

AVDELNINGEN FÖR KONSTRUKTIONSTEKNIK
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Box 118
221 00 LUND

DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING, LTH
P.O. Box 118
S-221 00 LUND
SWEDEN

UTVECKLING AV TAKSTOL MED FACKVERK I LIMTRÄ

DEVELOPMENT OF A ROOF TRUSS STRUCTURE IN GLULAM

AXEL BRORSON & ROBERT HEDLUND
VT 2013
TVBK-5226

RAPPORT TVBK-5226
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK-13/5226(74)

EXAMENSARBETE 30 HP
HANDLEDARE:
ROBERTO CROCETTI, KONSTRUKTIONSTEKNIK LTH
LENNART AXELSSON, MOELVEN TÖREBODA AB
ARNE EMILSSON, LIMTRÄTEKNIK AB
EXAMINATOR:
EVA FRÜHWALD HANSSON
JUNI 2013

FÖRORD

Detta examensarbete är skrivet på civilingenjörsutbildningen Väg- och vattenbyggnad på Lunds Tekniska Högskola. Rapporten är skriven på avdelningen för konstruktionsteknik i samarbete med Moelven Töreboda AB och Limträteknik AB.

Vi vill tacka vår handledare Lennart Axelsson för goda råd och för ett trevligt och lärorikt besök på Moelven Törebodas fabrik. Vi vill också tacka Arne Emilsson som varit ett stöd under arbetets gång. Framförallt vill vi tacka Professor Roberto Crocetti som haft en öppen dörr till oss och bidragit med både inspiration och stort kunnande på området.

Ett tack till Øystein Flakk på EDR & Medeso som lånat ut licens till beräkningsprogrammet SAP2000 som varit oss mycket behjälpligt under arbetets gång. Vi vill även tacka Kent Persson på avdelningen för byggnadsmekanik för hjälpen med FEM-modelleringen.

Detta examensarbete har gett oss en chans att fördjupa oss i fackverkskonstruktioner och materialet limträ, men framförallt låtit oss jobba på ett kreativt sätt vilket har varit väldigt roligt. Förhoppningsvis lyser något av detta igenom till läsaren, som i bästa fall också blir inspirerad av rapporten.

Lund, juni 2013

Axel Brorson & Robert Hedlund

”Logik kan ta dig från punkt A till punkt B. Fantasi kan ta dig vart som helst.”

– Albert Einstein

SAMMANFATTNING

I syfte att öka konkurrenskraften för byggande i limträ finns det intresse av att utveckla ett nytt standardiserat koncept för hallbyggnader. Ett effektivt sätt för att bygga hallbyggnader är att utföra dessa med fackverkstakstolar. Det största konkurrerande materialet är stål. En stor ekonomisk osäkerhet för limträkonstruktioner är knutpunkterna. Det huvudsakliga syftet med det här arbetet är att komma fram till en billig och lättmonterad takstol, med 40 m spännvidd, och optimera utformningen av fackverket och dess knutpunkter.

För att nå fram till ett komplett hallbyggnadskoncept krävs att ytterligare frågor utreds. Några av dem är stabilisering av takstol ur sitt plan, stabilisering av hela byggnaden, pelarutformning och grundläggning. Denna rapport behandlar enbart takstolsutformningen.

Fackverket utgörs av en över- och en underram, huvudsakligen med stänger i limträ och några enstaka rundstänger i stål. Speciellt utformade förband i stål och dymlingsförband används i knutpunkterna. Dessa är utformade för att vara tillämpbara vid många olika takstolsutformningar.

Utvecklingsarbetet har gått ut på att generera ett flertal idéer på fackverksgeometrier för att sedan utvärdera dem och komma fram till de bästa lösningarna. Liknande arbetsgång har använts för knutpunkterna. Processen kan delas in i följande steg:

1. **Inspiration och idéstadie:** Ett stort antal konstruktioner studeras och utvärderas. Varianter av de lämpligaste lösningarna tas vidare i projektet.
2. **Skissa:** Olika utformningar av takstolarna skissas för hand för att sedan förfinas och justeras. Antal stänger och deras orientering samt taklutning varieras.
3. **Grov dimensionering:** Tvärsnittskrafter beräknas med SAP2000 och en första dimensionering görs.
4. **Kostnadsberäkning:** Baserat på tvärsnitt och antal knutpunkter uppskattas materialkostnaden för alla alternativen.
5. **Urval:** Ett urval baserat på jämförelse av styvhet, kostnad, antal knutpunkter och stänger samt enkelhet av montage görs.
6. **Slutgiltig dimensionering, optimering och kostnadsberäkning:** Takstolarna från urvalet och deras knutpunkter finjusteras och en ny kostnadsberäkning görs.

19 takstolsalternativ utreds och sex av dem klassas som intressanta och vidareutvecklas. De slutgiltiga material- och produktionskostnaderna för dessa är mellan 85 000 – 105 000 kr och de två billigaste är bågar. Det är betydligt billigare än en jämförbar takstol som en stor svensk limträproducent nyligen sålt. En direkt kostnadsjämförelse är dock svår att göra då inte alla faktorer tagits hänsyn till. De takstolsalternativ och förband som tagits fram bedöms ha potential till att förbättra hallbyggnadskonceptet.

ABSTRACT

In order to increase the competitiveness of construction with glulam, there is interest in developing a new standardized concept for buildings with large open space requirements. An effective way of constructing these buildings is to design them with roof trusses. The main competing material is steel. A great economic uncertainty for glulam roof trusses is the nodes. The main purpose of this thesis is to come up with an inexpensive, easy-to-install truss, with 40 m span, and to optimize the design of the truss and its nodes.

In order to achieve a complete concept it is required to investigate additional parts of the structure. Some of them are stabilization of the truss out of its plane, stabilization of the entire building, design of the columns and foundation. This thesis only concerns the design of the roof truss.

The truss consists of a top and a bottom frame, mainly with glulam members and a few steel members. Specially designed steel and dowelled connections are used in the nodes. These are designed to be applicable to different kinds of roof trusses.

Several ideas on truss geometries and connectors have been generated and evaluated. The whole process can be divided into the following steps:

1. **Inspiration and brainstorming:** A large number of truss structures are studied and evaluated. The most applicable designs are taken further in the process.
2. **Sketch:** Roof trusses are sketched by hand and then refined and adjusted. The number of members and their orientation is varied and so is the the slope of the roof.
3. **Rough design:** Cross sectional forces are calculated with SAP2000 and a rough design is done.
4. **Cost estimate:** The cost of the roof trusses is estimated based on the cross sections and the number of nodes.
5. **Selection:** A selection is made based on comparison of rigidity, cost, number of nodes and members as well as simplicity of assembly.
6. **Final design, optimization and cost estimation:** the trusses from the selection and their nodes are slightly adjusted and improved and a new cost estimate is made.

19 roof trusses are investigated and six of them are classified as interesting and further developed. The final production and material costs for these vary from 85,000 to 105,000 SEK and the two cheapest are arcs. That is significantly cheaper than a comparable truss a major Swedish glulam producer recently sold. A direct cost comparison, however, is difficult to do since not all factors have been taken into account. The roof trusses and connectors developed are considered to have the potential to improve the building concept.

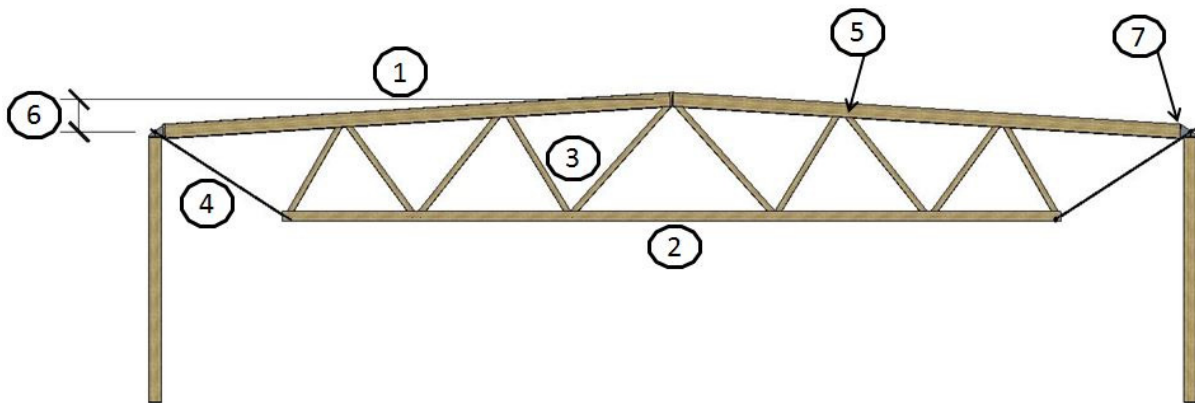
INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. Terminologi.....	1
2. Inledning	3
2.1 Bakgrund	3
2.2 Syfte & mål.....	3
2.3 Förutsättningar.....	4
2.4 Avgränsningar	4
3. Allmänt om fackverkskonstruktioner	5
3.1 Statik i fackverk.....	5
3.2 Ekonomi.....	5
4. Material	7
4.1 Limträ	7
4.2 Stål	10
5. Utformning av takstol	11
5.1 Arbetsgång.....	11
5.2 Skissa	12
5.3 Grov dimensionering	15
5.4 Kostnadsberäkning	19
5.5 Urval	21
5.6 Slutgiltig dimensionering, optimering och kostnadsberäkning.....	21
6. Utformning av förband	31
6.1 Förband 1 – Pelar-takstolsförband.....	31
6.2 Förband 2 – Dragförband	38
6.3 Förband 3 – Rundstång-underramsförband	46
6.4 Förband 4 – Nock	49
6.5 Ny kostnad av förband.....	50
7. Slutgiltig kostnad för valda takstolar	51
8. Pelare.....	51
9. Diskussion.....	53
9.1 Om takstolarna.....	53
9.2 Om förbanden	55

9.3	Felkällor.....	59
10.	Slutsatser	61
11.	Referenser.....	63
	Bilaga A - Dimensionering för drag, tryck och böjning	I
	Bilaga B – Dimensionering för tvärkraft och tvärdrag	III
	Bilaga C – Takstol från Moelven Töreboda.....	V

1. TERMINOLOGI

Överram (1)	<i>Översta konstruktionsdelen i takstolen som taket vilar på</i>
Underram (2)	<i>Nedersta konstruktionsdelen i takstolen</i>
Stång (3)	<i>Inre stång i fackverket mellan överram och underram</i>
Rundstång (4)	<i>Rundstång av stål som förbinder upplagspunkten med underramen</i>
Konstruktionsdel	<i>Sammanfattande benämning för överram, underram, stång och rundstång</i>
Knutpunkt (5)	<i>Område där två eller flera konstruktionsdelar möts</i>
Förband	<i>Del i knutpunkt som överför krafter mellan konstruktionsdelar</i>
Pilhöjd (6)	<i>Höjdskillnad mellan upplagspunkt och centrumlinje vidnock</i>
Upplagspunkt (7)	<i>Punkt vid pelartopp där konstruktionsdelarnas centrumlinjer möts</i>

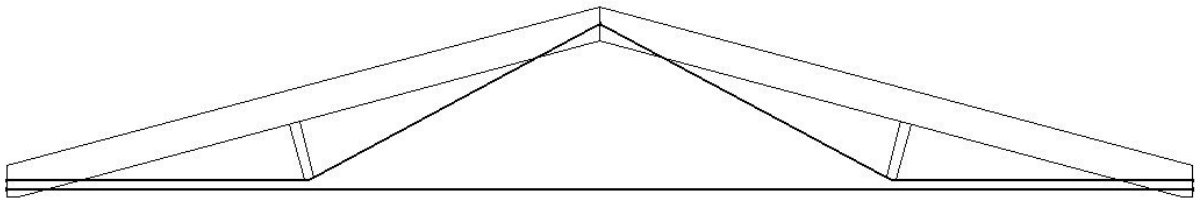


Figur 1.1 Principbild av takstol

2. INLEDNING

2.1 BAKGRUND

Fackverk i limträ förekommer ibland för spännvidder på 30 till 40 m. Byggnader där de kan förekomma är exempelvis butikslokaler, ridhallar, idrottshallar och lagerlokaler. Konkurrensen med andra material – till exempel stål - är ofta mycket tuff. För att fackverkskonstruktioner i limträ skall bli konkurrenskraftiga behöver de förbättras och effektiviseras. Knutpunkterna i fackverket utgör ofta den största ekonomiska osäkerheten. En takstol med samma snölast, spännvidd och centrumavstånd som de takstolar som har studerats i denna rapport har nyligen producerats av Moelven Töreboda AB, se figur 2.1. Produktions- och materialkostnaden för takstolen blev då sammanlagt omkring 115 000 kr. Överramens tvärsnittsmått är 215x1125, de korta stängerna är 215x360. Dragbandet i underkant är 4 strundstänger $\varnothing 32$ och dragbandet mellan takstolsände ochnock är 2 st rundstänger $\varnothing 32$.



Figur 2.1 Takstol producerad av Moelven Töreboda

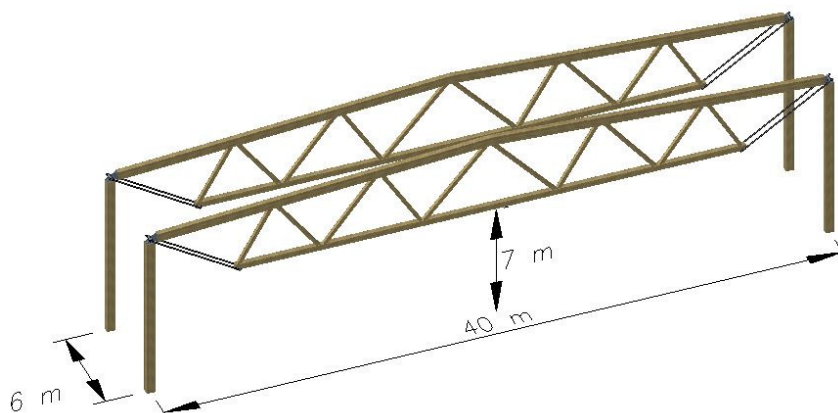
2.2 SYFTE & MÅL

Syftet med arbetet är att utveckla en fackverkskonstruktion i limträ som ska vara takstol i ett konkurrenskraftigt och standardiserat hallbyggnadskoncept. Genom att standardisera byggandet kan kostnaderna reduceras. Fackverket ska vara lättmonterat, estetiskt tilltalande och optimerat med avseende på materialvolym. Förband i knutpunkter och upplagspunkter analyseras och utvecklas också för att vara kostnadseffektiva och väl anpassade till fackverkskonstruktionen. Målet är att utveckla en så kostnadseffektiv takstol som möjligt.

2.3 FÖRUTSÄTTNINGAR

Som stöd för utvecklingen har ett antal randvillkor för byggnaden bestämts i samråd med handledarna.

- 40 m fritt spann och 80 m lång byggnad
- Fri takhöjd ska vara minst 7 m
- Taklutning inte mindre än 1:16 ($\approx 3,6^\circ$)
- cc-avstånd mellan takstolar är 6 m
- Maximal nedböjning vid långtidslast $\sim L/200$ som motsvarar 200 mm
- Limträ GL30c
- Konstruktionsstål S355
- Överramen förutsätts vara stagad mot vippning och knäckning ur sitt plan



Figur 2.2 Randgeometri för takstol

Utöver dessa tillkommer randvillkor som inte begränsar takstolens utformning i samma utsträckning.

- Brandklass R30
- Önskvärd transporthöjd är 4,5 m och max transportlängd är 20 m
- Ingående delar av takstolen bör inte överstiga 21 m på grund av produktionsbegränsningar
- Säkerhetsklass 3

2.4 AVGRÄNSNINGAR

Det är mycket att analysera och utveckla innan ett standardiserat hallbyggnadskoncept är färdigt. Vad som inte undersöks i det här arbetet men som krävs för en komplett stomlösning är bland annat stabilisering av takstolarna ur sitt plan, stabilisering av hela byggnaden, en passande pelarutformning och en lämplig metod för grundläggning.

Endast lasteffekter som verkar direkt på takstolen undersöks. Inga laster från stabiliseringssystem antas påverka takstolarna. Överramen förutsätts vara stagad ur sitt plan så att vippning av hela takstolen eller knäckning av överramen i riktning vinkelrätt takstolens plan ej behöver kontrolleras. Stånginfästningarna i fackverket antas fungera som perfekta leder och utreds ej närmare.

3. ALLMÄNT OM FACKVERKSKONSTRUKTIONER

3.1 STATIK I FACKVERK

Ett fackverk består av ett antal stänger som tillsammans bildar en struktur. Stängerna verkar antingen i tryck eller i drag. Inget moment belastar stängerna i ett idealt fackverk. I ett sådant fackverk används inte kontinuerliga balkar, men en sådan konstruktion blir mer komplicerad framförallt ur tillverkningsynpunkt och medför dessutom inga särskilda fördelar. Ett fackverk som spänner i en riktning kan på många sätt jämföras med en I-balk, i och med att det effektiviserar materialutnyttjandet. Merparten av materialet finns på liknande sätt i topp och botten av tvärsnittet. De fackverk som behandlas i denna rapport består av kontinuerliga över- och underramar och ett antal ledat infästa stänger. Över- och underramarna kommer precis som flänsarna på en I-balk till stor del att hantera tryck- och dragkrafter som uppstår vid böjning. Stängerna fungerar till stor del som livet på en I-balk, med skillnaden att tvärkraften verkar som normalkrafter i dem. De förhindrar att över- och underramen knäcker i sitt eget plan. För att förhindra knäckning och vippning ut ur planet krävs stabilisering i sidled. För att inte stångkrafterna ska bli för stora är en konstruktionshöjd på minst 1/12 av spännvidden lämpligt för parallellfackverk (Carling 2001).

Ett idealt fackverk har perfekta leder vilket är problematiskt att åstadkomma i realiteten. Om perfekta leder inte kan åstadkommas bildas tvångskrafter i knutpunkterna som kan ha avsevärd påverkan på fackverkets statik. Stora krafter överförs ofta genom knutpunkterna vilket också ställer krav på förankring av förbandet. Det är inte ovanligt att förbanden i knutpunkterna är styrande för tvärsnittets dimensioner. Av säkerhetsskäl eftersträvas alltid ett duktilt brott. För ett förband med inslitsade plåtar kan det åstadkommas genom lämpligt val av avståndet mellan plåtarna. Om avståndet är för litet kommer sannolikt ett sprött träbrott inträffa före dymlingarna plasticerar (duktilt brott).

3.2 EKONOMI

I de flesta fall är det ekonomin som styr genomförbarheten hos byggprojekt. I limträkonstruktioner eftersträvas att minimera mängden stål då det är ett dyrare material. Att använda stål är dock oundvikligt då det är nödvändigt att använda det i till exempel förband.

Kostnaden för ett fackverk är starkt förknippad med antalet knutpunkter, typ av förband, samt effektivitet i produktion och montage. Ett kostnadsoptimerat fackverk bör därför innehålla så få knutpunkter som möjligt med minimal stålvolym i förbanden. Ett mindre antal knutpunkter innebär också färre stänger, vilket dock ofta leder till grövre dimensioner. Det är därför inte säkert att ett fackverk med få knutpunkter är billigare än ett med flera – men generellt är det något att sträva efter. Förbanden i fackverk står för en stor del av totalkostnaden, upp till 20 %, enligt Lennart Axelsson på Moelven Töreboda under samtal våren 2013. Det är därför viktigt att dessa optimeras för att reducera kostnaden.

För att minimera produktionskostnaderna är det bra att försöka hålla sig till så få olika sorters element och tvärsnitt. Det är även en fördel om en merpart av montagearbetena kan göras i fabrik. De montagejobb som görs på byggarbetsplatsen ska gå snabbt och enkelt och det är

fördelaktigt om lyftkran kan användas så lite som möjligt. Konstruktioner med tyngdpunkten placerad på ett sådant sätt att de blir självstabiliserande, kan reducera behovet av stabilisering under byggskedet. För det krävs att tyngdpunkten ligger under upplagen. Jämfört med massiva konstruktioner har fackverk en låg vikt vilket förenklar hantering i fabrik och på byggarbetsplats samt ger låga transportkostnader (Carling 2001).

Fackverket bör utformas så att det kan transporteras i godslängder som inte kräver särskilt transporttillstånd. Takstolen bör samtidigt delas i så få delar som möjligt vid transport för att minimera montagearbetet på byggarbetsplatsen.

4. MATERIAL

4.1 LIMTRÄ

4.1.1 ALLMÄNT

Träslaget som i vanliga fall används till svenskt limträ är gran. Till tryckimpregnerat limträ används ofta furu. Limträ är ett ortotrop material vilket innebär att det har olika egenskaper i olika riktningar. Vid belastning parallellt fibrerna, framförallt i tryck, är limträ starkt. Den goda hållfastheten parallellt fibrerna gör att materialet också har hög böjhållfasthet. Vid belastning vinkelrätt fibrerna är limträ betydligt svagare, framförallt i drag. I Sverige är limträskvalitet GL30c vanligast.

Limträ är uppbyggt av hoplimmade lameller som kan skarvas vid tillverkning av längre element. Enligt Carling (2001) är limträ både hållfast och styvt i förhållande till sin egen vikt. Flexibiliteten hos limträ är god och elementen kan böjas exempelvis för att uppnå önskvärda estetiska krav och för att optimera nyttjandegraden av materialet hos en konstruktion. Det finns även stora valmöjligheter i valet av tvärsnitt då det är enkelt att variera antalet lameller. I och med att materialet är så pass lätt kan element med stora tvärsnitt användas. Det är fördelaktigt med avseende på böjmotstånd och stabilitet hos enskilda element. Enligt uppgift från Axelsson kan Moelven Töreboda tillverka upp till tre meter höga tvärsnitt.

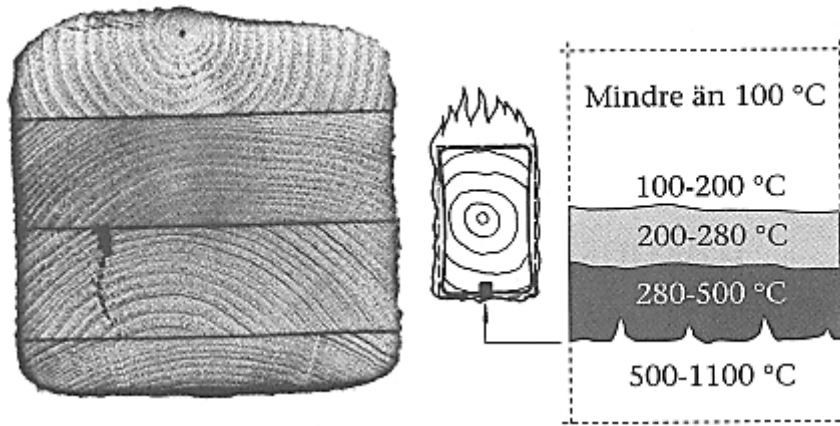


Figur 4.1 Tvärsnittsprofil av limträ (Nords 2013)

Av många anses limträ vara ett vackert material, som kräver lite underhåll (Moelven 2013). Beständigheten i kemiskt aggressiv miljö är också god. Det har goda värmeisolerande egenskaper, vilket gör att köldbryggor och kondensation kan undvikas.

Trä brinner utifrån och in. Det trä som inte brunnit behåller sin hållfasthet samtidigt som den förkolnade ytan isolerar virket innanför. Det gör att limträ har förhållandevis goda

brandegenskaper och ofta inte kräver ytterligare brandskyddsåtgärd (Isaksson, Mårtensson och Thelandersson 2005). Därmed slipper den estetiskt tilltalande stommen kläs in, utan kan hållas synlig. Limträ deformeras i mindre grad på grund av temperaturförändringar än exempelvis stål och betong. Däremot är limträns egenskaper betydligt mer beroende av fukthalt. Fuktkvoten i limträ i inomhusmiljö varierar mellan 8-12% från vinter till sommar enligt Axelsson. Förändringar av fuktkvot kan ge relativt stora volymförändringar. Knutpunkterna bör därför utformas så att de tillåter viss rörelse i materialet så att tvångskrafter kan undvikas.



Figur 4.2

T.v. brandpåverkat limträ med borrtaget kolskikt
T.h. zoner i brandpåverkat trä
(Isaksson, Mårtensson och Thelandersson 2005)

Materialet har goda egenskaper även ur miljösynpunkt (Moelven 2013). Produktionen av limträ ger mindre utsläpp av koldioxid än tillverkningen av andra byggmaterial och genom att det lagrar koldioxid bidrar det till att mängden i atmosfären minskar. Biprodukterna från tillverkning kan användas till uppvärmning och den låga egentygden ger ofta billigare och miljövänligare transporter.

4.1.2 MATERIALDATA

Den dimensionerande hållfastheten hos limträ beror bland annat på en rad yttre faktorer. Därför skiljer den sig ofta från projekt till projekt, även om hållfasthetsklassen är densamma. De dimensionerande hållfastheterna, X_d , hos limträ bestäms enligt följande ekvation:

$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (\text{Ekv. 4.1})$$

där $\gamma_M = 1,25$ för limträ

X_k symboliserar de karakteristiska hållfastheterna. Klimatklass 1 och 2 och medellång lastvaraktighet som kortvarigaste last ger:

$$k_{mod} = 0,8$$

För dimensionerande drag- och böjhållfasthet gäller:

$$X_d = k_h k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (\text{Ekv. 4.2})$$

$$\text{där } k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \right. \\ \left. 1,1 \right\} \quad (\text{Ekv. 4.3})$$

h är tvärsnittshöjden. Dimensionerande hållfasthetsegenskaper på limträet enligt ekvation 4.1 redovisas i tabell 4.1. Dimensionerande hållfasthet för drag och böjning redovisas inte då de varierar beroende av tvärsnittets dimensioner.

Tabell 4.1 - Hållfasthet GL30c

	Hållfasthet [MPa]			
	Karakteristisk		Dimensionerande	
Tryck parallellt fiberriktning	$f_{c,0,k}$	24,5	$f_{c,0,d}$	15,7
Tryck vinkelrätt fiberriktning	$f_{c,90,k}$	2,5	$f_{c,90,d}$	1,6
Drag parallellt fiberriktning	$f_{t,0,k}$	19,5	$f_{t,0,d}$	-
Drag vinkelrätt fiberriktning	$f_{t,90,k}$	0,5	$f_{t,90,d}$	-
Böjning	$f_{m,k}$	30	$f_{m,d}$	-
Längsskjuvning	$f_{v,k}$	3,5	$f_{v,d}$	2,2

Enligt Eurokod 5 kapitel 2.3.2.2 (2) ska följande elasticitets- och skjuvmodul används för beräkningar i brottgränstillståndet där styvheten har påverkan på lastfördelning. Värderna på de moduler som använts återfinns i tabell 4.2.

$$E_{mean,fin} = \frac{E_{mean}}{1 + \psi_2 k_{def}} \quad k_{def} = 0,6$$

$$G_{mean,fin} = \frac{G_{mean}}{1 + \psi_2 k_{def}} \quad \psi_2 = 0,2$$

k_{def} erhålls från Eurokod 5 och ψ_2 från Eurokod 0.

Tabell 4.2 - Moduler i brottgränstillståndet för GL30c

Elasticitetsmoduler	$E_{0,05}$	10800	MPa	Används vid knäckning
	$E_{0,mean}$	13000	MPa	
	$E_{0,mean,fin}$	11607	MPa	Används vid analys i brottgränstillståndet
	$E_{90,05}$	300	MPa	
	$E_{90,05,fin}$	268	MPa	Används vid analys i brottgränstillståndet
Skjuvmoduler	G_{mean}	650	MPa	
	$G_{mean,fin}$	580	MPa	Används vid analys i brottgränstillståndet

Enligt Eurokod 5 kapitel 2.3.2.2 (1) ska elasticitets- och skjuvmodulen i ekvationerna nedan används för deformationsberäkningar i bruksgränstillståndet. De moduler som använts återfinns i tabell 4.3.

$$E_{mean,fin,def} = \frac{E_{mean}}{1 + k_{def}}$$

$$G_{mean,fin,def} = \frac{G_{mean}}{1 + k_{def}}$$

Tabell 4.3 - Moduler i bruksgränstillståndet för GL30c

Elasticitetsmoduler	$E_{0,mean,fin,def}$	8125	MPa
	$E_{90,mean,fin,def}$	188	MPa
Skjuvmodul	$G_{mean,fin,def}$	406	MPa

Densiteten för GL30c anges i tabell 4.4.

Tabell 4.4 - Densitet för GL30c

Densitet, medel	ρ_{mean}	430	kg/m ³
Densitet, karakteristisk	ρ_k	390	kg/m ³

4.2 STÅL

4.2.1 ALLMÄNT

Stål är ett isotropt material med hög hållfasthet. Rätt utformat samverkar också stål väl med trä. Det är därför lämpligt att använda som beslag, till exempel för att det kan ge en spröd träkonstruktion ett duktilt brott. Stålets egenskaper är oberoende av fukthalt men är mer beroende av temperatur än trä. Stål har dåligt brandmotstånd och kräver ofta brandskyddsåtgärder. Sådana åtgärder kan vara att klä in stålet med trä eller att brandskyddsmåla det. Tabell 4.5 nedan visar materialegenskaper för konstruktionsstål S355.

4.2.2 MATERIALDATA

Tabell 4.5 - Materialegenskaper för S355

Sträckgräns	f_y	355	MPa
Brotthållfasthet	f_u	510	MPa
Elasticitetsmodul	E	210	GPa
Skjuvmodul	G	80,8	GPa
Densitet	ρ	7850	kg/m ³
Poissons tal	ν	0,3	-

5. UTFORMNING AV TAKSTOL

5.1 ARBETSGÅNG

För att finna de bäst lämpade fackverksgeometrierna och förbanden för takstolskonstruktionen har följande arbetsgång följts:

1. Inspiration och idéstadie
2. Skissa
3. Grov dimensionering
4. Kostnadsberäkning
5. Urval
6. Noggrann dimensionering, optimering och kostnadsberäkning

- 1. Inspiration och idéstadie:** I detta skede studeras ett stort antal konstruktionstyper. Inspirationsmaterialet är inte begränsat till träkonstruktioner. Stålkonstruktioner är också av intresse då de inte sällan kan utformas som träkonstruktioner med mindre förändringar. Största källan är bilder på olika webbsidor. Ishockeyhallar, ridhallar, större arenor studeras. Även litteratur av Natterer, Herzog och Volz (1991) samt Engel (2009) studeras. Målet med detta stadie är att bygga en "konstruktionsbank" som stöd till nästa stadie - skissandet.
- 2. Skissa:** Vid skisstadiet tas många geometrier fram. "Konstruktionsbanken" används för att ta fram olika sätt att utforma takstolen. Takstolen skissas för hand som fackverksbåge, treledsparabelbåge, dubbelbåge och även mer konventionella fackverk med sadeltak. Efter att de grova yttre utformningarna tagits fram förfinas skisserna. Då varieras antal stänger och deras orientering samt taklutning. Mycket av förfinandet sker i SAP2000 i samband med modellupprättandet.
- 3. Grov dimensionering:** Efter att modellerna upprättats i SAP2000 görs en första dimensionering. Från SAP2000 tas största normalkraft och moment ut i respektive byggnadsdel. Modellerna dimensioneras enligt Eurokod 5. Tvärkraftsdimensionering utelämnas i detta skede då det inte antas bli dimensionerande för tvärsnitten.
- 4. Kostnadsberäkning:** Baserat på tvärsnitt och antal knutpunkter beräknas en uppskattad kostnad för alla alternativen. Kostnadsberäkningen är endast baserad på materialåtgång.
- 5. Urval:** Ett urval baserat på styvhet, kostnad, antal knutpunkter och stänger samt enkelhet av montage görs.
- 6. Slutgiltig dimensionering, optimering och kostnadsberäkning:** Tvärsnittskrafterna är beroende av takstolens styvhet. Den styvhet som ger bäst lastfördelning söks. Efteråt följer en mer noggrann dimensionering där tvärkraft och tvärdrag också kontrolleras. De slutgiltiga alternativen kostnadsberäknas på nytt.

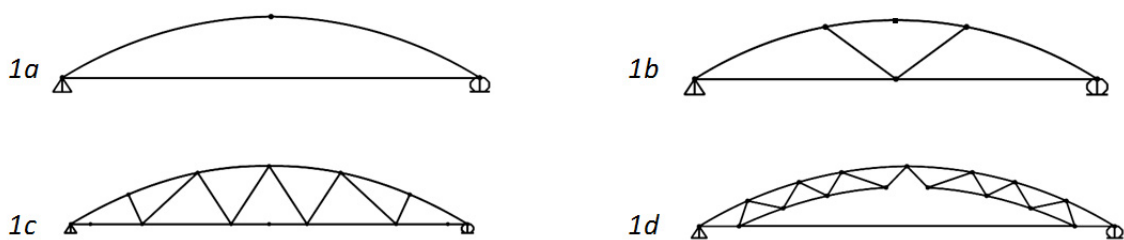
För förbanden har en något annorlunda arbetsgång följts. Där har steg 3 och 4 försumrats. Efter skisstadiet har urvalet av knutpunkter skett i samråd med handledare. Vid urvalet har störst vikt lagts vid att förbandet ska vara anpassningsbart och därmed kunna fungera i många olika typer av takstolar samt att det ska vara lättmonterat på byggarbetsplats.

5.2 SKISSA

Det viktigaste vid skissandet har varit att arbeta fritt samtidigt som en rad egenskaper har prioriterats. Vissa takstolstyper är bättre anpassade för särskilda ändamål än andra. Många av egenskaperna hänger ihop. De egenskaper som har prioriterats är:

- Få knutpunkter och stänger eftersom det innebär mindre mängd stål till förband, mindre hantering av olika byggnadselement och snabbare fabriksmontage.
- Det bör vara möjligt att transportera takstolen i två eller tre delar, var och en med maxlängd av 20 m. De olika delarna bör sedan gå snabbt och enkelt att sätta ihop på byggarbetsplatsen.
- Takstolens tyngdpunkt bör ligga under upplagspunkterna eftersom det medför självstabilisering och därmed minskat behov av stagning vid montage.
- Tillräcklig styvhet för att inte för stora nedböjningar ska inträffa.
- Minimerad materialåtgång.
- Jämn snittkraftsfördelning, framförallt böjmomentfördelning, för att så mycket av tvärsnittets kapacitet ska utnyttjas längs hela konstruktionsdelens längd.

Utifrån de här parametrarna började ett antal idéförslag växa fram. De sammanställdes i sju olika grupper baserade på dess yttre geometri. Den första gruppen består av olika sorters fackverk med parabelformad överram se figur 5.1. Pilhöjden bestämdes enligt $h = 0,144 \cdot \text{spännvidd}$ vilket, för en cirkelbåge, ungefärligt ger den funikulära formen vid jämnt utbredd last. Parabelbågarna är därför väldigt lika cirkelbågar. Därför bör böjmomenten i överramen bli små vid symmetrisk last. Höjden blev 5,76 m vilket är en nackdel ur transportsynpunkt om den inte kan delas i lägre delar. En fördel med den här gruppen är att det är den som kräver lägst höjd på pelarna, för att uppnå den fria höjden på 7 m. Takstolstyp 1a är med för att en jämförelse ska kunna göras. Den är inte utformad som ett fackverk, utan som en treledsbåge med dragband.



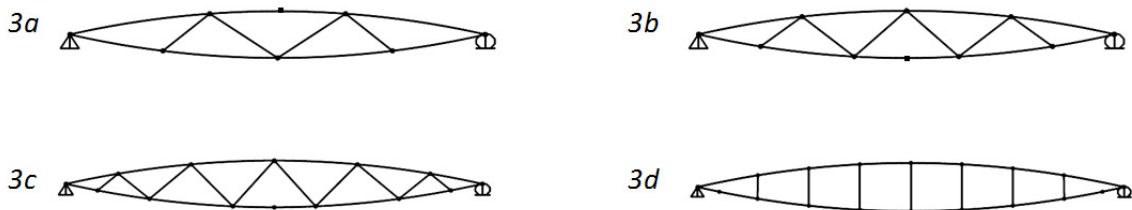
Figur 5.1 Takstolar i grupp 1

Takstolarna i grupp 2 (se figur 5.2) är utformade som en fackverksbalk med taklutning 1:16 på överramen och en parabelformad underram. Totala höjden är ungefär 5 m. Tanken med en sådan typ av fackverk är att tvärsnittshöjden växer i takt med att böjmomentet ökar. Tyngdpunkten bör ligga under upplagspunkten.



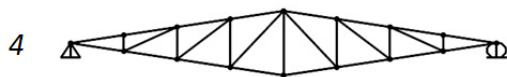
Figur 5.2 Takstolar i grupp 2

Grupp 3 (se figur 5.3) är en variant där både över- och underramen är parabelformad. Underramen är likadant utformad som i grupp 2, så det intressanta är framförallt att jämföra skillnaderna som uppstår på grund av de olika överramarna. Totala höjden är ca 5 m.



Figur 5.3 Takstolar i grupp 3

En tanke med nästa typ av fackverk, figur 5.4, är att använda enbart raka limträelement. Totala höjden är ungefär 5 m. Inga tydliga fördelar förväntas men den kan ändå vara intressant som jämförelse på grund av sin udda geometri.



Figur 5.4 Takstol i grupp 4

Resterande grupper är utformade på ett sådant sätt att tyngdpunkten ligger under pelartopparna. Typen är den som mest liknar konventionella fackverk. Underramen sammankopplas med förbandet vid upplagspunkten med rundstänger i stål. I grupp 5 (se figur 5.5) används en taklutning på 1:10 och en största höjd på fackverket på ca 4,5 m. Rundstången närmast upplaget är relativt kort, dels för att hålla nere mängden stål och dels för att en så stor del av fackverket som möjligt ska hamna under upplagspunkten.



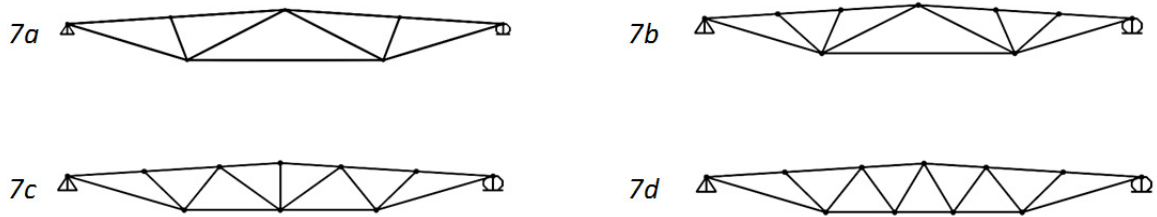
Figur 5.5 Takstolar i grupp 5

I grupp 6 minskades taklutningen till 1:16 och största höjd på fackverket ökades till ungefär 5 m. De här förändringarna förväntas medföra minskade normalkrafter i över- och underram, på grund av det ökade avståndet mellan dessa, se figur 5.6.



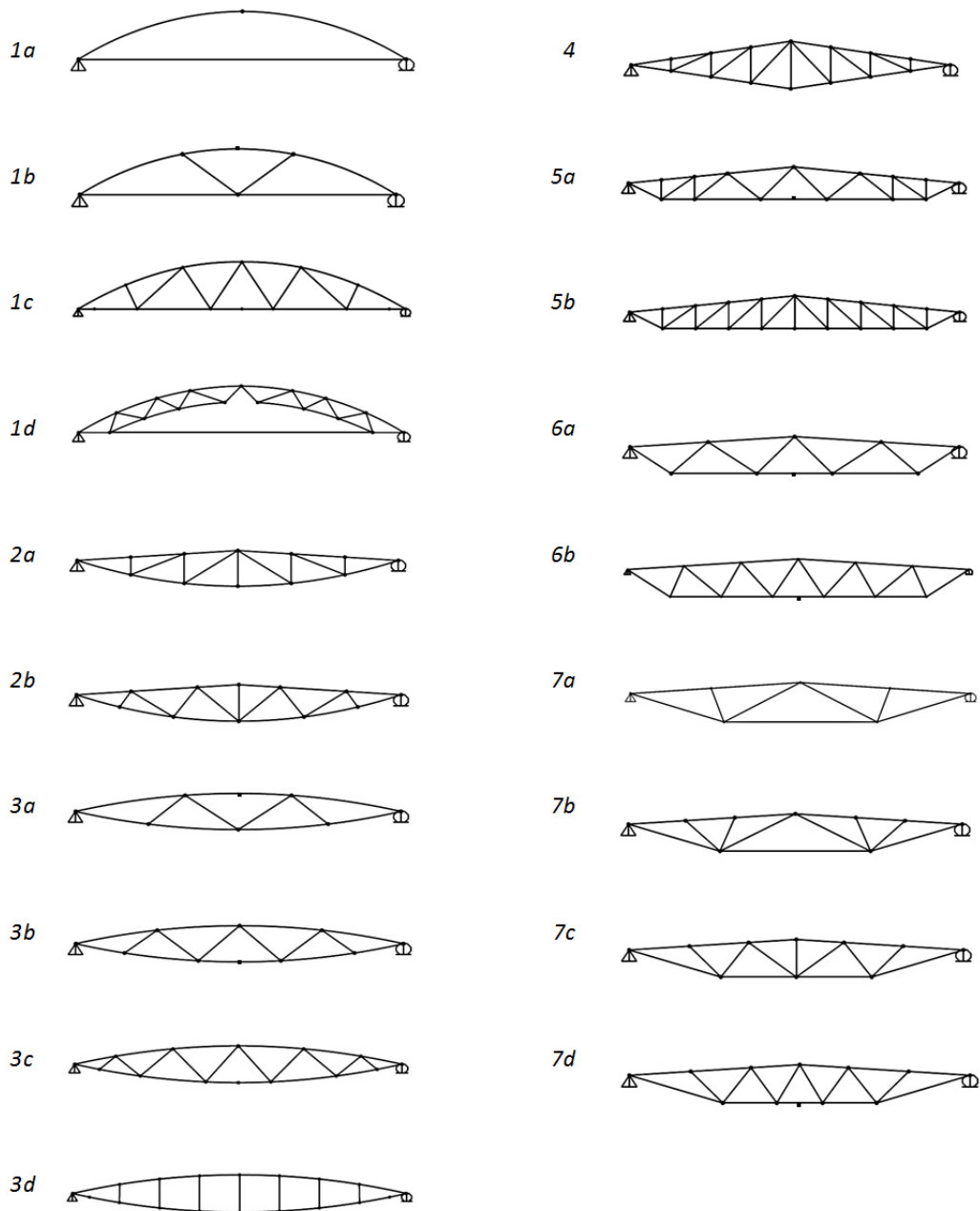
Figur 5.6 Takstolar i grupp 6

Den sista fackverksgruppen är lik grupp 5 och 6, men har längre rundstänger mellan upplag och underram, se figur 5.7. Tanken med det var att minska totalvikten och minimera antalet stänger och knutpunkter. Tyngdpunkten antas fortfarande ligga under pelartopparna. Underramen är under 20 m och behöver därför inte skarvas.



Figur 5.7 Takstolar i grupp 7

I figur 5.8 visas de 19 geometrier som studeras.

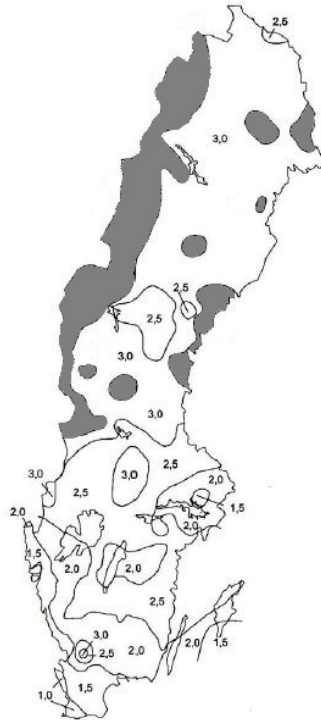


Figur 5.8 Alla 19 studerade geometrier

5.3 GROV DIMENSIONERING

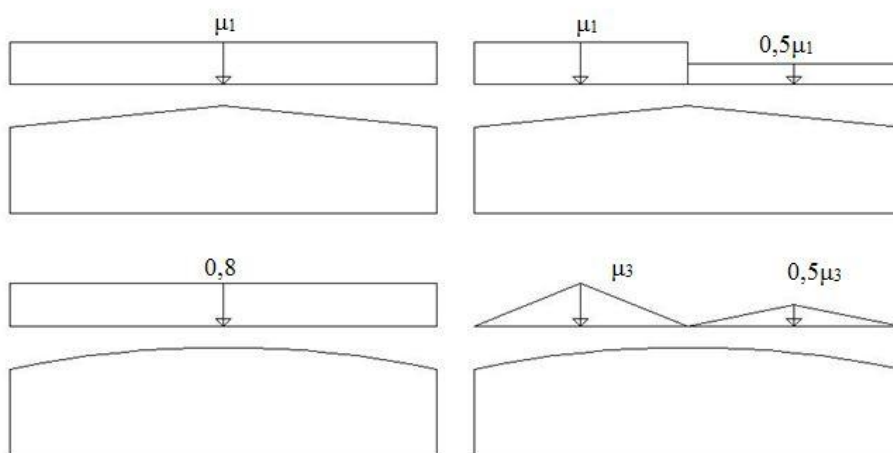
5.3.1 LASTER

De laster som behandlas i detta arbete är snö, vind och egentynngd. Snölastens karakteristiska värde är $3,0 \text{ kN/m}^2$. Med den snölasten täcks största delen av Sverige in då endast mindre områden i Norrlands inland och kustland samt fjällvärlden överstiger det värdet (figur 5.9).



Figur 5.9 Snökarta från Eurokod 1. Grå zoner markerar områden där snölasten överstiger $3,0 \text{ kN/m}^2$ (författarnas bearbetning av figur).

Enligt Eurokod 1 varierar snölasten beroende på takform. En hallbyggnad med sadeltak har två lastfall för snö, ett symmetriskt lastfall med jämnt utbredd last och ett med större jämnt fördelad last på ena sida nocken - osymmetrisk last. Bågformat tak har liknande lastfall fast med triangulärt fördelad last i det asymmetriska lastfallet, se figur 5.10. Enligt samtal med Arne Emilsson på Limträteknik AB våren 2013, blir det asymmetriska lastfallet ofta dimensionerande för bågformade takstolar. Formfaktorerna sammanfattas i tabell 5.1. Med aktuell taklutning kommer snölasten vara något mer ogynnsam vid bågformad takkonstruktion. Se tabell tabell 5.2 för sammanfattning av laster.



Figur 5.10 Snölastfördelning på sadel- och bågtak. T.v. symmetrisk snölast. T.h. asymmetrisk snölast.

Tabell 5.1 - Takhöjd och formfaktorer för snölast på tak

Takstolsgrupp	Takhöjd [m]	μ_1	μ_3
1	5,8	-	1,65
2	1,25	0,8	-
3	2,25	-	0,76
4	3,0	0,8	-
5	2,0	0,8	-
6	1,25	0,8	-
7	1,25	0,8	-

Vindlastens karakteristiska hastighetstryck, q_p antas till 0,8 kN/m². Det motsvarar ungefär en byggnad i terrängtyp 2, $v_b = 24$ m/s och 12 m referenshöjd. Vid aktuella taklutningar i denna undersökning ger vinden upphov till enbart suglast på taket. Egentyngden antas till 0,6 kN/m². Lasten egentyngd innefattar tyngd av takplåt, isolering och installationer i takkonstruktionen. Takstolens egentyngd, $g_{takstol}$ ingår således inte i lastbenämningen egentyngd. Takstolens egentyngd är likväl alltid med vid beräkningar av snittkrafter då beräkningsprogrammet SAP2000 adderar egentyngd.

Tabell 5.2 - Karakteristisk last och ψ -faktorer

Last	[kN/m ²]	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Egentyngd, g	0,6	-	-	-
Snö, s_k	3,0	0,8	0,6	0,2
Vind, q_p	0,8	0,3	0,2	0

I brottgränstillstånd kombineras lasterna enligt ekvation 6.10a och 6.10b i Eurokod 0. Ekvation 6.10b med snö som huvudlast är dimensionerande för samtliga takstolar då snö är den klart största lasten. Det sug vindlasten ger upphov till är mindre än egentyngden på takstolen. Därför kontrolleras inget lastfall med vind som huvudlast. Dimensionerande lastkombination i brottgränstillstånd för takstolarna är $q_d = \gamma_d 1,2(g + g_{takstol}) + \gamma_d 1,5\mu s_k$ där $\gamma_d = 1$ för säkerhetsklass 3.

För att beräkna nedböjning i bruksgränstillstånd används ekvation 6.16b i Eurokod 0 för kvasi-permanent last. Lastkombination är då $q_d = 1,0(g + g_{takstol}) + \psi_2\mu s_k$.

5.3.2 DIMENSIONERANDE TVÄRSNITTSKRAFTER

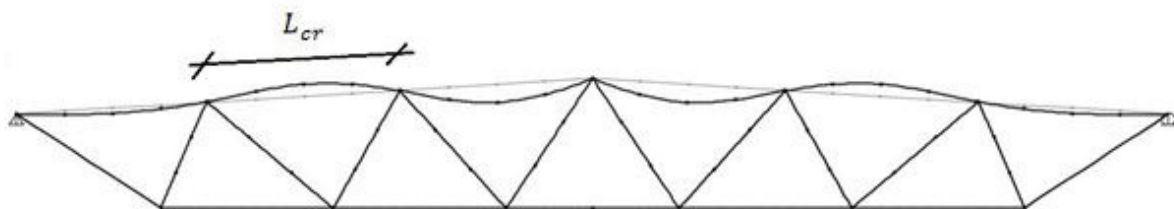
I kapitel 6.1 presenteras ett förband som utvecklats för att vara tillämpbart på alla 19 takstolar. Förbandet sammankopplas med underamen med två rundstänger. Därför används rundstänger till samtliga takstolsalternativ. I tabell 5.3 redovisas tvärsnittskrafter som beräknats i SAP2000 i det dimensionerande snittet. I dimensionerande lastfall är snö huvudlast och det är antingen symmetriskt eller asymmetriskt lastfördelning. Hela takstolen är beräknad i säkerhetsklass 3.

Tabell 5.3 - Dimensionerande snittkrafter, N = normalkraft, M = böjmoment. För normalkraften gäller att negativa värden betyder tryckkraft och positiva värden dragkraft

Takstol	Överram		Underram		Kort stång	Lång stång	Rundstång
	N [kN]	M [kNm]	N [kN]	M [kNm]	N [kN]	N [kN]	N [kN]
1a	-627	370	910	0	-	-	1090
1b	-970	349	956	24	-93	-	911
1c	-880	55	932	8	-86	-75	904
1d	-1058	46	944	21	-92	-	901
2a	-1364	150	1413	207	-247	50	1410
2b	-1312	149	1453	178	-254	-	1387
3a	-1218	-178	1313	162	-180	-150	1176
3b	-1225	-105	1290	126	-140	-	1181
3c	-1233	73	1254	117	-132	-	1224
3d	-736	131	736	222	-77	-	1247
4	-1515	130	1507	148	-280	341	1525
5a	-1449	165	1477	42	-511	-	942
5b	-1490	49	1477	34	-520	-	947
6a	-1202	-273	1232	9	-630	-	764
6b	-1225	-101	1216	12	-457	-	796
7a	-1221	-247	1227	25	-314	-164	1294
7b	-1275	178	1227	21	-254	-103	1321
7c	-1282	160	1248	9	-277	-	1329
7d	-1277	165	1241	8	-254	-	1323

5.3.3 KNÄCKLÄNGDER

För att bestämma vilka knäcklängder som de trycka bärverksdelarna ska dimensioneras för har knäckningsanalys utförts i SAP2000. För de tryckta bärverksdelarna har den första moden studerats och knäcklängd utvärderats därefter. I figur 5.11 illustreras ett exempel på detta. Figuren visar den första knäckmoden för överramen i alternativ 6b. I detta fall är tolkningen att knäcklängden, L_{cr} , är avståndet mellan knutpunkterna.



Figur 5.11 Knäcklängd

På detta sätt har de tryckta bärverksdelarnas knäcklängd beräknats. Knäckmoden är dock beroende av de övriga delarnas styvhet. Om inte stängerna hade varit tillräckligt styva kunde moden förändrats. Knäcklängden måste därför utvärderas efter varje förändring på takstolen

som görs, exempelvis vid förändrat tvärsnitt på stänger, för att säkerställa att knäcklängden inte förändrats.

5.3.4 DIMENSIONERING

De ingående delarna i de olika fackverken har dimensionerats med ekvationerna i *Bilaga A - Dimensionering för drag, tryck och böjning*, hämtade ur Eurokod 5. Det styrande för valet av dimension har varit att hamna på en nivå mellan 85 till 100 % utnyttjandegrad vid interaktionskontrollerna för samtidig böjning och axiellt tryck respektive samtidig böjning och axiell dragning. I tabell 5.4 visas delarnas dimensioner i de olika takstolarna.

Tabell 5.4 - Dimensioner på ingående delar. b , h och \emptyset anges i [mm] och L i [m]

Takstol	Överram			Underram			Kort stång			Lång stång			Rundstång	
	L	b	h	L	b	h	L	b	h	L	b	h	L	\emptyset_r
1a	21	300	810	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
1b	21	230	900	18	280	360	8,7	230	180	-	-	-	2	50
1c	21	215	495	18	265	315	3,3	115	135	7,5	165	180	2	50
1d	21	275	405	-	275	360	3,5	125	135	-	-	-	2	50
2a	21	300	630	18	325	675	3,7	175	180	7	140	180	2	60
2b	21	325	585	18	325	630	6,6	200	225	-	-	-	2	60
3a	20,2	300	675	18	300	630	5,8	190	225	7,8	200	225	2	50
3b	20,2	300	540	18	300	585	6,3	175	225	-	-	-	2	50
3c	20,2	215	585	18	215	675	5,7	175	180	-	-	-	2	60
3d	20,2	190	675	18	190	720	3,4	125	135	-	-	-	2	60
4	20,2	300	585	20,2	300	675	4,5	200	180	7,25	180	200	7,1	60
5a	20	300	630	16	300	495	4,9	200	315	-	-	-	4,5	50
5b	20	275	495	16	275	540	4,9	200	315	-	-	-	4,5	50
6a	20	300	720	15	300	360	5,9	250	315	-	-	-	6	40
6b	20	190	720	15	300	360	3,9	200	225	-	-	-	6	50
7a	20	215	855	18	240	495	4	190	180	10,1	265	225	11,5	60
7b	20	290	630	18	325	360	4,4	190	180	10	215	225	11,5	60
7c	20	290	630	18	300	360	5,3	200	225	-	-	-	11,5	60
7d	20	290	630	18	300	360	5,3	190	225	-	-	-	11,5	60

5.4 KOSTNADSBERÄKNING

Den del av takstolarnas kostnad som har studerats är produktions- och materialkostnaden. De priser som uppges i tabell 5.5 är uppskattningar. Prisuppgifterna för limträ och förbandsstål kommer från limträproducenten Moelven AB, genom muntlig kommunikation med Axelsson. Kostnaden är baserad på tillverkning för limträ och inköpspris för förbandsstål. Beroende på antal limningar och tillsågning av virke kan emellertid priset på limträ per m³ variera något. För rundstång kommer uppgifterna från Anders Asp på Pre Cast Technology AB, under samtal våren 2013. I priset ingår stänger, gängning, muttrar och mutterbrickor.

Tabell 5.5 - Uppskattade priser för material

Material	Pris
Limträ	6000 kr/m ³
Rundstång	20 kr/kg
Förbandsstål	45 kr/kg

Tabell 5.6 nedan visar pris efter en överslagsmässig dimensionering av förbanden som beskrivs i kapitel 6.1. Dragförbandet och rundstång-underramsförbandet har dimensionerats enligt Eurokod 3 del 1-8 och Eurokod 5 del 1-1. På de övriga förbanden i tabell 5.6 har grövre uppskattning av nödvändig dimension gjorts. De enda förbanden som skiljer sig mellan de olika takstolarna är diagonalförbanden. Det är mycket billigare med tryckta än dragna stångförband. Dragna förband kräver mer material och är mer komplicerade att tillverka.

Tabell 5.6 - Grov uppskattning av kostnad för förband

Förband	Dimensionerande kraft	Pris
Pelar-takstolsförband	1200 kN	3500 kr
Dragförband	1400 kN	6500 kr
Rundstång-underramsförband	1300 kN	3300 kr
Nockförband	1200 kN	630 kr
Stångförband	-	100-1000 kr

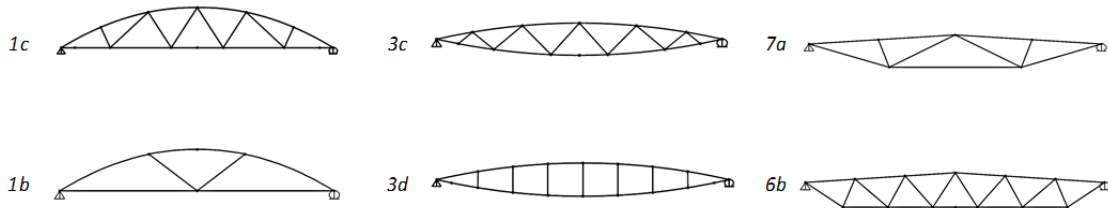
I tabell 5.7 har en kostnadssammanställning gjorts. Anledningen att kostnaden för 1a sticker ut är att den är utformad med dragband i stål och andra typer av förband. Kostnaden för dragbandet står under Σ rundstänger.

Tabell 5.7 - Kostnadssammanställning

Takstol	Σ träelement [kr]	Σ rundstänger [kr]	Σ förband [kr]	Σ materialkostnad [kr]
1a	82 200	17 000	7100	106 300
1b	78 300	2500	21 100	101 800
1c	55 500	2500	22 400	80 300
1d	79 800	2500	23 300	105 600
2a	107 300	3600	22 200	133 100
2b	109 500	3600	22 200	135 300
3a	101 600	2500	21 300	125 400
3b	90 300	2500	21 700	114 500
3c	74 000	3600	21 600	99 000
3d	65 600	3600	21 200	90 400
4	110 400	9100	23 000	142 400
5a	92 400	5500	22 900	120 900
5b	89 000	5500	23 900	118 400
6a	88 000	4700	21 700	114 500
6b	62 800	7400	25 200	95 400
7a	65 800	20 400	14 500	100 700
7b	65 900	20 400	15 300	101 600
7c	65 500	20400	15 500	101 400
7d	66 400	20400	15 700	102 500

5.5 URVAL

Efter jämförelser har sex alternativ valts till att gå vidare med. Eftersom flera takstolsvarianter finns tillgängliga behöver inte konceptet bli enformigt. De avgörande faktorerna har varit materialkostnad, antal element och knutpunkter, enkelhet hos förband, transportmöjligheter, samt lätthet av montage i fabrik och på byggarbetsplats. De alternativ som jämförelsevis har stått sig bäst i respektive grupp anses vara intressanta. Dock har vissa grupper visat sig vara mindre intressanta att gå vidare med. Av de totalt 19 alternativen som studerats har alternativen i figur 5.12 valts för vidareutveckling.



Figur 5.12 Alternativ som vidareutvecklas

Gemensamt för alternativen är att materialkostnaden är låg eller lägre för dessa än övriga alternativ. De valda alternativens styrkor skiljer sig också, vilket kan göra ett alternativ mer lämpligt i vissa fall. 1b och 1c är till materialkostnaden klart lägst. Pelarna för grupp 1 är 7 m höga vilket är de kortaste pelarna. De är dock inte självstabiliserande och byggnadshöjden på 12,8 m är högre än de övriga. Grupp 3 kräver en pelarhöjd på 9,25 m med en byggnadshöjd på 11,5 m. Tyngdpunkten för grupp 3 är något under upplagspunkten vilket är positivt. En nackdel med grupp 1 och 3 är att de har krökta element. Det behöver inte vara någon stor nackdel men ger ett något mer komplicerat produktionssätt, framförallt vid slitssågning. Grupp 6 och 7 har enbart raka element vilket då får anses som en fördel av samma anledning. De har tyngdpunkten lägst av de valda alternativen vilket också är positivt. Placeringen av tyngdpunkten så lågt gör dock att pelarna blir 10,25 m höga. Total byggnadshöjd är då 11,5 m. Beslut om vilka alternativ att gå vidare med har tagits i samråd med handledarna.

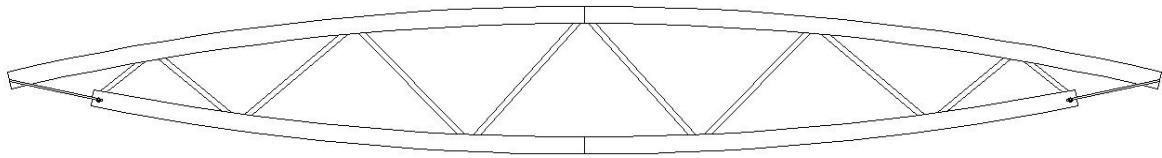
5.6 SLUTGILTIG DIMENSIONERING, OPTIMERING OCH KOSTNADSBERÄKNING

Alternativen som gått vidare från urvalet analyseras här noggrannare. Något som undersöks var effekterna av att ändra styvheten hos vissa element, för att på så sätt erhålla en jämnare fördelning av böjmomentet. Förhoppningen är att maxmomentet ska sänkas och att dimensionerna i så fall ska kunna minskas. Detta blir främst aktuellt för överramarna eftersom de är upplagda på elastiska mellanstöd (stänger) som kan generera stora stödmoment, se till exempel figur 5.14. För att uppnå en jämnare fördelning kan styvheten i balkarna minskas, vilket uppnås genom att minska på tvärsnittshöjden. Därmed kan momentet anpassas så att största stöd- och fältmoment blir så lika som möjligt. Samtidigt som böjmomentkapaciteten minskas, genom minskning av tvärsnittshöjden, kan alltså balken behålla tillräcklig kapacitet genom att det dimensionerande momentet sänks. Lastfördelningen i resten av konstruktionen, framför allt diagonalerna, kommer också att förändras något. Den här optimeringen av tvärsnittet har tillämpats på samtliga takstolar som valts till att gå vidare med. Diametern och därmed styvheten hos rundstängerna har också varierats. Att öka diametern på rundstängerna

har dock inte lett till en tillräckligt stor reducering av övriga konstruktionsdelars tvärsnitt för att ge en billigare takstol.

Nedböjning av takstolarna är beräknad i SAP2000 med lastkombination enligt kapitel 5.3.1. Redovisad nedböjning är den största nedböjningen på takstolen vid kvasi-permanent last. Vid denna dimensionering har också hänsyn tagits till förbanden. Förband 2 och 3, se figur 6.14 och figur 6.24, kräver att underramens bredd är minst 280 mm. Även stängernas bredd har anpassats för att matcha under- eller överramen. Detta för att det medför lättare produktion av takstolen. Nedan presenteras de valda alternativen. De är sorterade efter pris i sjunkande ordning. Dimensionerande snitt för respektive takstol markeras i moment- och normalkraftsdiagrammen med ett svart streck.

5.6.1 3c – DUBBELBÅGE

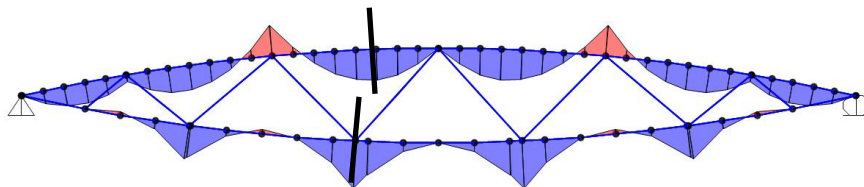


Figur 5.13 Alternativ 3c

Tabell 5.8 - Sammanfattning av takstol 3c

Beskrivning	3c. Parabelformad över- och underram med pilhöjd 2,25 m och sneda stänger. Takstolshöjd 5,1 m.				
Nedböjning	40 mm vid långtidslast				
Tyngdpunkt	Ca 0,1m under upplagspunkt				
Stångförband	20 st, varav 4 dimensionerade för drag och 16 för tryck				
Dimension	Överram	Underram	Stång	Rundstång	Förband
	215x585	280x585	215x180	Ø60	-
Kostnad	31 700 kr	35 400 kr	10 600 kr	5 300 kr	21 600 kr
Totalkostnad	104 600 kr				

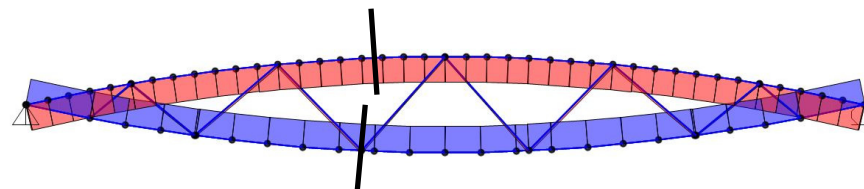
Alternativ 3c har förändrats vid den slutgiltiga dimensioneringen. Underramens tvärsnitt har anpassats till dragförbandet, vilket har resulterat i en volymökning av underramen. Stängerna i 3c är lågt belastade men har anpassats till överramens bredd vilket gör att de är överdimensionerade. Båda dessa förändringar har lett till en kostnadsökning av 3c vilket gör den till ett relativt dyrt alternativ.



Figur 5.14 Dimensionerande momentfördelning (symmetrisk)

Tabell 5.9 - Dim. M

	M_{Ed} [kNm]
Överram	73
Underram	117

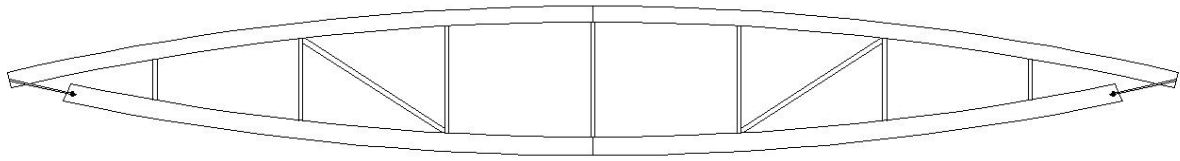


Figur 5.15 Dimensionerande normalkraftsfördelning (symmetrisk)

Tabell 5.10 - Dim. N

	N_{Ed} [kN]
Överram	-1233
Underram	1254
Stång	-132

5.6.2 3D – DUBBELBÅGE

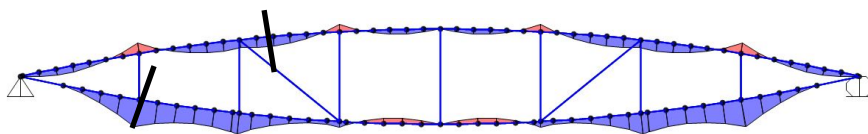


Figur 5.16 Alternativ 3d

Tabell 5.11 - Sammanfattning av takstol 3d

Beskrivning	3d. Parabelformad över- och underram med pilhöjd 2,25 m och vertikala stänger. Takstolshöjd 5,1 m.					
Nedböjning	45 mm vid långtidslast					
Tyngdpunkt	Ca 0,3m under upplagspunkt.					
Stångförband	18 st, varav 4 dimensionerade för drag och 14 för tryck					
Dimension	Överram	Underram	Vertikal	Diagonal	Rundstång	Förband
	215x540	280x630	215x135	215x180	Ø60	-
Kostnad	29 300 kr	38 100 kr	3 000 kr	2 800 kr	3 600 kr	21 900 kr
Totalkostnad	98 700 kr					

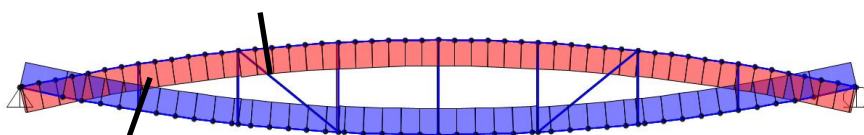
Vid slutgiltig dimensionering av 3d lades två diagonalstänger in. Stängerna lades in för att reducera det stora fältmoment som uppstod i överramen vid asymmetrisk last. De vertikala stängerna gav inte tillräckligt stöd till överramen. Genom att lägga in den diagonala stängen blir knutpunkten styvare vilket reducerar fältmomentet. Vid asymmetrisk last är dimensionerade moment för överramen ca tre gånger större utan diagonal stång än med. Det reducerade maxmomentet har gjort att det symmetriska lastfallet istället är dimensionerande. En fördel med 3d är att det är små krafter i stängerna. Vertikalerna är tryckta vilket gör förbanden till dessa mindre komplicerade. Däremot kan diagonalerna vara dragna. Trots det reducerade momentet har priset ökat vid den slutgiltiga dimensioneringen. Det beror främst på att bredden på underramen har ökats från 190 mm till 280 mm för att passa till dragförbandet.



Figur 5.17 Dimensionerande momentfördelning (symmetrisk)

Tabell 5.12 - Dim. M

M _{Ed} [kNm]	
Överram	48
Underram	129

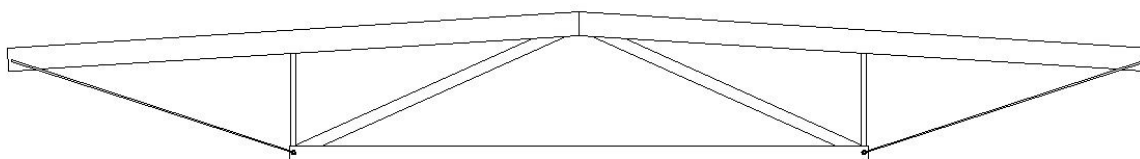


Figur 5.18 Dimensionerande normalkraftsfördelning (symmetrisk)

Tabell 5.13 - Dim. N

N _{Ed} [kN]	
Överram	-1248
Underram	1240
Vertikal	-95
Diagonal	-91

5.6.3 7A – RAKA ELEMENT

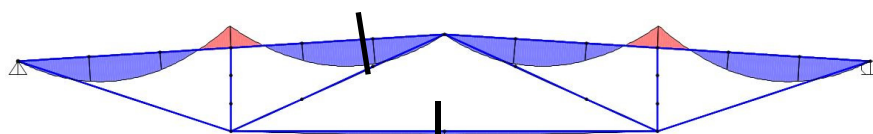


Figur 5.19 Alternativ 7a

Tabell 5.14 - Sammanfattning av takstol 7a

Beskrivning	7a. Endast raka element med taklutning 1:16. 11m lång rundstång från upplag till underram. Takstolshöjd 5,1 m.					
Nedböjning	100 mm vid långtidslast					
Tyngdpunkt	Ca 0,7m under upplagspunkt					
Stångförband	8 st, varav alla dimensionerade för tryck.					
Dimension	Överram	Underram	Vertikal	Diagonal	Rundstång	Förband
	215x815	280x450	215x180	215x405	Ø50	-
Kostnad	42 100 kr	15 100 kr	1 800 kr	11 500 kr	12 900 kr	14 500 kr
Totalkostnad	97 900 kr					

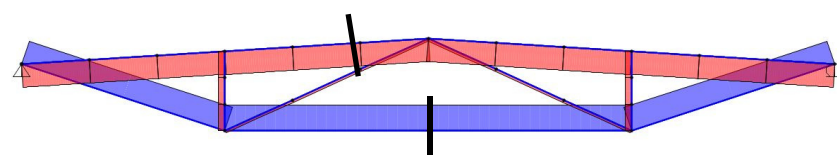
Efter urvalet har alternativ 7a genomgått en mindre förändring. Underramen har förlängts till 20 m, vilket är längsta möjliga utan skarvning. Det medför en annan orientering på stänger och kortare rundstänger. Rundstångens diameter kan också minskas från Ø60 till Ø50. Diagonalstången blir längre och då också grövre i dimension, dock så är vinningen av en kortare och mindre rundstång större. Det har resulterat i ett billigare alternativ. Takstolen består av 11 element och är det alternativ med minst antal element, lika många som 1b. Det är fördelaktigt vid produktionen men också på grund av att det lämnar stort fritt utrymme under taket. Det låga antalet stänger gör dock takstolen mindre styv.



Figur 5.20 Dimensionerande momentfördelning (symmetrisk)

Tabell 5.15 - Dim. M

M _{Ed} [kNm]	
Överram	240
Underram	31

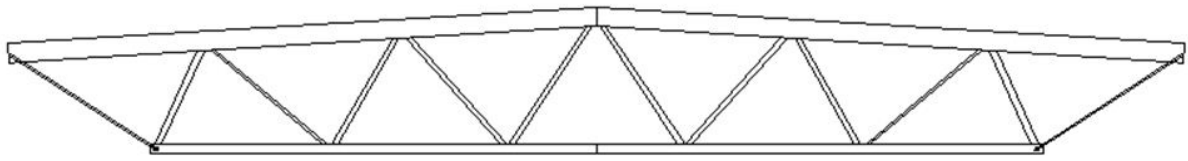


Figur 5.21 Dimensionerande normalkraftsfördelning (symmetrisk)

Tabell 5.16 - Dim. N

N _{Ed} [kN]	
Överram	-1137
Underram	1224
Vertikal	-311
Diagonal	-179

5.6.4 6B – RAKA ELEMENT

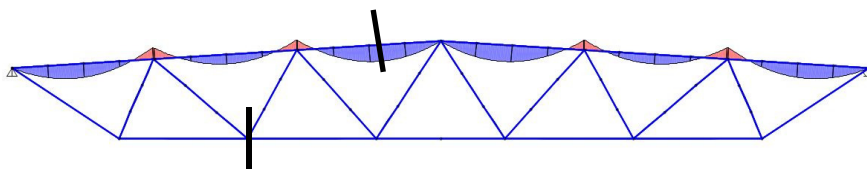


Figur 5.22 Alternativ 6b

Tabell 5.17 - Sammanfattning av takstol 6b

Beskrivning	6b. Endast raka element med taklutning 1:16. 6m rundstång från upplag till underram. Takstolshöjd 5,0 m. Yttre stång avser stången närmast upplag.					
Nedböjning	42 mm vid långtidslast					
Tyngdpunkt	Ca 0,9 m under upplagspunkt					
Stångförband	20 st, varav 12 är dimensionerade för drag och 8 för tryck.					
Dimension	Överram	Underram	Yttre stång	Inre stång	Rundstång	Förband
	215x675	330x315	215x225	215x180	Ø50	-
Kostnad	34 800 kr	18 700 kr	2 300 kr	8 700 kr	7 400 kr	25 200 kr
Totalkostnad	97 100 kr					

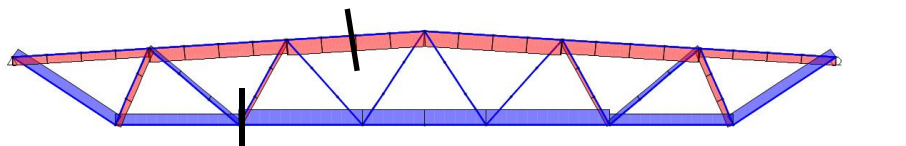
Geometrin på alternativ 6b är oförändrad sedan den grova dimensioneringen. Tvärsnitten har dock justerats något. Kostnadsmässigt har inte förändringarna gjort någon större skillnad men alternativet har anpassats för att stämma bättre överens med övriga alternativ. Det innebär att överramen har breddats från 190 mm till 215 mm. Alla alternativen har då en överramsbredd på 215 mm vilket gör pelar-takstolförbandet tillämpligt utan justering. Jämfört med 7a är detta alternativ marginellt billigare, men om många takstolar ska produceras bör 7a bli ett billigare alternativ då den kräver mindre arbete vid produktion.



Figur 5.23 Dimensionerande momentfördelning (symmetrisk)

Tabell 5.18 - Dim. M

	M_{Ed} [kNm]
Överram	126
Underram	12

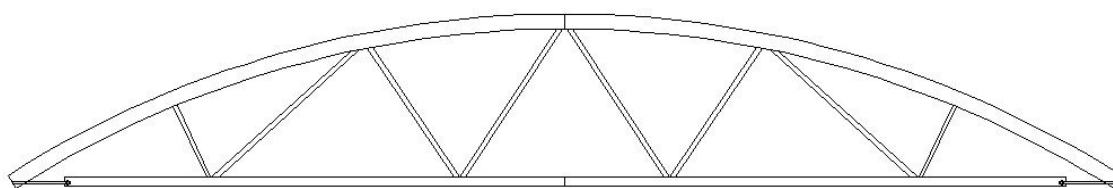


Figur 5.24 Dimensionerande normalkraftsfördelning (symmetrisk)

Tabell 5.19 - Dim. N

	N_{Ed} [kN]
Överram	-1226
Underram	1223
Yttre stång	-468
Inre stång	-238

5.6.5 1c – PARABELBÅGE

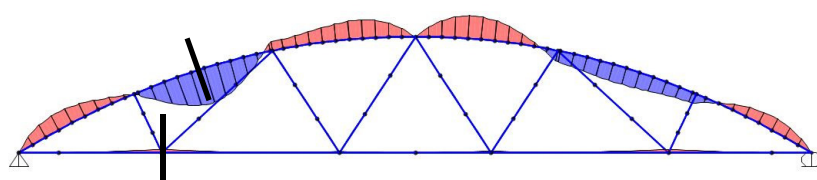


Figur 5.25 Alternativ 1c

Tabell 5.20 - Sammanfattning av takstol 1c

Beskrivning	1c. Parabelbåge med pilhöjd 5,76m. 8 stänger. Kort stång avser den närmast upplag. Takstolshöjd 6,2 m.					
Nedböjning	47 mm vid långtidslast					
Tyngdpunkt	Ca 2,1 m över upplagspunkt					
Stångförband	16 st, varav 12 är dimensionerade för drag och 4 för tryck					
Dimension	Överram	Underram	Kort stång	Lång stång	Rundstång	Förband
	215x540	280x315	215x135	215x180	Ø50	-
Kostnad	29 300 kr	19 100 kr	1 100 kr	10 400 kr	2 500kr	23 100 kr
Totalkostnad	85 500 kr					

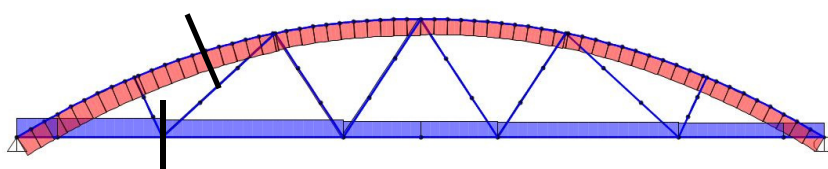
Detta alternativ är nästan oförändrat sedan den grova dimensioneringen. De dimensioner som förändrats är framförallt underramen som anpassats till dragförbandet. Stängerna har också breddats för att förenkla förbandet till överramen. Sammantaget står sig 1c bra jämfört med övriga alternativ då den är både styv och billig.



Figur 5.26 Dimensionerande momentfördelning (asymmetrisk)

Tabell 5.21 – Dim. M

M _{Ed} [kNm]	
Överram	90
Underram	8

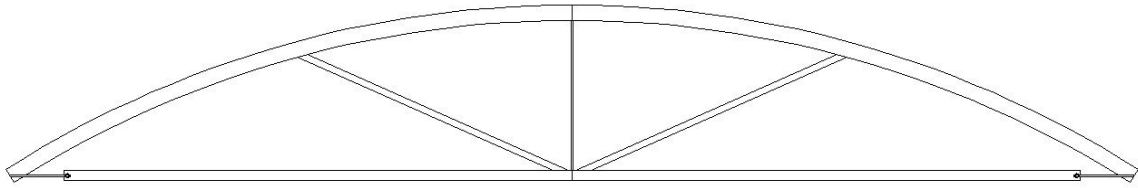


Figur 5.27 Dimensionerande normalkraftsfördelning (asymmetrisk)

Tabell 5.22 – Dim. N

N _{Ed} [kNm]	
Överram	-949
Underram	941
Kort stång	-28
Lång stång	-89

5.6.6 1B – PARABELBÅGE

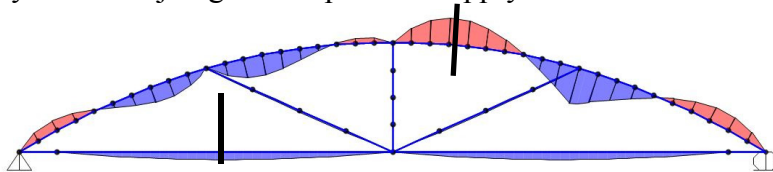


Figur 5.28 Alternativ 1b

Tabell 5.23 - Sammanfattning av takstol 1b

Beskrivning	1b. Parabelbåge med pilhöjd 5,76m. 3 stänger. Takstolshöjd 6,2 m.					
Nedböjning	135 mm vid långtidslast					
Tyngdpunkt	Ca 2,1 m över upplagspunkt.					
Stångförband	6 st, varav alla är dimensionerade för drag.					
Dimension	Överram	Underram	Vertikal	Diagonal	Rundstång	Förband
	215x540	280x360	215x90	280x225	Ø50	-
Kostnad	29 300 kr	21 800 kr	700 kr	8 900 kr	2 500kr	21 400 kr
Totalkostnad	84 600 kr					

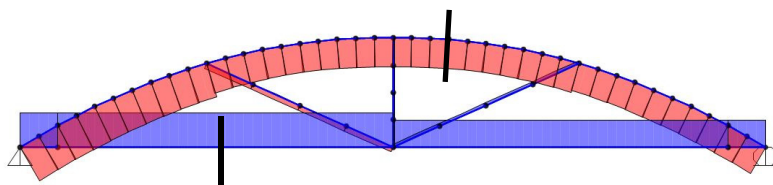
Vid slutdimensionering av 1b upptäcktes att den tidigare dimensionerats ogynnsamt. Största normalkraft och största moment var kombinerat, trots att de inte låg i samma snitt. Detta har åtgärdats genom att kontrollera var snitt för sig, som det bör göras. Detta har resulterat i kraftigt reducerad tvärsnittshöjd på överramen. Utöver det har en vertikal stång placerats vid mittpunkten samtidigt som knutpunkten diagonal-överram förflyttades 1 m närmare upplag. Allt detta för att bättre klara av den asymmetriska lasten. Adderandet av den vertikala stången gör takstolen styvare. Därmed blir den sneda stångens stödreaktion till överramen större. Resultatet är en jämnare momentfördelning och det maximala momentet minskar radikalt, från 349 kNm till ca 90 kNm. Trots den vertikala stången är detta alternativ det klart minst styva. Nedböjningskravet på $L/200$ uppfylls emellertid.



Figur 5.29 Dimensionerande momentfördelning (asymmetrisk)

Tabell 5.24 - Dim. M

M_{Ed} [kNm]	
Överram	89
Underram	24



Figur 5.30 Dimensionerande normalkraftsfördelning (asymmetrisk)

Tabell 5.25 - Dim. N

N_{Ed} [kN]	
Överram	-750
Underram	901
Vertikal	-20
Diagonal	-137

5.6.7 KONTROLL AV TVÄRKRAFT OCH TVÄRDRAG

De slutgiltiga alternativen har dimensionerats för tvärkraft och tvärdrag (vid krökt överram) enligt Eurokod 5 med ekvationerna i *Bilaga B – Dimensionering för tvärkraft och tvärdrag*. Eftersom det är en kontroll redovisas även kapaciteterna. Som kan ses i tabell 5.26 och tabell 5.27 är kapaciteten tillräcklig i samtliga fall.

Tabell 5.26 – Kontroll av tvärkrafter med dimensionerande tvärkraft, V_{Ed} , och kapacitet, V_{Rd}

Takstol	Överram		Underram	
	V_{Ed} [kN]	V_{Rd} [kN]	V_{Ed} [kN]	V_{Rd} [kN]
1b	50	116	5	101
1c	57	116	3	88
3c	63	126	58	164
3d	53	116	56	177
6b	106	145	8	104
7a	155	174	7	126

Tabell 5.27 – Kontroll av tvärdrag

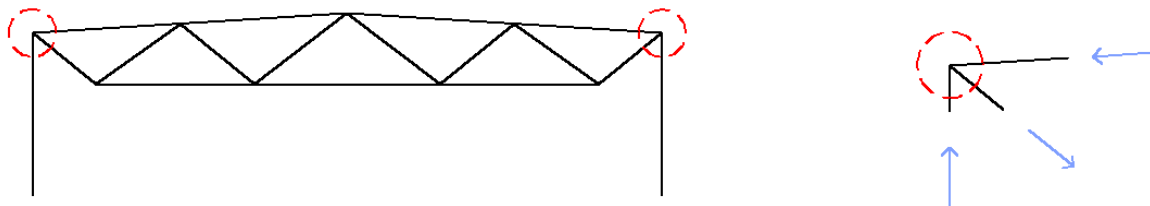
Takstol	Dimensionerande tvärdrag, $\sigma_{90,d}$ [MPa]	Kapacitet, $k_{dis}k_{vol}f_{90,d}$ [MPa]
1b	0,02	0,15
1c	0,02	0,15
3c	0,01	0,15
3d	0,01	0,15

6. UTFORMNING AV FÖRBAND

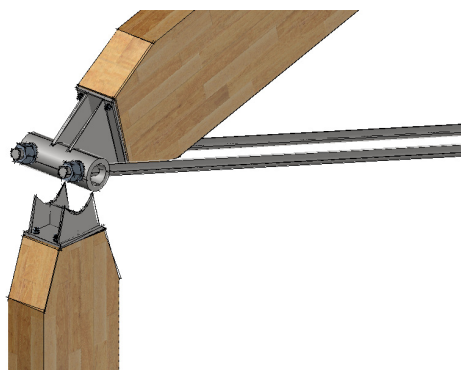
Under hela fasen med utformning av fackverkens geometrier har det kontinuerligt arbetats med design av dess knutpunkter. Till stängerna används konventionella förband. De kan bestå av inslitsade plåtar om förbandet är draget eller med pålimmad knap om förbandet är tryckt. Dessa undersöks inte närmare i denna rapport. Endast enklare dimensionering har gjorts för att kunna uppskatta kostnaden. Det är de mer unika knutpunkterna, vilka sammanbinder pelare och takstol samt de olika primärdelarna av fackverken, som noggrannare analyseras nedan. De är speciellt framtagna för att, med smärre modifikationer, passa samtliga fackverksgeometrier som gått vidare från urvalet. Förbanden har dimensionerats efter det takstolsalternativ som ger störst last i respektive förband. Därför kan nedanstående förband användas i alla vidareutvecklade takstolsalternativ. Lastexcentricitet har i största möjliga mån undvikts för samtliga knutpunkter. Normalspänningen i trästängerna varierar mellan tryck och drag för de olika takstolarna. Däremot är överram samt rundstänger alltid tryckbelastade medan underramen är dragbelastad.

6.1 FÖRBAND 1 – PELAR-TAKSTOLSFÖRBAND

6.1.1 BESKRIVNING



Figur 6.1 Position av förband 1 och kraftspel i knutpunkten

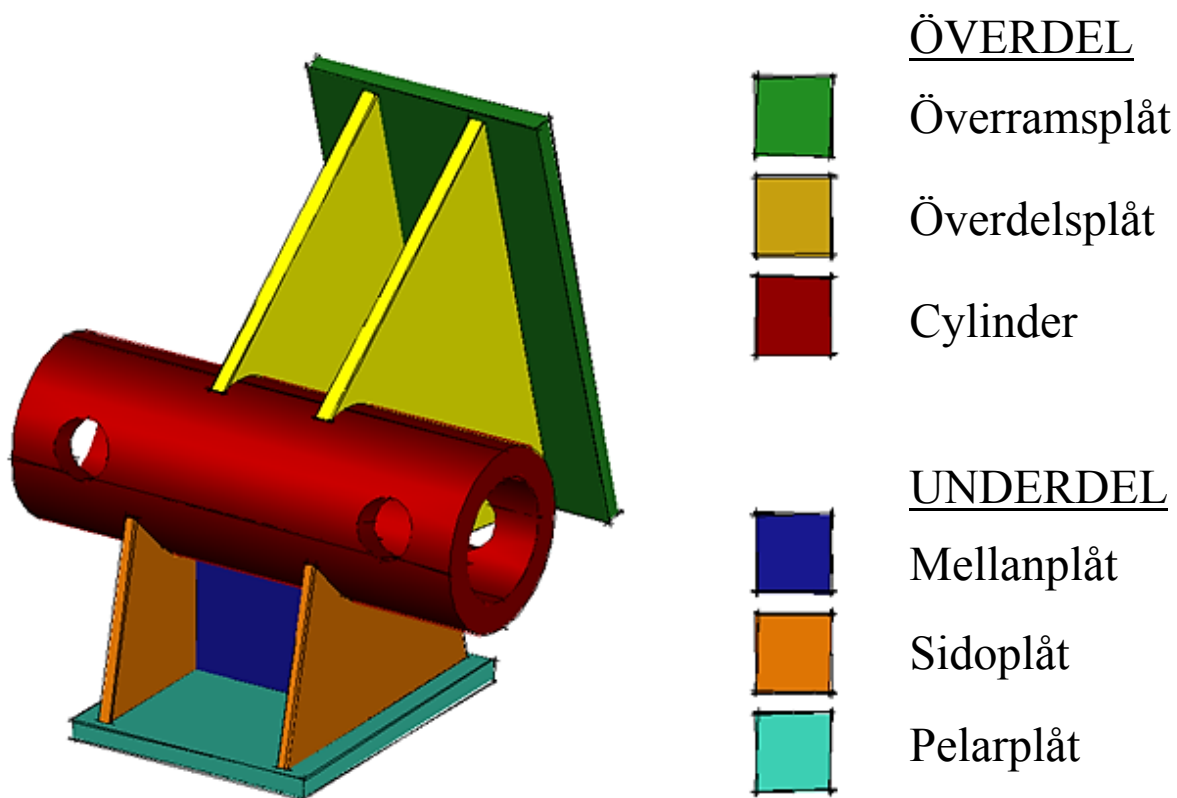


Figur 6.2 Skiss av förband 1, upplyft

Förbandet i figur 6.2 fungerar i stort sett som en perfekt led, vilket är eftersträvansvärt eftersom det då inte leder till några oväntade tvångskrafter. En annan stor fördel med förbandet är att det blir enkelt att lägga upp takstolen på pelarna. Förbandet är anpassat för en pelare med bredd 215 mm och höjd 495 mm. Dessa dimensioner är nödvändiga för en fasadpelare i denna typ av hallbyggnad och aktuell vindlast, vilket redogörs för i kapitel 8.

Vid behov kan pelartoppen snedsågas för att tillåta grövre pelartvärsnitt. Nödvändig storlek på tryckzonen i det anslutande limträet är 215x370 för överramen och 215x170 för pelaren.

Anslutande rundstänger är av diametern 50 mm (1b, 1c, 6b & 7a) eller 60 mm (3c & 3d) och är gängade i ändarna så att goda möjligheter till justering ges. Håltagningens diameter är 4 mm större än rundstångens så att det ska vara enkelt att föra igenom den. Förbandet fästs i överram och pelare med hjälp av skruv, vilka inte har dimensionerats. För att tillåta fuktrörelser i limträet vinkelrätt fiberriktningen kan skruvhålen i plåten göras avlånga. Rundstången ansluts med mutter och mutterbricka vilka heller inte har dimensionerats. Nödvändig dimension på dessa kontrolleras med leverantör.



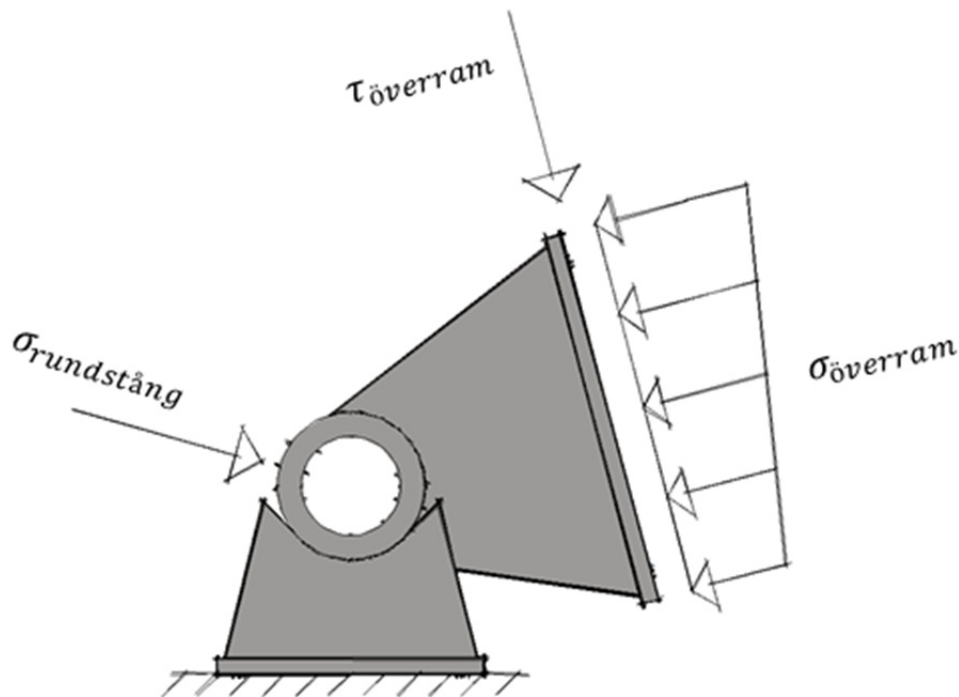
Figur 6.3 Ingående delar i förband 1

Förbandet består av två huvuddelar – en övre och en undre. Underdelen består av fyra hopsvetsade plåtar och överdelen av tre plåtar hopsvetsade med en cylinder. Hur svetsarna bör utformas utreds inte vidare i den här rapporten. Mellanplåten i underdelen stabiliserar sidoplåtarna och hjälper till att fördela lasten från cylindern. För att säkra konstruktionsdelen, för till exempel olyckslast, krävs att överdelen på ett säkert sätt låses fast i underdelen. Hur detta lämpligas görs återstår att undersöka. Dimensionerna hos samtliga delar av förbandet är av standardmått. Det som krävs är tillskärning av plåtarna och håltagning i cylindern.

6.1.2 ANALYS OCH DIMENSIONERING

6.1.2.1 Metod

En elastoplastisk modell av förbandet har satts upp i Abaqus, se figur 6.4. Det ingående materialet är stål S355, vilket för enkelhets skull modellerats idealplastiskt med en konstant flytgräns på 355 MPa.



Figur 6.4 Lastfall förband 1

Delarna i överdelen är samtliga uppbyggda av linjära skalelement och de är hopsatta med hjälp av kommandot "merge". Det slår ihop de olika delarna genom att göra så att de delar noder där de ansluter med varandra (Dassault Systèmes 2010).

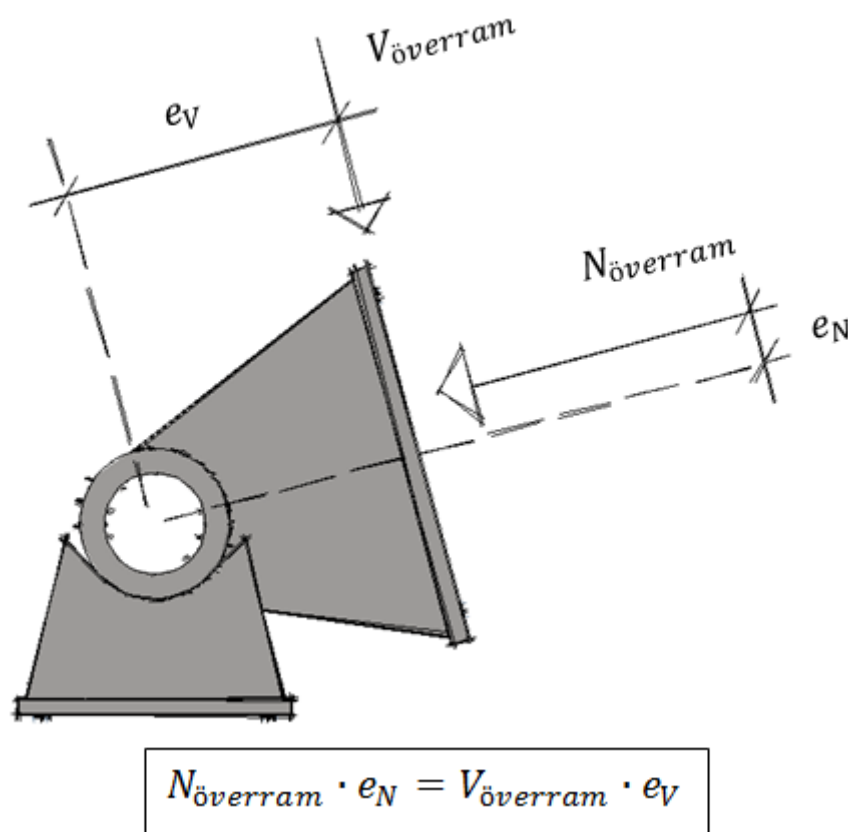
Stängerna, muttrarna och mutterbrickorna är inte med i modellen. Den påkänning de ger cylindern gestaltas genom en tryckspänning, projicerad i rundstångens riktning, på området kring håltagningarna för rundstängerna. Den tryckta ytan är anpassad efter mutterbrickan. Håltagningen är gjord för en rundstång $\varnothing 50$ mm och har därför en diameter på 54 mm. På grund av att cylindern är uppbyggd av skalelement är hålen mindre nära cylinderns mitt. Detta påverkar troligtvis inte resultatet nämnvärt eftersom den största påkänningen dragkraften i rundstängerna påverkar cylindern med sker genom tryckspänning i kontakten med mutterbrickorna.

I underdelen representeras plåtarnas ihopsvetsning av restriktionen "tie". Den fungerar på så sätt att noderna i en yta, "slave surface", anpassas efter noderna i en anliggande yta, "master surface" (Dassault Systèmes 2010). Svetsarna kontrolleras emellertid inte. Plåtarna är modellerade med linjära solida element. Anledningen till att de enklare skalelementen inte används här också är att de inte klarar av att skapa en fungerande kontaktyta att lägga upp

cylindern på. För att kunna ge ett verklighetstroget resultat är plåtarna indelade, eller ”meshade”, med tre element i djupled. Pelarplåten är fast inspänd enligt figur 6.4.

Kraften mellan över- och underdelen överförs genom kontakt mellan cylindern och toppytorna hos plåtarna i underdelen. Kontakten är hård i normalled, vilket innebär att den inte tillåter någon inträngning av cylindern i plåtarna. Kontakten ger också friktion med friktionskoefficienten 0,15 (SFN 2013), i tangentialled.

För att motverka mekanism i knutpunkten har normalspänningen som överförs från överramen omfördelats så att en större del av den verkar i överdelen av den anslutande plattan. Mekanismen uppstår på grund av tvärkraften från överramen. Den linjära fördelning som används är en uppskattning av verkligheten. För att uppnå jämvikt i modellen har det också varit nödvändigt att öka denna last med ett fåtal kN. Det har gjorts genom att öka lutningen på linjära fördelningen något. Det är viktigt att poängtera att denna mekanism endast uppstår i modellen och skulle inte kunna uppstå i verkligheten då förbandet är fäst i övriga konstruktionen.

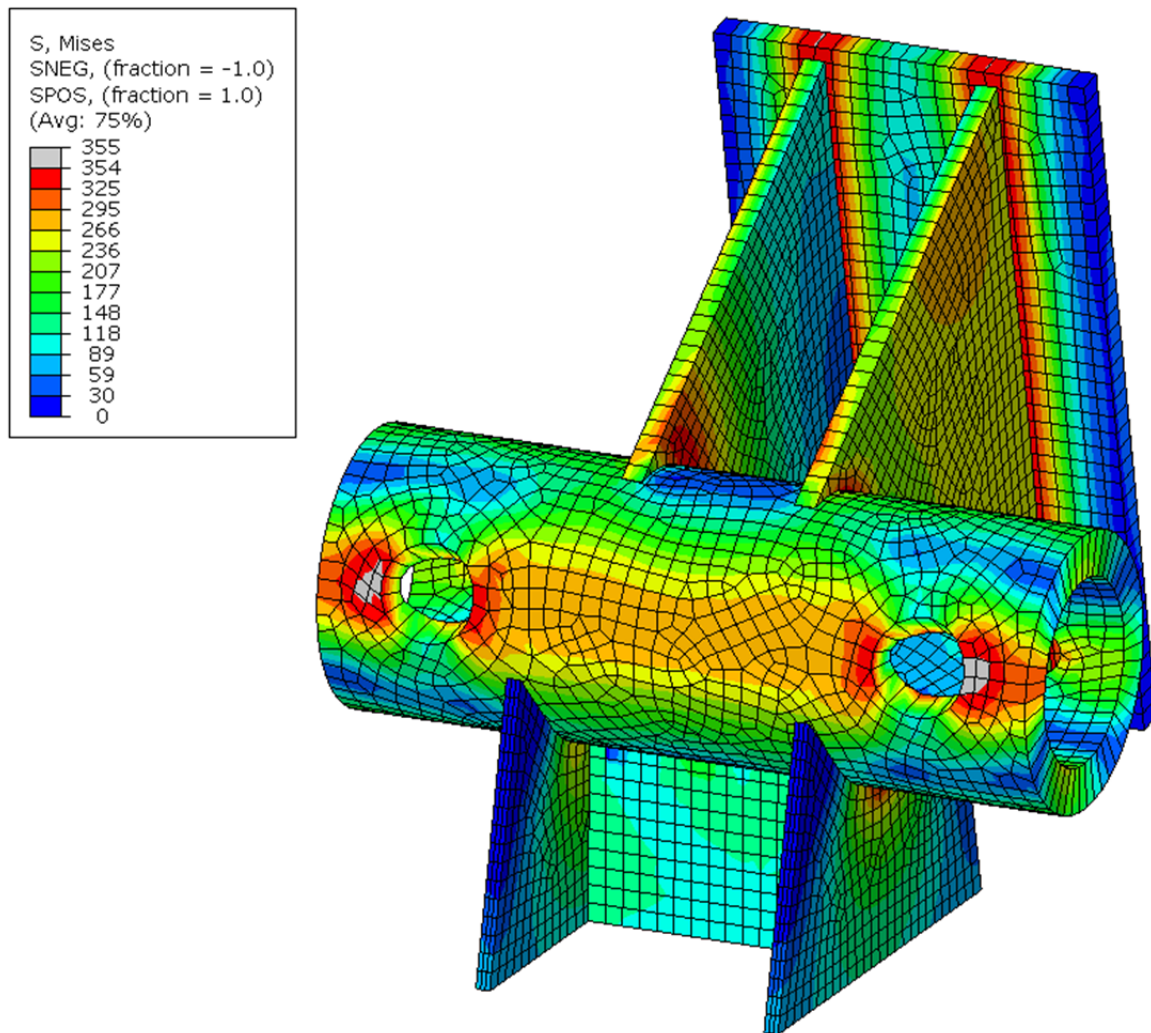


Figur 6.5 Lastfall förband 1

6.1.2.2 Resultat

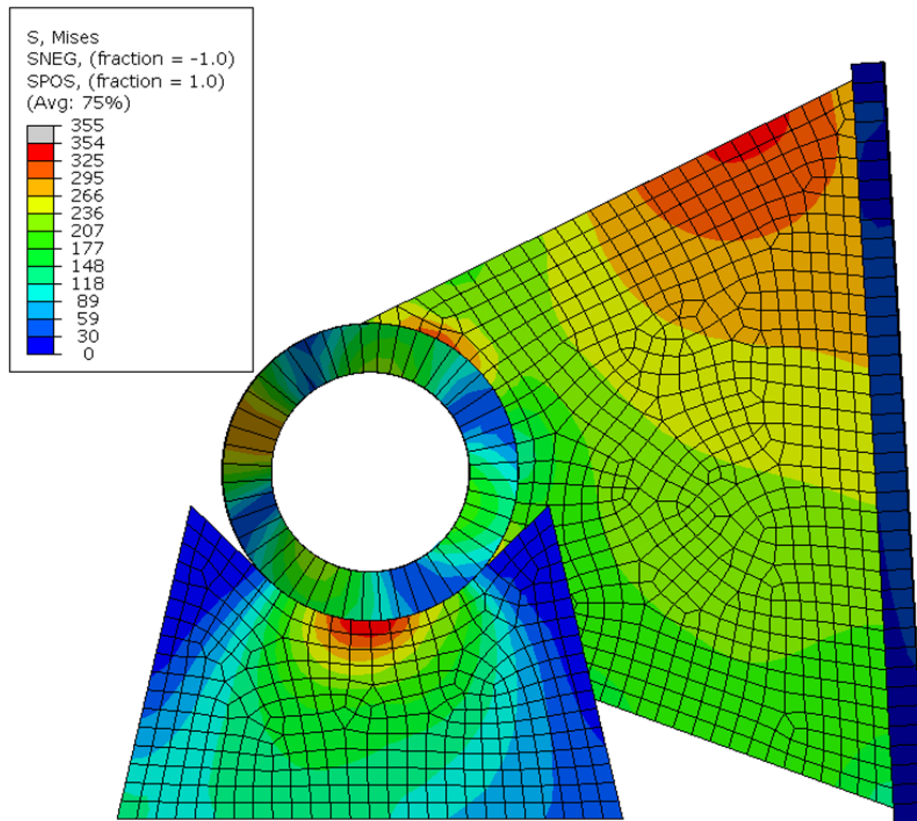
Analyser av förbandet gjordes för samtliga av de valda takstolsgeometrierna. Takstol 3d gav störst påkänning på överdelen, se figur 6.6. Underdelen belastades hårdast av Takstol 7a, se figur 6.7. Därför har förbandet dimensionerats efter de två lastfallen. Förbandet kommer därmed att kunna användas till samtliga av de slutgiltiga alternativen. Som kan ses i figur 6.6

finns ett par mindre zoner där plasticitet uppstår. Det som då sker är att lasten fördelar sig jämnare över ett större område kring plasticitetszonerna. Därmed bedöms aktuell spänningsfördelning inte innebära någon risk. För att motverka att mekanism uppstod i förbandet vid alternativ 7a ökades resultanten av $\sigma_{\text{överram}}$ med 50 kN vilket motsvarar en lastökning på 4 %. Måtten för förbandet hittas i figur 6.8 och figur 6.9. Deformationen på cylindern blir mycket liten. Cylinderns ände böjer 0,5 mm i rundstångens riktning.



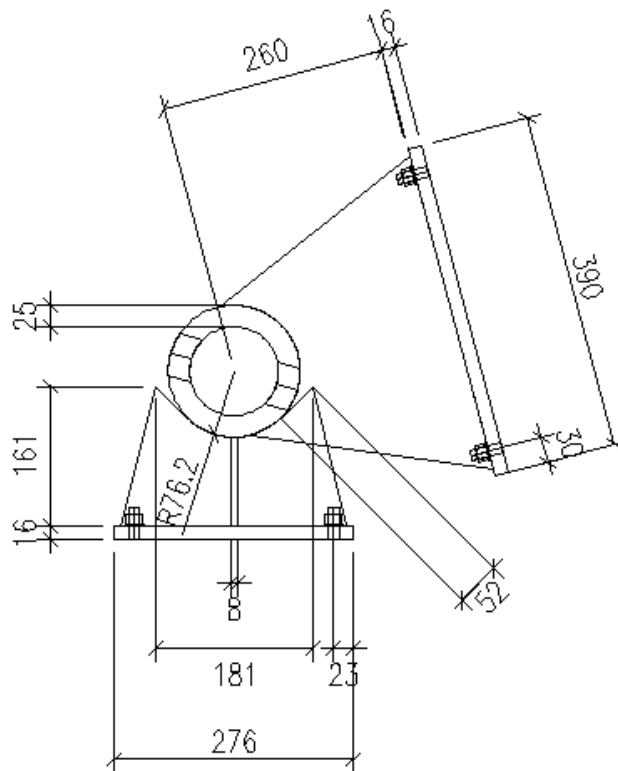
Figur 6.6

Von Misesspänning i förband 1 på takstolsalternativ 3d (störst påkänning på överdel). Gråa områden är plasticerade

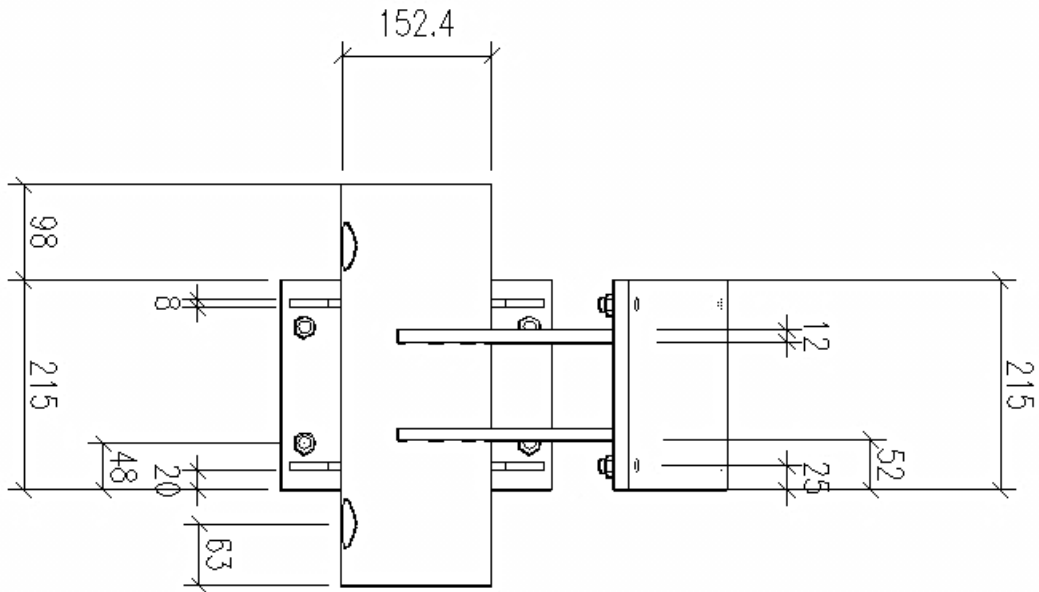


Figur 6.7 Von Misesspänning i förband 1 på takstolsalternativ 3d (störst påkänning på underdel)

Förbandets dimensioner redovisas i figur 6.8 och figur 6.9.



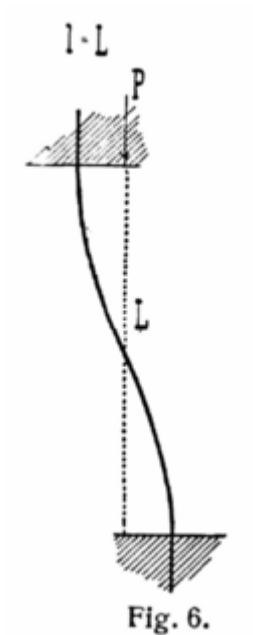
Figur 6.8 Måttsättning av förband 1 sett från sida [mm]



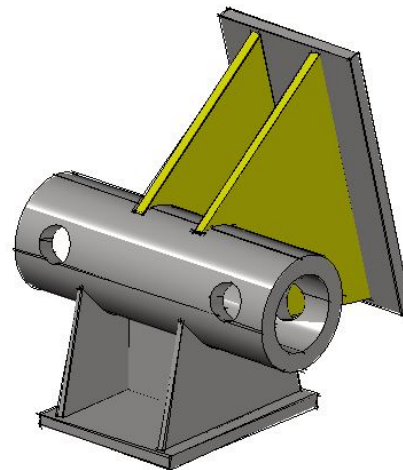
Figur 6.9 Måttsättning av förband 1 sett ovanifrån [mm]

6.1.2.3 Knäckning av plåtar

Sidoplåtarna i underdelen är stagade mot knäckning tack vare mellanplåten. Däremot finns det risk för att överdelsplåtarna i förbandet ska knäcka, se figur 6.11. En knäckningsanalys gjordes i Abaqus för att kontrollera att så inte kan ske. För att kontrollera att analysen stämmer görs här en knäckningskontroll av plåtarna i vecka riktningen. Det knäckningsfall som bäst återspeglar verkligheten visas i figur 6.10.



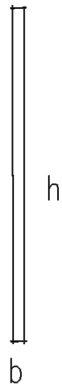
Figur 6.10 Knäckningsfall



Figur 6.11 Kontrollerade plåtar (gula)

Knäcklasten för en balk med rektangulärt tvärsnitt bestäms i detta fall med följande ekvation:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^2 Ehb^3}{12l^2} \quad \text{där: } \begin{aligned} E &= 210 \text{ GPa} \\ b &= 12 \text{ mm} \\ l &= 184 \text{ mm} \end{aligned}$$



Den takstol som ger störst normalkraft är 3d. Den belastar de två parallella plåtarna men en normalkraft på 1251 kN. Per plåt blir det alltså:

$$\frac{1251}{2} = 626 \text{ kN}$$

Om knäckningslasten, P_{cr} , sätts till denna last kan minsta nödvändiga höjd bestämmas enligt:

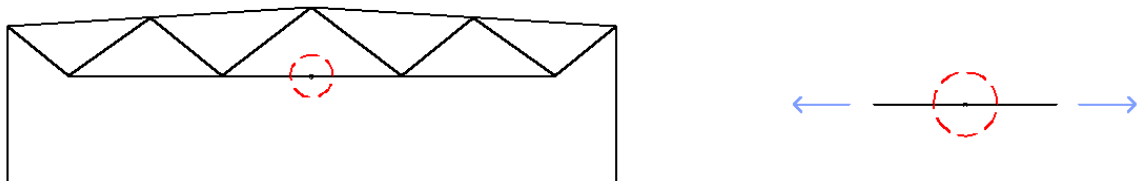
$$h = \frac{12P_{cr}l^2}{\pi^2 Eb^3} = 142 \text{ mm}$$

Figur 6.12 undersökt tvärsnitt

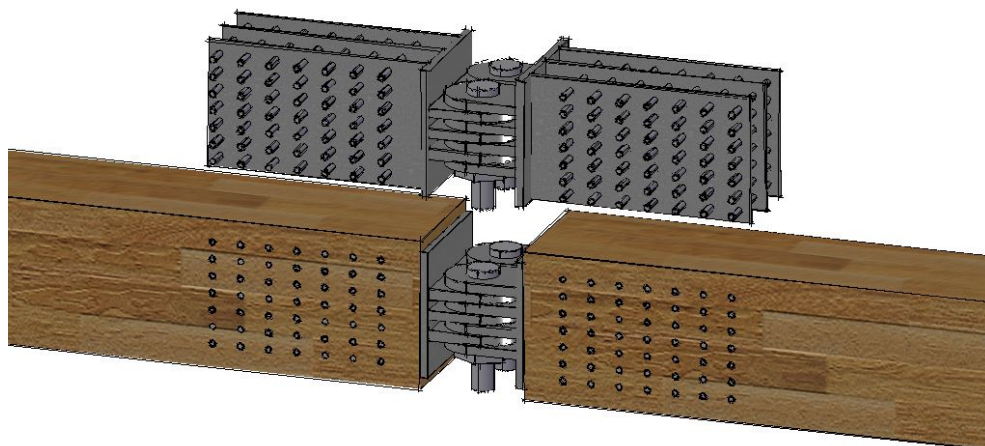
Minsta belastad tvärsnittshöjd av plåten är ungefär 290 mm. Därmed bekräftar kontrollen att risk för knäckning inte föreligger.

6.2 FÖRBAND 2 – DRAGFÖRBAND

6.2.1 BESKRIVNING



Figur 6.13 Position av förband 2 och kraftspel i knutpunkten



Figur 6.14 Skiss av förband 2

Om underramen överstiger 20 m kan det vara nödvändigt av transportskäl att skarva den. Vid förbandet är underramen näst intill enbart belastad med dragkraft. Det moment och den tvärkraft som finns där är små. De viktigaste egenskaperna i förbandet är därför att kunna motstå stor dragkraft och vara lättmonterat då underramen måste sättas ihop på byggarbetsplats. Under arbetets gång har ett antal dragförband jämförts på idéstadie. I samråd med handledarna har författarna kommit till slutsatsen att förbandstypen i figur 6.14 är intressant och därför väljs denna som dragförband i hallbyggnadskonstruktion. Den största fördelen med detta förband är att det går snabbt att montera på byggarbetsplats. De båda delarna sätts ihop med två sprintar med gängad ände och låses med mutter. Infästningen i limträdelarna görs med inslitsade plåtar och dymlingar.

6.2.2 ANALYS OCH DIMENSIONERING

6.2.2.1 Sprintdel av förband

Förbandet är utformat för att klara den största dragkraften i de sex takstolsalternativ som är framtagna. Det ger en dimensionerande normalkraft på 1300 kN, alltså 650 kN genom varje sprint. Förbandet är helt utfört i S355. Först dimensioneras den del av förbandet som innehåller en massiv sprint och plåt – ett rent stålförband. För att undvika excentricitet i förbandet utformas ena balkändan med en sprintplåt mer än den andra änden, se figur 6.16. Änden av förbandet med färre sprintplåtar blir alltså den dimensionerande änden. Kraften förankras i balken med inslitsade plåtar och dymling. Mittdelen av förbandet är dimensionerat enligt Eurokod 3 del 1-8 och ska då uppfylla följande villkor:

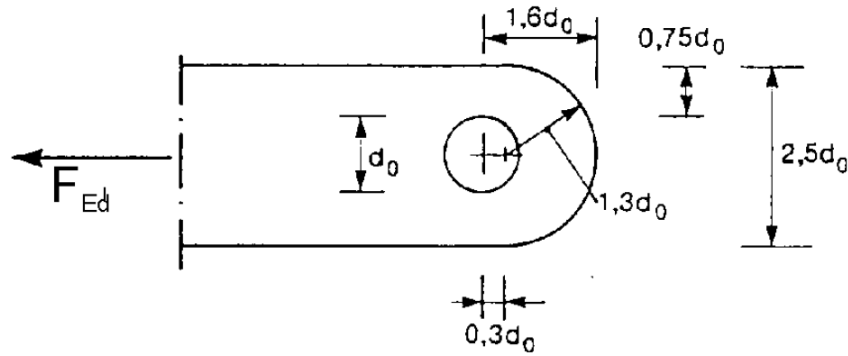
$$1. \text{ Skjuvning av sprinten} \quad F_{v,Rd} = 0,6 \cdot A_{sprint} \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \geq F_{v,Ed}$$

$$2. \text{ Hållkantryck} \quad F_{b,Rd} = 1,5 \cdot t \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed}$$

$$3. \text{ Böjmoment} \quad M_{Rd} = 1,5 \cdot W_{el} \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0}} \geq M_{Ed}$$

$$4. \text{ Böjning och skjuvning av sprint} \quad \left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 \leq 1$$

De parametrar som påverkar kapaciteten på mittdelen av förbandet är alltså sprintdiameter, plåttjocklek och antal skjuvplan. I förbandet vore det ofördelaktigt att ha för många plåtar då eventuell imperfektion i plåtar eller sprint kan göra svårigheter att föra in sprinten. Detsamma gäller för plåttjockleken. Sprintdiameteren används som utgångspunkt i förbandet och plåtens geometri kan hittas i figur 6.15. Med dessa dimensioner givna kan kapacitet per skjuvplan beräknas och på så sätt fås nödvändigt antal plåtar.



Figur 6.15 Plåtgeometri baserad på sprintdiameter (Eurokod 3 del 1-8)

1. Skjuvning av sprinten

Sprintdiameter	$d = 45 \text{ mm}$
Tvårsnittarea, sprint	$A_{\text{sprint}} = \left(\frac{d}{4}\right)^2 \cdot \pi = 1590 \text{ mm}^2$
Partialkoefficient	$\gamma_{M2} = 1,2$ (EKS 8)
Sträckgräns	$f_y = 355 \text{ MPa}$
Brottgräns	$f_u = 510 \text{ MPa}$
Skjuvkapacitet per plan	$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot A \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}} = 406 \text{ kN}$

För att sprintens skjuvkapacitet inte ska överstigas krävs alltså minst två skjuvplan per sprint.

2. Hålkanttryck

Håldiameter i plåt	$d_0 = d + 4 = 49 \text{ mm}$
--------------------	-------------------------------

För att beräkna plåttjocklek behöver hålkanttrycket vara känt. Dimensionerna i förbandet påverkar också momentfördelningen. Det ger ett iterativt förfarande vid dimensioneringen. Det visar sig att minst 3 plåtar är nödvändigt i änden med färre plåtar.

Hålkanttryck	$F_{b,Ed} = \frac{650}{3} = 217 \text{ kN}$
Plåttjocklek	$t = \max\left(0,7 \sqrt{\frac{F_{b,Ed} \gamma_{M0}}{f_y}} = 17,3; \frac{d_0}{2,5} = 19,6\right) \rightarrow 20 \text{ mm}$
Kapacitet hålkant	$F_{b,Rd} = 1,5 \cdot t \cdot d \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 479 \text{ kN}$

3. Böjmoment

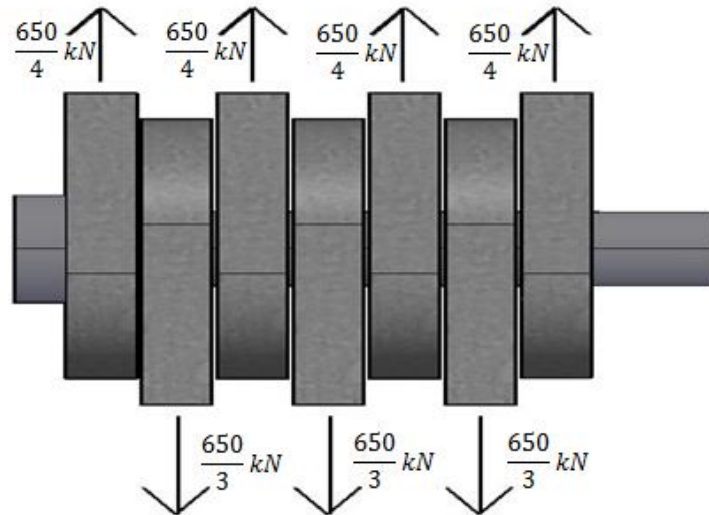
Elastiskt böjmotstånd	$W_{el} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = 8946 \text{ mm}^3$
Momentkapacitet i sprint	$M_{Rd} = 1,5 \cdot W_{el} \cdot \frac{f_{yp}}{\gamma_{M0}} = 4,8 \text{ kNm}$

Med geometri enligt ovan erhålls följande dimensionerande laster som kontrolleras mot respektive kapacitet:

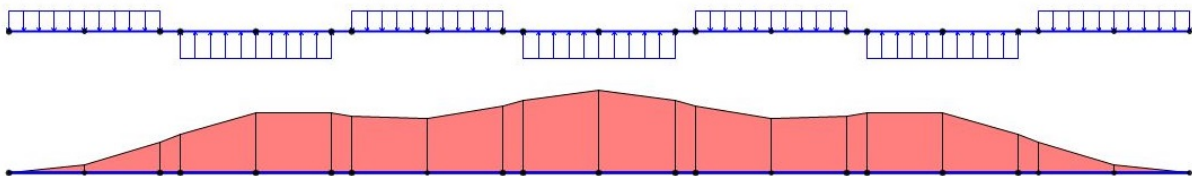
Kontroll av hållkantryck $F_{b,Ed} = 217 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 479 \text{ kN}$

Kontroll av skjuvning av sprint $F_{v,Ed} = 108 \text{ kN} < F_{v,Rd} = 406 \text{ kN}$

Momenten beräknas med antagandet om att spänningen i kontaktytan mellan sprint och plåt är jämnt fördelad. I figur 6.16 illustreras lastfallet. Lastfördelningen fördes in i SAP2000 varpå momentfördelningen i sprinten kunde bestämmas, se figur 6.17.



Figur 6.16 Lastfallet för sprinten med 3+4 plåtar. Ej skalenlig

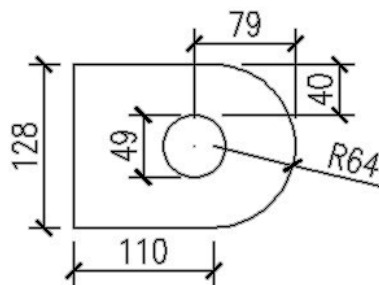


Figur 6.17 Lastfördelning och momentdiagram för sprint

Kontroll av moment i sprint $M_{Ed} = 4,2 \text{ kNm} < M_{Rd} = 4,8 \text{ kNm}$

M_{Ed} är hämtat ur momentdiagramet i figur 6.17.

Kontroll av böjning och skjuvning $\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}}\right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}}\right)^2 = 0,86 \leq 1$



Figur 6.18 Måttsättning av sprintplåtar i sprintdel av förband 2 [mm]

Plåtarna svetsas fast i en ändplåt som också slitsplåtarna fästs till, se figur 6.19. Endast sprintplåtarnas svets behandlas här då slitsplåtarnas kontaktlängd mot ändplåten är så pass stor att en svets inte bör vara något problem. Den last från plåten som överförs till varje svets är halva hålkantstrycket. Svetsen dimensioneras för att uppfylla kraven

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

$$\left(\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)\right)^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \text{ där } \beta_w = 0,9$$

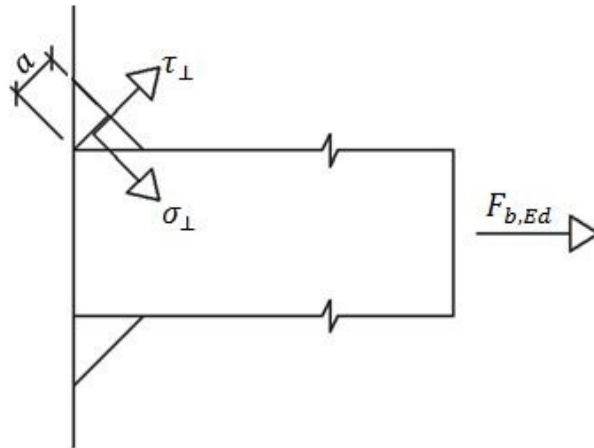
I detta fall är $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp}$ och $\tau_{\parallel} = 0$ vilket reducerar ekvationen till

$$2\sigma_{\perp} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \text{ där } \beta_w = 0,9$$

Spänningen i svetsen beräknas med

$$\sigma_{\perp} = \frac{F_{b,Ed}}{2\sqrt{2} L_{eff} a} \text{ där } L_{eff} = 128 \text{ mm} - 2a$$

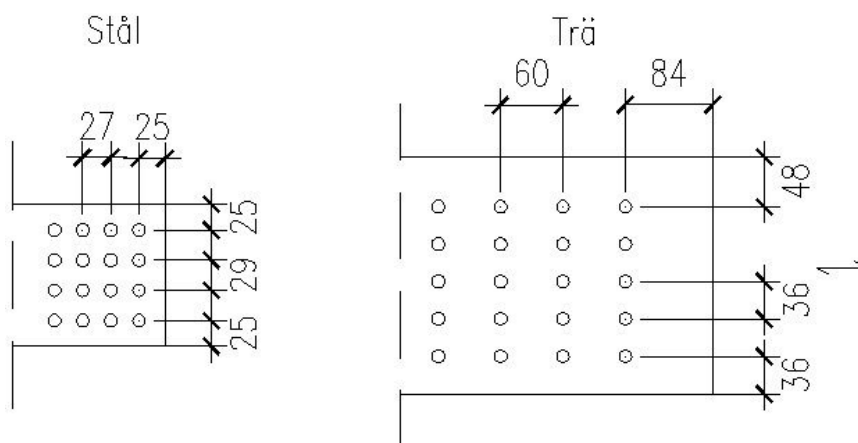
För att uppfylla spänningskraven erfordras $a > 2 \text{ mm}$. Enligt Eurokod 3 del 1-8 bör dock inte svetsens a-mått understiga 3 mm. Därför väljs ett a-mått på 3 mm.



Figur 6.19 a-mått och spänningar i svetsen

6.2.2.2 Slits- och dymlingsdel av förband

Från sprintförbandet förs kraften in till underramen genom inslitsade plåtar och dymlingar. Minsta avstånden till kant, till ände och mellan dymlingar visas i figur 6.20. Måtten är enligt Eurokod 3 del 1-8 och Eurokod 5 del 1-1. I figur 6.20 är översidan den belastade kanten varpå avståndet är något större där än vid underkanten.



Figur 6.20 T.v. Minsta kant- och centrumavstånd för dymlingar m.a.p. slitsplåt
T.h. Minsta kant- och centrumavstånd för dymlingar m.a.p träet [mm]

För att beräkna kapacitet för ett slitsplåtförband beräknas den last en enskild dymling kan bära. Denna last multipliceras sedan med antal dymlingar i förbandet. I dymlingsrader kan det uppstå ojämn spänningsfördelning mellan dymlingar (Crocetti, 2012). Enligt Eurokod 5 del 1-1 måste därför antalet dymlingar i en rad reduceras till ett effektivt antal som beror på antal, avstånd och diameter på dymlingar. Hela förbandet är utfört i S355. Nedan följer en dimensioneringsgång för denna typ av förband.

Dymlingsdiameter $d = 12 \text{ mm}$

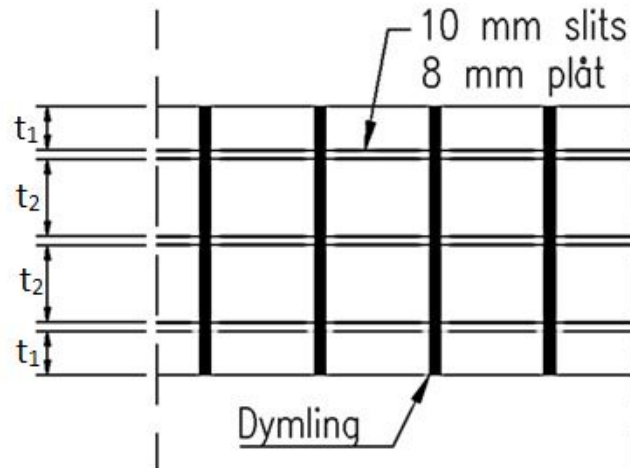
Densitet GL30c $\rho_k = 390 \text{ kg/m}^3$

Partialkoefficient för träförband $\gamma_M = 1,3$

Bäddhållfasthet $f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d) \cdot \rho_k = 28,1 \text{ MPa}$

Flytmoment $M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} = 0,10 \text{ kNm}$

För att erhålla ett duktilt brottbeteende i förbandet eftersträvas att flytleder uppstår i dymlingarna innan träet går till brott. För att säkra det beteendet krävs en minsta virkestjocklek mellan slitsarna, $t_{2,req}$, se figur 6.21.



Figur 6.21 Virkestjocklek t_1 och t_2

$$\frac{f_{h,k} \cdot t_{2,req} \cdot d}{2} = 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} \rightarrow t_{2,req} = 78 \text{ mm}$$

I detta förband används $t_2 = 80 \text{ mm}$.

I den yttre delen av förbandet eftersträvas också uppkomst av flytled. För att en flytled ska uppkomma krävs en minsta virkestjocklek från slits ut till kant, $t_{1,req}$.

$$f_{h,k}t_{1,req}d = f_{h,k}t_{1,req}d \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k}t_{1,req}^2d}} - 1 \right) \rightarrow t_{1,req} = 24 \text{ mm}$$

Ska två flytleder uppstå i yttre delen krävs att $t_1 = t_{2,req}$. I de takstolsalternativ som tagits fram är underramen som minst 280 mm bred. För att uppfylla kraven för flytledsbildning ryms då tre slitsplåtar. Med $b = 280 \text{ mm}$ och tre slitsplåtar erhålls $t_1 = 45 \text{ mm}$ och $t_2 = 80 \text{ mm}$.

Kapacitet för en dymling och skjuvplan beräknas med formlerna nedan:

En flytled (yttre skjuvplan) $F_{v,Rk}^I = f_{h,k}t_1d \left(\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,k}t_1^2d}} - 1 \right) = 9,2 \text{ kN}$

Två flytleder (centrala skjuvplan) $F_{v,Rk}^{II} = 2,3\sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} = 13,2 \text{ kN}$

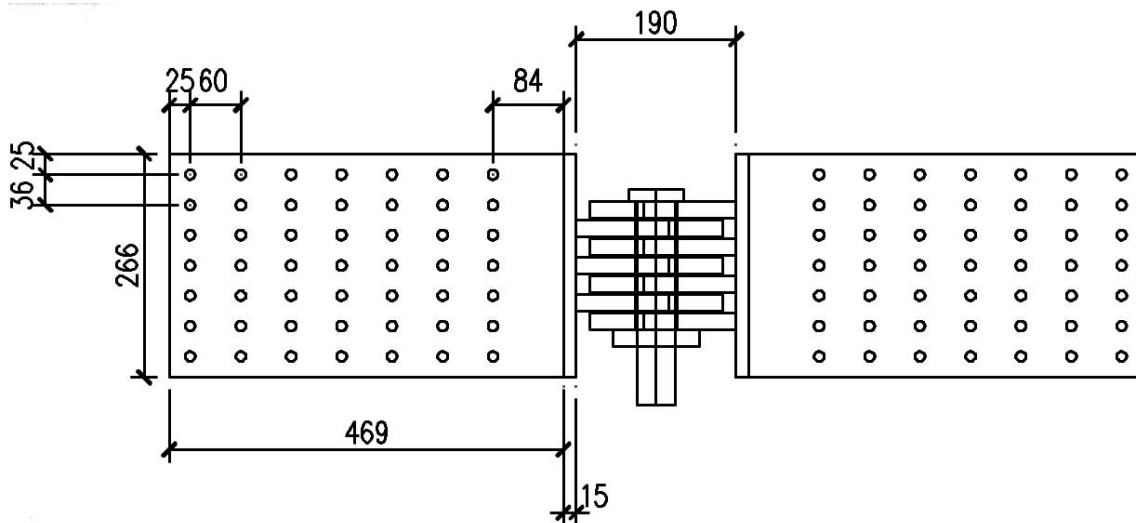
I detta förband har varje dymling fyra centrala skjuvplan och två yttre skjuvplan.

Karakteristisk bärförmåga/dymling $F_{Rk} = 4 \cdot F_{v,Rk}^{II} + 2 \cdot F_{v,Rk}^I = 71,2 \text{ kN}$

Höjden på underramen är, på de valda alternativen, som lägst 315 mm. Det ger utrymme för 7 dymlingsrader. Antalet effektiva dymlingar per rad korrigeras med följande formel där n_{rad} är antal dymlingar i en rad:

Eff. dymlingar i en rad $n_{eff} = n_{rad}^{0,9} \cdot \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \leq n_{rad}$ där a_1 är avståndet mellan dymlingar

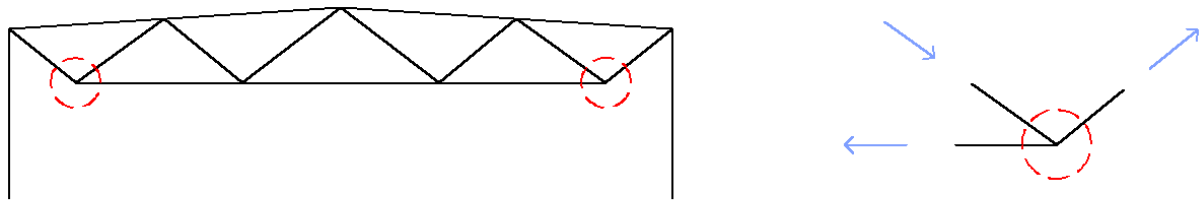
För att beräkna dimensionerande kapacitet på dymlingsförbandet reduceras den karakteristiska kapacitetet på varje dymling med faktorn $\frac{k_{mod}}{\gamma_M}$ och multipliceras med antalet effektiva dymlingar i förbandet. Detta dymlingsförband har dimensionerats till 49 dymlingar (7 rader x 7 st) med en total kapacitet $F_{v,Rd} = 1393 \text{ kN}$. Med dimensionerande kraft $F_{Ed} = 1300 \text{ kN}$ ger det en utnyttjandegrad på 93 %. De slutgiltiga måtten och dymlingsplacering hittas i figur 6.22.



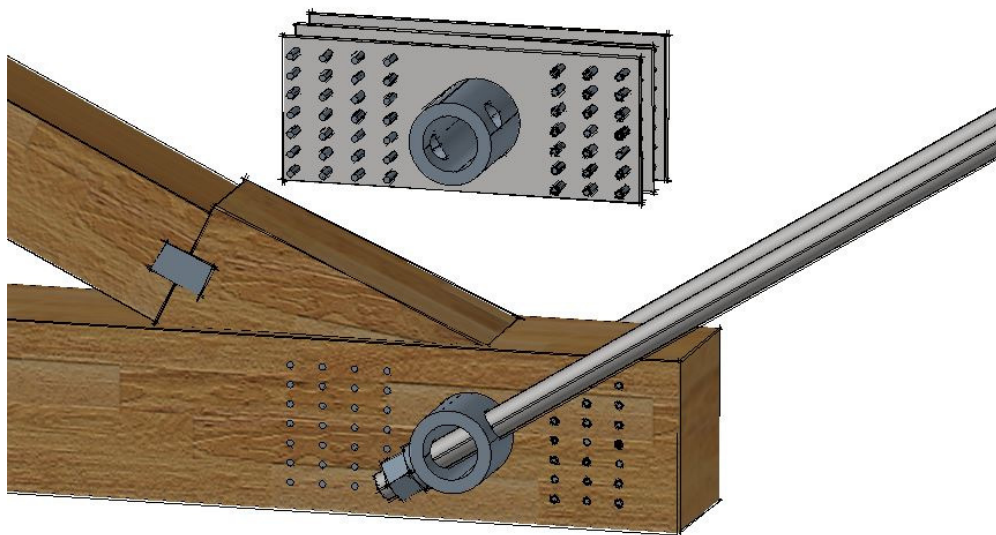
Figur 6.22 Måttsättning av slitsplåt och dymlingsorientering [mm]

6.3 FÖRBAND 3 – RUNDSTÅNG-UNDERRAMSFÖRBAND

6.3.1 BESKRIVNING



Figur 6.23 Position av förband 3 och kraftspel med tryckt diagonal



Figur 6.24 Skiss av förband 3

Förband 3 (se figur 6.24) fungerar som en led på ett bra sätt. De delar som ingår är 49 dymlingar, tre slitsplåtar och en cylinder, se figur 6.24. Dymlingarna överför kraften från slitsplåtarna till underramen. För att alla dymlingar ska få plats måste underramen förlängas något. Kraften överförs mellan rundstången och cylindern med hjälp av mutter och mutterbricka. I närheten av förbanden ansluter diagonaler för vissa av geometrierna. De är då riktade på ett sådant sätt att excentricitet undviks. Håltagningen för cylindern i slitsplåtarna har 4 mm större diameter än cylindern för att göra det lättare att föra in den. Träet har en håldiameter som är 8 mm större än cylindern för att säkerställa att lasten enbart överförs mellan cylinder och slitsplåtar. En fördel vid montagearbetet är att cylindern kan rotera fritt varpå det blir enkelt att ansluta den gängade rundstången till cylindern. Att rundstången är gängad ger goda möjligheter till justering på samma sätt som hos förband 1. Avståndet från yttersta dymlingen till underramens ände sätts till 110 mm, vilket är något längre än vad som krävs. Komplexiteten i knutpunkten gör en sådan åtgärd befogad.

6.3.2 ANALYS OCH DIMENSIONERING

Den dimensionerande lasten är i princip lika stor som i förband 2. Utgångspunkten är därför att antalet dymlingar blir detsamma. I takstolsalternativ 6b och 7a skiljer dock lastens angreppsvinkel då rundstången inte är parallell med underramen. I övriga takstolar är vinkeln 0° . Vinkeln påverkar bäddhållfastheten parallellt fiberriktningen enligt:

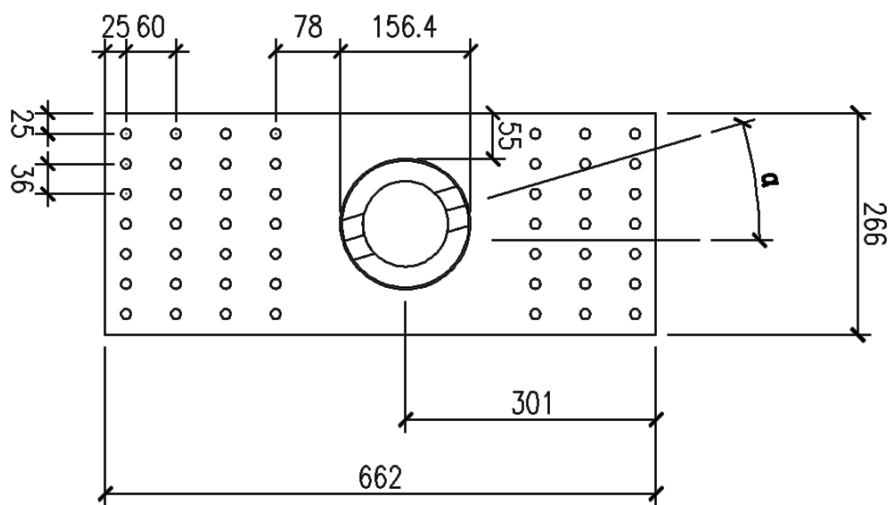
$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d = 1,53 \quad \text{för barrträ}$$

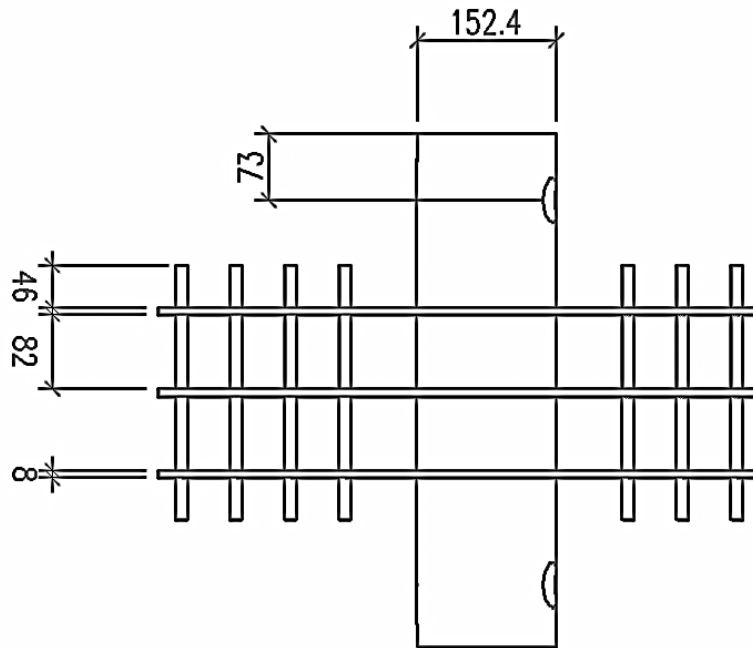
Den enda skillnaden är alltså att $f_{h,\alpha,k}$ används istället för $f_{h,0,k}$ i ekvationerna i kapitel 6.2.2.2. I tabell 6.1 redovisas kapaciteten i förbandet för takstol 6b och 7a, beräknat med 49 (7x7) stycken 12 mm dymlingar. Förbandsgeometrin visas i figur 6.25 och figur 6.26.

Tabell 6.1 - Inverkan av angreppsvinkel

Takstol	α [°]	$f_{h,\alpha,k}$ [MPa]	Kapacitet, F_{Rd} [kN]	Dimensionerande last, F_d [kN]
6b	33	24,3	1237	792
7a	18	26,8	1352	1183



Figur 6.25 Måttsättning av förband 3 sett från sidan [mm]



Figur 6.26 Måttsättning av förband 3 sett ovanifrån [mm]

En enkel överslagsräkning görs för att kontrollera att stålet kring håltagningen på 156,4 mm har tillräcklig draghållfasthet. Fallet som undersöks är det värsta tänkbara med

$$\alpha = 0^\circ \quad (\text{se figur 6.25})$$

och dimensionerande normalkraft

$$N_d = 1300 \text{ kN}$$

Det antas att halva kraften går till dymlingarna i vänstra delen av förbandet och halva till dem i högersidan. Höjden av det snitt av slitsplåten som måste ha kapacitet att föra vidare halva kraften är:

$$h = 55 \cdot 2 = 110 \text{ mm}$$

vilket ses i figur 6.25. Tjockleken på slitsplåtarna är:

$$t = 8 \text{ mm}$$

Enligt EKS 8 6.1(1) på sida 81 är stålets dimensionerande bärförmåga med hänsyn till dragbrott beräknad som:

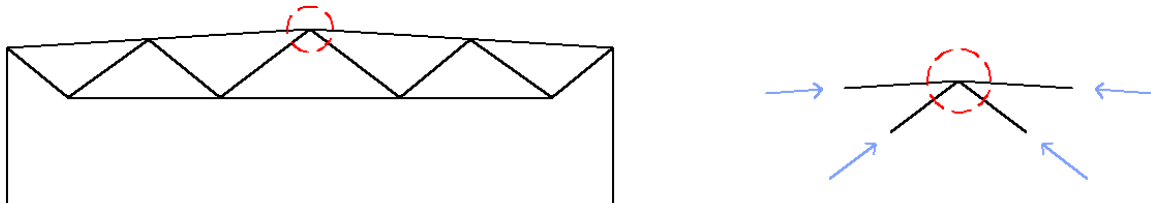
$$f_{yd,drag} = \frac{f_y}{\gamma_{M2}} = \frac{355}{1,1} = 323 \text{ MPa}$$

Eftersom förbandet innehåller tre plåtar blir dimensionerande spänning:

$$\sigma_d = \frac{N_d}{2 \cdot 3ht} = 246 \text{ MPa} < f_{yd,drag} = 323 \text{ MPa}$$

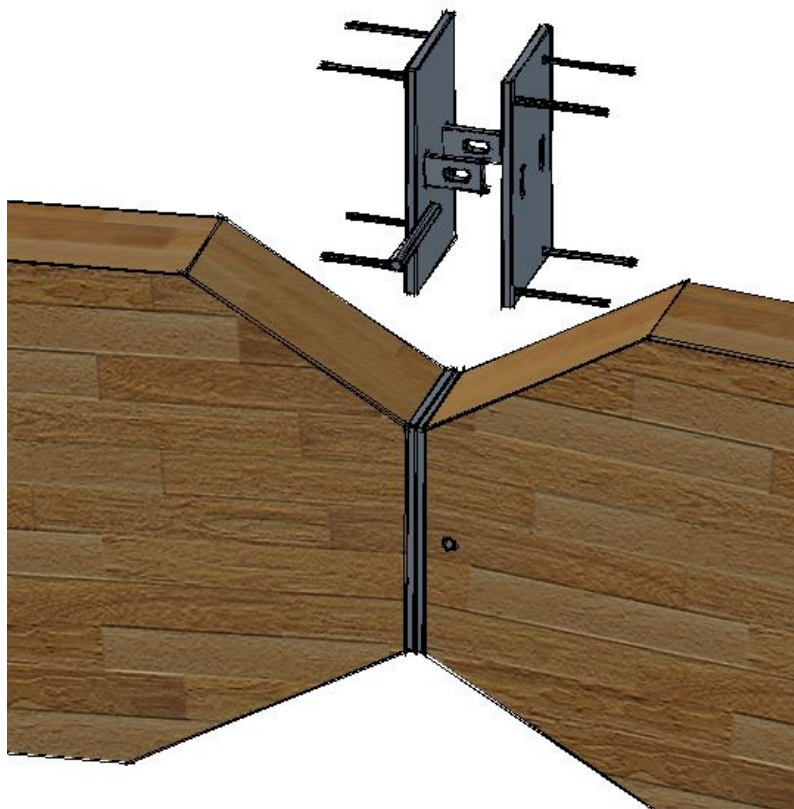
Cylindern i förband 3 har inte dimensionerats. Eftersom dimensioner och dimensionerande last i stort sett är de samma som i förband 1 bör kapaciteten vara tillräcklig. Kontaktytan mellan cylindern och slitsplåtarna är dessutom större än kontaktytan mellan cylindern och underdelen i förband 1. Det hade varit önskvärt att göra en FEM-analys av cylindern och slitsplåtarna omkring den. Det skulle ge bättre förståelse för hur lastfördelning blir i slitsplåtarna och dymlingarna.

6.4 FÖRBAND 4 – NOCK



Figur 6.27 Position av förband 4 och exempel på kraftspel

En idé på ett enkelt nockförband har tagits fram. Kontakten sker genom anliggning av två plåtar. Tvärkraft överförs via två hanar, som också låser ihop förbandet med hjälp av en sprint. Det har senare visat sig att Limträteknik AB redan har utformat liknande förband. Därför har inga noggrannare beräkningar och dimensioneringar gjorts. Figur 6.28 visar principen för förbandet.



Figur 6.28 Skiss av förband 4

6.5 NY KOSTNAD AV FÖRBAND

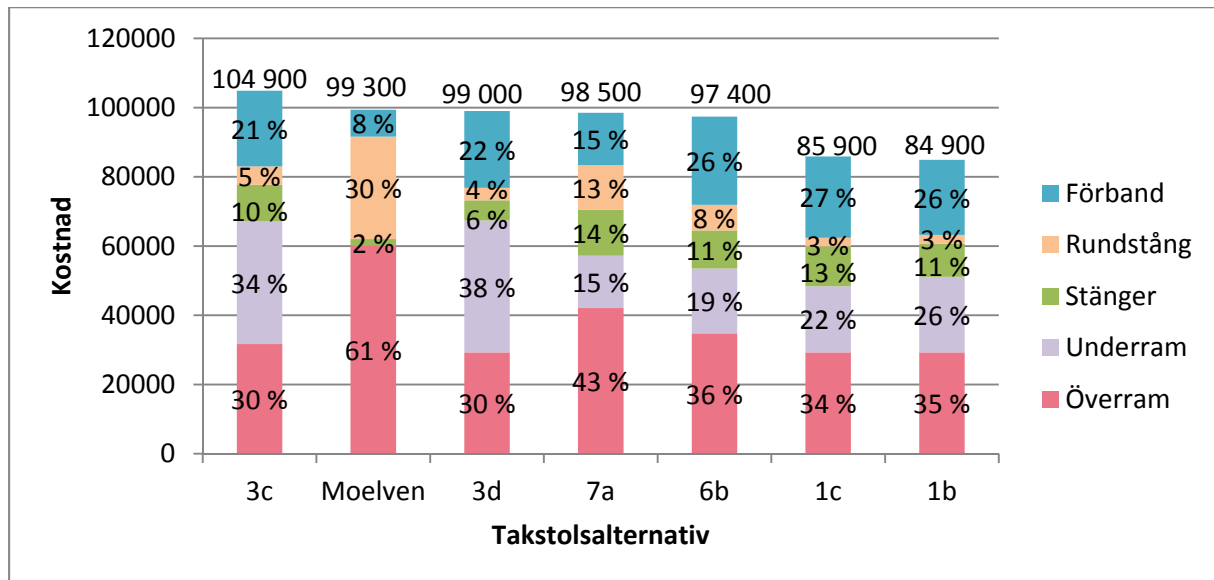
En ny konstnadsberäkning baserad på den dimensionering som gjord i kapitel 6 utförs. Kostnaden för de olika förbanden är helt baserad på mängden material som ingår i dem, se tabell 6.2.

Tabell 6.2 – Prisjämförelse av förband

	Preliminärt pris	Nytt pris
Förband 1	3500 kr	3170 kr
Förband 2	6500 kr	6160 kr
Förband 3	3300 kr	3860 kr

7. SLUTGILTIG KOSTNAD FÖR VALDA TAKSTOLAR

I figur 7.1 presenteras slutkostnaden för takstolarna och hur stor andel respektive konstruktionsdel utgör.



Figur 7.1 Slutkostnad och kostnadsandel för respektive konstruktionsdel

Takstolen som Moelven Töreboda utformat (se figur 2.1) är i figur 7.1 beräknad med samma kostnadsmodell som takstolarna har räknats med. Då blir kostnaden ca 100 000 kr. Kostnaden har då beräknats med pelar-takstolsförband och nockförband av samma slag som använts i övriga takstolar. Något dragförband eller rundstång-underramsförband är inte aktuellt i den takstolen vilket gör kostnadsandelen för förband betydligt mindre.

8. PELARE

Vid dimensionering av förband 1 måste hänsyn tas till pelardimensioner så att inte rundstängernas placering kolliderar med pelaren. En grov dimensionering av en pendelpelare i limträ har utförts. Pelaren är stagad i veka riktningen. Maximal pelarhöjd bland slutgiltiga alternativen är 10,5 m. Med laster enligt kapitel 5.3.1 och ett antagande att vindens formfaktor på vägg är 1,0 erhålls följande dimensionerande snittkrafter:

$$\text{Vind huvudlast:} \quad N_{Ed} = 432 \text{ kN} \quad M_{Ed} = 99 \text{ kNm}$$

$$\text{Snö huvudlast:} \quad N_{Ed} = 552 \text{ kN} \quad M_{Ed} = 30 \text{ kNm}$$

Enligt grovdimensionering är en limträpelare av samma material som takstolen, GL30c, och dimensionerna 215x495 tillräckligt. Pelaren har då 96 % utnyttjandegrad. Någon pelarlösning utförd i betong eller stål har inte utretts.

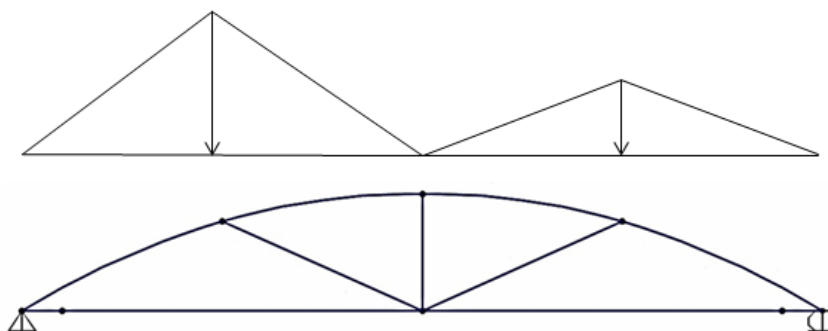
9. DISKUSSION

9.1 OM TAKSTOLARNA

Det har varit önskvärt att undersöka flera sorters grupper av takstolar. Om fokus istället hade legat på en viss typ av takstolsgrupp hade en noggrannare analys av denna kunnat genomföras. Till exempel hade större vikt kunnat läggas på att variera antalet stänger och dess placering samt konstruktionsdelarnas tvärsnittsdimensioner. I rapporten har en balans mellan antal grupper av takstolar och varianter inom varje grupp försökts uppnås.

Det enklaste resultatet att jämföra efter att takstolarna dimensionerats är deras kostnad. Kostnadsberäkningen är dock beroende av ett antal antaganden och förenklingar. Det bör understrykas att den takstol som är beräknad som billigast inte nödvändigtvis ger den lägsta totalkostnaden då endast material och produktionskostnad är det som tagits hänsyn till. Det är därför vanskligt att dra slutsaten om vilken av takstolarna som är ”bäst”. Som nämnts tidigare kan vissa takstolar vara mer eller mindre lämpliga, beroende på byggnadens ändamål och yttre faktorer. Det som kan jämföras efter de studier som utförts är hur bra de olika alternativen står sig mot varandra med avseende på materialåtgång och styvhet.

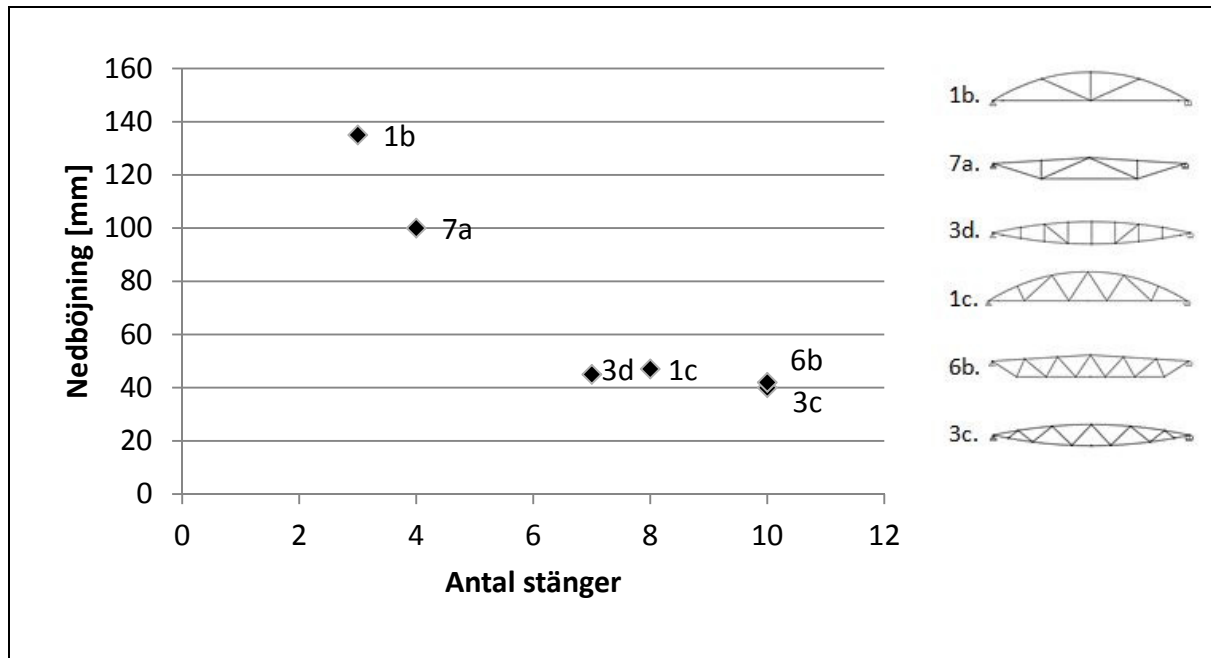
Resultaten i kapitel 5.6 tyder på att bågförmen är den mest materialeffektiva geometrin. Vid införandet av Eurokod ändrades den asymmetriska lasten på bågar från rektangulär lastfördelning till den triangulära som applicerats här. Parabelbågen är utformad för att vid jämnt utbredd last näst intill enbart generera axiell belastning. Triangulär lastfördelning avviker mer från en jämn fördelning än en rektangulär asymmetrisk fördelning gör. Takstol 1b och 1c har trots detta visat bäst materialutnyttjande. Att nämnda takstolar inte straffas hårdare av lastfördelningen beror troligtvis på stängernas funktion och placering. 1c har flera stänger vilka omfördelar lasten och 1b har en stång vid triangelfördelningens resultant (se figur 9.1) som kraftigt reducerar maxmomentet i överramen. Utan stänger drabbas bågen hårdare vilket kan ses vid en jämförelse av dimensionerande böjmoment i grupp 1.



Figur 9.1 Asymmetrisk lastfördelning för takstol 1b

Ytterligare en slutsats att dra är att styvheten korrelerar väl med antalet stänger i fackverket. Det billigaste alternativet, 1b, har minst antal stänger och alternativ 7a har näst minst antal stänger och de båda är betydligt mindre styva än de övriga, se figur 9.2. Alla takstolar

uppfyller emellertid nedböjningskravet $L/200$. Nedböjningen på underramen i takstolsalternativ 1b och 7a blir stor jämfört med övriga alternativ på grund av att den är inte har något stöd från stänger utefter sin längd. Nedböjningen kan minskas genom att fästa ett fåtal vajrar mellan över- och underramen.



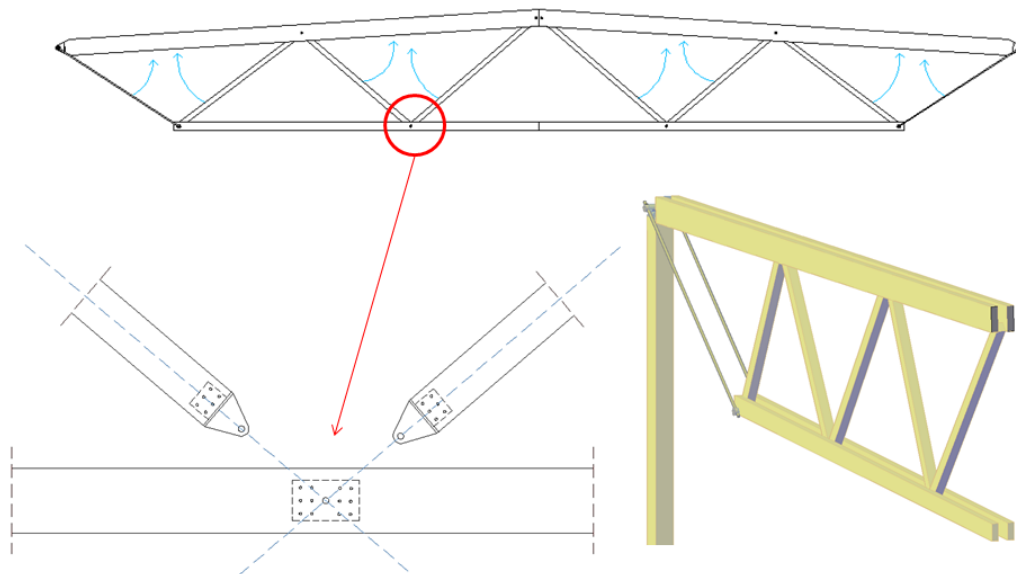
Figur 9.2 Nedböjning och antal stänger

I kapitel 2.1 beskrivs en takstol med liknande förutsättningar som i detta arbete. Det var ett spännverk i limträ. Produktions- och materialkostnaden för den var omkring 115 000 kr. Alla sex alternativ som gått genom urvalet är enligt kostnadsberäkningen billigare än så. För att utvärdera takstolarna i detta arbete hade en direkt jämförelse mellan dessa kostnader varit lockande. Det bör dock poängteras att kostnadsberäkningen i detta arbete är baserad på uppskattningar av produktions- och materialkostnad. I ett verkligt projekt skulle de specifika materialkostnaderna kunna öka, men också minska. Kostnad av åtgärder för att brandskydda enligt klass R30 har helt försumrats i detta arbete. Stålet i rundstängen och även förbanden behöver med stor sannolikhet sådana åtgärder. Det finns säkerligen ytterligare kostnadsfaktorer som försumrats i detta arbete. Med detta i åtanke kan priset på takstolarna jämföras. Vid den jämförelsen är det svårt att bortse se från den stora kostnadsskillnaden mellan takstolarna från detta arbete och det exempel Moelven Töreboda lämnat. Takstolarna utvecklade i detta arbete verkar ha potential att kunna effektivisera hallbyggandet. Därför hade en kostnadsberäkning av dessa takstolar utförd av Moelven varit väldigt intressant.

För att takstolarna ska kunna understiga transporthöjden 4,5 m, vilket innebär att inga särskilda tillstånd vid transport krävs, krävs att de inte har en högre totalhöjd än 3,7 m. I arbetet har främst takstolar med en total höjd på ungefär 5 m utformats. Vid en jämförande kostnadsberäkning visade det sig att en takstol med 3,7 m totalhöjd blir ungefär 25 % dyrare än en takstol med 5 m totalhöjd. Därmed ansågs det inte vara ekonomiskt försvarbart att producera takstolar av den lägre varianten. Istället verkar det mera rimligt att producera högre takstolar med smarta transportlösningar.

9.1.1 VIDAREUTVECKLING

Vid längre spänvidder kan det bli nödvändigt att öka höjden på fackverket. Med anledning av det kan det bli väldigt svårt att hålla sig under transporthöjden på 4,5 m. I figur 9.3 visas en utformning som tillåter höga fackverkhöjder med bibehållen transportvänlighet. Över- och underramen består här av två parallella balkar, vilka på längden kan delas i två eller tre delar. Stängerna är infästa med leder. De fästs i ena änden vid produktionen för att sedan kunna fällas in mellan de parallella över- eller underramarna inför transporten. På byggarbetsplatsen kan de sedan fällas ut igen och fästas i andra änden med en sprint, på liknande sätt som dragförbandet (förband 2) fästs in.



Figur 9.3 Vidareutveckling av takstol

9.2 OM FÖRBANDEN

Enligt Axelsson kan förbandskostnaden för dessa typer av fackverk uppgå till närmare 20 % av den totala produktions- och materialkostnaden. I figur 7.1 syns att den andelen överstigs i alla takstolar utredda i detta arbete, med undantag för 7a. Detta kan bero på ett antal faktorer. I de förband som utvecklats ligger stor vikt vid att skapa perfekta leder. De är inte nödvändigtvis de billigaste förbanden. Förbanden i kapitel 6 kan alltså vara dyrare än mera traditionella förbandstyper. Samma anledningar som påverkar totalkostnad enligt kapitel 9.1 påverkar då också förbandens kostnadsandel. Utöver dessa faktorer finns stångförbanden som kanske är den största osäkerheten. Kostnaden för dessa är grovt uppskattad och ingen hänsyn har tagits till eventuella merkostnader vid komplicerade knutpunkter där flera stänger möts, till exempel vid nockförbanden. Detta skulle dock öka förbandens kostnadsandel ytterligare. Att förbanden är en större andel av kostnaden i de takstolar som utformats är heller inte nödvändigtvis en felaktighet. För att reducera transportlängden har dragförband i underramen använts. Dragförbandet är dock ett dyrt förband, vilket blir tydligt om man ser till förbandskostnaden på takstol 7a. Att tillverka längre underramar utan dragförband och då

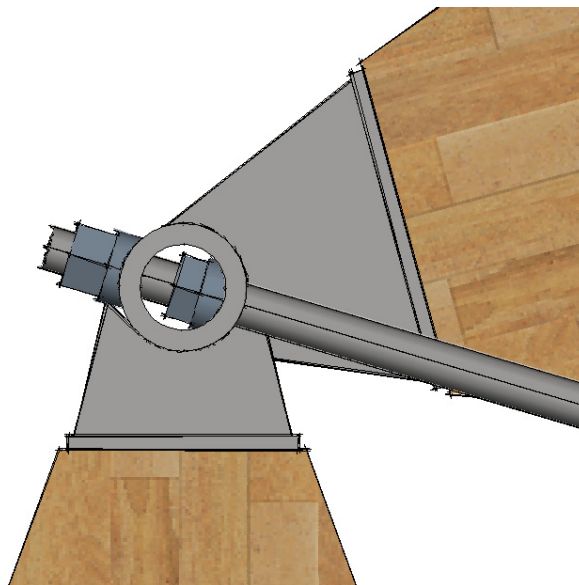
istället transportera dessa i ett stycke skulle kunna vara ett billigare alternativ sett till totalkostnad. Den lösningen har inte utretts närmare i detta arbete.

Vissa saker skulle kunna undersökas närmare i Abaqusanalyserna av förband 1. I analyserna har endast en håltagning i cylindern med 54 mm diameter, avsett för en rundstång med 50 mm diameter, modellerats. Eftersom rundstångsdiametern varierar beroende på takstol hade det varit intressant att undersöka om för stora plasticitetszoner hade uppstått i något av fallen. Muttrarna och mutterbrickornas lastfördelning kan också analyseras närmare.

9.2.1 VIDAREUTVECKLING

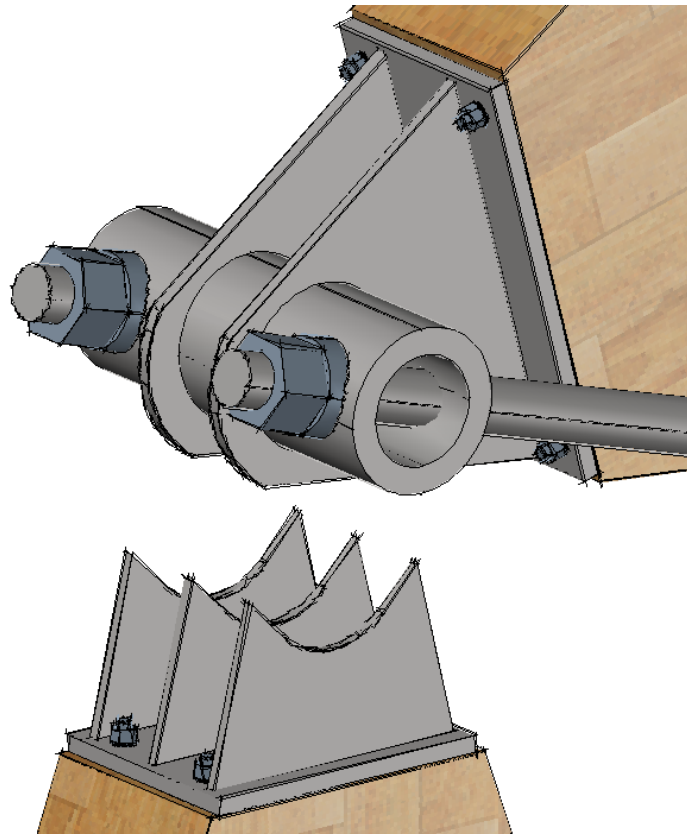
9.2.1.1 Förband 1

I kontaktytan mellan mutterbrickorna och cylindern uppstår höga spänningar. Ett sätt att minska dessa är att göra brickan större. Ett annat sätt skulle kunna vara att låta ytterligare en mutter överföra lasten. Den skulle i så fall kunna fästas på insidan av cylindern på samma sätt som i figur 9.4. Vi montage fästs först den inre muttern. Sedan dras muttern vid rundstång-underramsförbandet åt. Sist fästs muttern på utsidan av cylindern. I förband används vanligtvis parallellkopplingar. Eftersom den här lösningen leder till en seriekoppling kan det bli problematiskt att uppnå en jämn kraftfördelning. Lösningen behöver en mer praktisk utformning men den visar på en idé till vidareutveckling.



Figur 9.4 Anslutning med två muttrar

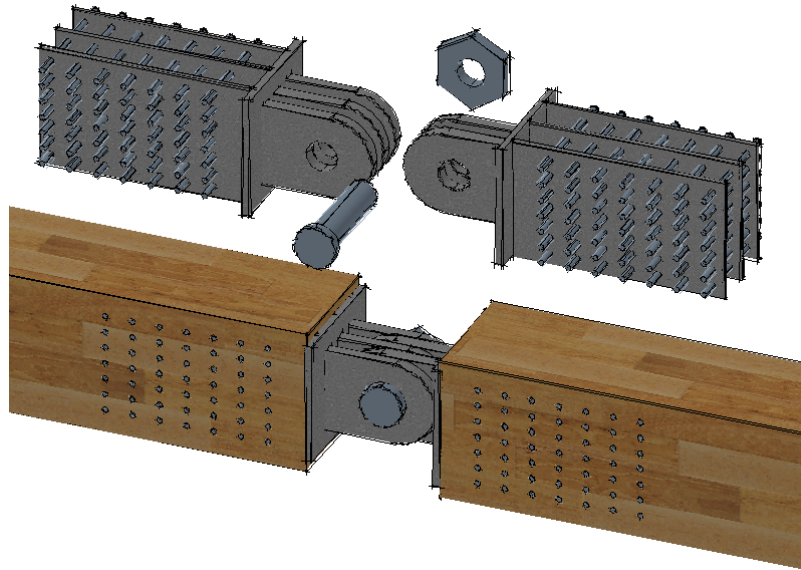
För att ytterligare öka flexibiliteten i förbandet kan överdelsplåtarna designas som i figur 9.5. På så sätt behöver inte cylindern svetsas fast, vilket leder till att den kan roteras fritt för att passa de vinklar som balk och stänger ansluter med hos de olika fackverkstyperna. Lösningen gör också att visst svetsningsarbete kan undvikas. Enda nackdelen är att det går åt något mer stål i ett sådant förband.



Figur 9.5 Alternativ utformning av överdel

9.2.1.2 Förband 2

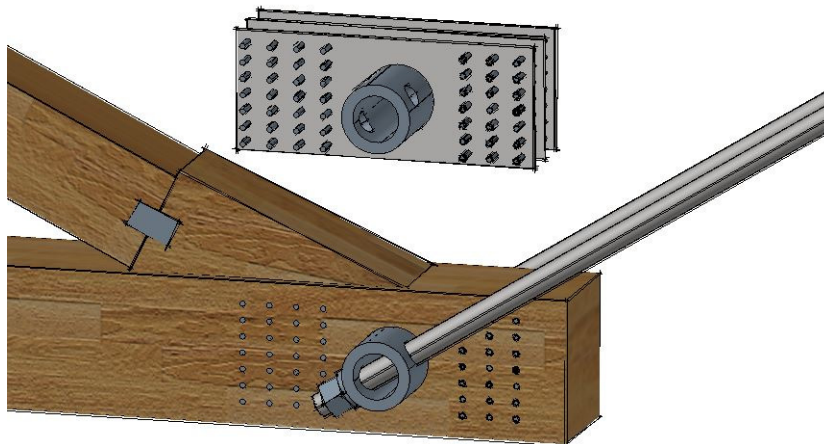
I förband 2 svetsas sprintplåtarna till en ändplåt. Dessa svetsar kan bli komplicerade att utföra då det endast är ca 20 mm mellan plåtarna. Det kan också ifrågasättas om det finns någon vinning i att använda separata plåtar för varje sprint då det bara är 12 mm mellan. Att slå ihop de båda plåtarna till en plåt med två sprinthål skulle eventuellt vara ett bättre alternativ. Ett annat alternativ på utformning som i vissa avseenden är bättre är att använda en horisontell sprint, se figur 9.6. Det skulle göra förbandet till en närmast perfekt led och vara lättare att montera. En grov dimensionering av detta sätt att utforma förbandet tyder på att sprintdiametern skulle bli 60 mm med 2+3 plåtar med tjockleken 30 mm. Med dessa dimensioner är kostnaden nästan oförändrad. Detta sätt att utforma förbandet rekommenderas.



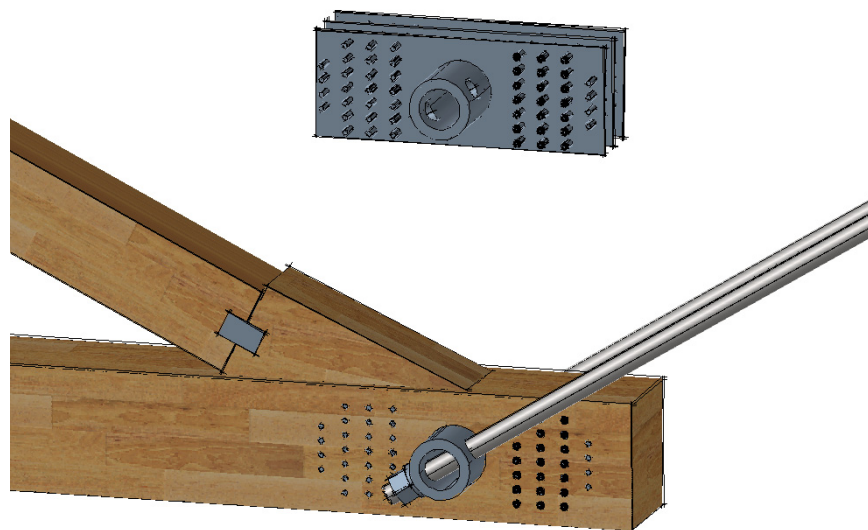
Figur 9.6 Dragförband med en horisontell sprint

9.2.1.3 Förband 3

En detalj som skulle kunna ändras med det här förbandet är att ändra antalet dymlingar och deras position - från 28 ena sidan och 21 på sidan närmast änden (figur 9.7), till 25 på båda sidorna (figur 9.8). På så sätt uppnås symmetri och därmed kan lastfördelningen mellan båda sidorna med större säkerhet bestämmas. Lösningen i figur 9.8 bedöms vara mera lämplig att använda.



Figur 9.7 Förband 3



Figur 9.8 Förband 3 med symmetrisk placering av dymlingar

9.3 FELKÄLLOR

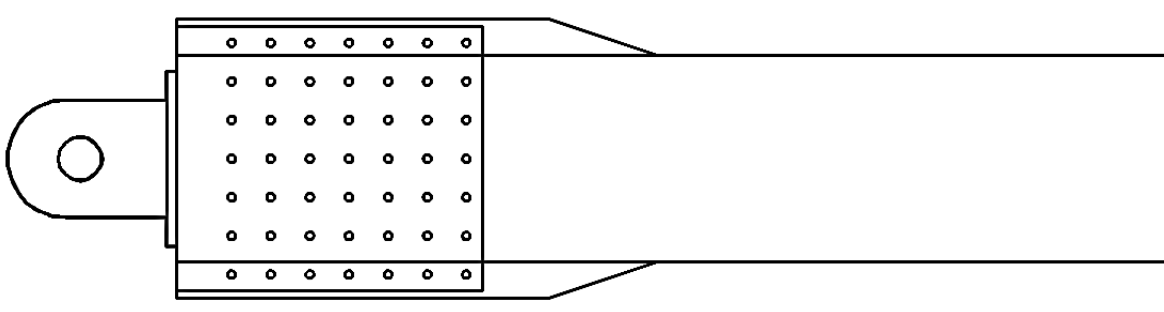
Vid dimensioneringen av rundstängerna antogs att tillgängliga diametrar var antingen 50 mm eller 60 mm. Det har sedan visat sig att det finns möjlighet att tillverka stänger av betydligt fler diametrar än så. Enligt Asp på Pre Cast Technology AB finns diametrar på 39, 42, 45, 48, 50, 52, 56 och 60 mm, vilka alla skulle kunna vara aktuella för de slutgiltiga takstolarna. I tabellen nedan redovisas hur mycket som hade kunnat sparas på varje takstol genom att minska på rundstångsdiametern till minsta möjliga för respektive stångkraft. Det är viktigt att tänka på att en förändring av stängernas dimension påverkar lastfördelningen i hela takstolen. Detta har inte beaktats vid kostnadsuppskattningen i tabell 9.1, varför den verkliga skillnaden på totalkostnaden troligen skiljer sig något från den i tabellen.

Tabell 9.1 - Kostnad vid olika dimensioner på rundstång

		1b	1c	3c	3d	6b	7a
Diameter	[mm]	50	50	60	60	50	50
Kostnad	[kr]	2466	2466	5327	3551	7398	12947
Möjlig diameter	[mm]	45	45	52	52	42	50
Kostnad	[kr]	1998	1998	4001	2667	5220	12947
Skillnad på totalkostnad	[kr]	469	469	1326	884	2178	0

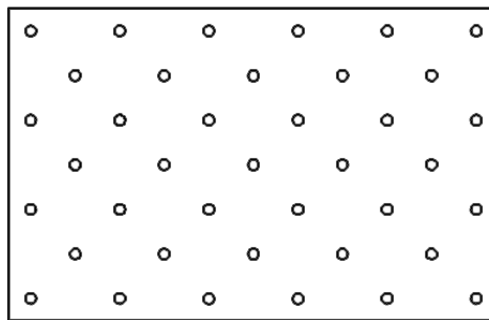
Rundstängerna har inte dimensionerats för något moment av egentyngden. Det spänningstillskott momentet ger på rundstängerna är i de flesta fall litet men då rundstängerna blir något längre, till exempel i alternativ 7a, bör det inte försummas. Detsamma gäller för de stänger som inte är vertikala. I de flesta fall är stängerna överdimensionerade för att matcha överramens bredd så detta inte blir något problem. I andra fall är inte stängerna överdimensionerade och då bör det kontrolleras att stängernas kapacitet är tillräcklig. Inget av ovanstående har dock gjorts i arbetet.

I ett sent skede kontrollerades dragförbandet (förband 2) för klossbrott enligt Eurokod 5, bilaga A. Kapaciteten visade sig bara vara 675 kN, alltså ungefär hälften av 1300 kN som förbandet är dimensionerat för. För att klara av lasten måste c/c-avståndet mellan dymlingarna ökas från 36 till 59 mm i höjddled. För att få plats med de slitsplåtar som då krävs ökas kan tvärsnittshöjden ökas genom att två knapar fästs som i figur 9.9. Höjden på knaparna i figuren är 55 mm och längden ungefär 650 mm. En liknande utformning av förband 3 är förmodligen också nödvändig.



Figur 9.9 Förband 2 med ökad kapacitet för klossbrott

För att reducera höjden något skulle dymlingarnas placering kunna ändras till ett mönster som visas i figur 9.10. På så vis kan tvärsnittshöjden minskas med en höjd motsvarande tre dymlingars diametrar, alltså 36 mm. Slitsplåten blir något längre vid en sådan placering av dymlingarna.

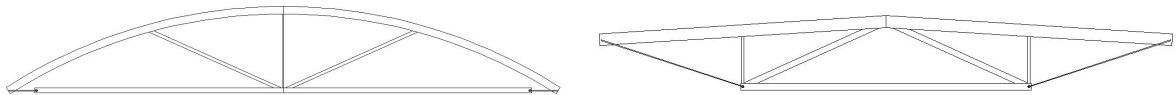


Figur 9.10 Alternativ placering av dymlingar

Tvärsnittsarean för träet minskar vid förband 2 och 3 på grund av slitsar samt hål för dymlingar och cylinder. Detta har inte tagits hänsyn till i rapporten. Eftersom momentet är i princip obefintligt vid de knutpunkterna kan ändå kapaciteten vara tillräcklig, åtminstone vid förband 2 där tvärsnittsreduktionen inte är lika stor som vid förband 3. Underramen har dimensionerats för dragkraften vilken i stort sett är konstant, kombinerat med det maximala momentet. Det ligger i regel mittemellan de båda förbanden. Vid förband 3 måste effekterna från håltagningen för cylindern kontrolleras extra noga. Snittet vid håltagningen bör på ett ungefär kunna överföra halva dragkraften i underramen, på grund av dymlingarnas placering (se figur 9.8).

10. SLUTSATSER

För att sammanfatta rapporten presenteras här de utformningar av takstolar och förband som anses vara mest intressanta. Takstol 1b är med, bland annat, på grund av att det är den takstol med lägst kostnad. Förutom det är takstol 1b och 7a (figur 10.1) de alternativen med minst antal ingående konstruktionsdelar. Det ses som positivt eftersom det kräver mindre hantering framförallt vid produktionen i fabrik. Med praktiska förband som är lättmonterade så har de också potential att bli väldigt enkla att montera på byggarbetsplats, om de inte går att transportera monterade. Förbanden i figur 10.2 bedöms som de intressantaste eftersom de är de mest anpassningsbara samtidigt som de fungerar som leder.

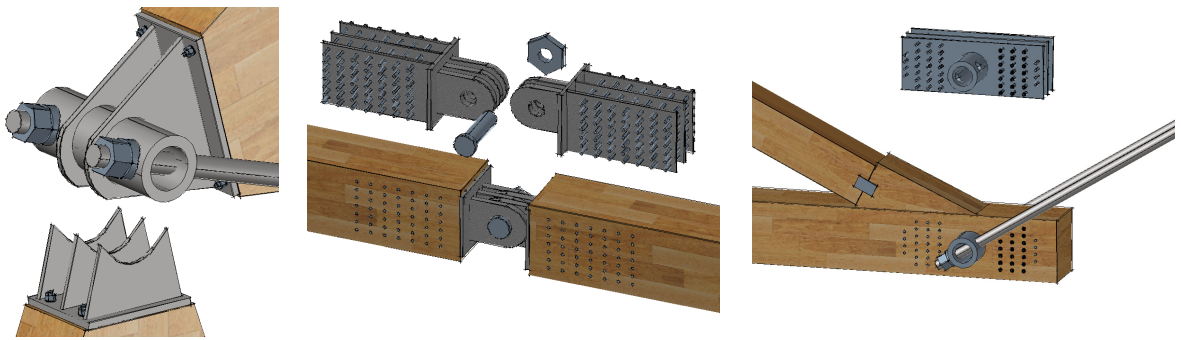


Figur 10.1

De mest intressanta takstolarna.

Till vänster: 1b

Till höger: 7a



Figur 10.2

Förbanden med störst potential

11. REFERENSER

Litteratur

Carling, Olle (2001). Limträhandbok. Stockholm: Svenskt limträ AB

Dassault Systèmes (2010). SIMULIA, ABAQUS Theory Manual Version 6.10

Engel, Heino (2009). Tragsysteme = Structure systems. 4. Aufl. Ostfildern: Hatje Cantz Verlag

Isaksson, Tord, Mårtensson, Annika & Thelandersson, Sven (2005). Byggkonstruktion. Lund: Studentlitteratur

Leuger, Otto (1904). Lexikon der gesamten Technik und ihrer Hilfswissenschaften. 2. uppl. (1904). Stuttgart och Leipzig: Bogon, W

Natterer, Julius, Herzog, Thomas & Volz, Michael (1991). Holzbau Atlas Zwei. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation

Normativa föreskrifter

Eurokod 0, SS-EN 1990

Eurokod 1, SS-EN 1991

Eurokod 3, SS-EN 1993

Eurokod 5, SS-EN 1995

EKS 8, BFS 2011:10

Websidor

Nords. 2013. Trävaror. <http://www.nords.se/sv/travaror/limtrabalk/> (Hämtad 2013-05-30).

Moelven. 2013. Varför limträ?
<http://www.moelven.com/se/Produkter-och-tjanster/Limtra/Varfor-limtra/>
(Hämtad 2013-05-27).

SFN. 2013. Handbok för skruvförband.
<http://handbok.sfnskruv.se/template.asp?lank=185> (Hämtad 2013-05-30).

BILAGA A - DIMENSIONERING FÖR DRAG, TRYCK OCH BÖJNING

Drag parallellt fiberriktningen: $\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,g,d}$

Dimensionerande dragkapacitet $N_{t,Rd} = f_{t,0,k}A$

Tryck parallellt fiberriktningen: $\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,g,d}$

Dimensionerande tryckkapacitet $N_{c,Rd} = f_{t,0,d}Ak_c$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \quad \text{för } \lambda_{rel} > 3$$

$$k = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2)$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}$$

$$\lambda = \frac{L_{cr}}{i}$$

För en balk stagad i veka riktningen gäller att:

$$i = \frac{h_{tvärsnitt}}{\sqrt{12}}$$

Eftersom diagonalerna är ostagade är det aktuellt att kontrollera dem i veka riktningen. Bredden är oftast mindre än höjden, varpå $b_{tvärsnitt}$ blir avgörande för knäckningsmotståndet istället för $h_{tvärsnitt}$.

Samtidig böjning och axiell dragning:

$$\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$$

Bara över- och underram kontrolleras. Eftersom de är stagade i veka riktningen kontrolleras de bara i styva riktningen.

Samtidig böjning och axiellt tryck:

$$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$$

Bara över- och underram kontrolleras. Eftersom de är stagade i veka riktningen kontrolleras de bara i styva riktningen.

BILAGA B – DIMENSIONERING FÖR TVÄRKRAFT OCH TVÄRDRAG

Tvärkraft:

$$V_{Rd} > V_{Ed}$$

$$V_{Rd} = \frac{A f_{v,k}}{1,5}$$

$$A = b_{ef} h$$

$$b_{ef} = k_{cr} b \quad k_{cr} = 0,67 \text{ för limträ}$$

Tvärdrag:

Tvärdrag, $\sigma_{t,90,d}$, kontrolleras för takstolarna med krökt överram.

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d}$$

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6M_d}{bh^2}$$

$$k_p = k_5 + k_6 \left(\frac{h}{r}\right) + k_7 \left(\frac{h}{r}\right)^2$$

$$k_5 = 0$$

$$k_6 = 0,25$$

$$k_7 = 0$$

$$k_{dis} = 1,4 \quad \text{för krökta balkar}$$

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} = \left(\frac{0,01}{bhL_{balk}}\right)^{0,2}$$

BILAGA C – TAKSTOL FRÅN MOELVEN TÖREBODA

(Skala stämmer ej)

