

Torgeir Solberg, Torjus Stomlien og Roy Skaar

Takkonstruksjon for sirkulære bygninger

En ny løsning utviklet med hensyn på konstruksjonssikkerhet, prefabrikkering og montering

Bacheloroppgave i ingeniørfag, bygg

Veileder: Eskild Narum Bakken

Mai 2019

Torgeir Solberg, Torjus Stomlien og Roy Skaar

Takkonstruksjon for sirkulære bygninger

*En ny løsning utviklet med hensyn på
konstruksjonssikkerhet, prefabrikkering og montering*

Bacheloroppgave i ingeniørfag, bygg
Veileder: Eskild Narum Bakken
Mai 2019

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

 **NTNU**
Norwegian University of
Science and Technology

Oppgavens tittel:	Dato: 19. mai 2019		
Takkonstruksjon for sirkulære bygninger	Antall sider: 70 + 54		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	x
Navn: Torjus Stomlien, Torgeir Solberg og Roy Skaar			
Veileder: Eskild Narum Bakken			

Sammendrag:

Denne bacheloroppgaven handler om hvordan man kan konstruere og dimensjonere en mangekantet takkonstruksjon med sirkulært takvindu i sentrum og uten synlige aksialstaver. Det betyr at taket skal bæres utelukkende av ytterveggene og konstruksjonen skal være fri for bærepunkter eller strekkstag. Gaia Homes AS ga ut oppgaven. De har tidligere importert et sirkulært hus fra Canada. Bedriften eier et regulert område i Alvdal der det skal settes opp ytterligere 49 sirkulære hus og hytter, men prosjektet har stagnert i mangel på en optimal takkonstruksjon.

Med denne bakgrunnen ønsker vi å benytte oppgaven til å designe og konstruere et prinsipp som kan benyttes ved slike bygg, da i forskjellige størrelser.

Det ble foretatt en studie av eksisterende løsninger og prinsipper på det internasjonale markedet. Analyser av disse avslørte ulike svakheter og forbedringspotensial hos samtlige, ingen av dagens løsninger framstod som optimale løsninger på verken konstruksjonsprinsippets muligheter eller bedriftens behov. Denne prosessen ga grunnlag for konkretisering av prinsipielle muligheter og eksakte kravspesifikasjoner. Dette ble utgangspunktet for vår konstruksjon og dimensjonering av tak til et allerede prosjektert hus. Vår konklusjon på spørsmålet om gunstig løsning inkluderer selvbærende tak, limtrebjelker, kubbinger i konstruksjonstre, samt ytre strekking i stål.

Stikkord:

Konstruksjonsteknikk
Takkonstruksjon
Sirkulær
Selvbærende



Torgeir Solberg

Torjus Stomlien

Roy Skaar

Abstract

This bachelor thesis is about how to construct and dimension a polygonal roof construction with a circular skylight in the center and no visible tension bars. This implies that the roof is only supported by the exterior walls, and no tension rods or supports are visible inside. Gaia Homes AS issued the task. They also previously imported a circular house from Canada. The company owns a regulated area in Alvdal where a further 49 houses and cabins are set to be erected, but the project is inhibited by their lack of an optimal roof construction.

With this background, we want to use the task to design and construct a principle that can be used in such buildings, in different sizes.

A study was made of existing solutions and principles on the international market. Analyzes of these revealed various weaknesses and improvement potentials of them all, none of today's solutions appeared to be optimal solutions of neither the construction principle's possibilities, nor the company's needs. This process provided the basis for concretization of principle possibilities and exact requirement specifications, which became the basis for our construction and dimensioning of roofs for an already planned house. Our conclusion on the question of optimal solution includes self-supporting roofs, glulam beams, blocks in structural timber, and outer steel tensioning ring.

Forord

Bacheloroppgaven markerer avslutningen på vårt treårig utdanningsløp på byggingeniørlinjen ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Gjøvik.

Med gruppas sterke interesse for konstruksjonsteknikk og bruk av trevirke som byggemateriale, var det lett å avgjøre hva oppgavens tema skulle bli. Det største ønsket var å utforme en problemstilling som har reell relevans og nytteverdi for næringslivet. Gruppen kom i kontakt med Gaia Homes og deres stagnering av et utviklingsprosjekt i mangel på en løsning av takkonstruksjon.

Siden konstruksjonsformen ikke er særlig utbredt, finnes det lite relevant faglitteratur for prosjektering av mangekantede tak. Dette forutsatte dyptgående refleksjon over hvert enkelt spørsmål vi støtte på under arbeidet.

Gruppen vil rette en stor takk til vår veileder Eskild Narum Bakken for konstruktive tilbakemeldinger, gode diskusjoner og innsats utover hva vi kan forvente. Videre rettes en spesiell takk til Jan Steinar Egenes, Leif Erik Storm og Marthin Landgraff for lojal og uvurderlig hjelp gjennom hele studieløpet og i forbindelse med bacheloroppgaven. Utbyttet av studiet er i høy grad preget av deres kvaliteter. Vi ønsker også å takke for et givende samarbeid med Gaia Homes, som har gitt oss god innsikt i problemstillingen vi stod overfor. Vi vil også takke for et hyggelig og givende bedriftsbesøk.

Som gruppe sitter vi igjen med en veldig god følelse. Arbeidet med oppgaven har vært en krevende, omfattende og givende prosess. Vi har som gruppe dratt nytte av hverandres kvaliteter og fordelt oppgavene strategisk og jevnt.

Innholdsfortegnelse

Abstract	iii
Forord	iv
Innholdsfortegnelse	v
Tabeller	viii
Figurliste	viii
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Formål.....	1
1.3 Problemstilling.....	2
1.4 Omfang	4
1.5 Definisjoner	5
1.5.1 Uttrykk	7
2 Teori	8
2.1 Sirkulære takkonstruksjoner	8
2.2 Hvorfor velge tre	12
2.2.1 Konstruktive egenskaper	12
2.2.2 Miljømessige fordeler	13
2.2.3 Lokal kompetanse	14
2.2.4 Estetikk.....	14
2.3 Laster	15
2.4 Statikk.....	18
2.5 Bærende konstruksjonsdeler	19
2.5.1 Takbjelker.....	19
2.5.2 Trykkring.....	19
2.5.3 Strekkring	20
2.5.4 Forbindelser.....	20
2.5.5 Brann	22
3 Metode.....	24
3.1 Metodevalg	24

3.1.1	Spesielle utfordringer	26
3.2	Beregninger	27
3.2.1	Manuelle beregninger	27
3.2.2	Beregningsverktøy	27
4	Resultat	29
4.1	Eksisterende prinsipper	29
4.1.1	Selvbærende tak	29
4.1.2	Kombinert bæring	36
4.1.3	Historiske konstruksjoner	42
4.2	Laster	44
4.3	Bærende konstruksjonsdeler	45
4.3.1	Takbjelker	48
4.3.2	Trykkring	49
4.3.3	Strekkring	49
4.3.4	Forbindelser	52
4.3.5	Brann	53
5	Diskusjon	54
5.1	Produksjon og montering	56
5.1.1	På fabrikk	56
5.1.2	Forberedelse til montering på byggeplass	57
5.1.3	På byggeplassen	58
5.2	Vår alternative løsning	60
5.3	Miljø	61
5.4	Videre forskning	62
6	Konklusjon	63
	Litteraturliste	65
7	Vedlegg	71
7.1	Løsningens bæresystem	71
7.2	Tidligere oppgave ved NTNU	72
7.3	Beregninger	73
7.4	Beregninger for strekkring	85
7.5	Beregningsresultat for grenseverdier	96
7.6	Formler og forklaring	97

7.6.1	Beregningsgrunnlag for takbjelker	98
7.6.2	Beregningsgrunnlag for Trykkring	99
7.6.3	Beregningsgrunnlag for strekkring	99
7.6.4	Beregningsgrunnlag for forbindelser	102
7.7	Produksjonstegninger	106

Tabeller

Tabell 1: Oppsummering fra TEK 17	22
Tabell 2: Laster.....	44
Tabell 3: Oppsummering av komponentdimensjonering	47
Tabell 4: Oppsummering fra TEK 17 (2).....	53

Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av den naturlige konveksjonen i bygget, eget bilde	9
Figur 2: Resultant, eget bilde fra Focus Konstruksjon.....	10
Figur 3: Skjærkraft i sentrum, eget bilde fra Focus Konstruksjon.....	10
Figur 4: Strekking og opptredende strekkrefter i rødt	11
Figur 5: Trykking og opptredende trykkrefter i blått.....	11
Figur 6: Lastfaktorer for snølast, Tabell 5.2 (Standard Norge, 2018).....	15
Figur 7: Cpe, 10 verdier for kupler, 7.12 (Standard Norge, 2009b).....	16
Figur 8: Trykkfordeling for sirkulære sylindere, figur 7.27(Standard Norge, 2009b).....	17
Figur 9: Stillas, Bilde: Mandala Homes (2018)	30
Figur 10: Hurricane ties, fastholdinger i overganger. Bilde: Setup Manual Mandala Homes (2016, s. 36).....	31
Figur 11: Tilnærmet statikkgrunnlag for selvbærende tak, eget bilde	32
Figur 12: RF-units, eller reciprocal frame units. Bilde: Song et al. (2013)	33
Figur 13: Arkitekttegning av Precious Blood Church (Gaboury, 1969)	34
Figur 14: Tilnærmet statikkgrunnlag for selvbærende tak, eget bilde	34
Figur 15: Installasjon, fagverksbjelker med ring. Bilde: Deltec Homes (2015b)	37
Figur 16: Kubbinger, plater og støtte til saksene. Bilde: Deltec Homes (2015a)	38
Figur 17: Tilnærmet statikkgrunnlag for kombinert bæring, eget bilde.....	38
Figur 18: Kombinert bæring, redigert	40
Figur 19: Tilnærmet statikkgrunnlag for kombinert bæring, eget bilde.....	41
Figur 20: Tilnærmet statikkgrunnlag for Pantheon/kuppel, eget bilde	42
Figur 21: Snittegning av Pantheon (Pantheon, 118-125)	43
Figur 22: Eksempel på bæresystem med trykking i en Yurt, Dalbéra (2011)	43
Figur 23: Domen i Firenze, Scheele (2003)	44
Figur 24: Bærende konstruksjonsdeler fra siden, eget bilde	45
Figur 25: Bærende konstruksjonsdeler sett ovenfra, eget bilde	46
Figur 26: Produksjonstegning av 70 mm x 223 mm GL30c bjelke, eget bilde.....	48
Figur 27: Oversiktsbilde over trykking, eget bilde	49
Figur 28: Strekkstag, eget bilde.....	50

Figur 29: Oversiktsbilde over strekkring, eget bilde.....	51
Figur 30: Oversiktsbilde forbindelse trykkring, eget bilde	52
Figur 31: Produksjonstegning plate i trykkring, eget bilde.....	52
Figur 32: Oversiktsbilde forbindelse strekkring, eget bilde.....	53
Figur 33: Illustrasjon av vår løsning, kun bæresystem.....	71
Figur 34: Illustrasjon av et enkelt takelement, kun bæresystem	71
Figur 35: Ende-, kant- og hullavstander for festemidler (Standard Norge, 2009c).	100
Figur 36: Spenninger i sveisesnittets plan (Standard Norge, 2009d).	102

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Gaia Homes AS, etablert i 2014, er en fremtidsrettet bedrift bestående av frivillige som ønsker å bygge opp en økolandsby i Alvdal kommune. De har blitt inspirert av tradisjonell byggeskikk som benytter seg av sirkulære konstruksjoner. Eksempler på inspirasjon kan være mongolsk yurt, samiske gammer og indiansk tipi (Gaia Homes, 2017). Utgangspunktet for oppdragsgiverens ønske om sirkulære hus er estetikk, romopplevelse, og bokvalitet, i tillegg til flere materielle og tekniske fordeler. Basert på erfaringer og studieturer ønsker Gaia Homes å bygge runde hus fordi de mener dette gir en annen romopplevelse, nye planløsningsalternativer og større estetiske muligheter som ikke foreligger i konvensjonelle rektangulære, kvadratiske eller manglekantede hus.

En tidligere gruppe ved NTNU har forsøkt å løse samme problem, men kom ikke helt i mål. Mer om dette under kapittel 4.1.1. Vi besøkte Gaia helt i starten av prosjektfasen. Under besøket fikk vi en detaljert gjennomgang av bygget og byggeprosjektet av utførende som var på stedet. Vi fikk gode ideer på forbedringsmuligheter basert på vår ingeniørfaglige bakgrunn, som vi tok til videre betraktning med beregninger og simuleringer.

1.2 Formål

Tidligere har Gaia Homes importert og satt opp et sirkulært bolighus fra en bedrift i Canada, men deres planer om å sette opp ytterlige 49 boliger inhiberes av mangel på en «optimal» løsning for konstruksjon og montering av taket. Det spesielle ved disse sirkulære bygningene er at det ikke skal være noe form for synlig strekkstag eller annen bæring utenom ytterveggene. Bedriften har også et ønske om høy grad av prefabrikasjon. Gruppen mener det eksisterer forbedringspotensial tilknyttet det konstruktive og utformingene av takkonstruksjonen. Ved å løse denne oppgaven på en tilfredsstillende måte kan vi hjelpe Gaia med å realisere prosjektet. Samtidig ser vi muligheten for å tilføre en ny løsning på det internasjonale markedet.

Potensiell betydning for byggebransjen og samfunnet

En takkonstruksjon som tar utgangspunkt i styrker og svakheter i dagens byggekunst og teknologi, kan være med på å prege et segment i byggebransjen og gjøre vår konstruksjon til en konkurransedyktig løsning. Deltakelse i en konkret markedssituasjon gir gruppen mulighet til å komme med nye løsninger og ideer som også andre kan benytte seg av. Vi mener løsningen vi har kommet frem til er innovativ og kan bidra til utvikling av dagens byggekunst og teknologi.

1.3 Problemstilling

Hovedspørsmålet er hvordan taket kan konstrueres for å oppnå tilfredsstillende sikkerhet, enkel produksjon og rask montering. Byggene har diffusjonsåpne vegger, og det legges vekt på økologiske prinsipper og kortreiste materialer. Etter analyse av oppgavetekst og samtaler med bedriften, framgår det at bedriften ønsker en optimal løsning som umiddelbart kan omsettes i praktisk anvendelse. Ut fra denne bakgrunnen blir problemstillingen formulert:

«Hvordan bør sirkulære hus- og hyttetak med takvindu i sentrum og uten synlige aksialstaver konstrueres med hensyn til konstruksjonssikkerhet, prefabrikasjon og montering?»

Problemstillingens nøkkelbegrep

- Konstruksjonssikkerhet – Det omhandler konstruksjonens mekaniske motstandsevne og stabilitet. Løsningen må konstrueres slik at nødvendig sikkerhet mot brudd blir ivare tatt. For å oppnå dette må konstruksjonen dimensjoneres etter gjeldende norske lover og forskrifter. Vi ser det også som viktig at god konstruksjonspraksis blir ivare tatt (Direktoratet for byggekvalitet, 2014).
- Prefabrikering – Prefabrikasjon er her alt man gjør i forkant med konstruksjonskomponenter som forenkler eller effektiviserer prosessene på byggeplassen. Det kan være produksjon og sammenstilling av komponenter på fabrikk for enkel montering på byggeplass eller bare ferdigkappede lengder av bjelker (Thue, 2018).

- Montering – Betyr her alt som må gjøres på byggeplassen som er relevant for taket. Målet er å redusere monteringstiden til et minimum. Montering henger tett sammen med konstruksjonssikkerhet på den måten at løsningen må være utarbeidet på en måte som minimerer muligheten for monteringsfeil.
- Sirkulære konstruksjoner – I dette tilfellet snakker vi egentlig om mangekantete konstruksjoner. Grunnen til at vi kaller den sirkulær og ikke mangekantet, er dels for å følge oppgavens ordlyd, dels at den visuelt og konstruktivt opptrer som en sirkel. Slike konstruksjoner har så mange kanter at det minner mer om sirkulær form enn en mangekant. Dette kan sammenlignes med hvordan Fibonacci's tallrekke konvergerer i tallet *phi* og går mot uendelig, når man har mange nok elementer i en mangekant, får man til slutt en sirkel (Aarnes, 2014, s. 11-12).
- Aksialstav – En aksialstav er konstruksjonselementer som tar opp krefter i sin lengderetning (UiT, 2012). Aksialstaver kan være søyler, under- og overgurt i fagverk – for eksempel takstoler.

Problemområde

Problemstillingen er utarbeidet på bakgrunn av bedriftens reelle utfordring. Oppgaven tar utgangspunkt i en detaljert arkitekttegning. Hvordan takkonstruksjonen skal konstrueres, produseres og monteres er uvisst. For å svare på problemstillingen vil vi ta utgangspunkt i geometrien og tegningens arkitektoniske utforming. Vi ønsker å komme frem til en ny løsning som er mulig å benytte til både mindre og større bygg enn det tegningen tilsier. Ingen synlige aksialstaver vil si at den innvendige delen av taket følger takvinkelen og at rommet i bygget skal være helt fritt for synlige strekkstag eller noen form for støtte. Bygget skal ha skråtak med toppunkt i senter av bygget hvor takvinduet av vesentlig størrelse plasseres. En betydelig funksjon for vinduet er å ivareta en naturlig konveksjon av inneluften. Størrelsen av vinduet avhenger derfor av byggets volum. Prefabrikasjon og rask montering er ønskelig, da resten av huset er prefabrikkert som veggelementer og kan monteres på kort tid.

1.4 Omfang

Oppgaven ble gitt som en særdeles åpen problemstilling, og det må settes begrensninger slik at oppgaven og målet blir konkretisert. Dette avsnittet utdyper og avgrenser problemstillingen.

For å svare på *hvordan taket bør konstrueres*, må det settes noen forutsetninger avhengig av *hvem* som skal bygge, *hvor* byggene skal reises og *ønsker* fra bedriftens side. Dette er faktorer som har avdekket svakheter ved eksisterende løsninger. Den mest aktuelle konstruksjonen, som er anvendt i importerte hus fra Canada, benytter en stor andel stål i konstruksjonen for å ta opp hovedkreftene. Man unngår noen vanskelige beregninger, men vi ser ikke nødvendigheten.

For *hvem* det gjelder, vil også evnen til prefabrikasjon fra et praktisk rettet synspunkt være sentralt. Med utgangspunkt i bedriftens erfaring med bygget fra Canada er det ønske om å redusere monteringsgraden. Veggkonstruksjonen ligger godt til rette for prefabrikasjon og rask montering. En tilsvarende løsning for takkonstruksjonen vil skape en hustype med svært kort byggetid og små byggeplassutgifter. Bedriften har kun prosjekterende og administrativ kompetanse, ingen utførende stab. Det utførende leddet er kostnadsdrivende i produksjonsprosessen og utgiftene ønskes minimert. Prefabrikasjon og monteringsvennlighet er et sentralt tema i vårt arbeid, i den grad det ikke går på bekostning av konstruksjonssikkerhet. Her vil takprodusentens evne til nøyaktig produksjon være en viktig faktor.

Et annet premiss er *hvor* det skal bygges. Her er transport, tilgjengelighet og økonomi viktige faktorer. Økonomiske betraktninger er en naturlig konsekvens av bedriftens og oppgavens fokus på praktisk gjennomførbarhet. Vi forholder oss til lokale materialer og produsenter og sikter mot en realistisk, gjennomførbar løsning av takkonstruksjonen. Ut over dette er ikke økonomiske betraktninger inkludert oppgaven. Detaljer mht. transport er ikke omtalt i oppgaven, siden dette varierer fra byggeplass til byggeplass.

Sikkerhetsaspektet begrenses til konstruksjonssikkerhet. HMS og andre sikkerhetsbetraktninger inngår ikke i denne oppgaven. Vi vil ikke omtale generelle krav til tak som tetthet, isolasjonsverdi, lufting mm. siden det ikke er unikt for konstruksjonen. Det løses

med å velge preaksepterte ytelser så langt det går. Der konstruksjonens særegenhet fører til komplikasjoner av generelle krav vil vi spesifiserer detaljene. Økologisk og økonomisk bærekraft, gjennom benyttelse av lokalt trevirke og lokale bedrifter, er prioritert i prosjektet. Dette skal likevel ikke gå på bekostning av prefabriking, konstruksjonssikkerhet og montering.

Med prinsippbasert løsning mener vi at løsningen har et gyldighetsområde før den må endres. I hovedsak gjelder dette hvor stort taket kan bli før opptredende krefter blir for store og løsningen må endre slik at den kan dimensjoneres for større krefter. For å vurdere monteringsvennlighet og tidsbruk vil vi ta utgangspunkt i vår egen faglige vurdering, og Gaia Homes sin tidligere erfaring. Vi vil også benytte oss av informasjon fra leverandører av sirkulære hus i Nord-Amerika og lokale bedrifters kunnskap og erfaring. Utover dette inngår ikke egen studie om monteringsvennlighet og tidsbruk i oppgaven. Vi tar utgangspunkt i at en takprodusent skal lage takelementene og ser realistisk på muligheten for modulbaserte løsninger.

1.5 Definisjoner

I dette kapittelet vil vi definere ord og uttrykk som vil benyttes i oppgaven. Begrepene defineres med utgangspunkt i at leseren kjenner til byggetekniske standarduttrykk. Alminnelige uttrykk vil derfor ikke vektlegges.

Utnyttelsesgrad

I henhold til NS-EN 1990 Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner kapittel 1.5, er utnyttelsesgraden forholdet mellom dimensjonerende kapasitet og dimensjonerende kraft for en konstruksjonskomponent (Standard Norge, 2016a, s. 8-14). Dette er en prosentvis framstilling av hvor mye en konstruksjonsdel utnytter sitt potensiale på bakgrunn av gjeldende lover og standarder. Det må ikke forveksles med hvor mye en konstruksjonskomponent faktisk tåler før den *ryker*.

Konstruksjonspraksis

God konstruksjonspraksis innebærer at bygget er utformet med enkel lastnedføring slik at flest mulig krefter tas opp med strekk- og trykkrefter. Ingen store lastkonsentrasjoner er ønskelig. Dette vil i praksis si flest mulig bærepunkter, symmetrisk utførelse og enkel kraftfordeling (Egenes, 2018, s. 30).

Kubbing

Med kubbing mener vi spikerslag mellom limtrebjelkene. De har til hensikt å holde bjelkene i ønsket posisjon, gi økt stabilitet i konstruksjonen og muliggjøre festing av andre bygningskomponenter som himlingspanel, undertak mm. (Spigerverk, 2017).

Taktro

Det er sjiktet som legges på den bærende delen av taket. For eksempel bordtak av trepanel, asfaltplater el. (SINTEF Byggforsk, 2015a).

Raft

Med raft mener vi overgangen mellom vegg og tak. Altså hvor utsiden av ytterveggen og undersiden av takbjelkene møtes (SNL, 2009).

Precut

Precut eller prekapp er en form for prefabrikasjon hvor konstruksjonskomponenter kappes til eksakt riktig lengde før de fraktes til byggeplassen. Dette er som regel takbjelker som kappes, men det kan også være samtlige konstruksjonskomponenter av råbygget som sendes som et byggesett til byggeplassen (Glasø, 2011, s. 2).

1.5.1 Uttrykk

Følgende uttrykk er uten offisiell definisjon. Uttrykkene er basert på prinsipper i sirkulær byggemetode som er brukt for å forenkle rapporten.

Hetta

Kransen rundt takvinduet. Dette er en liten del av taket som er tekket som resten av taket og som går i fra bunnen på takvinduet og ca. en meter nedover takflaten. Dens funksjon er å muliggjøre at luftespalten som går langs hele takflaten er åpen i toppen samtidig som det ikke kommer regnvann inn i konstruksjonen. Hetta overlapper lufteåpningen i toppen, og sørger på denne måten for at vannet renner ned fra takvinduet, på selve hetta og videre ned på elementene.

Trykkring

Med trykkring mener vi en ring som ligger rundt det sirkulære vinduet i mønet. En ring som har til hensikt ta opp alle trykkrefter som bjelkene mobiliserer og ta opp alle skjærkrefter i vertikalretning som følge av skjevlast.

Strekkring

Lenger ned på taket går kreftene over fra trykk til strekk og strekkringen kommer inn i bildet. Strekkringen kan være en ring som går rundt hele konstruksjonen i ytterkant, for eksempel i overgang tak/veggelement. Den har til hensikt å ta opp all strekkraft som bjelkene mobiliserer. Strekkringen kan sammen med trykkringen – i teorien – gjøre taket selvbærende, ringene er derved to svært sentrale konstruktive elementer.

2 Teori

Teorikapittelet er utarbeidet på bakgrunn av oppgavens tema og problemstilling. I delkapittel 2.1 vil vi ta for oss det spesielle ved sirkulære konstruksjoner. I delkapittel 2.2 vil vi ta for oss teori om materialvalg før vi i 2.3 utdypet teorien bak utregning av laster og bærende konstruksjonsdeler. Teorikapittelet beskriver særtilfellene en sirkulær takkonstruksjon introduserer. Målet er å tolke og beskrive tilfellene, for å vise forståelse rundt krefter og hensikten med sirkulære tak.

2.1 Sirkulære takkonstruksjoner

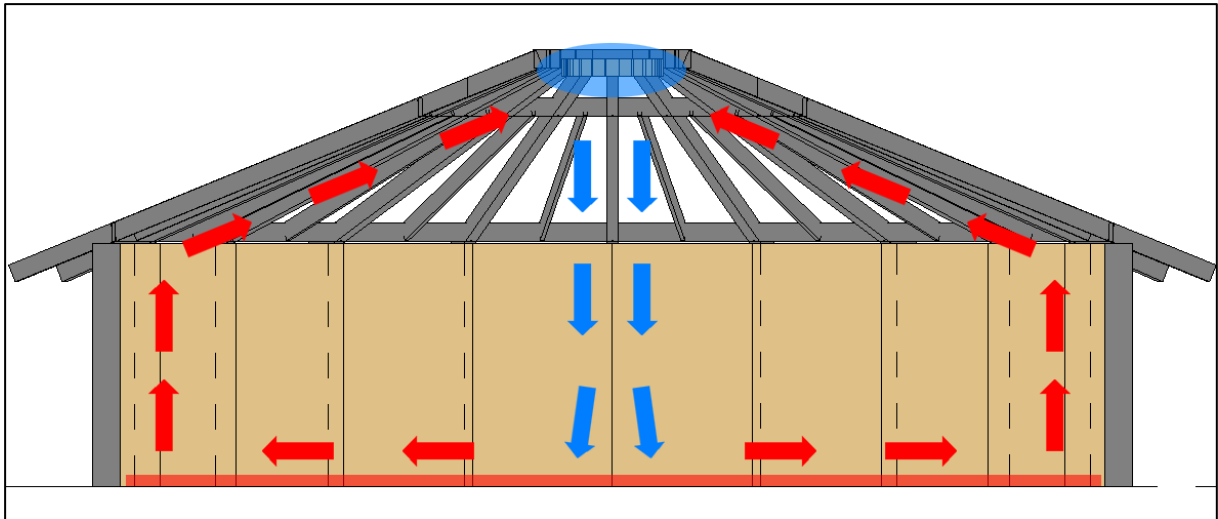
Sirkulære konstruksjoner har historisk sett vært blant de aller tidligste former for boligbygging i kulturer over hele verden (Attia, 2010). En mulig årsak til dette kan tenkes å være knyttet til naturen, hvor sirkulære eller konsentriske former er betydelig mer vanlig enn rektangulære og kvadratiske former.

Med framvekst av sivilisasjon og økt populasjon i tettbygde områder, ble nomadesamfunnenes og en del tidlige bondesamfunns sirkulære bygningsformer satt til side for en mer kompakt struktur, nemlig den kvadratiske eller rektangulære geometrien (Attia, 2010). Det finnes flere fordeler med sirkulære bygninger sammenlignet med det vi nå regner som konvensjonelle bygninger.

Den aerodynamiske egenskapen til en sirkelformet bygning gjør at vindkreftene på vegger og tak blir sterkt redusert sett i forhold til en kvadratisk, rektangulær eller irregulær bygning. Ingen plane overflater eller kanter, betyr at vinden vil bevege seg langs og rundt bygningen på en naturlig måte fremfor å avgi vesentlige trykk- og strekkrefter (Attia, 2010).

Sammenligner man den sirkulære, den kvadratiske og den rektangulære geometrien, vil man finne at den sirkulære formen er den mest arealeffektive gitt den samme omkretsen som de andre formene (South, 2009). Teoretisk sett betyr dette at man får mer rom for den samme mengden materialer og at man behøver mindre materialer for å omslutte det samme rommet som en kvadratisk eller rektangulær bygning. Mindre materialer utgjør mindre kostnader og har dessuten en positiv innvirkning på CO_2 -avtrykket knyttet til byggingen (Inhabitat, 2017).

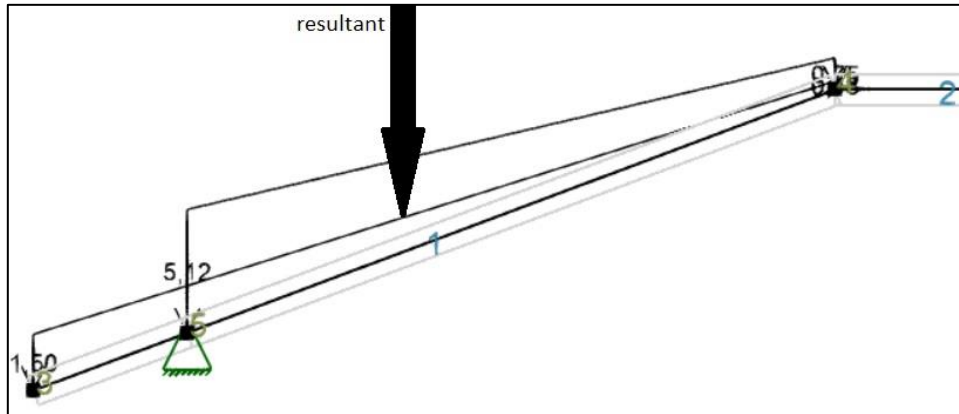
Runde hus med en åpen takløsning, samt med glasskuppel eller takvindu i sentrum av takmønet vil også ha fordelen av en naturlig luft- og temperaturkonveksjon. Varm luft stiger oppover mot og langs det isolerte taket. Glasskuppelen eller takvinduet vil på grunn av en større U-verdi og en kaldere overflate senke temperaturen på luften som resulterer i at luften synker nedover igjen mot gulvet (Inhabitat, 2017). Prosessen vil være kontinuerlig så langt det er en temperaturforskjell mellom luften inne og glasskuppelen.



Figur 1: Illustrasjon av den naturlige konveksjonen i bygget, eget bilde

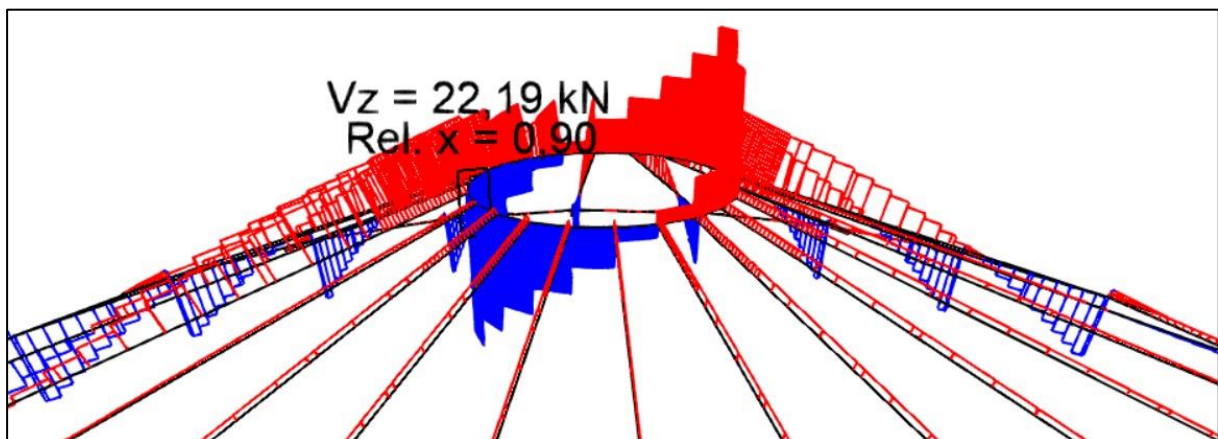
Lastfordeling

Lastfordelingen i en sirkulær bygning, kontra tradisjonelle rektangulære konstruksjoner, er lik på den måten at aktuelle lover og standarder er på lik linje gjeldende. Likevel eksisterer det noen forskjeller. Lastarealet per takbjelke er trekantet, noe som er en stor fordel da resultanten blir vesentlig nærmere opplageret (veggen) enn om lastarealet hadde vært rektangulært. Dette gir et mindre dimensjonerende moment om y-aksen på takbjelkene (Bell, 2017). Bildet viser den mest ugunstige lastsituasjonen i denne sammenheng, uten snølast på takutstikk.



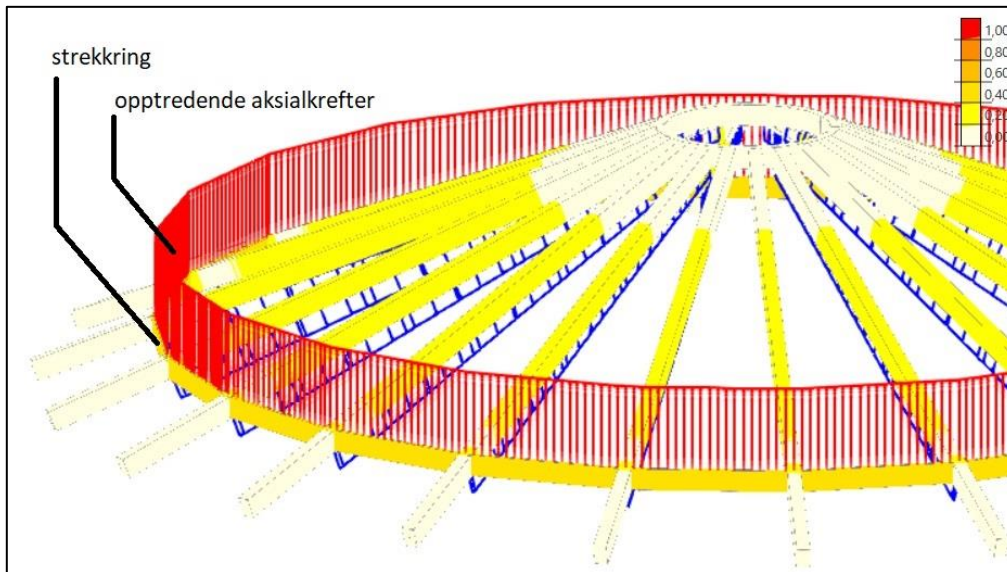
Figur 2: Resultant, eget bilde fra Focus Konstruksjon

All last fordeles symmetrisk på samtlige takbjelker, så lenge lasten er lik over hele taket. Symmetri og unngåelse av store lastkonsentrasjoner er kjent som god konstruksjonspraksis (Egenes, 2018). Når lasten ikke lengre er lik over hele taket, eksempelvis med snø på halve takflata, så kan det by det på noen utfordringer. Som vist på bildet under så mobiliseres vesentlige skjærkrefter i z-retning i trykkringen i sentrum.



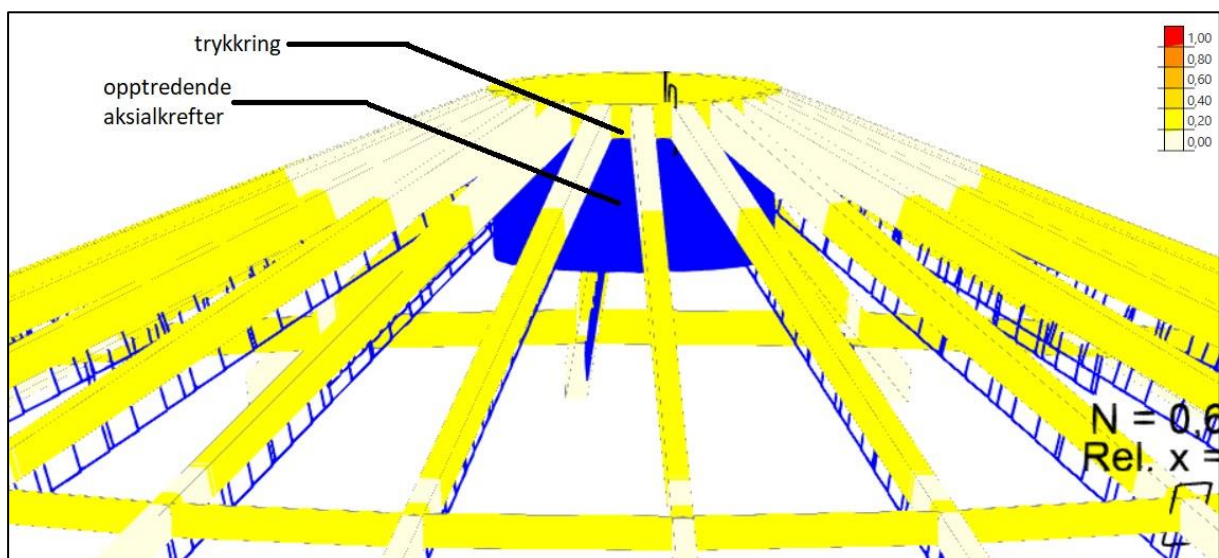
Figur 3: Skjærkraft i sentrum, eget bilde fra Focus Konstruksjon

Ved jevnt fordelt last på takflaten vil aksialkreftene i strekkringen fordele seg jevnt rundt hele ringen. Bjelkene mobiliserer horisontale krefter som tas opp av ringen. Bildet viser et symmetrisk lasttilfelle og illustrerer hvordan lastene typisk kan opptre i en sirkulær konstruksjon med strekkring:



Figur 4: Strekkring og opptredende strekkrefter i rødt

På samme måte som strekkringen, vil trykkringen få symmetrisk kraftfordeling i det gitte lasttilfellet. Opptredende aksialkrefter vil i verdi være like store i trykk- og strekkringen dersom lastbildet er symmetrisk.



Figur 5: Trykkring og opptredende trykkrefter i blått

2.2 Hvorfor velge tre

2.2.1 Konstruktive egenskaper

Treverk er et lett formelig materiale med en rekke egenskaper som gjør det konstruktivt aktuelt i denne takkonstruksjonen og konkurransedyktig i forhold til andre materialer. Lav vekt åpner opp for mange muligheter for arkitekter og ingeniører som ønsker å lage konstruksjoner med lette bæresystemer og samtidig ha et arkitektonisk særpreg. Lav vekt betyr at densiteten, ρ , er lav siden treet har en organisk oppbygning, en isolerende egenskap, hovedsakelig fordi det er plass til luft og vann i treet celler (Thue, 2016).

Tre er et hygroskopisk materiale, noe som betyr at det tar opp og avgir fukt til omgivelsene (Thue, 2016, s. 309). Det kan by på problemer, men er også en egenskap som kan benyttes til sitt fulle potensiale. Cellene vil svulle og krympe, alt ettersom hvor mye vann som er med i diffusjonen. Derfor kan treverk krympe, vri seg i flere retninger og sprekke, samt svulle og holde på fuktighet. Materialestyrken til treverk er derfor fuktighetsbetinget og dette blir representert i klimaklasser.

Det blir sett på som en fordel at trær har en naturlig temperatur- og fuktighetsregulering som ikke naturlig forekommer i andre produkter. Materialer av tre har høy varmekapasitet, men lav varmeledningsevne (SINTEF Byggforsk, 2003). Lav varmeledningsevne betyr i praktisk forstand at overflater føles varmere. Et tilfredsstillende komfortkrav er derfor enklere å oppnå.

En av fordelene til treet er at man kan benytte alle overflatene til å sammenføre andre konstruksjonsdeler, samtidig. Tre er sammensatt av fibere og kalles et *anisotrop* materiale, som betyr at egenskapene varierer i forhold til fiberretningen. Det innebærer at strekk og trykk i fiberens retning kan lett bli tatt opp, men opptrer de på tvers av fibre tåler materialet mindre. Derfor må det tas hensyn til kreftenes angrepsretning ved dimensjonering (Thue, 2016).

2.2.2 Miljømessige fordeler

Bruken av tre i konstruksjoner har både fordeler og ulemper. Tre er et bærekraftig materiale som minimerer CO₂-avtrykk sammenlignet med andre alternativer. Den viktigste faktoren for miljøet er CO₂-avtrykk; utslipp under produksjon og ved deponering/avfall. I alle planter og trær foregår *fotosyntesen* som bruker karbondioksid, vann og lysenergi til å produsere sukker og oksygen. I følge Kolbein Bell (2017) er noen av de viktigste egenskapene til treet å ta karbon fra luften og binde det. Ved treet død, ved forråtnelse eller brann, blir karbonet frigjort tilbake til luften. Så lenge vi sørger for at tilveksten er lik forbruket, kan vi si at skogen er klimanøytral. Dersom tilveksten holdes konstant og tømmeret som ellers dør blir brukt som treprodukter, vil total lagring av karbon være større enn utslippet.

Under de forutsetninger at tilveksten er større enn forbruket og bearbeidingen foregår på en bærekraftig måte, kan produkter av tre bidra til å motvirke drivhuseffekten (Treindustrien, 2013). Ifølge en rapport fra NINA (Framstad, Stokland og Hysten, 2011) ser man at det største akkumulerte opptaket av CO₂ per arealenhet stammer fra eldre boreal løvskog, men at ny lagring går svært sakte. Det er svært store arealer med gammel skog som vokser sent og har lite tilvekst, spesielt i forhold til skogarealet med yngre skog som vokser raskere. Det er underforstått at yngre skog har raskere og mer kvalitetsrik lagring av CO₂ per arealenhet i forhold til eldre skog. Ny skog gagnar miljøet, siden det akkumuleres karbon raskere per arealenhet ny skog. Begrepet *tilvekst* brukes fordi trær vokser naturlig over nesten hele verden, derfor er det riktig å si at trær i utgangspunktet er et bærekraftig produkt. På denne måten er trær i utgangspunktet et bærekraftig produkt. Eksempelvis kan det som ikke brukes til å lage materialer brukes til trefiberisolasjon eller biobrensel. Det betyr at tømmeret blir brukt fullt ut og relativt lite avfall blir produsert (Treindustrien, 2013, s. 4).

Treteknisk og SINTEF har utarbeidet en rapport som sammenligner karbonavtrykk av bygging av tre, i forhold til tilsvarende løsninger i stål og betong. Resultatet av undersøkelsen viser at klimagassutslippet er rundt 35 % høyere ved bruk av betong og stål, kontra bruk av tre. I denne sammenhengen var de store «synderne» for utslipp relatert til sjakter og fundament – typiske betongkonstruksjoner. I tillegg ble det i undersøkelsen brukt kryssfinerelementer og det ble lagt vekt på bæresystem, sjakter og fundament (Tellnes *et al.*, 2013). I en undersøkelse ved Norsk institutt for bioøkonomi ble det ført en LCA – livsløpsvurdering – analyse fra flere vitenskapelige artikler. Denne rapporten konkluderer

også med det samme, nettopp at de fleste studier indikerer at det er en merkverdig fordel for miljøet å bygge med tre, kontra stål og betong (Hill og Zimmer, 2018).

Ved en oppfatning at bruken av tre, sammenlignet med stål og betong som de mest vanlige materialene brukt i dag, gir det mening for oss å velge tre som materiale. Et åpenbart bærekraftig og naturlig produkt som hovedmateriale i et prosjekt som skal fremme naturens gode sider, samt være beskyttet mot de dårlige, er et godt utgangspunkt i prosjekter som dette.

2.2.3 Lokal kompetanse

Norge innehar stor ekspertise på bruken av tre. Mye av det norske treverket har god kvalitet og vi produserer gode, konkurransedyktige materialer. I 2017 var andelen skog i Norge på 38% av norsk landareal (Dalen, 2017). Den største delen av skogen finner vi i Sør-Norge og i denne sammenhengen vil det si at bedriften har tilgang til lokale ressurser. Dette er en fordel, ikke bare for det økonomiske aspektet, men også for den lokale kompetansen i bygdene (Statskog, 2018). Elementer kan fabrikeres hos en lokal bedrift, et lokalt snekkerfirma kan ta tilbudet og lokale ingeniører kan ta ledelsen.

2.2.4 Estetikk

Ved å oversette tradisjonelle og eldre metoder til det moderne kan man oppnå ettertraktede funksjoner. Slike funksjoner kan være naturlig fuktregulering, isolering, lav vekt, lufting og monteringsvennlighet. Det faller også naturlig å tenke at treverk er naturnært og når man går inn i et slikt bygg – entrer man ikke bare en bolig, men et rolig og stressfritt miljø (Nyrud og Bringslimark, 2012, s. 3-4). Treverk gir friheten til å bygge et sikkert bæresystem, i tillegg til å ha den arkitektoniske fremtoningen som ønskes. Derfor gir det et godt grunnlag for bygg som skal fremme slike tilstander for sinnet; et rolig, kontrollert miljø som understreker det naturlige, i en blanding av tradisjonelle og moderne metoder.

2.3 Laster

Snølast

Beregning av snølast i Norge skal foregå i henhold til NS-EN 1991-1-3: Allmenne laster, snølaster. Karakteristisk snølast avhenger av byggets geografiske plassering og høyde over havet på byggestedet. Det beregnes ut ifra følgende uttrykk (Standard Norge, 2018):

$$S_k = S_{k0} + n * \Delta S_k, \quad \text{der } n = \frac{(H - H_g)}{100} \quad \text{NA.4.1(1)}$$

S_k er karakteristisk snølast på mark, S_{k0} er grunnverdien og ΔS_k er et tillegg som kun gjelder hvis byggestedets høyde over havet er høyere enn H_g , høydegrensen. Alle de nevnte parameterne finnes i tabell NA.4.1(901).

Formfaktor, som avhenger av takets utforming og helling, hentes ut fra samme standard:

Takvinkel α	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8(60 - \alpha)/30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 \alpha/30$	1,6	--

Figur 6: Lastfaktorer for snølast, Tabell 5.2 (Standard Norge, 2018)

Når det gjelder takets geometri finnes det ingen standard for manglekantede sirkulære tak. Det finnes en standard for buede tak, vi har valgt å bruke de generelle bestemmelsene da de gir størst formfaktor og størst last. I vårt tilfelle gir ikke takets geometri mulighet til å lede økte laster i kombinasjon snø og vind, snarere tvert imot, vi er på denne måten på sikker side.

Bygg som defineres som småhus mm. har pålitelighetsklasse 1. Dette gir mulighet for reduksjon av variable laster med faktoren $k_{Fi} = 0,9$, i henhold til NA.A1.3.1. Klassifisering finnes i tabell NA.A1(901) i samme standard (Standard Norge, 2016a, s. 10).

Vindlast

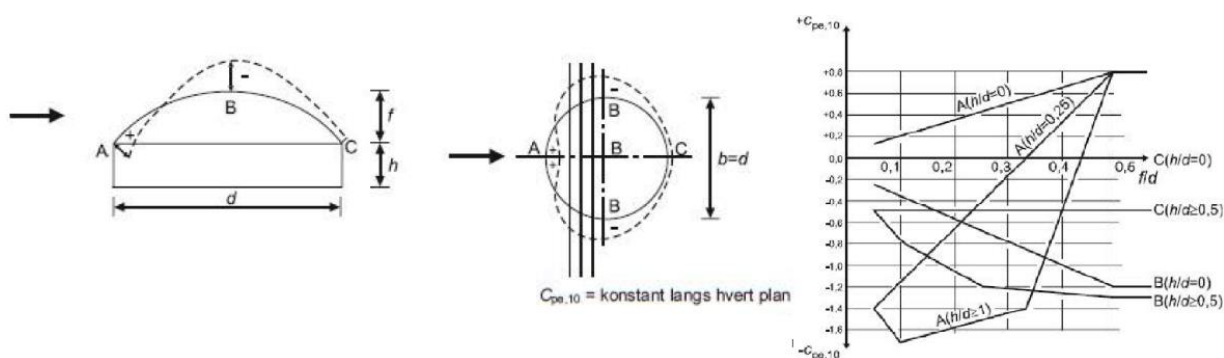
Beregning av vindlast i Norge skal gjøres i henhold til NS-EN 1991-1-4 Allmenne laster - Vindlaster. Vindlasten avhenger av geografisk plassering og byggets geometri. $V_{b,0}$, referansevindhastigheten, leses av i tabell NA.4(901.1) for det gjeldende stedet (Standard Norge, 2009b). Vindhastighetstrykket $q_p(z)$, som tar høyde for kastvind, byggets høyde over mark og terrengruheten for området, kan regnes ut fra følgende formel:

$$q_p(z) = k_w * v_{2b,0}^2 \quad \text{L-35(Fallsen, 2011)}$$

Vindlastfaktor k_w kan enten leses av i tilhørende tabell eller regnes ut manuelt. For å finne vindtrykket på utvendige overflater, w_e , benyttes følgende formel:

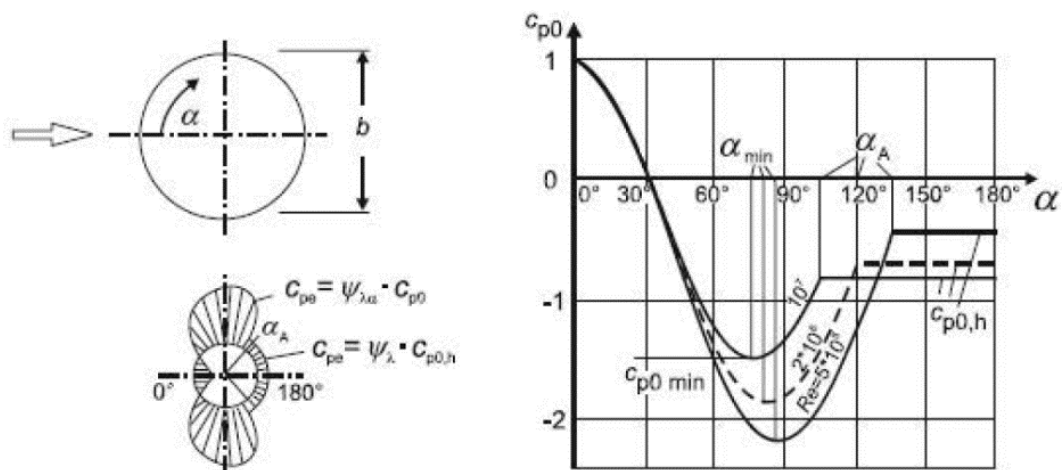
$$w_e = q_p(z) * c_{pe} \quad \text{5.2(1)(Standard Norge, 2009b)}$$

c_{pe} -verdier for taket hentes ut fra gjeldende verdier for kupler på sirkulære bygg, da det ikke finnes egne verdier for manglekantede sirkulære bygg med 22 kanter eller mer. Følgende figur er gjeldende:



Figur 7: $c_{pe,10}$ verdier for kupler, 7.12 (Standard Norge, 2009b)

Formfaktor for utvendig trykk på vertikal vegg hentes fra utvendig formfaktorer for sirkulære sylindere siden formfaktor for manglekantede sirkulære bygg kun går opp til attenkantete bygg. Følgende illustrasjon er gjeldende:



Figur 8: Trykkfordeling for sirkulære sylindere, figur 7.27(Standard Norge, 2009b)

Egenlast

Egenlast regnes i denne oppgaven som tyngden av selve konstruksjonen. For taket gjelder det alle bestanddeler som inngår i takkonstruksjonen, fra himlingspanel til takteking. Egenlast blir i utgangspunktet regnet ut på grunnlag av volum og tyngdetetthet for hver del, for så å bli lagt sammen. Tyngdetetthet kan hentes fra produsentenes egne produktblader eller fra SINTEF sine gjeldene tabeller (SINTEF Byggforsk, 2013b). I samme blad finner man tabeller for tyngde av sammensatte bygningsdeler. Dette er preaksepterte verdier med en liten margin til sikker side.

Lastkombinering

Lastkombinering i bruddgrensetilstand skal beregnes iht. NS-EN 1990 (Standard Norge, 2016a). Avhengig av hvilken type last det gjelder, blir den karakteriske lasten multiplisert med en tilhørende lastfaktor γ_f . Faktoren tar høyde for usikkerhet knyttet til fastsettelse av lasten og dens faktiske virkning på konstruksjonen, samt reduksjon for sannsynligheten for samtidighet av flere laster. Videre har vi Ψ -faktor som avhenger av bygningstype og lasttype.

Lastkombinasjon som gir størst opptredende spenning for den bygningskomponenten som skal dimensjoneres skal brukes. Siden det ikke alltid mulig å se for seg flere lastkombinasjoner må beregnes for å få frem de største spenningene. Ved dimensjonering av

for eksempel vindforankring kan lastfaktor for egenlast sløyfes, da man vil få større opp tredende spenninger ved å gjøre det på denne måten (Landgraff, 2017c).

2.4 Statikk

Våre manuelle beregninger for krefter er basert på tradisjonell likevektsbetraktning. I oppgaven blir kreftene våre beregnet på to måter; én ved likevektsbetraktning i et to-dimensjonalt system og én i rommet. I boken til Bell (2014) forklares bakgrunnen for å beregne slike situasjoner; kort fortalt benyttes tre likninger som må være sanne for at et legeme skal være i statisk likevekt; og i et ortogonalt system er det tre betingelser som må være oppfylt:

$$\Sigma F_x = 0$$

Følgende betegnelse beskriver at legemet ikke beveger seg horisontalt og kan for eksempel være viktige for laterale krefter i overgangen mellom et tak og en vegg.

$$\Sigma F_z = 0$$

Følgende betegnelse beskriver at et legeme ikke beveger seg vertikalt.

$$\Sigma M_p = 0$$

Følgende betegnelse beskriver at alle momenter som påvirker et legeme skal utligne hverandre, ellers blir det rotasjon.

Ved overgangen fra planet til rommet introduseres en betingelse til for å sikre seg mot bevegelse i den tredje retningen, y:

$$\Sigma F_y = 0$$

Følgende betingelse er for likevekt i rommet, og hindrer bevegelse inn og ut av planet dersom summen er null.

Dersom et legeme blir utsatt for krefter og uavhengig om det er i likevekt, vil det skape nye opptredende krefter i gitt legeme. Kreftene kalles for snittkrefter og innebærer bøyemoment, skjærkraft og aksialkraft (Bell, 2014, s. 49). Dette er tre type krefter som har stor betydning for denne oppgaven. For eksempel en kubbing, som i vår sammenheng antas å være en stav mellom to bjelker, vil ta ren strekk og dermed kun være påkjent av aksielle krefter. En takbjelke som blir påvirket av krefter i flere retninger vil få opptredende spenning på grunn av bøyning.

2.5 Bærende konstruksjonsdeler

2.5.1 Takbjelker

Dimensjoneringen av takbjelkene tar utgangspunkt i opptredende bøyepenninger og skjærspenninger beregnet manuelt og med beregningsprogrammet Focus Konstruksjon. For beregning av dimensjonerende fastheter er fasthetsfaktoren k_{mod} og partialfaktoren for materialeegenskaper og bestandighet γ_M brukt. Fasthetsfaktoren k_{mod} bestemmes ut i fra tabell 3.1 i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b) på bakgrunn av materiale, klimaklasse og lastvarighet. Med limtre som materiale i klimaklasse 1 og halvårslast/mellomlangtidslast som lastvarighetsklasse, vil fasthetsfaktoren k_{mod} ha en verdi på 0,80. Partialfaktoren for materialeegenskaper og bestandighet γ_M bestemmes ut i fra tabell NA.2.3 i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b) på bakgrunn av materiale og vil for limtre ha en verdi på 1,15.

For å finne nødvendig tverrsnitt på takbjelkene og for å kontrollere kapasiteten på tverrsnittet mot opptredende bøyepenninger, tas det utgangspunkt i kontroll (6.11) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b). Denne kan vi videreføre og omgjøre for å finne det nødvendige motstandsmomentet til tverrsnittet $W_{y,min}$ og dermed finne nødvendig bjelketverrsnitt A . Karakteristisk skjærfasthet for kombinert limtre $f_{v,g,k}$ bestemmes ut fra tabell 4 i NS-EN 14080 fra Standard Norge (2016c) og vil for limtretypen GL30c ha en verdi på $3,50 \text{ N/mm}^2$.

2.5.2 Trykkring

Trykkringen, som er sammensatt av korte segmenter av C24 konstruksjonstrevirke, dimensjoneres for de opptredende trykkspenninger og skjærspenninger øverst i

takkonstruksjonen. Materialeegenskapene som brukes for å beregne den dimensjonerende fastheten for C24 konstruksjonstrevirke finnes i tabell 1 i NS-EN 338 fra Standard Norge (2016b), hvor karakteristisk trykkfasthet parallelt med fiberretningen $f_{c,0,k}$ og karakteristisk skjærfasthet $f_{v,k}$ er oppgitt. For C24 konstruksjonstrevirke er $f_{c,0,k}$ lik 21 N/mm^2 og $f_{v,k}$ lik 4 N/mm^2 .

Tverrsnittet kontrolleres for den dimensjonerende trykkspenningen i fiberretningen etter uttrykket gitt i punkt 6.1.4(1)P i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b).

Dimensjonerende trykkspenningen i fiberretningen $\sigma_{c,0,d}$ beregnes ved å dividere den dimensjonerende trykkraften i fiberretningen N_{Ed} på bruttoarealet til trevirke A .

For videre beregning av opptrendene krefter som skjærspenning og skjærkraft, se vedlegg for formler.

2.5.3 Strekking

Dimensjoneringen av strekkstagene som til sammen utgjør strekkingen, tar utgangspunkt i stålqualität S 355. Som en forenkling har Standard Norge (2015) gitt verdier for flytegrensen f_y og strekkfastheten f_u i tabell 3.1 i NS-EN 1993-1-1. For stålsorten S 355 er flytegrensen oppgitt som 355 N/mm^2 og strekkfastheten som 490 N/mm^2 . Videre består hver forbindelse mellom to strekkstag av bolter i fasthetsklassen 8.8. Ved dimensjonering av boltene er det i tabell 3.1 i NS-EN 1993-1-8 fra Standard Norge (2009a) anbefalt å bruke de karakteristiske verdiene som er gitt for flytegrensen f_{yb} og for strekkfastheten f_{ub} . For bolter i fasthetsklassen 8.8 gir det en flytegrense på 640 N/mm^2 og en strekkfasthet på 800 N/mm^2 . Partialfaktorene for kapasitet γ_{Mi} som er benyttet i dimensjoneringene, er hentet fra NA.6.1(1)2B i NS-EN 1993-1-1 fra Standard Norge (2015).

Viser til vedlegg for dimensjoneringskriteriene for strekkingen. Dette innebærer kapasitetsberegning for både strekkstag, sveiser og bolter.

2.5.4 Forbindelser

For dimensjonering av forbindelser er det hensiktsmessig å først beregne minimums innbyrdes- og kant-/endeavstander for festemidlene i forbindelsen. Minimumsavstander

beregnes på bakgrunn av hvilket festemiddel som anvendes, diameteren på forbinde-
 ren d og vinkel mellom fiberretning og lokal kraftretning. For bolter er det i tabell 8.4 i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b) gitt formler for beregning av minsteavstander. For skruer med glatt skaft og en diameter på mer enn 6 mm gjelder ifølge punkt 8.7.1(4) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b), de samme reglene som for bolteforbindelser. For skruer med glatt skaft og en diameter på 6 mm eller mindre gjelder ifølge punkt 8.7.1(5) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b), de samme reglene som for spikerforbindelser. Formler for beregning av minsteavstander for spikerforbindelser er gitt i tabell 8.2 i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b). Minsteavstander mellom aksialbelastede skruer er gitt i tabell 8.6 i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b).

Utgangspunktet for å beregne den effektive dimensjonerende kapasiteten til en forbindelse $F_{v,ef,Rd}$ er gitt i punkt 8.1.2 i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b). Her er det gitt formel for beregning av den effektive karakteristiske kapasiteten til en forbindelse $F_{v,ef,Rk}$.

For å beregne den effektive dimensjonerende kapasiteten til en forbindelse $F_{v,ef,Rd}$ multipliseres uttrykket over med fasthetsfaktoren for lastvarighet og klimaklasse k_{mod} , dividert med partialfaktoren for materialeegenskaper γ_M .

Det effektive antallet forbindere i én rad i fiberretningen n_{ef} har ulike verdier eller beregningsmetoder avhengig av hvilken forbindelsestype det gjelder. For en rad med spiker i fiberretningen er $n_{ef} = n^{k_{ef}}$, hvor n er antall spiker og k_{ef} er gitt i tabell 8.1 i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b). Dersom en gruppe med skruer eller bolter belastes med en kraft parallelt med skaftet er det gitt i punkt 8.7.2(8) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b) at $n_{ef} = n^{0,9}$. For én rad med skruer eller bolter i fiberretningen og med last vinkelrett på fiberretningen er det ifølge punkt 8.5.1.1(4) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b) gitt at $n_{ef} = n$. For last i fiberretningen er n_{ef} gitt ved den minste verdien enten av n eller av beregnet verdi.

$F_{v,Rk}$ er den karakteristiske kapasiteten til hver forbinde-
 ren per snitt. Det skilles mellom enkeltsnittede og dobbeltsnittede forbindelser, som igjen deles inn i ulike forbindelsestyper basert på materialene som forbindes.

Trevirkets karakteristiske densitet ρ_k er for konstruksjonsvirke gitt i tabell 1 til 3 i NS-EN 338 fra Standard Norge (2016b) og for limtre gitt i tabell 4 og 5 i NS-EN 14080 fra Standard

Norge (2016c). Tre- eller platetykkelsene er angitt som t_1 og t_2 , hvor t_1 er tykkelsen for komponent 1 og t_2 for komponent 2. Det karakteristiske flytemomentet $M_{y,Rk}$ blir for bolteforbindelser beregnet etter punkt 8.5.1.1(1) og for skrueforbindelser beregnet etter punkt 8.3.1.1(4) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b).

For beregningsgrunnlaget her, som omfatter enkelt- og dobbeltsnittede forbindelser, forbindere og kapasitet, se vedlegg.

2.5.5 Brann

Branndimensjonering av trekonstruksjoner i Norge utføres i henhold til NS-EN 1995 ut fra de krav som stilles i TEK17, avhengig av byggets utforming og bruksområde (Bell, 2017).

I henhold til §11-4(3), kan vi bruke følgende preakseptert løsning 4: «Byggverk i brannklasse 1 og risikoklasse 4 kan ha hoved- og sekundærbæresystem med brannmotstand R 15» (Direktoratet for byggkvalitet, 2017). Det vil si at bygget skal tåle den dimensjonerende lasten for ulykkesgrensetilstand under en brann i 15 minutter (Landgraff, 2018a).

I henhold til TEK 17 §11-2 Tabell 1 (RKL) og §11-3 Tabell 1 (BKL), så havner konstruksjonen vår i følgende klasser gjengitt i tabell under:

Beskrivelse	Bolig
Etasjer	2
Brannklasse (BKL)	1
Risikoklasse (RKL)	4
Krav	R-15

Tabell 1: Oppsummering fra TEK 17

For å finne det gjenværende tverrsnittet etter x antall minutter med brann, regnes forkullingsdybden d_{ef} ut på følgende måte:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 * d_0 \quad (4.1) \text{ (Standard Norge, 2010a)}$$

Her er $d_{char,n} = \beta_n * t$, det vil si forkullingshastighet ganger tid. Forkullingshastigheten er spesifisert i Tabell 3.1 i samme standard, og tiden er for vår del 15 minutter. Ut i fra tabell 4.1

samt punkt 4.2.2, kan andre del av formelen for brannforløp under 20 minutter omgjøres til: 0,35 t.

Når forkullingsdybden er trukket fra de eksponerte sidene av konstruksjonsdelen skal det gjenværende tverrsnittet testes med følgende lastkombinasjon:

$$6.11b: G_{kj} + \Psi_{21} * Q_{k1} + \Psi_{2i} * Q_{ki} \quad \text{Tabell NA.A1.3 (Standard Norge, 2016a)}$$

Videre dimensjoneres den aktuelle konstruksjonsdelen med fastheter, fasthetsfaktor og materialfaktor for ulykkestilstanden brann (Bell, 2017).

3 Metode

Valg av metode legger sterke føringer for undersøkelsen og er avgjørende for innsamlingen av data. Det var nødvendig for oss å avklare hvilken metode som ville besvare problemstillingen vår på best mulig måte.

Følgende kapittel vil først begrunne valg av metode i delkapittel 3.1. Deretter vil vi beskrive hvordan vi førte beregninger og hvordan vi innehar god validitet og reliabilitet i delkapittel 3.2

3.1 Metodevalg

Metodevalget i denne oppgaven er todelt; innledningsvis blir det foretatt en skrivebordsundersøkelse for å analysere sekundærdata i form av standarder, tidligere rapporter og bedrifter som datamateriale. Med dette grunnlaget produserte vi ny data gjennom beregninger og simuleringer, for å løse oppgaven.

Før vi ga en fullstendig løsning på problemstillingen ble det først gjort en grundig undersøkelse på hva som allerede eksisterte av løsninger på sirkulære takkonstruksjoner. Slik kunne vi kartlegge styrker og svakheter. Vi har gjort et grundig og bredt søk på nett, men også diskutert med både erfarne tømrere, rådgivende ingeniører, bedriften selv, vår veileder og andre fagpersoner tilknyttet NTNU.

For å få nærmere innsikt i tema og problemstilling besøkte vi Gaia Homes tidlig i prosessen. Her ønsket vi å få bedre kjennskap til deres kunnskap på området, deriblant har de ført et relevant byggeprosjekt i Alvdal og vært på bedriftsreise i Nord-Amerika. Videre ble det sendt ut forespørsler om tips og bistand til større aktører og nettverk innen økosamfunn som Norsk Økosamfunn og Global Ecovillage Network. Etter en omfattende kartlegging, utviklet vi våre egne og nye forslag til løsninger. Med utforming av enkle fysiske modeller samt innspill fra nevnt fagpersonell ble ideene forbedret. Svakheter ved våre løsninger ble eliminert, og til slutt ble det tatt utgangspunkt i den beste løsningen, for å optimalisere den på grunnlag av våre erfaringer og kompetanse, oppgavens spesifisering, bedriftens ønsker og eksterne innspill.

Beregningen ble ført på tre måter; én med manuelle beregninger, én med beregningsverktøy i 2D og én med hjelp av beregningsverktøy i 3D – i denne sammenhengen brukte vi Focus Konstruksjon. Statikkprogrammet ble brukt for å kontrollere manuelle beregninger, samt for å modellere i 3D, slik at vi fikk et helhetlig bilde av kraftfordelingen. Modellen er sirkulær og symmetrisk, derfor var det svært mye hjelp i denne modellen for å visualisere fordelingen. For de manuelle beregningene ble programmer som Excel brukt, for å ha en ryddig og organisert prosess, samt mulighet til å føre etterkontroller på en enkel måte.

Analyse av lignende prosjekt

Oppgaven starter med en analyse over hva som er tilgjengelig av løsninger på internasjonal basis. Dette danner en oversikt over eksisterende teknikker.

En metodisk gjennomgang benyttes for å søke opp de løsninger som er å finne. Både veileder og bedrift har kommet med innspill, men den største delen av informasjon finnes ved hjelp av internettsøk. I sistnevnte tilfelle søkes det hovedsakelig i vitenskapelige og konstruksjonsfaglige databaser. Eksempler på dette er Google Scholar, søk i Oria med databaser som Science Direct, Compendex og ASCE Library. Om det foreligger tekniske tegninger, åpner det for muligheten til å foreta beregninger og danne en konklusjon for bruken og utformingen. Dersom det ikke er gitt noen klare spesifikasjoner, må det brukes skjønn og sunn fornuft til å konkludere løsningen så fremt det er mulig. Man «legger merke» til det som ikke er å finne også. Dette legger grunnlag for en innovativ tankegang og mulighet til å finne nye løsninger. Med dette til grunn, danner vi kategorier som skal beskrive hovedprinsippene.

Validitet og reliabilitet

Dersom undersøkelsen gir et tilnærmet, om ikke helt likt, resultat i flere uavhengige undersøkelser gir dette resultatet større troverdighet. Beregninger baserer seg på prinsipper og det kan være flere «veier til mål», noe som legger opp til at beregninger og resultat bør kvalitetssikres.

For å ivareta og fremme god data, er det to begreper som spiller en viktig rolle; validitet og reliabilitet (NTNU, 2015). Validitet kan defineres som «hva undersøkelsen kastet lys over – og om det ga informasjon om det som ble formulert i problemstillingen» (Grenness, 1997, s. 110). For å oppnå høy grad av validitet så vi det som viktig å avdekke majoriteten av de eksisterende løsningene. Derfor ble søket bredt og vi tok kontakt med personer/bedrifter vi

antok var store innenfor området. Beregninger baserer seg på prinsipper og det kan være flere «veier til mål», noe som legger opp til at beregninger og resultat bør kvalitetssikres.

Reliabilitet kan defineres som «hvorvidt målingene som leder fram til de endelige resultatene er utført så nøyaktig at vi kan stole på dem» (Grenness, 1997, s. 113) Med reliabilitet mener vi pålitelighet; det skal være kilder og data vi kan stole på. Triangulering av fremgangsmåter og resultat er eksempel på god skikk for forskning (Flick, 2011, s. 306-307). Dette er et prinsipp vi bruker for å beregne dimensjoner og legge statikkgrunnet. Prosessen er slik: først manuelle beregninger, deretter gjennom et statikkprogram. Manuelle beregninger er todimensjonale og programmet beregner både to- og tredimensjonalt. Slik opprettholder vi reliabiliteten i oppgaven.

3.1.1 Spesielle utfordringer

Utfordringen i denne oppgaven er todelt; å finne en gunstig takløsning til et spesifikt og prosjektert bygg, og samtidig komme fram til en prinsipløsning som kan brukes på tilsvarende sirkulære bygninger. Vi betrakter beregningsmetodene og statikken i denne type konstruksjoner som krevende. Involvert teori og spørsmålene om hvilke forenklinger vi kan foreta oss slik at prinsippene bevares i konstruksjonsteknikk, er av betydelig vanskelighetsgrad.

Opgaven har flere mulige innfallsvinkler og løsninger. Samtidig foreligger det begrenset fagstoff angående sirkulære bygninger. Ingeniørenes alminnelige oppslagsverk, Norske Standarder, har foreløpig ingen beskrivelser eller spesielle krav for slik utforming. Etter bredt, systematisk og internasjonalt rettet søk på området har vi ikke avdekket tidligere relevante forsknings- og utviklingsprosjekter. Det er også vanskelig å få tak i detaljtegningene til dagens relevante produsenter, men med overslagsberegninger og praktiske betraktninger får vi likevel nødvendig utbytte av de ulike produsentenes tilgjengelige fagstoff.

En usikkerhet ved denne metoden er at noen av de løsningene som eksisterer i dag ikke har tilgjengelige beregninger eller tekniske tegninger man kan studere. En løsning på dette er å se på hver løsning det gjelder som et prinsipp. På denne måten er det lettere å simulere og beregne prinsippene med større nøyaktighet. Ved innhenting av sekundærdata kan det være utfordrende å ivareta reliabilitet. Siden det er lite tidligere forskning har det vært opp til oss å

vurdere de enkelte løsningene basert på vår bakgrunn og kompetanse. Dette kan gi opphav til feilkilder i oppgaven.

3.2 Beregninger

Lovverkets hierarki for dimensjonering og prosjektering av konstruksjoner i Norge kan deles inn i tre; Plan og bygningsloven (PBL), Byggeforskrifter (TEK17) dernest Norsk Standard (NS). Det er ikke et krav at NS skal følges. Likevel henviser TEK17 og PBL til NS og bruk av NS gir tilstrekkelig dokumentasjon for oppfylte krav festet i PBL. Derfor er i praksis NS gjeldende og svært mye brukt blant ingeniører i Norge. (Bell, 2017)

3.2.1 Manuelle beregninger

Statikkberegninger er gjort i samsvar med norske standarder, kompendier og forelesningsnotater utgitt ved NTNU Gjøvik. Metodikken gikk ut på å forenkle konstruksjonen, slik at tradisjonelle beregningsmetoder kan brukes for å finne krefter. Siden konstruksjonen er vanskelig å beregne som en fullstendig konstruksjon er det nødvendig å bryte konstruksjonen ned i enkle, todimensjonale elementer for å beregne statikken.

Forbindelsene baseres på norske standarder og forelesningsnotater. Dette ble oppført i beregningsprogrammet Excel for å få en oversiktlig og effektiv gjennomgang.

3.2.2 Beregningsverktøy

For å forsikre at vi har regnet oss frem til riktige dimensjonerende opptredende krefter har vi aktivt brukt beregningsverktøy aktivt for å sammenligne resultatene. Dette har vi gjort både med statikkmodeller for deler av konstruksjonen i 2D, på lik linje med våre manuelle beregninger, og det samme i 3D. Vi har også modellert hele takkonstruksjonen i 3D for å sammenligne resultatene.

For å beregne alle konstruksjonskomponenter og forbindelser har vi brukt Focus Konstruksjon. For beregning av stålkomponentene har vi brukt Focus Konstruksjon og SolidWorks som er et FEM-analyseprogram. For branndimensjonering har vi gjort

nødvendige manuelle beregninger for hånd, etterfulgt av dimensjonering i Focus
Konstruksjon.

4 Resultat

I dette kapitlet introduseres først resultatet av søket som ble gjort i anledning eksisterende konstruksjoner. Representasjonen blir etter metode forklart i kapittel 3.1, sammen med en vurdering av hver enkelt løsning. Videre blir beregnede laster lagt frem, og til slutt hvordan utformingen av de bærende konstruksjonsdelene blir som et resultat av lastene.

4.1 Eksisterende prinsipper

Under følgende delkapitler vil funn, i form av relevante prinsipper og løsninger, bli presentert. Det finnes noen flere sirkulære bygg som kunne nevnes, men mangel på relevans til oppgaven med tanke på problemstillingen, gjør de uaktuelle.

4.1.1 Selvbærende tak

Selvbærende tak er de mest relevante for denne oppgaven. Likevel ser man at det kreves mye av bæresystemene dersom diameteren økes betraktelig.

Mandala Homes

Mandala Homes jobber ut ifra sitt kontor i Nelson, B.C. Canada. Mandala tilbyr et unikt konsept basert på over 70 års erfaring i byggebransjen, og har en rekke løsninger på markedet. Det var nettopp denne bedriften Gaia valgte som leverandør av sitt første sirkulære hus, fordi Mandala ble sett på som ledende aktør i markedet.

I motsetning til andre bedrifter, oppgir Mandala mer teknisk informasjon om sine løsninger (Mandala Homes, 2019a). I tillegg har vi tilgang til et dokument, *Setup Manual*, som fulgte med da Gaia importerte bygget. Denne er svært utfyllende og har flere tekniske detaljer vi har studert nøye. I dokumenter på deres hjemmeside forklarer de hvordan konstruksjonen og monteringen er tenkt. Deres hovedprinsipp for taket er at de har fagverksbjelker, en stålring med vindu i sentrum og dobbel stålkabel som går rundt hele omkretsen, da gjennom samtlige bjelker. Det forklares at taket er frittstående, uten synlige aksialstaver – basert på et såkalt katedralprinsipp (Mandala Homes, 2014). Taket er selvbærende.

Stålringen kommer i forskjellige størrelser avhengig av størrelsen på bygget. Mandala Homes oppgir at størrelsene på ringene kan variere fra 1,2 m til 1,68 m i diameter og har en tykkelse på 4 til 5 ½ tommer. Sammenføyingen av ring og takbjelke er en forbindelse mellom tre og stål. Det er sveisede braketter på stålringen som bjelkene skrues i. Bjelkene installeres på ene siden av braketten og seks skruer av dimensjon 10 mm x 115 mm i forboret hull (Mandala Homes, 2016, s. 30). Denne stålringen må bygges opp på et stillas, ifølge deres veiledning, som skal bestå av precut-elementer av 38 x 140 mm og 38 x 89 mm treverk. Det stilles strenge krav til stillaset siden det skal bygges på plassen og være helt i lodd og i vater (Mandala Homes, 2016, s. 11).

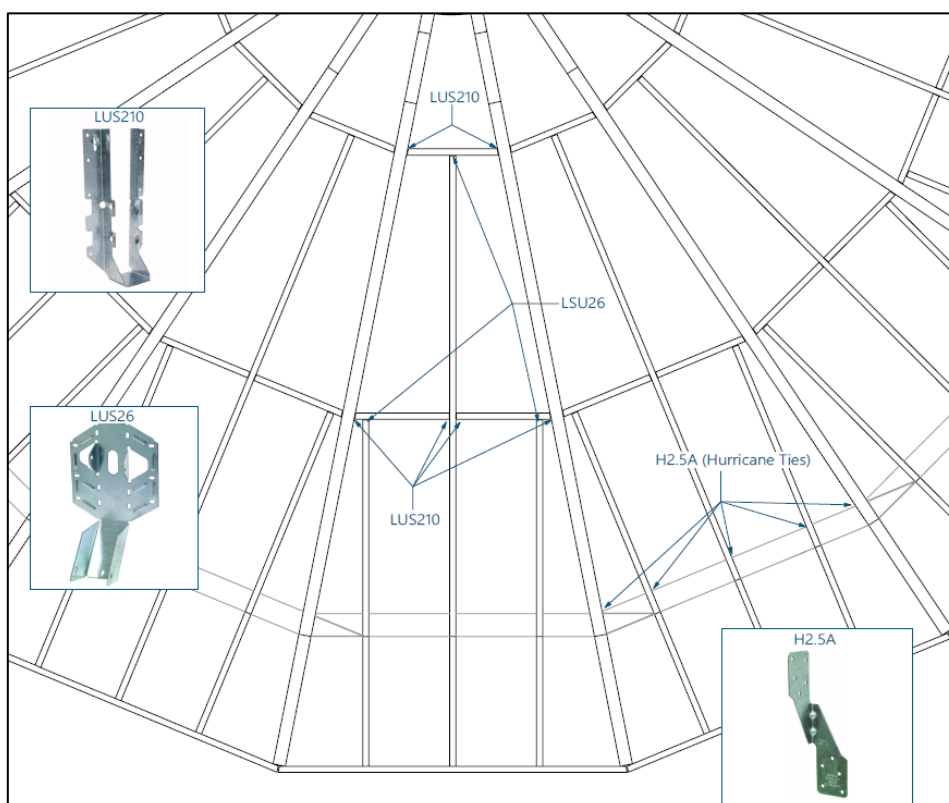


Figur 9: Stillas, Bilde: Mandala Homes (2018)

Måten Mandala Homes velger å holde igjen for strekket i konstruksjonen er å bruke to stålkabler. Disse skal fungere som strekk- «stag», med et forbindelsespunkt der man kan stramme dem. Uttalelser fra brukeren vi har snakket med mener disse har en vanskelig plassering. Det blir dermed vanskelig å etterstramme om det skulle være nødvendig – noe som kan være høyst sannsynlig, én eller to ganger. Det mest overraskende for denne brukeren var at med to meter snø og etter etterstramming så var begge stålkablene slakke. I tillegg får stålkablene en knekk rundt hver takbjelke, noe som er med på å svekke argumentet for at stålkabel for lignende bygninger er en god løsning. I tillegg valgte Mandala Homes å gjøre

mye selv, og problemet viste seg at det var også veldig tidkrevende å sette sammen takelementene slik de ble levert.

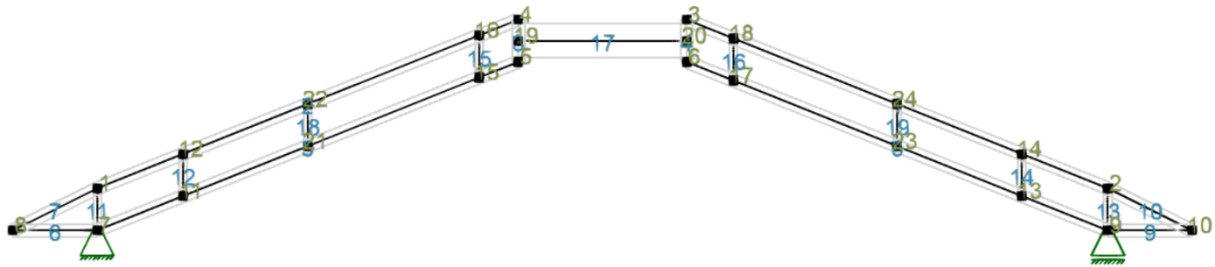
I overgangen mellom bjelke og vegg er det en stålforbindelse av lignende type som vist i figur 10. I samme figur kan man også se overgangene mellom kubbing og bjelker. LUS210 braketten sitter mellom bjelke og kubbing, mens LUS26 er mellom langsgående sperre. Dette er aktuelle løsninger for denne typen montering og tillater litt spillerom. Vi ser potensiale til forbedring og effektivisering i monteringen av elementene her.



Figur 10: Hurricane ties, fastholdinger i overganger. Bilde: Setup Manual Mandala Homes (2016, s. 36)

Ifølge deres nettsider viser de til en generell tidslinje for et anslag over byggetid, helt fra «planlegging» til «slutføring». Ut i fra denne tabellen ser vi at det vil ta inntil fire måneder å sette sammen et fullstendig hus, totalt 12 måneder fra start til slutt (Mandala Homes, 2019b). Dette virker uavhengig av hvilken type hus man velger.

Vår vurdering



Figur 11: Tilnærmet statikkgrunnlag for selvbærende tak, eget bilde

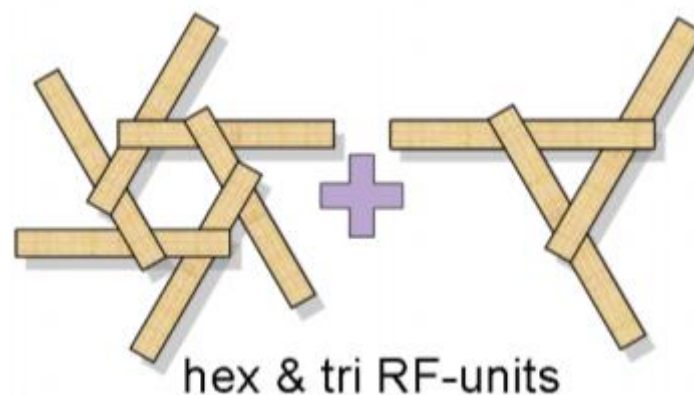
Mandala har flere løsninger og et bredt utvalgt av sirkulære bygg på markedet. Totalt sett mener vi det er litt for mange individuelle deler for effektiv bygging. Stålringen kan by på problemer når det kommer til avstander. Siden stålringen kommer prefabrikkert med 20 til 30 påsveisede braketter, kan dette gi avvik under konstruksjon. Det kreves urealistisk stor nøyaktighet på vinkler og avstander på de påsveisede brakettene og bjelkene. Samtidig er det unødvendig å benytte stålringen i sentrum for å ta opp moment. Ved å gå ned i dimensjon og materiale og heller basere løsningen sin på å ikke ta opp moment, får man en lettere og mer praktisk gjennomførbar konstruksjon.

Stålkablene får en knekk ved overgangen i hver takbjelke. Ved spisse ender og kanter kan en stålkabel få redusert kapasitet, spesielt under store og *uforventede* påkjenninger. En stålkabel innehar en viss stivhet og har derfor et gitt bruksområde. Retningsendring av stålkabelen må skje gradvis rundt noe sirkulært av en viss diameter. Ifølge Norsk Standard skal diameter på følgeledd og spoler ikke være mindre enn 40-60 ganger diameteren til stålkabelen (Standard Norge, 2013). Med utgangspunkt i dette, samt praktisk vurdering, anser vi stålkabelen i denne sammenheng som langt utenfor sitt bruksområde. Ved en hendelse som krever at man må bytte en stålkabel, må man demontere takpanel for å få tilgang stålkabelen. Samtidig må man trolig endre på brakettene til stålkablene for å bytte de. Dette er nok en omfattende operasjon, selv om det er lav risiko for at noe sånn skjer. En enkel løsning på problemet ville vært å ha denne konstruksjonskomponenten tilgjengelig opp under raftet men likevel skjult. Man vil heller ikke klare å etterstramme en stålkabel, som produsenten pålegger, uten å påvirke den enkelte takbjelken. Dette er på grunn av knekken som blir rundt hver bjelke, samt friksjonen som oppstår i det stålkabelen strammes mot sentrum og dras imot stålkabelens strammepunkt. Stålkabelen vil da dra bjelkene mot strammepunktet i stedet for inn mot sentrum.

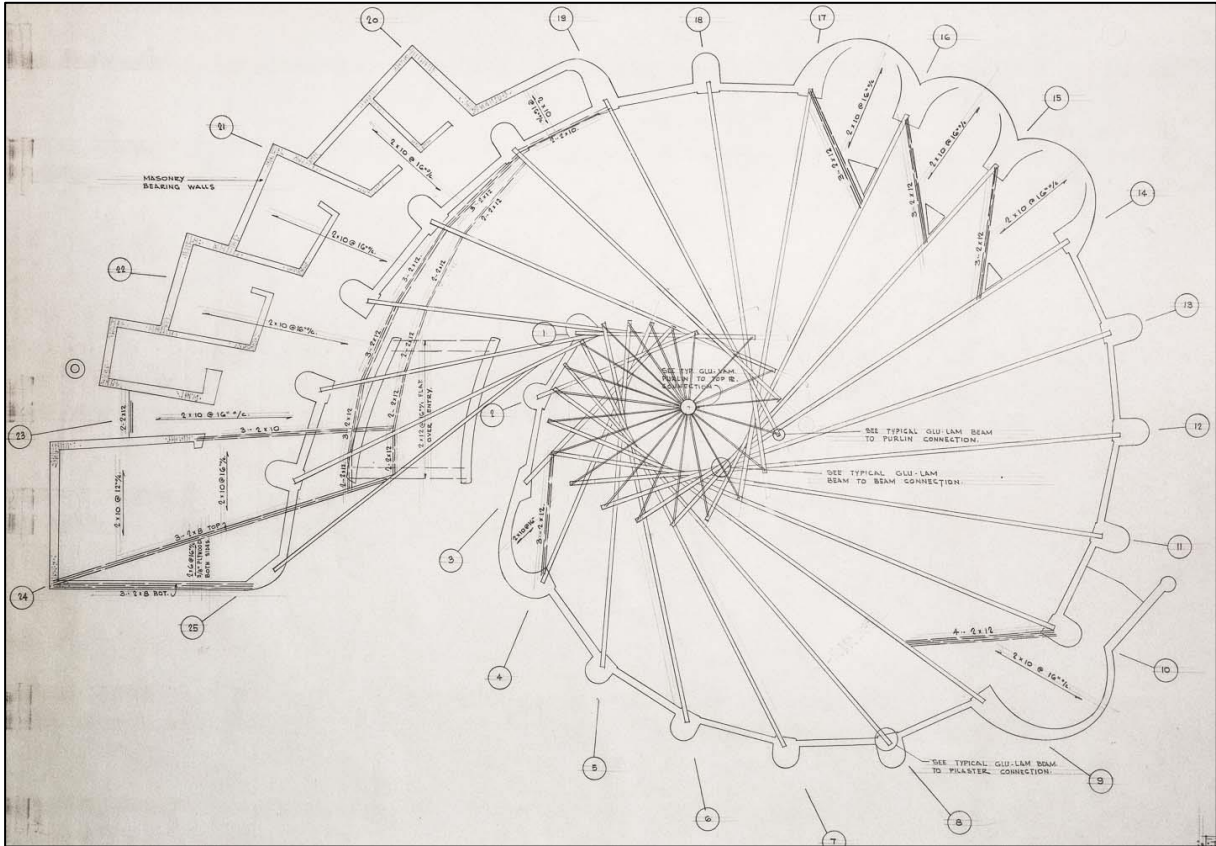
Stillasoppbygningen kan ha mye å si for hvordan man utfører monteringen. Stillaset må bygges på plassen for å få eksakt riktig høyde samtidig som den må være i lodd og vater. For at stillaset ikke skal komme i konflikt med takflatene rundt på den øverste delen, må stillaset være i nøyaktig samme diameter som stålringen. Stillaset må derfor plassbygges med nøyaktighet. Dette er uten tvil tidkrevende og avgjørende for videre montering av takkonstruksjonen.

Reciprocal-metoden

En annen løsning er blant annet slik den romersk-katolske kirken «Precious Blood» i Winnipeg, Canada er konstruert. Det selvberende taket er utformet gjennom en metode kalt *reciprocal* på engelsk. Oversatt til norsk blir dette ordet *gjensidig*. Bæringen baseres på at samtlige bæreelementer bærer hverandre slik at alle elementer låser hverandre i en gitt form. Denne sirkulære formen blir holdt oppe av en innfestning ytterst ved veggen og en sluttet sammenstilling i sentrum der elementene overlapper hverandre. Overlappingen vises på følgende figur:



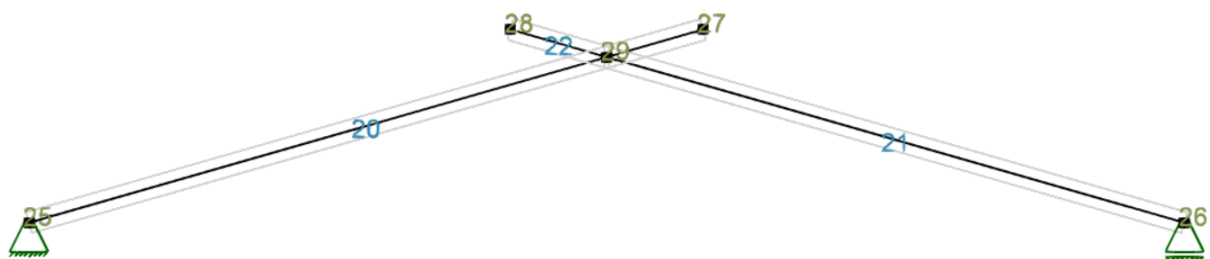
Figur 12:RF-units, eller reciprocal frame units. Bilde: Song et al. (2013)



Figur 13: Arkitekttegning av Precious Blood Church (Gaboury, 1969)

Beregninger på denne konstruksjonsmetoden er svært komplisert og har derfor ikke kunnet benyttes før i moderne tid, grunnet regnekraften til datamaskiner (Song *et al.*, 2013).

Vår vurdering



Figur 14: Tilnærmet statikkgrunnlag for selvbærende tak, eget bilde

Dersom det estetiske uttrykket ved en reciprocal bygning er ønskelig og det trumfer tidsbruk og kostnader, vil en slik løsning være god. Samtidig er det en komplisert byggemetode som

gjør prefabrikeringer i større skala tidkrevende. I tillegg kan kompleksiteten bidra til at de utførende bruker lengre tid, sammenlignet med tradisjonelle byggemetoder.

Konstruksjonen lar seg vanskelig sammenføre med moderne byggeskikk og dagens krav. Metoden skaper vinkler på takbjelkene som ikke står i stil med takflaten, som igjen kompliserer videre bygging av luftespalte, taktro og isolering av taket.

Bolter og festemetoder av stål er ikke et krav ved mindre konstruksjoner, men dersom lengden på bjelker øker vil det være behov for det. Da vil de opptredende kreftene på et tidspunkt bli større enn kapasiteten til rene treforbindelser.

Reciprocal-metoden har i utgangspunktet en grad av prefabrikasjonsvennlighet, spesielt for precut av lengder og innsnitt. Samtidig ser vi store problemer med å produsere moduler bestående av flere elementer, i hvert fall for større konstruksjoner på grunn av kompleksiteten. Eksempler på bruksområde kan være trehytter, campinghytter og lysthus. Det er også mulig å bruke reciprocal-metoden som bæring under et annet tak, slik at utsiden ser helt symmetrisk og rett ut.

Estetiske krav alene fra oppdragsgiver utelukker løsningen, ettersom det er ønskelig å skjule bæringen i himlingen.

Tidligere bacheloroppgave

I 2017 åpnet Gaia Homes for samme problem som bacheloroppgave, på lik linje som i år. Gruppen som tok den for seg kom fram til en løsning vist i vedlegg 7.1. Etter samtale med Eskild Narum Bakken, ble det kjent at de ikke kom helt i mål. Grunnen til det var beregningsevnen og valgt konstruksjonsdetaljer. Gruppen skrev konklusjonen slik:

«Konstruksjonsløsningen betegnes som ukomplett på grunn av usikkerhet rundt sveisen mellom vinkelstål og endeplate samt bruken av kompakt tak» (Jerdal, Berg og Sagvik, 2017).

Detaljene i oppgaven er ikke kjent, kun beskrivelsene tilgjengelig via plakaten.

Vår vurdering

Plassering av forbindelsene begrenser grad av prefabrikering. For at montering skal være mulig, må takelementet være åpent, enten fra oversiden eller undersiden. Isolering og

ferdigstillelse av selve elementet må derfor gjøres på byggeplass. Vi ser potensialet for å endre antallet forbindere og strekkringen for å øke grad av prefabrikkering. Samtidig er det mulig å minimere materialforbruket med hensyn til maksimale avstander for plater og spikerslag. Løsningen mangler en måte å ta opp skjærkrefter ved skjevlast og er sikkerhetsmessig ikke tilfredsstillende. Løsningen baserer seg på kompakte tak, det vil si at det mangler luftespalte som blant annet kan medføre ising (Bøhlerengen, 2019).

4.1.2 Kombinert bæring

Konstruksjoner med kombinert bæring viser seg å benytte innspenning i sentrum. For eksempel kan det være både en trykkring og strekkring i senter som fungerer som bærer taket. I tillegg låses veggene fast i hverandre for å ta opp laterale krefter og legge mindre press på innspenningen i senter. På denne måten kan man få store spenn på taket, men ofte på bekostning av taktykkelse og takvinkler. Metoden kan brukes fra små til store bygg, men ved økning i størrelse så synker materialeffektiviteten.

Deltec Homes

Deltec Homes har produsert boliger og lokaler siden år 1968 og er basert i Asheville, North Carolina (Deltec Homes, 2019c). Deres mål er å produsere energieffektive hus av høy kvalitet som varer i kommende generasjoner. De hevder også at de leverer en byggeprosess som tradisjonelle metoder ikke kan tilby. Dette kan de si på grunnlag av at de legger vekt på rask utførelse gjennom til dels prefabrikkerte elementer og precut materialer i byggingen (Deltec Homes, 2019b)

Kort fortalt er bygget i seg selv delt opp av veggelementer, taksperrer, stålringer for trykk og strekk og fundament. Oppgaven vil kun undersøke taket og valget deres mot utforming, festemetode og utnyttelse. For takkonstruksjonen benyttes det fagverksbjelker til bæresystem, en trykk- og strekkring av stål i sentrum, samt spikerplater nederst på saksene som tar opp strekk og holder saksene sammen (Deltec Homes, 2019a). Spikerplatene skal i tillegg binde taksaksene sammen og fjerne all horisontal bevegelse. I motsetning til andre løsninger, velger Deltec Homes å ha en strekkring i sentrum som skal hindre at taket synker. Takbjelkene er som man ser veldig høye mot sentrum, noe som tyder på at de skal være innspennet for å ta opp moment som opptrer ved at tyngden på taket «presser» ned og ønsker å flate ut. Alle plater er

av kryssfiner, for gulvet og vegger kommer de precut, ellers vil entreprenøren sørge for resten. Utover dette er mye informasjon utilgjengelig for oss.

Monteringen av taket begynner med at trykk- og strekkringen reises på stillas i sentrum av bygget. Dette er en spesiell anordning som kommer med bygget, og kan demonteres og sendes tilbake igjen. Stillaset støtter takssaksene under montering, helt til spikerplatene og taktekket er på plass og bygget er selvbærende (Deltec Homes, 2019a).



Figur 15: Installasjon, fagverksbjelker med ring. Bilde: Deltec Homes (2015b)

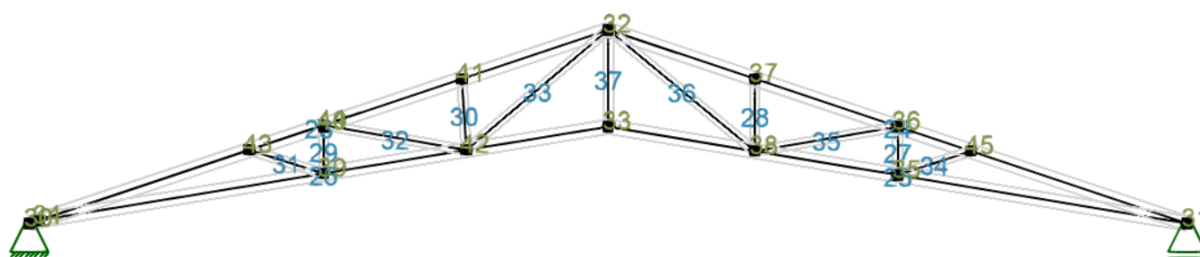
På figur 16 kan man se at de bruker kubbinger for å gi økt stabilitet og stivhet. I tillegg er det satt på ekstra støtter på annenhver saks. Dette er trolig gjort for å øke stabilitet i konstruksjonen og motvirke vipping, samt bidra til fordeling av krefter i anleggsflaten på veggen. Annenhver saks faller naturlig i hver veggskjøt, så vi antar at utformingen skal hjelpe til med å fordele kreftene utover veggene, kontra rett i skjøten. I tillegg er det fungerende spikerslag for platene som blir lagt på



Figur 16: Kubbinger, plater og støtte til saksene. Bilde: Deltec Homes (2015a)

På sin hjemmeside angir Deltec Homes at et fullstendig strukturelt skall står ferdig oppført innen én uke eller mindre (Deltec Homes, 2019b).

Vår vurdering



Figur 17: Tilnærmet statikkgrunnlag for kombinert bæring, eget bilde

Måten Deltec Homes velger å ta opp kreftene i konstruksjonen, ut ifra det vi ser, er å bruke momentinnspenning i takbjelkene ved sentrum av takkonstruksjonen og låse av veggene med spikerplater. Dersom det skulle oppstå en svikt i avlåsningen av veggene, vil det ved større belastninger være kritisk at selve taket har kapasitet nok til å ta opp de horisontale kreftene. En slik kombinert løsning svekker konstruksjonssikkerheten til en viss grad dersom takkonstruksjonen og veggene er avhengig av hverandre. I sentrum av taket er det brukt stålring for å ta opp trykk, strekk og moment.

Vi mener en lettere løsning for konstruksjonens helhet bør være å ikke benytte seg av momentinnspenning, da det fører til et høyere tak med mer materialer og tyngre konstruksjonskomponenter. Samtidig ser vi at effekten av innspenning i sentrum ikke vil være optimal, siden løsningen baserer seg på en fullstendig innspent fagverksbjelke som spenner over byggets halve bredde. At takbjelkene blir fullstendig innspent er i realiteten svært tvilsomt og sannsynligheten for at konstruksjonen vil gi noe etter ved belastning er stor. Det er også mangel på en glasskuppel eller takvindu i sentrum av taket, noe som går ut over det estetiske med løsningen, samt inneklimate i bygget. Her vil man ikke ha nytte av den naturlige luft- og temperaturkonveksjonen man får ved å montere en glasskuppel eller takvindu. Høydeforskjellen mellom yttertak og himling, som utgjør tykkelsen på taket, er ugunstig da den varierer fra størst i sentrum og minsker ut mot raftet. Dette kan føre til at det vil være vanskelig å oppnå konstante isolasjonsverdier i hele taket, hvor det spesielt ut mot raftet kan bli for lite isolasjon på grunn av plassmangel. Løsningen baserer seg heller ikke på prefabrikkerte elementer, men helt ordinære fagverksbjelker som monteres på tradisjonelt vis. Dette gjør at resten av taket som taktro, isolasjon og takteking etc. må monteres på byggestedet. Dette samsvarer ikke i våre øyne som en effektiv byggeprosess.

Stålløsning

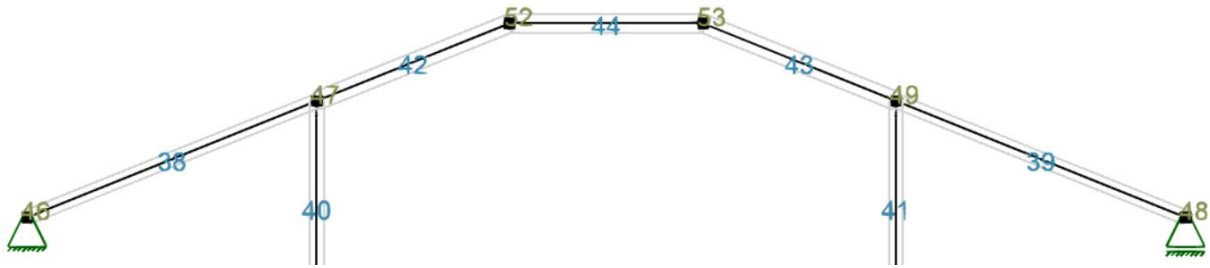


Figur 18: Kombinert bæring, redigert

Bildet er hentet fra bedriftens arkiv og skal angivelig være tatt i et økosamfunn i Rydebäck, Sverige. Løsningen benytter stål som primært bæresystem for å ta opp trykk og skjevlast. Til sekundærsystem blir det benyttet tre, hvor det blir utformet med enkle parallelle bjelker med tverrgående kubbinger. I senter er det en type stålring.

Bæresystemet i stål består av seks radielle HUP-profiler og I-profiler på tvers imellom. Langs hver HUP-bjelke er det påsveiset braketter for innfesting av sperrene. Det ser ut til at det er fire skruer i forbindelsen. Videre legges sperrer opp i I-profilet og festes kant i kant med spiker/skrue-plate. Øverst i mønet sveises HUP-bjolkene fast i plater og boltes fast med totalt 12 bolter per bjelke. Forbindelsen mellom langs- og tverrgående bjelker er utført med påsveiset plate og I-bjelken er lagt an på bærende vegger på stållask. På resterende del av taket blir det videre utført med bruk av tre og stålplater. Hovedbæringen fortsetter med treprofil både på langs og på tvers. Sperrene antas å være 76 x 152 mm og HUP-Bjolkene med en bredde på 150 mm.

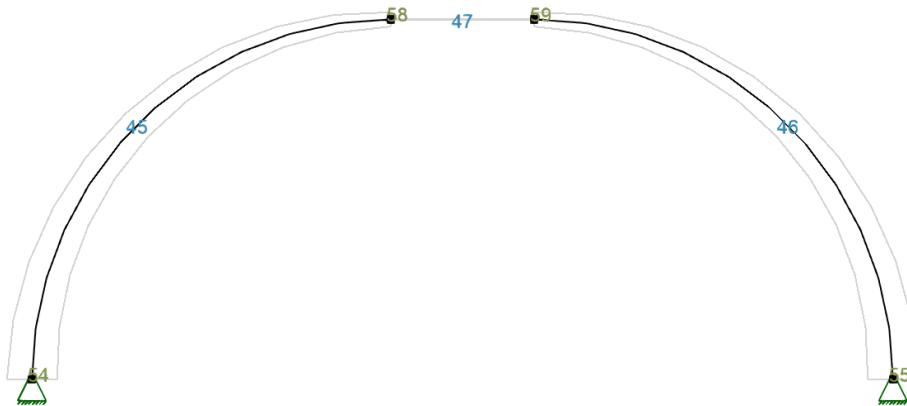
Vår vurdering



Figur 19: Tilnærmet statikkgrunnlag for kombinert bæring, eget bilde

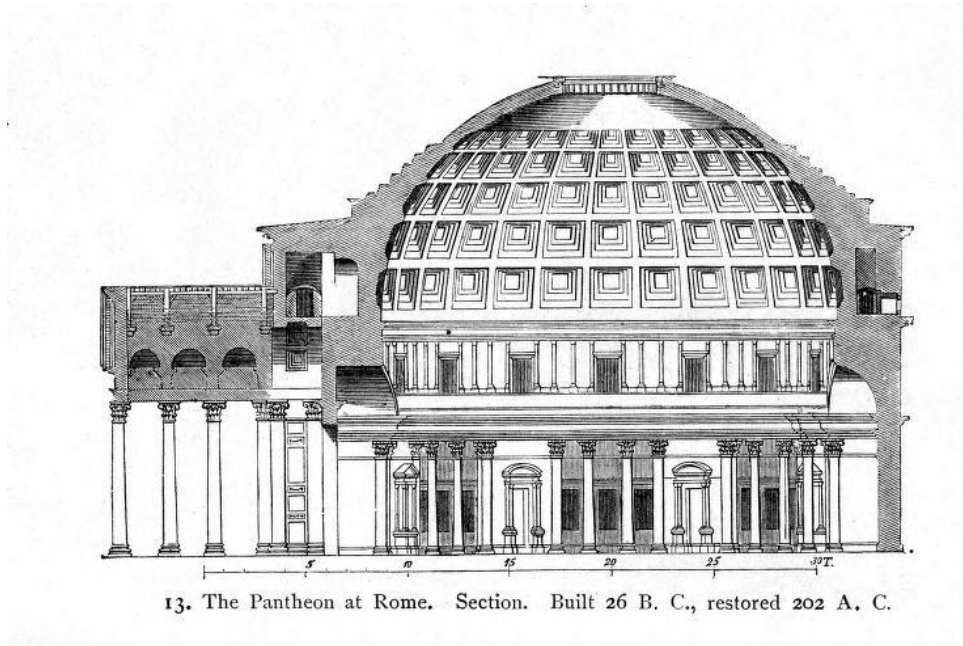
Det er åtte I-bjelker som ligger an på bærende innervegger. Dette gjør diameteren veldig liten i forhold til det vi må ta hensyn til i oppgaven vår. Vi ser på det som en unødvendig bruk av stål for å bære taket på den måten. For resten av utførelsen er det samtidig brukt veldig mye materialer, det er svært lav senteravstand og standardiserte avstander fravikes. Dette fører til at konstruksjonen har unødvendig mange forbindelser. Tre/stål-forbindelsene med stålbraketter kan ta lang tid å produsere og krever stor nøyaktighet. Å velge stål i denne konstruksjonen vurderer vi som fordyrende i alle ledd; produksjon, materialkost og montering. Montering av konstruksjonen vil utvilsomt tidkrevende i forhold til hvor liten den er. Grunnet mye stål krever det mer isolasjon for å hindre kuldebroer i taksjiktet samtidig som utformingen av taket gjør det vanskeligere enn vanlig å isolere. Stålbjelkene kompliserer også montering av resterende konstruksjonskomponenter, spesielt taktro. Løsningen begrenser mulighetene for prefabrikkering. For oss er dette en ulogisk løsning å benytte i denne sammenhengen.

4.1.3 Historiske konstruksjoner



Figur 20: Tilnærmet statikkgrunnlag for Pantheon/kuppel, eget bilde

Rotunde, som er en annen betegnelse for sirkulære konstruksjoner, er benyttet gjennom hele historien. Med utgangspunkt i et sirkulært plan, blir denne formen brukt i flere kjente byggverk, for eksempel Pantheon, Baptistry i Piazza dei Miracoli og Temple Church i London. Det gjelder ikke bare de store, anerkjente religiøse byggene, men også de mindre, tradisjonelle som ble brukt til alt fra beboelse til matkonservering. Eksempler på dette er blant annet tipi, yurt, samiske gammer, lavvo og iglo. Dette er små bygg med andre konstruksjonstekniske krav, men prinsippene for kraftfordeling er de samme. Byggene med kupler utpeker seg spesielt for denne oppgaven. Monumentet Pantheon, bygget rundt året 120, illustrerer ingeniørkunsten og effektiviteten av byggeteknikkene som ble brukt (Rome.info team, 2003). Undersøkelsen av bygget lærte oss om fordeling av krefter og hvordan Romerne unngikk kollaps ved å styre de laterale kreftene ned i fundamentet. Selv om flere av prinsippene er de samme, skiller den seg bort fra det vi er ute etter å designe siden bygget er sylindrerformet.



Figur 21: Snittegning av Pantheon (Pantheon, 118-125)



Figur 22: Eksempel på bæresystem med trykkring i en Yurt, Dalbéra (2011)

Et annet eksempel er Domen i Firenze. Taket i katedralen er bygget i renessansen og er en av de mest anerkjente med en høyde på 114 meter. Taket har en oktogonal form bestående av marmor, sandstein og murstein, og uten bæring i tre. Takets spenn, uten noen indre strekkstag, illustrerer viktigheten av å føre horisontale krefter ned i vertikale bygningselementer.



Figur 23: Domen i Firenze, Scheele (2003)

Mange av konstruksjonene som faller inn under denne kategorien yter nytte, men ikke rettet mot problemstillingen annet enn at vi drar lærdom av dem.

4.2 Laster

Oppsummering av lastberegningenes resultater for oppgaven, er nedenfor beskrevet i tabellform. For utregninger i Excel se vedlegg 7.3.

Egenlast	$0,7 \text{ kN/m}^2$	Fra punkt 42, blad 471.031 (SINTEF Byggforsk, 2013a) Manuell beregninger er utført i tillegg for kontroll. Se vedlegg for lastberegning
Snølast på mark - S_k på tak - S	$4,0 \text{ kN/m}^2$ $3,2 \text{ kN/m}^2$	S_k gjelder for Alvdal kommune under 650moh S blir videre multiplisert med faktoren $k_{Fi} = 0,9$ i lastkombineringslikningene (Standard Norge, 2018).
Vindlast tak - w_{\max} vegg - w_{\max}	$-0,66 \text{ kN/m}^2$ $0,63 \text{ kN/m}^2$	Verdiene for utvendig vindlast gjelder spesifikt for de aktuelle bygninger i Alvdal kommune (Standard Norge, 2009b).

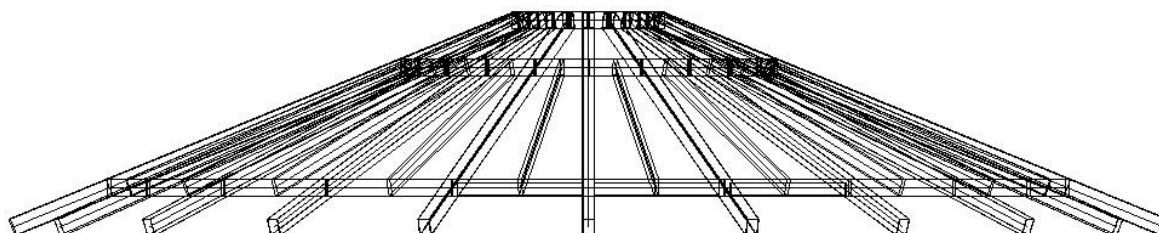
Tabell 2: Laster

4.3 Bærende konstruksjonsdeler

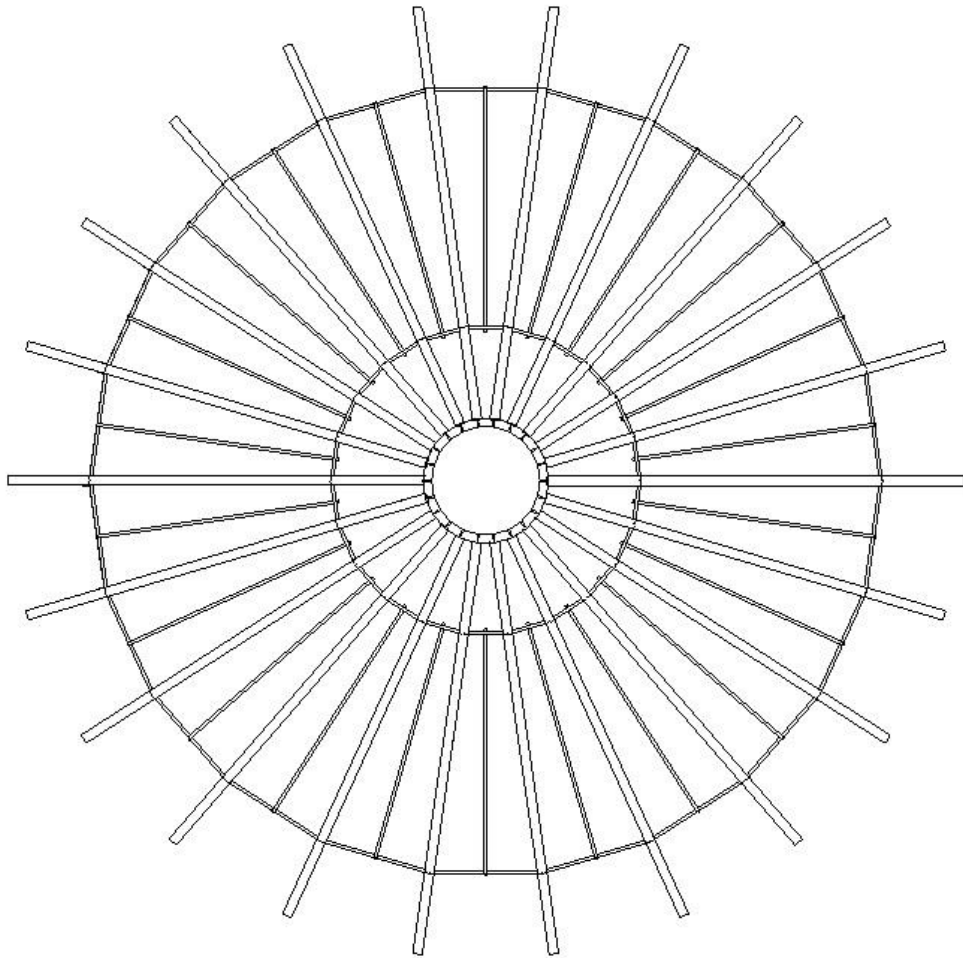
Her kommer en beskrivelse av de bærende konstruksjonskomponentene ved vår løsning. Det presiseres at en del komponenter ved løsningen er fjernet på illustrasjonene. Dette for å illustrere de aktuelle komponentene best mulig.

Utforming

Utformingen baserer seg på 22 like prefabrikkerte takelementer som er tenkt produsert på en elementfabrikk eller lignende. Vi vil presentere en modulbasert løsning hvor takelementene er formet som trekanter, som er bygd med bærende takbjelker av limtre på hver side med tilstrekkelig sekundærbjelker. Mellom sekundærbjelkene vil det være spikerslag og innblåst isolasjon. På oversiden stiftes vindsperre på før et luftesjikt med 36 mm sløyfer skytes fast med spikerpistol. Over luftesjiktet monteres taktro av OSB-plater. På elementets underside kan også himlingspanel monteres på fabrikk uten at det vanskeliggjør montering av taket.



Figur 24: Bærende konstruksjonsdeler fra siden, eget bilde



Figur 25: Bærende konstruksjonsdeler sett ovenfra, eget bilde

På neste side presenteres en oppsummering av spesifikasjoner ved komponentene i oppgaven, beskrevet i tabellform. For utregninger i Excel se vedlegg.

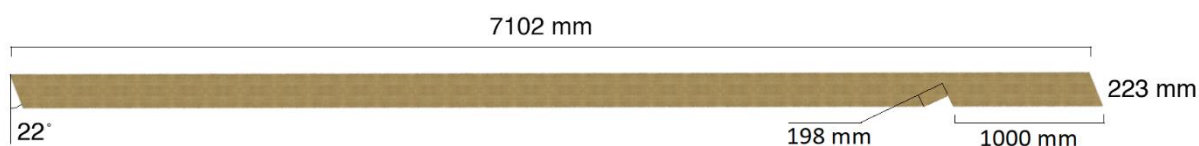
Konstruksjonsdel	Dim. krefter	Utnyttelsesgrad	Valgt løsning
Takbjelker	$M_{y,d} = 16,52 \text{ kNm}$ $V_{z,d} = 16,48 \text{ kN}$	77% 61%	<u>Limtre</u> Kvalitet/type: <i>GL30c</i> Dimensjon: <i>70 mm x 223 mm (2 stk. per takelement)</i>
Trykkring	$N_{Ed} = -102,32 \text{ kN}$ $V_{z,d} = 22,19 \text{ kN}$	83% 91%	<u>Trevirke</u> Kvalitet/type: <i>C24</i> Dimensjon: <i>48 mm x 223 mm (3 stk. per takelement)</i>
Forbindelse - trykkring	$V_{z,d} = 22,19 \text{ kN}$	95%	<u>Stålplate</u> Kvalitet/type: <i>S355</i> Dimensjon: <i>8 mm</i> <u>Skrue</u> Kvalitet/type: <i>Fransk treskrue</i> Dimensjon: <i>12 mm x 160 mm (2 x 3 stk.)</i>
Strekkring	$N_{Ed} = 101,34 \text{ kN}$	93%	<u>Stålplate</u> Kvalitet/type: <i>S355</i> Dimensjon: <i>8 mm</i> <u>Sveis</u> Kvalitet/type: <i>S355</i> Halsmål: <i>3 mm</i>
Forbindelse - strekkring	$N_{Ed} = 50,67 \text{ kN}$ $V_{Ed} = 35,22 \text{ kN}$	36% 95%	<u>Bolt</u> Kvalitet/type: <i>8.8</i> Dimensjon: <i>20 mm x 200 mm (2 stk.)</i>
Vindforankring	$N_{Ed} = 4,31 \text{ kN}$	97%	<u>Skrue</u> Type: <i>Utvendig treskrue</i> Dimensjon: <i>6 mm x 90 mm (3 stk. per takelement)</i>

Tabell 3: Oppsummering av komponentdimensjonering

4.3.1 Takbjelker

Takbjelkene ligger an på veggene der to veggelement møtes og går inn mot byggets sentrum, hvor de staker imot konstruksjonens trykkring. Bjelkene, av typen limtre GL30c 70 mm x 223 mm, utgjør sidene/vangene på hvert takelement. Med byggets 22 kanter blir det totalt 44 takbjelker. To og to bjelker ligger inntil hverandre med gjennomgående bolter, noe som legger til rette for forbindelser som løser oppgavens mange kriterier.

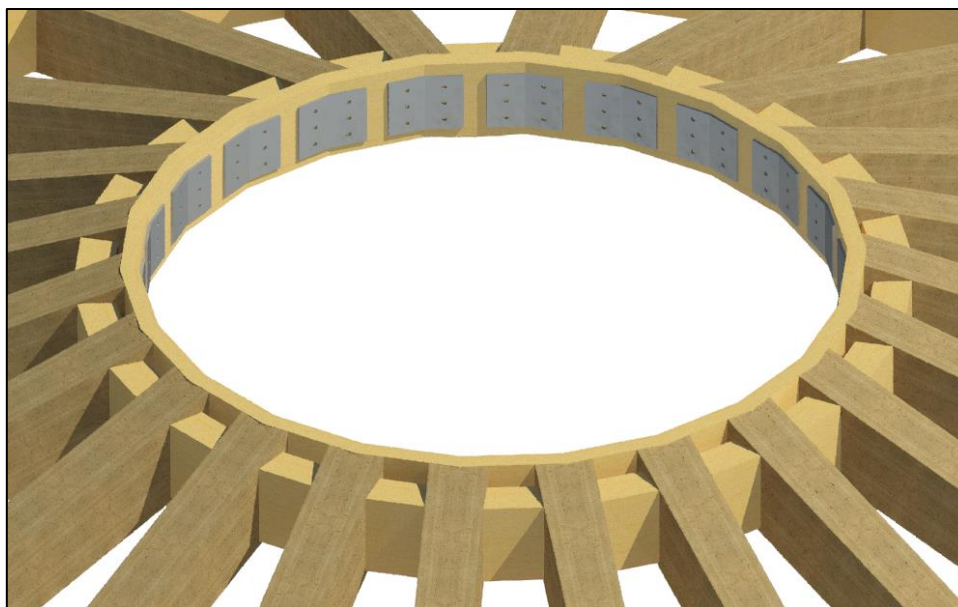
For å oppnå størst mulig anleggsflate hvor elementene ligger an på veggen har vi lagd et innsnitt i bjelkene. Innsnittet er gjort størst mulig, men gjenværende tverrsnitt av bjelkene er tilstrekkelig for å tåle dimensjonerende belastninger.



Figur 26: Produksjonstegning av 70 mm x 223 mm GL30c bjelke, eget bilde

4.3.2 Trykkring

Konstruksjonens trykkring er integrert i toppen av hvert takelement. Der monteres 3 korte kubbinger av C24 heltre i dimensjonene 48 mm x 223 mm som skal ta opp alle trykkrefter. En kubbing i innerste sirkel, og dobbelt lag utenfor, som vist på bildet under. Sammen med trykkringens forbindelse tar den sammensatte ringen opp dimensjonerende skjærkrefter.



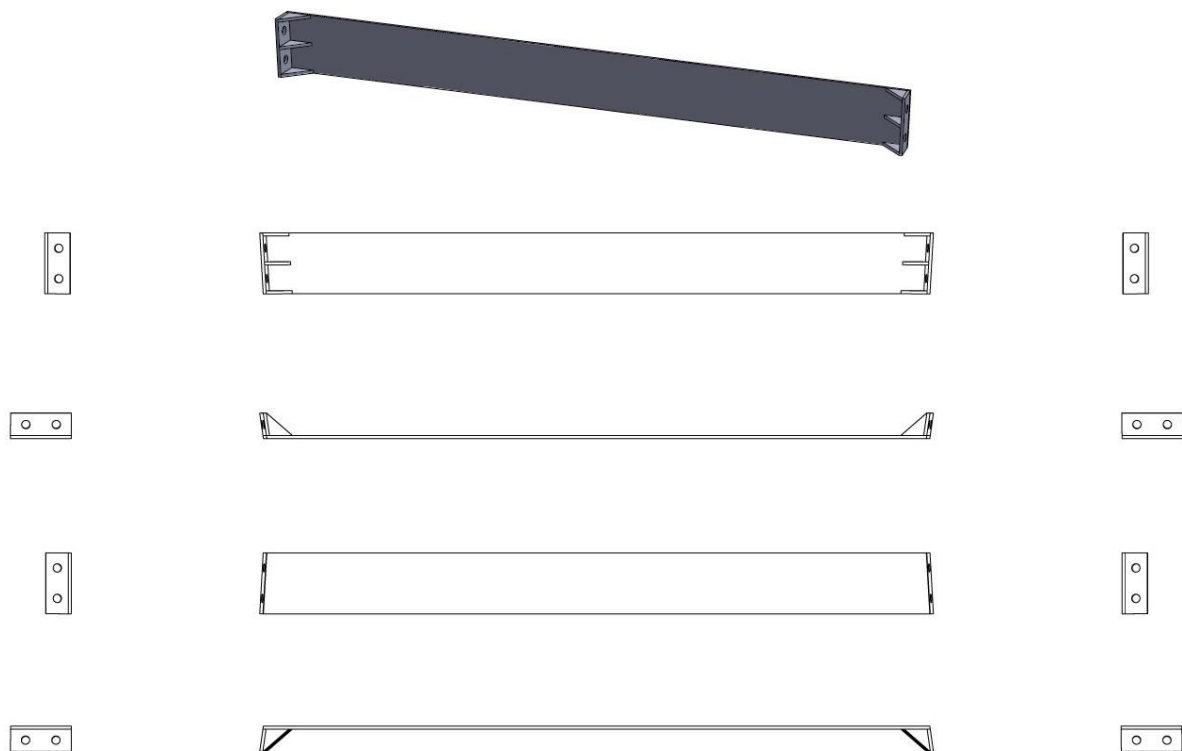
Figur 27: Oversiktsbilde over trykkring, eget bilde

4.3.3 Strekkring

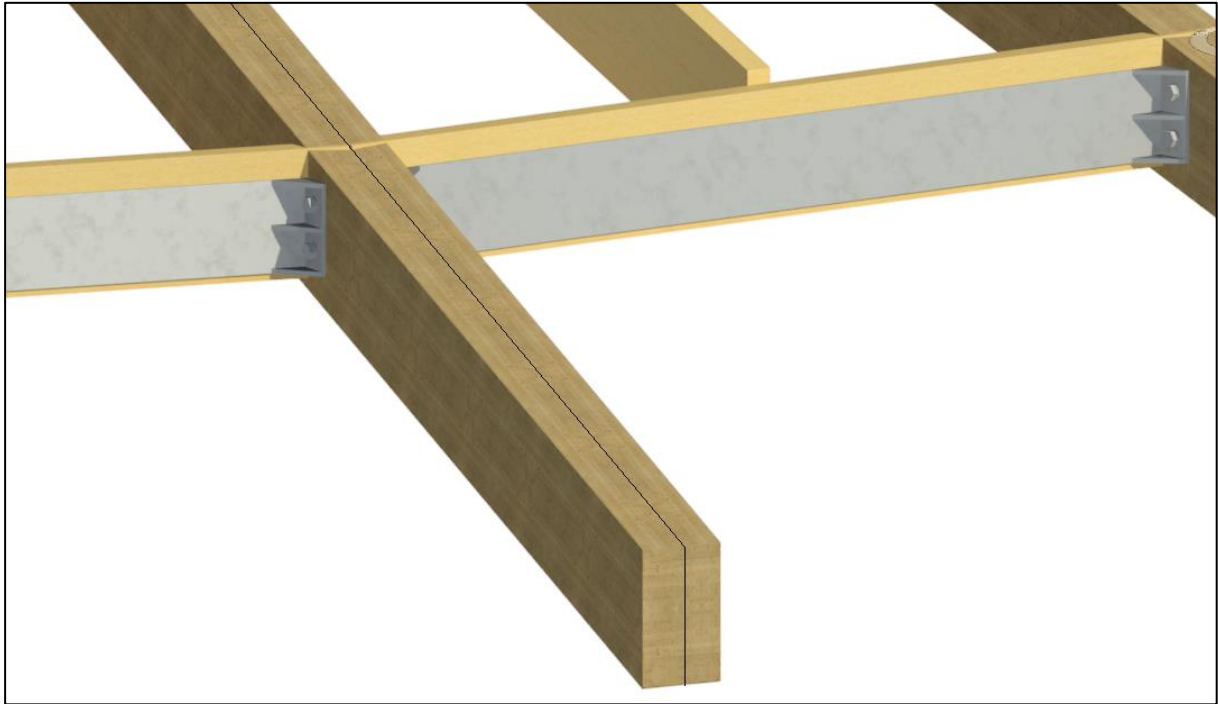
Strekkringen er sammensatt av 22 identiske strekkstag og består av utstanset 8 mm tykt S355 stål. Strekkstagene monteres på utsiden av bygget på kubbingen som ligger jevnt med husets yttervegg. Plassering av strekkstagene lar seg gjøre både før og etter takelementene er heist opp og de blir skjult inne i gesimskassen. Et strekkstag består av to kortplater forbundet med sveiser til en langplate. Hver kortplate er satt sammen av én 8 mm tykk stålplate, påsveiset med tre stykker 8 mm tykke stålvinkler.

Vinkelforskjellen mellom horisontalplanet og stålplaten har til hensikt å kompensere for vinkelen som dannes mellom de sammensatte limtrebjelkene. Stålvinklene fungerer som en

forsterkning i overgangen mellom kort- og langplaten, der sveisene som forbinder stålvinkele med platene har et halsmål på 3 mm. På kortplatenes flatside er det lagt inn to hull for å klargjøre plass til de to gjennomgående boltene som forbinder to strekkstag. Avstandene mellom hullenes sentrum, samt fra sentrum til ender og kanter, har utgangspunkt i limtrebjelkenes og stålplatenes minimumsavstander. Mellom de 22 segmentene som utgjør takkonstruksjonen er det en vinkelforskjell på $16,36^\circ$, noe som gjør at taket får den karakteristiske sirkulære formen. Stålvinklene er følgelig modellert med en vinkel på $98,18^\circ$, hvor til sammen 44 sett med stålvinkler tilsvarer en full sirkel på 360° .



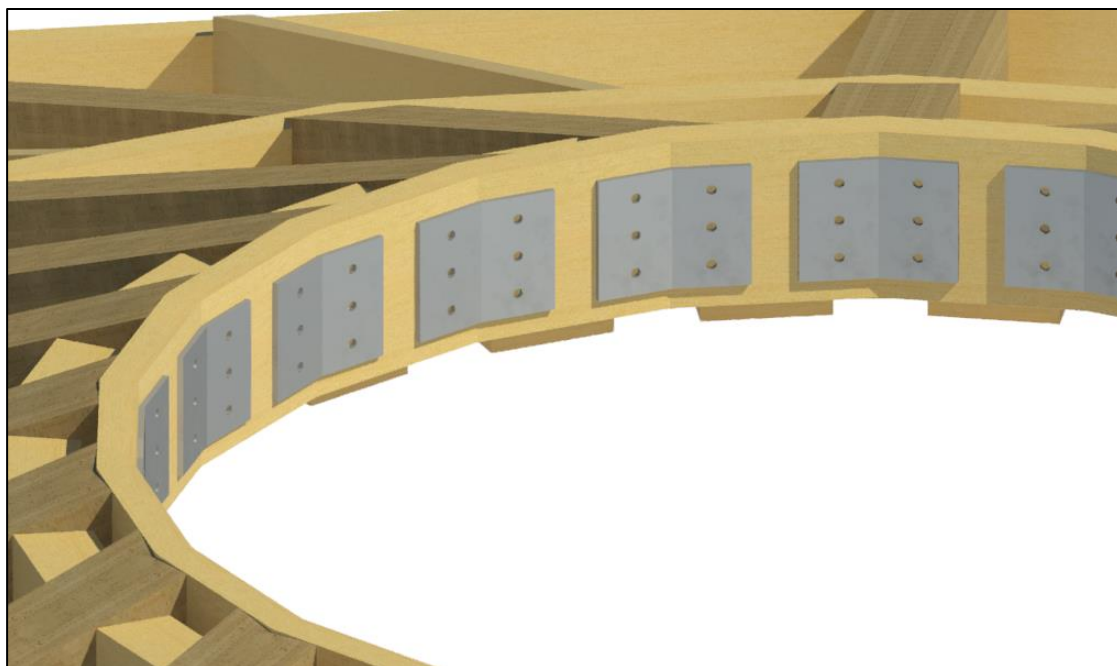
Figur 28: Strekkstag, eget bilde



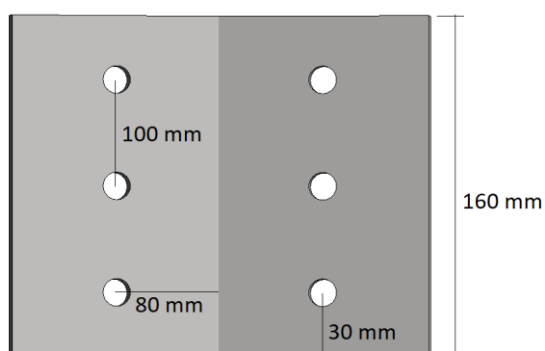
Figur 29: Oversiktsbilde over strekkring, eget bilde

4.3.4 Forbindelser

Forbindelsen i trykkringen, skjøten mellom elementene, består av en rektangulær knekt 8 mm stålplate med 3 stk. 12 mm x 160 mm franske treskruer på hver side. Platen er knekt i $16,3^\circ$ på midten noe som muliggjør montering av takelementene, holder de sammen og tar opp skjærkrefter.

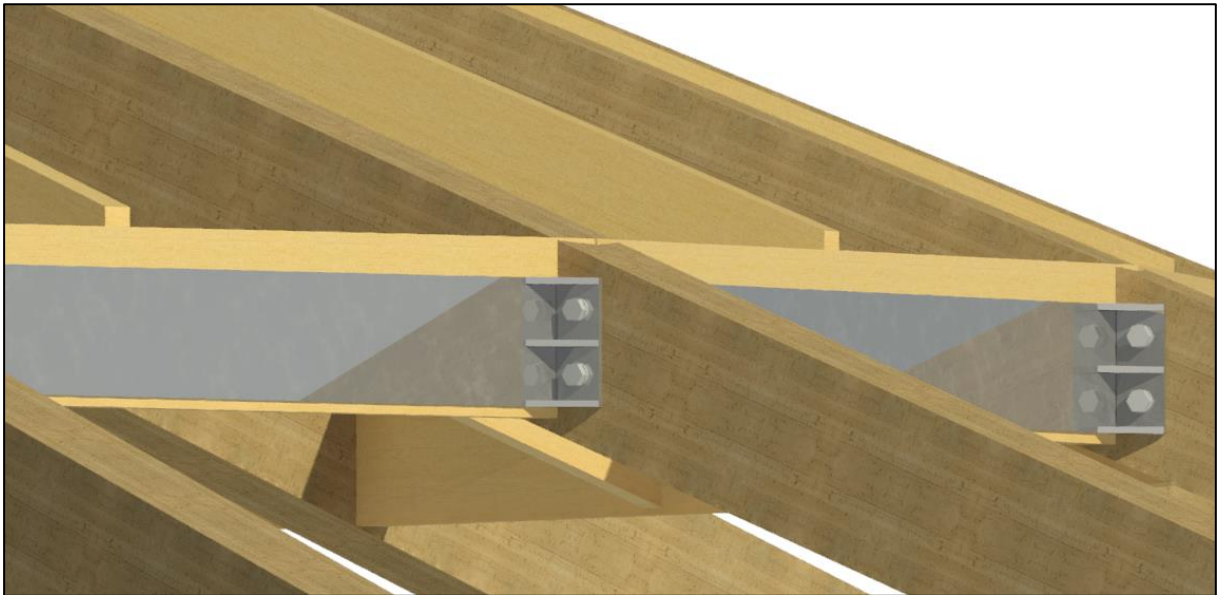


Figur 30: Oversiktsbilde forbindelse trykkring, eget bilde



Figur 31: Produksjonstegning plate i trykkring, eget bilde

Forbindelsen i strekkringen er vist på bildet under. Den består av 2 stk. 20 mm x 200 mm gjennomgående bolter mellom hvert strekkstag.



Figur 32: Oversiktsbilde forbindelse strekkring, eget bilde

4.3.5 Brann

I henhold til TEK 17 §11-2 Tabell 1 (RKL) og §11-3 Tabell 1 (BKL), havner konstruksjonen vår i følgende klasser gjengitt i tabell under:

Beskrivelse	Bolig
Etasjer	2
Brannklasse (BKL)	1
Risikoklasse (RKL)	4
Krav	R-15

Tabell 4: Oppsummering fra TEK 17 (2)

Forkullingsdybden d_{ef} er for vår modell 16 mm.

Focus Konstruksjon gir følgende: Kapasitetsutnyttelse ved lastkombinasjon brann = 46%

5 Diskusjon

Problemstillingens hovedfokus har vært å utvikle og beregne en komplett løsning for sirkulær/mangekantet takkonstruksjon med vektlegging på konstruksjonssikkerhet, prefabrikkering og montering. Disse tre punktene henger tett sammen og påvirker hverandre i stor grad.

Ved gjennomgang av foreliggende relevante løsninger fant vi flere forbedringspotensialer. Den viktigste prioriteten var *konstruksjonssikkerhet*. For å oppnå en tilfredsstillende grad av sikkerhet, er konstruksjonen dimensjonert etter gjeldene lover og regler for der det skal bygges. Grunnen til at dette er tilstrekkelig er fordi det norske systemet, som vi er bundet av, har stort sprik mellom utnyttelsesgrad og når en komponent går til brudd. Ved dimensjonering er det krav om å bruke materialfaktorer til 5%-fraktilen i stedet for middelværdi etter delkapittel 4.2 i NS-EN 1990 (Standard Norge, 2016a).

Det er relativt store sikkerhetsfaktorer ved lastberegninger og materialfaktorer ved flere ledd i dimensjoneringen. Lasttilfellet som er mest ugunstig må benyttes som dimensjonerende. Et urealistisk lastbilde kan oppstå ved at lastene er for store eller at flere laster er lagt sammen. Påkjeningene vil derimot mest sannsynlig ikke opptre samtidig. Oppsummert er det norske hierarkiet et svært trygt system, og man kan være trygg på at man er på sikker side ved å benytte det. På denne måten oppnår vi tilstrekkelig grad av konstruksjonssikkerhet. Fokuset på å utforme en enkel løsning som minimerer risikoen for monteringsfeil og inneholder en god konstruksjonspraksis har vært sentralt. Dette har vi forsøkt ved å unngå store lastkonsentrasjoner, enkel og symmetrisk lastnedføring, mest mulig strekk- og trykkrefter samt at forbindelsene er få og enkle i prinsipp. Ved å velge to vidt forskjellige forbindelsestyper i strekk- og trykkringen, ser vi det som lite sannsynlig for autorisert fagpersonell å montere feil. Det er også et poeng at vi kun har valgt tre typer forbindelser for hele takkonstruksjonen, fordi det kan minimere faren for monteringsfeil.

Et annet aspekt ved alle byggeprosjekt er redusering av monteringstid. For å oppnå dette ser vi på tilstrekkelig grad av *prefabrikasjon* som en nødvendighet. Gaia Homes har selv erfart hvor tidkrevende det kan være å sette opp en sirkulær bygning som kommer levert i mange forskjellige komponenter. Basert på egne erfaringer med konstruksjonsteknikk, så vi også

store muligheter ved dette. For å kunne oppnå tilfredsstillende grad av prefabrikkering, var størrelsen på de ferdiglagde elementene og hvor mye de kunne prefabrikkeres avgjørende. Med hensyn til frakt og håndtering av taket så vi det totalt urealistisk å fabrikkere hele taket og heise hele takflaten på plass. Bygg som er opp mot 6 meter i diameter kan denne måten være et alternativ. Løsningen ble derfor å dele opp takflaten i så store elementer som mulig uten at det gikk på bekostning av andre kriterier. For å fasilitere gunstig montering og tilfredsstillende konstruksjonssikkerhet delte vi opp taket i like mange takelementer som veggelementer. Vi ser også på muligheten for å tekke taket helt ferdig på fabrikk, men dette er noe som må klareres i samråd med leverandøren av taktekkingen. Ansvarsrett og andre juridiske og praktiske forhold blir ikke vektlagt i tilknytning til løsningen på problemstillingen.

Prefabrikkering henger tett sammen med *montering* fordi man monterer mer før elementene ankommer byggeplassen. Dette støtter opp under vårt valg om å fabrikkere mest mulig og størst mulig takelementer for å montere minst mulig på byggeplassen. Da størrelsen på elementene og grad av prefabrikkering ble bestemt, stod utforming av forbindelsene igjen. Ved å redusere antall forbindelser som monteres på byggeplass, reduseres monteringstiden. Dette kan selvfølgelig ikke gå på bekostning av andre kriterier og de må være monteringsvennlige. Som et krav fra Norsk Standard må en bolteforbindelse ha minst to forbindere. I forbindelsen i strekkringen klarte vi å utvikle en sikker løsning som baserer seg på nettopp dette minimumskravet.

Monteringsvennlighet er en faktor som setter preg på vår løsning. Vi mener at løsningen er utførelsesmessig enkel og utarbeidet slik at takprodusenten kan skreddersy montering til hvert enkelt bygg, avhengig av tilgjengelig mannskap på byggeplassen og utstyr. Den praktiske gjennomførbarheten blir ivaretatt og fremmet i vår modell. Strategiske sammenføyinger og fastholdinger med lav kompleksitet gjør monteringen trinnvis enkel.

5.1 Produksjon og montering

I det følgende vil vi introdusere et forslag til montering som baserer seg på vår tverrfaglige bakgrunn og praktiske erfaringer. Vi valgte å forkaste flere løsninger fordi analysen synliggjorde bedre og enklere muligheter.

5.1.1 På fabrikk

Elementene er tenkt produsert på en elementfabrikk. Den eksakte produksjonsgangen vil være noe avhengig av hver enkelt fabrikk opprinnelige rutiner og erfaringer. Vi anser følgende eksempel som en fornuftig produksjonsgang:

1. Precut av samtlige trekomponenter: Innebærer kapping av limtrebjelkene med innsnitt ved opplager, samt riktige vinkler i endene både horisontalt og vertikalt. Kapping av kubbingene inkludert de som danner trykkringen, også disse i riktige vinkler horisontalt og vertikalt.

2. Montering av trekomponentene: gjøres på store monteringsbord med spikerpistol. Når dette er gjort er det konstruksjonsmessige ferdig og elementet utgjør en åpen stiv ramme av tre. Det anbefales at et hull bores midt på elementets smaleste ende for å muliggjøre enkel løfting med krok.

3. Montering av vindsperre på elementets overside: det er naturlig å la elementet så langt i prosessen ligge på samlebåndet med oversiden opp, derfor kan vindsperre monteres med stiftmaskin på vanlig måte. Dette er en duk som er kombinert vindsperre og undertak og som til sammen utgjør et såkalt forenklet undertak.

4. Med spikerpistol skytes sløyfene fast oppå bjelkene og den langsgående sekundærbjelken. Dette utgjør luftesjiktet. Tilstrekkelig lufting oppnås med 36 mm sløyfer. Anbefalt luftesjikt er hentet fra SINTEF Byggforsk blad 525.102 (SINTEF Byggforsk, 2012). Vi har også sett på muligheten for å krysslekte for å oppnå enda bedre lufting. Denne løsningen har blitt skrinlagt da elementene trolig vil miste mye av sin interne soliditet ved at lektene måtte bli festet på samme punkt som sløyfene. I stedet vil taktroet av stive plater hjelpe til å stive av hele elementet, noe som fører til solide takelementer.

5. *Taktro bestående av OSB-plater skytes fast med spikerpistol eller skrus med skruautomat* avhengig av den valgte produsents anbefaling. Dette gjøres nesten helt opp til det som utgjør mønet. Den resterende hetta som går fra takvinduet og over de øverste delene av luftesjiktet plassbygges. Dette fordi taktekking må være ferdig før man kan bygge hetta over, samtidig som at elementene lar seg lettere pakke i hopetall med jevne overflater samt at risikoen for transportskader på en utstikkende del elimineres.

Platenes største spenn, nederst på elementene, blir på ca. 900 mm. Platenes tillate spennvidde er kontrollert mot SINTEF Byggforsk blad 525.861, tabell 21(SINTEF Byggforsk, 2015b).

6. *Isolering.* Elementet roteres rundt, fiberduk fra isolasjonsfabrikanten stiftes på før isolasjon blåses inn i alle hulrom, selvfølgelig utenom elementets nedre del som utgjør takutstikket.

7. *Himlingspanel monteres* på vanlig måte og elementet er ferdig og klar til fraktklargjøring.

8. *Strekstaget i stål kan gjerne monteres på elementfabrikk* dersom dette er fornuftig med hensyn på logistikk, avhengig blant annet av de to leverandørenes tilholdssted. Hvis ikke kan de monteres på byggeplassen før elementene heises opp på bygget.

5.1.2 Forberedelse til montering på byggeplass

1. *Kontrollmål av diameter på toppsvill.* Det vil utelukke unødvendig monteringsfeil ved å kontrollmåle diameteren på bygget mellom alle hjørnepunktene. Ved avvik kan bygget tvinges og låses i riktig posisjon, for eksempel ved hjelp av jekkestropper eller stag og jekk fra utsiden.

2. *Stillas rundt på utsiden av hele bygget* vil være til stor hjelp under montering. En fin arbeidshøyde da vil være rundt 1,70m ned fra toppsvillen til stillasplatingen. Stillaset må uansett på plass til montering av forkantbord, takrenner, gesimsbord mm.

3. *Stillas i sentrum på bygget.* Inne i bygget vil det bli nødvendig med et stillas for å montere taket på en mest mulig effektiv måte. Stillaset burde være ca. 3 x 3 m og høyden på platingen burde være ca. 1,5 m under takelementenes høyeste punkt (én meter høyere enn toppsvillen på dette bygget). Den utførende må forsikre seg om at stillaset tåler den vekten alle takelementene påfører stillaset da de hviler på stillaset. Et eksempel kan være 2 stk. 3 m lange stillaser av typen HAKI tungstillas.

4. *Støtteben i 2'4' til takets toppunkt.* Taket står ikke av seg selv før det siste elementet er på plass, derfor må støtteben være klart til monteringen. Det trengs ca. 13 stk. 2'4' som er ca. 1,5 m lange dersom stillashøyden er som forklart over. I tillegg trengs det ca. 100 stk. 6 mm x 90 mm skruer.

5. *Avstandsstykker i 2'4' til sentrum av sirkelen.* For å oppnå riktig diameter på trykkringen og for å tilrettelegge at monteringen av det siste elementet går problemfritt, kan 2 stk. 2'4' være til hjelp. Disse må ha eksakt samme lengde som innvendig diameter på trykkringen.

6. *Det kan også være lurt å ha tilgang på 2-4 jekker og et brekkjern i tilfelle monteringsfeil.* Da kan det bli nødvendig å heve et eller flere elementer for å få plass til neste.

7. *Kontroll av diameter på trykkring opp mot diameter takvindu.* Det kan være lurt å kontrollmål størrelse på vindu, samt plassering av festepunktene på vinduet stemmer overens med takets geometri.

5.1.3 På byggeplassen

På monteringsdagen kan det være lurt å være enten 2 eller 4 bygningsarbeidere i tillegg til kranføreren. En eller to mann oppe på stillaset i sentrum og en eller to mann nede på stillaset rundt bygget. På stillaset i sentrum skal de ta imot elementene, låse de i høyde, feste de i naboelementet samt montere stålforbindelsen i trykkringen. På stillaset rundt bygget skal de ta imot elementene, kontrollere plassering, feste de i naboelementene, montere strekkstaget samt kontrollere lengde på takutstikk.

1. *De to første takelementene burde settes opp diagonalt (rett ovenfor hverandre) med avstandsstykket i sentrum mellom seg.* Dette avstandsstykket kan godt monteres så det blir værende der til monteringen er ferdig. Det første elementet som løftes opp, plasseres midlertidig på toppsvill og låses i høyde i sentrum med ett støtteben og 2 stk. 6 mm skruer skrudd gjennom og inn i elementet, hvilende på stillasets platting. Når riktig takvinkel, lodd på elementer samt likt takutstikk er oppnådd på begge sider, kan de to første elementene låses fast i toppsvill med 3 stk. 6 mm x 90 mm skruer (som også er byggets vindforankring).

2. *Deretter kan man montere resten av takelementene.* For å ha best kontroll på likt takutstikk rundt hele bygget anbefaler vi å montere resten av elementene diagonalt, altså annen hvert

element ovenfor hverandre. Man må også kontrollere om takelementene ligger midt på veggelementene eller om følgefeil oppstår og takelementenes plassering på toppsvill blir feil.

3. Både takets forbindelser i trykkring og strekkring skal monteres fullstendig så fort som fremgangen muliggjør det, altså underveis av monteringen av takelementene. I trykkringen forbores hullene og stålplaten mellom elementenden monteres så fort elementet er løftet opp. I strekkringen bores det gjennom de to tilhørende bjelkene ved stålstagets to hull og gjennomgående bolt monteres før neste element tas imot.

4. Montering av de to siste elementene gjøres på samme måte som de andre. Dersom det er begrenset med plass kan jekk brukes for å løfte byggets toppunkt. En mulighet er å plassere flere jekker under stillaset og jekke på hele stillaset, eller kun deler av taket.

5. Når takkonstruksjonen er montert komplett kan støtteben fjernes. Før dette må strekkring og trykkring være omsluttet. Alle forbindelsene må være montert på beskrevet måte. Da er det klart for taktekking.

6. Taket tekkes helt opp til enden av elementenes taktro. Dernest plassbygges takets hette rundt sirkelen i midten. Sløyfer spikres fast før hetta av OSB-plater monteres oppå og tekkes. Det er nå klart for å montere takvinduet.

7. Vinduet monteres i henhold til produktdatablad og monteringsveiledning fra produsent.

5.2 Vår alternative løsning

Ved tidligere anledning så vi på en annen løsning som potensielt ville løse problemet vårt. Det begynte med en kombinert bæreløsning, der både veggene og taket utgjorde bæringen.

Løsningen fikk navnet «toppsvilløsningen» og baserer seg på at toppsvilla, i form av en vinkelplate på en toppsvill, ligger over skjøten på veggelementene. Toppsvillen blir utformet som en *bumerang* og skal utgjøre en strekkring rundt hele bygget. Bumerangen går fra senter til senter på veggelementene, cirka to meter lange elementer. Denne løsningen hadde fjernet behovet for strekkringen av stål, stålkabel eller lignende. Det vi også så på som fordelaktig med en kombinert bæreløsning som denne, er den to-faktor-sikkerheten vi kan få. Denne løsningen kombinert med et selvbærende tak ville da fungert som to uavhengige systemer. Skjer det noe uforutsett med veggene, vil taket fortsatt være dimensjonert for å ta opp større krefter og unngå en farlig situasjon.

I prinsippet er dette en god løsning. Vi støtte likevel på flere problemer når det kom til beregning og dokumentasjon av funksjonaliteten til elementet. Det foreligger ingen fasit en slik løsning kan testes opp mot. Beregningene måtte derfor bestå av en FEM-analyse, noe som ikke er like holdbart for treverk som for tradisjonell fasthetsmekanikk og statikk. I tillegg var løsningen lite modulbasert og hadde en lav grad av prefabrikasjon, til tross for precut av bjelker, toppsville, kubbinger og trykkring. En viktig presisering i forbindelse med to-faktor-sikkerheten er at toppsvilløsningen med fordel kunne hatt et «sikkerhetsnett» bestående av et eksternt bæresystem på grunn av alle usikkerhetsmomentene ved løsningen. Løsningen ble å utelukke den usikre løsningen og dimensjonere en ny basert på dagens krav.

Laboratorieundersøkelser hadde blitt svært omfattende hvis vi hadde hatt kompetansen og verktøyet til å foreta en slik test. Vi hadde planer om å bygge en testbrakett vi kunne benytte, men tidsrammen var for kort og usikkerheten var for stor. Dette var grunnlaget for at vi forkastet denne løsningen for vår oppgave, men det er verdt å nevne – nettopp fordi det har et godt potensial for noen med mer kunnskap om laboratorieundersøkelser og testing av trematerialer enn oss.

5.3 Miljø

Produksjon og ferdigstilling av bygningen har både direkte og indirekte innvirkning på miljøet. Innvirkning vil i denne sammenhengen være tilknyttet valg av materialer, energiforbruk, avfall og andre forurensende utslipp som påvirker både lokalmiljøet rundt byggestedet og det globale miljøet. Det er derfor viktig at hele prosessen, fra råmateriale til ferdig konstruksjon på byggeplass, vurderes nøye før de endelige produksjons- og konstruksjonsvalgene fastslås. I hvilken grad valgene har innvirkning på miljøet vil være avhengig av flere prosesser. Eksempler på slike prosesser er innhenting av råmaterialer til bearbeiding, produksjon av byggematerialer og byggelementer, vedlikehold og levetid (Svanæs, 2004).

I kapittel 2.2.2 omtales de miljømessige fordelene ved bruk av tre som materiale, hvor spesielt lagring av CO_2 i treets masse er en gunstig miljøegenskap. Løsningen vår består hovedsakelig av takbjelker i limtre, kubbinger og lekter i konstruksjonstre og OSB-plater. I løpet av levetiden vil bygget fungere som et lager for karbon, noe som gjør valg av materialer i bygget til et miljøkløkt valg.

Bruk av stålkomponenter i takkonstruksjonen er begrenset til strekkstagene og forbindelsene som festemidler. En potensiell stor miljøgevinst er å ta i bruk resirkulert stål til omforming. For strekkstagene, som har en spesifikk utforming i forhold til bruksområdet, vil det være aktuelt å ta i bruk resirkulert stål til omforming. Bruken av resirkulert stål vil også være aktuelt for noen typer forbindelsesmidler i modellen som skruer, spiker og stålplater. For bolter vil det være aktuelt å nyttiggjøre stål til ombruk. Løsningen fokuserer på begrensnig av stålforbruk. Likevel kan tre som eneste materiale begrense allsidigheten til takkonstruksjonen.

5.4 Videre forskning

Forslag til videre forskning kan være egen studie om økonomiske betraktninger ved lignende byggeprosjekter. Sammenligning av kostnader ved høy og lav grad av prefabrikkering er et interessant moment. Samtidig kan en studie for transportmuligheter og transportkostnader også være avgjørende for valg av prefabrikkeringsgrad. Videre kan det være relevant at det blir ført en studie for selve monteringen av løsningen. Oppgaven gir et forslag, men det er usikkert hvor vidt monteringsveiledningen er optimal.

6 Konklusjon

Hovedformålet med problemstillingen har vært å undersøke hvordan sirkulære hus- og hyttetak med takvindu i sentrum og uten synlige aksialstaver bør konstrueres, med hensyn til konstruksjonssikkerhet, prefabrikasjon og montering.

Oppgavens konklusjon baserer seg på en omfattende analyse av eksisterende prinsipper på området. Gjennom en analyse av det som er å finne av eksisterende løsninger har vi avdekket en rekke forbedringspotensialer ved samtlige av de forskjellige prinsippene. Konklusjonen bærer preg av estetiske premisser, fysiske rammebetingelser og ønsker fra oppdragsgiver.

Løsningen vår er et modulbasert tak bestående av like mange takelementer som veggelementer. Takelementene prefabrikeres på en elementfabrikk. Øverste del av hvert takelement utgjør til sammen en trykkring av tre. Skjøtene i trykkringen monteres sammen på en enkel men solid måte som lett lar seg gjøre på byggeplass. Oppunder takets raft monteres takets strekkring bestående av prefabrikkerte stålprofiler, en på hvert takelement. Med gjennomgående bolter til tilhørende stålprofil gjennom takbjelkene låses hele takflaten.

- Konstruksjonssikkerhet – konstruksjonen er dimensjonert etter gjeldende lover og forskrifter. Dette er i seg selv et bevis på at konstruksjonssikkerheten er oppfylt. Løsningen er enkel, symmetrisk og innehar ingen store lastkonsentrasjoner, som er god konstruksjonspraksis. Taket er selvbærende, der valgte løsninger for vindforankring og veggmontering bidrar som et tillegg til sikkerheten.
- Prefabrikking – oppgitt grad av prefabrikking ansees som gunstig for byggets størrelse. Diameteren er for stor til å bygge hele takflaten for så å løfte den på plass. Dermed er modulbasert løsning veien å gå. På bakgrunn av dette, prefabrikeres elementene så mye som mulig uten at det går på bekostning av konstruksjonssikkerheten, sannsynligheten for transportkader eller andre reelle utfordringer.
- Montering – løsningen baserer seg hovedsakelig på to festepunkter, som er festet i topp og bunn. Det brukes få, store og solide festemidler. Alle konstruksjonskomponentene i takkonstruksjonen har flere funksjoner. Dette fører til at

antall festemidler og monterings tid kan reduseres til et minimum. Løsningen har, på de to forskjellige festepunktene, to vidt forskjellige forbindelsestyper. Dette minimerer, om ikke utelukker muligheten for monteringsfeil.

Løsningen er gunstig for bygg i den gjeldende størrelsen. For mindre bygg vil det t være fornuftig å velge et annet prinsipp for takkonstruksjonen. Vi ser at vår løsning er gyldig for bygg med diameter ned mot rundt seks meter, da vil det være mulig å prefabrikkere hele takflaten. Etter beregninger, vist i vedlegg 7.4, viser det seg å være mulig å benytte løsningen på sirkulære bygg opp til rundt 30 meter. Prinsippet er beholdt i sin helhet utenom endringer i trykkringen, der hel stålring vil være gunstig. Skal det bygges enda større ser vi det hensiktsmessig å benytte fagverksbjelker.

Litteraturliste

Opphavsrettsnotis

Følgende figurer er gjengitt av Torgeir Solberg, Torjus Stomlien og Roy Skaar i Bacheloroppgaven *Elementbasert takkonstruksjon for sirkulære hus* med tillatelse fra Standard Online AS. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se www.standard.no.

Figur 6: Lastfaktorer for snølast, Tabell 5.2 fra NS-EN 1991-1-3:2003+A1:2015+NA:2018

Figur 7: Cpe, 10 verdier for kupler, 7.12 fra NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009

Figur 8: Trykkfordeling for sirkulære sylindere, figur 7.27 fra NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009

Figur 35: Ende-, kant- og hullavstander for festemidler fra NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009

Figur 36: Spenninger i sveisesnittets plan fra NS-EN 1993-1-8:2005+NA2009

Referanser

- Aarnes, H. (2014) *Rekker og Tallfølger*. Tilgjengelig fra: <https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/tall/rekker.pdf> (Hentet: 19. mai 2019).
- Attia, E. (2010) *Squaring The Circle*. Tilgjengelig fra: https://www.huffingtonpost.com/entry/squaring-the-circle_b_504592 (Hentet: 18. mars 2019).
- Bell, K. (2014) *Konstruksjonsmekanikk, Del 1 Likevektslære*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Bell, K. (2017) *Dimensjonering av trekonstruksjoner*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Bøhlerengen, T. (2019) *Unngå byggskader ved prosjektering av tak*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/community/fagblogg/poster/unnga-byggskader-ved-prosjektering-av-tak/> (Hentet: 18. mai 2019).
- Dalbéra, J.-P. (2011) *Armature de yourte en bois dans le désert du Khorezm, Ouzbékistan* [digitalt fotografi]. Tilgjengelig fra: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Armature_dune_yourte_\(Khorezm,_Ouzb%C3%A9kistan\)_ \(6859416536\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Armature_dune_yourte_(Khorezm,_Ouzb%C3%A9kistan)_ (6859416536).jpg) (Hentet: 12. mai 2019).
- Dalen, L. S. (2017) *Nye rekordtall for skogen i Norge*. Tilgjengelig fra: <https://www.nibio.no/nyheter/nye-rekordtall-for-skogen-i-norge> (Hentet: 01. april 2017).
- Deltec Homes (2015a) *Pre-cut 5/8" plywood roof sheathing is installed to complete the roof* [digitalt fotografi]. Tilgjengelig fra: <https://www.deltechomes.com/learn-more/construction/> (Hentet: 15. mars 2019).
- Deltec Homes (2015b) *Roof trusses are installed* [digitalt fotografi]. Tilgjengelig fra: <https://www.deltechomes.com/learn-more/construction/> (Hentet: 15. mars 2019).
- Deltec Homes (2019a) *Builder FAQs*. Tilgjengelig fra: <https://www.deltechomes.com/builder-faq/> (Hentet: 15. mars 2019).
- Deltec Homes (2019b) *Construction*. Tilgjengelig fra: <https://www.deltechomes.com/learn-more/construction/> (Hentet: 15. mars 2019).
- Deltec Homes (2019c) *About Deltec Homes*. Tilgjengelig fra: <https://www.deltechomes.com/learn-more/about-us/> (Hentet: 06. mars 2019).
- Direktoratet for byggekvalitet (2014) *Kapittel 10 Konstruksjonssikkerhet TEK 10*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggeregler/tek/3/10/10-2/> (Hentet: 18. mai 2019).
- Direktoratet for byggekvalitet (2017) *TEK 17 §11-4(3)(4) Bæreevne og stabilitet*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggereglene/byggteknisk-forskrift-tek17/11/ii/11-4/> (Hentet: 21. mars 2019).
- Egenes, J. S. (2018) *BYG3332 Fleretasjes trehus Bæresystemer (P3)*. Tilgjengelig fra: https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-483575-dt-content-rid-17227475_1/courses/194_BYG3332_1_2018_H_1/Fleretasjes%20trehus%20P3%20B%C3%A6resystemer%20H2018%20JSE.pdf (Hentet: 18. mai 2019).
- Fallsen, H. B. (2011) *Kompendium Lastberegning (v/HiG)*. Gjøvik: Høgskolen i Gjøvik.
- Flick, U. (2011) *The SAGE Dictionary of Social Research Methods*. SAGE Publications, Ltd. doi: <https://dx.doi.org/10.4135/9780857020116>
- Framstad, E., Stokland, J. N. og Hysten, G. (2011) *Skogvern som klimatiltak - Verdifulle skogtyper for biologisk mangfold og karbonlagring*. (NINA Rapport 752): Norsk institutt for naturforskning. Tilgjengelig fra: <https://www.nina.no/archive/nina/pppbasepdf/rapport/2011/752.pdf> (Hentet: 02. april 2019).
- Gaboury, É. (1969) *The plans for Église Précieux-Sang (Precious Blood Church) in St. Boniface* [digitalisert tegning]. Finnes ved Société historique de Saint-Boniface

- Archives. Tilgjengelig fra: <https://www.winnipegarchitecture.ca/200-kenny-street/> (Hentet: 15. mai 2019).
- Gaia Homes (2017) *Forside Gaia Homes*. Tilgjengelig fra: http://gaiasenter.no/gaia-homes/forside-gaia-homes_d11/ (Hentet: 15. november 2018).
- Glasø, G. (2011) Fleretasjes Trehus, *Fokus på tre*. Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/32-Fleretasjes-trehus.pdf>.
- Grenness, T. (1997) *Inføring i vitenskapsteori og metode*. Tano Aschehoug.
- Hill, C. og Zimmer, K. (2018) *The environmental impact of wood compared to other building materials*. (NIBIO Rapport 56). Norwegian institute for Bioeconomy Research: NIBIO. Tilgjengelig fra: https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2496052/NIBIO_RAPPORT_2018_4_56.pdf?sequence=1&isAllowed=y (Hentet: 01. april 2019).
- Inhabitat (2017) *Why our ancestors built round houses – and why it still makes sense to build round structures today*. Tilgjengelig fra: <https://inhabitat.com/why-our-ancestors-built-round-houses-and-why-it-still-makes-sense-to-build-round-structures-today/> (Hentet: 15. mars 2019).
- Jerdal, A., Berg, E. og Sagvik, S. (2017) *Sirkulær Takkonstruksjon* [Digital plakat](Hentet: Januar 2019).
- Landgraff, M. (2017a) Dimensjonering for skjær iht. NS-EN 1995-1-1. *BYG2301 Konstruksjonsteknikk*. Tilgjengelig fra: https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-241265-dt-content-rid-17112783_1/courses/194_BYG2301_1_2017_H_1/Trekonstruksjoner/Skj%C3%A6r%202017H.pdf (Hentet: 31. mars 2019).
- Landgraff, M. (2017b) Dimensjonering for ren bøyning. *BYG2301 Konstruksjonsteknikk*. Tilgjengelig fra: https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-241263-dt-content-rid-17112776_1/courses/194_BYG2301_1_2017_H_1/Trekonstruksjoner/Dimensjonering%20for%20ren%20b%C3%B8yning%202017H.pdf (Hentet: 29. mars 2019).
- Landgraff, M. (2017c) Grunnlag for lastvirkningsanalyse. *BYG2301 Konstruksjonsteknikk*. Tilgjengelig fra: https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-241225-dt-content-rid-17112766_1/courses/194_BYG2301_1_2017_H_1/Konstruksjonsl%C3%A6re/1%20Grunnlag%20for%20lastvirkningsanalyse.pdf (Hentet: 13. mars 2019).
- Landgraff, M. (2018a) Brann - Trekonstruksjoner. *BYG3311 Tre-og stålkonstruksjoner*. Tilgjengelig fra: https://ntnu.blackboard.com/webapps/blackboard/content/listContentEditable.jsp?content_id=225771_1&course_id=2301_1 (Hentet: 26. mars 2019).
- Landgraff, M. (2018b) Forbindelser - Grunnlag. *BYG3311 Tre-og stålkonstruksjoner*. Tilgjengelig fra: https://ntnu.blackboard.com/bbcswebdav/pid-225800-dt-content-rid-10544895_1/courses/194_BYG3311_1_2018_V_1/Tre/A.%20Grunnlag%202018V.pdf (Hentet: 04. april 2019).
- Mandala Homes (2014) *Structural Systems*. Tilgjengelig fra: https://www.mandalahomes.com/wp-content/uploads/2014/01/Fact_sheet_Structural_Systems.pdf (Hentet: 15. mars 2019).
- Mandala Homes (2016) *Setup Manual*. Nelson, Canada: Mandala Homes.
- Mandala Homes (2018) *step-4-truss-roof-system* [digitalt fotografi]. Tilgjengelig fra: <https://www.mandalahomes.com/news/building-with-wood-beneficial-beautiful-sustainable/attachment/step-4-truss-roof-system/> (Hentet: 05. april 2019).
- Mandala Homes (2019a) *ABOUT MANDALA CUSTOM HOMES*. Tilgjengelig fra: <https://www.mandalahomes.com/about/> (Hentet: 13. mars 2019).

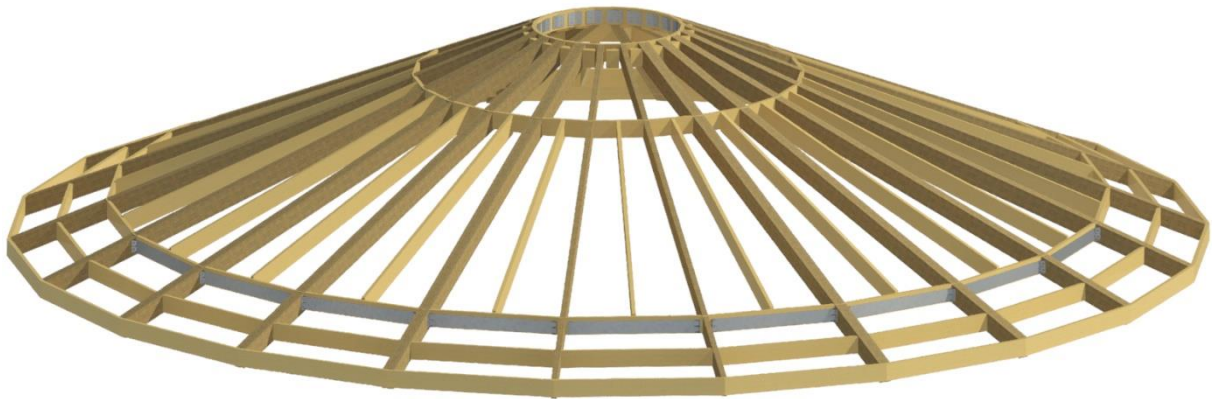
- Mandala Homes (2019b) *Project Timeline*. Tilgjengelig fra: <https://www.mandalahomes.com/build-your-home/project-timeline/> (Hentet: 18. mars 2019).
- NTNU (2015) *Introduksjon IMRAD*. Tilgjengelig fra: https://www.youtube.com/watch?time_continue=421&v=49QVAYLA3IA (Hentet: 07. april 2019).
- Nyrud, A. Q. og Bringslimark, T. (2012) *Opplevelse av tre i innemiljø*, Fokus på Tre (54). Tilgjengelig fra: http://www.trefokus.no/resources/filer/fokus-pa-tre/Fokus_nr_54_JZ3zO.pdf.
- Pantheon* (118-125) [digitalisert tegning]. Finnes ved University of Michigan Library Digital Collections. Tilgjengelig fra: http://quod.lib.umich.edu/h/hiaaic/x-prang17-und-13/prang17_13 (Hentet: 15. mai 2019).
- Rome.info team (2003) *Roman Pantheon*. Tilgjengelig fra: <https://www.rome.info/pantheon/> (Hentet: 15. mai 2019).
- Scheele, E. S. (2003) *Cupola del Brunelleschi* [digitalt fotografi]. Tilgjengelig fra: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cupola_santamariadelfiore.jpg#filelinks (Hentet: 12. mai 2019).
- SINTEF Byggforsk (2003) *471.010 Varmekonduktivitet og varmemotstand for bygningsmaterialer*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/209/varmekonduktivitet_og_varmemotstand_for_bygningsmaterialer#i13 (Hentet: 26. mars 2019).
- SINTEF Byggforsk (2012) *525.102 Isolerte skrå tretak med kombinert undertak og vindspærre*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/383/isolerte_skråa_tretak_med_kombinert_under_tak_og_vindspærre (Hentet: 04. april 2019).
- SINTEF Byggforsk (2013a) *471.031 Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster_for_bygningsmaterialer_byggevarer_og_bygningsdeler#i0 (Hentet: 28. februar 2019).
- SINTEF Byggforsk (2013b) *471.031 Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/215/egenlaster_for_bygningsmaterialer_byggevarer_og_bygningsdeler#i0 (Hentet: 13. mars 2019).
- SINTEF Byggforsk (2015a) *525.861 Taktro av tre*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/409/taktro_av_tre (Hentet: 18. mai 2019).
- SINTEF Byggforsk (2015b) *525.861 Taktro av tre*. Tilgjengelig fra: https://www.byggforsk.no/dokument/409/taktro_av_tre#i2 (Hentet: 15. mai 2019).
- SNL (2009) *Raft*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/raft> (Hentet: 18. mai 2019).
- Song, P. *et al.* (2013) Reciprocal Frame Structures Made Easy, 32(94). doi: <http://doi.acm.org/10.1145/2461912.2461915>.
- South, D. (2009) *Technical Journal - Think Round*. Tilgjengelig fra: <https://www.monolithic.org/round2it/technical-journal-think-round> (Hentet: 18. mars 2019).
- Spigerverk, C. (2017) *Hva er et spikeslag*. Tilgjengelig fra: <https://boligkanalen.no/spigerverket/hva-er-et-spikerslag> (Hentet: 18. mai 2019).
- Standard Norge (2009a) *NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=396860> (Hentet: 23. januar 2019).

- Standard Norge (2009b) *NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-4: Allmenne laster - Vindlaster*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=392208> (Hentet: 28. februar 2019).
- Standard Norge (2009c) *Symboler for ende-, kant- og hullavstander for festemidler* [figur]. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=396860> (Hentet: 26. mars 2019).
- Standard Norge (2009d) *Spenninger i sveisesnittets plan* [figur]. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=396860> (Hentet: 28. mars 2019).
- Standard Norge (2010a) *NS-EN 1995-1-2:2004+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-2: Brannteknisk dimensjonering*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=418958> (Hentet: 26. mars 2019).
- Standard Norge (2010b) *NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=436137> (Hentet: 23. januar 2019).
- Standard Norge (2013) *ISO 19901-7:2013 Petroleum and natural gas industries — Specific requirements for offshore structures — Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=638817> (Hentet: 15. mai 2019).
- Standard Norge (2015) *NS-EN 1993-1-1:2005+A1:2014+NA:2015 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=755701> (Hentet: 21. mars 2019).
- Standard Norge (2016a) *NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016 Eurokode: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=814847> (Hentet: 28. februar 2019).
- Standard Norge (2016b) *NS-EN 338:2016 Konstruksjonstrevirke - Fasthetsklasser*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=824287> (Hentet: 06. april 2019).
- Standard Norge (2016c) *NS-EN 14080:2013+NA:2016 Trekonstruksjoner - Limtre og limt laminert heltre - Krav*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=866055> (Hentet: 29. januar 2019).
- Standard Norge (2018) *NS-EN 1991-1-3:2003+A1:2015+NA:2018 Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster - Snølaster*. Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1004200> (Hentet: 11. januar 2019).
- Statskog (2018) *Våre Skoger*. Tilgjengelig fra: <https://www.statskog.no/skog-og-klima/skogen-i-tall> (Hentet: 19. mai 2019).
- Svanæs, J. (2004) *Tre og miljø, Fokus på tre*, (8). Tilgjengelig fra: <http://www.treteknisk.no/resources/filer/publikasjoner/fokus-pa-tre/Fokus-nr-8.pdf>.

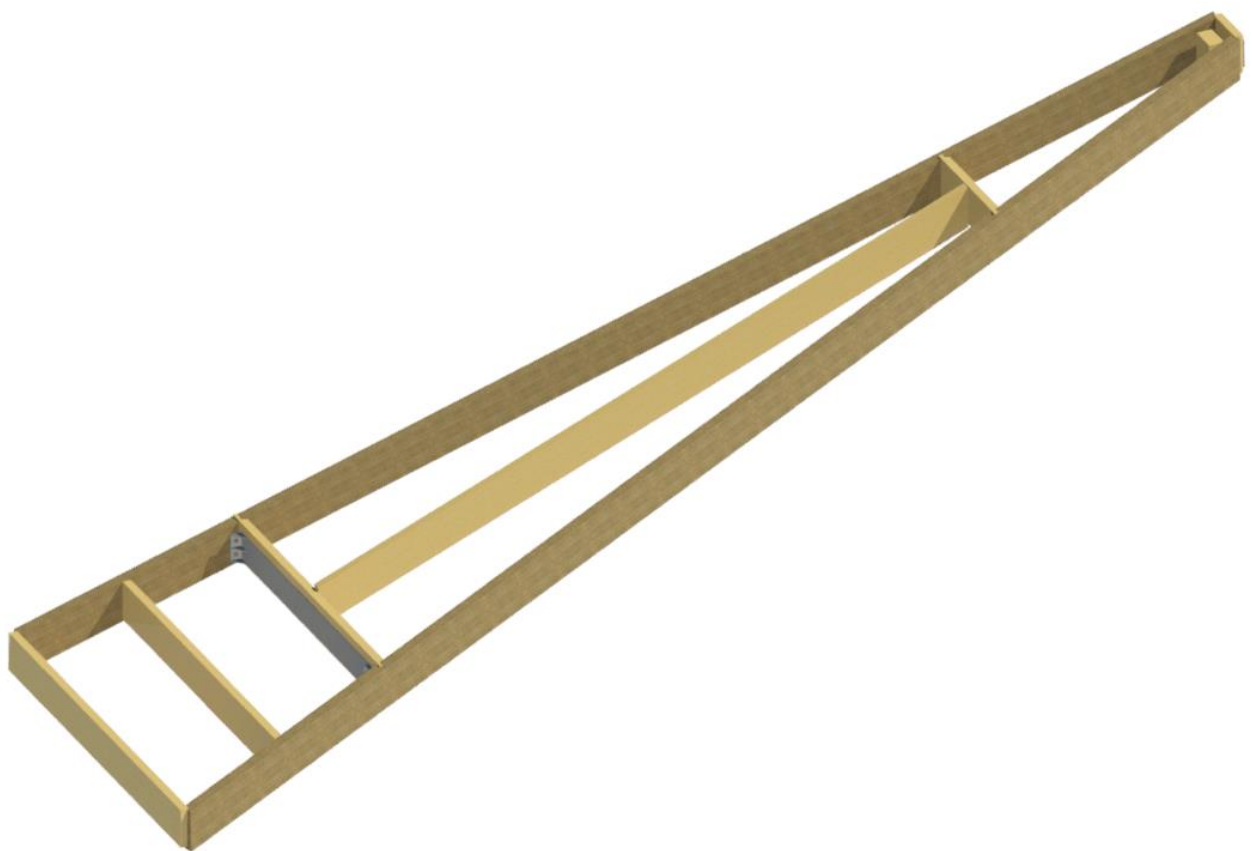
- Tellnes, L. G. F. *et al.* (2013) *Assessment of carbon footprint of laminated veneer lumber elements in a six story housing – comparison to a steel and concrete solution.* (LCA of Sustainable Materials and Technologies 11). irbnet. Tilgjengelig fra: http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC26479.pdf (Hentet: 01. april 2019).
- Thue, J. V. (2016) *Bygningsfysikk grunnlag.* Bergen: Fagbokforlaget.
- Thue, J. V. (2018) *Prefabrikasjon.* Tilgjengelig fra: <https://snl.no/prefabrikasjon> (Hentet: 18. mai 2019).
- Treindustrien (2013) *Lille grønne,* Treindustriens. Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/resources/Treindustriens-lille-gronne.pdf>.
- UiT (2012) *Fagverk.* Tilgjengelig fra: <http://meccanica.no/statikk/fagverk.html> (Hentet: 19. mai 2019).

7 Vedlegg

7.1 Løsningens bæresystem



Figur 33: Illustrasjon av vår løsning, kun bæresystem



Figur 34: Illustrasjon av et enkelt takelement, kun bæresystem

7.2 Tidligere oppgave ved NTNU

SIRKULÆR TAKKONSTRUKSJON

"Utvikling og analyse av en elementbasert takkonstruksjon for sirkulære bolighus"

Introduksjon

Gaia Homes er et norsk foretak som har utviklet ideen om å bygge en landsby inspirert av tradisjonell sirkulære byggeskikk. I dag er foretaket utbygger av økolandsby i Alvdal, hvor en sirkulær bolighustype er under utvikling. Økolandsbyen omfatter 49 hus som er under prosjektering og skal oppføres fra 2017.



Gaia Homes ønsker en byggemetode for takkonstruksjonen som effektiviserer byggeprosessen. Ønsket løsning er prefabrikasjon. Prosjektet tar sikte på utarbeide en komplett selvberørende sirkulær takkonstruksjon. Det fremmes et design som dimensjoneres etter gjeldende lover og standarder. Det inkluderer bæresystemet, forbindelser samt alle nødvendige sjikt. Avslutningsvis er det foretatt en diskusjon og analyse over hvorvidt løsningen er optimal. Produksjons- og monterings tid er sentrale faktorer.

Konstruksjonsmessige utfordringer

Etter ønske fra Gaia Homes:

- Sirkulært vindu i sentrum av taket, diameter lik 1,83 meter
- Åpen himling, kuppelformet innvendig
- Takets ytre diameter kan variere fra 10-18 meter
- 22 grader helning på taket
- Taktelementene må passe segmentinndelingen av veggene
- Trevirke som byggemateriale
- Bruk av trefiberisolasjon i taket

Metode og utførelse

Visualisering: Bruk av ArchiCad
Designfase: Fire designforslag blir presentert
Elimineringsprosess: Analyse av hvert design. Sentrale faktorer: Mulighet for prefabrikasjon, kritiske punkter/ulempen, monterings tid og etterarbeid, praktisk gjennomførbarhet
Videreutvikling: Ytterligere optimalisering av valgt design
Dimensjonering: Manuelle beregninger, Focus Konstruksjon og SFS Software
Analyse og diskusjon: Vurdere egen løsning, og sammenligne

Resultat og diskusjon



Design og dimensjoner gjelder for diameter lik 10-, 13- og 16 meter.

- Elementbasert løsning (prefabrikasjon) er et godt utgangspunkt når målet er å effektivisere byggeprosessen
- Kuldebroer kan bli et problem pga. mye trevirke i skjøtene
- Det er fordelene og ulemper ved isolering på fabrikk eller byggeplass. Det samme gjelder om himlingen er klartgjort på forhånd eller ikke.
- Ved manuelle beregninger fremstår noe som overdimensjonert avhengig av kontrollen som er utført
- I dataprogrammer ser en at det ikke alltid er mulig å simulere den virkelige situasjonen, og dermed må det gjøres forenklinger
- Generelt er konstruksjonen mest kritisk i en situasjon av skjevlast
- I forhold til andre takformer som saltak, fremstår monterings tiden for et sirkulært tak som ugunstig
- Ved å sammenligne prosjektets løsning med andre produsenter av runde hus, ser en at det er mulig å redusere tidsbruken

Konklusjon

Konstruksjonsløsningen betegnes som ukomplett på grunn av usikkerhet rundt sveisen mellom vinkelstål og endeplate samt bruken av kompakt tak. Utfordringene er belyst i rapporten og er nevnt som forslag til videre arbeid.

NTNU Kunnskap for en bedre verden

Anders Jerdal, Emily Berg, Sveinung Sagvik
Bygg - Konstruksjonsteknikk

Fremføring 7. juni kl. 10.30
Auditorium 2/3 Eureka

7.3 Beregninger

Beregning av laster							
Karakteristiske laster							
Egenlast pr. takelement							
Areal input							
Areal lekt	m ²	0.001728					
Areal kubb	m ²	0.0245					
Areal Limtre	m ²	0.016725					
Areal tak	m ²	7.814					
Materiale	oppgitt enhet	hentet verdi, byggforsk	kn/m	m	antall	kn	Total kN
Osب	kn/m ³	6.3	49.23	0.02			0.89
Shingel	kn/m ²	0.05	0.39				0.39
Lekter	kn/m ³	5	0.01	6.58	2.00	0.11	0.11
Limtre	kn/m ³	4.7	0.08	6.58	2.00	1.03	1.03
kubbing	kn/m ³	5	0.12	6.00	1.00	0.74	0.74
Duk	kn/m ²	0.003	0.02				0.02
Himling	kn/m ³	5	39.07	0.015			0.59
Mineralull	kn/m ³	0.6	4.69	0.25			1.17
Total							4.94
kN/m²							0.63
471.031 Egenlaster for bygningsmaterialer, byggevarer og bygningsdeler							
Snølast							
Sk, 0	4						
formfaktor	0.8						
Sk	3.2						
Vindlast							

Terrengruhet	3						
K r	0.2154						
Z 0	0.3						
Z	10.5						
V b0	24	m/s					
C dir	1						
C alt	1		utregnet				
C season	1		0,842 < 1				
C prob	1						
V b	24	m/s					
z	10.5	m	toppen av mønet				
Kw	1.1		Fallsen kompendiet				
q pz	633.6	N/m2					
Eller beregnet via formel: Kw			1.088				
Påvirkning av vind på sirkulært bygg med kuppel-tak							
Byggets form	høyde h	7.4	m				
	diameter d	13.17	m				
	vegghøyde f	2.29	m				
	h/d	0.562					
	f/d	0.174					
	C pe 10	Punkt A	-1.04	interpolering i A			
Diagram i NS	Punkt B	-1					
	Punkt C	-0.5					
We	A	-658.944	N/m2				
	B	-633.6	N/m2			B	
	C	-316.8	N/m2	->	A	B	C
NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009, NA.7.2.8 Bueformede tak og kupler (figur 7.12)							

Påvirkning av vind på sirkulær vegg, sylindere								
EN 1991-1-4:2005, 7.9 Sirkulære sylindere, (1)-(4), Figur 7.27								
Cp, 0	1							
W	633.6	N/m ²						
Forankring av limtretragere mot veggelement								
<i>Framspring fra NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009, 7.2.1.(3) og figur 7.3</i>								
W	633.6	N/m ²						
Areal på utstikk	2.1	m						
trykk	1330.56	N/m						
Sug fra tak (A)	-658.9	N/m ²						
Areal tak stykke	2.65	m ²						
Total F opplag	3077	N/m						
Fokus gir, F	3300	N/m						
<i>Løsning fra byggforsk, preakseptert løsning BKS 520.241 Tabell 51</i>								
Kapasitet	4400	N/m						
kap .utn	0.75	ok						

Aksialbelastede forbindelser			
		Her: Limtre drager	Her: kubbinga
Grunnlag for beregning		For treverk 1	For treverk 2
Virke	Type	C24	C24
	Kmod	0.8	0.8
	Materialfaktor	1.3	1.3
	ρ , densitet (kg/m ³)	350	350
Festemiddel	Type	6x90	Enhet
	Diameter, d	6	mm
	Lengde, total	90	mm
	Diameter, hode	12	mm
	l _p , lengde gjengeparti	60	mm
	l _{ef} , effektivt gjengeparti	51	mm
Min. avstand for aksialbelastede skruer [mm]		Min. avstand fra tyngdepunktet i gjenget del av skruer [mm]	
<i>i et plan i fiberretning</i> <i>a₁</i>	<i>i et plan vinkelrett på fiberretning</i> <i>a₂</i>	<i>til enden</i> <i>a_{1,CG}</i>	<i>til en kant</i> <i>a_{2,CG}</i>
42.00	30.00	60.00	24.00
Norsk Standard NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner			
Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger 8.7.2(2) Tabell 8.6			
Antall	Antall rader	1	
	Antall forbindere per rad	1	
	Antall forbindere totalt	1	
	Totalt antall effektive, n _{ef,tot}	1.00	
Norsk Standard NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner			
Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger 8.7.2(8), Formel (8.41)			

Kapasitetsberegning, 1-3		
1. Karakteristisk uttrekkskapasitet, input		
n ef, antall effektive	1.00	stk
d, diameter	6	mm
l ef, effektivt gjengeparti	51	mm
ρ , densitet	350	kg/m ³
kd,	0.75	
α , vinkelen - skrue/fiberretning	45	°
Karakteristisk uttrekksparameter normalt på fiberretningen		
F ax, k	15.54	N/mm ²
Karakteristisk uttrekningskapasitet til forbindelsen i vinkel α på fiberretningen		
F ax, α , Rk	3242.02	N
Norsk Standard NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner		
Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger 8.7.2(4) og (5)		
Herfra husk å endre densitet i grunnlaget (på toppen av arket)		
2. Skruehodetsgjennomtrekningsmotstand, input		
n ef, antall effektive	1.00	stk
d h, diameter skruehodet	12	mm
ρ k, densitet	350	kg/m ³
ρ a, tilhørende densitet	400	kg/m ³
f head k, gjennomtrekningsparam.	18.63	N/mm ²
f head k er hentet fra datablad og fungerer herved som veiledende parameter		

<http://wpp.cobuilder.com/DocumentHandler?params=17F26D99DFBF8A71BA6F40E5FF170E62D419DD>

Karakteristisk gjennomtrekningskapasitet for skruer med vinkel i forhold til fiberretning		
F _{ax, a} , R _k	2410.91	N
Norsk Standard NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner		
Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger 8.7.2(6), Formel (8.40b)		
3. Skruens strekkfasthet		
k ₂ , (fast parameter)	0.63	<i>0.63 for senkskrue, ellers 0.9</i>
Fasthetklasse	8.8	
f _{ub} , strekkfasthet	800	N/mm ²
γ _{M2} , materialfaktor	1.25	
innvendig r, hentet fra datablad	2.1	mm
A _s	13.85	mm ²
n, antall forbindere	1	stk
Karakteristisk strekkapasitet for skruegruppe		
F _t , R _k ,	6982.42	N
Norsk Standard NS-EN 1993-1-8:2005+NA:2009 Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner		
Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser Tabell 3.4		
Dimensjonerende kapasitet for forbindelsen		
γ _m , materialfaktor	1.3	
K _{mod} , fasthetsfaktor	0.8	
minste kar. kapasitet	2410.91	N
F _{ax} , R _d	1483.64	N

Vindforankring per veggelement		
N Rd, kap. 3 skruer	4450.918877	N
N Ed, opptredende	4310	N
utnyttelsesgrad	96.83%	

Stålforbindelse kubbing/limtre			
ρ, densitet	390	kg/m ³	
f h2, hullkantfasthet	25.584	N/mm ²	
t 2, tykkelse trevirke	140	mm	
d, diameter bolt	20	mm	
My, flytmoment bolt	579280.93	Nmm	
F ax, uttrekkskapasitet bolt	8812.5	N	
f uk, strekkfasthet	800	N/mm	
t 1, tykkelse stålplate	6	mm	
skruelengde	200	mm	
Karakteristisk kapasitet per forbinder			
for de aktuelle bruddformene			
(j)	35817.6	N	
(k)	30203.0	N	
(l)	35817.6	N	
(m)	41801.0	N	
Minste karakteristiske kapasitet per forbinder			30203.0 N
Dimensjonerende kapasitet for hele forbindelsen			
Kmod	0.8		
materialfaktor	1.3		
antall bolter	2	stk	

Kapasitet	37172.97	N
Opptredende kraft	35220	N
utnyttelsesgrad	94.75%	
Underlagsskiven		
Underlagsskivens uttrekkskapasitet		
Fc90k, GL30c	2.5	N/mm ²
12*t	72	mm
4*d	80	mm
D skive	72	mm
d hull	22	mm
Fax, underlagsskive	8812.5	N
Boltens strekkapasitet		
As, spenningsareal	245	mm ²
f ub, strekkfasthet	800	N/mm ²
Fax, bolt	141120	N
Opptredende kraft, tot	101340	N
Kraft per bolt	50670	N
utnyttelsesgrad	35.91%	
Merknader og grunnlag		
EC5-1-1 8.5.2(1)		
EC5-1-1 8.5.2(2) beregnes kapasiteten til en underlagsskive under forutsetning av at den		
karakteristisk trykkfasthet på kontaktflaten er 3 x fc,90,k		
EC5-1-1 8.5.2(3) må ikke kapasiteten per bolt i en stålplate overskride kapasiteten til en		
sirkulær underlagsskive med en diameter, D, som er den minst av:		
- 2 x t, der t er platetykkelsen		
- 4 x d, der d er boltediameteren		

NS-EN 14080 tabell 4			
gjengebetegnelse		As, spenningsareal	
M12		84	mm ²
M16		157	mm ²
M18		192	mm ²
M20		245	mm ²
M22		303	mm ²

Forbindelse i trykkringen - franske treskruer

<i>Kraft på tvers av fiberretning</i>			
Bruddform - tre mot stål		Underlagsskivens uttrekkskapasitet	
ρ , densitet	350 kg/m ³	Fc90k, C24	2.5 N/mm ²
f h 0, hullkantfasthet	25.3 N/mm ²	12*t	60 mm
k 90	1.53	4*d	48 mm
f h 90	16.507 N/mm ²	D skive	48 mm
t 2, tykkelse trevirke	160 mm	d hull	14 mm
d, diameter bolt, mm	12 mm	Fax, underlagsskive	3952.5 N
t 1, tykkelse stålplate	5 mm		
f uk, strekkfasthet	800 N/mm ²	Boltens strekkapasitet	
My, flytmoment bolt	153490.85 Nmm	As, spenningsareal	84 mm ²
F ax, uttrekkskapasitet bolt	3952.5 N	f ub, strekkfasthet	800 N/mm ²
		Fax, bolt	48384 N
Karakteristisk kapasitet per forbinder			
(a)	12677.5 N	Gjengebetegnelse	As
(b)	8861212.6 N	M12	84
(c)	31693.8 N	M16	157
(d)	15452.9 N	M18	192
(e)	13670.3738 N	M20	245
		M22	303
Minste karakteristiske kapasitet per forbinder			

F v, Rk	12677.5	N			
Kmod	0.8				
materialfaktor	1.3				
antall bolter	3				
<i>nb: på én side av skjøt</i>					
Dimensjonerende kapasitet for hele forbindelsen					
F v, ef, Rk	23404.66	N			
Kontroll, opptredende mot kapasitet					
Vz, d	22190	N			
Vz, kap	23405	N			
Utnyttelsesgrad	94.81%				
Forbindelse i trykkringen - treskrue					
<i>Kraft på tvers av fiberretning</i>					
Bruddform - tre mot stål			Underlagsskivens uttrekkapasitet		
p densitet	350	kg/m ³	Fc90k, c24	2.5	N/mm ²
f hk, hullkantrykk	16.36	N/mm ²	12*t	36	mm
t, tykkelse tre	48	mm	4*d	24	mm
t, tykkelse stål	3	mm	D skive	24	mm
d, diameter skrue	6	mm	d hull	8	mm
My, flytmom. skrue	12658.27	Nmm	Fax, underlagsskive	960	N
Fax, uttrekk.kap.	960	N			
f ub, strekkfasthet	400	N/mm ²	Skruens strekkapasitet		
Karakteristisk kapasitet pr. forbinder F v,Rk			As, spenningsareal	10	mm ²
(a)	1884.37	N	f ub, strekkfasthet	400	N/mm ²
(b)	2052.73	N	Fax, bolt	2880	N
(c)	4710.91	N			

(d)	2554.38	N			
(e)	2803.58	N			
Valgt verdi basert på den mest krisitske					
Min. F v, Rk	1884.37	N			
Dimensjonerende kapasitet i forbindelsen					
n ef	12	stk			
Fv, ef, Rk	22612.39	N			
Kontroll, opptredende mot kapasitet					
Vz, d	22190	N			
Vz, kap	22612	N			
Utnyttelsesgrad	98.13%				

Minimumsavstander					
	Avstand	Vinkel	Minste avstander [mm]		
			Uten forboring		Med forboring
			$\rho_k \leq$	$420 < \rho_k \leq$	
			420 kg/m ³	500 kg/m ³	
Min. avstander for tverrbelastede skruer, d ≤ 6 mm	<i>a₁</i> (i fiberretning)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	d < 5 mm	67.22	27.15
			45.76		
			d ≥ 5 mm		
			52.06		
	<i>a₂</i> (vinkelrett på fiberretning)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	30.00	42.00	23.11
	<i>a_{3,t}</i> (belastet ende)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	75.76	105.76	57.76
	<i>a_{3,c}</i> (ubelastet ende)	$90^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	60.00	90.00	42.00
	<i>a_{4,t}</i> (belastet kant)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	d < 5 mm	d < 5 mm	d < 5 mm
			40.21	52.21	28.21
			d ≥ 5 mm	d ≥ 5 mm	d ≥ 5 mm

			55.53	67.53	38.42
	$a_{4,c}$ (ubelastet kant)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	30.00	42.00	18.00
	Vinkel, α	45.00			

Norsk Standard NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner

Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger 8.3.1.2(5) Tabell 8.2

Min. avstander for tverrbelastede skruer, $d > 6$ mm	Avstand	Vinkel	Minste avstander [mm]	
	a_1 (i fiberretning)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$		27.15
	a_2 (vinkelrett på fiberretning)	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$		24.00
	$a_{3,t}$ (belastet ende)	$-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	max	42.00
				80.00
	$a_{3,c}$ (ubelastet ende)	$90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$		36.63
		$150^\circ \leq \alpha < 210^\circ$		24.00
		$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$		36.63
	$a_{4,t}$ (belastet kant)	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	max	22.21
18.00				
$a_{4,c}$ (ubelastet kant)	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$		18.00	
Vinkel, α	45.00			

Norsk Standard NS-EN 1995-1-1:2004+A1:2008+NA:2010 Eurokode 5: Prosjektering av trekonstruksjoner

Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger 8.5.1.1(3) Tabell 8.4

Effektivt antall forbindere for én rad med n forbindere i fiberretning med last i fiberretning		
n_{ef}	min	2.00
		1.43
Effektivt antall forbindere for én rad med n forbindere vinkelrett på fiberretning med last vinkelrett på fiberretning		
n_{ef}		2.00

Effektivt antall forbindere for én rad med n forbindere med vinkel α i forhold til fiberretning					
n_ef	min	6.53	OBS!		
		6.15			

7.4 Beregninger for strekkring

Strekkapasitet (langplate)					
Inndata					
Tverrsnittsareal, A	1280,00	mm ²	8,00 mm		
Flytspenning, f_y	355,00	N/mm ²	S 355		
Partialfaktor, γ_{M0}	1,05				
Kontroll					
Dimensjonerende kraft, N_ed	101340,00	N	Resterende kapasitet	76,58%	
Dimensjonerende kapasitet, N_t,Rd	432761,90	N			
Ende-, kant- og hullavstander					
Inndata					
d_0	22,00	mm	M20		
Utdata					
Endeavstand, e_1	26,40	mm			101,20

Kantavstand, e_2	26,40	mm	Minste lengde (mm)	
Hullavstand, p_1	48,40	mm	Minste bredde (mm)	52,80
Hullavstand, p_2	52,80	mm		
Avskjæringskapasitet per snitt (ugjenget del)				
Inndata				
Stålkvalitetsfaktor, α_v	0,60		8.8	
Strekfasthet, f_ub	800,00	N/mm ²	8.8	
Bruttotverrsnitt, A	314,00	mm ²	M20	
Partialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, F_v,Ed	7210,00	N	Resterende kapasitet	94,02%
Dimensjonerende kapasitet, F_v,Rd	120576,00	N		
Avskjæringskapasitet per snitt (gjenget del)				
Inndata				
Stålkvalitetsfaktor, α_v	0,60		8.8	
Strekfasthet, f_ub	800,00	N/mm ²	8.8	
Spenningsareal, A_s	245,00	mm ²	M20	

Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, $F_{v,Ed}$	7210,00	N	Resterende kapasitet	92,34%
Dimensjonerende kapasitet, $F_{v,Rd}$	94080,00	N		
Kapasitet for hullkantrykk				
Inndata				
Korreksjonskoeffisient, k_1	1,66			
Korreksjonskoeffisient, α_b	0,40			
Strekfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Boltdiameter, d	20,00	mm	M20	
Godstykkelse, t	8,00	mm	8,00 mm	
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, $F_{v,Ed}$	14420,00	N	Resterende kapasitet	65,37%
Dimensjonerende kapasitet, $F_{b,Rd}$	41646,08	N		
Dimensjonering mot blokkutrivning				
Inndata				

Strekfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Nettoareal strekkpåkjent, A_{nt}	464,00	mm ²		
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Flytspenning, f_y	355,00	N/mm ²	S 355	
Nettoareal skjærpåkjent, A_{nv}	304,00	mm ²		
Materialfaktor, γ_{M0}	1,05			
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, N_{Ed}	14420,00	N	Resterende kapasitet	94,02%
Dimensjonerende kapasitet, $V_{eff,1,Rd}$	241228,61	N		
Strekkapasitet (kortplate)				
Inndata				
Tverrsnitt, A	1280,00	mm ²	8,00 mm	
Flytspenning, f_y	355,00	N/mm ²	S 355	
Materialfaktor, γ_{M0}	1,05			
Nettotverrsnitt, A_{net}	928,00	mm ²		
Strekfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Kontroll				

Dimensjonerende kraft, N_{Ed}	14420,00	N		
Dimensjonerende kapasitet, $N_{pl,Rd}$	432761,90	N	Rest. kap.	96,67%
Dimensjonerende kapasitet, $N_{u,Rd}$	327398,40	N	Rest. kap.	95,60%
Strekkkapasitet (bolt)				
Inndata				
Korreksjonskoeffisient, k_2	0,90			
Strekkfasthet, f_{ub}	800,00	N/mm ²	8.8	
Spenningsareal, A_s	245,00	mm ²	M20	
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, $F_{t,Ed}$	50670,00	N	Resterende kapasitet	64,09%
Dimensjonerende kapasitet, $F_{t,Rd}$	141120,00	N		
Gjennomlokking				
Inndata				
Minste middelvei, d_m	31,48	mm		
Platetykkelse, t_p	8,00	mm	8,00 mm	
Strekkfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	

Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, $F_{t,Ed}$	50670,00	N	Resterende kapasitet	72,76%
Dimensjonerende kapasitet, $B_{p,Rd}$	185990,89	N		
Kombinert avskjæring og strekk (bolt)				
Inndata				
Dimensjonerende skjærkraft, $F_{v,Ed}$	7210,00	N		
Dimensjonerende skjærkapasitet, $F_{v,Rd}$	94080,00	N		
Dimensjonerende strekkraft, $F_{t,Ed}$	50155,00	N		
Dimensjonerende strekkkapasitet, $F_{t,Rd}$	141120,00	N		
Kontroll				
$1,00 \geq$	0,33		Rest. kap.	66,95%
Sveiskapasitet (1), retningsmetoden				
Inndata				
Antall sveis	4,00	stk		
Lengde per sveis, L	60,00	mm		
Halsmål, a	3,00	mm	3,00 mm	

Effektiv lengde, L_{eff}	216,00	mm		
Sveisetverrsnitt, A	648,00	mm ²		
Normalkraft, F	0,00	N		
Skjærkraft, V	101340,00	N		
Normalspenning, σ_{norm}	0,00	N/mm ²		
Skjærspenning, τ_{norm}	0,00	N/mm ²		
Skjærspenning, τ_{para}	156,39	N/mm ²		
Strekfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Korrelasjonsfaktor, β_w	0,90		S 355	
Kontroll				
Dimensjonerende kraft (1)	270,87	N/mm ²	Resterende kapasitet	37,81%
Dimensjonerende kapasitet (1)	435,56	N/mm ²		
Dimensjonerende kraft (2)	0,00	N/mm ²	Resterende kapasitet	100,00%
Dimensjonerende kapasitet (2)	352,80	N/mm ²		
Sveiskapasitet (2), retningsmetoden				
Inndata				
Antall sveis	2,00	stk		

Lengde per sveis, L	68,00	mm		
Halsmål, a	3,00	mm	3,00 mm	
Effektiv lengde, L_eff	124,00	mm		
Sveisetverrsnitt, A	372,00	mm ²		
Normalkraft, F	101180,00	N		
Skjærkraft, V	5750,00	N		
Normalspenning, σ_{norm}	192,33	N/mm ²		
Skjærspenning, τ_{norm}	192,33	N/mm ²		
Skjærspenning, τ_{para}	15,46	N/mm ²		
Strekfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Korrelasjonsfaktor, β_w	0,90		S 355	
Kontroll				
Dimensjonerende kraft (1)	385,58	N/mm ²	Resterende kapasitet	11,47%
Dimensjonerende kapasitet (1)	435,56	N/mm ²		
Dimensjonerende kraft (2)	192,33	N/mm ²	Resterende kapasitet	45,49%
Dimensjonerende kapasitet (2)	352,80	N/mm ²		
Sveiskapasitet (3), retningsmetoden				

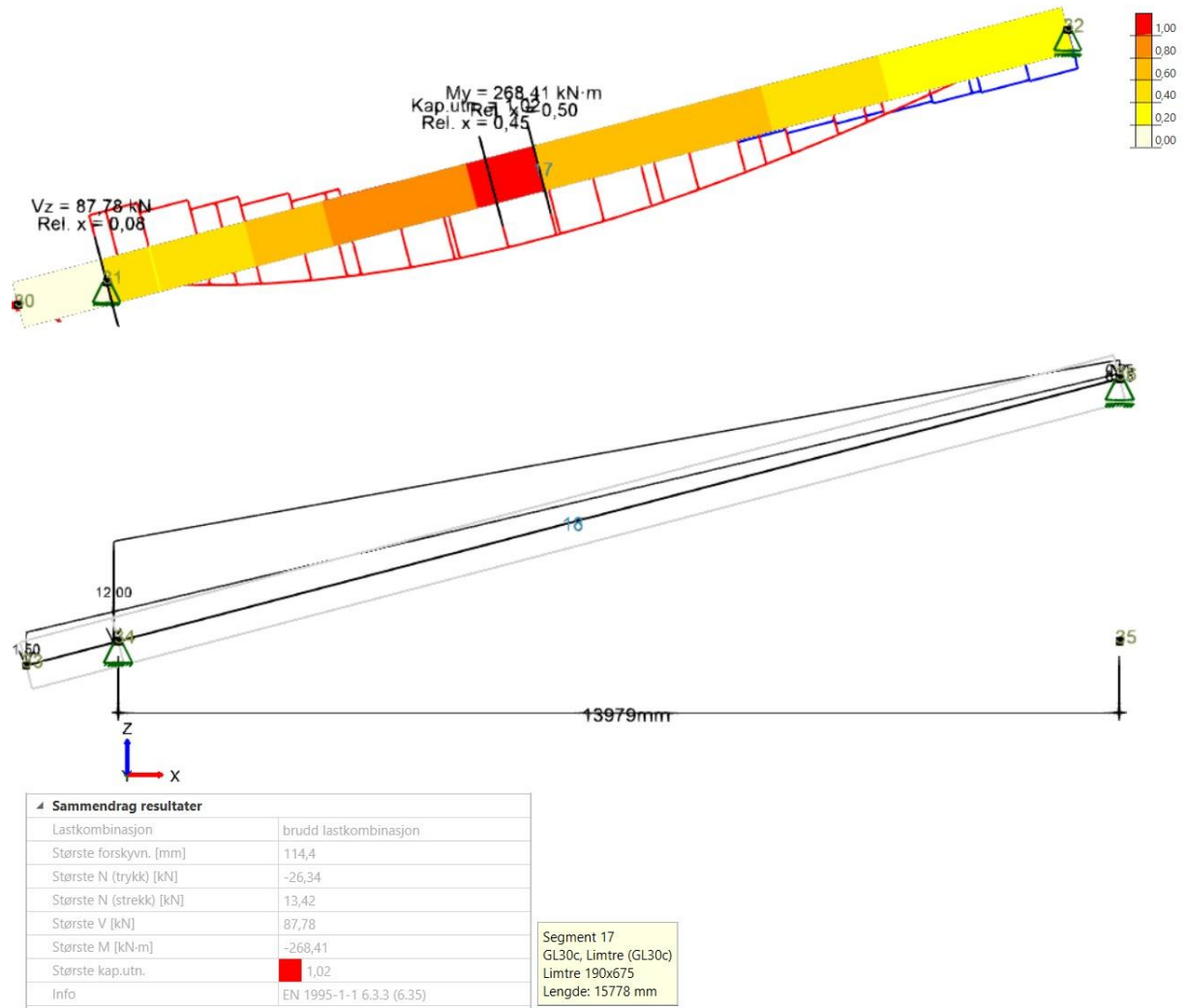
Inndata				
Antall sveis	4,00	stk		
Lengde per sveis, L	60,00	mm		
Halsmål, a	3,00	mm	3,00 mm	
Effektiv lengde, L_eff	216,00	mm		
Sveisetverrsnitt, A	648,00	mm ²		
Normalkraft, F	100310,00	N		
Skjærkraft, V	14420,00	N		
Normalspenning, σ_{norm}	109,46	N/mm ²		
Skjærspenning, τ_{norm}	109,46	N/mm ²		
Skjærspenning, τ_{para}	22,25	N/mm ²		
Strekkefasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Korrelasjonsfaktor, β_w	0,90		S 355	
Kontroll				
Dimensjonerende kraft (1)	222,29	N/mm ²	Resterende kapasitet	48,96%
Dimensjonerende kapasitet (1)	435,56	N/mm ²		
Dimensjonerende kraft (2)	109,46	N/mm ²		68,97%

Dimensjonerende kapasitet (2)	352,80	N/mm ²	Resterende kapasitet	
Sveiskapasitet (1), forenklet metode				
Strekfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Korrelasjonsfaktor, β_w	0,90		S 355	
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Dimensjonerende skjærfasthet, $f_{vw,d}$	318,26	N/mm ²		
Antall sveis	4,00	stk		
Lengde per sveis, L	60,00	mm		
Halsmål, a	3,00	mm	3,00 mm	
Effektiv lengde, L_{eff}	216,00	mm		
Sveisetverrsnitt, A	648,00	mm ²		
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, $F_{w,Ed}$	101340,00	N	Resterende kapasitet	50,86%
Dimensjonerende kapasitet, $F_{w,Rd}$	206235,29	N		
Sveiskapasitet (2), forenklet metode				
Strekfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Korrelasjonsfaktor, β_w	0,90		S 355	

Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Dimensjonerende skjærfasthet, $f_{vw,d}$	318,26	N/mm ²		
Antall sveis	2,00	stk		
Lengde per sveis, L	65,00	mm		
Halsmål, a	3,00	mm	3,00 mm	
Effektiv lengde, L_{eff}	118,00	mm		
Sveisetverrsnitt, A	354,00	mm ²		
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, $F_{w,Ed}$	101340,00	N	Resterende kapasitet	10,05%
Dimensjonerende kapasitet, $F_{w,Rd}$	112665,57	N		
Sveiskapasitet (3), forenklet metode				
Strekfasthet, f_u	490,00	N/mm ²	S 355	
Korrelasjonsfaktor, β_w	0,90		S 355	
Materialfaktor, γ_{M2}	1,25			
Dimensjonerende skjærfasthet, $f_{vw,d}$	318,26	N/mm ²		
Antall sveis	4,00	stk		
Lengde per sveis, L	60,00	mm		
Halsmål, a	3,00	mm	3,00 mm	

Effektiv lengde, L_{eff}	216,00	mm		
Sveisetverrsnitt, A	648,00	mm ²		
Kontroll				
Dimensjonerende kraft, $F_{w,Ed}$	101340,00	N	Resterende kapasitet	50,86%
Dimensjonerende kapasitet, $F_{w,Rd}$	206235,29	N		

7.5 Beregningsresultat for grenseverdier



7.6 Formler og forklaring

7.6.1 Beregningsgrunnlag for takbjelker

Kapasitetkontroll på tverrsnittet mot opptredende bøyespenning, har utgangspunkt i kontroll (6.11) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b):

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,00 \quad (6.11) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

For å finne nødvendig bjelketverrsnitt A , finner man det nødvendige motstandsmomentet til bjelketverrsnittet $W_{y,min}$. Kontrollen omgjøres slik:

$$M_{y,d} \leq M_{y,Rd}$$

hvor

$$M_{y,d} = \sigma_{m,y,d} * W_y$$

$$M_{y,Rd} = f_{m,y,d} * W_{y,min}$$

(Landgraff, 2017b)

ny kontroll

$$M_{y,d} \leq f_{m,y,d} * W_{y,min}$$

eller

$$\frac{M_{y,d}}{f_{m,y,d}} \leq W_{y,min}$$

$M_{y,d}$ er dimensjonerende moment om y-aksen. Dimensjonerende bøyefasthet om y-aksen $f_{m,y,d}$ beregnes etter følgende formel:

$$f_{m,y,d} = k_{mod} * \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_M} \quad (2.14) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

For tilfredsstillende motstand mot opptredende skjærspenninger, anvendes følgende kontroll:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (6.13) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Der dimensjonerende skjærspenningen τ_d beregnes etter følgende formel:

$$\tau_d = \frac{1,5 * V_{z,d}}{h * b * k_{cr}} \quad (\text{Landgraff, 2017a})$$

Dimensjonerende skjærfasthet $f_{v,d}$ beregnes etter følgende formel:

$$f_{v,d} = k_{mod} * \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_M} \quad (2.14) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

7.6.2 Beregningsgrunnlag for Trykkring

Dimensjonerende trykkspenning kontrolleres:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Dimensjonerende trykkfasthet i fiberretningen beregnes:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} * \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad (2.14) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Kontroll mot opptredende skjærspenninger:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (6.13) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Dimensjonerende skjærspenningen τ_d beregnes:

$$\tau_d = \frac{1,5 * V_{z,d}}{h * b * k_{cr}} \quad (\text{Landgraff, 2017a})$$

Dimensjonerende skjærfasthet $f_{v,d}$ beregnes:

$$f_{v,d} = k_{mod} * \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \quad (2.14) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

7.6.3 Beregningsgrunnlag for strekkring

For å beregne strekkapasiteten til staget $N_{t,Rd}$, anvendes følgende formel:

$$N_{t,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6) \text{ (Standard Norge, 2015)}$$

Strekkkapasiteten blir kontrollert opp mot opptredende strekkraft N_{Ed} etter følgende kriterium:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd} \quad (6.5) \text{ (Standard Norge, 2015)}$$

For å beregne avskjæringskapasiteten for en bolt $F_{v,Rd}$, anvendes følgende formel:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{ub} * A}{\gamma_{M2}} \quad \text{Tabell 3.4 (Standard Norge, 2009a)}$$

Avskjæringskapasiteten blir kontrollert opp mot opptredende avskjæringskraft $F_{v,Ed}$:

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad \text{Tabell 3.2 (Standard Norge, 2009a)}$$

For å beregne kapasiteten mot hullkantrykk til staget $F_{b,Rd}$, anvendes følgende formel:

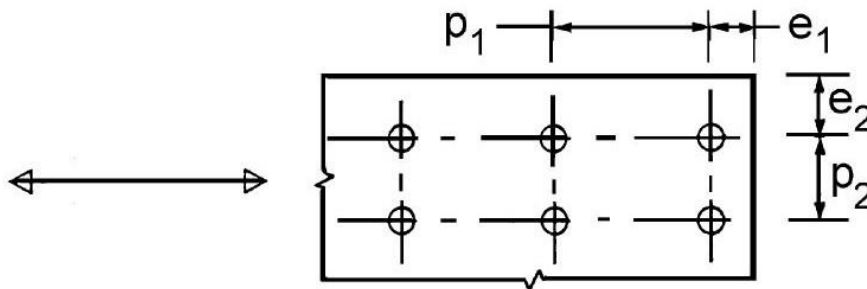
$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 * \alpha_b * f_u * d * t}{\gamma_{M2}} \quad \text{Tabell 3.4 (Standard Norge, 2009a)}$$

I formelen er d boltens nominelle diameter og t er godstykkelsen. Tabell 3.4 i NS-EN 1993-1-8 fra Standard Norge (2009a) definerer reduksjonskoeffisientene k_1 og α_b slik:

k_1 er den minste av; $2,8 * \frac{e_2}{d_0} - 1,7$, $1,4 * \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ eller 2,5

α_b er den minste av; 1, $\frac{f_{ub}}{f_u}$, $\frac{e_1}{3*d_0}$ eller $\frac{p_1}{3*d_0} - \frac{1}{4}$

Hvor d_0 er hulldiameteren for en bolt og avstandene e_1 , e_2 , p_1 og p_2 er illustrert under:



Figur 35: Ende-, kant- og hullavstander for festemidler (Standard Norge, 2009c).

Tabell 3.3 i NS-EN 1993-1-8 fra Standard Norge (2009a) angir minste og største hull-, ende- og kantavstander for festemidler:

$$e_1 = 1,2 * d_0$$

$$e_2 = 1,2 * d_0$$

$$p_1 = 2,2 * d_0$$

$$p_2 = 2,4 * d_0$$

Tabell 3.3 (Standard Norge, 2009a)

Kapasiteten for hullkantrykk blir kontrollert opp mot opptredende kraft $F_{v,Ed}$ etter følgende kriterium:

$$F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$$

Tabell 3.2 (Standard Norge, 2009a)

For å beregne strekkapasiteten til en bolt $F_{t,Rd}$, anvendes følgende formel:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 * f_{ub} * A_s}{\gamma_{M2}}$$

Tabell 3.4 (Standard Norge, 2009a)

Kapasiteten mot gjennomlokking blir kontrollert opp mot opptredende strekkraft $F_{t,Ed}$:

$$F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$$

Tabell 3.2 (Standard Norge, 2009a)

Kapasitetskontroll opp mot en kombinert strekk- og skjærkraft:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 * F_{t,Rd}} \leq 1,00$$

Tabell 3.4 (Standard Norge, 2009a)

Kapasiteten mot blokkutrivning av en boltgruppe påkjent av en sentrisk kraft $V_{eff,1,Rd}$:

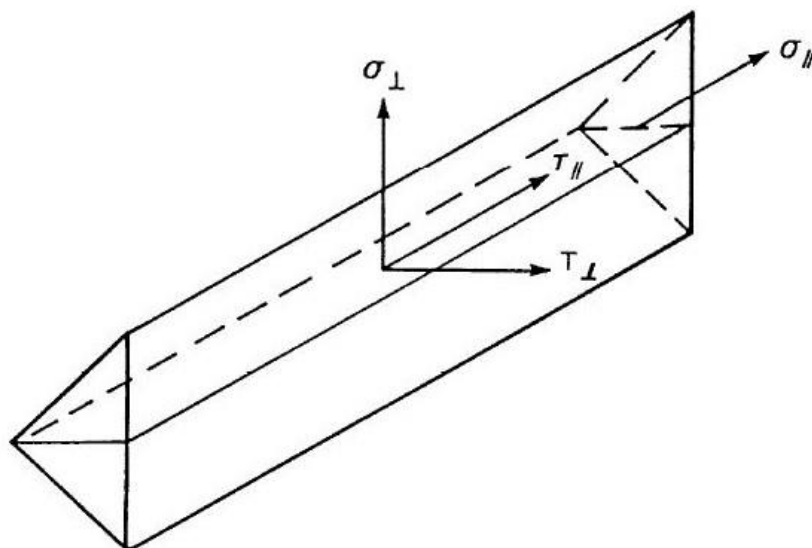
$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u * A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) * f_y * A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

(3.9) (Standard Norge, 2009a)

Kapasiteten mot blokkutrivning blir kontrollert mot opptredende kraft N_{Ed} :

$$N_{Ed} \leq V_{eff,1,Rd}$$

Spenningskomponentene til sveisene kan illustreres som i figuren under:



Figur 36: Spenninger i sveisesnittets plan (Standard Norge, 2009d).

For å kontrollere at kapasiteten til sveisen er tilfredsstillende, må følgende kriterier være oppfylt:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w * \gamma_{M2}}$$

og

(4.1) (Standard Norge, 2009a)

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 * f_u}{\gamma_{M2}}$$

Korrelasjonsfaktoren β_w i formelen bestemmes på bakgrunn av standard og stålsort, og finnes i tabell 4.1 i NS-EN 1993-1-8 fra Standard Norge (2009a). Med stålsorten S 355 vil korrelasjonsfaktoren bli 0,9.

7.6.4 Beregningsgrunnlag for forbindelser

Beregning av den effektive karakteristiske kapasiteten til en forbindelse $F_{v,ef,Rk}$:

$$F_{v,ef,Rk} = n_{ef} * F_{v,Rk} \quad (8.1) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Beregning av den effektive dimensjonerende kapasiteten til en forbindelse $F_{v,ef,Rd}$:

$$F_{v,ef,Rd} = n_{ef} * F_{v,Rk} * \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \quad (\text{Landgraff, 2018b})$$

Beregnet verdi for n :

$$n_{ef} = n^{0,9} * \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 * d}} \quad (8.34) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

For tre-mot-tre-forbindelser og platemateriale-mot-tre-forbindelser er den karakteristiske kapasiteten lik den minste av de beregnede verdiene fra formlene gitt i punkt 8.2.2(1) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b).

Enkeltsnittet forbindelse:

$$a) F_{v,Rk} = f_{h,1,k} * t_1 * d$$

$$b) F_{v,Rk} = f_{h,2,k} * t_2 * d$$

$$c) F_{v,Rk} = \frac{f_{h,1,k} * t_1 * d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2 * \beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$d) F_{v,Rk} = 1,05 * \frac{f_{h,1,k} * t_1 * d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 * \beta (1 + \beta) + \frac{4 * \beta (2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * d * t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$e) F_{v,Rk} = 1,05 * \frac{f_{h,1,k} * t_2 * d}{1 + 2 * \beta} \left[\sqrt{2 * \beta^2 (1 + \beta) + \frac{4 * \beta (1 + 2 * \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * d * t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$f) F_{v,Rk} = 1,15 * \sqrt{\frac{2 * \beta}{1 + \beta}} * \sqrt{2 * M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Dobbeltsnittet forbindelse:

$$g) F_{v,Rk} = f_{h,1,k} * t_1 * d$$

$$h) F_{v,Rk} = 0,5 * f_{h,2,k} * t_2 * d$$

$$j) F_{v,Rk} = 1,05 * \frac{f_{h,1,k} * t_1 * d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2 * \beta (1 + \beta) + \frac{4 * \beta (2 + \beta) M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * d * t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$k) F_{v,Rk} = 1,15 * \sqrt{\frac{2 * \beta}{1 + \beta}} * \sqrt{2 * M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Faktoren β er forholdet mellom de ulike komponentenes hulkantfasthet og beregnes ved følgende formel:

$$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}} \quad (8.8) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

For stål-mot-tre-forbindelser er den karakteristiske kapasiteten lik den minste av de beregnede verdiene fra formlene gitt i punkt 8.2.3(3) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b).

Enkeltsnittet forbindelse, tynn stålplate:

$$a) F_{v,Rk} = 0,4 * f_{h,k} * t_1 * d$$

$$b) F_{v,Rk} = 1,15 * \sqrt{2 * M_{y,Rk} * f_{h,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Enkeltsnittet forbindelse, tykk stålplate:

$$c) F_{v,Rk} = f_{h,k} * t_1 * d$$

$$d) F_{v,Rk} = f_{h,k} * t_1 * d \left[\sqrt{2 + \frac{4 * M_{y,Rk}}{f_{h,k} * d * t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$e) F_{v,Rk} = 2,3 * \sqrt{M_{y,Rk} * f_{h,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Dobbeltsnittet forbindelse, vilkårlig tykk stålplate som den sentrale komponenten:

$$f) F_{v,Rk} = f_{h,1,k} * t_1 * d$$

$$g) F_{v,Rk} = f_{h,1,k} * t_1 * d \left[\sqrt{2 + \frac{4 * M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} * d * t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

$$h) F_{v,Rk} = 2,3 * \sqrt{M_{y,Rk} * f_{h,1,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Dobbelsnittet forbindelse, tynne stålplater som de ytre komponentene:

$$j) F_{v,Rk} = 0,5 * f_{h,2,k} * t_2 * d$$

$$k) F_{v,Rk} = 1,15 * \sqrt{2 * M_{y,Rk} * f_{h,2,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

Dobbelsnittet forbindelse, tykke stålplater som de ytre komponentene:

$$l) F_{v,Rk} = 0,5 * f_{h,2,k} * t_2 * d$$

$$m) F_{v,Rk} = 2,3 * \sqrt{M_{y,Rk} * f_{h,2,k} * d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4}$$

I uttrykkene ovenfor bestemmes karakteristisk hullkantfasthet $f_{h,k}$ for tredel én $f_{h,1,k}$ og tredel to $f_{h,2,k}$ ut i fra forbindelsesmiddel og materialtype for det som forbindes. For bolte- og skrueforbindelser i trevirke og parallellfiner er karakteristisk hullkantfasthet gitt ved:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (8.31) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

der

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad (8.32) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Her er α vinkelen mellom lasten og fiberretningen. Basert på type trevirke kan faktoren k_{90} bestemmes ut fra formlene gitt i punkt 8.5.1.1(2) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b). Følgende formler er gitt:

Bartrevirke:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \quad (8.33) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Parallellfiner:

$$k_{90} = 1,30 + 0,015d$$

Hardved:

$$k_{90} = 0,90 + 0,015d$$

Den karakteristiske hullkantfastheten for skruer med glatt skaft og en diameter på 6 mm eller mindre i trevirke og parallellfiner beregnes etter følgende formler:

uten forboring:

$$f_{h,k} = 0,082 * \rho_k * d^{-0,3} \quad (8.15) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

med forboring:

$$f_{h,k} = 0,082 * (1 - 0,01 * d) * \rho_k \quad (8.16) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Det karakteristiske flytemomentet $M_{y,Rk}$ blir for bolteforbindelser beregnet etter punkt 8.5.1.1(1) og for skrueforbindelser beregnet etter punkt 8.3.1.1(4) i NS-EN 1995-1-1 fra Standard Norge (2010b) på følgende måte:

$$M_{y,Rk} = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6} \quad (8.14) \text{ og } (8.30) \text{ (Standard Norge, 2010b)}$$

Vedlegg slutt.

7.7 Produksjonstegninger

