige byggematerialers evne til at opfylde samme funktioner for svinestalden. De 6 forskellige vurderede bygningsdele har forskellige funktioner i svinestalden. Fælles for dem er, at de hjælper med at holde et acceptabelt indeklima i svinestalden, bl.a. ved at holde vind og vejr ude over en længere tidsperiode. Alternative løsninger har indflydelse på de medfølgende klimapåvirkninger (CO₂ emission, GWP), men kan også have det for eksempelvis levetiden. Den funktionelle enhed sørger for, at alle scenarier er sammenlignelige, ved at der stilles samme krav til forskellige byggematerialer i form af hvor, hvor længe og hvor godt. De specifikke funktionelle enheder for hver af de seks bygningsdele som sammenlignes i denne rapport kan ses i Tabel 3.1

Bygningsdel	FU
Terrændæk	x m ² terrændæk egnet til en svinestald i 40 år
Loft	x ⁵ m ² akustikloft med porøsitet som tillader passende ventilation igennem loftet i en svinestald i 40 år
Ydervæg	x m ² ydervæg som tåler miljøet i en svinestald og er vejrbestandig i 40 år
Indervæg	x m ² indervæg som kan tåle miljøet i en svinestald i 40 år
Tag	x m ² vejrbestandig tag i 40 år
Fundament	x lbm fundament, som kan optage kræfterne fra ydervæggene i en svinestald, i 40 år

Tabel 3.1: FU for de seks bygningsdele som sammenlignes

Systemgrænser

Analysen, der er foretaget i LCAbyg 3.2, medtager modulerne A1-A3, B4 og C3-C4.

Modul	A1-A3			A4-A5		B1-B7							C1-C4				D
Livscyklus-faser	Produkt			Bygge-proces		Brug							Endt levetid				Uden for system-grænse
Processer	Råmaterialer	Transport	Produktion	Transport	Overførelse/montering	Brug	Vedligeholdelse	Reparation	Udskiftning	Renovering	Energiforbrug til drift	Vandforbrug til drift	Nedtagning/nedrivning	Transport	Afaldsbehandling	Bortskaffelse	Potentiale for genanvendelse, genvinding og genbrug
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D

Tabel 3.1.1: Livscyklusfaser som defineret i den europæiske standard EN 15978:2011

Tabel 3.1.1. viser et mere detaljeret overblik over de forskellige faser, som kan tages med i en LCA-beregning. I praksis inddrages dog normalt ikke alle faser.

LCAbyg 3.2 inkluderer modul A1-A3, B4, C3 og C4 i sine beregninger.

Fuldstændighedskrav

Det er kun de seks bygningsdele, som benævnt i Tabel 3.1, der er medtaget i beregningerne til sammenligning mellem forskellige bygningsdesign for svinestalden. Dette er primært for at begrænse omfanget af LCA-beregninger. Dette skal dog ses som en begrænsning af resultaterne, da øvrige bygningsdele eller inventar i svinestalden kan have betydning for de endelige resultater.

LCIA-metode

LCA-beregninger er foretaget i LCAbyg 3.2 med fokus på miljøpåvirkningskategorien klimapåvirkninger (GWP). Der bør dog altid kigges på de øvrige miljøpåvirkningskategorier som er inkluderet i beregningerne foretaget i LCAbyg inden en egentlig beslutning på baggrund af resultaterne for GWP foretages, for at undgå såkaldt burden-shifting (Hauschild, Rosenbaum og Olsen 2018), hvor problemerne med udledninger fra ét materiale i en påvirkningskategori flyttes til en anden påvirkningskategori ved valget af et alternativt materiale. Derfor er øvrige kategorier som er inkluderes i LCAbyg er også taget

i betragtning. De vurderede miljøpåvirkningskategorier kan ses i Tabel 3.2.

Impact kategori	Forkortelse	Enhed
Klimaforandringer	GWP	Kg CO ₂ -eq.
Ozonedbrydning	ODP	Kg R11-eq.
Fotokemisk ozondannelse	POCP	Kg Ethen-eq.
Forsuring	AP	Kg SO ₂ -eq.
Næringssaltbelastning	EP	Kg PO ₄ -eq.
Udtømning af ressourcer – grundstoffer	ADPe	Kg Sb-eq.
Udtømning af ressourcer – fossile brændsler	ADPf	MJ
Primærenergiforbrug	PEtot	kWh

Tabel 3.2: Inkluderede miljøpåvirkningskategorier i LCAByg 3.2

Beskrivelse af miljøpåvirkningskategorier

De 8 forskellige miljøpåvirkningskategorier, der medregnes i LCAbyg, er såkaldte midpoint-kategorier, hvor en række forskellige udledninger samles i én kategori. Det gælder for eksempel for alle drivhusgasser, som samles i midpoint-kategorien "klimaforandringer" (GWP) og måles i kg. CO₂-ækvivalenter.

En samlet oversigt over hvad de 8 miljøpåvirkningskategorier betyder for klimaet:

- GWP: Når mængden af drivhusgasser i atmosfæren øges, opvarmes de jordnære luftlag med klimaændringer til følge
- ODP: Nedbrydning af det stratosfæriske ozonlag som beskytter flora og fauna mod solens skadelige UV-stråler
- POCP: Bidrager i forbindelse med UV-stråler til at danne jordnær ozon /sommersmog) som bl.a. er skadelig for luftvejene
- AP: Når menneskeskabte udledninger af luftforurende stoffer som NO_x, SO₂ og NH₃ reagerer med vand og falder som "syreregn" der bl.a. medvirker til at nedbryde rodsystemer og udvaske planternes næringsstoffer
- EP: For høje tilførsler af næringsstoffer fremmer uønsket plantevækst i sarte økosystemer, f.eks. algevækst med fiskedød til følge
- ADPe: Et højt forbrug af abiotiske ressourcer kan bidrage til udtømning af tilgængelige grundstoffer i form af f.eks. metaller eller mineraler
- ADPf: Et højt forbrug af abiotiske ressourcer kan bidrage til udtømning af tilgængelige energi i form af fossile brændsler

PEtot: Et højt forbrug af ressourcer i primærenergiform fra fossile og fornybare kilder kan bidrage til udtømning af naturlige ressourcer.

Datakrav og kvalitet

Der er fortrinsvist benyttet produkt- eller branchespecifikke EPD'er (primært fra EPD Dan- mark eller EPD Norge), som er udført i henhold til DS/EN 15804, på alle byggematerialer til LCA-beregninger i LCAbyg. Den generiske database i LCAbyg, Ökobaudat, er således kun benyttet i et meget begrænset omfang.

Størstedelen af de benyttede EPD'er er fra 2019 eller 2020 og stammer fra Danmark eller Norge og anses derfor kvalitetsmæssigt for at være af tilfredsstillende kvalitet.

4 Baseline: Betonelementstald

Som allerede nævnt er baseline til LCA resultater- og sammenligninger, en typisk dansk svinestald med betonvægge og træspærkonstruktion, som bliver bygget i dag hos danske landmænd (GRÅKJÆR 2021). Denne type svinestald vil fremover blive benævnt "Betonelementstald". I rapporten "DET KLIMAVENLIGE LANDBRUGSBYGGERI, Arbejdspakke: 1, LCA og LCC Baseline for 'Betonelementstald'" (Mahdi m.fl. 2021) er der lavet livscyklusvurdering af Betonelementstalds miljøpåvirkninger og disse resultater danner grundlaget for denne rapport, eftersom de bruges til at udvælge hvilke bygningsdele der bør fokuseres på, i et forsøg på at finde alternative designforslag, som kan nedbringe CO₂-aftrykket fra stalden. Rapporten er udført af DTU i samarbejde med Gråkjær og SEGES og benævnes i det følgende som 'baselinereport'.

Betonelementstalden er 1715 m² og er opbygget af ydervægge i betonelementer, skillevægge/tværgående stabiliserende vægge i letbetonelementer, samt en tagkonstruktion af træspær. Fundamentet er et klassisk randfundament af beton og lecablokke. Derudover har svinestalden et 1700 m² loft i træbetonplader, samt gavle af en let konstruktion i 25 mm metalplader.

Bygningskomponenter og mængder

Ydervægge

Ydervægge er opbygget af et sandwich element bestående af C25/30 beton på begge sider af et 100 mm tykt lag isolerende PIR-skum, se tabel 4.1.

Materiale	Tykkelse	Mængde (total)
<i>Udvendigt</i>		
Beton C25/30	60 mm	429 m ²
PIR skum isolering	100 mm	429 m ²
Beton C25/30	120 mm	429 m ²
<i>Indvendigt</i>		

Tabel 4.1: Betonelementstald, Ydervæg

Indervægge

Indervægge har en afstivende funktion, og har dermed en statisk funktion for Betonelementstald. Hvis ikke der er nok gennemgående stabiliserende, skillevægge, vil det være nødvendigt med indspændte søjler langs ydervæggene, for at optage vandrette kræfter. Indervægge er opbygget af letbetonelementer, se tabel 4.2.

Materiale	Mængde (total)	Antal
Letbetonelement, 100 mm.	433 m ²	9 stk.

Tabel 4.2: Betonelementstald, Indervæg

Tagkonstruktion

Tagkonstruktionen består af gitterspær i træ med en center-afstand på 1 meter. Se tabel 4.3 for dimensioner.

Materiale	Mængde	Antal
Træspær	0,41 m ³ pr. spær	68 stk.
Gitterbjælker	0,721 m ³ pr. spær	5 stk.
Tagplader, fibercement	1873 m ²	1 stk.

Tabel 4.3: Betonelementstald, Tagkonstruktion

Randfundament

Fundamentet består af et klassisk randfundament opbygget af en rande med in situ beton, 2 fundablokke samt én lecablok.

Se tabel 4.4 for dimensioner og nærmere beskrivelse af mængder.

Materiale	Mængde	Antal
Beton, in situ	0,15 m ³ pr. meter	184 lbm
2 x Fundablokke, 20x23 cm19	0,092 m ³ pr. meter	184 lbm
X 23 cm. lecablok	0,044 m ³ pr. meter	184 lbm

Tabel 4.4: Betonelementstald, Randfundament

Terrændæk

Terrændækket er todelt, og består af ét niveau ved gangarealer rundt langs ydervæggene, og ét lavere niveau hvor svinene opholder sig (kanalbund). Se tabel 4.5.

Materiale	Mængde (total)	Antal
Kanalbund (beton med armering)	970 m ²	1 stk.
Gangarealer (isolering, grovbeton, afretningslag)	550 m ²	1 stk.

Tabel 4.5: Betonelementstald, Terrændæk

Loft

Løftet i hele Betonelementstald består af 25 mm tykke træbetonplader samt 100 mm mineraluldisolering. Se tabel 4.6.

Materiale	Dimension	Mængde
Træbetonplader	25 mm	1715 m ²
Mineraluldisolering	100 mm	1715 m ²

Tabel 4.6: Betonelementstald, Loft

Gavle

Gavlene i Betonelementstald består af metalplader og er ikke isolerede. Se tabel 4.7.

Materiale	Tykkelse	Mængde
Metaltrapezplader	0,75 mm	120 m ²

Tabel 4.7: Betonelementstald, Gavl

LCA-resultater, hotspot fra Betonelementstald

Levetider

De valgte levetider for bygningsdelene, som er brugt i LCA-beregningerne, er baseret på de relevante bygningskomponenters EPD'er – se appendiks A for en fuld oversigt over brugte EPD'er. Hvis ikke der er brugt EPD til et bygningskomponent, eller den brugte EPD ikke angiver forventet levetid, er levetiderne i appendiks F i SBI 2013:30(Aagaard m.fl. 2013) blevet brugt, se appendiks B.

Et væsentligt udsnit af LCA-resultaterne fra baselinerapporten, kan ses i Figur 4.1 og 4.2.

Udvælgelse af bygningskomponenter

Eftersom formålet med denne rapport er, at finde alternative designløsninger til svinestalde i Danmark, bruges LCA-resultaterne fra "baseline-rapporten" til at udvælge hvilke bygningskomponenter der bør undersøges alternativer til.

Der præsenteres dermed ikke en løsning på alle Betonelementstalds mest miljøbelastende bygningskomponenter fundet i hotspot-analysen (f.eks. terrændækket (Figur 3.1); derimod er der blevet undersøgt alternativer til udvalgte bygningskomponenter ud fra en række betingelser:

1. Bygningskomponentet er repræsenteret i hotspot-analysen i baseline-rapporten (Mahdi m.fl. 2021)
2. Et alternativ skal opfylde sammen funktion som det, det erstatter (f.eks. samme isoleringsevne)
3. Der bliver undersøgt et alternativ til mindst ét af bygningskomponenterne fra top 3 i hotspot-analysen (Figur 3.2)
4. Et alternativt bygningskomponent skal som minimum opfylde ét af følgende to kriterier, men helst begge:
 - (a) Mindre CO₂-aftryk i forhold til det bygningskomponent det erstatter
 - (b) Egner sig til design for adskillelse (så hele eller dele af bygningskomponentet kan skilles ad og bruges direkte igen i en ny svinestald) (se Rapport om Urban Mining og Design for Adskillelse).

Udvælgelse af miljøpåvirkningskategorier

Udover CO₂-udledninger, som bidrager til klimaforandringer, måles der på en lang række andre miljøpåvirkningskategorier i en LCA.

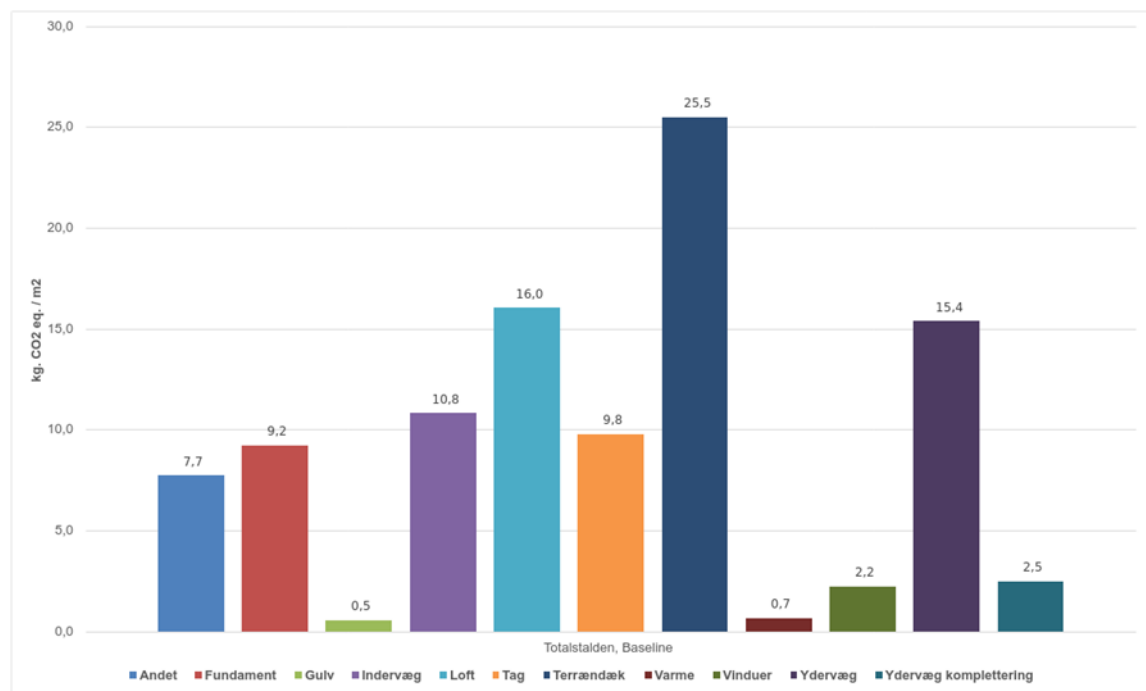
I LCAbyg 3.2, som er den software der er brugt i både baseline-rapporten (Mahdi m.fl. 2021) og denne rapport til at lave LCA-beregninger, bliver der beregnet miljøaftryk på 8 forskellige miljøpåvirkningskategorier, jf. tabel 3.2

Formålet med arbejdet, som præsenteres i denne rapport, er at finde designforslag som kan nedbringe CO₂-aftrykket og dermed mindske påvirkninger til klimaforandringer fra danske svinestalde. Derfor er miljøpåvirkningskategorien GWP, som måles i CO₂ ækvivalenter, den eneste miljøpåvirkningskategori der betragtes i denne rapport.

Dog er rapporten med alle miljøpåvirkningskategorier (tabel 3.2) som genereres i LCAbyg software inkluderet i appendiks (D.2.)

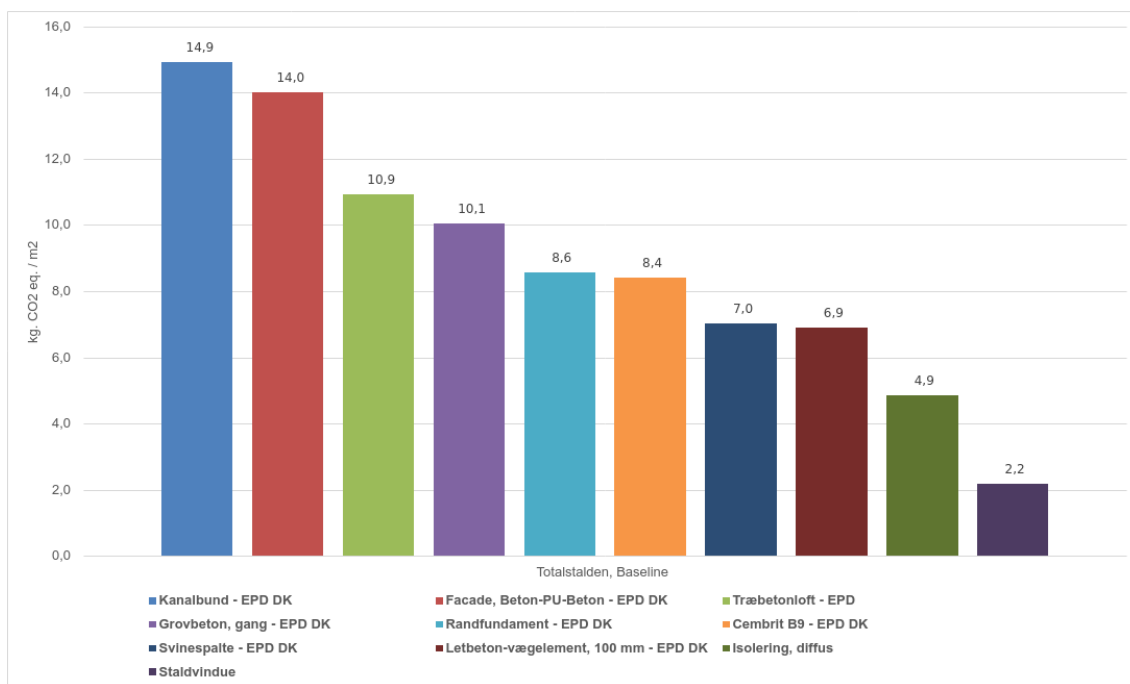
Udvælgelse af mest miljøbelastende bygningskomponenter og bygningsdele

For at kunne udvælge de mest miljøbelastende bygningsdele fra Betonelementstald, med det formål at finde mere bæredygtige alternativer, bruges såkaldte hotspot-resultater fra LCA-beregningerne for Betonelementstald (fra baselinerapporten). Kigger man på en hotspot-analyse over de mest miljøbelastende bygningsdele, ses det at terrændæk, loft og ydervæg er de bygningsdele, som står for det største CO₂-aftryk i Betonelementstalds levetid (blandt byggematerialer). Figur 4.1-



Figur 4.1: Hotspot for Betonelementstaldens bygningsdele

Et mere detaljeret indblik fås ved at se på konkrete bygningskomponenternes udledninger Figur 3.2. Her ses det, at udledningen fra henholdsvis kanalbunden (terrændæk) og ydervæggene står for den højeste CO₂-udledning. Træbetonloftet (loft) og grovbeton (terrændæk) er de 3. og 4. største udledere efterfulgt af hhv. randfundamentet og fibercementpladerne i taget.



Figur 4.2: Hotspot for Betonelementstalds Bygningskomponenter - GWP

En samlet prioriteret oversigt over de mest miljøbelastende (GWP) bygningskomponenter, samt hvilken bygningsdel de tilhører, kan ses i tabel 4.8.

#	Bygningskomponent	Bygningsdel
1	Kanalbund	Terrændæk
2	Facadeelementer (beton-PU-beton)	Ydervæg
3	Træbeton (loftplader)	Loft
4	Grovbeton (gangarealer)	Terrændæk
5	Randfundament (leca-fundablok-beton)	Fundament
6	Tagplader (fibercement)	Tag

Tabel 4.8: Samlet oversigt over de mest klimabelastende (GWP) bygningskomponenter fra Betonelementstalden, samt hvilken bygningsdel de tilhører.

De mest miljøbelastende bygningsdele

Figur 4.2 viser miljøpåvirkninger, ift. GWP, fordelt på bygningsdele frem for bygningskomponenter (Figur 4.2). Her ses det, at terrændækket er den bygningsdel, med størst CO2-aftryk. Bygningsdelen "andet" dækker over inventar i svinestalden, som der ikke undersøges alternativer til i denne rapport. Derudover er de 6 mest betydningsfulde bygningsdele listet i tabel 4.8.

Det ændrer lidt på rækkefølgen. Dette skyldes, at eksempelvis terrændækket består af flere forskellige bygningskomponenter, som i dette tilfælde summeres under samme bygningsdel.

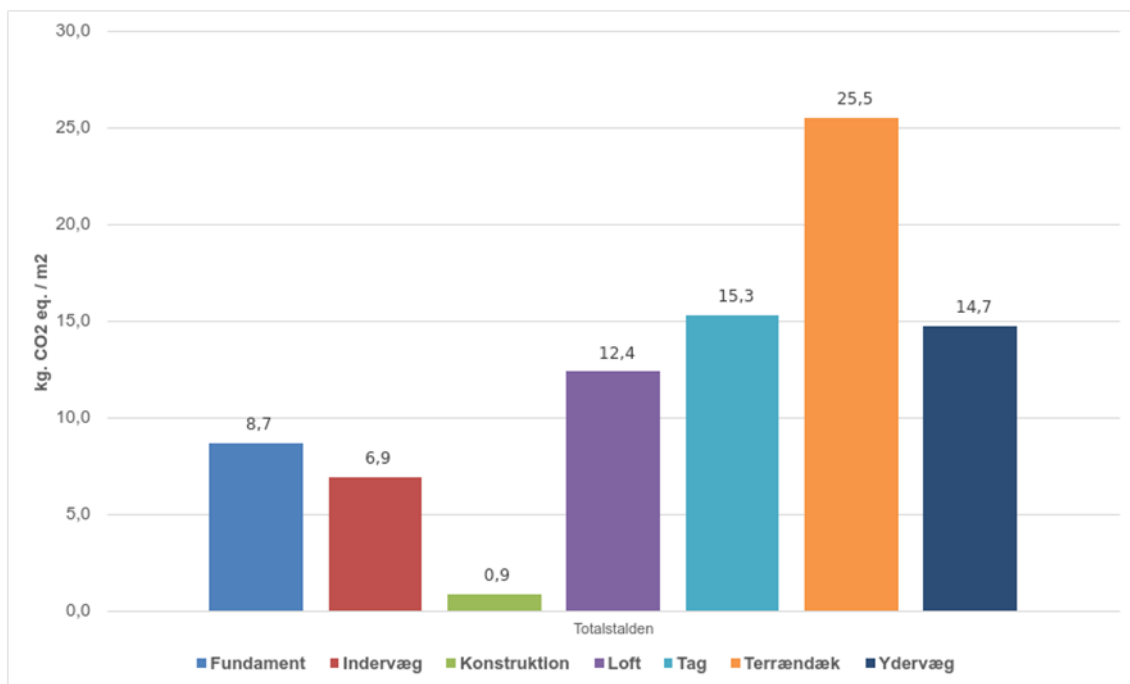
De 6 bygningsdele fra tabel 4.9, terrændæk, loft, ydervæg, indervæg, tag og fundament, er altså de mest betydningsfulde ift. GWP fra Betonelementstald. Det er udelukkende disse 6 bygningsdele som bruges i det videre arbejde i denne rapport, når der sammenlignes med alternative løsninger til Betonelementstald.

#	Bygningsdel
1	Terrændæk
2	Loft
3	Ydervæg
4	Indervæg
5	Tag
6	Fundament

Tabel 4.9: De mest klimabelastende (GWP) bygningsdele for Betonelementstald

LCA-resultater fra Betonelementstald på de udvalgte bygningsdele

LCA-resultaterne for Betonelementstald på de 6 udvalgte bygningsdele i Tabel 4.9 kan ses på Figur 4.3.



Figur 4.3: Betonelementstald: LCA-resultat (GWP) for 6 udvalgte bygningsdele

Resultaterne er de samme som fundet i baseline-rapporten (Mahdi m.fl. 2021) – forskellen ligger i udelukkelsen af visse bygningsdele (f.eks. vinduer og døre), som ikke er taget med, samt måden bygningsdelene er kategoriseret på. "loft", indbefatter træbetonplader + mineraluld isolering + dampspærre. Kategorien "konstruktion" dækker over konstruktionstræ, som er brugt til tagkonstruktionen i Betonelementstald.

Denne måde at kategorisere og præsentere LCA-resultater kan gøre det svært at gen-nemskue hvilke bygningskomponenter som er inkluderet i hver bygningsdel. Alligevel bruges denne kategorisering, da den giver en mere overskuelig sammenligning. Efterfølgende vil der blive kigget nærmere på resultater for de enkelte bygningskomponenter, for at skabe klarhed over præcist hvilke komponenter som er ansvarlige for udledningerne.

Øvrige miljøpåvirkningskategorier fra LCA

For at sikre, at der ikke bliver overset andre bygningskomponenter med en betydelig miljøpåvirkning i andre miljøpåvirkningskategorier, er resultaterne for de øvrige kategorier jf. tabel 3.2 som allerede nævnt også taget i betragtning, men analysen præsenteres ikke i denne rapport.

Konklusion på de mest miljøbelastende bygningskomponenter

Alternative materialer og staldtyper

Der er tre umiddelbare løsninger på at nedbringe CO₂-aftrykket fra de mest miljøbelastende bygningskomponenter fra Betonelementstald:

1. Erstatte bygningskomponenterne med et alternativ, som består af et mindre CO₂-belastende materiale
2. Finde måder at genanvende bygningskomponenterne i et nyt byggeri, på en måde hvor det erstatter produktionen af nye materialer (vuggetilvugge.dk 2021).
3. Erstatte Betonelementstald med en helt anden staldtype

Angående 1: Ved afsøgningen af alternativer er det valgt at Betonelementstalds umiddelbare geometri, statiske system/princip og bygningsdesign bevares. Fordelen ved det er, at hvis der findes alternative byggematerialer, som kan bruges som direkte erstatning til det eksisterende, så kan det være en relativt simpel og enkel måde at optimere Betonelementstalds design.

Der stilles, som allerede nævnt, også det krav til det nye bygningsdesign, at det opfylder de samme funktioner, som det nuværende design.

I denne rapport undersøger vi erstatningen af bygningskomponenterne med et alternativ som består af et mindre CO₂ belastende materialer. Først udforskede tilgange til at mindske betonelementstaldens CO₂-aftryk, hvor forskellige bygningsdesign og komponentløsninger præsenteres, vurderes og sammenlignes med Betonelementstalden på forskellige måder. Herefter undersøges mulighederne for at optimere det eksisterende design af Betonelementstalden uden at udskifte grundlæggende bygningsmaterialer (såsom beton).

Størstedelen af de seks bygningskomponenter, som fremgår af tabel 3.8 består af beton – bortset fra PU-skummet i ydervæggens facadeelementer. Derfor er den første konklusion, at det vil være nødvendigt at finde en alternativ løsning til det relativt høje CO₂-aftryk forbundet med beton bygningsdele. I det følgende kapitel undersøges bl.a. muligheden for at erstatte træ med beton.

Angående 2: Potentialer for genanvendelse bliver undersøgt i en anden dokument (se Rapport om 'urban mining' og design for adskillelse).

Angående 3: En anden måde at nedbringe CO₂-aftrykket fra svinestalde kan også være ved at vurdere en helt anden type svinestald med grundlæggende andre materialer, geometri, statisk system og design, men som stadig opfylder samme funktioner som Betonelementstald (antal m²,kapacitet etc.). Hvis en alternativ staldtype performer bedre (på GWP), er det måske en bedre løsning? I samråd med SEGES og Gråkjær A/S er en sådan staldtype også analyseret i det følgende (kapitel 5). Der er valgt en stald, hvor den primære konstruktion er stål.

5 Optimering af Betonelementstalden

I det følgende vil alternative bygningsdesigns til Betonelementstalden blive præsenteret og vurderet ud fra de parametre og kriterier, som er beskrevet i de forrige kapitler.

Der er helt grundlæggende, ift. materialeforbrug, nogle fordele forbundet med at bygge i en lignende geometri som ses i Betonelementstalden eftersom forholdet f.eks. mellem terrændæk og randfundament bliver fordelt på en fordelagtig måde. Det kræver dog at kræfterne fra taget kan føres ned i fundamentet på en fornuftig måde, hvilket er blevet gjort i Betonelementstalden ved brug af bærende ydervægge i beton samt tværgående,

bærende indervægge i letbeton til afstivning. Der er dog visse udfordringer forbundet med brugen af beton – især ift. GWP..
For at nedbringe Betonelementstaldens CO₂-aftryk undersøges:

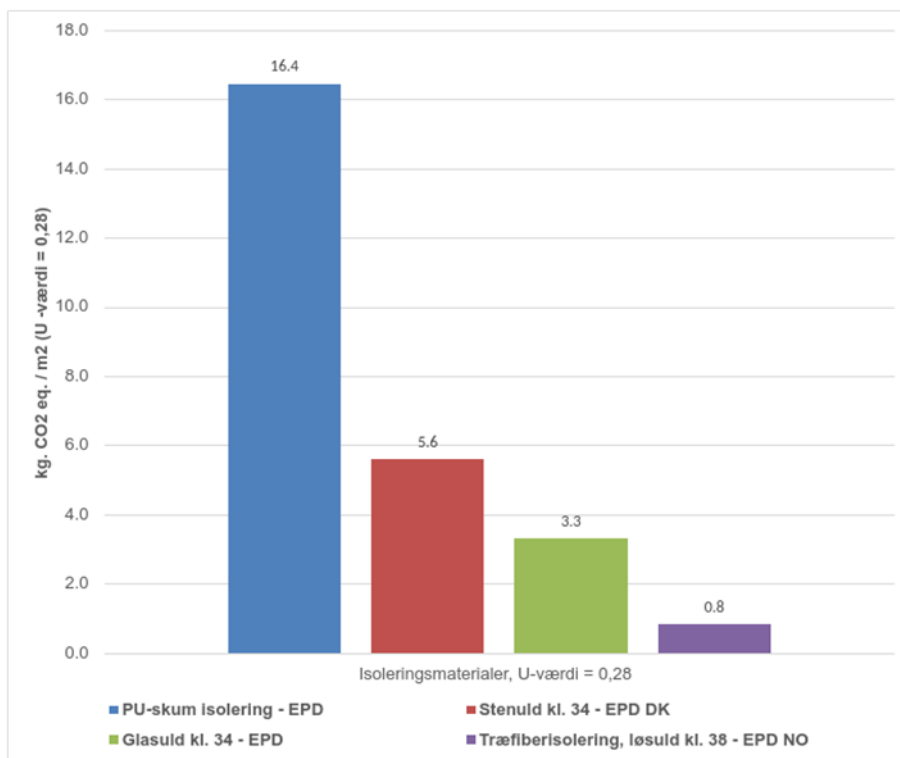
Et alternativt design af Betonelementstalds ydervægge, hvor isoleringen i erstattes med et andet materiale, præsenteres.

Kan der laves et alternativt bygningsdesign, hvor væsentlige bygningskomponenter erstattes med andre materialer, som opfylder samme funktioner som det nuværende design, men som har et lavere CO₂-aftryk? (CLT) Hvis de løsninger også har et potentiale for design for adskillelse betragtes det som en ekstra fordel.

Endelig præsenteres et grundlæggende nyt design af Betonelementstalds indervægge og ydervægge, samt fordele og ulemper ift. GWP (stålstalden).

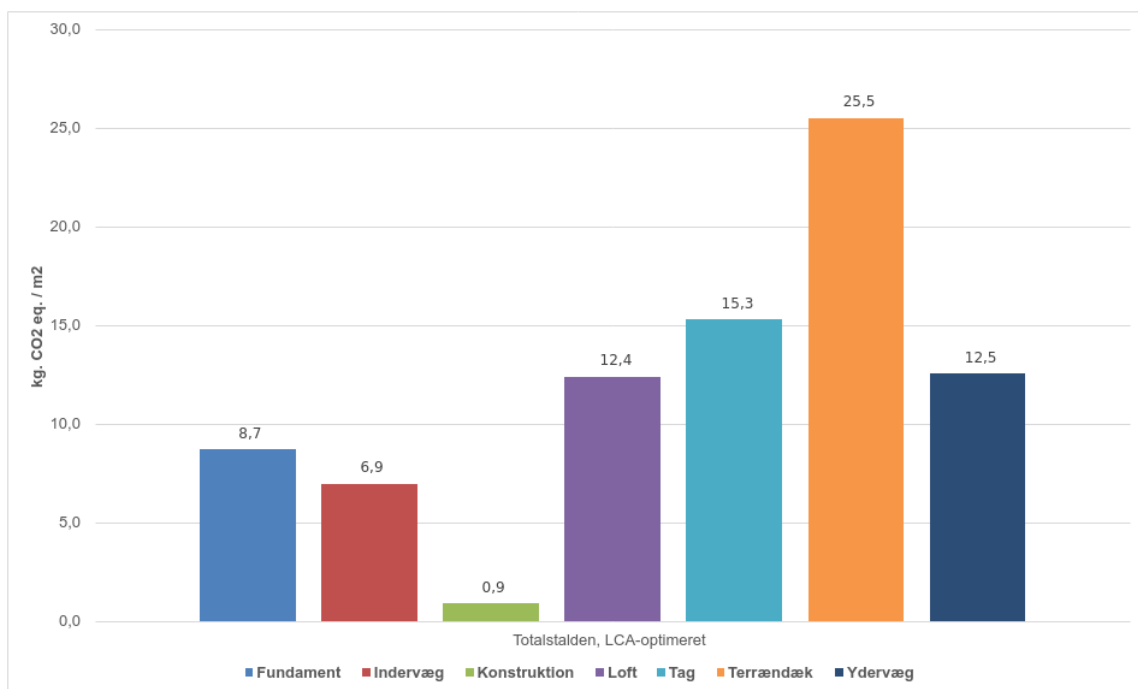
6 Alternativt isoleringsmateriale

Isoleringen i Betonelementstalds ydervægge er PU-skum isolering. PU-skum har en væsentligt højere CO₂-udledning end både mineraluldsisolering og træfiberisolering – se figur 6.1 som sammenligner CO₂-aftrykket mellem 1 m² af de tre isoleringsmaterialer – alle med en U-værdi på 0,28 (100 mm PU-skum isolering, 122 mm mineraluldsisolering og 136 mm træfiberisolering.



Figur 6.1: GWP for 1 m² af forskellige isoleringstyper med en U-værdi på 0,28

LCA-resultatet for ydervægge med træfiberisolering, i stedet for PU-skum, kan ses på figur 6.2.



Figur 6.2: Resultat for LCA-optimeret design af Betonelementstald med træfiberisolering.

I Tabel 6.1 er resultaterne for ydervæggene fremhævet fra de to figurer.

Bygningsdel	Bygningskomponent	[kg. CO ₂ -eq. / m2]	Mængde (total)
Ydervæg			
Betonelementstald, optimeret ⁴	Ydervæg	12,5	429 m ²
Betonelementstald, oprindelig ⁵	Ydervæg	14,7	429 m ²
CO ₂ -reduktion		2,2	

Tabel 6.1: CO₂-udledning fra Betonelementstalds ydervæg med træfiberisolering

Ydervæggens CO₂-aftryk i Betonelementstald kan reduceres med 15% ved at erstatte 100 mm PU-skum isolering med 136 mm træfiberisolering.

7 CLT-stalden – et alternativ i træ

I dette kapitel bliver et alternativt bygningsdesign af Betonelementstalden præsenteret, med brug af CLT (Cross-laminated Timber) elementer som erstatning for alt beton i ydervægge og indervægge. LCA-beregninger på GWP bliver præsenteret og sammenlignet med Betonelementstald og Stålkonstruktionsstaldens CO₂-aftryk. Dette designforslag, som er et alternativ til Betonelementstalden, vil i det følgende blive benævnt som "CLT-stalden".

Statisk system

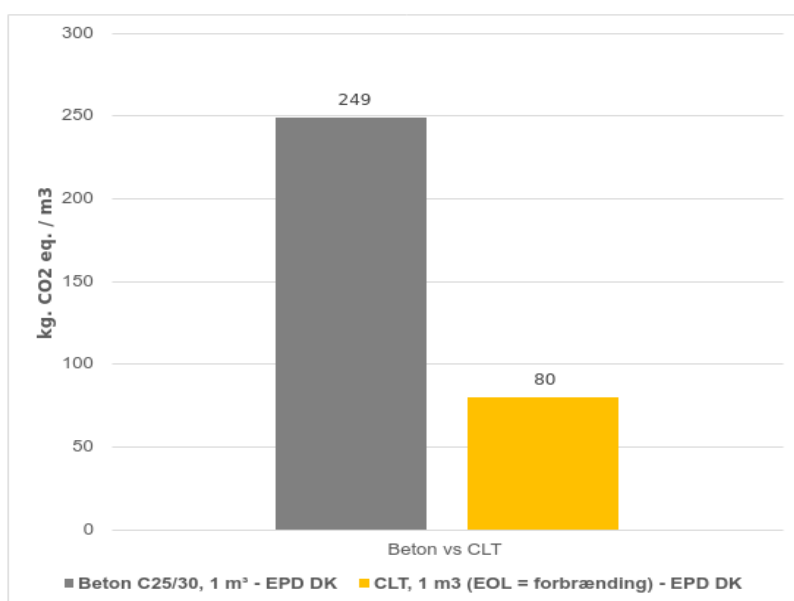
Det er målet at erstatte bygningskomponenter fra Betonelementstalden med alternative bygningskomponenter, som kan opfylde den samme funktion som betonelementerne gør. Det betyder, at eksempelvis skiveeffekten i ydervæggene, ønskes at blive bevaret. Der findes et godt alternativ til betonelementvægge kaldet CLT, som er krydslamineret massivtræ (cross laminated timber), med styrke og statiske egenskaber, som minder om beton, når det bruges i en skive som eksempelvis i et ydervægselement.

Det betyder, at betonen fra ydervæggene i Betonelementstald, kan erstattes direkte med CLT og at det statiske princip og funktion fra Betonelementstald vil blive bevaret. Det gør CLT til et interessant alternativ til beton, da det gør det relativt nemt at udskifte bygningskomponenter som primært består af betonelementer, med CLT elementer.

CO2-aftryk for CLT

I denne sammenhæng giver det selvfølgelig kun mening at erstatte betonen med CLT, hvis den samlede designløsning med CLT viser sig at have et lavere CO2-aftryk end den nuværende løsning.

En sammenligning mellem CLT og beton kan ses på Figur 7.1. Dette resultat kan naturligvis ikke bruges til at konkludere, at en samlet designløsning med CLT har et mindre CO2-aftryk ift. den nuværende løsning. Derimod er det en indikator for, at der er potentiale for at nedbringe Betonelementstalds CO2-aftryk ved at erstatte bygningskomponenter i beton med en CLT-baseret løsning.



Figur 7.1: GWP i kg. CO2-eq. for 1 m³ beton C25/30 og CLT

Beregningen er for hele produkternes livscyklus i en betragtningsperiode på 50 år og både data til beton og CLT er baseret på danske EPD'er fra EPD Danmark. CLT bliver afbrændt i EOL, hvilket er en konservativ betragtning eftersom det mest realistiske vil være en blanding af afbrænding og genbrug/genanvendelse.

Jf. Figur 7.1 har beton C25/30 et CO2-aftryk som er 311% højere end CLT målt pr. m³ i hele livscyklusfasen for produkterne.

Opbygning af CLT-stalden

De to mest oplagte bygningskomponenter i Betonelementstald som kan erstattes direkte med CLT er ydervægge og indervægge. Derudover er der også mulighed for at ændre gavlen, så den har samme klimaskærm som ydervæggen. I ydervægge og indervægge har CLT mulighed for at erstatte betonens funktion mere eller mindre direkte. Begge vægge kræver dog en anden opbygning ved brugen af CLT, som bliver beskrevet i det følgende.

Indervægge

Indervæggene i Betonelementstald består af 100 mm. letbetonelementer³ og har en afstivende funktion af Betonelementstald i form af deres skiveeffekt. Disse kan erstattes direkte med 100 mm CLT elementer. Pga. det relativt hårde miljø i en svinestald, beklædes indervæggen i CLT med 2 lag fibercementplade på 6 mm i 1,2 meters højde

på begge sider, hvilket er taget med i LCA.

Ydervægge

Ydervæggene består i Betonelementstald af 120 mm. beton, 100 mm. PU-skum isolering, 60 mm. beton (facade).

Der er flere måder at opbygge en ydervæg til Betonelementstald med CLT elementer. Her præsenteres ét forslag, som tager udgangspunkt i, at den bærende bagvæg i beton fra Betonelementstalden, erstattes med 120 mm. CLT. Dermed er det grundlæggende statiske princip for stalden bevaret og der er styr på kræfterne fra taget, som skal føres ned i fundamentet. Isoleringen kan både være PU-skum, mineraluld eller træfiberisolering. For en konsistent LCA-sammenligning mellem CLT-stalden og Betonelementstald, bruges der dermed PU-skum isolering, så de to staldbygninger sammenlignes med samme "handicap" ift. CO₂-aftrykket fra isoleringen⁷. Uden på PU-skum isoleringen bygges et træskelet af 45x45 mm konstrukstræ, hvorpå der monteres vindspærre (træfiberplader), afstandslisters og bræddebeklædning.

Façade beklædnings alternativer – f.eks. i ubehandlet træ

Med en ubehandlet træfacade det lette på CO₂-aftrykket ved at undgå brug af maling til facaden regelmæssigt. En ubehandlet træfacade kan holde i op til 75 år for Rødgran og op til 120 år for Skovfyr. Minimumlevetiden for Rødgran er angivet til 50 år, hvilket stadig er længere end den forventede levetid på staldbygningen på 40 år.

Et oplagt alternativ til en ubehandlet træfacade kunne være brugte mursten.

Bygningskomponenter og mængder

Ydervægge, indervægge og gavle er de bygningskomponenter, som er forskellige fra Betonelementstalden (se Tabel 7.4). Alle CLT-staldens øvrige bygningsdele er identiske med Betonelementstaldens, både i opbygning og mængder, og er beskrevet tidligere.

Ydervægge

Ydervægge er opbygget af en bagvæg i CLT med 2 lag fibercementplader på indersiden i 1,2 meters højde. Uden på CLT elementet isoleres med PU-skum isolering og der bygges en konstruktion i reglar, som holder vindspærre (træfiberplader) samt afstandslisters og bræddebeklædning.

Materiale	Tykkelse	Mængde (total)
<i>Udvendigt</i>		
Bræddebeklædning	25 mm	429 m ²
Afstandslisters, 22x45 mm, c-c = 300 mm	22 mm	0,0033 m ³ /m ²
Vindspærre, træfiberplade	12 mm	429 m ²
Reglar, 45x45 mm, c-c = 600 mm	45 mm	0.00338 m ³ /m ²
PU-skum isolering	100 mm	429 m ²
CLT	120 mm	429 m ²
Fibercementplader, 2 stk. forskudt i 1,2 m højde	2 x 6 mm	215 m ² ¹⁰
<i>Indvendigt</i>		

Tabel 7.1: CLT-stald, opbygning af ydervæg

Indervægge

Indervæggene i CLT har en afstivende funktion i form af deres skiveeffekt, ligesom let-betonvæggene i Betonelementstald. For at beskytte CLT elementerne mod det hårde miljø i svinestalden beklædes de med 2 lag fibercementplader i 1,2 meters højde på begge sider.

Materiale	Tykkelse	Mængde (total)
Fibercementplade, 2 stk. forskudt i 1,2 meters højde	2 x 6 mm	217 m ² ¹¹
CLT	100 mm	433 m ²
Fibercementplade, 2 stk. forskudt i 1,2 meters højde	2 x 6 mm	217 m ²

Tabel 7.2: CLT-stald, opbygning af indervæg

Gavle

Gavlene opbygges af en trækonstruktion uden på gavl-spærret, samt en bræddebeklædning i samme stil som ydervæggene. Mængden af konstruktionstræ bygger på et overslag,

Materiale	Tykkelse	Mængde (total)
Bræddebeklædning	25 mm	120 m ²
Vindspærre, træfiberplade	12 mm	120 m ²
Konstruktionstræ (inkl. afstandslist)er)	95 mm	0,0071 m ³ /m ²

Tabel 7.3: CLT-stald, opbygning af gavle

Levetider

De valgte levetider for bygningsdelene, som er brugt i LCA-beregningerne, er baseret på de brugte EPD'er fra forskellige bygningskomponenter – se appendiks A for en fuld oversigt over brugte EPD'er. Hvis ikke der er brugt EPD til et bygningskomponent, eller den brugte EPD ikke angiver en forventet levetid, er levetiderne i appendiks F i SBI 2013:30 (Aagaard m.fl. 2013) blevet brugt, se appendiks B.

Bygningskomponenter til LCA-sammenligning

Der demonstreres i det følgende en LCA-sammenligning mellem CLT-stalden og Betonelementstald (Baseline rapporten).

Tabel 7.4 viser de 6 udvalgte bygningsdele til LCA-sammenligningen og skaber et overblik over, hvilke komponenter som er identiske mellem Betonelementstald og CLT-stalden.

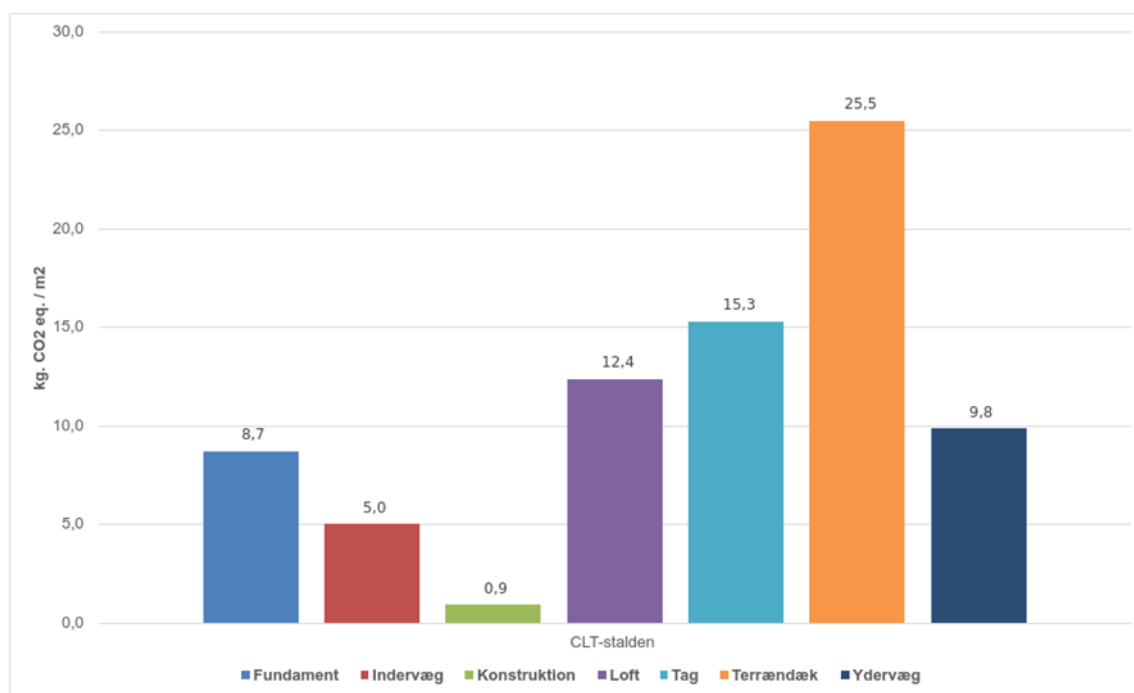
Bygningsdele	Identisk	Anderledes
Terrændæk	X	
Loft	X	
Ydervægge		X
Indervægge		X
Tag	X	
Fundament	X	

Tabel 7.4: Oversigt over udvalgte bygningsdele til LCA-sammenligningen, samt identiske bygningsdele, mellem CLT-stalden og Betonelementstald

Det ses på Tabel 7.4, at kun indervægge og ydervægge varierer mellem Betonelementstald og CLT-stalden. Resten af bygningsdelene er således identiske – både i opbygning og mængder.

LCA-resultater for CLT-stalden

LCA-resultaterne (GWP), udført i LCAbyg 3.2, for forskellige bygningstyper i CLT-stalden kan ses på Figur 7.2. Her ses det, at loftet i CLT-stalden har det største bidrag til GWP. Kategorien "konstruktion" dækker over konstruktionstræ som bruges til tagspær. Ydervægge har det højeste CO₂-aftryk efter loftet og tag og fundament (randfundament) deler en 3. plads.



Figur 7.2: CLT-stalden: LCA-resultat (GWP) for udvalgte bygningstyper

Sammenligning af LCA-resultater

På Figur 7.2 ses det, at både ydervægge og indervægge i CLT-stalden har et lavere CO₂-aftryk end for Betonelementstald.

Tabel 7.5 præsenterer en overskuelig sammenligning af udledningerne (GWP) fra de udvalgte bygningstyper for Betonelementstalden og CLT-stalden.

Bygningsdel	Bygningskomponent	[kg. CO ₂ eq. / m ²]	Mængde (FU) ¹⁴
Terrændæk			
CLT-stald	Terrændæk	25,5	970+550 m ²
Totalstald	Terrændæk	25,5	970+550 m ²
Loft			
CLT-stald	Loft, træbetonloft + mineraluld	12,4	1.715 m ²
Totalstald	Loft, træbetonloft + mineraluld	12,4	1.715 m ²
Ydervæg			
CLT-stald	Ydervæg + Gavl	9,8	429 m ² + 120 m ²
Totalstald	Ydervæg + Gavl	14,7	429 m ² + 120 m ²
Indervæg			
CLT-stald	Indervæg, CLT inkl. fibergips	5,0	434 m ²
Totalstald	Indervæg, letbeton	7,0	434 m ²
Tag			
CLT-stald	Konstruktion, tagspær / gitterspær	0,88	27,8 m ³ / 262 m ³
CLT-stald	Tag, fibercementbølgeplader	15,3	1.874 m ²
Totalstald	Konstruktion, tagspær / gitterspær	0,88	27,8 m ³ / 262 m ³
Totalstald	Tag, fibercementbølgeplader	15,3	1.874 m ²
Fundament			
CLT-stald	Randfundament	8,7	184 lbm.
Totalstald	Randfundament	8,7	184 lbm.
CO₂-udledning TOTAL			
CLT-stald	77 [kg. CO ₂ eq. / m ²]		
Totalstald	84 [kg. CO ₂ eq. / m ²]		

Tabel 7.5: CO₂-udledning fra forskellige bygningsdele for Betonelementstald og

CLT-stalden.

CO₂-belastningen fra ydervægge (inkl. gavle) er reduceret med 33%

CO₂-belastningen fra indervæggene er reduceret med 29%

Reduktionen for de enkelte bygningsdele, isoleret set, er således markant. Ydervæggene kan reducere CO₂-aftryk med 33 % ved at opbygge væggen som beskrevet i Tabel 7.1 fremfor som den er opbygget i Betonelementstald; ydervæggene kan reducere GWP med 29 % ved at benytte en løsning med CLT elementer og fibergips frem for letbetonelementer.

LCA-optimering af CLT-stalden

Isoleringen i CLT-staldens ydervægge er PU-skum isolering – ligesom der bruges i betonstalden. PU-skum har dog en væsentligt højere CO₂-udledning end både mineraluldsisolering og træfiberisolering, se Figur 6.1 som sammenligner CO₂-aftrykket mellem 1 m² af de fire isoleringsmaterialer – alle med en U-værdi på 0,28 (100 mm PU-skum isolering, 122 mm mineraluldsisolering og 136 mm træfiberisolering).

En løsning med mineraluld eller træfiberisolering, virker umiddelbart som den bedste løsning ift. bygbarhed, eftersom CLT-væggen ikke leveres som et sandwichelement ligesom betonelementet der bruges i ydervæggen i Betonelementstalden.

Der er dermed mulighed for at forbedre både Betonelementstald og CLT-staldens CO₂-aftryk ved at udskifte PU-skum isolering med enten mineraluldsisolering eller træfiberisolering.

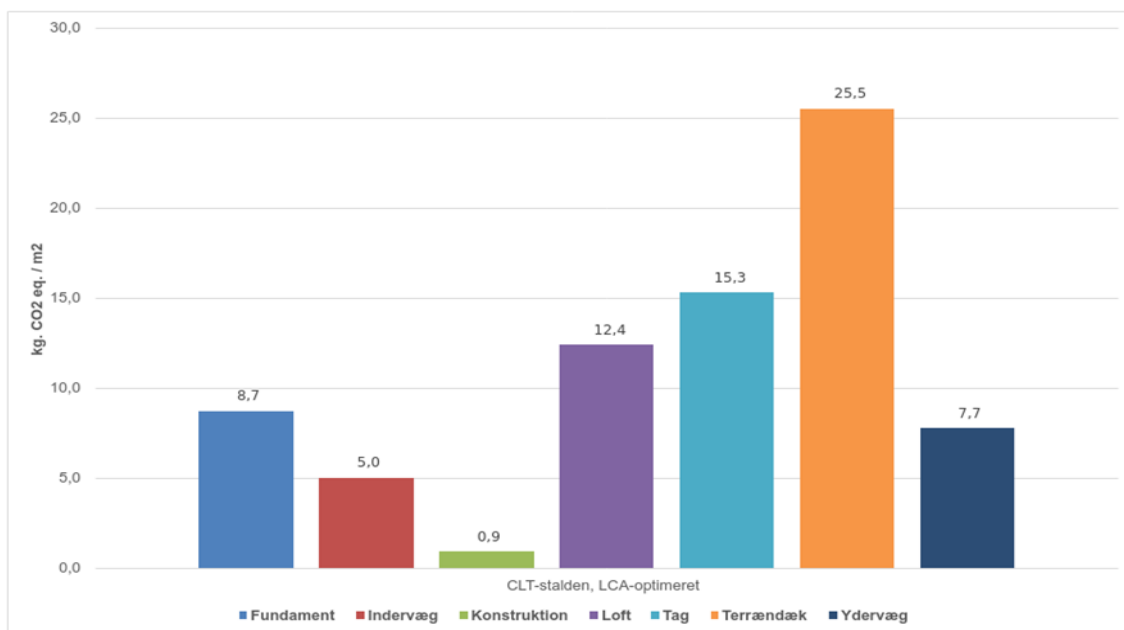
Alternativ ydervæg med et andet isoleringsmateriale

Benyttes 145 mm træfiberisolering i ydervæggene i CLT-stalden (nærmeste dimension for spærtræ, som giver samme U-værdi for væggen), i stedet for 100 mm PU-skum isolering, vil ydervæggens opbygning se lidt anderledes ud, se Tabel 7.6.

Materiale	Tykkelse	Mængde (total)
<i>Udvendigt</i>		
Bræddebeklædning	25 mm	429 m ²
Afstandslist, 22x45 mm, c-c = 300 mm	22 mm	0,0033 m ³ /m ²
Vindspærre, træfiberplade	12 mm	429 m ²
Reglar, 45x145 mm, c-c = 600 mm	145 mm	0.0109 m ³ /m ²
Træfiberisolering	145 mm	429 m ²
CLT	120 mm	429 m ²
Fibercementplader, 2 stk. forskudt i 1,5 m højde	2 x 6 mm	268 m ² 16
<i>Indvendigt</i>		

Tabel 7.6: CLT, Ydervæg med træfiberisolering

CO₂-aftrykket fra denne CLT-ydervæg med træfiberisolering kan ses på Figur 7.3. Det ses at GWP for ydervægge er faldet fra 9,8 [kg. CO₂ eq. / m²] til 7,7 [kg. CO₂ eq. / m²].



Figur 7.3: CLT-stalden: GWP for LCA-optimeret design med træfiberisolering

Tabel 7.7 giver et overskueligt overblik over udledningen fra den oprindelige ydervæg i CLT-stalden og den LCA-optimerede version med træfiberisolering.

Bygningsdel	Bygningskomponent	[kg. CO ₂ eq. / m ²]	Mængde (total)
Ydervæg			
CLT-stald, optimeret	Ydervæg	7,7	429 m ²
CLT-stald, oprindelig	Ydervæg	9,8	429 m ²
(Totalstald, oprindelig)	(Ydervæg)	(14,7)	(429 m ²)
CO ₂ -reduktion		2,1	

Tabel 7.7: CO₂-udledning fra CLT-staldens ydervæg med træfiberisolering

Den nye CLT-ydervæg med 145 mm træfiberisolering har en CO₂-udledning på 7,7 [kg. CO₂ eq. / m²] i modsætning til den oprindelige CLT-ydervæg på næsten 10 [kg. CO₂ eq. / m²]. Det svarer til en reduktion på 21%.

Ved at udskifte PU-skum isolering med træfiberisolering i ydervæggene, kan CLT-staldens CO₂-udledning fra ydervægge reduceres med 21 %.

I forhold til Betonelementstaldens ydervægge, er det en reduktion på 48%.

CLT-staldens samlede CO₂-udledning med træfiberisolering fremgår af Tabel 7.8.

CO ₂ -udledning TOTAL	
CLT-stald, optimeret	75 [kg. CO ₂ eq. / m ²]
CLT-stald, oprindelig	77 [kg. CO ₂ eq. / m ²]
(Totalstald, oprindelig)	(84 [kg.CO ₂ eq./m ²])

Tabel 7.8: CO₂-udledning fra CLT-stalden med træfiberisolering

CLT-stalden med træfiberisolering i ydervæggene har reduceret den samlede CO₂-udledning med 11% i forhold til Betonelementstalden.

CLT og design for adskillelse

En anden fordel ved CLT elementer er, at det typisk samles med skruer eller beslag, ligesom andre træbaserede elementer og materialer. Dette gør CLT elementer relativt

nemme at adskille igen, som betyder, at de egner sig til design for adskillelse. CLT forventes at have en lang levetid som konstruktionstræ og beton på 120 år (Aagaard m.fl. 2013). Det betyder, at CLT elementerne vil kunne genanvendes mere eller mindre direkte igen i en ny bygning – op til 3 gange i en staldbygning med en levetid på 40 år. (Dette kommer også til udtryk i D-modulet for den danske EPD på CLT, EPD-Danmark 2020a.) Se yderligere information i rapport om Urban Mining og Design for adskillelse.

Konklusion på LCA-resultater

Konklusionen på sammenligningen af LCA-resultaterne mellem de 6 udvalgte bygningsdele er, at CLT-stalden kan reducere CO₂-udledningen for ydervæggene med over 33% blot ved at udskifte betonen i ydervæggene med CLT elementer. Udledningen for indervægge kan ligeledes reduceres markant med 29 %, hvilket medfører at det samlede CO₂-aftryk for CLT-stalden er reduceret med mere end 8 %.

Udskiftes PU-skum isolering i ydervæggene med træfiberisolering, opnås en reduktion af CO₂-aftrykket for ydervæggene på over 23 % isoleret set for CLT-stalden. Sammenlignes med ydervæggene i betonelementstalden svarer det til en reduktion på næsten 50 % og en samlet CO₂-udledning for hele CLT-stalden som er reduceret med ca. 11 % i forhold til Betonelementstald.

Det var forventet, at CLT-stalden ville have et lavere CO₂-aftryk, eftersom en direkte sammenligning mellem beton C25/30 og CLT viste, at CLT har en væsentligt lavere CO₂-udledning i forhold til beton. Der er mulighed for at opnå en essentiel reduktion af CO₂-aftrykket fra ydervæggene i Betonelementstalden ved at bruge den foreslåede løsning til ydervægge.

En yderligere reduktion af CO₂-aftrykket fra ydervæggene på over 23 % kan opnås ved at bruge træfiberisolering i stedet for PU-skum isolering. Begge typer mineraluldsisolering (stenuld eller glasuld) har også en lavere CO₂-udledning end PU-skum, og vil dermed også medføre til en samlet reduktion, hvis det benyttes frem for PU-skum isolering.

Slutteligt kan det konkluderes, at der må findes et stort potentiale i at finde et alternativ til terrændækket i Betonelementstalden, som er det mest CO₂-belastende bygningskomponent ifølge resultaterne fra Figur 4.2., tabel 4.8. Der er ikke undersøgt alternativer til terrændækket, da der ikke kendes til gode og velprøvede løsninger, som kan opfylde kravene til det hårde miljø der er i en svinestald.

Konklusion på CLT-stalden

CLT-stalden som alternativ tager udgangspunkt i Betonelementstaldens geometri samt opbygning af bygningsdele. Der er blevet præsenteret et alternativt bygningsdesign til Betonelementstald med (essentielle) ændringer i ydervægge, indervægge og gavle. Det viser sig at CLT-stalden har en CO₂-udledning som er mere end 8 % lavere end Betonelementstalds. Dette skyldes udelukkende udskiftningen af betonen i ydervægge og indervægge med træbaserede løsninger (CLT).

Optimering af bygningskomponenter: isoleringsmateriale

De første sammenligninger mellem CLT-stalden og Betonelementstald blev baseret på, at CLT-stalden benytter det samme isoleringsmateriale som i Betonelementstald, PU-skum. Udskiftes dette isoleringsmateriale med et andet, mindre CO₂-belastende alternativ, kan udledningerne fra CLT-stalden reduceres yderligere.

CO₂-aftrykket fra CLT-staldens ydervægge kan ved at bruge mindre CO₂ belastende isoleringsmateriale reduceres med yderligere 21 %

– det betyder at CLT-stalden har reduceret CO₂-udledninger fra ydervæggene med knap 50 % i forhold til Betonelementstald.

En CLT-stald med træfiberisolering har således et samlet CO₂-aftryk der er mere end 11% lavere end Betonelementstalden.

CLT elementerne har et stort potentiale i at blive adskilt og genanvendt i et nyt byggeri. De er typisk samlet med skruesamlinger eller beslag og derudover har de en lang levetid

på op til 120 år.

Det kan konkluderes samlet set, at der er et stort potentiale i at bygge med CLT frem for beton, hvis ønsket er at bygge staldbygninger med et lavere CO₂-aftryk. Derudover er CLT et "nemt" alternativ til beton, eftersom det har nogle af de samme statiske egenskaber som beton i forhold til sin afstivende skiveeffekt i både bærende indervægge- og ydervægge.

Erstattes PU-skum isolering med træfiberisolering (eller mineraluldsisolering) er der endnu en oplagt mulighed for at nedbringe CO₂-aftrykket fra staldbygningen yderligere.

Design for adskillelse og direkte genanvendelse er endnu en parameter som med fordel kan udnyttes når der bygges med CLT, som også vil have en positiv effekt på staldbygningens samlede CO₂-aftryk i fremtiden.

8 Stålkonstruktionsstalden

I det følgende undersøges om en alternativ staldtype, som allerede findes på markedet er mere klimavenlig end Betonelementstalden. I samråd med SEGES er valgt en svinestald som er opbygget af stålrammer som det primære bærende system med selv bærende sandwichelementer (metal-PU-metal) som klimaskærm. Denne stald vil i det følgende blive benævnt "Stålkonstruktionsstalden" og er grundlæggende opbygget meget anderledes end Betonelementstald (som bruges som baseline dvs. sammenligningsgrundlag). Stålkonstruktionsstalden er som sagt et allerede eksisterende og færdigarbejdet alternativ til Betonelementstalden.

Stålkonstruktionsstaldens opbygning

Stålkonstruktionsstaldens geometri adskiller sig fra Betonelementstalds ved kun at udgøre 577 m² i grundplan, se appendiks C, i modsætning til Betonelementstalds 1715 m². Derudover er materialevalget fundamentalt anderledes, primært baseret på stål og selv bærende sandwichelementer. Fundament og terrændæk er i samme stil som i Betonelementstald.

Stålrammer

Stålet har et stort potentiale i forhold til design for adskillelse, eftersom der er mulighed for at genbruge stålrammerne i en ny staldbygning. Hvis ikke dette er muligt, er genanvendelse af brugt stål, i produktionen af nyt konstruktionsstål, allerede veletableret – typisk dansk konstruktionsstål består således af op til 78 % genbrugsstål (Give-Steel-A/S 2020). Genanvendelsens fordele ift. miljøpåvirkninger faktoren er allerede inkluderet i EPD'er for stål.

Klimaskærm

Stålkonstruktionsstaldens klimaskærm er opbygget af selv bærende sandwichelementer med en kerne af PU-skum isolering med metalplade på begge sider. Disse metal-PU-metal sandwichelementer udmærker sig bl.a. ved at være lette i vægt, hurtige at opsætte og høj isolerings- evne (pga. PU-skum isolering). Derudover egner de sig, ligesom stålet, til at blive adskilt igen (nedtaget i hele elementer) og har dermed potentiale for at kunne bruges igen i et nyt byggeri. Desværre har de en relativt kort forventet levetid på højest 45 år (European- Association-for-Panels-and-Profiles 2018). En dansk svinestalds forventede levetid er 40 år (Aagaard m.fl. 2013), så det vil umiddelbart ikke være muligt at bruge de samme sandwichelementer i flere staldbygninger, medmindre en bygning tages ud af drift før tid.

Tag

Taget på Stålkonstruktionsstalden består af tagplader i metal på træåse samt mineraluldsisolering.

Fundament og terrændæk

Fundamentet og terrændækket antages at være opbygget på samme måde som i Totalstalden.

Bygningskomponenter og mængder

Ydervægge og tagkonstruktion

Den bærende konstruktion er stålrammer, med indvendig placering. Facader udføres i sandwichelementer, brandhæmmende PIR skum med stålplade på begge sider. Tag opbygges som stålplade inderst og yderst, fastgjort på træåse som ligger oven på stålrammerne, med 150 mm mineraluld og dampspærre imellem. Se Tabel 8.1

Materiale	Mængde	Antal
Sandwichelementer, metal-PU-metal, 100 mm	277 m ²	4 stk.
Stålrammer	408,8 kg/stk.	11 stk.
Træåse, 45x145 mm, 44 m (længde)	0,287 m ³ /stk.	14 stk.
Loft/tag (metalplader + 150 mm mineraluld)	668 m ² /stk.	1 stk.

Tabel 8.1: Stålkonstruktionsstald, Ydervægge og tagkonstruktion.

Randfundament

Fundamentet består af et klassisk randfundament opbygget af en rande med in situ beton, 2 fundablokke samt én lecablok.

Se Tabel 8.2 for dimensioner og nærmere beskrivelse af mængder.

Materiale	Mængde	Antal
Beton, in situ	0,15 m ³ pr. meter	115 lbm
2 x Fundablokke, 20x23 cm19	0,092 m ³ pr. meter	115 lbm
X 23 cm. lecablok	0,044 m ³ pr. meter	115 lbm

Tabel 8.2: Stålkonstruktionsstald, Fundament

Terrændæk

Terrændækket er todelt, og består af ét niveau ved gangarealer rundt langs ydervæggene, og ét lavere niveau hvor svinene opholder sig (kanalbund). Se Tabel 8.3.

Materiale	Mængde (total)	Antal
Isolering, Beton, Afretningslag)	577 m ²	stk.

Tabel 8.3: Baseline, Terrændæk

Gavle

Gavlene i Stålkonstruktionsstalden består også af sandwichelementer med 100 mm PU skum isolering i kernen. Se Tabel 8.4.

Materiale	Tykkelse	Mængde
Sandwichelementer, metal-PU-metal	100 mm	23,5 m ²

Tabel 8.4: Stålkonstruktionsstald, Gavl

Stålkonstruktionsstaldens geometri

En vigtig forskel på Stålkonstruktionsstalden er dens grundlæggende anderledes geometri i forhold til Betonelementstald. I appendiks C ses et udvalg af tegningsmateriale over Stålkonstruktionsstalden samt mængder på stålrammerne (Figur C.1). Det kan ses af tegningsmaterialet, at én stålstald udgør 577 m² i modsætning til 1715 m² for Betonelementstalden. For at kunne sammenligne LCA- resultaterne mellem de to

staldtyper, er resultaterne normaliseret i forhold til m² for de forskellige staldtyper. Det betyder, at GWP udtrykkes i enheden [kg. CO₂ eq. / m²]. Dette er en typisk måde at udtrykke en bygnings udledninger på, for at der kan sammenlignes på tværs af forskellige bygninger med varierende grundplan og geometri.

Levetider

De valgte levetider for bygningsdelene, som er brugt i LCA-beregningerne, er baseret på de brugte EPD'er fra forskellige bygningskomponenter – se appendiks A for en fuld oversigt over brugte EPD'er. Hvis ikke der er brugt EPD til et bygningskomponent, eller den brugte EPD ikke angiver forventet levetid, er levetiderne i appendiks F i SBi 2013:30 (Aagaard m.fl. 2013) blevet brugt, se appendiks B.

Bygningskomponenter til LCA-sammenligning

For at lave en LCA-sammenligning mellem Stålkonstruktionsstalden og Betonelementstalden, er det nødvendigt at sammenligne resultaterne fra de samme bygningsdele. For at begrænse omfanget af LCA-beregningerne, laves der en sammenligning mellem de mest væsentlige bygningsdele, som bidrager til GWP1.

Tabel 8.5 viser de 6 udvalgte bygningsdele til LCA-sammenligningen og skaber et overblik over, hvilke bygningsdele som er identiske mellem Stålkonstruktionsstalden og Betonelementstalden.

Bygningskomponent	Identisk	Anderledes
Terrændæk	X	
Loft		X
Ydervægge		X
Indervægge		X
Tag		X
Fundament	X	

Tabel 8.5: Oversigt over udvalgte bygningsdele til LCA-sammenligningen, samt identiske bygningsdele, mellem Stålkonstruktionsstalden og Betonelementstalden.

Mængder på udvalgte bygningskomponenter

En samlet oversigt over bygningskomponenter og mængder for Betonelementstald og Stålstalden kan ses på Tabel 8.6. Det er disse mængder som er brugt til indtastning i LCAbyg 3.2 til beregning af de to staldes miljøaftryk.

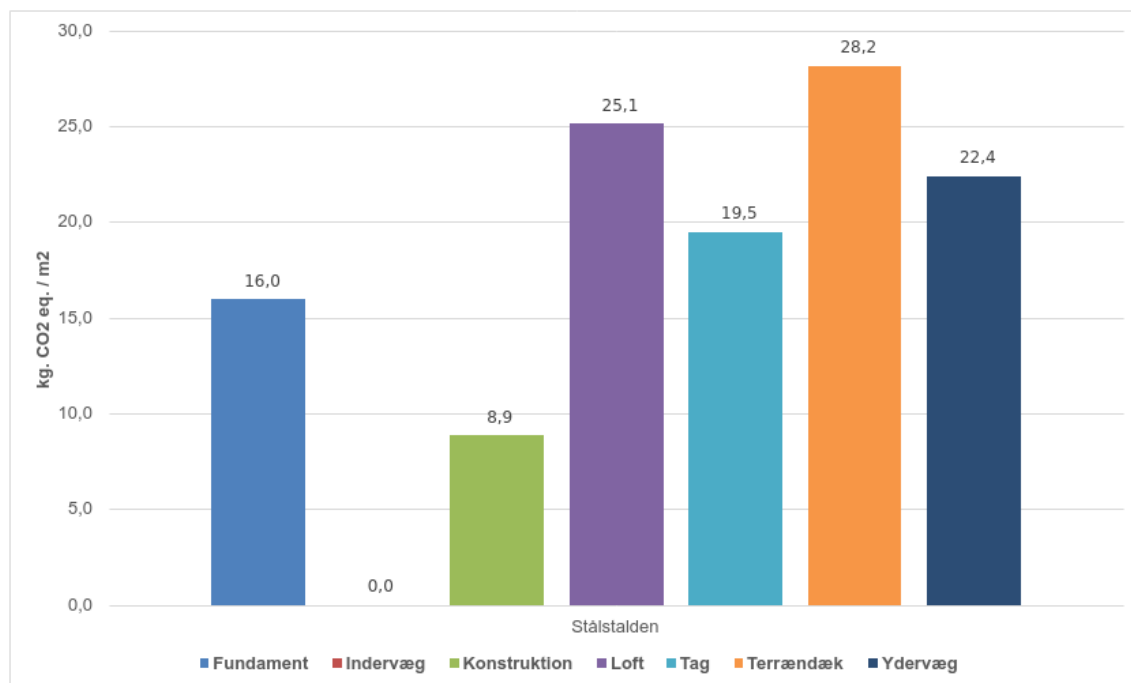
Bygningsdel	Bygningskomponent	Mængde (total)	Antal
Terrændæk			
Stålstald	Terrændæk, beton C25/30	577 m ²	1 stk.
Stålstald	Terrændæk, trykfast isolering	577 m ²	1 stk.
Betonstald	Terrændæk, beton C25/30	970+550 m ²	1 stk.
Betonstald	Terrændæk, trykfast isolering	475 m ²	1 stk.
Loft			
Stålstald	Loft, metalplader + mineraluld	668 m ²	1 stk.
Betonstald	Loft, træbetonloft + mineraluld	1.715 m ²	1 stk.
Ydervæg			
Stålstald	Ydervæg, metal-PU-metal	277 m ²	4 stk.
Stålstald	Gavl, metal-PU-metal	23,5 m ²	2 stk.
Betonstald	Ydervæg, beton-PU-beton	429 m ²	4 stk.
Betonstald	Gavl, metalplade	87,4 m ²	2 stk.

Indervæg			
Stålstald	Indervæg	0 m ²	0 stk.
Betonstald	Indervæg, letbeton	434 m ²	9 stk.
Tag			
Stålstald	Konstruktion, stålrammer	4.497 kg	11 stk.
Stålstald	Konstruktion, træåse	4,03 m ³	14 stk.
Stålstald	Tag, ståltrapezplade	668 m ²	1 stk.
Betonstald	Konstruktion, tagspær	27,8 m ³	68 stk.
Betonstald	Konstruktion, gitterspær Tag,	262 m ³	5 stk.
Betonstald	fibercementbølgeplader	1.874 m ²	1 stk.
Fundament			
Stålstald	Randfundament	115 lbm.	1 stk.
Betonstald	Randfundament	184 lbm.	1 stk.

Tabel 8.6: Mængder på udvalgte bygningskomponenter som bruges til sammenligning af LCA- resultater mellem Totalstald og Stålkonstruktionsstald

LCA-resultater fra Stålkonstruktionsstalden

LCA-resultaterne (GWP), lavet i LCAbyg 3.2, for de 6 udvalgte bygningstyper i Stålstalden kan ses på Figur 8.1. Det kan ses, at terrændæk, loft og ydervægge i Stålkonstruktionsstalden er de største bidragere til GWP for Stålkonstruktionsstalden. I modsætning til Betonelementstald er terrændækket ikke den ubetinget største udleder. Kategorien "konstruktion" dækker over konstruktions- stålet, som bruges til stålrammerne. Summeres denne med enten "tag" eller "ydervægge" ville det være den mest udledende bygningsdel for hele Stålkonstruktionsstalden.



Figur 8.1: Stålkonstruktionsstalden: LCA-resultat (GWP) for udvalgte bygningstyper,

Sammenligning af LCA-resultater

Sammenlignes resultaterne på Figur 8.1 kan det ses, at terrændæk og loft i Stålstalden

er de to bygningsdele med det største CO₂-aftryk blandt samtlige bygningsdele. En anden stor udleder fra Stålkonstruktionsstalden er ydervæggen, som udelukkende dækker over det selvbærende sandwichelement på 100 mm (metal-PU-metal) der bruges i Stålkonstruktionsstalden som klimaskærm. Konstruktionsstålet, der bruges som stålrammer til det bærende system for stalden, er repræsenteret i kategorien "konstruktion".

Tabel 8.7 sammenfatter resultaterne. På tabellen ses det, at Stålstaldens samlede CO₂-udledning for de udvalgte bygningskomponenter som beskrevet i Tabel 8.5, er på 120 [kg. CO₂ eq. / m²]. Betonelementstaldens samlede CO₂-udledning for de tilsvarende bygningskomponenter er lavere og ender ifølge beregningerne på 84 [kg. CO₂ eq. / m²]. Dette er en betydelig forskel og betyder, at Stålkonstruktionsstaldens CO₂-aftryk for de udvalgte bygningsdele er 43% højere end Betonelementstaldens.

Her er der flere ting som er værd at bemærke:

1. Konstruktionsstålet til Stålkonstruktionsstalden har en væsentligt højere CO₂-udledning end både betonen i ydervæggene og konstruktionstræet der bruges til tagspær i Betonelementstald. Derfor må stålet anses for at være en af de primære grunde til den større udledning
2. Stålkonstruktionsstaldens ydervægge (sandwichelementer) har en næsten dobbelt så høj CO₂-udledning ift. ydervæggene i beton-PU-beton fra Betonelementstald jf. Tabel 4.7
3. Betonelementstalds indervægge + ydervægge har sammenlagt næsten samme CO₂-udledning som Stålkonstruktionsstaldens ydervægge (Stålkonstruktionsstalden har ingen indervægge).

Bygningsdel	Bygningskomponent	[kg. CO ₂ eq./m ²]	Mængde (FU) ³
Terrændæk			
Stålstald	Terrændæk	28,2	577 m ²
Betonstald	Terrændæk	25,5	970+550 m ²
Loft			
Stålstald	Loft, metalplader + mineraluld	25,1	688 m ²
Betonstald	Loft, træbetonloft + mineraluld	12,4	1.715 m ²
Ydervæg			
Stålstald	Ydervæg + Gavl, metal-PU-metal	22,4	277 m ² + 23,5 m ²
Betonstald	Ydervæg + Gavl	14,7	429 m ² + 120 m ²
Indervæg			
Stålstald	Indervæg	0,0	0 m ²
Betonstald	Indervæg, letbeton	6,9	434 m ²
Tag			
Stålstald	Konstruktion, stålrammer + træåse Tag, ståltrapezplader	8,9	4.497 kg + 4,03 m ³ 668 m ²
Stålstald		19,5	
Betonstald	Konstruktion, tagspær/gitterspær Tag, fibercementbølgeplader	0,9	27,8 m ³ /262 m ³ 1.874 m ²
Betonstald		15,3	
Fundament			
Stålstald	Randfundament	16,0	115 lbm.
betonstald	Randfundament	8,7	184 lbm.
CO ₂ -udledning TOTAL			
Stålstald	120 [kg. CO ₂ eq. / m ²]		
Betonstald	84 [kg. CO ₂ eq. / m ²]		

Tabel 8.7: CO₂-udledning fra forskellige bygningsdele for Betonelementstald og

Stålkonstruktionsstalden.

Betonelementstald har den fordel, at den ikke har konstruktionsstål, ligesom Stålkonstruktionsstalden, eftersom det statiske system ligger i de bærende ydervægge- og indervægge

Loft og tag, som står for væsentlige CO₂-udledninger fra Stålkonstruktionsstalden, har en markant højere udledning, sammenlignet med Betonelementstalds loft og tag. Derfor giver det mening at undersøge om løsninger fra Betonelementstald er mulige at implementere i Stålkonstruktionsstalden, for dermed at sænke CO₂-aftrykket fra disse to bygningsdele. Dette vil blive undersøgt i det følgende.

LCA-optimering af Stålkonstruktionsstaldens bygningsdesign

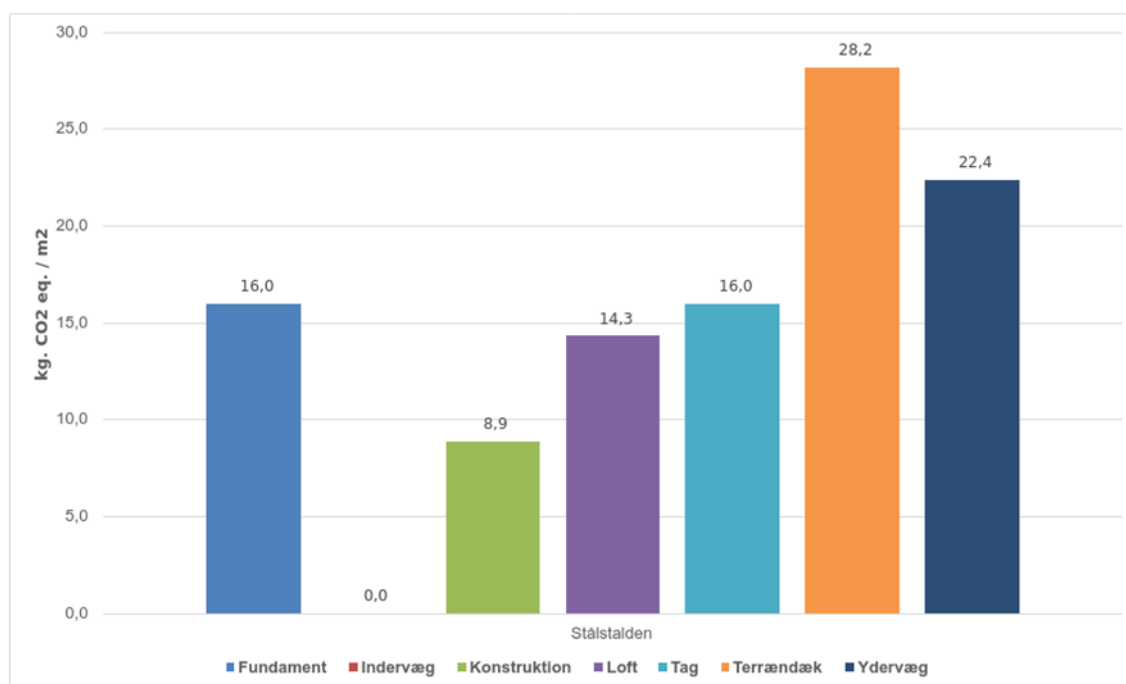
Nyt bygningsdesign for Stålkonstruktionsstalden

Det optimerede bygningsdesign af Stålkonstruktionsstalden, i forhold til CO₂-udledninger, er identisk med Stålkonstruktionsstaldens oprindelige design, bortset fra loftet og taget (tagpladerne). Som det fremgår af Tabel 8.7 har disse to bygningsdele et væsentligt højere CO₂-aftryk i forhold til Betonelementstald.

Eftersom bygningskomponenterne fra Betonelementstald umiddelbart kan bruges i Stålkonstruktionsstalden uden problemer, undersøges det hvor stor en effekt dette vil have på Stålkonstruktionsstaldens samlede CO₂-aftryk.

LCA-resultater for LCA-optimeret design af Stålkonstruktionsstalden

De nye LCA-resultater for det LCA-optimerede design af Stålkonstruktionsstalden, så den bruger sam me bygningskomponenter som Betonelementstald i loft og tag, kan ses på Figur 8.2.



Figur 8.2: GWP: LCA-optimeret design af Stålkonstruktionsstalden

Bygningsdel	Bygningskomponent	[kg. CO ₂ eq. / m ²]	Mængde (total)
Loft			
Stålkonstruktionsstald, optimeret ⁴	Loft	14,3	668 m ²

Stålkonstruktionsstald, oprindelig ⁵	Loft	25,1	688 m ²
Tag			
Stålkonstruktionsstald, optimeret ⁶	Tag	16,0	668 m ²
Stålkonstruktionsstald, oprindelig ⁷	Tag	19,5	688 m ²
CO ₂ -reduktion		14,3	[kg. CO ₂ eq. / m ²]

Tabel 8.8: CO₂-udledning fra LCA-optimerede bygningskomponenter i Stålkonstruktionsstalden.

Effekt på samlede LCA-resultater

Forskellen i udledningerne fra de oprindelige bygningsdele og det LCA-optimerede design for Stålkonstruktionsstalden kan ses på Tabel 8.8. Den samlede reduktion er mere end 14 kg. CO₂ eq. / m².

Trækkes denne forbedring fra Stålkonstruktionsstaldens oprindelige CO₂-aftryk på 120 kg. CO₂ eq. / m², bliver det samlede CO₂-aftryk for det LCA-optimerede design af Stålkonstruktionsstalden 105,7 [kg.CO₂eq./m²].

Dette er en samlet reduktion for Stålkonstruktionsstaldens CO₂-aftryk på 12%.

Det er en væsentlig reduktion, i forhold til, at der blot er udskiftet to bygningskomponenter med komponenter, som allerede bruges i Betonelementstald⁹.

Stålkonstruktionsstaldens samlede CO₂-udledning med de udskiftede bygningsmaterialer fremgår af Tabel 8.9.

CO ₂ -udledning TOTAL	
Stålstald, optimeret¹⁰	105,7 [kg. CO ₂ eq. / m ²]
Stålstald, oprindelig	120 [kg. CO ₂ eq. / m ²]
(Betonstald, oprindelig)	(84 [kg. CO ₂ eq. / m ²])

Tabel 8.9: CO₂-udledning fra Stålkonstruktionsstalden med LCA-optimeret design

På trods af en samlet reduktion på 12 % har Stålkonstruktionsstalden stadigvæk et CO₂-aftryk som er 25,8% højere end Betonelementstaldens.

Konklusion på LCA-optimeret design af Stålkonstruktionsstalden

Ved at udskifte to bygningskomponenter, loft og tag, med identiske bygningskomponenter som bruges i Betonelementstald, er det muligt at reducere Stålkonstruktionsstaldens samlede CO₂-aftryk med 12%. En sådan reduktion betyder, at Stålkonstruktionsstaldens CO₂-udledninger stadig er over 25 % højere end Betonelementstalds – i modsætning til det oprindelige design af Stålkonstruktionsstalden, hvor CO₂-udledningerne var næsten 43 % højere.

Derfor kan det konkluderes, at Betonelementstalds design for loft og tag er bedre miljømæssigt og man bør ikke vælge de løsninger som findes i Stålkonstruktionsstalden. Derudover kan det konkluderes, at selv med de mest åbenlyse forbedringer fra Betonelementstald implementeret i Stålkonstruktionsstalden, ligger udledningen stadig markant over Betonelementstaldens.

Konklusion på LCA-resultaterne

Stålkonstruktionsstalden har en højere miljøpåvirkning, ift. GWP, end Betonelementstalden, målt på de 6 bygningsdele som beskrevet i kapitel 4. Dette skyldes både Stålkonstruktionsstaldens anderledes geometri, som betyder at udledningerne målt pr. m² er højere for visse af de identiske bygningsdele, men det skyldes også at stål er et

materiale med højere GWP end f.eks. beton og træ. To andre vigtige bygningsdele ift. GWP er loft og tag. Disse to bygningsdele viste sig at have et markant højere CO₂-aftryk ift. Betonelementstald. Derfor blev bygningskomponenterne i disse to bygningsdele analyseret, og et alternativt design til Stålkonstruktionsstalden præsenteret; et design som benytter samme bygningskomponenter for loft og tag, som Betonelementstald. Dette havde en betydelig effekt for Stålkonstruktionsstaldens CO₂-aftryk, men ikke nok til at komme under Betonelementstald. Stålkonstruktionsstalden har, med det optimerede design for loft og tag, stadigvæk et CO₂-aftryk som er over 25 % højere end Betonelementstaldens.

Slutteligt må det konstateres, at selv om Stålkonstruktionsstaldens geometri og brug af stålrammer betyder, at afstivende indervægge ikke er nødvendige, så er det ikke nok til at få et samlet set lavere CO₂-aftryk i forhold til Betonelementstalden.

Jf. betingelse "Mindre CO₂-aftryk i forhold til det bygningskomponent det erstatter" må det konstateres, at Stålkonstruktionsstalden ikke lever op til det punkt.

Den anden delbetingelse, (b), for alternative bygningskomponenter til Betonelementstald lyder således: "Egner sig til design for adskillelse (så hele eller dele af bygningskomponenter kan skilles ad og bruges direkte igen i en ny svinestald eller anden type byggeri)". Det potentiale der er for Stålkonstruktionsstalden ift. en implementering af direkte genanvendelse af væsentlige bygningskomponenter, kan have en betydelig effekt på CO₂-aftrykket fra en bygning. Denne mulighed for Betonelementstaldundersøges yderligere i Rapport om 'urban mining' og design for adskillelse. Stålkonstruktionsstaldens stålrammer, som er det primære bærende system i stalden, har et potentiale i at blive genanvendt eller genbrugt i en ny staldbygning. Stål har nogle særlige fordele, når det kommer til adskillelse og potentiale for direkte anvendelse i et andet byggeri, fordi at det både har en lang levetid¹⁶ og ofte egner sig til at blive adskilt – især hvis samlinger er boltet sammen og ikke svejset.

D-modulet er den sidste fase i livscyklussen efter "bortskaffelsesfaserne" (C1-C4 processerne). Den omhandler potentialet for genbrug, genanvendelse- eller nyttiggørelse af produktet/systemet og ligger således udenfor systemet. Således er D-modulet for konstruktionsstål i Stålkonstruktionsstalden på 2,5 kg. CO₂ eq. / m² ydervæg. Dette skal ses i lyset af, at konstruktionsstålet allerede består af 78 % genanvendt stål jf. EPD'en for konstruktionsstål (GiveSteelA/S 2020).

Konklusion i forhold til Stålkonstruktionsstalden

Stålkonstruktionsstaldens grundlæggende materialevalg med sandwichelementer og stålrammer viser sig primært at være en ulempe, når der måles på GWP fra de væsentlige bygningskomponenter sammenlignet med Betonelementstald. Valget af GWP-tunge materialer som konstruktionsstål og sandwichelementer med PU-skum smitter tydeligt af på CO₂-aftrykket fra Stålkonstruktionsstalden med en udledning der er 43 % højere end Betonelementstaldens, målt pr. m² etageareal.

LCA-optimering: loft og tag

Det er også blevet undersøgt hvilke bygningsmaterialer i loft og tag, som var skyld i en væsentligt højere udledning sammenlignet med samme bygningsdele fra Betonelementstald. Effekten ved at udskifte materialer i disse bygningsdele er ikke ubetydeligt eftersom det viste sig, at Stålkonstruktionsstaldens samlede CO₂-aftryk kan reduceres med op til 12 %. Selvom det er en betydelig reduktion, er Stålkonstruktionsstaldens CO₂-udledninger stadigvæk over 25 % højere end Betonelementstaldens.

Opsummering

I forhold til CO₂-udledninger fra de 6 udvalgte bygningsdele i Stålkonstruktionsstalden, er der nogle store ulemper forbundet med valget af materialer og staldens grundlæggende bygningsdesign / geometri når der måles på GWP.

Hvis ønsket er en staldbygning med et lavere CO₂-aftryk end Betonelementstalds, kan

Stålstaldens design ikke anbefales – også selvom der optimeres på opbygningen af to bygningsdele, samt design for adskillelse og direkte genanvendelse af et væsentligt bygningskomponent tages med i betragtningen.

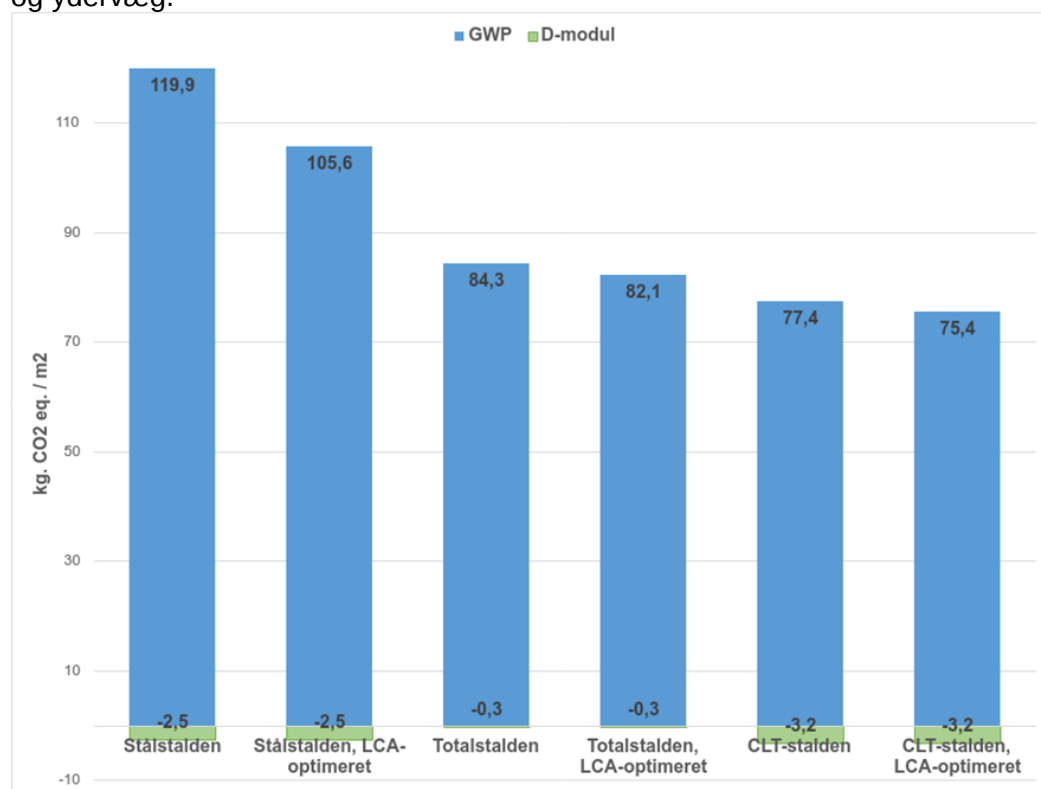
Valget af to byggematerialer som konstruktionsstål og sandwichelementer med PU-skum gør, at Stålkonstruktionsstalden har en væsentligt højere CO₂-udledning ift. Betonelementstald, som er baseret på beton-elementer og træspær.

9 Samlede resultater og anbefalinger

Der er blevet behandlet flere forskellige designløsninger, materiale-alternativer og optimeringer af både Betonelementstalden, Stålkonstruktionsstalden og CLT-stalden. Dette kapitels formål er, at samle og sammenligne de essentielle resultater fra rapporten, således at en samlet konklusion og anbefaling kan sammenfattes.

Samlede resultater

De samlede resultater kan ses på Figur 9.1 for både det oprindelige og et LCA-optimeret design af de tre staldtyper. Her ses det, at Stålkonstruktionsstalden har det højeste CO₂-aftryk, Betonelementstalden placerer sig i midten, og CLT-stalden har både med sit oprindelige og LCA-optimerede design, det laveste GWP blandt alle tre staldtyper. Ligeledes er CLT-staldens D-modul for CLT det højeste på -3,2 kg. CO₂ eq. / m² inder- og ydervæg.



Figur 9.1: GWP for Betonelementstald, Stålkonstruktionsstalden og CLT-stalden

Tabel 9.1 giver et samlet overblik over resultaterne fra Figur 9.1.

Betonelementstald	[kg. CO ₂ eq. / m ²]
Oprindelig	84,3
LCA-optimeret	82,1
D-modul	-0,3

Stålkonstruktionsstalden	
Oprindelig	119,9
LCA-optimeret	105,6
D-modul	-2,5
CLT-stalden	
Oprindelig	77,4
LCA-optimeret ³	75,4
D-modul	-3,2

Tabel 9.1: GWP for Betonelementstald, Stålkonstruktionsstalden og CLT-stalden

Betonelementstald

Betonelementstald har som baseline i denne rapport placeret sig i midten af resultaterne. Den scorer hverken bedst eller dårligst i nogle af scenarierne fra Tabel 9.1.

Men i forhold til design for adskillelse og direkte genanvendelse, er det nærliggende at drage den konklusion, at Betonelementstalds betonelementer fra både indervægge og ydervægge er de mest problematiske og skaber nogle udfordringer – sammenlignet med stålrammerne og CLT-elementerne. Dette kommer dog også til udtryk i Betonelementstalds meget lave D-modul, sammenlignet med de to andre stalde.

Betonelementstalds "optimerede" design, hvor PU-skum isolering erstattes med træfiberisoleringsring, reducerer alene det samlede CO₂-aftryk for stalden med 2,6 %.

Isoleringen i ydervæggene vejer samlet ca. 1,3 ton. De 6 bygningsdele i Betonelementstald, som er brugt til LCA-beregningerne⁵, vejer tilsammen mere end 713 ton. Det vil sige, at isoleringen udgør ca. 0,18% af den samlede bygningsmasse. Det er et vidne om, at relativt små ændringer og udskiftninger i et enkelt bygningskomponent, som ikke nødvendigvis fylder meget i hverken vægt eller procent af den samlede bygningsmasse, godt kan have en betydelig effekt på en konstruktions GWP.

Anbefalinger

Anbefalingerne til Betonelementstalden er:

- Det skal undersøges, om et alternativt isoleringsmateriale kan erstatte PU-skum. Det bedste alternativ ift. GWP er umiddelbart træfiberisolering, pga. lavt CO₂-aftryk kombineret med gode tekniske egenskaber ift. eksempelvis fugttransport, men også stenuld og især glasuld scorer væsentligt bedre end PU-skum isolering ift. GWP
- Potentialet i direkte genanvendelse af beton i ydervægge og indervægge kan være stort, og muligheder for dette i fremtiden bør undersøges og udforskes.
- Tagkonstruktionen af fibercementplader viste sig at score mærkbart bedre, end ståltrapezpladerne i Stålkonstruktionsstalden. Derudover har fibercementpladerne også en længere forventet levetid end ståltrapezplader. Derfor er den umiddelbare anbefaling, at fibercementplader altid bør vælges over ståltrapezplader
- Terrændækket er for alle tre staldtyper den bygningsdel med det største CO₂-aftryk. Dermed vil der være et potentiale i at nedbringe udledningerne fra terrændækket – på sigt vil dette være helt nødvendigt, hvis svinestalde i fremtiden skal bygges med en minimal klimabelastning. Denne rapport har ikke behandlet alternativer til terrændækket, som er identisk for alle tre staldtyper, men det er umiddelbart et af de steder med størst potentiale for at nedbringe klimabelastningen fra svine-stalde (og nybyggeri generelt).

Stålkonstruktionsstalden

Stålkonstruktionsstaldens stålrammer viste sig på flere parametre at egne sig godt til design for adskillelse og genanvendelse eller genbrug. Stålrammerne har en betydeligt længere levetid end selve stalden på op til 120 år. Dog er den anvendte EPD for

konstruktionsstål allerede bestående af 78 % genanvendt stål.

Stålkonstruktionsstaldens LCA-optimerede design, med samme loft- og tagkonstruktion som Totalstal- den viste sig at have en meget positiv effekt på Stålkonstruktionsstaldens GWP. Derfor anbefales det, hvis en Stålkonstruktionsstald igen skal opføres, at opsøge samme konstruktionsopbygninger for disse to bygningsdele som Betonelementstald.

Anbefalinger

Anbefalingerne til Stålkonstruktionsstalden er:

- Stålkonstruktionsstaldens grundlæggende bygningsdesign er svært at anbefale, hvis ønsket er at bygge fremtidens svinestalde med et mindre CO₂-aftryk, eftersom den scorer dårligere end både Betonelementstald og CLT-stalden – både i dens oprindelige og LCA- optimerede design
 - Hvis Stålkonstruktionsstalden skal optimeres ift. GWP, bør der eksperimenteres med at ændre den grundlæggende geometri, så den minder mere om Betonelementstald i grundplan – på den måde vil mængden af randfundament og ydervæg i forhold til grundplanet blive reduceret betydeligt. derudover bør alternative løsninger til især loft og tag, men også sandwichpaneler undersøges. Disse tre bygningsdele har alle tre et meget højt GWP sammenlignet med andre kendt, velfungerende løsninger
 - Stålkonstruktionsstaldens loft og tag, men også ydervægge med PU-skum har et meget højt GWP, sammenlignet med andre kendte og velfungerende løsninger. Derfor bør et alternativ, gerne træbaseret, undersøges i stedet
 - Stålkonstruktionsstaldens stålrammer bør, hvis muligt, altid blive adskilt og genanvendt, efter- som en af fordelene ved konstruktionsstålet er, at det både kan genanvendes direkte og indgå i produktionen af nyt konstruktionsstål
- Stålkonstruktionsstaldens kan på baggrund af resultaterne i denne rapport ikke anbefales, hvis ønsket er at bygge fremtidens svinestalde med et mindre klimaaftryk særligt inden for GWP.

CLT-stalden

CLT-stalden har det laveste CO₂-aftryk blandt de tre staldtyper jf. de opsummerede resultater fra Tabel 9.1.

CLT-stalden har, ligesom de to andre staldtyper, stadig en markant CO₂ udledning fra terrændækket sammenlignet med de øvrige bygningsdele. Det efterlader et stort potentiale for at nedbringe CO₂-aftrykket fra CLT-stalden, hvis der kan findes et alternativ til terrændækket, som har mindre miljøpåvirkninger.

Anbefalinger

Anbefalingerne til CLT-stalden er:

- CLT-stalden bør ikke benytte PU-skum isolering, men i stedet træfiberisolering eller alternativt mineraluldsisolering.
- Fibercementpladerne i 1,2 meter højde på indersiden af alle CLT-elementer har relativt høj andel af både indervægge og ydervægges CO₂-aftryk. Derfor bør det undersøges, om fibercementplader i 2 lag er nødvendige, eller om et alternativ, gerne en træbaseret plade, kan bruges i stedet
- Bygges regnskærmen rigtigt, kan en ubehandlet træfacade i Rødgran eller Skovfyr holde i hele staldens levetid. På den måde undgås både brug af (klimabelastende) maling, og udgifter i forbindelse med vedligehold af træfacaden. Konstruktiv beskyttelse i form af tagudhæng samt godt håndværk i forbindelse med opsætning af brædderne, sikrer ubehandlede brædders levetid i mange år
- CLT-staldens fundament, som er identisk til Betonelementstalds fundament, kan muligvis optimeres eftersom CLT-elementerne har en væsentligt lavere densitet end den beton, som er brugt i Betonelementstald. Dette bør undersøges nærmere
- Et mindre miljøbelastende alternativ til terrændækket har umiddelbart det største potentiale ift. at nedbringe klimaaftrykket yderligere fra CLT-stalden

Referencer

Aagaard, Niels-Jørgen m.fl. (2013). „Levetider af bygningsdele ved vurdering af bæredygtighed og totaløkonomi“. I: URL: www.sbi-dk.proxy.findit.dtu.dk/Pages/Levetider-af-bygningsdele-ved-vurdering-af-baeredygtighed-og-totaloekonomi.aspx#s=2013:30.

Mahdi, Vania m.fl. (2021). „DET KLIMAVENTLIGE LANDBRUGSBYGGERI, Arbejdspakke: 1, LCA og LCC Baseline for 'Betonelementstald'“

c2ccertified.org (2017). What Is Design for Disassembly? URL: www.c2ccertified.org/news/article/what-is-design-for-disassembly.

Hauschild, Michael Z., Ralph K. Rosenbaum og Stig Irving Olsen (2018). Life Cycle Assessment – Theory and Practice. Springer. ISBN: 978-3-319-56474-6.

GRÅKJÆR (2021). Betonelementstald. URL: www.graakjaer.dk/betonelementstald.

vuggetilvugge.dk (2021). Cirkulær Økonomi. URL: www.vuggetilvugge.dk/viden-om/cirkulaer-oekonomi/.

Give-Steel-A/S (2020). „EPD of 1 ton of structural steel; EPD No.: MD-20042-EN“. I: URL: www.epddanmark.dk.

European-Association-for-Panels-and-Profiles (2018). „EPD of Double skin steel faced sandwich panels with a core made of polyurethane; EPD No.: EPD-PPA-20180076-CBG1-EN“. I: URL: www.ibu-epd.com.

EPD-Danmark (2021). Hvad er en EPD? URL: www.epddanmark.dk/om-epder/hvad-er-en-epd/.

Astrup, Thomas F. (2014). Genanvendelse af byggematerialer: Hvordan kan vi gøre det bedre? URL: www.bygge-anlaegsavisen.dk/genanvendelse-af-byggematerialer.

Dansk-Beton-Fabriksbetonforeningen (2020a). „Fabriksbeton styrkeklasse C25/30; EPD No.: MD-20011-DA“. I: URL: www.epddanmark.dk.

EPD-Danmark (2020a). „Cross Laminated Timber; EPD No.: MD-20007-EN“. I: URL: www.epddanmark.dk.

Dansk-Beton-Fabriksbetonforeningen (2020b). „Letbeton vægelement; EPD No.: MD-20016-DA“. I: URL: www.epddanmark.dk.

Cembrit-Holding-A/S (2016a). „Cembrit Corrugated sheets; EPD No.: EPD-CEM-20160114-IAD1-EN“. I: URL: www.bau-umwelt.com.

EPD-Norge (2017). „Hunton Undertak; EPD No.: PGRF/346/623/PQ“. I: URL: www.epd-norge.no.

Cembrit-Holding-A/S (2016b). „Cembrit Construction Board; EPD No.: MD-16001-EN“. I: URL: www.epddanmark.dk.

Træ.dk-c/o (2020). „Sawn and dried construction wood products of pine and spruce; EPD No.: MD-20002-EN“. I: URL: www.epddanmark.dk.

IBU (2018). „Profiled sheets made of steel for roof, wall, deck and ceiling constructions; EPD No.: EPD-PPA-20180077-CBG1-EN“. I: URL: www.ibu-epd.com.

PU-Europe (2014). „Polyurethane (PU) board without facing; EPD No.:“ i: URL: www.pu-europe.eu.

IBU (2019). „ROCKWOOL stone wool thermal insulation; EPD No.: EPD-RWI-20190050-CBD1-EN“. I: URL: www.ibu-epd.com.

EPD-Norge (2019). „ISOVER Formstykker λ 34; EPD No.: NEPD-2611-1324-EN“. I: URL: www.epd-norge.no.

– (2020). „Hunton Trefiberisolasjon Innblåst; EPD No.: NEPD-2286-1041-NO“. I: URL: www.epd-norge.no.

EPD-Danmark (2020b). „FRØSLEV Heatwood solid wood panelling and cladding from Scots pine and Norway spruce; EPD No.: MD-20033-EN“. I: URL: www.epddanmark.dk.

EPD-Norge (2018). „Semullit/Träullit/Baux - White Natural; EPD No.: NEPD-1554-595-EN“. I: URL: www.epd-norge.no.

