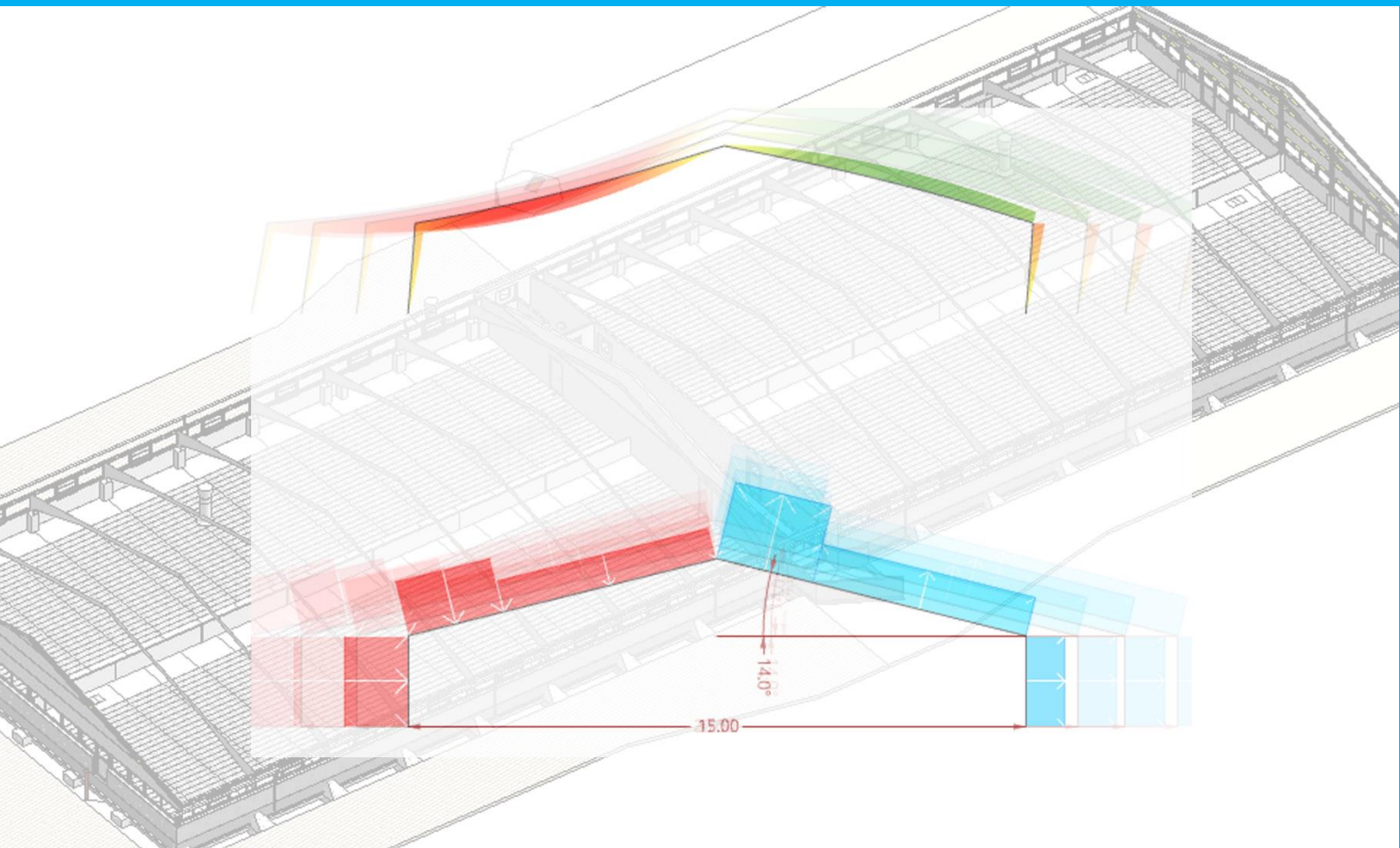


DET KLIMAVENLIGE LANDBRUGSBYGGERI

- Parametrisk optimering af staldbygninger med fokus på CO₂-udledning

Rapport 6



DET KLIMAVENTLIGE LANDBRUGSBYGGERI

- Parametrisk optimering af staldbygninger med fokus på CO₂-udledning

Rapport 6

Januar, 2022

Af



Philip Halding



Arne Egerup



Kristoffer Negendahl

Projekt udarbejdet af SEGES Innovation P/S

Projektleder Kenneth Poulsen, Byggechef, SEGES Innovation P/S

ISBN: 978-87-7475-690-3

Copyright: Reproduktion 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. Introduktion	1
1.1 Parametrisk optimering	1
1.2. Typer af stalde	3
1.3. Udregning af CO ₂ -udledning (GWP) via livscyklusanalyse	4
2. Modelleringsforudsætninger	4
3. Resultater	6
4. Konklusion	9
Bilag	10

1. Introduktion

Dansk landbrug ønsker at bidrage til en grøn omstilling i samfundet. Der er mange indgange til feltet, og én af dem er at undersøge mulighederne for at etablere bæredygtigt landbrugsbyggeri. I samarbejde med SEGES, som er tilknyttet interesseorganisationen Dansk Landbrug og Fødevarer og entreprenørfirmaet Graakjær, blev det besluttet at benytte en standard svinestald som casestudie. Danmarks Tekniske Universitet, Institut for byggeri og Anlæg udfører en serie af analyser, med en standardiseret slagtegrisestald, 'Totalstalden', som udgangspunkt. Gråkjær A/S, som producerer 'Totalstalden', har været en væsentlig samarbejdspartner i projektet.

Der er fire arbejdsopgaver i projektet. Denne rapport er tilknyttet arbejdsopgave 3, hvor det er hensigten at belyse, om der er et fremtidigt potentiale i at optimere staldbygningers bærende konstruktion. Optimeringen er med henblik på at minimere udledningen af CO₂ uden at påvirke udgifterne ved opførelse og drift.

Denne rapport viser en såkaldt parametrisk computermodel af staldtværsnit, som sammenligner et stort antal forskellige parametre for at kunne bestemme, hvilken kombination, som er optimal. Parametrene er: Bygningsbredde, taghældning og type af rammetværsnit.

Resultaterne fra den parametriske staldtværnsnitsanalyse viser, at der umiddelbart er en fordel ved at anvende rammer i limtræ frem for stålrammer, når vi kigger på udledning af CO₂. Den optimale kombination af spænd og taghældning er beskrevet for både stål- og limtræsrammer med angivne beregningsforudsætninger, og de optimale forhold lader til at være:

Spænd: 15 m, Taghældning: 8 til 10 grader.

Det skal dog understreges, at udviklinger inden for fremstilling af materialer og byggeteknologi hele tiden ændrer på forudsætninger for beregningen af CO₂-udledningen. Desuden er der gjort en række antagelser for at simplificere de parametriske beregninger, og de gør, at resultaterne ikke kan anvendes 1-til-1 i en faktisk staldbygning. I et konkret dimensioneringstilfælde bør bygningen detailberegnes for at opnå tilstrækkelig nøjagtighed.

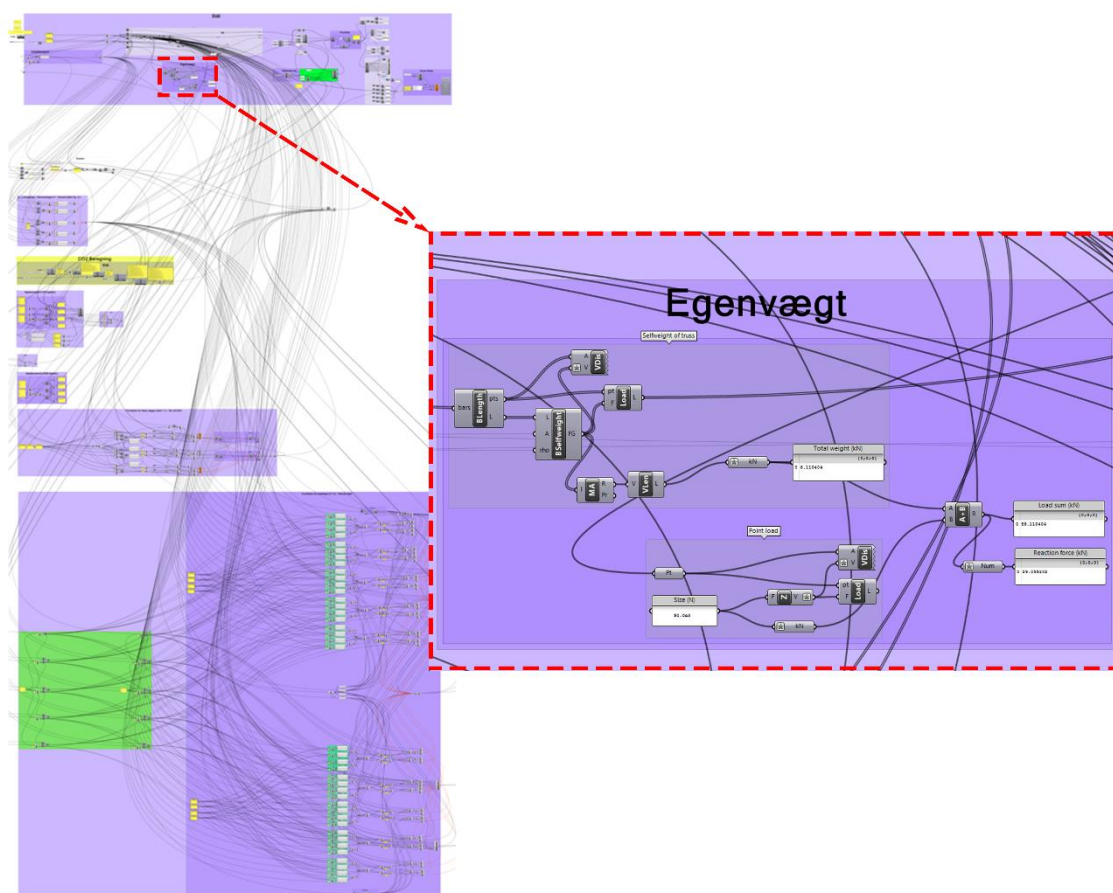
1.1 Parametrisk optimering

Parametrisk optimering er et relativt nyt værktøj for bygningsingeniører. Grundlæggende er der tale om, at der ved hjælp af computerkraft kan gennemregnes et stort antal forskellige kombinationer af bygningsparametre for at kunne opnå det mest optimale byggeri. Det optimale resultat afhænger af formålet med den parametriske model – i dette tilfælde den mindste udledning af CO₂ per areal af staldbygning.

Alle parametrene i en model (fx bygningshøjde, spænd af en konstruktionsdel osv.) opsættes på forhånd inden for nogle grænseværdier. Desuden skal det defineres, hvor store spring der skal være for hver parameterværdi. Et stort antal vil give et mere præcist resultat, men vil tage lang tid til at få beregnet, mens et mindre antal vil give et lidt grovere resultat, men med mindre behov for tid til beregning.

Der kan benyttes forskellige typer af software for at kode de scripts, som ligger til grund for beregningerne. I forbindelse med undersøgelsen er benyttet programmet Grasshopper, som oftest er anvendt af arkitekter. Der fungerer på den måde, at der kodes visuelt, ved at forskellige sektioner af kode forbindes på skærmen med "ledninger", se figur 1. En sektion kan fx være beregning af egenvægt, som det ses. I Grasshopper findes der forskellige "plug-ins", som er mindre tilknyttede underprogrammer, der kan gøre selve kodningen lettere.

I forbindelse med staldbygningerne er benyttet plug-in programmet K2Engineering og KIWI, som man begge kan anskue som en form for Finite-Element (FE) beregningsmetode (numerisk beregning). Altså et tilknyttet program, som kan beregne momenter, forskydningskraft og normalkraft af et bygningsdesign i Grasshopper, som er påvirket af en specificeret last. K2Engineering (udviklet ved DTU) blev først anvendt, men dets anvendelse var for begrænset til at give et retvisende billede af fordelingen af snitkræfterne i hver ramme. KIWI blev efterfølgende benyttet med succes, og de viste resultater i næste kapitel stammer fra beregning via dette plugin.



Figur 1: Eksempel på et visuelt script fra Grasshopper.

Selve beregningen af de mange kombinationer af parameterværdier tager oftest nogle timer, men det er selve arbejdet med at få udviklet og nedfældet scriptet, som er utroligt vanskeligt og tidskrævende. En grov beskrivelse af processen for udviklingen af et script til brug for optimering af CO₂-udledning for staldeværnsnit er givet i næste kapitel.

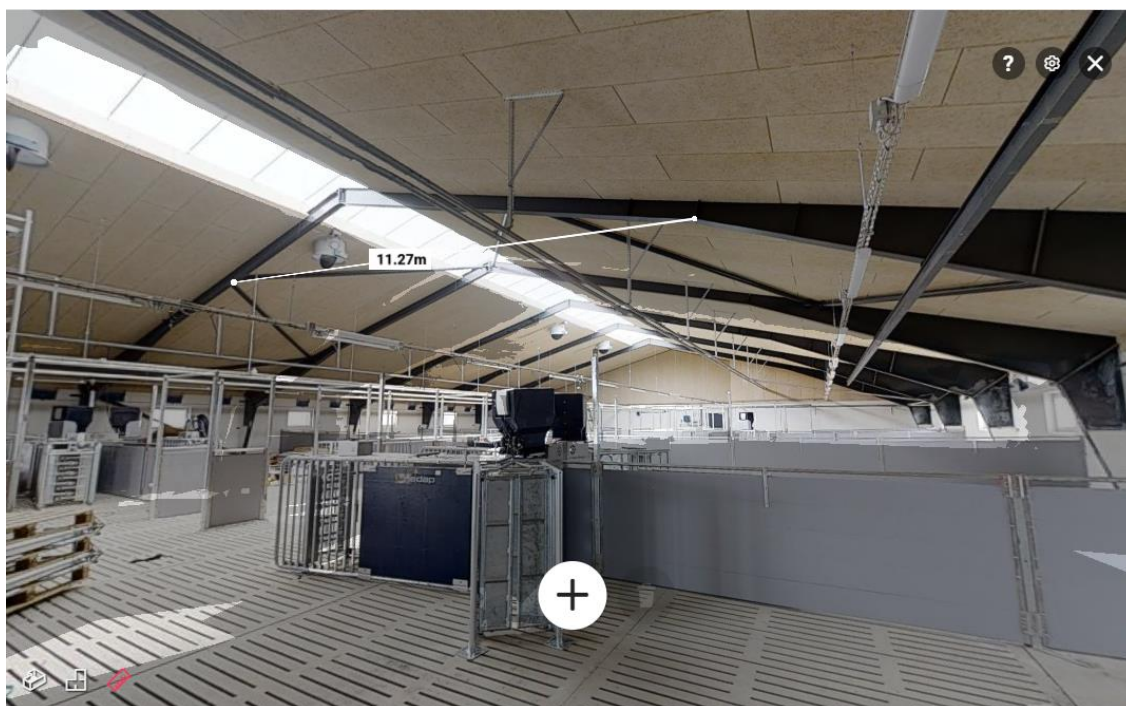
1.2. Typer af stalde

I de foregående rapporter vises nogle af de gængse staldd typer, som eksisterer i Danmark. Det har i denne rapport været mest hensigtsmæssigt at foretage den parametriske analyse for rammekonstruktioner i stål og limtræ. Der findes mange staldbygninger med stålrammer og projektdeltagerne har været på flere ekskursioner til den type af stalde, både under opførelse og i drift.

Det har været muligt at få tegninger på eksisterende stalde, og der har været anvendt 3D scanning til efterfølgende computergengivelse af opførte staldbygninger med bærende systemer som stålrammer.

Det er muligt i en begrænset periode at se et eksempel på en af de omtalte 3D scanninger via følgende link (se også figur 2):

<https://my.matterport.com/show/?m=x2TJHWaKMEP>



Figur 2: Opmåling ved hjælp af 3D scannet billede fra Hasbjergvej 39 i Vordingborg.

Der skal her nævnes, at den omstændelige udvikling af den parametriske model har gjort, at der kun har været tid til at arbejde med rammekonstruktioner med et konstant rammetværnsnit. Det vil sige, at stålrammernes størrelse fx ikke varierer fra kip til ramnehjørne, som det ses på figur 2. Der er således en yderligere mulighed for optimering af CO₂-udledningen ved at tage varierende ramnehøjder i regning i modellen.

1.3. Udregning af CO₂-udledning (GWP) via livscyklusanalyse

Metoden til at udregne CO₂-udledningen (også kaldet GWP: "Global Warming Potential") for et staldbyggeri er allerede gennemgået i de tidligere projektrapporter, og der henvises til udredningen der.

I modsætning til de andre rapporter anvendes ikke LCA byg software til beregningen. Der anvendes her et LCA-skøn, hvor de forskellige faser af staldens levetid medregnes i vurderingen af den samlede CO₂-udledning. Der er dog ikke tale om anvendelse af genbrugsscenarier (normens fase D¹), hvilket også er normalt at undlade i denne typer af byggerier.

Der er i optimeringen fokus på udledningen fra den primært bærende konstruktion, hvilket er rammerne. Det antages, at træåse, pladetage og isoleringsmateriale har den samme udledning af CO₂ per m₂ i alle tilfælde. Der ændres derfor ikke i afstanden imellem rammerne, da det vil influere på denne antagelse.

Beregning af udledning af antal kg CO₂ per m³ materiale foregår som følger:

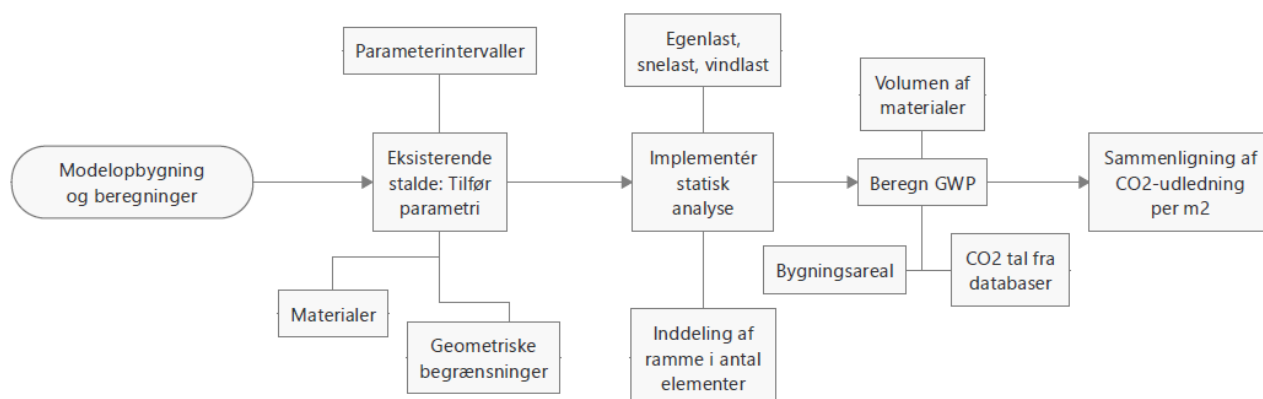
Limtræseksempel med LCA-data fra epd-Danmark:

$$\begin{aligned} A1 \text{ til } A3: & - 610 \text{ kg CO}_2 \text{ per m}^3 \\ C3 \text{ (afbrænding):} & +743 \text{ kg CO}_2 \text{ per m}^3 \\ \text{Sum:} & 133 \text{ kg CO}_2 \text{ per m}^3 \\ \text{Ved } 450 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & \text{ svarer det til ca. } 0,3 \text{ kg CO}_2 \text{ per kg limtræ} \end{aligned}$$

Dette er et eksempel fra en dansk produktion af limtræ fra de nordiske lande, og udledningen er her noget lavere end fx den tyske database Ökobaudat. For stål er værdierne mere konsistente på tværs af databaser, og der regnes med 0,99 kg CO₂ per kg stål med forudsætning om, at der anvendes genbrugsstål.

2. Modelleringsforudsætninger

Modelleringen af staldtværsnit i Grasshopper er baseret på metoden i figur 3.



Figur 3: Metode for opbygning af parametriseret model.

¹ EN 15978:2011

Der er fastlåst følgende geometriske forhold i modellen:

1. Rammerne kan rotere ved fundamentet, men er fastlåst mod bevægelse vandret og lodret.
2. Siderne af rammen er fastlåst i højden til 2,2 m
3. Rammeafstanden er 4,5 m.
4. Der regnes kun på fulde rammeafstande med tværlast uden vindkryds eller ved endevæg.
5. Der er for at simplificere beregninger gjort den antagelse, at rammen har det samme tværsnit overalt.
6. Modellen er inddelt i 24 elementer ved den numeriske statiske beregning.

Der er anvendt følgende parametriske betingelser i modellen:

1. Taghældning varierer fra 10 til 30 grader med et interval på 2 grader.
2. Den totale bredde (spændet) af rammen varierer fra 15 til 30 m med et interval på 2,5 m

Der er anvendt følgende materialeegenskaber i modellen:

1. Stål:
 - a. E-modul: 210 GPa
 - b. G-modul: 81 GPa
 - c. F_{yd} : 229 MPa
 - d. Der er derudover anvendt IPE-profil tværsnitsdata fra Teknisk Ståbi² for profiler fra 160 mm til 300 mm højde.
 - e. Densitet: 7850 kg/m³
2. Limtræ:
 - a. E-modul: 12,6 GPa
 - b. G-modul: 780 MPa
 - c. F_d : 28 MPa (bøjning af træ med k-last)
 - d. Der er desuden valgt tværsnitsdata fra Teknisk Ståbi, som ikke er kritiske for kipning): Fra 300 mm til 800 mm højde.
 - e. Densitet: 450 kg/m³

Lasterne i modellen er som følger:

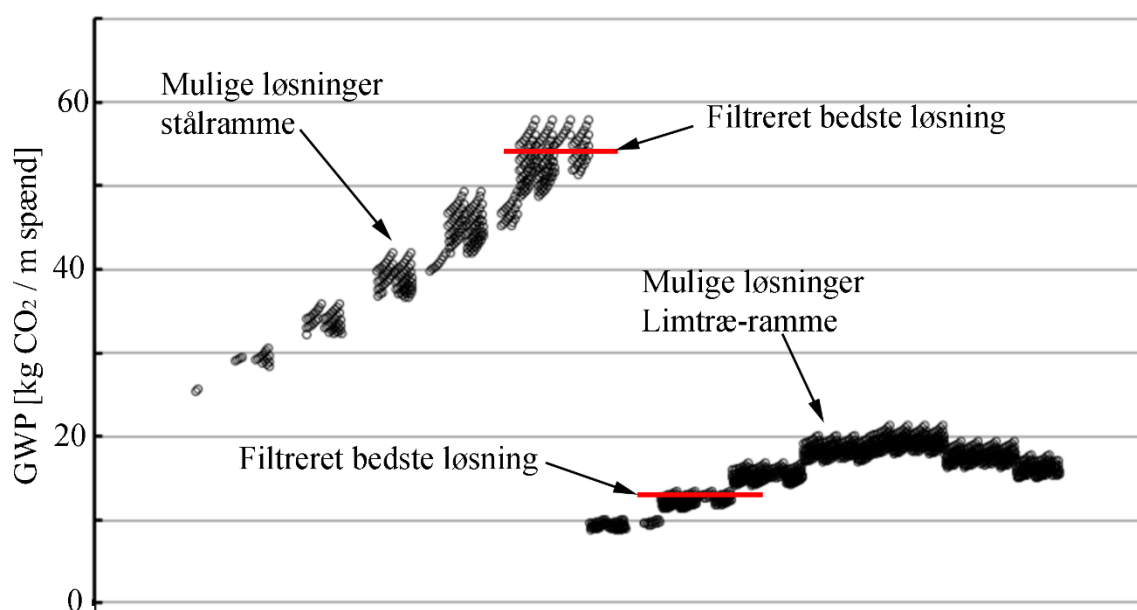
1. Egenlasten er baseret på materialevolumen og densiteten af materialerne for rammerne. Dette er tillagt vægten per kvadratmeter for beklædningen af bygningen, som er sat til 100 kg. Der er anvendt KFI på 1.0 og ingen faktor på egenlasten.
2. For at opnå et overskueligt antal lasttilfælde, er kombinationen af vind- og sne laster reduceret til fire kritiske tilfælde:
 - a. Dominerende vindlast med maksimalt tryk på den ene tagflade og maksimalt sug på den anden.
 - b. Dominerende vindlast med maksimalt sug på begge tagflader.
 - c. Dominerende snelast over hele taget med reduceret vind som a), men uden sug.
 - d. Dominerende snelast over den ene tagflade med reduceret vind som a)
3. Der er anvendt designlaster med lastkombinationsfaktorer i henhold til gældende standard.

² <http://staabi.dk/teknisk.aspx>

3. Resultater

Undersøgelsen i Grasshopper er foretaget på en sådan måde, at alle 3360 "iterationer" er gennemført uden hensyntagen til begrænsninger som maksimale udbøjninger og tilladte spændinger i tværsnittet. Efterfølgende har det således været nødvendigt at filtrere resultaterne for at kunne fremvise de optimale variationer af parametre uden at medtage urealistiske tilfælde. De filtrerede løsninger er sammenfattet i figur 4, hvor der dog fortsat ikke er taget hensyn til, at hver kombination af parametre skal kunne bære i alle fire opstillede lasttilfælde

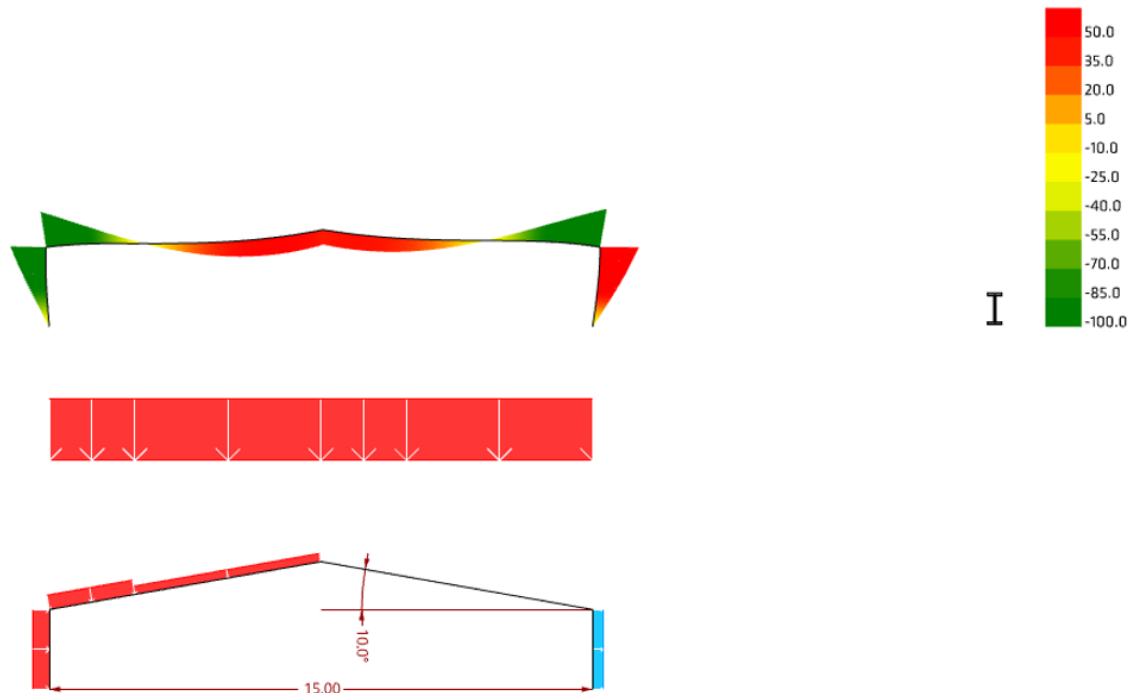
For videre at kunne filtrere resultaterne, således at en given kombination af spænd, taghældning og rammetværsnit kan bære alle de fire lastkombinationer, er der foretaget en gennemgang af output i Excel.



Figur 4: Udledning af CO₂ per m spænd. Alle løsninger filtreret for tilladelige tværsnitsspændinger. Hvert punkt svarer til et lasttilfælde for en given kombination af parametre. Tilladte løsninger som modstår alle lastkombinationer ligger over de røde streger.

Den dimensionsgivende lastkombination er dominerende sne med reduceret vind (se eksempel i figur 5). Ved denne lastkombination er bøjningsmomentet størst ved rammernes indspændte hjørner.

Idet at stålrammerne i den parametriske model ikke er udført med varierende profilstørrelse er der en stor materiale- og CO₂-besparelse at hente for stålløsningen ved bl.a. at minimere profilstørrelsen hen over midten af spændet, som det ses på eksisterende staldbygninger. Det vurderes, at der samlet set kan spares mindst 50% af den udledte CO₂ i forhold til det viste niveau i figur 4.



Figur 5: Eksempel på geometri, last og tilhørende momentfordeling for staldramme.

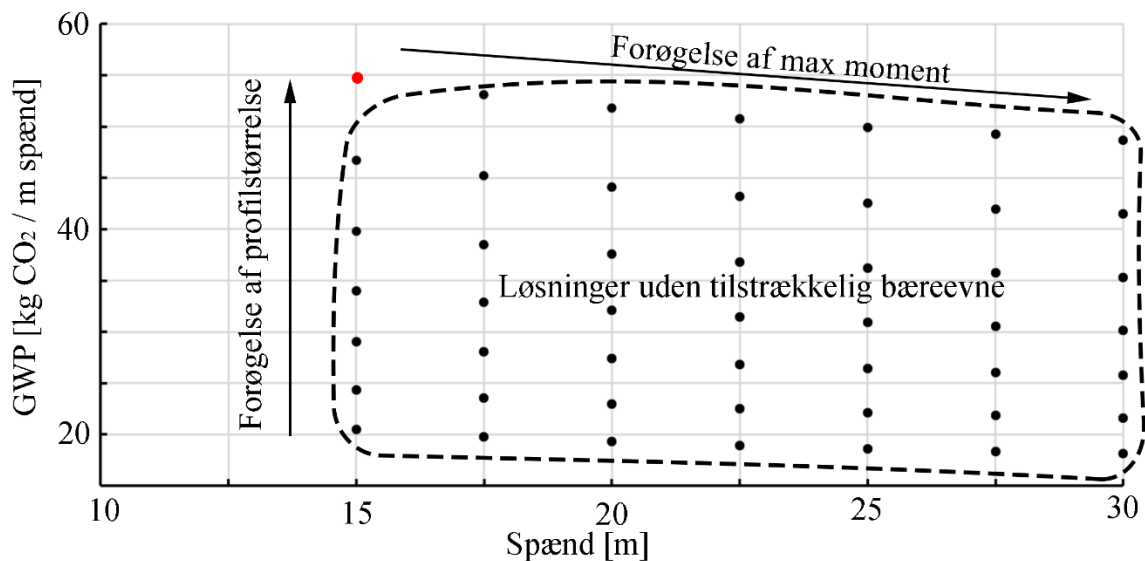
Uanset om der medregnes stålrammer med optimeret profilhøjde eller ej, så er niveauet for udledning af CO₂ fra limtræsrammerne mindre end for stålrammerne i alle tilfælde:

- Kombinationer med mindste udledning af CO₂:
 - Stålramme IPE 300 uden profilhøjdevariation: Spænd på **15 m**, taghældning på **8 grader: 55 kg CO₂** per m spænd for hver ramme.
 - Limtræsramme 400x185 mm: Spænd på **15 m**, taghældning på **8 til 10 grader: 13 kg CO₂** per m spænd for hver ramme.

I figur 6 ses GWP i forhold til spænd for alle stålløsningerne ved 8 graders taghældning (også løsninger, som overskrider de maksimalt tilladte tværsnitsspændinger). Det kan ses, at der kun er en ganske lille besparelse i udledningen af CO₂ ved en forøgelse af spændet. Samtidigt vil det betyde en markant forøgelse af momentet i rammen, og derfor vil det være nødvendigt at øge profilstørrelsen. Hver forøgelse af profilstørrelse har derimod en relativt større betydning for CO₂-udledningen.

Det indikerer, at et mindre spænd er at foretrække for at opnå den mindste udledning af CO₂.

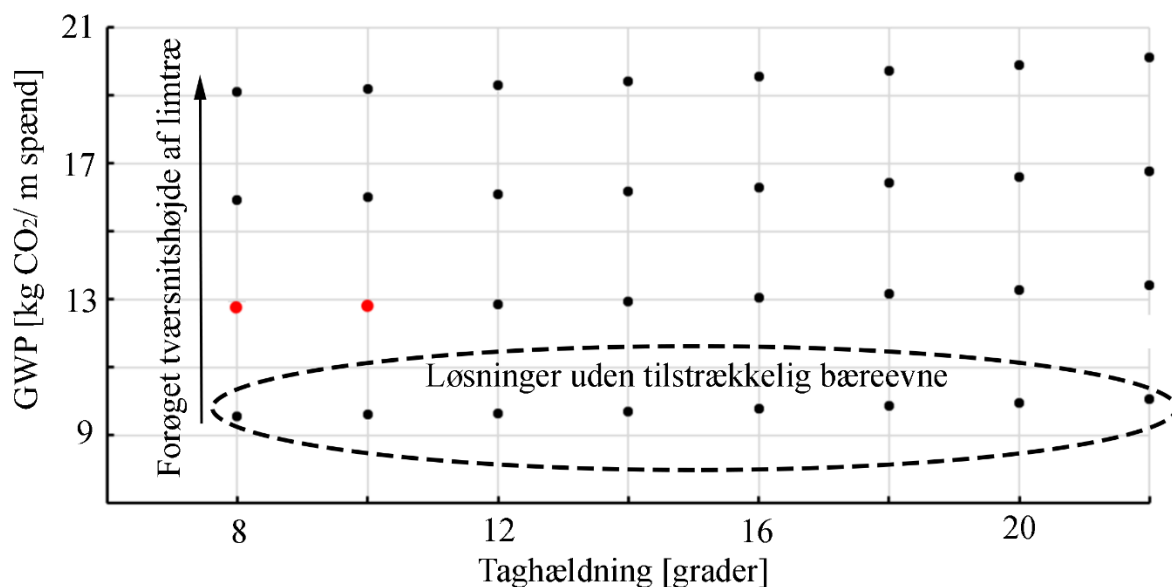
Den optimale stålløsning er vist med rød markering. Med de valgte profiler var det den eneste kombination, som kunne modstå alle fire lasttilfælde.



Figur 6: Spænd vs GWP per m for én ramme i stål med 8 grader taghældning.

Ud fra ovenstående formodes det, at en yderligere gennemkøring af den parametriske model med større stålprofiler ikke vil lede til et mere optimalt resultat. Der er som sagt i figuren anvendt samme profilstørrelse i hele rammen.

I figur 7 ses variationer af limtræsrammer med 15 m spænd. Igen er alle løsninger medtaget for at illustrere sammenhængen. Da der ikke er en tendens i ændring af momentet ved en ændring af taghældningen (varierer meget for hvert lasttilfælde), ser det ud til, at en mindre taghældning i gennemsnit vil være en fordel. Den optimale løsning er da også 8 til 10 grader her, som det ses markeret med rødt i figuren.



Figur 7: GWP per m ramme for limtræsrammer med forskellige taghældning for 15 m spænd. Medtaget er tværsnitsdimensioner: 300x185 mm, 400x185 mm, 500x185 mm og 600x185 mm.

4. Konklusion

Den parametriske optimering via Grasshopper og plug-in'et KIWI er et stærkt værktøj til at undersøge et stort antal forskellige parametre i en stald-rammekonstruktion. Det er dog omstændeligt at udarbejde det script, som ligger bag beregningen.

Der er foretaget en analyse af rammer til staldbygninger i limtræ og stål. Parametrene er bygningsspænd, taghældning og tværsnitstype. Det har været nødvendigt at gøre en række antagelser for at simplificere udregningen. Bl.a. vurderes kun de fire skønnet mest kritiske lastkombinationer og der arbejdes ikke med varierende stålprofilhøjder i en ramme (som der typisk ses i eksisterende stald-rammer af stål). Det sidstnævnte vil uvægerligt have en betydning for udledningen af CO₂ fra stålramme-stalde, og det vurderes, at der kan skæres mindst 50% af udledningen.

Således vil resultaterne for CO₂-udledningen per m ramme inkl. beklædning ikke direkte kunne anvendes i praktiske dimensioneringstilfælde. Resultaterne skal derfor kun ses som vejledende.

Alle resultaterne er opgjort som kg CO₂ per meter rammespænd – altså noget der kan omregnes til en udledning af CO₂ per gulvareal for indre rammer i konstruktionen. For en hel bygning må der så ganges op med antal rammer og tillægges gavle, vindkryds etc.

De optimerede resultater giver en indikation af, at limtræ er en bedre løsning end stålrammer i forhold til CO₂-udledning bygningens levetid. Dog skal det understreges, at udvikling inden for produktion af materialerne er i konstant udvikling, og at der om få år kan være helt andre CO₂-tal tilgængelige fra fx produktion af genbrugsstål. Desuden er materialeholdbarheden en vigtig faktor i det barske staldmiljø, som heller ikke er berørt her.

Resultaterne fra det analyserede eksempel viser, at der er en tendens til, at det mindste spænd i det angivne parameterinterval (15 m) giver den laveste udledning af CO₂ per meter ramme for stål-tilfældet. Det samme gælder limtræ.

I et eksempel for limtræsrammer er der vist, at der udledes marginalt mindre CO₂ ved de laveste taghældninger i det undersøgte interval (8 til 10 grader). Da der ikke umiddelbart er en fast tendens i forhold til fx udviklingen af største moment som funktion af taghældning af staldrammer, kan det som tommelfingerregel siges, at taghældningen kan vælges frit, men ser ud til i de fleste tilfælde at være optimal ved de laveste hældninger.

Samlet set må det konkluderes, at den største CO₂-besparelse i eksemplet ses ved at reducere staldtværsnitsspændet ned til fx 15 m. De funktionsmæssige udfordringer ved en smallere stald er ikke taget i betragtning her.

Bilag

Ved henvendelse til Philip Halding, Arne Egerup eller Kristoffer Negendahl fra DTU Byg kan udleveres Excel-ark med al data, rapport fra den studerende (der har arbejdet indledningsvist med emnet) og figurer af samtlige parametriske iterationer.

Danmarks
Tekniske
Universitet

Brovej, bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
Tlf. 4525 1700

www.byg.dtu.dk