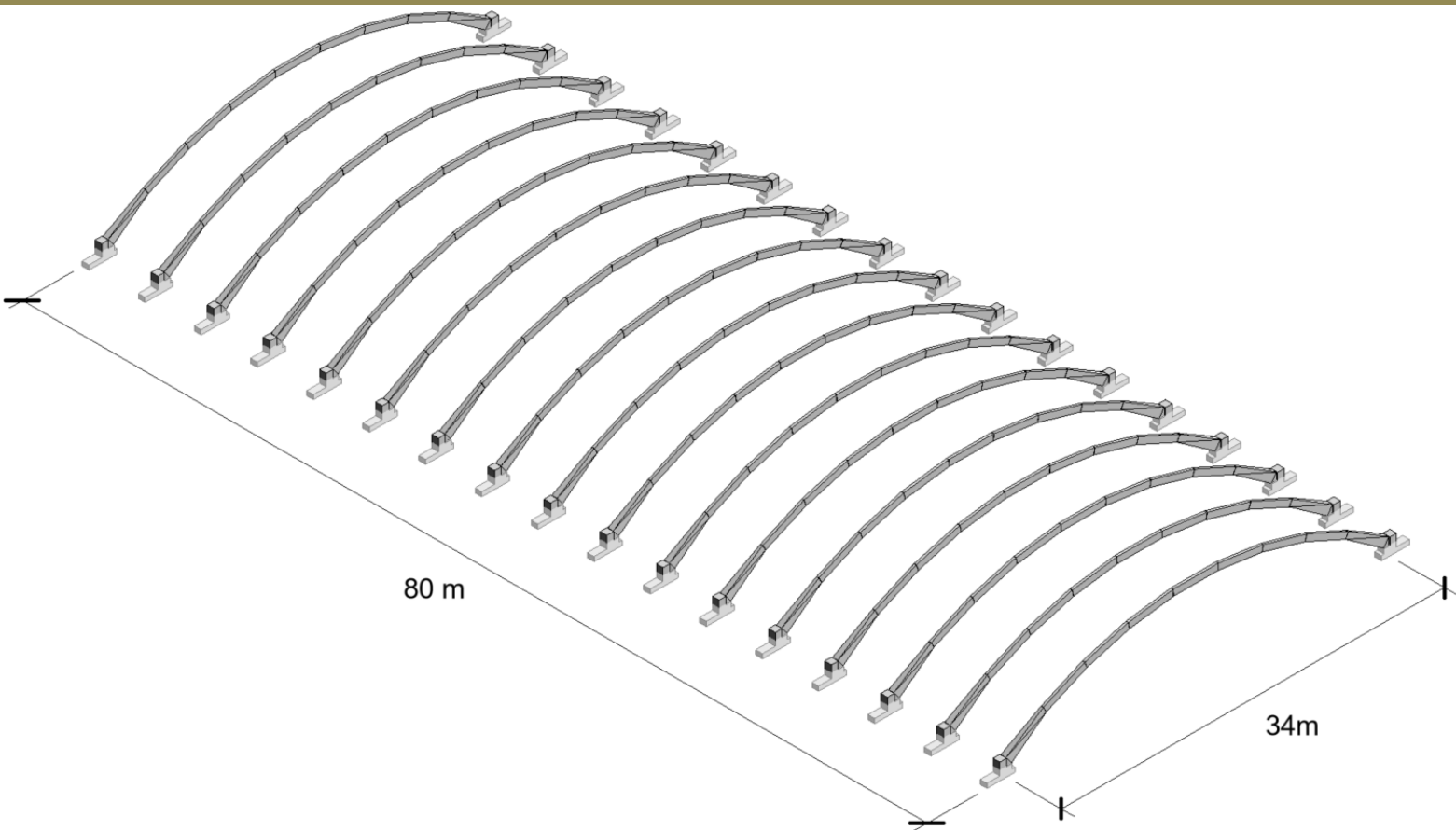


DET KLIMAVENLIGE LANDBRUGSBYGGERI

- Pris og CO₂-udledning af typiske stalde og en stald med ny byggeteknologi

Rapport 7



DET KLIMAVENTLIGE LANDBRUGSBYGGERI

- Pris og CO₂-udledning fra typiske stalde og en stald med ny byggeteknologi

Rapport 7

Januar, 2022

Af



Philip Halding

Projekt udarbejdet af SEGES Innovation P/S

Projektleder Kenneth Poulsen, Byggechef, SEGES Innovation P/S

ISBN: 978-87-7475-691-0

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	Buer i konstruktioner	1
1.2	Perlekædeteknologi.....	4
1.3	Udregning af CO ₂ -udledning (GWP) og referencestalde.....	6
2	Konstruktionsopbygning	8
2.1	Montage.....	11
3	Resultater	12
4	Konklusion	15
	Bilag	16

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 fokus på at minimere udledningen af CO₂.

Der er fire arbejdsplaner i projektet. Denne rapport er tilknyttet arbejdsplan 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 i for høj grad at påvirke udgifterne ved opførelse og drift.

Denne rapport viser en alternativ opbygning af stalde med buer af præfabrikerede betonelementer, som er spændt sammen i en buform. Løsningen baserer sig på teknologi, som er opfundet og afprøvet af DTU Byg. Buerne er opsat på samme vis, som rammerne i en stålstald, og der er monteret beklædning og isolering uden på buerne. Bueløsningen er holdt op imod typiske staldeværnsnit med spænd på 25 m, og der foretages en sammenligning af CO₂-udledning og gives skøn af opførelsesomkostningerne.

Resultatet viser at den nye foreslåede betonbuekonstruktion er teoretisk brugbar og fuldt konkurrencedygtig i forhold til to referencetalde, når der sammenlignes på pris for de bærende materialer. Dog er den beregnede CO₂-udledning fra betonbueløsningen 127% højere end for referencetalde med træspær. Det er kun de primært bærende dele af konstruktionerne, som er sammenlignet.

Det skal understreges, at beregningerne er vejledende, og at der i alle tilfælde skal foretages en detaljeret statisk beregning, samt en opdateret LCA-analyse af konkrete stalddesigner.

1.1 Buer i konstruktioner

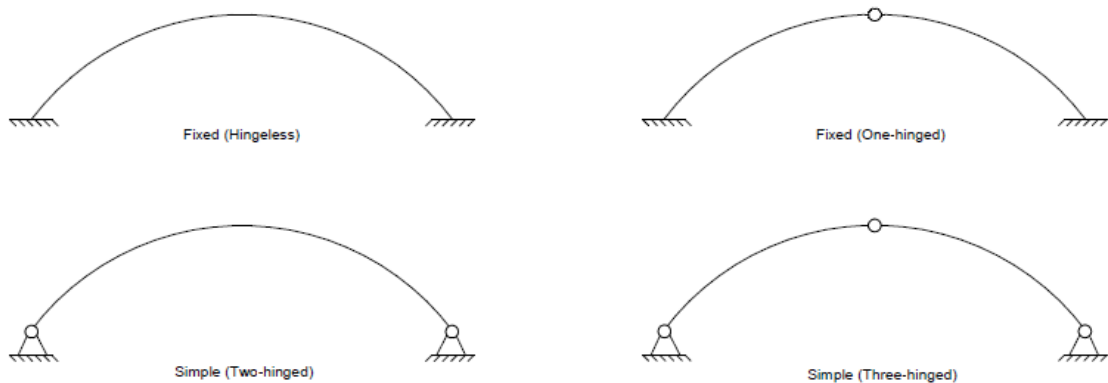
Buer har været anvendt i konstruktioner i tusindvis af år. Årsagen til denne popularitet har været, at det er en utrolig stærk form til at modstå typiske jævnt, fordelte laster som trykspændinger. En parabelformet bue kan faktisk modstå en jævnt fordelt last udelukkende som tryk i buen og uden momenter.

Denne fordel gør, at der i mange tilfælde kan spares materiale ved at benytte bueformen. Buer har dog den udfordring, at der altid vil opstå udskridende vandrette reaktionskræfter

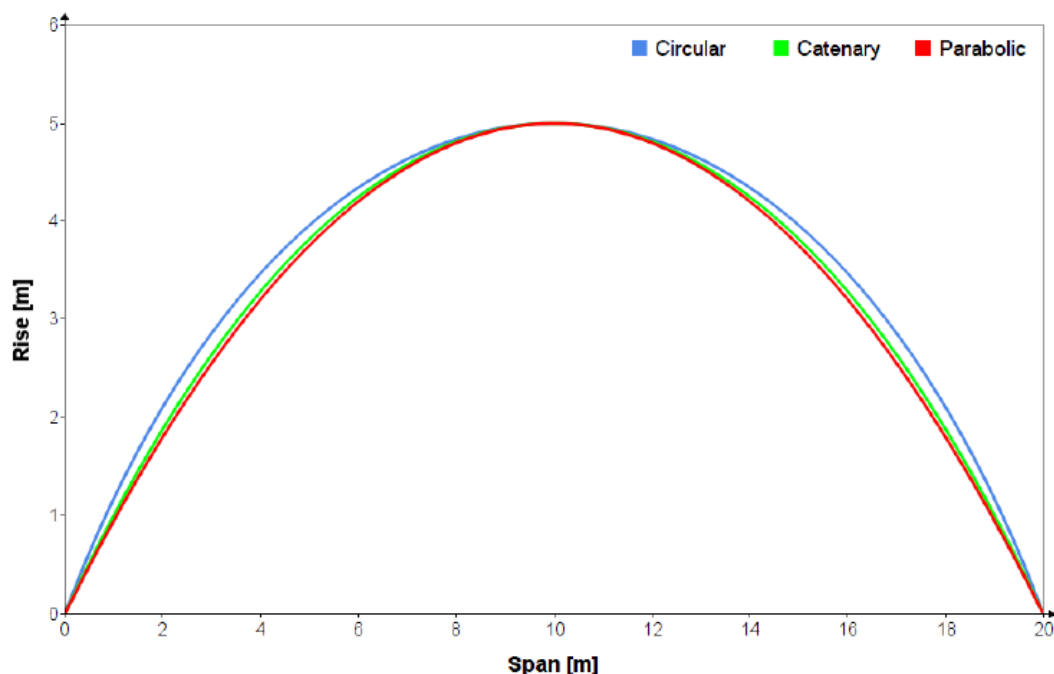
ved fundamentene, når buen er belastet, og disse kræfter skal modvirkes ved at bygge store fundamenter, som fx udnytter jordtrykket, eller et trækbånd, som forbinder bueenderne.

Det statiske system (figur 1) og bueformen (figur 2) og lasterne (figur 3) har betydning for om der opstår momenter og forskydningskræfter i buen og med hvilke størrelser. I dette projekt anvendes cirkelformen, da det giver en ens krumning i hele buen. Det har en fordel i forbindelse med opbygning af buen, da alle betonelementer kan laves identiske. Forskellen på de forskellige bueforme er beskeden, når der er tale om en relativt lav bue.

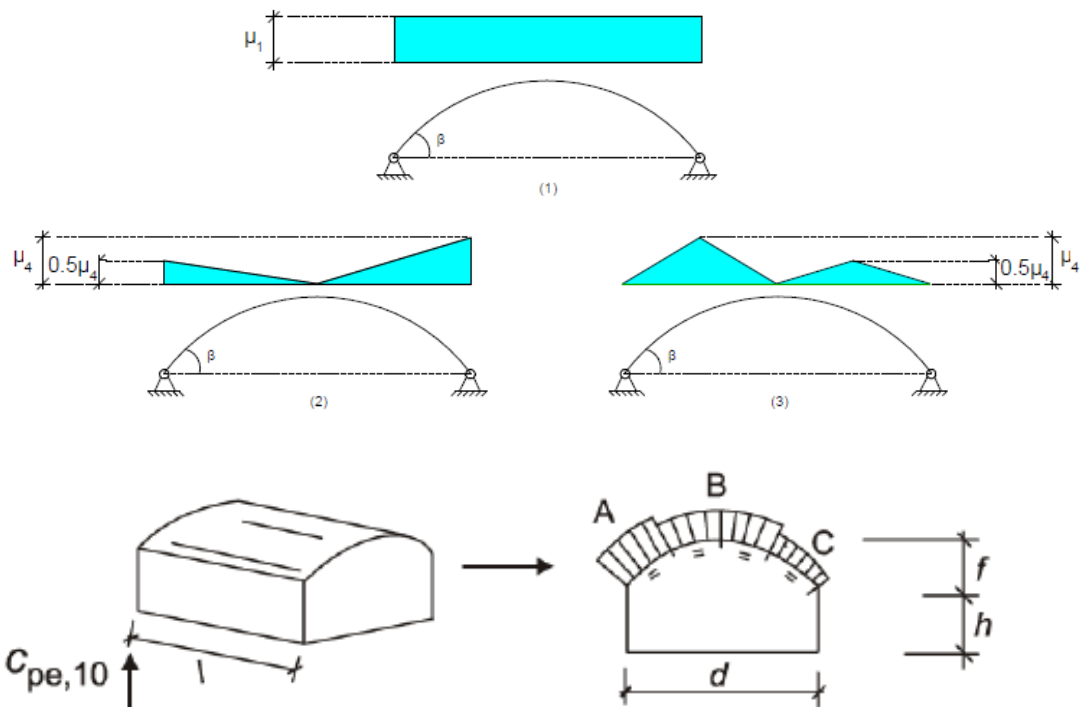
Til statisk system er valgt en to-hængslet løsning, hvilket i praksis er lettest at opføre.



Figur 1: Statisk system fra indspændt til trehængslet. Mest praktisk er en to-hængslet løsning.



Figur 2: Tre gængse bueformer i konstruktioner: Parabel er optimal for jævn fordel lodret last, kædelinjen (catenary) er optimal for egenlast, og cirkelformen er optimal for jævn last vinkelret på buen.

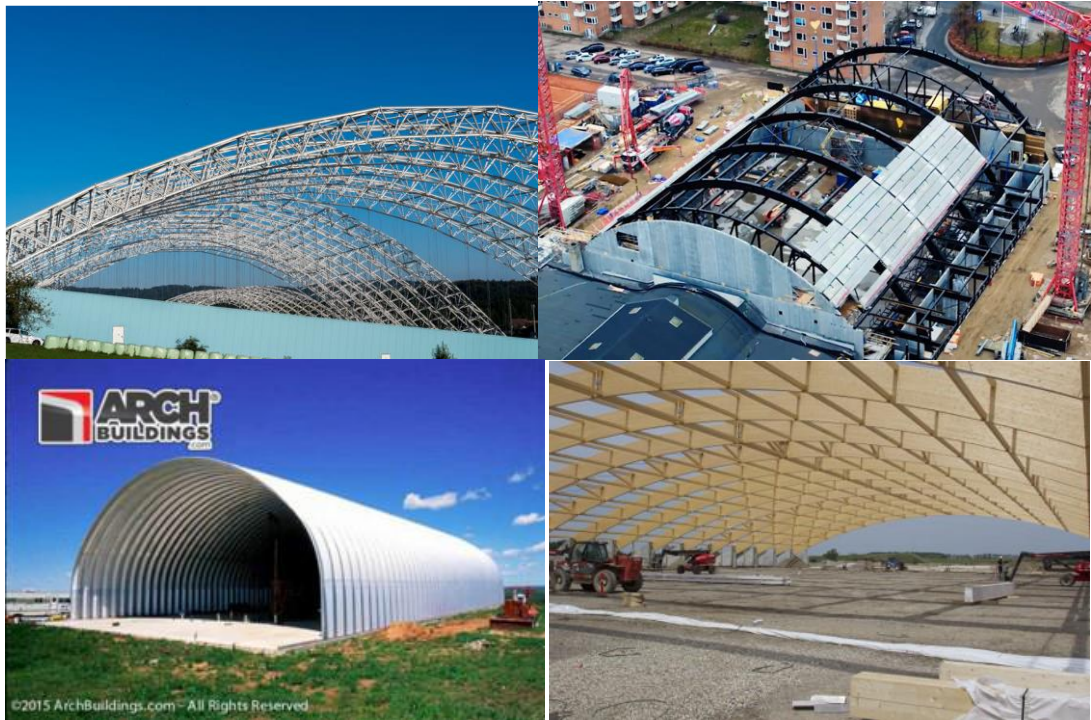


Figur 3: Øverst: Mulige snelastkonfigurationer. Nederst: Vindlast på buede tage¹

Ud over at der opstår vandrette reaktioner i en bue, så skal man være opmærksom på skæv belastning, som oftest er dimensionsgivende. En belastning på den ene buehalvdel vil give positive momenter i den belastede side, og negative momenter i den ubelastede side. Det betyder, at den negative momentkapacitet også kan være kritisk i forhold til eftervisning af buetværsnit.

I figur 4 er der givet en række eksempler på større buede konstruktioner i forskellige andre materialer.

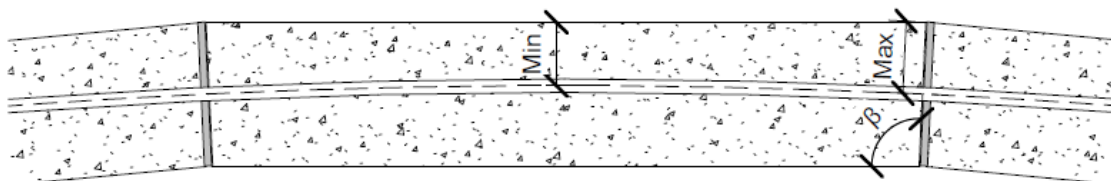
¹ EN 1991 FU:2015 Actions on structures



Figur 4: Top: ståløsninger med gitteropbygning og massive profiler. Bund: Rundbuehal i stål og limtræs-buer.

1.2. Perlekædeteknologi

For de præfabrikerede betonelementbuer anvendes en ny teknologi kaldet "perlekædearmring". Princippet er, at der støbes flade betonelementer med en lille hældning i enderne. Inden i elementerne indstøbes en kabelkanal, hvorigennem der trækkes et kabel. Når et antal af disse elementer "trækkes" på det samme kabel, og kablet derefter spændes op imod enderne, så opstår der en bueform, som afhænger af kabelkanalens krumning og vinklerne for enden af hvert betonelement. Se figur 5 for et eksempel.



Figur 5: Øverst: Principskitse set fra siden af kabel, der løber igennem flere flade betonelementer med skrå ender. Nederst: Teknologien i brug ved bro over å i Jylland. Opspændingen af kablet ses i enden af det sidste element.

Elementernes længde, kabelkanalens krumning, og endernes vinkel beregnes, så de stemmer overens med den ønskede form af buen. Det er også muligt at have flere forskellige krumninger i én bue. Elementerne er flade for at opnå en så simpel og billig produktion og transport som muligt. Der kan ilægges armering i elementerne for at opnå en højere bæreevne, og det er også muligt at lægge in-situ armering imellem elementer, hvis det er nødvendigt.

I forbindelse med opspændingen er det som minimum nødvendigt at gøre plads til specialarmering i enderne, for at undgå lokale brud. Man vil oftest injicere en mørtel ind i kabelkanalen efter opspænding, men det kan overvejes and undlade dette, da det så i fremtiden vil være muligt at afmontere buerne og adskille elementerne til genbrug. Montage sker ved at elementerne til en bue placeres på et vandret underlag i den rigtige vinkel (se figur 6), så støbes mørtel i overgangen mellem hvert element, og dagen efter sker opspændingen. Buerne løftes på plads med en kran og sættes på forberedte fundamenter.



Figur 6: Elementer står på siden og er klar til at få støbt samlinger og blive spændt op.

Alle metoderne til at samle og montere buerne er gennemprøvede og perlekædebuer har været udsat for verificerende fuldskala brudforsøg af flere omgange.

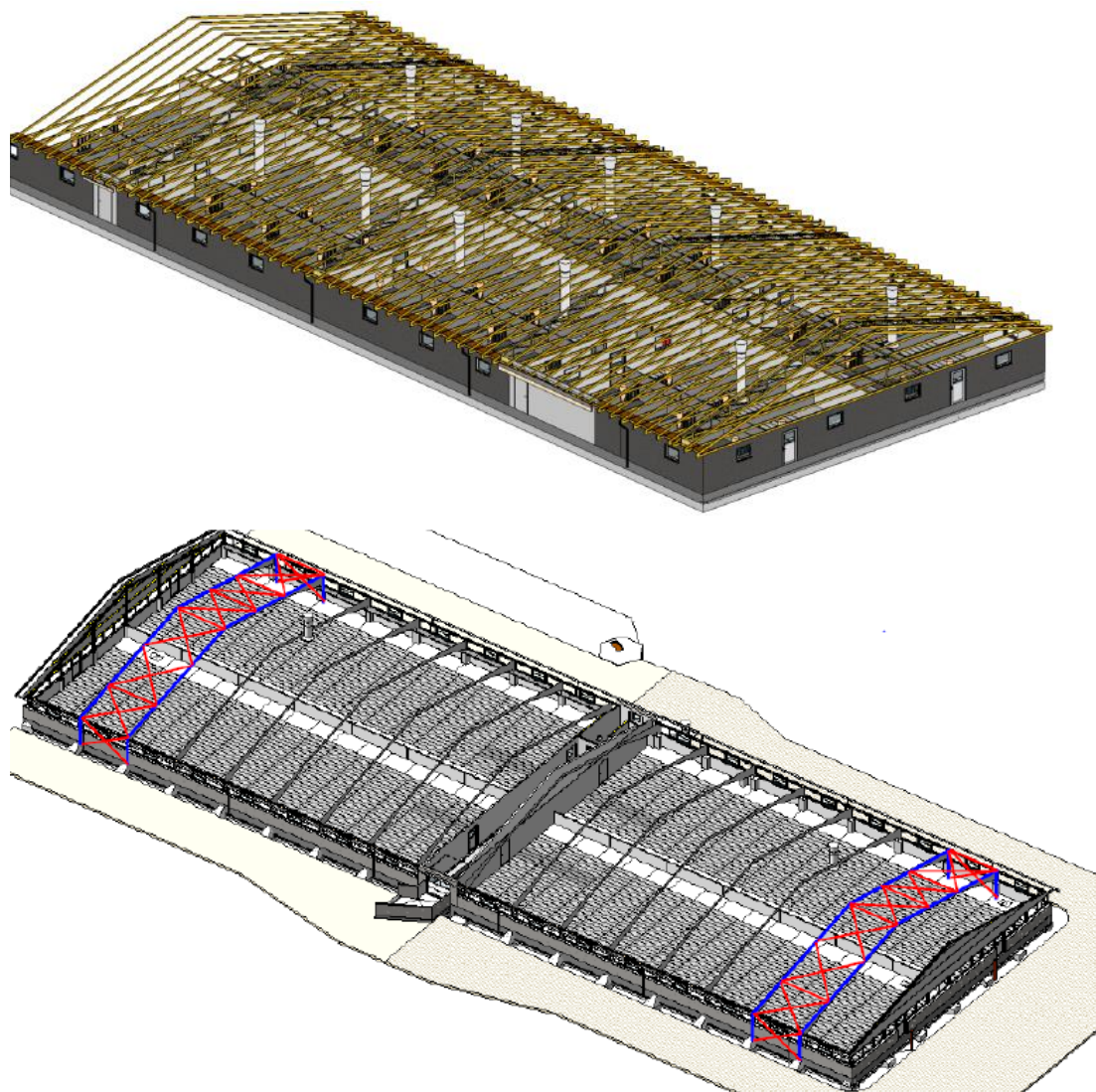
1.3. Udregning af CO₂-udledning (GWP) og referencestalde

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.

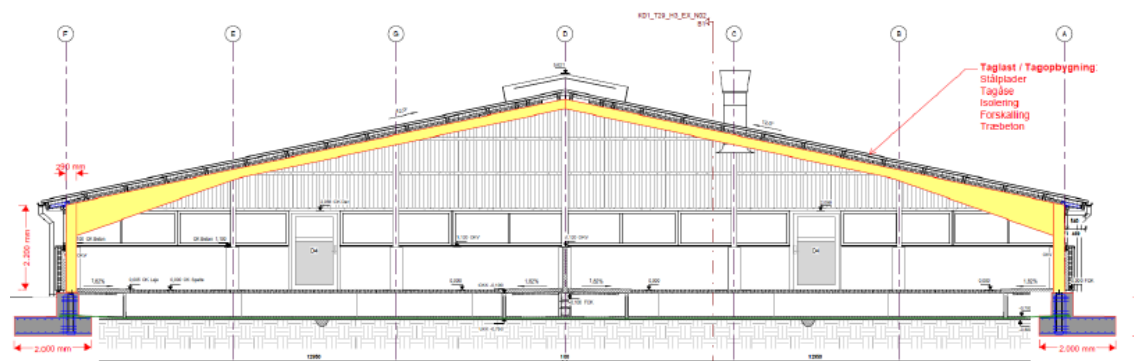
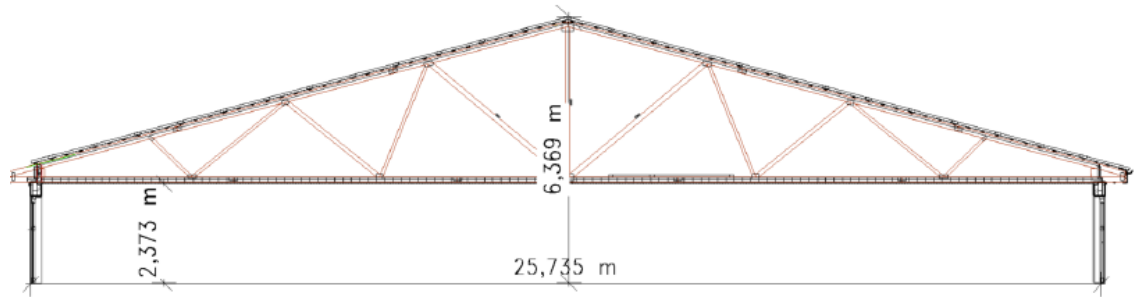
Der anvendes ligeledes her et LCA-skøn, hvor de forskellige faser af staldens levetid medregnes i vurderingen af den samlede CO₂-udledning. Der er dog ikke tale om anvendelse af genbrugsscenarier (normens fase D²), hvilket også er normalt at undlade i denne typer af byggerier.

CO₂-udledningen for den nye type stald med betonbuer er sammenlignet med to typiske staldtyper i Danmark med et rent spænd på næsten 26 m, se figur 7 og 8.

² EN 15978:2011



Figur 7: Øverst: Staldbygning med bærende vægge i beton og træspær. Nederst: Staldbygning med bærende stålrammer.

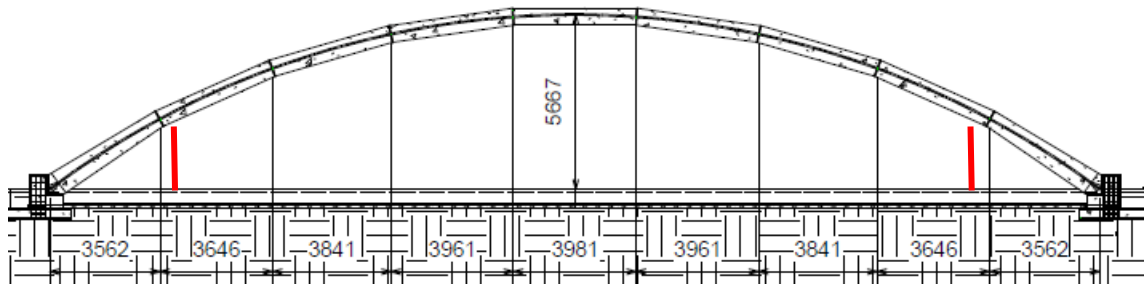


Figur 8: Staltdværsnit af de to typiske stalddtyper med spænd på ca. 26 m, som betonbueløsningen sammenlignes med.

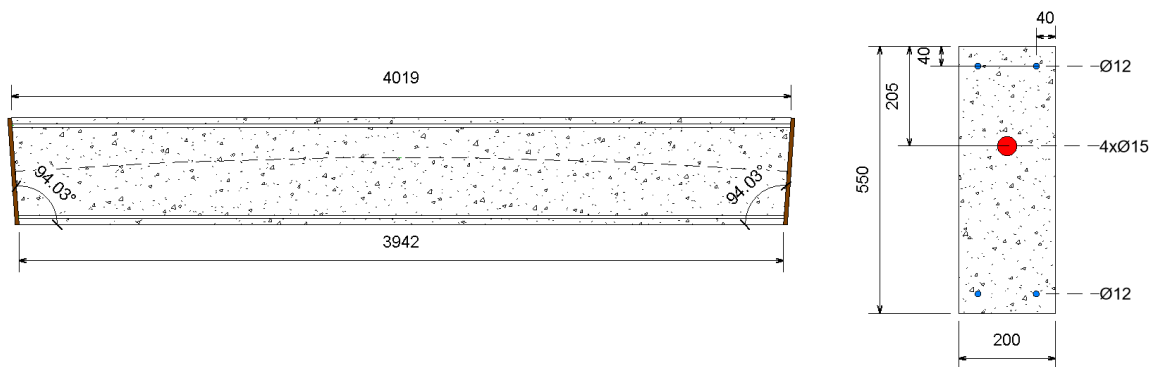
2. Konstruktionsopbygning

For at opnå et brugbart spænd af bygningen, som svarer til de 26 m for de to referencetalde, så må buespændet gøres længere. Det valgte design har et spænd på 34 m og en højde på 5.67 m. Det svarer til et højde/spænd forhold på 1/6, hvilket er valgt for at undgå for meget spildplads i siderne, uden at buen bliver for høj.

Det antages, at buerne beklædes med et let tag og isoleres tilsvarende stålstalden og med samme afstand imellem buerne, som der typisk er afstand imellem stålrammerne (5 m). Buerne er hver inddelt i ni betonelementer (se figur 9) hvoraf de midterst syv er ens med et tværsnit på 550 x 200 mm og en længde på 4019 mm (se figur 10). Der er brugt en buet kabelkanal som indeholder et kabel til efterspænding med fire liner. Mellem hvert element er der en 20 mm mørtelsamling. Endeelementerne i hver side er konstrueret således, at de gradvist bliver bredere, og ved overgange til fundamentet har de et større tværsnit (780 x 500 mm) for at kunne gøre plads til den ekstra armering omkring kabelforankringspunkterne.



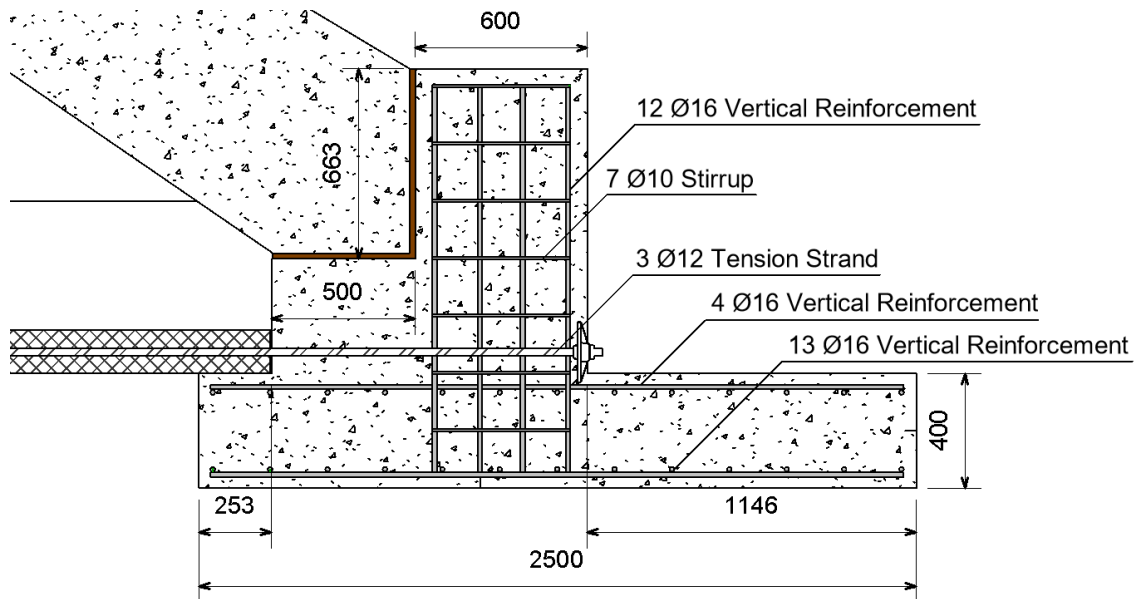
Figur 9: Tværsnit af stald med opbygning af betonbuer vha. perlekædeprincippet. De røde streger angiver, hvor evt. plastvægge kan placeres, så dyrene ikke er i kontakt med hverken bue eller væg/loft.



Figur 10: Geometri af betonelementer til bueopspænding. Betontrykstyrke 45 MPa.

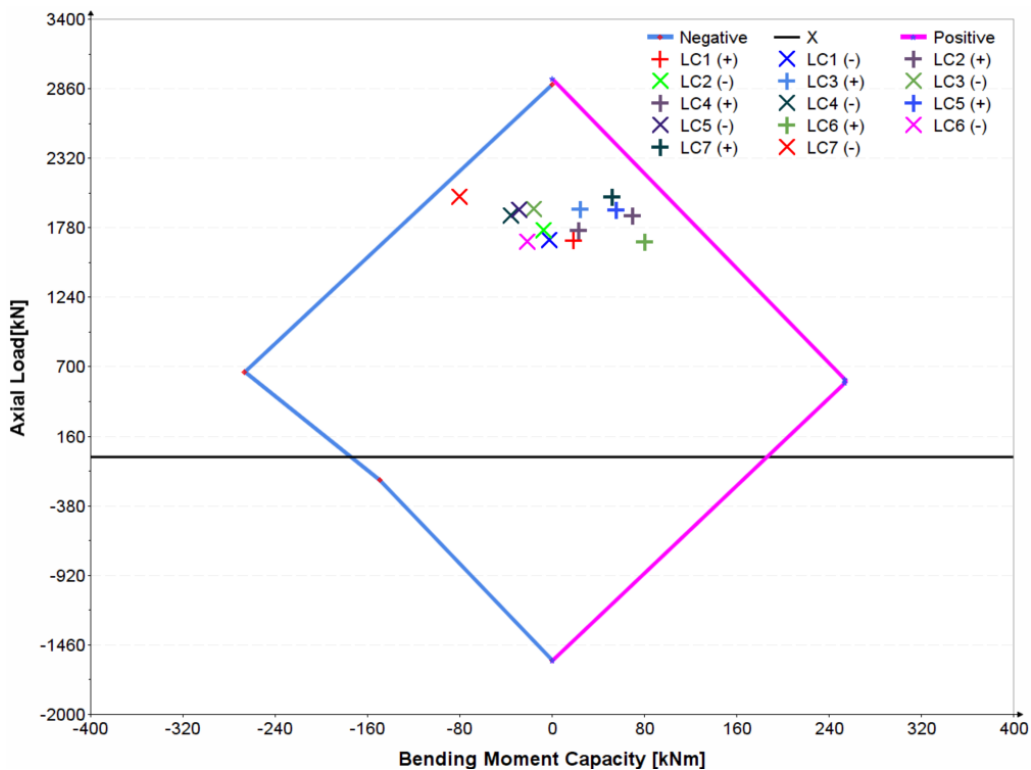
Dimensionering af fundamentet ses i figur 11. Fundamentet udvides med en "knast" med et vinkelret leje, hvor buen hviler af. Det er ikke nødvendigt at armere overgangen mellem bue og fundament, da buen altid vil trykke ned mod fundamentet. I overgangen mellem fundament og bue støbes en mørtelfuge, som vil gøre, at forbindelsen opfører sig som et "semi-hængsel".

Bemærk, at der er valgt en løsning med et efterspændt "trækbånd" i bunden imellem de to bueender. Det efterspændte kabel føres igennem en istøbt kabelkanal i bunden af gyllerenden, og således bliver der et mere lukket statisk system, som kun overfører lodrette kræfter til jorden.



Figur 11: Udviklet fundamentsløsning med forbindelse til trækband og samling mellem bue og fundament. Betontrykstyrke 30 MPa.

Bæreevnen af det foreslåede design er eftervist for alle relevant lastkombinationer inklusive løft af buerne med kran, når de skal monteres. Der er i løftetilfældet taget hensyn til dynamiske effekter med en ekstra sikkerhedsfaktor på 2. Der er taget hensyn til opspændingstab, og bæreevnen er beregnet både i forbindelse med positivt og negativt moment. Et M-N diagram er vist med alle de relevante lastkombinationer i figur 12. Forskydningsbæreevnen er også eftervist, og der er gjort undersøgelser af spændingsniveauet i anvendelsesgrænsetilstanden.

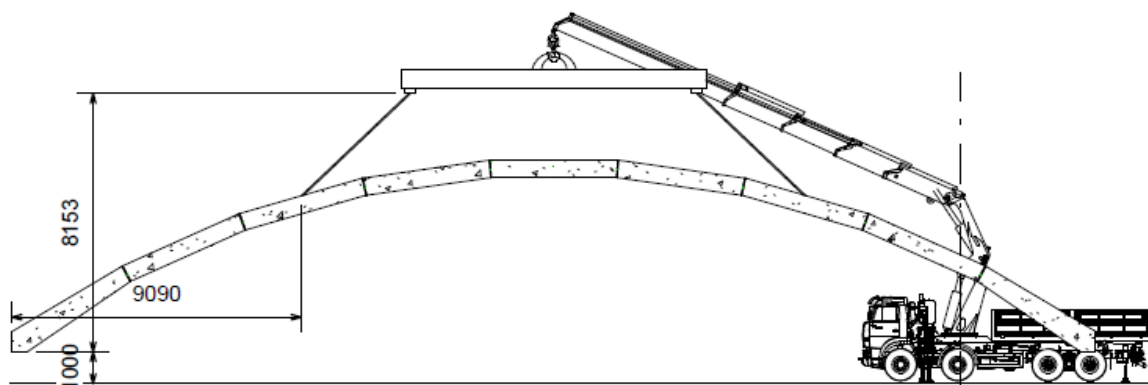


Figur 12: Bæreevnekurve for det valgte design.

2.1. Montage

Som beskrevet består selve opspændingen af en række skridt:

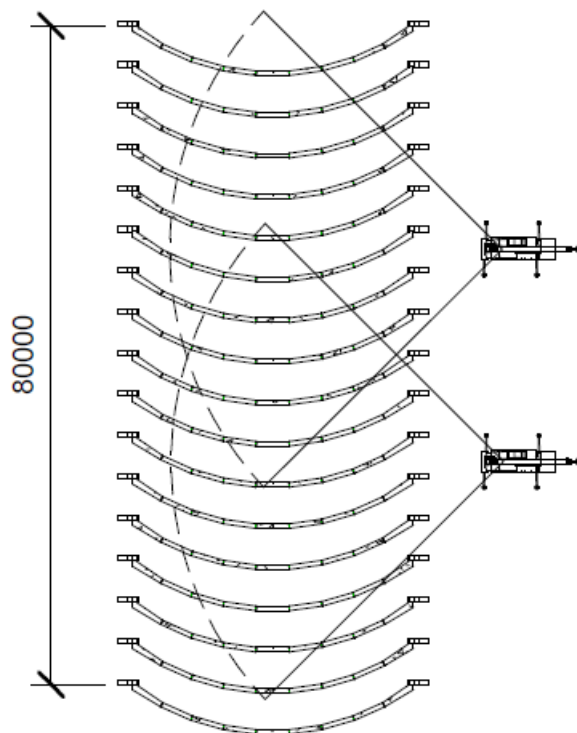
1. Med lastbilkran placeres elementerne på siden på det flade gulv i stalden med endeelementerne ud for de forberedte fundamenter og med alle ni elementer i den korrekte bueform (justering med koben). På forhånd er "trækbåndet" i gulvet blevet opspændt.
2. Kabelkanalerne forbindes med muffe.
3. Der støbes en mørtelfuge i overgangene imellem alle elementer. Fugen hærdner til næste dag.
4. Opspænding af elementer finder sted, samt muligt mørtel injicering i kanalen efter opspænding.
5. Alle buerne vippes nu roligt på plads med en lastbilkran eller en mobilkran og der sikres forbindes på langs af bygningen. De placeres på plastik afstandsstykker, så der er plads til at kunne støbe en mørtelfuge med overgangen mellem bue og fundament. Løftepunkter er vist på figur 13. Der løftes med åg.



Figur 13: Løftesituation, hvor buerne vippes fra vandret til lodret position.

En mellemstor mobilkran vil kunne nå halvdelen af buerne i en 80 m lang stald, fra én position. Det betyder, at selve opsætningen bør kunne gøres på én dag. Hvis der bruges en billigere lastbilkran, så vil det tage længere tid, da lastbilen skal skifte position flere gange. Desuden er det ikke sikkert, at det er muligt for en lastbil at finde plads imellem buerne, som det ses på figur 13.

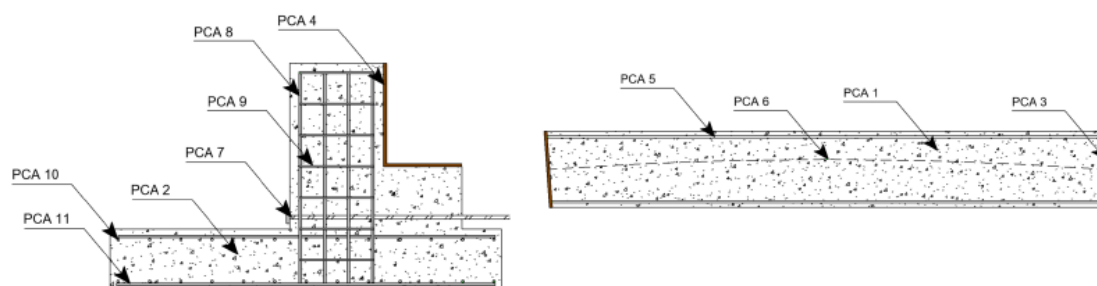
På figur 14 ses en plantegning af løft med mobilkran.



Figur 14: Plantegning af løfteområder fra to positioner med mellemstor mobilkran³.

3. Resultater

I figur 15 og tabel 1 ses de medtagne materialer til beregningen af GWP for buerne og fundamentet. Der medtages her kun de bærende dele og tilsvarende er gjort for de to referencestalde af stålrammer og træspær.



Figur 15: Position af materialerne til LCA analysen af CO₂-udledning for buerne.

³ www.BMS.dk

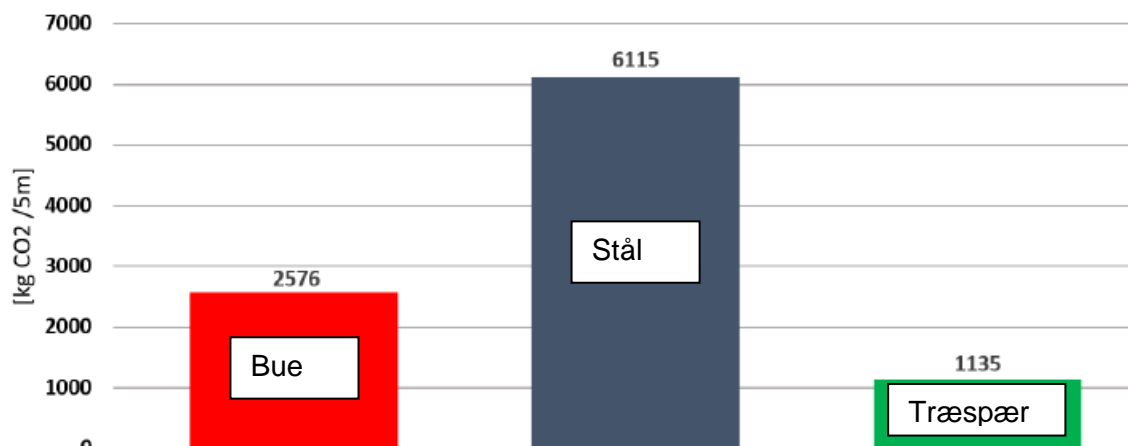
Tabel 1: Volumen af materialerne for hver bue og fundament.

	Volume [m^3]	Density [kg/m^3]	[Weight kg]
PCA 1 - Concrete C50 (Arches)	4.16	2400.00	9980
PCA 2 - Concrete C30 (Foundation)	2.20	2400.00	5290
PCA 3 - Mortar (Arches)	0.0240	2111.00	51
PCA 4 - Mortar (Foundation)	0.0368	2111.00	78
PCA 5 - Pretensioning Steel (Arches)	0.0184	7850.00	145
PCA 6 - Posttensioning Steel (Arches)	0.0286	7850.00	224
PCA 7 - Posttensioning Steel (Foundation)	0.0206	7850.00	162
PCA 8 - Vertical Reinforcement	0.0064	7850.00	50
PCA 9 - Horizontal Reinforcement	0.0025	7850.00	20
PCA 10 - Horizontal Reinforcement - Depth	0.0040	7850.00	31
PCA 11 - Horizontal Reinforcement - Width	0.0082	7850.00	65

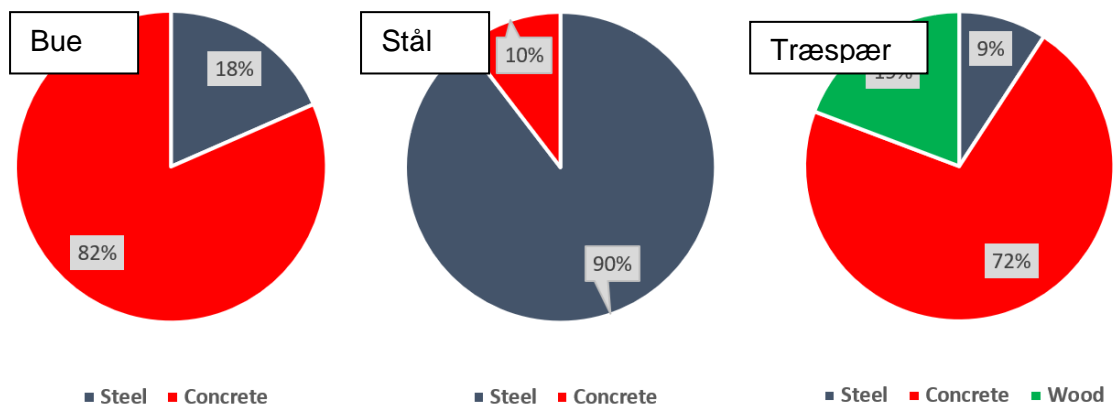
En sammenligning af CO₂-udledningen er gjort med de to referencetalde af hhv. stål og med træspær. Stalden med træspær har en spærafstand på 1 m. For at foretage en ordentlig sammenligning med en stålramme og en betonbue, er der således beregnet for fem spærfag. Der er ikke inkluderet gavlopbygninger og vindkryds, så CO₂-sammenligningen er baseret på de bærende dele for et fag af 5 m udstrækning inkl. fundamenter i beton.

Der er brugt de samme CO₂-data, som i de tidligere projektrapporter, og der henvises til disse, hvis de konkrete tal ønskes.

Figur 16 viser en sammenligningen. Det ses, at det fortsat er stalden med træspærfag på betonvægge, som giver den mindste udledning (1135 kg CO₂ per 5 m bygning), mens betonbueløsningens bærende konstruktion udleder 127% mere og stålrammestalden 439 % mere.

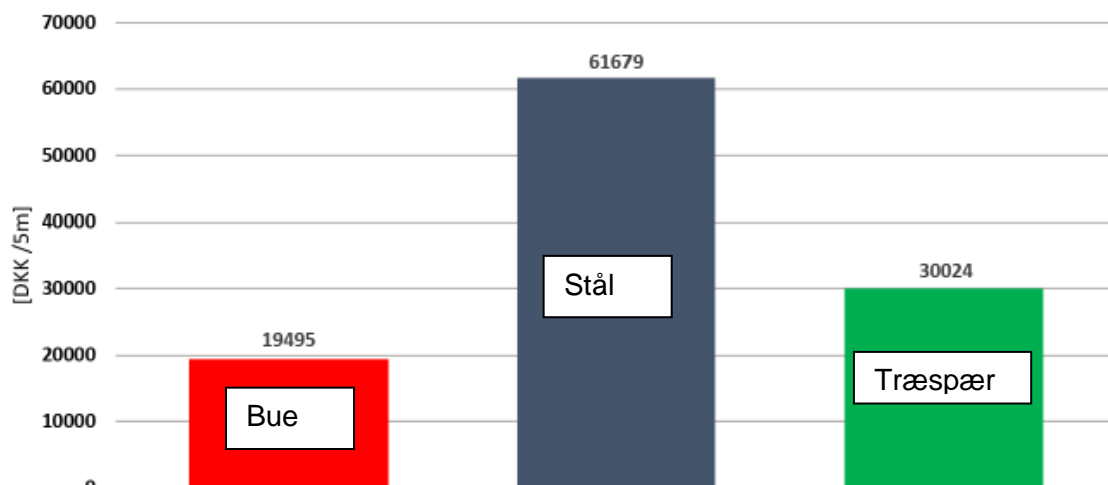


Figur 16: CO₂-Sammenligning af bærende dele af betonbuestalden, stålstalden og stalden med træspær for 5 m bygningbredde = per bue/ramme.

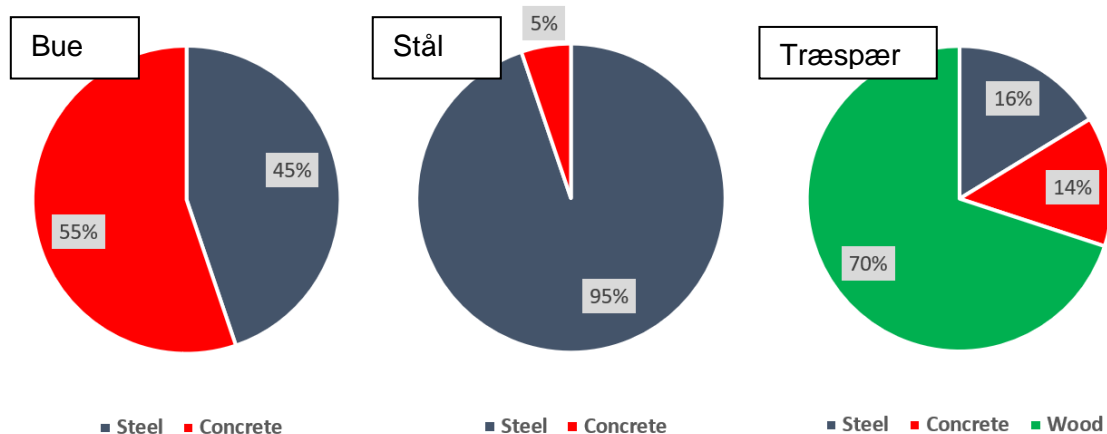


Figur 17: Fordeling af CO₂-udledning for den bærende konstruktion i hver type stald.

Ved at undersøge byggematerialers priser (december 2021) er det muligt ud fra mængderne af de forskellige typer af stalde at beregne et groft overslag af den rå materialepris. Resultatet er vist i figur 18 og 19. Her ses det, at det er en fordel at benytte betonbuerne. Dog skønnes det, at den nye betonbueløsning i begyndelsen vil kræve en større udgift til samling og montage grundet manglende erfaring hos entreprenørerne.



Figur 18: Sammenligning af rå materialepriser for de bærende dele for hver bygning. Estimatet er per bue (= 5m bygningsbredde).



Figur 19: Fordeling af pris på bærende materialer i hver type stald.

4. Konklusion

Det er vist, hvordan flade bueelementer af beton kan spændes sammen i en bueform, som let kan vippe på plads på forberedte fundamenter.

Ud fra det valgte design af betonbuerne er der foretaget sammenligning med en staldkonstruktion med stålrammer, og en staldbygning af betonvægge. Alle de tre stalde har samme brugbare areal.

I forhold til en LCA-analyse af CO₂-udledningen har betonbueløsningen en 127% højere udledning i forhold til stalden med træspær og ser derfor ikke ud til at være konkurrencedygtig, hvad det angår. En opgørelse af de rå materialepriser viser dog, at bueløsningen er billigere end de to andre alternativer. Der er kun sammenlignet CO₂-udledning for de primært bærende dele af de forskellige stalde og kun for et 5 m bredt snit midt i stalden uden hensyntagen til fx vindkryds, gavlopbygning, tag, isolering osv.

Det skal bemærkes, at der hele tiden udvikles nye fremstillingsmetoder og materialetyper, og således kan LCA-resultaterne på kort tid ændre sig meget.

Buerne har et spænd på 34 m, hvilket giver ekstra plads med lav loftshøjde i siderne. Der kan sættes lodrette plastvægge op for at undgå, at dyrene er i kontakt med buer og loft, og dermed opnås en forbedret holdbarhed. Desuden er der mulighed for, at buerne kan spændes op uden mørtelinjicering i kabelkanalerne, så de kan adskilles og genbruges efter endt levetid.

Bilag

Ved henvendelse til Philip Halding fra DTU Byg kan udleveres en rapport fra den kandidatstuderende, som har hjulpet med arbejdet med udvikling af betonbueløsningen.

Danmarks
Tekniske
Universitet

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

www.byg.dtu.dk