

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

Bärförmåga hos tvärbelastade inlimmade skruvar

Salar Fili

2015

Rapport TVBK-5245
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK-15/5245(132)

Examensarbete
Handledare: Eva Frühwald Hansson, LTH
Maj 2015

Förord

Detta examensarbete har utförts på civilingenjörsutbildningen inom Väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola.

Jag vill först och främst tacka min familj som alltid stöttat mig och varit där i både framgång och motgång. Tack pappa och mamma som lärde oss att aldrig ge upp, att misstag är till för att kunna resa sig ännu starkare. Jag vill även tacka alla vänner som har gjort denna framgångssaga otrolig och bidragit till att både studierna har gått bra och att de varit roliga att utföra. Tillsammans klarade vi det!

Jag vill även tacka lärarna på LTH och i synnerlighet Ebrahim Parhamifar och Eva Früwald Hansson som alltid haft tid för oss studenter! Eva som även varit min handledare under examensarbetet har väglett mig och tagit sin tid att diskutera problemen som uppstått på vägen.

Ytterligare ett stort tack till Erik Serrano på avdelningen för byggnadsmekanik som hjälpt till med modelleringen!

Nu ser jag fram emot en ny fas i livet – jobba tills att jag blir pensionär!

Lund, maj 2015

Salar Fili

Abstract

Glued-in Rods (GiR) is a relative new connection type that could be used for creating hidden joints in timber structures. These hidden joints are more esthetic appealing in contrast to ordinary joints with toothed plates, nails and bolts. With the use of GiR the connectors gets an automatic protection in case of fire while unprotected steel loses all of its strength in case of fire.

In this report an attempt to design the joint with regards to current Swedish standards and recommendations is made. Where standards and recommendations are not satisfied, a guide to reinforce the joint to obtain some guidelines is presented. The simulation and analysis are made in ABAQUS CAE.

The results are that current Swedish recommendations and standards is not sufficient to design a frame with high bending moments. With the aid of an arbitrary plate (i.e. carbon fiber, glass fiber and plywood) connected to the end of the beam, a design is possible.

Keywords: Glued-in Rods, Laterally loaded, GIROD, GiR, Reinforcement, Arbitrary reinforcement, timber structures

Sammanfattning

Inlimmade skruvar är en relativt ny förbandstyp som kan användas för att skapa anslutningar som förblir dolda för det blotta ögat. Dessa dolda anslutningar är mer estetiskt tilltalande i kontrast till ”vanliga” förband med spikplåt, skruvar och bultar. Förbindarna får även ett naturligt skydd av träet vilket minskar arbetet med att brandskydda spikplåtar, skruvar och bultar.

Syftet med examensarbetet är att undersöka tvärkraftskapaciteten hos tvärbelastade inlimmade skruvar då kunskapen varken är samlad eller tillräckligt god. I det ingår att undersöka ifall gällande rekommendationer är tillräckliga för en dimensionering. Om inte, ska förstärkning göras för att uppnå en möjlig dimensionering. Simulering och analysering av förbandet görs i ABAQUS CAE som är ett av de mest använda finita elementprogrammen.

Resultatet från denna rapport är att befintliga rekommendationer och normer inte var tillräckliga för dimensionering av ett ramhörn. Detta då det behovet av skruvar överskred det tillåtna antalet. Dock kunde dimensioneringen göras möjlig genom att förstärka förbandet med ett godtyckligt material (t.ex. kolfiber, glasfiber, plywood) på balkänden.

Nyckelord: Inlimmade skruvar, Tvärbelastad, GIROD, GiR, Förstärkning, Godtycklig förstärkning, Träkonstruktioner

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INTRODUKTION.....	3
1.1	BAKGRUND	3
1.2	SYFTE & MÅL	4
1.3	METOD.....	4
1.4	AVGRÄNSNING	4
2	LITTERATURSTUDIE - INLIMMADE SKRUVAR	6
2.1	MATERIALVAL	7
2.1.1	<i>Trä</i>	7
2.1.2	<i>Skruv</i>	8
2.1.3	<i>Lim</i>	9
2.2	ANVÄNDNINGSSOMRÅDEN	10
2.3	UTMATTNING, FUKT & BRAND	15
2.3.1	<i>Utmattning</i>	15
2.3.2	<i>Fukt</i>	15
2.3.3	<i>Brand</i>	17
2.4	UTFÖRANDE I DAGSLÄGET	18
2.4.1	<i>Kvalitetskontroll</i>	20
2.4.2	<i>Utförande i Sverige</i>	21
2.5	DIMENSIONERINGSMETODER.....	23
2.5.1	<i>Axiell belastning</i>	23
2.5.2	<i>Transversell belastning</i>	26
2.5.3	<i>Skruvar belastade i axiell och transversell riktning</i>	31
2.6	KANT- OCH SKRUVAVSTÅND	31
2.7	FÖRSTÄRKNING	34
2.7.1	<i>Fackverksanalogi – Strut and tie modell</i>	36
3	METOD.....	40
3.1	FALLSTUDIE	40
3.1.1	<i>Dimensionering av förbandet i ramhörnet</i>	44
3.2	PARAMETERSTUDIE	53
3.2.1	<i>Förståelse av förbandets egenskaper – Fas ett</i>	54
3.2.2	<i>Del 1 – Uppritning av förbandet</i>	58
3.3	FÖRSTÄRKNING	67
4	RESULTAT OCH DISKUSSION.....	69
4.1	FALLSTUDIE	69
4.1.1	<i>Resultat</i>	69
4.1.2	<i>Diskussion</i>	69
4.2	PARAMETERSTUDIE	70
4.2.1	<i>Resultat</i>	71
4.2.2	<i>Diskussion</i>	82
4.3	FÖRSTÄRKNING	83
4.3.1	<i>Resultat</i>	84
4.3.2	<i>Diskussion</i>	88
4.4	ALLMÄN DISKUSSION	88
4.5	FELKÄLLOR	90
5	SLUTSATSER OCH FORTSATTAS STUDIER.....	91
5.1	SLUTSATSER.....	91

5.2	FORTSATTAS STUDIER	91
6	LITTERATURFÖRTECKNING.....	92
	BILAGA I – RAMANALYS	I
	BILAGA II – DIMENSIONERING AV ELEMENTEN	XII
	BILAGA III – RÅDATA FRÅN ABAQUS.....	XVII

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Förband är viktiga element i träkonstruktioner och kan markant påverka den totala konstruktionskostnaden. Dimensionering av förband kan uppta upp till 70 % av projekteringstiden (Batchelar & McIntosh, 1998). I dagsläget finns det många olika förbandslösningar vilka nyttjas som en följd av användning, simplicitet i produktion och montering. Inlimmade skruvar är en relativt ny förbandstyp som har börjat användas i större utsträckning sedan dess introduktion i Europa för ungefär 20 år sedan. Vid bygget av Eastview Baptist Church, under 2013, i Auckland utnyttjade man denna teknik i form av Epoxilimmade skruvar (Fragiacomo & Batchelar, 2012).



Figur 1.1 - Eastview Baptist Church Auckland (Manufactured by McIntosh Timber Laminates (now Timberlab Solutions Ltd))

Fördelarna med inlimmade skruvar är många. Förbandstypen med dolda skruvar skapar ett enhetligt utseende med endast trädetaljer som uppskattas ur ett estetiskt perspektiv. Träet brandskyddas även skruvarna i de fall skruvarna utgörs av stål som vanligtvis brandmålas eller brandskyddas och därmed utgör ett extra arbetsmoment. Det räcker normalt med att öka bredden och höjden på en limträbalk med 80mm för att motstå 60 min brand under full last (Isaksson, Mårtensson, & Thelandersson, Byggkonstruktion, 2010). Det kan jämföras med en stålbalk utan brandskydd som förlorar bärförmågan inom några få minuter (Promat, 2006). Utöver detta kan inlimmade skruvar användas för att förstärka exempelvis balkar, detta är framförallt aktuellt i historiska byggnader, samt förstävning om användningen i byggnaden ändras.

En stor anledning till att förbandstypen endast används i mindre skala är pga. att det saknas dimensioneringsformler som är allmänt accepterade i branschen. Vidare anses kunskapen för tvärkraftskapaciteten hos förbandet vara begränsat, vilket lett till att användningen där stora tvärkrafter finns varit förhållandevis liten.

Det som fascinerat mig mest i ämnet är möjligheten att kombinera estetiska och dimensionerande krav. Detta möjliggör ett samarbete mellan civilingenjörer och arkitekter redan i början av projekteringen.

1.2 Syfte & mål

Syftet med examensarbete är att samla kunskapen som finns om inlimmade skruvar. En större vikt ska fästas vid kunskap kring tvärkraftskapacitet och förstärkning.

Dessutom ska ett par viktiga områden beröras för att erbjuda en bredd i ämnet. Dessa områden är:

- Vilka material används vid utföring?
- Vilka potentiella användningsområden finns det?
- Hur utförs förbanden i dagsläget?
- Hur tänker man med avseende på fukt och brand?

Därefter skall kärnan av examensarbetet tas upp och följande frågor besvaras:

- Hur lyder gällande normer och rekommendationer?
- Är gällande kantavstånd rimliga?
- Är dimensionering möjlig? – dimensionering av en fallstudie
- Vilka parametrar är mest avgörande för spänningsfördelningen?
- Hur kan förbandet förstärkas, för att ta upp större tvärkrafter?
- Leder förstärkningen till att sprickor minimeras vilket öppnar upp för linjär-elastisk modellering?

1.3 Metod

Rapporten inleds med en litteraturstudie där befintlig forskning kartläggs och presenteras i ett samlat format. Vidare ska ett urval av möjliga lösningar modelleras i finita element programmet ABAQUS. Resultatet från modelleringen ska sedan jämföras med befintliga formler och typgodkännande för att undersöka ifall bärförmågan underskattas med gällande normer, då det fortfarande finns en del osäkerheter kring denna typ av anslutningar.

Om inget annat anges används Byggkonstruktion: Regel- och formelsamling, skriven av Isaksson och Mårtensson 2010 som underlag för formler.

1.4 Avgränsning

Då inlimmade skruvar kan produceras med ett stort antal kombinationer av materialval kommer rapporten begränsas till att endast undersöka de mest frekventa materialen som används i dagsläget. Andra materialval kommer kortfattat att nämnas. De valda materialen som behandlas i denna rapport är:

- Epoxi som limtyp
- Gängade skruvar av stål som skruvtyp

Vidare behandlas fukt- och brandrelaterade stycket endast kortfattat.

1. Introduktion

För fallstudien gäller: Kontroll av moment i fältmaximum skulle kunna göras för att kontrollera om takbalken går till brott i det snittet. Då denna rapport fokuserar på inlimmade skruvar görs inte kontrollen av fältmaximum.

Kontroll av vippningsbenägenheten hos elementen görs ej. Detta då takbalkarna och pelarna antas vara stagade med exempelvis takåsar. I denna rapport dimensioneras inte heller takåsarna och därmed är ”elementen stagade mot vippning” fullt realistiskt.

Beräkningarna kommer att fokusera på minimal inlimningsdjup vilket innebär lägsta möjliga bärförmåga i förbandet. Större inlimningsdjup redovisas endast kortfattat i berörda områden.

Ett sätt för att modellera förbanden verklighetsenligt är enligt brottmekanik. Detta angreppssätt kommer inte att användas i detta examensarbete. Istället går man runt problemet genom att förstärka förbandet och på så sätt kunna anta att linjär-elastiska förhållanden gäller. Denna approach leder till att de verkliga brottlasterna inte kan tas fram.

Inverkan av gruppeffekt vid skruvar kortare än rekommenderade skruvavstånd tas ej upp i denna rapport. Detta gäller framförallt för fallet då $n=13$ som motsvarar ungefär 3,5d i avstånd skruv till skruv som är under det rekommenderade avståndet på 5d.

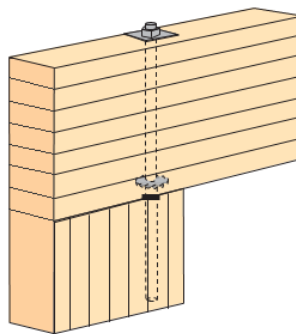
Tryckkrafter i förbandet kan beräknas med anliggning och om inte det räcker kan man kombinera anliggning med skruvar. I denna rapport berörs inte anliggning.

Laborationsförsök var inte möjliga p.g.a. en större renovering av LTH:s laborationslokaler.

2 Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

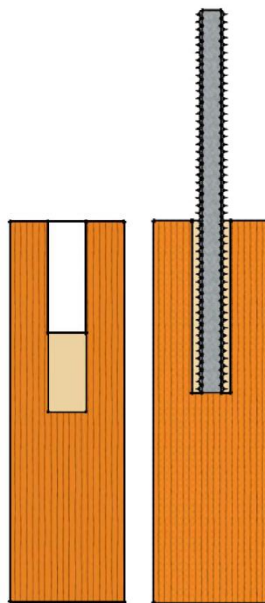
Limmade anslutningar har under flera årtionden använts i byggnadsstrukturer. Under denna tid har många olika limmade anslutningar uppkommit. Fingerskarvar och skäftfogar (olika varianter såsom ”scarf joints” & ”lap joints”) är flera av dessa exempel (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010). Bland de nyare anslutningar ingår inlimmade skruvar, som i Europa och Nya Zeeland har använts i en allt större omfattning sedan 1990 (Fragiacomo & Batchelar, 2012).

Förbandsnamnet – inlimmade skruvar - är självförklarande. Namnet tyder på att skruvar är inlimmade på olika vis i ett bärande balk- eller pelarsystem. Figur 2.1. nedan visar en möjlig konfiguration av förbandstypen.



Figur 2.1 – Anslutning mellan balk och pelare med inlimmad skruv. Källa: Svenskt Träs Limträhandbok 2001.

Vid utförande behöver man först borra ett hål i träelementen med en aning större diameter än skruvens diameter. Därefter fylls hålet med lim till den grad att limmet kommer att täcka hela borrhålets yta när skruven placeras i hålet, se figur 2.2.



Figur 2.2 – Principskiss för inlimmade skruvar. Efter (Steiger et al, Unpublished)

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Fördelen med inlimmade skruvar är många. Nedan kommer fördelar och nackdelar att listas efter uppgifter från Fragiacomio & Batchelar, 2012, Steiger et al, Unpublished & Frühwald Hansson & Crocetti, F9 Stål- och träbyggnad, 2014.

Tabell 2.1- Fördelar och nackdelar med inlimmade skruvar.

Fördelar	Nackdelar
Döljer metallen och skapar en estetiskt tilltalande anslutningstyp	Svårt att kontrollera och säkerställa rätt utförandet
Hög lokal kraftöverföring	Sprött brott
Tillförlitlig bärförmåga under normala förutsättningar	Bör/får ej limmas in-situ
Hög styvhet	Känslig för krympning & svällning av träet
Plastisk kapacitet	Känslig för inkompetent tillverkning
Skyddar stål mot korrosion	
Rimlig kostnad	
Relativt enkelt att producera och montera in-situ	

Ett aktuellt exempel där inlimmade skruvar användes vid dimensionering är Eastview Baptist Church i Auckland, Australien. Kyrkan byggdes 2013 och innehåller få synliga anslutningar, som syns i figur 1.1.

2.1 Materialval

Inlimmade skruvar är en hybridanslutning där egenskaper från minst tre material (om man bortser från att skruvarna kan göras i trä, vilket endast utgör bråkdel av användningen) måste kombineras (Steiger et al, Unpublished). Dessa material är trä som används för bärande elementen, stål som används för kraftöverföring mellan två eller fler element och lim som möjliggör kraftöverföringen och sammanbindning mellan stålet och träet.

2.1.1 Trä

Trä är en världens äldsta byggnadsmaterial. Trä kännetecknas av dess enkelhet att: transportera, bearbeta med enkla verktyg samt dess mångsidighet. Dessutom har trä en hög hållfasthet, låg egenvikt och god isoleringsförmåga. Nackdelarna; fuktkänslighet, risk för röta och mögelangrepp samt att trä är ett brännbart material (Isaksson, Mårtensson, & Thelandersson, Byggkonstruktion, 2010) kräver att användaren begriper begränsningarna med materialet. I Sverige är trä ett mycket vanligt konstruktionsmaterial dels pga. utbudet och dels pga. att det isolerar relativt bra.

Vidare är trä ett anisotrop material med olika hållfastheter i olika riktningar. Generellt är drag vinkelrätt fiberriktningen träets svagaste hållfasthet i jämförelse med att tryck parallellt fiberriktningen är den starkaste.

Trots att trä är ett brännbart material finns ett naturligt skydd då trä förkolnar och bildar ett isolerande lager. Till skillnad från stål som förlorar hållfastheten vid uppvärmning har trä kvar sin bärförmåga för det tvärsnitt som ej hunnit förkolna.

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Inlimmade skruvar används i huvudsakligen för större anslutningar som kräver hög bärcapacitet. Med den anledningen används limträ för de flesta fallen, då det är svårt att tillverka konstruktionsvirke i erforderlig storlek. I vissa fall har även LVL (Laminated Vaneer Lumber) använts i testsyfte (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010). LVL liknar plywood i och med att det är uppbyggt av tunna fanerskikt. Till skillnad från plywood är LVL orienterade i endast en, önskad, riktning. Detta leder till att drag- och tryckhållfastheten blir hög i aktuell riktning (TräGuiden, 2014). Av den anledningen lämpar sig LVL utmärkt i kombination med inlimmade skruvar. Däremot gäller nuvarande typgodkännande för inlimmade skruvar endast för limträanvändning.

2.1.2 Skruv

Valet av skruv för anslutningen inlimmade skruvar är en viktig del då skruvar tillsammans med limmet överför krafterna mellan de kopplade elementen. Under de senaste årtionden har forskare utfört många undersökningar gällande olika skruvmaterial och skruvtyper. Exempelvis har man undersökt gängade skruvar, armeringsstänger, dymlingar i ädelträ, olika kompositmaterial (såsom skruvar i kolfiber och glasfiber), släta dymlingar samt varierat diametrar och längder på skruvarna (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010).

Gängade skruvar i metall anses vara väl lämpade (Riberholt, 1988) för ändamålet att överföra krafter mellan träelementen.

Vad det gäller dymlingar i ädelträ har det huvudsakligen använts i Japan. Fördelen med att använda trä som koppling mellan olika element är att det resulterar i en mindre skillnad i elasticitetsmodul (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010) samt att anslutningen krymper och sväller ungefär lika vid fuktrörelser.

Bortser man från ädelträ och kompositmaterial, som endast utgör en bråkdel av användningen, kan man observera att stål utgör majoriteten av skruvanvändningen i inlimmade skruvar. Detta pga. att stål möjliggör ett segt brott (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010). Segt brott är att föredra i anslutningar då man får indikationer att något håller på att gå sönder till skillnad från spröda brott som utan förvarning brister och kan orsaka stor skada.

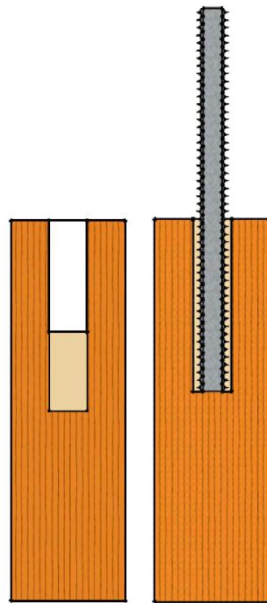
Vidare används huvudsakligen gängade skruvar då dessa lämpar sig väl i trä-trä anslutningar då kontaktytan för limmet ökar jämfört med ogängade skruvar. Gängade skruvar är att föredra även i trä-stål anslutningar då de möjliggör enkel montering med exempelvis muttrar (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010).

Åtgärder bör tas för att rostskydda skruvar som riskerar korrosionsskador. Görs inte detta innebär det att rosten måste överföra krafterna och att förbandet förstörs av den expanderande rosten (Riberholt, 1988). Exempelvis kan förzinkade skruvar användas, även om kvaliteten på förzinkningen är låg. Rostskyddet kan även uppnås genom att vissa limtyper har rostskyddande egenskaper. Limmets eventuella rostskyddande egenskaper är dock inte förlitliga, särskilt inte för gängade skruvar (Riberholt, 1988).

Det är även viktigt att skära gängningen i längdled för att undvika bildningen av hydrostatiskt tryck, vilket kan resultera i att splittra träet (Riberholt, 1988).

2.1.3 Lim

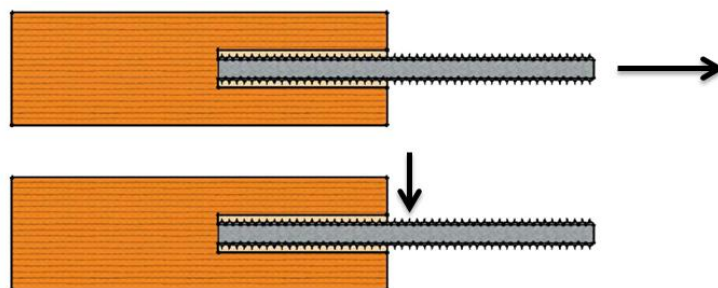
En stor variation av limtyper har undersökts som lämpliga limtyper i förbandstypen inlimmade skruvar. De vanligaste limtyperna i dessa sammanhang är: epoxi (EPX), fenol-resorcinol (PRF) och polyuretan (PUR). GIROD projektet använde de tidigare nämnda limtyperna för tester och jämförelser och kom fram till att PRF följt av PUR och EPX hade högst utdragningskapacitet (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010). Det är viktigt att nämna att hög utdragningskapacitet inte är enda parametern som måste tas till hänsyn vid val av limtyp. I många fall är vidhäftningen mellan lim och elementen som ska sammankopplas, håldiametern och limmets viskositet avgörande. Det är t.ex. viktigt att limmet fyller hålrummet på ett bra sätt vid överdimensionerade hål, se figur 2.3.



Figur 2.3 – Limmets hålfyllande egenskap

Av ovan nämnda parametrar resulterade det i att epoxi (EPX) generellt presterade bäst. Detta då EPX skapar en stark vidhäftning mellan stål och trä, vilket resulterar i att träet blir den svagaste länken (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010). Det kan vara av fördel att undvika svaga länken hos träet och därmed undvika ett sprött brott.

För fallet då skruvarna utsätts för en axiell last är limmet den avgörande faktorn för anslutningens kapacitet. Då förbandet istället utsätts för en tvärkraft är limmets betydelse mindre, istället är kapaciteten mer beroende av träets egenskaper, se figur 2.4.



Figur 2.4 - Limmets roll vid axiell- och transversell last

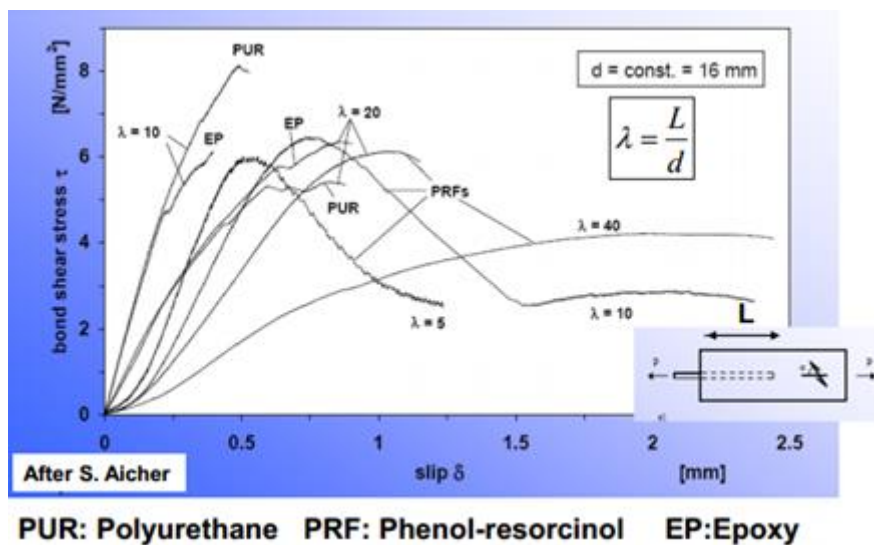
2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Tabell 2.2. visar skjuvmoduler för vanligt förekommande limtyper beroende av limtjocklek. Man kan observera att skjuvmodulen minskar med ökad limtjocklek.

Tabell 2.2 - Styvheten hos vanliga limtyper är beroende på limtjockleken (Frühwald Hansson & Crocetti, F9 Stål- och träbyggnadsteknik, 2014)

Tjocklek [mm]	Skjuvmodul [MPa]
0,1	1300 - 1800
0,4	700 - 850
0,8	600

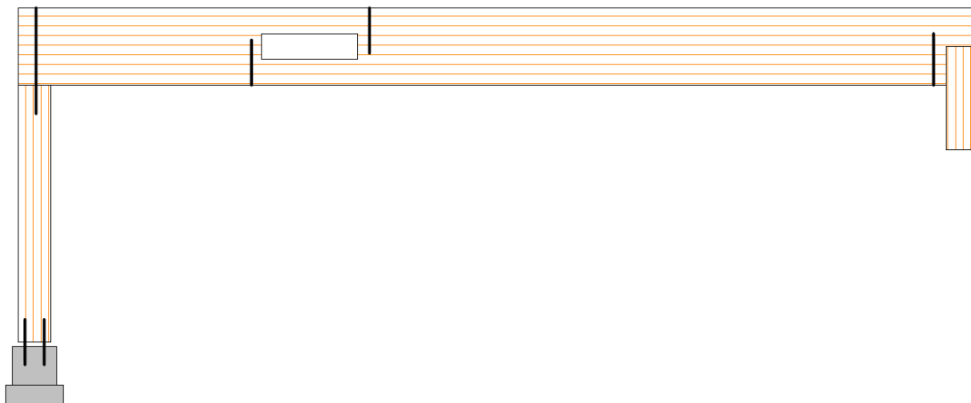
Figur 2.5 visar limfogens skjuvkapacitet för olika limtyper och slankheter på skruvarna. Både EPX och PUR sticker ut med hög kapacitet.



Figur 2.5 – Inverkan av skruvens slankhet och limtyp (Aicher, S.)

2.2 Användningsområden

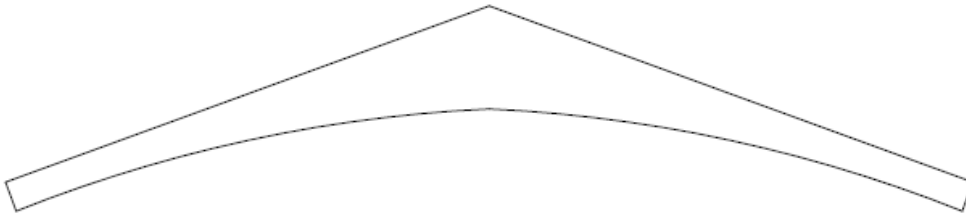
Fördelen med inlimmade skruvar är att anslutningstypen har många användningsområden. Figur 2.6 visar att inlimmade skruvar kan användas vid pelarfot, anslutning mellan balkar och pelare, förstärkning vid håltagning samt förstärkning vid urhakningar.



Figur 2.6 – Möjliga användningsområden. Efter Johansson, 2012.

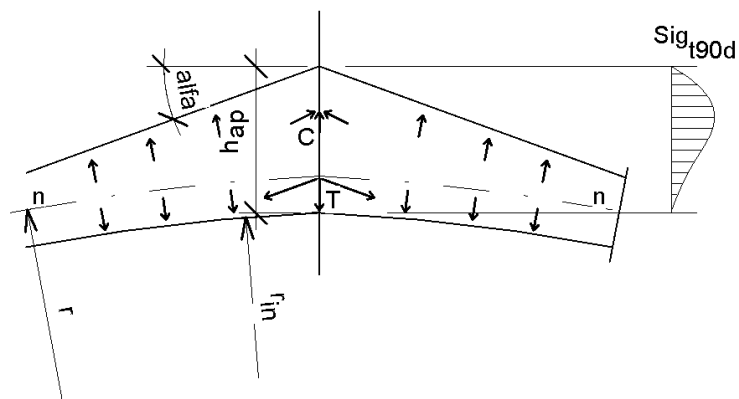
2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Inlimmade skruvar kan även användas vid förstärkning av konstruktörernas problembarn – bumerangbalken, se figur 2.7.



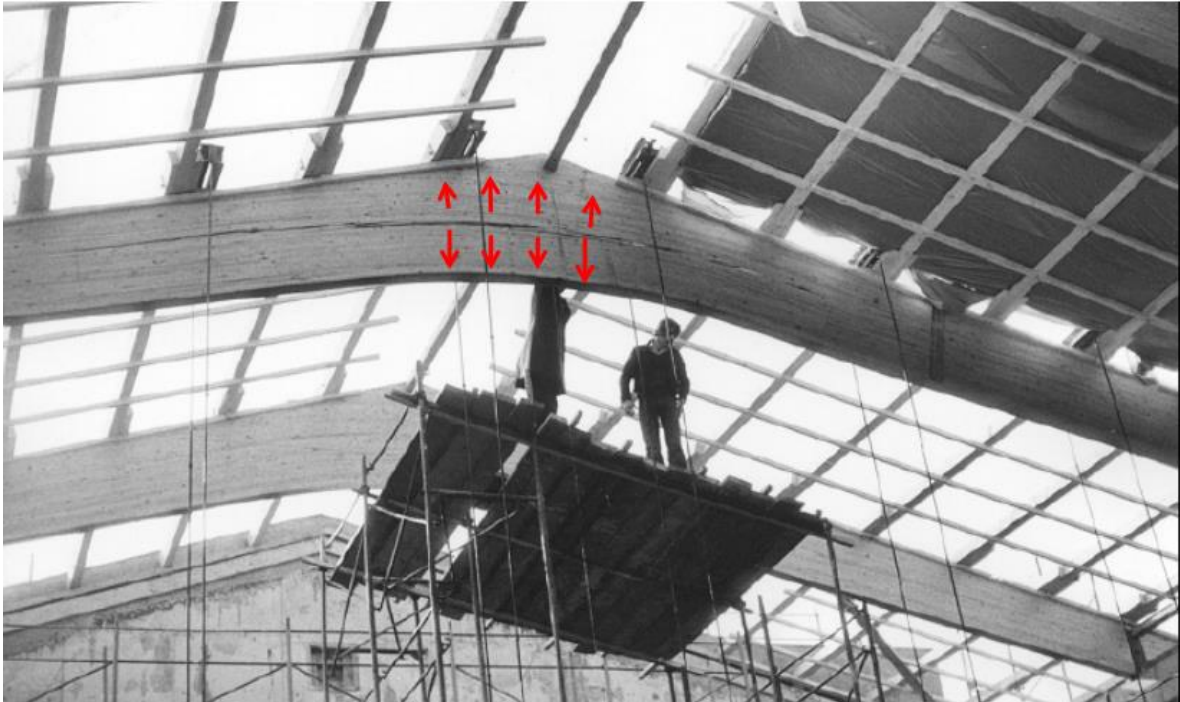
Figur 2.7 – Bumerangbalk

Problemet med bumerangbalken är att tryck- & dragspänningar som uppstår vid pålastning har en spjälkande effekt, se figur 2.8 - 2.11.



Figur 2.8 – Tryck- & dragresultanter ger upphov till krafter vinkelrätt fiberriktningen hos bumerangbalken.

Är magnituden av tryck- & dragkraftresultaten tillräckligt stor kommer bumerangbalken att spjälkas vid neutralla lagret. Detta p.g.a. att dragning vinkelrät fiberriktningen, f_{t90k} , hos limträ är i storleksordningen 40-45 gånger lägre än dragning parallellt fiberriktningen, f_{tk} .



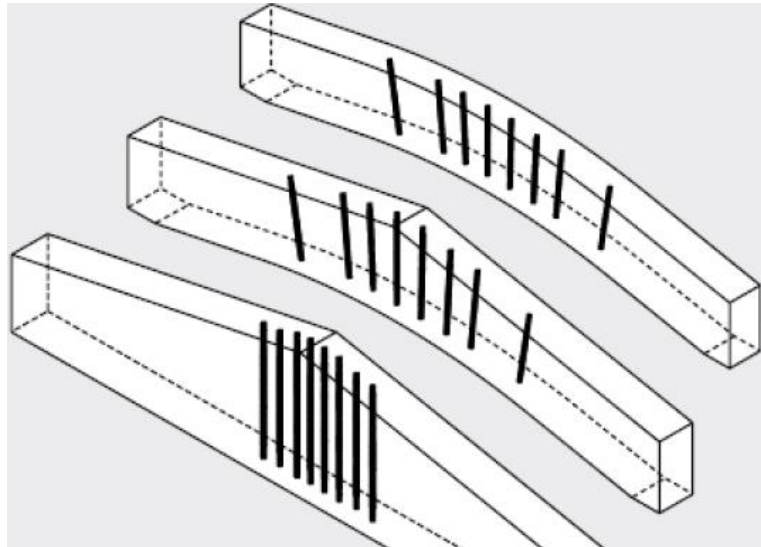
Figur 2.9 – Spjälkning av bumerangbalken (Aicher, S.)



Figur 2.10 – Brott av bumerangbalk (Aicher, S.)

Problemen med bumerangbalken behöver inte innebära ett förbud, utan att fördelar och nackdelar vid användning ska kännas till och kunna övervinnas. Ett exempel skulle vara användning av inlimmade skruvar (självborrande skruvar och plywoodskivor är också ett sätt men beaktas ej i denna rapport) för att förstärka balken, se figur 2.11.

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar



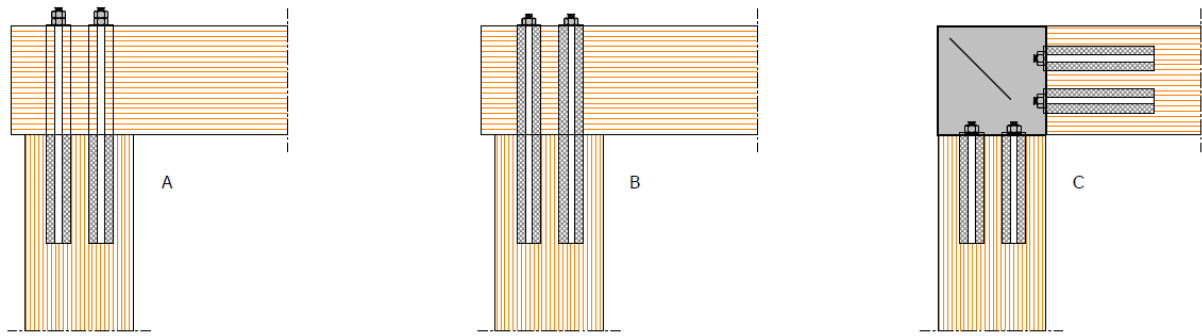
Figur 2.11 – Förstärkning av en bumerangbalk, mittersta balken. Källa: Design of timber structures – Swedish Wood 2011.

Ett annat viktigt användningsområde för inlimmade skruvar, bortsett från nybyggnation, är reparation och förstärkning av befintliga element. Detta alternativ används både för kulturhistoriska byggnader och vid ändrad användning av befintlig byggnad (Johansson, 2012), se figur 2.12.



Figur 2.12 – Reparation av befintliga element (Johansson, 2012)

Förenklat kan man skilja mellan tre olika konfigurationer på förbandet, se figur 2.13.



Figur 2.13 - Användningsområden. Efter Fragiaco & Batchelar, 2012.

Konfiguration A avser då skruvarna som är inlimmade i ett element och fästa med t.ex. muttrar i det andra elementet. Konfiguration B avser då skruvarna är inlimmade i båda elementen. Konfiguration C avser då skruvarna är inlimmade men utnyttjar en stålhubb för koppling mellan elementen. Utförandeprocessen för de olika konfigurationerna listas nedan:

Konfiguration A

- 1 Borrning och inlimning av skruvar i ena elementet på fabrik
- 2 Borrning av ovan del
- 3 Transport
- 4 Övre och undre element fästes med hjälp av brickor och muttrar
- 5 Muttrarna dras åt med dimensionerat vridmoment

Konfiguration B

- 1 Borrning och inlimning av skruvar i ena elementet på fabrik
- 2 Borrning och inlimning av skruvarna i det andra elementet på fabrik (in-situ limning rekommenderas ej då det inte går att besiktas okulärt)
- 3 Montering av de två elementen på fabrik
- 4 Transportering och uppresning

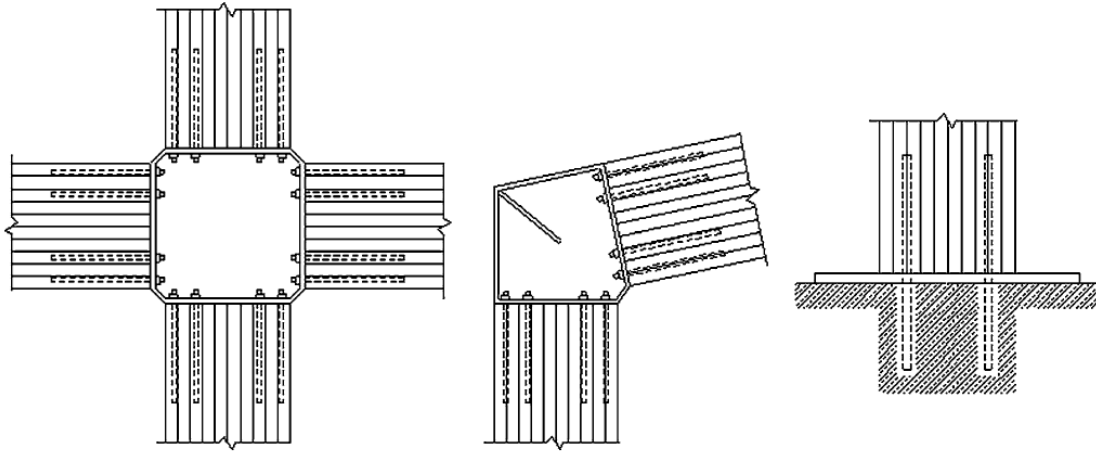
Konfiguration C

- 1 Måste uppfylla krav på kantavstånd (kan endast användas för större balkar och pelare)
- 2 Borrning och inlimning av skruvarna i samtliga träelement på fabrik
- 3 Transport
- 4 Stålhubben fästes mellan elementen med brickor och muttrar
- 5 Muttrarna dras åt med dimensionerat vridmoment
- 6 Stålhubben brandskyddas

Dessa tre konfigurationer kan i sin tur modifieras och användas i många olika fall.

Exempelvis skulle man kunna använda B på en pelarfot genom att limma skruvarna i träet på fabrik, där skruvarna sedan gjuts in i grunden. Vid skarvning av balkar skulle t.ex. C kunna användas om man vill utföra anslutningen på plats. Annars skulle även konfiguration B gå att utföra på fabrik.

Figur 2.14 visar hur man kan koppla ihop pelare i flera våningar med bjälklag (vänstra bilden), pelare med takbalkar i exempelvis industrierhallar (mitten bilden) och pelare med grund (högra bilden).



Figur 2.14 – Olika kopplingar (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010)

2.3 Utmattning, fukt & brand

Då trä är ett organiskt material bör användaren känna till begränsningarna och hur man trots detta kan utnyttja materialet.

2.3.1 Utmattning

Inlimmade skruvar antas komma ha en framtida roll i träbroar där det är inte går att bortse från utmattning (Bengtsson & Johansson, 2001) från trafiklasterna. Bengtsson & Johansson (2001) testade detta genom att utsätta inlimmade skruvar för en cyklisk lågfrekvent last på ca 1 Hz. Man fann fyra tydliga brottmoder, nämligen:

- Skruvbrott
- Brott i limfogen i kontaktytan
- Träbrott och
- Brott mellan trä och lim

Bengtsson & Johansson (2001) drog, utifrån testresultaten, slutsatsen att utmattning har en möjlighet att skada inlimmade skruvar. Det fanns vidare stor variation i brotten och man kunde därmed inte bekräfta om brotten berodde på materialen (träet, limmet eller skruvarna) eller vidhäftningen mellan trä-lim. Inlimmade skruvar med hänsyn till utmattning kräver mer undersökning för att fullt förstå vilka begränsningar som finns på anslutningstypen.

2.3.2 Fukt

Fördelarna med träanvändning är många. Förutom att det i Sverige är ett billigt konstruktionsmaterial har trä en hög hållfasthet relativt den låga egenvikten. Däremot är trä även ett fuktkänsligt material med risk för att drabbas av mögel-, röt- och insektsangrepp (Isaksson, Mårtensson, & Thelandersson, Byggkonstruktion, 2010). Trä innehåller alltid en del vatten vilket mäts med hjälp av fuktkvoten. Fuktkvoten ställer sig i jämvikt med

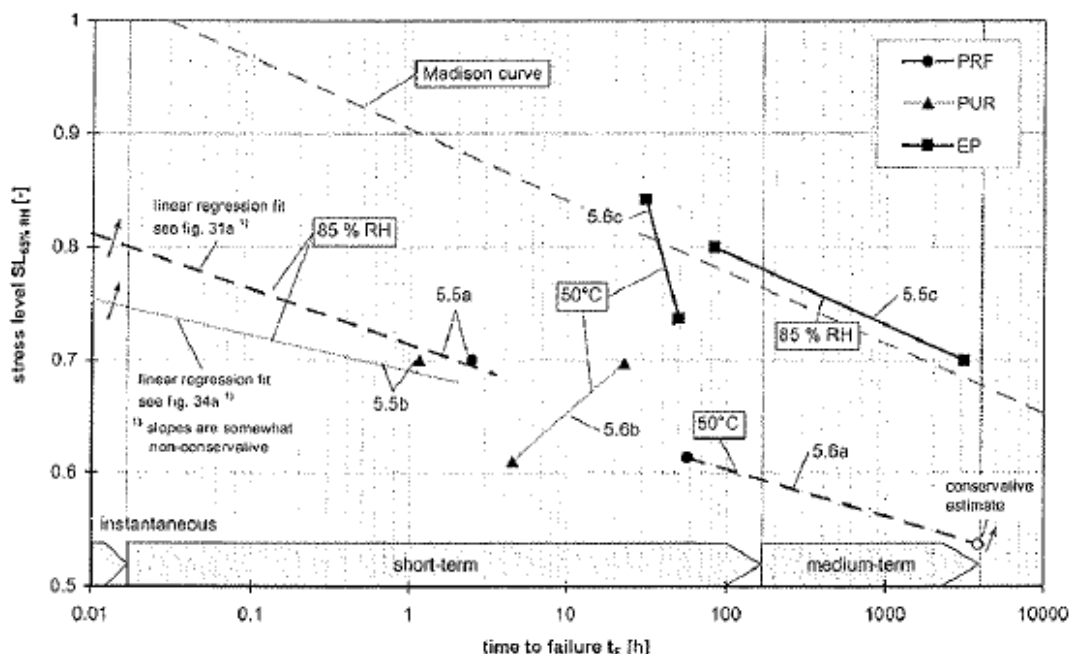
2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

omgivningens relativa fukttinhåll (RF) och temperatur. Minskar man fuktkvoten på trä krymper materialet. Ökar man däremot fuktkvoten sväller materialet. Det innebär att en balks dimensioner ändras beroende på klimatförhållanden (Isaksson, Mårtensson, & Thelandersson, Byggkonstruktion, 2010).

Vad det gäller inlimmade skruvar får anslutningstypen endast användas i konstruktioner med klimatklass 1 och 2 dock inte i klimatklass 3 (Svensson & Lundqvist, 2012). Det innebär att förbanden inte får användas i exempelvis direktkontakt med mark. Ett undantag från förbjudet mot användning i klimatklass 3 har gjorts förutsatt att skruvarna utförs parallellt eller vinkelrätt fiberriktningen med ett maximalt inlimningsdjup på 200 mm (Riberholt, 1988). Inlimmade skruvar får emellertid användas vid en pelarfotsanslutning om det sker inomhus, i en exempelvis industrihall, se figur 2.14 (bild till höger).

Då lim ofta är direkt beroende av klimatförhållanden gjordes det tester på olika limtyper med varierande temperatur- och fuktförhållanden. Testerna jämförde egenspanningarna vid 20°C och 65% relativ fuktighet hos limtyperna. Man fann att PRF, fenol-resorcinol, som förvarades i varierande utomhusklimat under skydd (från regn och vind) hade en väldigt liten påverkan på egenspanningar då testproverna inte belastades med en last. PUR, polyetan, förlorade under samma test ca 20% av styrkan. För EPX, epoxi, ökade istället styrkan med ca 12% (Bengtsson & Johansson, 2001).

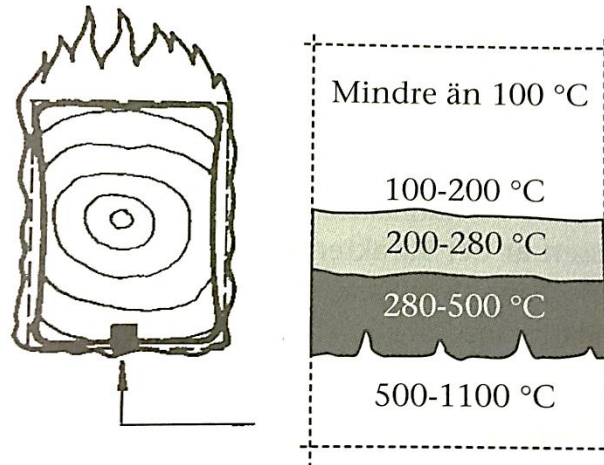
Vid RF 85% följde testresultatet för EPX Madisonkurvan, se figur 2.15, medan vid 50°C förlorade proven styrka vid ökad tid. Detta på grund av termo-mekaniska egenskaperna hos limmen (Bengtsson & Johansson, 2001).



Figur 2.15 – Pålastningstiden hos EPX, PUR och PRF under axiell belastning med gängade skruvar med varierande temperatur- och klimatförhållanden. Figur från Aicher, S. 2001.

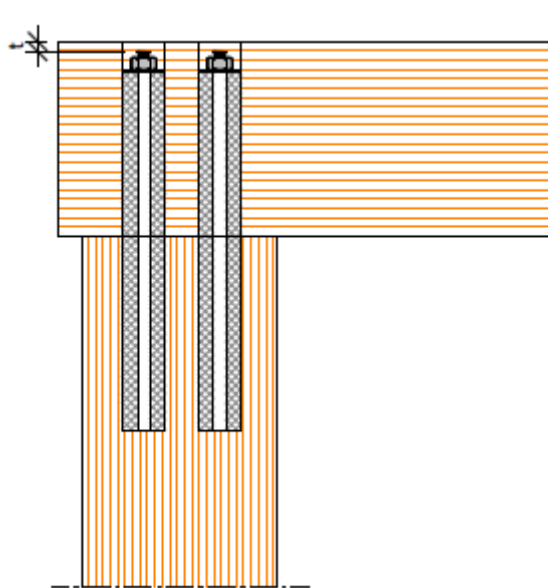
2.3.3 Brand

Trä är, som känt, ett brännbart material. Vid normal brandpåverkan antänds trämaterial och inträngningen sker ungefär med konstant hastighet. Hastigheten är lägre än vad man instinktivt tror då förkolningen av trä bildar ett kolskikt som är värmeisolerande och till en viss del förhindrar fortsatt syretillförsel (Carling, 2008). Trots långvariga brandförlopp kan obrända trädelar hålla sig under 100°C, se figur 2.16.



Figur 2.16 – Temperatur i trä under brand. (Isaksson, Mårtensson, & Thelandersson, Byggkonstruktion, 2010)

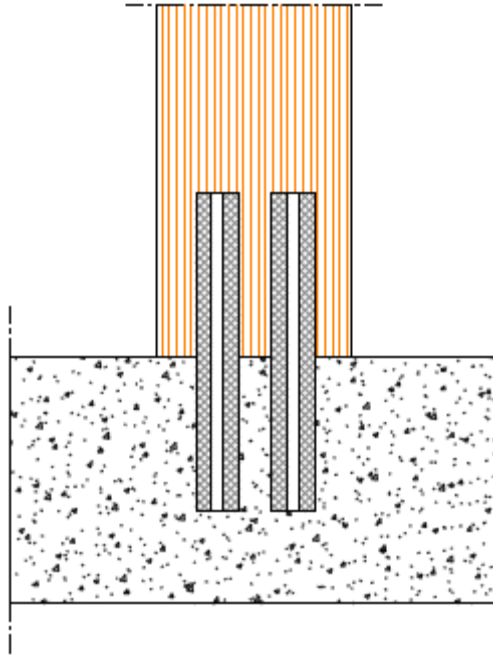
Branddimensioneringen för träkonstruktioner sker oftast genom att man ökar dimensionerna på elementen för att kunna motstå en brand enligt önskade krav, exempelvis 60min. I de flesta fall är det istället anslutningarna hos träkonstruktioner som är den svaga länken då de ofta utförs i stål. För inlimmade skruvar får man ett naturligt brandskydd genom att stålet är inuti trämaterialen. Som en jämförelse behöver man exempelvis brandmåla eller skydda spikplåtar med oorganiska material. Figur 2.17 och 2.18 visar exempel på inlimmade skruvar och deras förmåga att motstå brand.



Figur 2.17 – Schematisk figur över pelare-balkanslutning där limtjockleken är kraftigt överdriven, R30-R60. Efter Carling, 2008.

Anslutningstypen enligt figur 2.17 har brandprovats i Finland och uppskattas klara kraven för att motstå brand i 30 eller 60min. Det är viktigt att vidta åtgärder för att upprätthålla balkens sidostabilitet vid brand genom t.ex. tak- eller väggkonstruktion (Carling, 2008).

Observera att det är viktigt att det finns trä som omsluter skruvens topp med tjockleken t. Ligger skruvtoppen i ovankant av balken under en brand förlorar skruven snabbt sin hållfasthet då stål har hög värmeledningsförmåga.



Figur 2.18 – Schematisk figur för inspänd pelarfot där limtjockleken är kraftigt överdriven, R30-R60. Efter Carling, 2008.

2.4 Utförande i dagsläget

Inlimmade skruvar utförs genom att hål först borrar i träet. Diametern på hålet brukar vara några få millimeter större än skruvarnas diameter. Detta för att resultera i en limtjocklek på 1-2mm. Anledningen till den tunna limtjockleken är att de flesta limtyper presterar bättre med minskad tjocklek (Steiger et al, Unpublished). Exempelvis medför tunnare limtjocklekar en lägre sannolikhet för bildandet av luftbubblor jämfört med tjockare limpåförande. Tunnare limtjocklekar medför även indirekt att åtgången på lim minskar, vilket i sin tur påverkar kostnaden på ett positivt sätt.

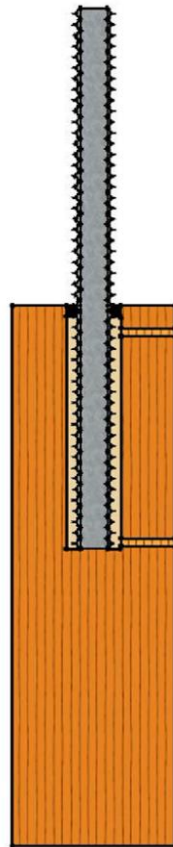
Efter borrning är det viktigt att rengöra borrhålet på materialrester som kan försämra limverkan. Det går att rengöra borrhålet med tryckluft, viktigt är då att tryckluften måste vara fri från oljepartiklar (Steiger et al, Unpublished).

Insättning av skruvarna kan ske på olika sätt. Den lättaste metoden sker genom att en förutbestämd mängd lim hålls i hålen och att insättning av skruvarna sker därefter. Beroende på limtypens viskositet kan man behöva trycka in skruvarna med en extra kraft. Den största nackdelen med denna enkla metod är att det inte finns någon tillfredsställande kontrollmetod för att upptäcka håligheter och tomrum hos limmet (Steiger et al, Unpublished), se figur 2.19.



Figur 2.19 – Metod med förutbestämd limmängd utan kontrollhål

En annan metod utförs genom att man borrar ytterligare två små hål i träelementet. Ett av hålen ska sitta i närheten av skruvens underkant och det andra hålet ska sitta i närheten av toppen, se figur 2.20. Därefter placeras skruven med en plugg för att undvika att lim rinner ut vid limpåföringen. Limmet appliceras sedan genom injektion via det understa hålet tills att lim väller ut ur det översta hålet (Steiger et al, Unpublished). Denna metod lämpar sig endast vid förband med få skruvar längs kanterna. Har man många skruvar som dessutom är centrerade är denna metod omöjlig att utföra. Detta kan dock lösas genom en kombination av metoder.



Figur 2.20 – Metod med kontrollhål

Ytterligare en metod går ut på att man först penslar lim på skruvarna för att säkerställa limpåföringen hos skruvarna. Därefter hälls lim i hålen för att tomrummen ska fyllas vid insättning av skruvarna. Skruvarna centreras därefter i hålen och förbandet härddas. Detta är en tidskrävande metod och då tid är lika med pengar resulterar det att denna metod sällan används i praktiken.

2.4.1 Kvalitetskontroll

För att säkerställa att inlimmade skruvar gjorts enligt gällande normer och rekommendationer krävs kvalitetskontroller. Vid en kvalitetskontroll av inlimmade skruvar är det viktigt att ta hänsyn till beskrivningarna i tabell 2.3 och 2.4.

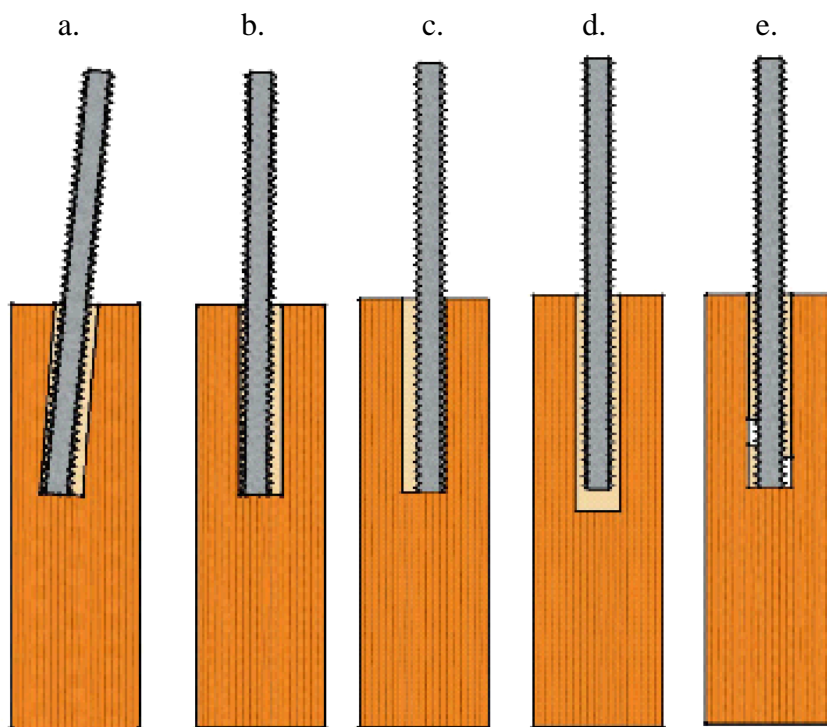
Tabell 2.3 - Kvalitetskontroll avseende material (Steiger et al, Unpublished)

Material	
Trä	Hållfasthetsklass, fukthalt
Lim	Bevisad lämplighet för inlimmade skruvar, tekniska specifikationer, klimatklass, tid limmet står öppet och härdningstid
Skruv	Korrekt geometri, typ & styrka enligt projektering (väljs stålqualität högre än projekterat kan det leda till negativa utfall t.ex. sprött brott), korrosion, ytans kondition (fri från oljor och smörjmedel)

Tabell 2.4 - Kvalitetskontroll avseende applikation (Steiger et al, Unpublished)

Applikation	
Hål	Position (t.ex. kant- och skruvavstånd), diameter, djup, lutning, rakhet och renlighet
Skruv	Korrekt och centrerad positionering av skruven i hålet och vid behov använda pluggar för att säkerställa centrereringen
Lim	Applicering enligt tillverkarnas specifikationer, kontroll av fyllnadsnivå och förekomst av tomrum

En rad olika fel kan uppstå vid produktionen av förbandstypen. Figur 2.21 visar möjliga fel.



Figur 2.21 – Möjliga felutföranden av inlimmade skruvar.

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Dessa fel kan förhindras, eller åtminstone minimeras genom att (fall a-e relaterar till figur 2.21):

- a. Snedborring: Användning av borrjigg för att undvika snedborring
- b. Skruv placerad snett: Centreringsverktyg i t.ex. plast eller metall som fästes på skruvens botten, vid behov även topp, för att centrera skruven i borrhålet.
- c. Skruv placerad längs borrhålet: Se b.
- d. Viskositet: Lägre viskositet på limmet, trycka i skruven med erforderlig kraft eller fästa en tyngd som möjliggör att skruven hinner böttna innan limmet härdar.
- e. Viskositet: Lägre viskositet på limmet, rotera skruven vid insättning eller pensla lim på skruv och fyll hålet med erforderligt lim

Kontrollmetod:

SP, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, hade som uppdrag att försöka utveckla enkla och pålitliga kontrollmetoder för inlimmade skruvar. Man ville att kontrollmetoden skulle kunna upptäcka produktionsfel, som exempelvis otillräckligt limpåförande, härdning och andra fel vid limning. SP undersökte två lämpliga metoder. Den ena metoden gick ut på att provbelasta och den andra krävde förstörande provning. Man fann att det var lättare att provbelasta proverna. Provbelastning, hos inlimmade skruvar var (på den tiden) en nyutvecklad testmetod, går ut på att ensidigt dragtesta proverna. Fördelen med metoden är att den är lämplig för produktionskontroll. SP provbelastade förbanden med ökande last, från 50% till 65%, 80% och till slut 90% av korttidskapaciteten. Detta gjordes för att hitta den maximala lasten som förbandet kan utsättas för utan att orsaka strukturell skada på limfogen.

Limtypen epoxi, EPX, nådde i medel högre utdragshållfasthet vid 80% och 90% provbelastning jämfört med förstörande prov. Inget av proven visade tecken på att utdragshållfastheten minskade efter ett pålastningsförsök. Nämnvärt är att prov som pålastades till 65% av korttidskapaciteten visade en minskning av utdragshållfastheten. Anledningen till detta kunde inte förklaras under utförda tester och kräver mer undersökning (Bengtsson & Johansson, 2001).

2.4.2 Utförande i Sverige

I detta avsnitt redovisas tillverkningsbeskrivningarna från de största limträ-tillverkarna i Sverige. Dessa är: Setra Trävaror AB, Martinsons Såg AB, Moelven Töreboda AB och Glulam of Sweden AB. Typgodkännandebevis 1396/78, utgivet av SP SITAC (Svensson & Lundqvist, 2012) följs vid tillverkning hos de fyra ovan nämnda företagen. Enligt typgodkännandet får limträ med lägst hållfasthetsklass GL24c användas. Inlimmade skruvar får endast användas i klimatklass 1 och 2, där temperaturen endast under kortare perioder överstiger 50°, detta under maximalt ett dygn (Svensson & Lundqvist, 2012).

På grund av att förbandet inte kan besiktas okulärt görs en märkning av produkten. Märkningen får maximalt återfinnas 300mm från inlimningen (Anon., Dimensioneringsanvisningar, 2012).

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Tillverkarens namn och tillverkningsort	Tillverkningsställe och ort
Boverkets inregistrerade varumärke	†
Certifieringsorgan och ackrediteringsnummer	SP SITAC 1002
Produktens typbeteckning	Inlimmad skruv
Typgodkännandets nummer	1396/78
Löpande produktionsnummer	produktionsnummer
Kontrollorgan	SP

Figur 2.22 – Märkning av inlimmade skruvar. (Svensson & Lundqvist, 2012)

Enligt Anon., Tillverkningsbeskrivning, 2012, nämns flera faktorer som eliminerar problem som återfinnes i tidigare delar av rapporten. Kortfattat skriver man:

Lokaler: Inlimning av skruv får endast utföras i lokaler där tillverkning av limträ sker.

Produktionsutrustning: En borrjigg måste användas och man måste noggrant kontrollera borrhålets raket innan borrning för att säkerställa raka hål. Vidare får inte borrhålets längd överstiga $25d_{\text{borrstål}}$. Borrhuvudets diameter ska vara en millimeter större än skruvens, $d_{\text{hål}} = d_{\text{skruv}} + 1 \text{ mm}$.

Provdragning av skruvarna sker med ihålig hydraulisk domkraft utrustad med manometer för registrering av det maximala oljetrycket. Provutrustningen måste kontrolleras minst en gång per år av kontrollinstitutionen.

Råvaror: Skruvarna får som lägst ha hållfasthetsklass 4.6 enligt SS-EN ISO 898-1 och måste vara M- eller UNC-gängade (M-gängade är metriskt gängade enligt europeisk standard och UNC-gängade är grovgängade enligt amerikansk standard) utmed hela skruvlängden. Vidare måste tillräckligt korrosionsskydd finnas för aktuell klimatklass.

Fuktkvoten hos limträet får inte överstiga 15%.

Limmet måste ha en bekräftad hållfasthet, beständighet samt vidhäftning till både stål och trä. Ett exempel som uppfyller kraven är Wevo Spezialharz (Epoxi) EP20/VP1 med härdare B20/1 (polyuretanlim Purbond CR421 är enligt (Svensson & Lundqvist, 2012) ytterligare ett exempel på lim som uppfyller kraven).

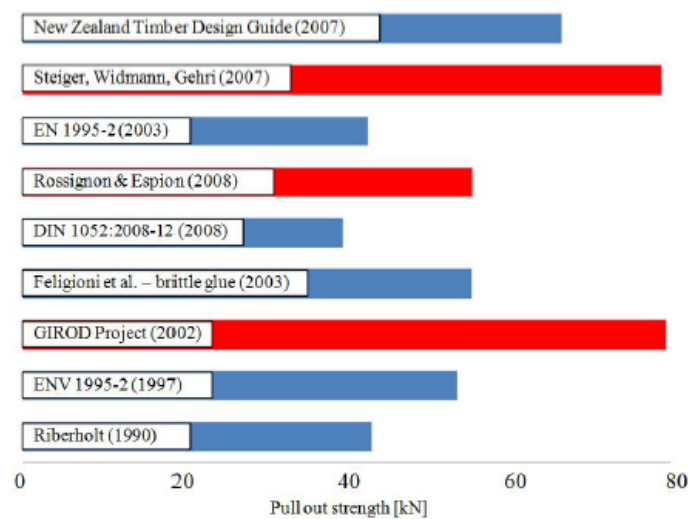
Tillverkning: Vid normal användning behöver träet vara fritt från sprickor där skruvarna placeras.

Vidare måste hålen rensas från spånrester och möjliga föroreningar måste avlägsnas. Först därefter kan lim injiceras i botten av hålet med hjälp av pip eller slang (betrykning av lim är inte tillåten enligt svenska rekommendationer). Limmängden ska vara anpassad för att få ett tydligt överskott av lim vid inplacering av skruven. Skruvarna ska därefter pressas ned samtidigt som de roteras för att säkerställa att skruven når hålets botten och att man får en god limspridning. Därefter ska limmet härda enligt limfabrikantens anvisningar. Det är även viktigt att skydda skruvarna från stötar och slag under montage och transport.

2.5 Dimensioneringsmetoder

I detta avsnitt sammanfattas gällande regler och typgodkännande med avseende på axiell och transversell belastning.

Sedan introduktionen av inlimmade skruvar har flera försök till att formulera formler för Eurokod 5 gjorts men misslyckats. Det fanns planer om att ett avsnitt om inlimmade skruvar skulle finnas med i prEN 1995-2 EC 5 del2: Broar, som i sista minuten togs bort. I Annex C, fram till andra utkastet av prEN 1995-2, fanns det information rörande inlimmade skruvar. Däremot togs det bort efter beslut från TC 250 WG5 (Källander, 2004) på grund av olika vetenskapliga tillvägagångssätt i tidigare undersökningar och olika tillvägagångssätt för att upprätta designformler i de olika länderna (Tlustochowicz, Serrano, & Steiger, 2010). Skillnaderna mellan de olika tillvägagångsätten visas i figur 2.23 nedan.



Figur 2.23 – Jämförelse av utdragskapacitet för inlimmade skruvar med olika designmetoder. Man använder epoxi med inlimningslängd=200mm, $\rho_k=370\text{kg/m}^3$, MC <14%, diameter=20mm och kantavstånd=2mm. Rött för karaktäristiska värden och blått för medelvärden. (Graph: M., Stepinac, Reference: Steiger, R., et al 2015: COST FP 1101 state of the art review on strengthening of timber structures with glued in rods)

2.5.1 Axiell belastning

Axiell dimensionering enligt gällande regler och typgodkännande redovisas kortfattat då det behövs vid dimensionering av fallstudien.

2.5.1.1 Geometri- och klimatbegränsningar

Brottmoderna som kan uppstå vid axiell belastning av skruvarna i inlimmade skruvar är: utdragning av träet, träbrott, fläkbrott, uppsprickning av träet och skruvbrott.

Inlimmade skruvar utförs endast i klimatklass 0 och 1 hos Svenskt limträ AB (Lindgren, 2004), vilket motsvarar klimatklass 1 och 2 enligt nuvarande normer.

Den minsta tillåtna inlimningslängden, $l_{i,min}$ beräknas enligt Lindgren, 2004:

$$l_{i,min} = \max \begin{cases} 0,5d^2 \\ 10d \end{cases} \quad 2.1$$

där,
 d = Skruvens ytterdiameter

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Ekvation 2.1 baseras normalt på skruvens ytterdiameter eller på en ekvivalent diameter, d_{ekv} . Det senare fallet används om limmets hållfasthet inte är avgörande (Lindgren, 2004).

Vid fallet ekvivalent diameter beräknas denna till:

$$d_{ekv} = \min \left\{ \begin{array}{l} d_{h\ddot{a}l} \\ 1,15 \cdot d_{skruv} \end{array} \right. \quad 2.2$$

2.5.1.2 Axiellt belastade skruvar – Brott i enstaka skruv

Det dimensionerade värdet vid axiell dragning av skruv bestäms som det lägsta värdet av utdragshållfastheten. Ekvation 2.3 avser dragbrott hos skruven och ekvation 2.4 avser brott i limfog enligt Lindgren, 2004:

$$R_{td} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{bu,k} \cdot A_s}{\gamma_n \cdot 1,2} \\ \frac{\pi \cdot d_{ekv} \cdot l_i \cdot f_{ax,k} \cdot \frac{\tan \omega}{\omega} \cdot \kappa_r}{\gamma_n \cdot 1,25} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} 2.3 \\ 2.4 \end{array}$$

där,

$f_{bu,k}$ = Karakteristiskt värde för skruvens brottspänning

A_s = Skruvens spänningsarea

d_{ekv} = Ekvivalent skruvdiameter

l_i = Skruvens inlimningslängd

$f_{ax,k}$ = 5,5N/mm²

ω = Sprödhetsparameter $\omega = \frac{0,016 \cdot l_i}{\sqrt{d_{ekv}}}$

γ_n = Partialkoefficient för säkerhetsklass enligt BKR 2:115

κ_r = Omräkningsfaktor som beaktar inverkan av fukt och belastningens varaktighet, enligt avsnitt 5:21 och 5:22 i BKR.

Vid tryckbelastade skruvar ska hänsyn till knäckning av skruvarna tas om de dimensionerade spänningarna överstiger 300N/mm² (Lindgren, 2004).

Enligt typgodkännandet (Anon., Tillverkningsbeskrivning, 2012) är formlerna lite annorlunda, se ekvation 2.5 och 2.6:

$$R_{td} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,6 \cdot f_{bu,k} \cdot A_s}{1,2} \\ \frac{\pi \cdot d_{ekv} \cdot l_i \cdot f_{ax,k} \cdot \frac{\tanh \omega}{\omega} \cdot k_{mod} \cdot \kappa_1}{1,25} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} 2.5 \\ 2.6 \end{array}$$

där,

$f_{bu,k}$ = Karakteristiskt värde för skruvens brottspänning

A_s = Skruvens spänningsarea

d_{ekv} = Ekvivalent skruvdiameter

l_i = Skruvens inlimningslängd

$f_{ax,k}$ = 5,5N/mm²

ω = Sprödhetsparameter $\omega = \frac{0,016 \cdot l_i}{\sqrt{d_{ekv}}}$

κ_{mod} = Omräkningsfaktor som beaktar inverkan av fukt och belastningens varaktighet, enligt avsnitt Eurokod 5 tabell 3.1

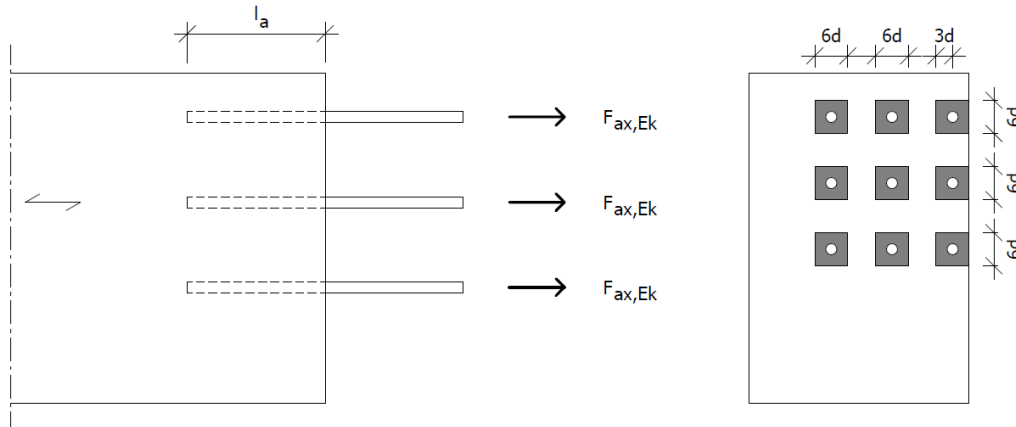
κ_1 = 1,0 för KK 0

0,8 för KK 1

Parametern κ_1 uppkommer vid beräkningar för att ta hänsyn till att utdragshållfastheten för inlimmade skruvar är känslig för högre fuktkvot (Lindgren, 2004).

2.5.1.3 Axiellt belastade skruvar – Dragbrott i limträet

Vid beräkning av träets effektiva tvärsnittsarea, A_{eff} , då dragning av skruvarna sker får endast ett avstånd om $3d$ på vardera sida om skruvens centrum tillgodoräknas (Lindgren, 2004), figur 2.24 nedan illustrerar detta.



Figur 2.24 – Beräkning av effektiv tvärsnittsarea, A_{eff} . l_a =inlimningslängd, d =skruvens diameter och $F_{ax,Ek}$ =karaktäristisk utdragningskapacitet för skruven. Efter Lindgren, 2004.

Den dimensionerade utdragskapaciteten, R_{td} , för en grupp inlimmade skruvar vid dragning i fiberriktningen bestäms enligt:

$$R_{tk} = f_{t,0,d} \cdot A_{eff} \quad 2.7$$

där,

$f_{t,0,d}$ = Träets dimensionerade draghållfasthet

A_{eff} = Effektiv träarea

Vid belastning i annan riktning än parallellt fiberriktningen ska risken för fläkning tas till hänsyn. Detta kan göras enligt Eurokod 5, 8.1.4 (Anon., Dimensioneringsanvisningar, 2012). Kravet som ska uppfyllas vid axiellt belastade inlimmade skruvar med avseende på fläkning är:

$$F_{90,Rd} \geq F_{v,d} \quad 2.8$$

där,

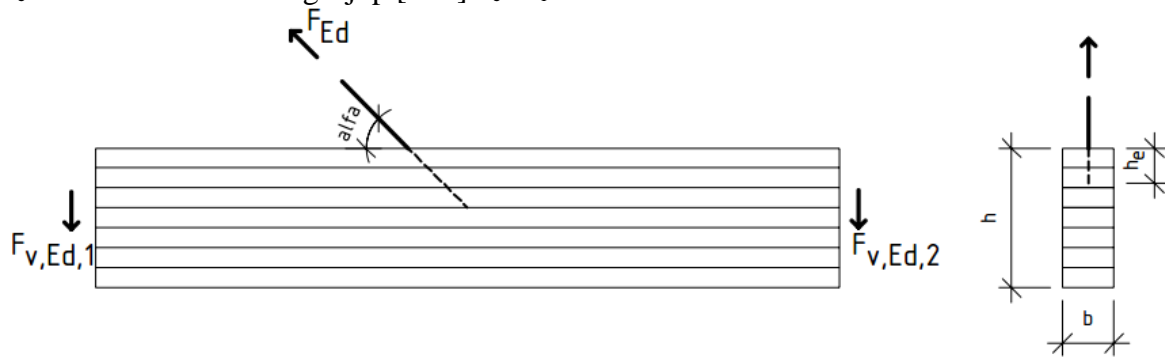
$$F_{v,d} = \max(F_{v,Ed,1}, F_{v,Ed,2}) \quad 2.9$$

$F_{v,Ed,1}$ och $F_{v,Ed,2}$ visas i figur 2.25

$$F_{90,Rk} = 14b \sqrt{\frac{h_e}{\left(1 - \frac{h_e}{h}\right)}} \quad 2.10$$

där,

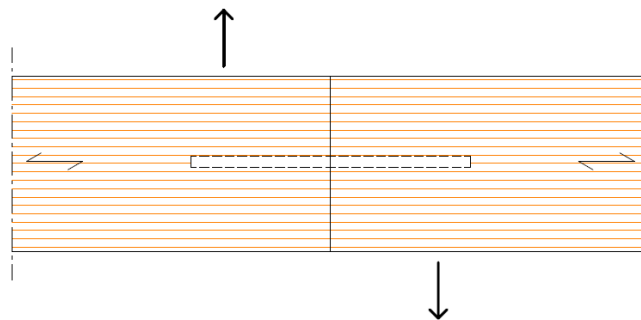
- $F_{90,Rk}$ = Karakteristisk bärförmåga vinkelrätt fiberriktningen [N]
- b = Bredd, max 6d [mm]
- h = Balkhöjd [mm]
- h_e = Inlimningsdjup [mm] $h_e = l_i \sin \alpha$



Figur 2.25 – Definitioner för beräkning av risken för fläkbrott för axiellt belastad skruv. Efter (Anon., Dimensioneringsanvisningar, 2012)

2.5.2 Transversell belastning

Enligt typgodkännande från Svenskt Limträ AB (Lindgren, 2004) kan transversellt belastade inlimmade skruvar beräknas på samma sätt som transversellt belastade dymlingar vinkelrätt fiberriktningen (tvärs fiberriktningen). Det innebär att formlerna för brottmoderna enligt avsnitt 8 i Eurokod 5 kan användas. Detta kan vara logiskt då enda skillnaden mellan inlimmade skruvar och dymlingar är att glidningen förhindras av limmet, se figur 2.26.



Figur 2.26 – Likheten hos inlimmad skruv och ”vanliga” förband enl. EC5.

Formlerna för dymlingar i träförband enligt Eurokod 5 gäller även för inlimmade skruvar under transversell belastning (Lindgren, 2004).

Vid inlimning i en vinkel större än 0° och mindre än 90° kan linjär interpolation användas. Vidare ska man ta hänsyn till risken för fläkbrott.

För inlimmade skruvar med belastning vinkelrät mot fiberriktningen används samma hålkantshållfasthet som med skruvar för samma diameter (Frühwald Hansson & Crocetti, F10 Stål- och träbyggnadsteknik, 2014).

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

För inlimmade skruvar med belastning parallellt fiberriktningen multipliceras hålkantshållfastheten med 10% jämfört med skruvar med samma diameter (Anon., Dimensioneringsanvisningar, 2012), (Lindgren, 2004).

Enligt ett reviderat dokument (Anon., Dimensioneringsanvisningar, 2012) finns följande råd avseende dimensioneringen:

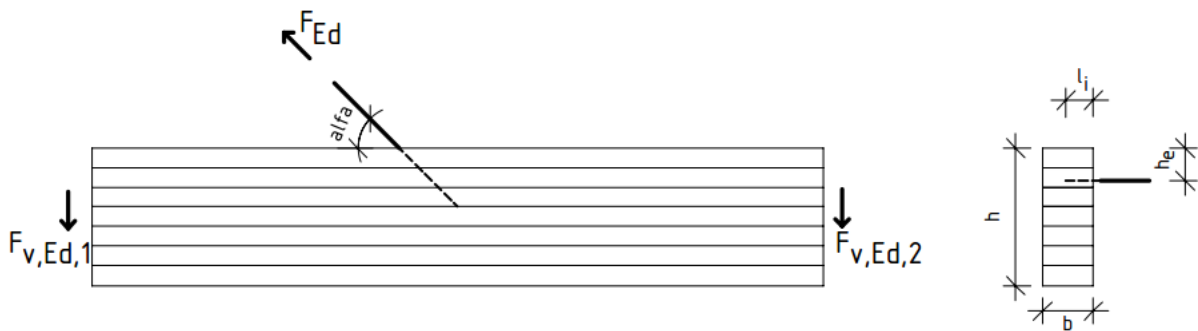
Krav som ska uppfyllas vid transversell belastade inlimmade skruvar:

$$F_{90,Rd} \geq F_{v,d} \quad 2.11$$

där,

$$F_{v,d} = \max(F_{v,Ed,1}, F_{v,Ed,2}) \quad 2.12$$

$F_{v,Ed,1}$ och $F_{v,Ed,2}$ visas i figur 2.27



Figur 2.27 – Definitioner för beräkning av risken för fläkbrott för transversellt belastad skruv. Efter (Anon., Dimensioneringsanvisningar, 2012)

Vidare beräknas den karakteristiska bärförmågan vinkelrätt fiberriktningen, $F_{90,Rk}$ enligt nedanstående uttryck:

$$F_{90,Rk} = 14l_i \sqrt{\frac{h_e}{(1-\frac{h_e}{h})}} \quad 2.13$$

där,

- $F_{90,Rk}$ = Karakteristisk bärförmåga vinkelrätt fiberriktningen [N]
- l_i = Inlimningsdjup [mm]
- h = Balkhöjd [mm]
- h_e = Kantavstånd till belastad kant, mätt vinkelrätt fiberriktningen [mm]

Till skillnad från andra förband, som kan ha flera skjuvplan, har inlimmade skruvar endast ett skjuvplan. För att få fler skjuvplan skulle man vara tvungen att fästa in plåtar i balkarna och elementen i längdled.

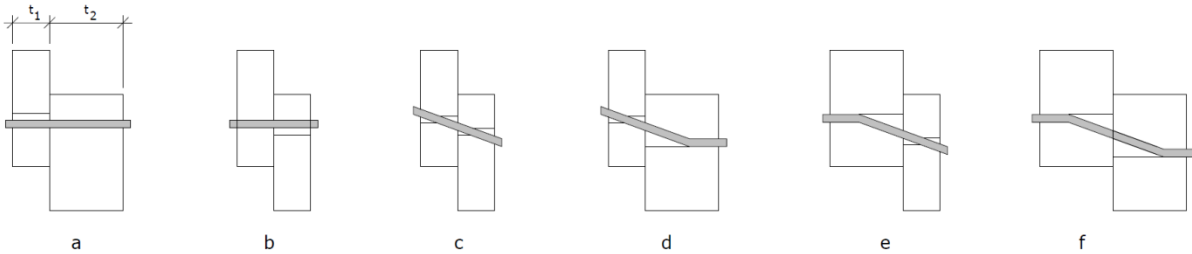
Dimensionering av tvärkraftskapaciteten hos skruvarna enligt EC. 5 avsnitt 8.2.2, som är beroende av olika brottmoder (se fig 2.32), för förbindare vid tvärbelastning i trä-trä med ett skjuvplan:

a

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (a) \\ f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right. \quad 2.14$$

där,

- $F_{v,Rk}$ = Karakteristisk bärförmåga per skjuvningsplan och förbindare
- t_i = Virkes eller skivtjockleken eller inträngningsdjup med i antingen 1 eller 2
- $f_{h,i,k}$ = Karakteristisk bäddhållfasthet i virkesdel i
- d = Förbindarens diameter
- $M_{y,Rk}$ = Karakteristisk flytmoment för förbindaren
- $F_{ax,Rk}$ = Karakteristisk utdragsbärförmåga för förbindaren
- β = Förhållandet mellan förbanddelarnas bäddhållfasthet,
 $\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$, vid likadant material och vinkel mellan kraft- och fiberriktning är $\beta=1$

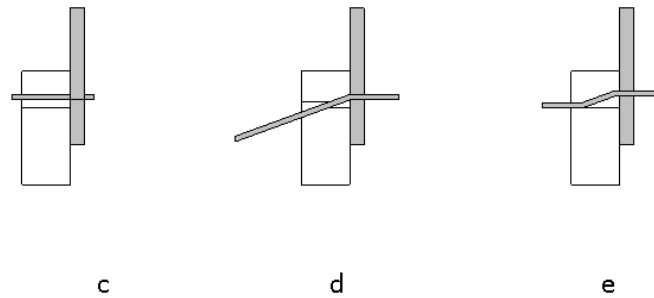


Figur 2.28 – Brottmoder för trä-trä förband. Efter EC 5 avsnitt 8.2.2 figur 8.2

Används en stålhubb för att koppla två element används istället EC5 avsnitt 8.2.3 gällande trä-stål förband med tjock plåt (se figur 2.29) och ett skjuvplan:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \quad (c) \\ f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \end{array} \right. \quad 2.15$$

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar



Figur 2.29 - Brottmoder för stål-trä förband. Efter EC 5 avsnitt 8.2.2 figur 8.3

Bidraget från linverkan, $F_{ax,Rk}/4$ begränsas enligt Johansens flytteori till en viss procent av Johansen-delen enligt EC5 avsnitt 8.2.2:

- 0% för dymlingar
- 15% för runda spikar
- 25% för kvadratiska och räfflade spikar samt skruvar
- 50% för andra spiktyper
- 100% för träskruvar

Är $F_{ax,Rk}$ okänt sätts bidraget från linverkan till noll.

Hålkantshållfastheten i aktuell riktning (EC5 avsnitt 8.5):

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad 2.14$$

där,

$f_{h,0,k}$ = Karakteristisk hålkantshållfasthet parallellt fiberriktningen (medelvärde) [N/mm²]

α = Vinkel mellan fiberriktning och kraftriktning [°]

k_{90} = $\begin{cases} 1,35 + 0,015d \text{ för barrträ} \\ 0,90 + 0,015d \text{ för lövträ} \end{cases}$

Medelvärdet av hålkantshållfastheten, $f_{h,0,k}$, beräknas enligt formel 2.15 som ursprungligen föreslogs av Whale & Smith (Whale, Smith, & Larsen, 1987), (Ehlbeck & Werner, 1988) och återfinnes i EC.5 avsnitt 8.5.

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k \quad 2.15$$

där,

f_h = Hålkantshållfastighet, medelvärde [N/mm²]

d = Skruvens diameter [mm]

ρ_k = Karakteristiska densiteten hos träet [kg/m³]

Den karakteristiska flytmomentskapaciteten bestäms enligt (EC 5 avsnitt 8.5):

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k} \cdot d^{2,6} \quad 2.16$$

där,

d = Skruvens diameter [mm]

$f_{u,k}$ = Karakteristisk draghållfasthet [N/mm²] enligt tabell 2.5 nedan.

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Tabell 2.5 - Brottgränser för skruvar. (SS-EN 1993-1-8, 3.1.1)

Hållfasthetsklass	4.6 [MPa]	8.8 [MPa]	10.9 [MPa]
$f_{u,k}$	400	800	1000
f_{yb}	240	640	900

Vid förband med flera förbindare parallellt fiberriktningen måste effektivt antal förbindare, n_{eff} , tas till hänsyn. Saknas flera förbindare parallellt fiberriktningen behöver n_{eff} inte tas till hänsyn. Effektivt antal förbindare beräknas för att ta hänsyn till att förbindarnas bärförmåga i ett förband kan vara lägre än summan av de enskilda förbindarnas bärförmåga. Detta på grund av avståndet mellan förbindare, kant- samt sidoavstånd inte är tillräckligt stor för att komma upp till maximal bärförmåga. Det kan därför vara en fördel att välja, om möjligt, avstånd mellan förbindare, kant- och sidoavstånd på sådant sätt att $n_{eff} = n_{förbindare}$. Den effektiva bärförmågan i radens riktning beräknas enligt:

$$F_{v,eff,Rk} = n_{eff} \cdot F_{v,Rk} \quad 2.17$$

där,

- $F_{v,eff,Rk}$ = En rad förbindares karakteristisk bärförmåga parallellt med fiberriktningen
- n_{eff} = Effektivt antal förbindare i rad parallellt med fiberriktningen (beräknas enligt avsnitt 8.3.1.1 i EC5)
- $F_{v,Rk}$ = Karakteristisk bärförmåga parallellt fiberriktningen för varje förbindare

Vid flera rader multipliceras $F_{v,eff,Rk}$ med antalet rader vid beräkning av total bärförmåga.

För att beräkna maximalt antal skruvar som får plats på höjden respektive bredden på en balk eller pelare görs detta enligt ekvation 2.18 och 2.19:

$$n_{skruv/rad} = \frac{h - 2,5d - 2,5d}{5d} + 1 \quad 2.18$$

$$n_{rader} = \frac{b - 2 \cdot 2,5d}{5d} + 1 \quad 2.19$$

Dimensionering för tvärkraft enligt limträhandboken (Carling, 2008):

$$R_{vk} = 12d^2 \sqrt{\frac{f_{yk}}{240}} \quad 2.20$$

Bärförmågan, R_{vk} vid tvärkraft enligt Limträhandboken avser per skruv. För att det ska vara jämförbart med Eurokod behöver man antingen dividera tvärkraftskapaciteten i Eurokod eller multiplicera R_{vk} med antalet skruvar. Det senare fallet finns nedan i ekvation 2.21:

$$R_{vk,total} = R_{vk,total} \cdot N_{förbindare} \cdot N_{skär} \cdot N_{rader} \quad 2.21$$

$$R_{vd} = k_{mod} \frac{R_{vk,total}}{\gamma_M} \quad 2.22$$

2.5.3 Skruvar belastade i axiell och transversell riktning

Vid kombinerad belastning i transversell och axiell belastning ska följande formel uppfyllas (Lindgren, 2004), (Carling, 2008) och (Anon., Dimensioneringsanvisningar, 2012).

$$\left(\frac{F_{ax,d}}{R_{ax,d}}\right)^2 + \left(\frac{F_{tr,d}}{R_{tr,d}}\right)^2 \leq 1 \quad 2.23$$

där,

- $F_{ax,d}$ = Dimensionerande axiell last
- $R_{ax,d}$ = Dimensionerande axiell bärförmåga
- $F_{tr,d}$ = Dimensionerande transversell last
- $R_{tr,d}$ = Dimensionerande transversell bärförmåga

Belastas förbandet av endast transversell belastning stryks, förutom termerna för axiell utnyttjandegrad, även kvadraten ur formel 2.23.

2.6 Kant- och skruvavstånd

En viktig del vid bärförmågeberäkningar hos förband är avstånd. Detta då trä är som tidigare nämnt ett anisotrop material som har olika hållfastheter i olika riktningar. Av den anledningen kan olika kantavstånd ge upphov till att bärförmågan utnyttjas optimalt eller inte. Placeras dessutom en förbindare för nära en kant kan fläkning och spjälkning ske. Det är av den anledningen kantavstånd för det tvärbelastade fallet är högre än det axiellt belastade, då hållfastheten vinkelrätt fiberriktningen är mycket lägre än den längs fiberriktningen.

Precis som andra delar om inlimmade skruvar råder det även oenighet kring kantavstånden. I detta avsnitt sammanställs därför olika resultat och angreppssätt kring kantavstånden.

Riberholt (Riberholt, 1988) föreslog de ursprungliga värden för kantavstånd i sitt arbete om inlimmade skruvar där han delade in avstånden beroende på hur god limkontakten var.

Tabell 2.6 - Kantavstånd för transversellt belastade skruvar och axiellt belastade skruvar. (Riberholt, 1988)

	Lim – bra kontakt	Lim - dålig kontakt
Transversellt belastade		
A1 – skruv – skruv	2d	4d
A2 – kant – skruv	2d	2.8d
A3 – lastad kant - skruv	4d	4d
Axiellt belastade		
A1	2d	4d
A2 – kant	1.5d	2.5d
A4 – ändträ	2d	4d
A5 – sidoträ	2.5d	2d

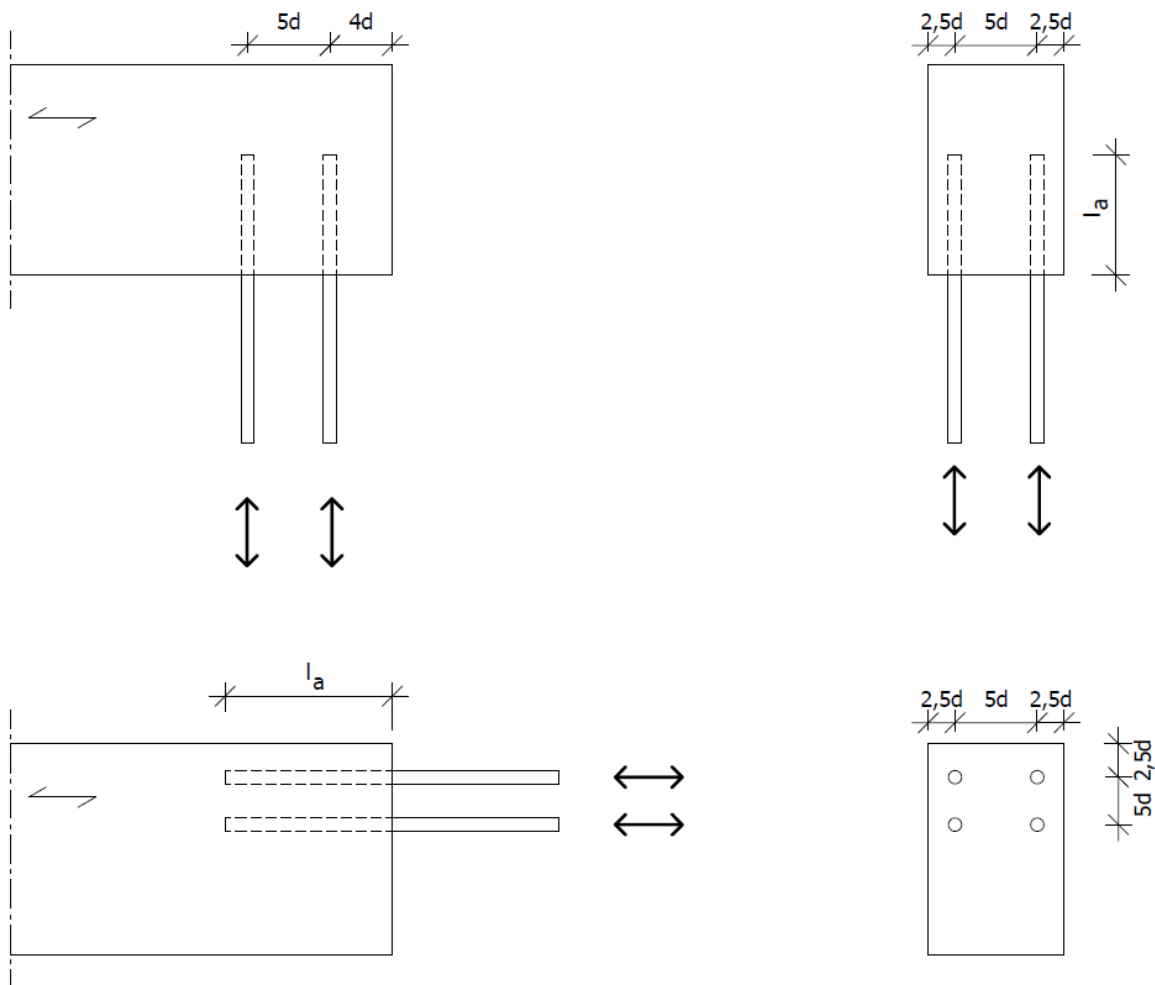
Ur typgodkännande från Svenskt Limträ AB (Lindgren, 2004) finns följande begränsningar avseende kant- och skruvavstånd:

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

”Avståndet från skruvcentrum till skruvcentrum får inte understiga $5d$. Avståndet från skruvcentrum till ändträkant i fiberriktning får inte understiga $4d$. Avstånd från skruvcentrum till sidträkant får inte understiga $2,5d$.” Se figur 2.30.

Tabell 2.7 - – Kantavstånd för axiellt belastade skruvar (Lindgren, 2004)

Avstånd	Minsta avstånd
A1 – skruv – skruv	$5d$
Skruv – ändträkant i fiberriktning	$4d$
Skruv – sidträkant	$2,5d$



Figur 2.30 – Minsta tillåtna kant- och skruvavstånd vid axiell belastning. Efter (Lindgren, 2004)

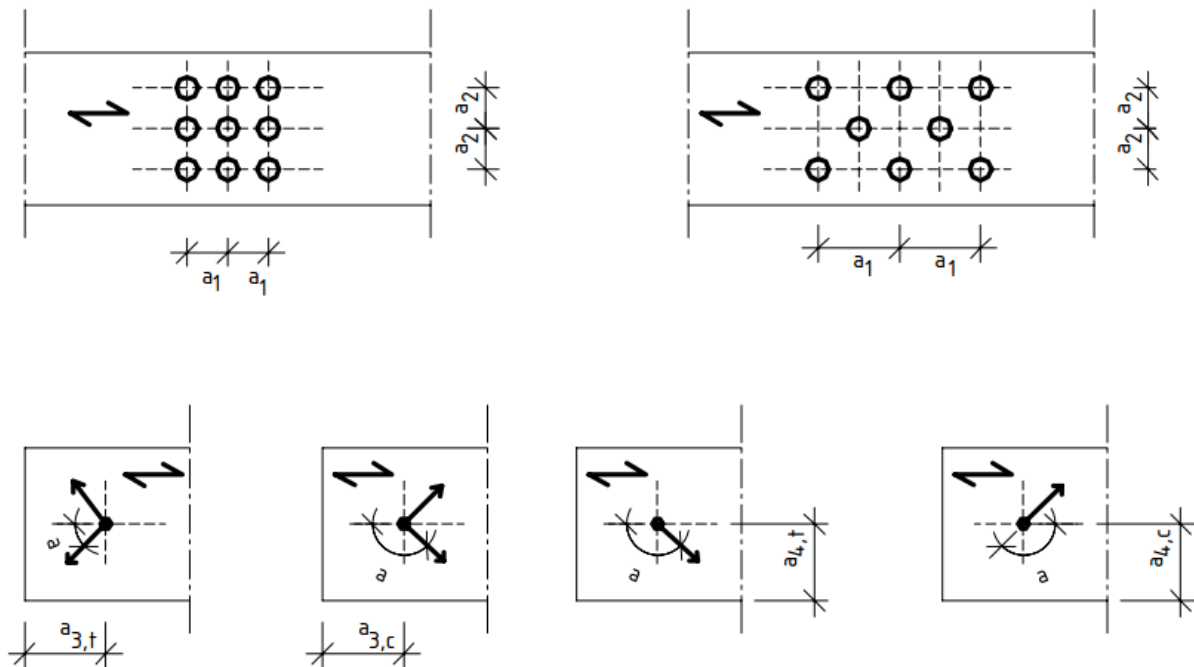
Enligt (Anon., Dimensioneringsanvisningar, 2012) kan anvisningarna i Eurokod 5 avsnitt 8.6, gällande kantavstånd för dymlingar användas för transversellt belastade inlimmade skruvar.

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Tabell 2.8 - Minsta kantavstånd mellan skruvar för trä-träförband (SS-EN 1995-1-1, 8.5.1.1). Vinkeln, α avser vinkeln mellan kraftriktning och fiberriktning.

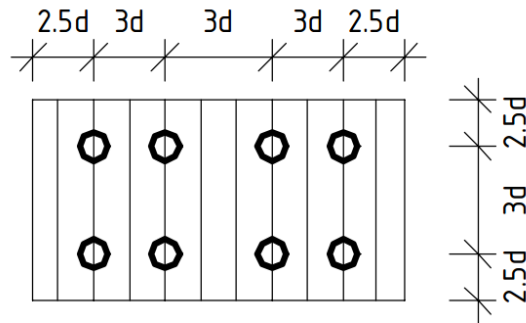
Avstånd	Vinkel	Minsta avstånd
a₁ - parallellt fibrerna	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	$(4 + \cos \alpha)d$
a₂ - vinkelrätt fibrerna	$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	4d
a_{3,t} - belastad ände	$90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	max(7d; 80mm)
a_{3,c} - obelastad ände	$90^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$	max(1+6sin α d; 4d)
	$150^\circ \leq \alpha \leq 210^\circ$	4d
	$210^\circ \leq \alpha \leq 270^\circ$	max(1+6sin α d; 4d)
a_{4,t} - belastad kant	$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$	max(2+2sin α d; 3d)
a_{4,c} - obelastad kant	$180^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$	3d

Definitioner på hur vinkeln, α bestäms visas i figur 2.31.

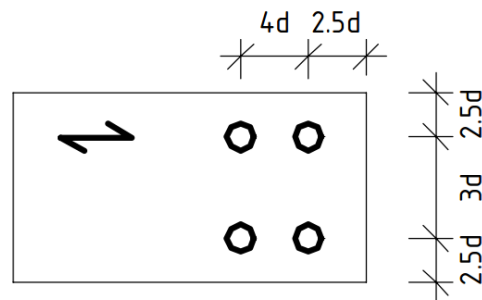


Figur 2.31 – Definitioner på hur vinkeln α bestäms. Efter (SS-EN 1991-1-1, 8)

I Frankrike utfördes experimentella tester på axiellt belastade inlimmade skruvar. Resultaten gällande avstånd redovisas i figur 2.32 och 2.33. Det är värt att nämna att dessa experiment finanserades av Simonin och Fargeot vilka är limträ tillverkare (Faye & et al, 2004).



Figur 2.32 – Axiell belastning parallellt fiberriktningen. Efter Faye et al, 2004.



Figur 2.33 – Axiell belastning vinkelrätt fiberriktningen. Efter (Faye & et al, 2004)

Allt ovanstående kan sättas i perspektiv enligt minsta kantavstånd enligt Eurokod 5 gällande skruvar för trä – träförband.

Som man ser råder stor oenighet gällande inlimmade skruvar vilket försvårar skapandet av gällande formler.

2.7 Förstärkning

Trä är, som tidigare nämnt, ett känt anisotropt material där det i vissa fall kan vara av intresse att förstärka för att möjliggöra fler användningsområden. Ett exempel där trä skulle behöva en eventuell förstärkning är i anslutningar med höga tvärbelastningar, var trä utan förstärkning skulle vara ett olämpligt material. Av den enkla anledningen är det viktigt att på något sätt utöka möjligheten för användning av förbandstypen – genom att öka tvärkraftskapaciteten. Tabell 2.9 nedan visar hållfastheten hos limträ (GL 28c) i olika riktningar. Man kan observera att hållfastheten vinkelrät är mycket lägre än hållfastheten parallellt fiberriktningen. Liknande beteende kan även urskiljas i andra limträklasser men även i trä i allmänhet.

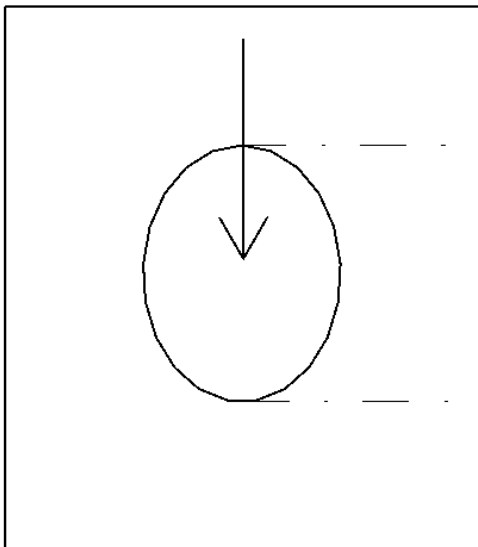
2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Tabell 2.9 - Hållfasthetsvärden hos homogent limträ av typen GL 28c. (Isaksson & Mårtensson, Byggkonstruktion - Regel- och formelsamling, 2010)

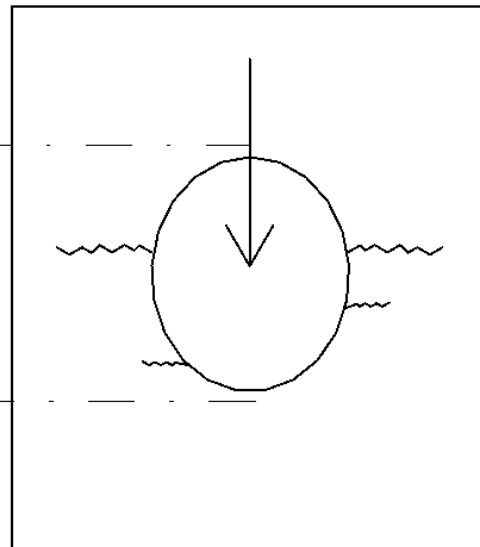
	Hållfasthetsvärden [MPa]
Böjning parallellt fibrerna f_{mk}	28
Dragning parallellt fibrerna f_{tk}	16,5
Dragning vinkelrätt fibrerna f_{t90k}	0,40
Tryck parallellt fibrerna f_{ck}	24
Tryck vinkelrätt fibrerna f_{c90k}	2,7
Längsskjuvning f_{vk}	2,7

Ett praktiskt exempel från detta är enligt nedanstående figur 2.34, där man kan observera att träet spricker upp vid belastning vinkelrätt fiberriktningen jämfört med hoptryckning vid belastning parallellt fiberriktningen.

PARALLELLT FIBERRIKTNING



VINKELRÄT FIBERRIKTNING



Figur 2.34 – Hålkantstyck vid lastning parallellt fibrerna jämfört med vinkelrätt fibrerna. Observera uppsprickning vid vinkelrät belastning.

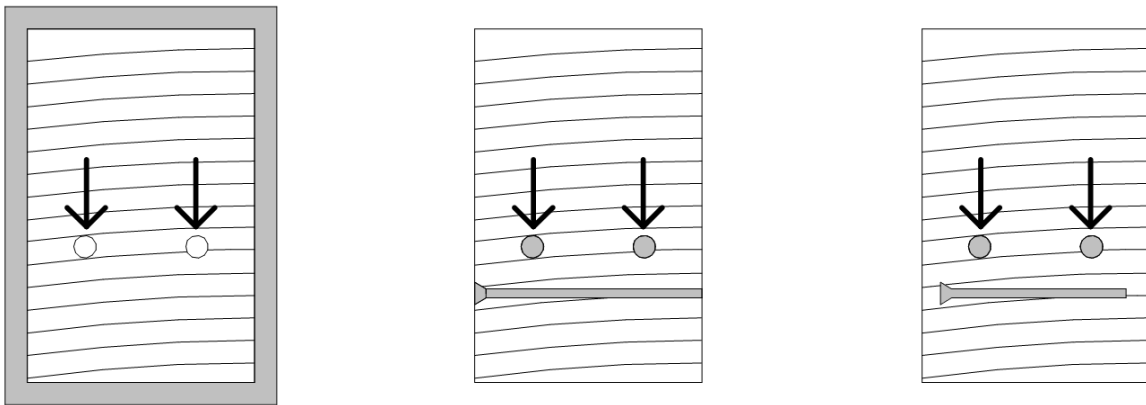
Utifrån tabell 2.9 och figur 2.34 kan man dra slutsatsen att hållfastheten hos förband med hög transversell belastning direkt beroende av hållfastheten vinkelrät fiberriktningen. Vidare är förbanden oftast dimensionerande i träkonstruktioner (Frühwald Hansson & Crocetti, F9 Stål- och träbyggnadsteknik, 2014). För att höja svagheten i träförbanden kan detta förstärkas. Förstärkningen kan exempelvis ske genom att man byter ut den yttersta delen av balken mot ett mer lämpligt material, t.ex. LVL (Laminated Vaneer Lumber) eller plywood.

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

Ett annat sätt att förstärka förbandet skulle kunna vara med hjälp av skruvar vinkelrät fiberriktningen. Skruvarna kan skruvas längs hela balkbredden men även genom endast en del av balken och på så sätt dölja skruvarna (man får även ett naturligt brandskydd). Även vid skruvning genom hela balkbredden skulle skruvarna vara relativt dolda, då de är förhållandevis små i jämförelse med balkhöjd och balkbredd. Se figur 2.35.

Ytterligare ett sätt att öka tvärkraftskapaciteten skulle vara att förstärka runt hela förbandet, se figur 2.35. Förstärkningen skulle kunna utgöras av stål (fördelen med stål är hög hållfasthet i förhållande till liten tjocklek) eller något skivmaterial som exempelvis plywood (sammankopplingen av plywood och balken skulle kunna göras med självborrande skruvar eller lim). Nackdelen med denna metod är att förbandet inte längre blir diskret och lika estetiskt tilltalande som med dolda förbindare. För fallet med dragband i stål resulterar det i ytterligare en nackdel – att man måste brandskydda stålet vilket innebär ytterligare ett arbetsmoment.

Det skulle även gå att förstärka med exempelvis ett skivmaterial på balkändan. Skivmaterialet kan exempelvis bestå av en glasfiberförstärkning, kolfiberförstärkning eller en stålplatta.



Figur 2.35 – Förstärkning av förbandet. T.v. yttre förstärkning i t.ex. plywood eller ståldragband. Mittersta skruv genom hela balkbredden. T.h. skruv genom en del av balkbredden.

2.7.1 Fackverksanalogi – Strut and tie modell

Ett sätt att förstärka är att tillämpa fackverksanalogi, så kallad ”strut and tie” på engelska. Det är en metod som framförallt används vid armering av betongkonstruktioner. Metoden presenterades av J. Schlaich, K. Schäfer och M. Jennewein 1987. Deras arbete generaliserade den tidigare fackverksanalogin för att kunna använda metoden i en godtycklig punkt av elementet (Schlaich, Schäfer, & Jennewein, 2014). Kortfattat utgår metoden från att elementen antingen tar upp tryck- eller dragspänningar. Tryckspänningarna tas upp av betongen då betong är speciellt lämpad för tryckspänningar och dragspänningar tas upp av armeringsstänger då stål är ett optimalt material för dragspänningar (Schlaich, Schäfer, & Jennewein, 2014).

För att kunna tillämpa strut and tie modellen på trä bör man i första hand undersöka om detta är möjligt, vilka likheter och skillnader finns med att använda trä gentemot betong samt hur man i så fall ska göra.

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

I tabell 2.10 nedan kan man observera att betong och trä har snarlika egenskaper i form av att tryckhållfastheten är högre än draghållfastheten – båda materialen klarar av att ta upp tryckspänningar på ett relativt bra sätt. Observera att draghållfastheten för de jämförda träsorterna avser drag vinkelrätt fiberriktning. Detta då fiberriktningen oftast är parallellt med balkens eller pelarens längdled vilket medför att tvärbelastade anslutningar antingen belastas med tryck eller drag vinkelrätt fiberriktningen.

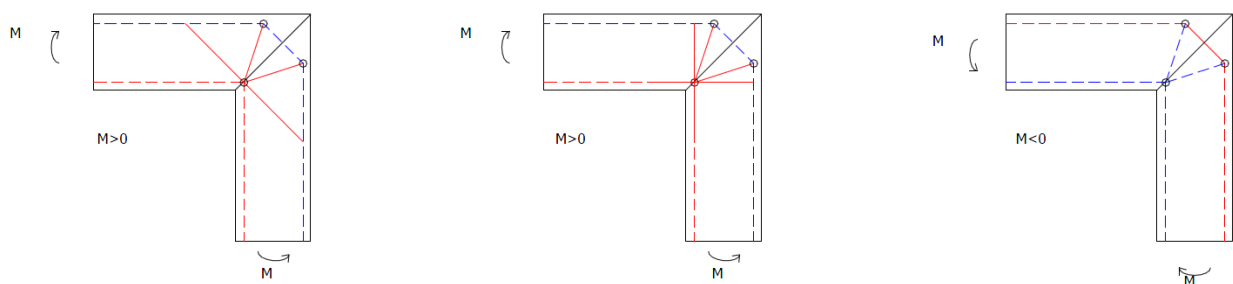
Tabell 2.10 – Liknelse mellan betong och limträ. (Isaksson & Mårtensson, Byggkonstruktion - Regel- och formelsamling, 2010)

Material	Tryckhållfasthet [MPa]	Draghållfasthet [MPa]	Kvot tryckhållfasthet/draghållfasthet [-]
Betong C50	50	5,3	9,4
Limträ GL 32h	22,5	0,50	45

Både betong och trä har olika egenskaper i olika riktningar. Båda materialen klarar i förhållandevis högre tryckspänningar i jämförelse med dragspänningar (för trä beror det på riktningen). Skillnaden mellan materialen är att betong är saknar fiberriktning och att svagheten mot dragspänningar är lika, oberoende på riktning. Träets hållfasthet är istället beroende av belastningssätt och fiberriktning. Draghållfastheten parallellt fibrerna är höga i trä i jämförelse med drag vinkelrätt fibrerna, som är träets svagaste hållfasthet.

Moderna, gängade skruvar möjliggör förstärkning av trärelement. Då skruvarna har en hög axiell hållfasthet och binder till träet på ett bra sätt kan de användas på samma sätt som armering används för att förstärka betongkonstruktioner (Trautz, 2009).

Gängade skruvar kan av den anledningen användas på ett systematiskt sätt för att förstärka träets svaga riktningar. Detta kan göras i områden med hög lastkoncentration, vid stöd och/eller förstärka hela element (Trautz, 2009), se figur 2.36.



Figur 2.36 – Strut-and-tie modeller för momentstyvt hörn med positiva samt negativa böjmoment. Gäller för element i trä. Blåa linjer avser tryck och röda drag, heldragna linjer representerar position för armering. Efter Trautz, 2009.

Vid dimensionering enligt strut and tie modellen antas att armeringen upptar all dragkraft medan tryckkraften tas om hand av betongen. Trä har relativt hög hållfasthet i fibrernas riktning för både drag- och tryckkrafter. Däremot är hållfastheten vinkelrätt fibrerna låg för både drag- och tryckkrafter, se tabell 2.10. Av den anledningen behöver strut-and-tie modellen för trä justeras en aning. I stället för att placera förstärkningen vid områden med hög

2. Litteraturstudie - Inlimmade skruvar

dragspänning som i fallet för betong bör förstärkningen placeras för att förstärka hållfastheten vinkelrätt eller diagonalt mot fiberriktningen (Trautz, 2009). Figur 2.37 nedan visar två möjliga sätt att förstärka limträbalkar.



Figur 2.37 – Förstärkning med hjälp av skruvar. Efter (Trautz, 2009)

För enkla geometrier och lastfall är det relativt enkelt att tänka ut hur och vart en eventuell förstärkning ska placeras. För mer komplexa fall kan man utgå från huvudspänningarna. Krafterna som går i strut-and-tie modellen kan beräknas med antingen manuella metoder eller enkla ingenjörsprogram (Trautz, 2009) såsom CAST (Computer Aided Strut- and- Tie). Har man krafterna är dimensioneringen av förstärkningen enkel. Om det inte finns någon risk för sprött brott av t.ex. sidospänningar eller skjuvspänning kan man fördela krafterna från ”fackverket” till både förstärkningen och träet (Trautz, 2009).

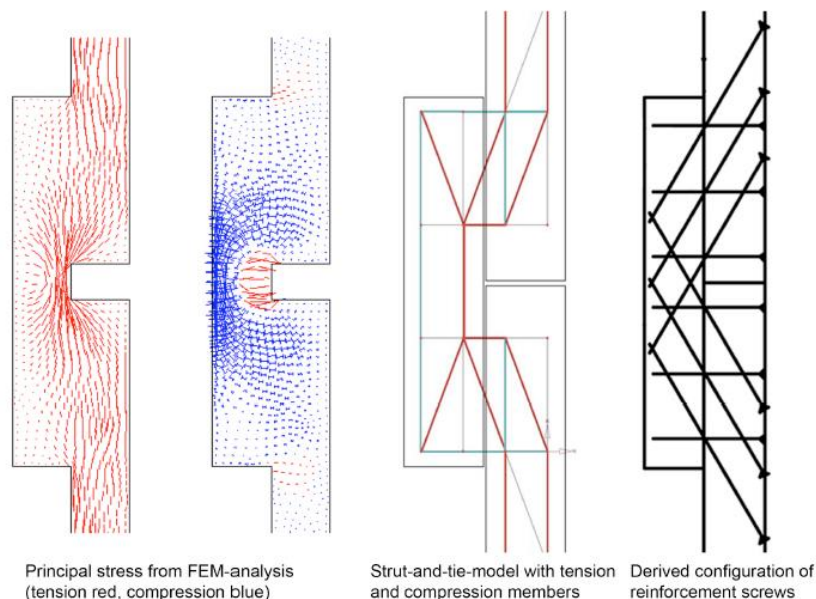
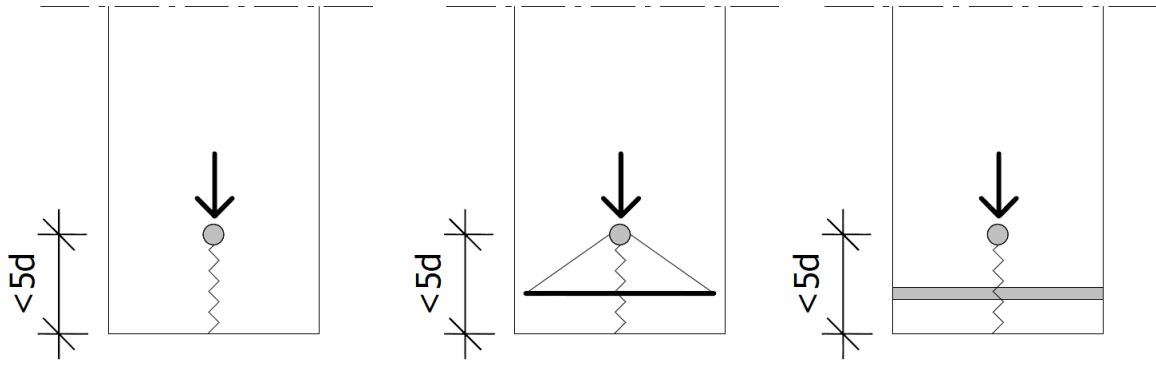


Figure 4: Development of a screw layout using FEM-analysis and strut-and-tie-model

Figur 2.38 – Hur man armerar med skruv kring en skarv (Graph: Trautz, M., *Self-tapping screws as reinforcement for timber structures*, page 5, 2009)

Då en kraft överstiger träets hållfastighet i aktuell riktning eller ifall avståndet till kanten är för liten kan träet börja spricka såsom figur 2.39 (t.v.) visar. En analogi med strut-and-tie i betongprojekteringen visas i samma figur (mitten). Sprickbildningen kan förhindras genom att förstärka med exempelvis en skruv såsom figur 2.39 (t.h.). Genom att förstärka på detta sätt uppvisar träet linjärelastiska egenskaper.



Figur 2.39 – Belastning av en skruv i trä

3 Metod

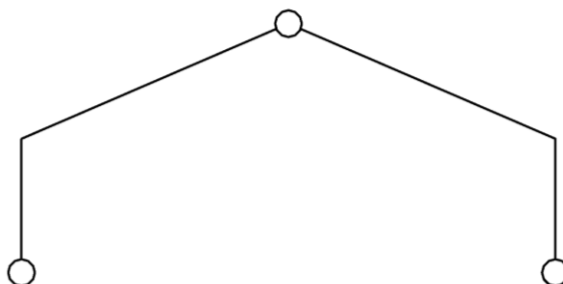
Målet med denna rapport är framförallt att undersöka om dimensionering enligt gällande rekommendationer är tillräckliga för ett ramhörn. Om inte undersöks förstärkningsbehovet samt utförandet av förstärkning hos inlimmade skruvar. Som tidigare nämnt används inlimmade skruvar i klimatklass 1 och 2 – inomhuskonstruktioner. Inlimmade skruvar används för tillfället i konstruktioner med låga tvärkrafter då man ännu inte har full kontroll kring tvärkraftskapaciteten hos anslutningstypen. Då trä, se tabell 2.10, är ett ortotropt material med låg hållfasthet i riktningar andra än parallellt fiberriktningen kan förstärkning vara ett sätt att komma runt problemet så att anslutningstypen kan användas i tillämpningar med högre tvärkraft.

3.1 Fallstudie

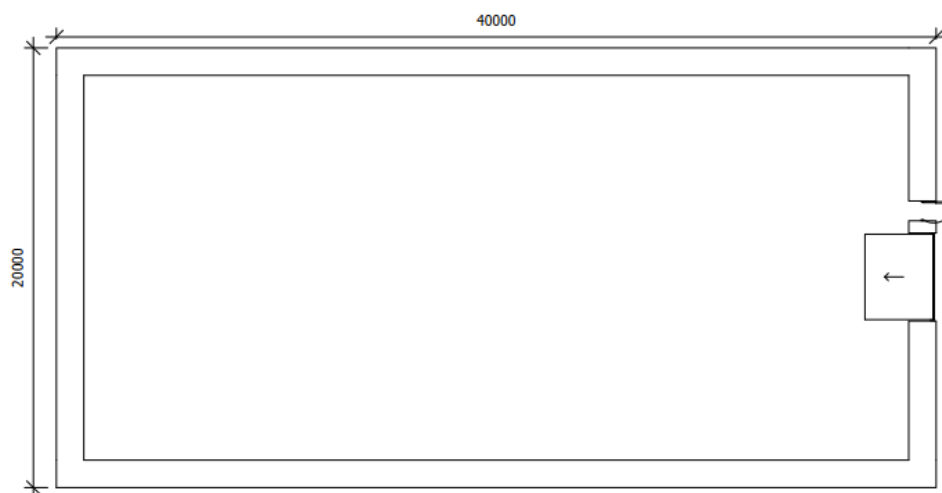
För att återspegla användningsområdet för inlimmade skruvar på ett verklighetstroget sätt dimensioneras en enkel lagerhall i ett plan enligt Eurokod. Lagerhallen har måtten 20x40x8m (BxLxH), se figur 3.2–3.4, och är belägen i Haparanda, Sverige, därav antas terrängtypen vara III. Installationer, såsom ventilation, ljussättning och andra fasta installationer fästs på taket vilket medför en egentyngd, $G_{egentyngd} = 0,5 \text{ kN/m}^2$. Vidare är c/c för stomsystemet 4m. Det statiska systemet som gäller för lagerbyggnaden visas i figur 3.1. För att förhindra vippning stagas takbalkarna med takåsar. Användning av takåsar resulterar, förutom att hålla upp taket, även i att reducera vippninglängden. Takåsarna förankras i takbalkarna för att förhindra förskjutningen i längdriktningen längs takets plan. Av den anledningen blir $k_{crit} = 1$ vid beräkning av momentkapaciteten. I tabell 3.1 finns geometriska data som gäller för lagerbyggnaden.

Tabell 3.1 - Geometrisk indata

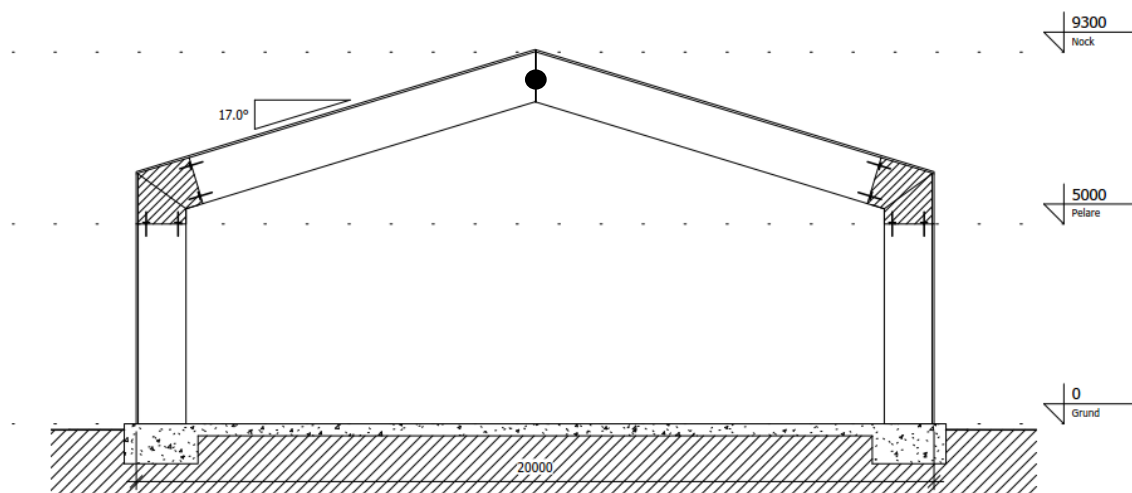
Geometri	
α	Ca 17°
B	20 m
L	40 m
H	8 m
h_{pelare}	5 m
l_{balk}	10,44 m



Figur 3.1 - Lagerhallens statiska system



Figur 3.2 – Planritning av lagerhallen



Figur 3.3 – Sektionsritning av lagerhallen



Figur 3.4 – 3D rendering på lagerhallen

Lutningen på lagerbyggnaden resulterar i att det enklaste fallet är användning av stålhubb för att sammankoppla elementen, se figur 2.14 (bilden i mitten) för principskiss. Detta innebär enkel montering och uppresning då limträbalkarna & pelarna förses med inlimmade skruvar vid produktion och kan transporteras monterade till bygget. På plats kopplas elementen ihop med en stålhubb och muttrarna dras åt för att säkerställa kopplingen.

Indata för lastberäkningen för lagerhallen visas i tabell 3.2.

Tabell 3.2 – Indata laster. Enligt EKS 1 & SS-EN 1991-1-4

Laster	[kN/m ²]
Snölast, s_k	3
Vindlast, q_p	0,5
Egentyngd, $G_{egentyngd}$	0,5

Programmet Ramanalys från StruSoft används för att erhålla snittkrafter och moment för lagerhallen. Resultatet redovisas i tabell 3.3. Utförliga beräkningar och snitt redovisas under bilaga I. Dimensionerande belastning erhålles då snölasten är huvudlast.

Tabell 3.3 - Utdata dimensionerade laster. Sammanställning från Ramanalys, se bilaga I

Laster – Snö som huvudlast				
Element	Nod	M [kNm]	V [kN]	N [kN]
Balk 2	5	0	30,10	105,42
	4	562,74	137,90	155,82
Pelare 2	3	0	115,47	176,86
	4	562,74	109,62	176,86

Dimensioneringsvärde för hållfasthet i brottgränstillståndet beräknas enligt:

$$f_d = \frac{k_{mod} \cdot f_k}{\gamma_M} \quad 3.1$$

där,

f_d = Dimensioneringsvärde

f_k = Karakteristiskt värde

k_{mod} = Omräkningsfaktor med hänsyn till inverkan av fukt och lasternas varaktighet

γ_M = Partialkoefficient för material, $\gamma_M = 1,25$ för limträ enligt

(Isaksson & Mårtensson, Byggkonstruktion - Regel- och formelsamling, 2010)

f_d skall vidare multipliceras med faktor k_h som tar hänsyn till storlekseffekten. k_h beaktas endast vid böjning och drag för tvärsnittshöjder mindre än 600mm. Tvärsnittshöjden, h anges i [mm].

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1}, 1,2 \right\} \quad 3.2$$

I vårt fall kommer vi anta en balkhöjd på 810mm vilket resulterar i att hänsyn till storlekseffekt ej behöver göras, $k_h=1$.

För limträ är partialkoefficienten, $\gamma_M=1,25$ (SS-EN 1995-1-1, 2.4.1). Detta ger dimensionerade hållfastheter i högra spalten i tabell 3.4.

Tabell 3.4 - Karakteristiska och dimensionerande hållfastheter för GL 32h

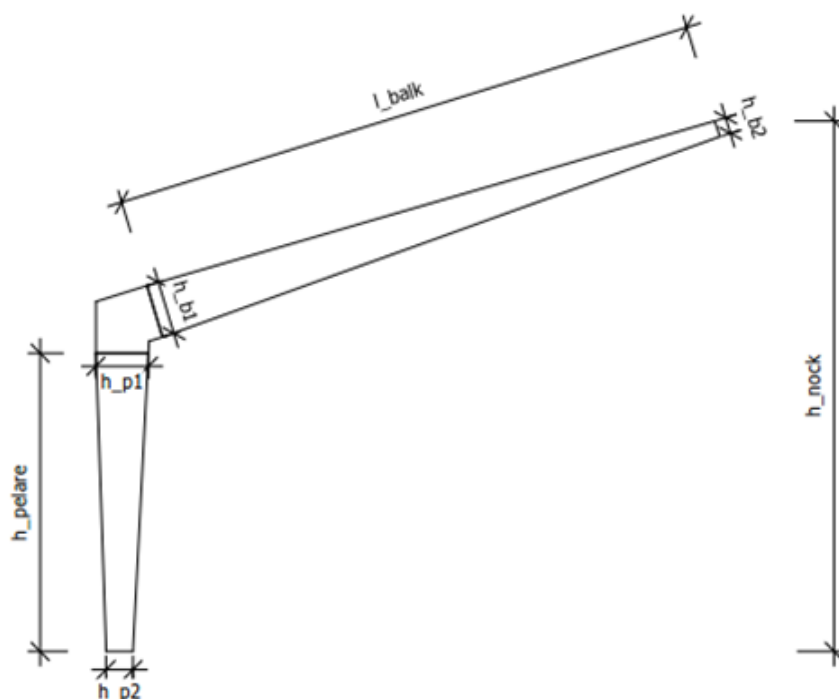
Karakteristiska hållfasthetsvärden [MPa]		Dimensionerade hållfasthetsvärden [MPa]	
f_{mk}	32	f_{md}	20,48
f_{tk}	22,5	f_{td}	14,4
$f_{t,90k}$	0,5	$f_{t,90d}$	0,32
f_{ck}	29	f_{cd}	18,56
$f_{c,90k}$	3,3	$f_{c,90d}$	2,11
f_{vk}	3,5	f_{vd}	2,24
$E_{0,05}$	11100		

Tvärsnittsdata i tabell 3.5 kommer från iterativa beräkningar där ursprungsdata var antagna värden. Nock och pelarfot antogs ha mindre dimensioner från början då de utsätts för mindre krafter totalt sett än i nod 4.

Tabell 3.5 - Dimensionerande element i [mm] i lagerhallen. Utförliga beräkningar redovisas under bilaga II

	Grund (h x b)	Ramhörn (h x b)	Nock (h x b)
Pelare	300x300	810x300	-
Balk	-	810x300	200x300

De iterativa beräkningarna leder till att pelare och balk ser ut som i figur 3.4.



Figur 3.5 – Element efter optimering

Om inget annat anges används formler från EC5 och tidigare givna formler i kapitel 2.

3.1.1 Dimensionering av förbandet i ramhörnet

3.1.1.1 Tvärkraft i limträ

Inledningsvis görs en kontroll av tvärsnitten i ramhörnet med avseende på tvärkraft enligt:

$$V_{Rd} = \frac{A \cdot f_{vd}}{1,5} k_{crit} \quad 3.3$$

där,

V_{Rd} = Dimensionerande tvärkraftskapacitet [N]

f_{vd} = Dimensionerande längsskjuvning [MPa]

A = Tvärsnittsarea [m²]

k_{cr} = Beaktan av sprickor vid momentbelastat tvärsnitt. För limträ är $k_{cr} = 0,67$. Effektiv bredd används för uträkning av arean, A enligt $b_{eff} = k_{cr}b$. Vid icke momentbelastat tvärsnitt sätts $k_{crit} = 1,0$.

3.1.1.2 Nod 4

Pelare

Pelare i nod fyra utsätts för ett moment, vilket innebär att k_{crit} ska beaktas. Det resulterar i att arean, $A_{eff} = k_{crit}bh$

$$V_{Rd} = \frac{A \cdot f_{vd}}{1,5} k_{crit} = \frac{(0,300 \cdot 0,810) \cdot 2,24MPa}{1,5} 0,67 = 243,13 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{109,62}{243,13} = 0,4508 \rightarrow \approx 46\%$$

Balk

Även balken i nod fyra utsätts för ett moment vilket innebär att k_{crit} ska beaktas.

$$V_{Rd} = \frac{A \cdot f_{vd}}{1,5} k_{crit} = \frac{(0,300 \cdot 0,810) \cdot 2,24MPa}{1,5} 0,67 = 243,13 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{137,9}{243,13} = 0,5672 \rightarrow \approx 57\%$$

3.1.1.3 Förband

Först ska förbandet dimensioneras enligt EC 5 med rekommendationer från typgodkännandet (Svensson & Lundqvist, 2012).

Sex olika diametrar på skruvarna beräknas. Nämligen $d=10\text{mm}$, $d=12\text{mm}$, $d=16\text{mm}$, $d=20\text{mm}$, $d=24\text{mm}$ och $d=30\text{mm}$. Dessa sex jämförs sedan. Beräkningarna för $d=16$ redovisas utförligt medan skruvar med resterande diameterstorlek endast redovisas i tabellformat under resultat. Vidare är vinkeln mellan kraftriktningen och fiberriktningen, $\alpha 90^\circ$.

Indata för förbandsberäkningar redovisas i tabell 3.6

Tabell 3.6 - Indata för beräkningar. (Isaksson & Mårtensson, Byggkonstruktion - Regel- och formelsamling, 2010)

	Skruv		Trä	
Hållfasthetsklass	4.6	8.8		Barrträ (GL 32h)
Sträckgräns, f_{yb} [MPa]	240	640	ρ_k [kg/m ³]	430
Brottgräns, f_{ub} [MPa]	400	800	k_{mod}	0,9
			$\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$	1

Hålkantshållfastheten för skruvar ≤ 30 mm beräknas enligt:

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 - 0,01d)\rho_k = 0,082(1 - 0,01 \cdot 16)430 = 29,62 \text{ MPa}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d = 1,35 + 0,015 \cdot 16 = 1,59$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{29,62}{1,59 \cdot \sin^2 90 + \cos^2 90} = 18,63 \text{ MPa}$$

Hålkantshållfastheten reduceras med 90% enligt typgodkännandet se s 26. Detta ger då att hålkantshållfastheten för inlimmade skruvarna blir $18,63 \cdot 0,10 = 1,86 \text{ MPa}$

$$M_{y,Rk} = 0,3f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 800 \text{ MPa} \cdot 16^{2,6} = 324282,26 \text{ Nm}$$

Minsta tillåtna inlimningslängd beräknas enligt:

$$l_{min} = \max \left\{ \frac{0,5 \cdot d^2}{10 \cdot d} \right\} = \max \left\{ \frac{0,5 \cdot 16^2}{10 \cdot 16} \right\} = \max \left\{ \frac{128}{160} \right\} = 160 \text{ mm}$$

Dimensionering av förbanden görs enligt ”trä-stål förband” med tjock plåt i ett skjvningsplan. Vidare försummas linvekan.

$$\begin{aligned}
F_{v,Rk} &= \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right) + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. \\
&= \min \left\{ \begin{array}{l} 1,86 \cdot 160 \cdot 16 \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 324282,26}{1,86 \cdot 16 \cdot 160^2}} - 1 \right) + 0 \\ 2,3 \sqrt{324282,26 \cdot 1,86 \cdot 16} + 0 \end{array} \right. \\
&= \min \left\{ \begin{array}{l} 4,77 \text{ kN} \\ 4,40 \text{ kN} = 4,40 \text{ kN} \\ 7,15 \text{ kN} \end{array} \right.
\end{aligned}$$

Om inlimningslängen istället ökas till 510 mm och högre balanseras kapaciteten, $F_{v,Rk}$ kring 7,15 kN. Detta innebär att brottmoden för två flytleder i skruven är uppåt begränsande.

Skulle förbandet dimensioneras utan en stålhubb som resulterar i att stål-trä ekvationerna i EC måste användas får man begränsad kapacitet, ungefär hälften av kapaciteten. Se nedan för en jämförelse.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1,k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} \cdot f_{h,1,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right. =$$

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned}
 & \frac{1,86 \cdot 160 \cdot 16}{1+1} \left[\sqrt{1 + 2 \cdot 1^2 \left[1 + \frac{160}{160} + \left(\frac{160}{160} \right)^2 \right] + 1^3 \left(\frac{160}{160} \right)^2} - 1 \left(1 + \frac{160}{160} \right) \right] \\
 & 1,05 \cdot \frac{1,86 \cdot 160 \cdot 16}{2+1} \left[\sqrt{2 \cdot 1(1+1) + \frac{4 \cdot 1(2+1)324282,26}{1,86 \cdot 16 \cdot 160^2}} - 1 \right] \\
 & 1,05 \cdot \frac{1,86 \cdot 160 \cdot 16}{1+2 \cdot 1} \left[\sqrt{2 \cdot 1^2(1+1) + \frac{4 \cdot 1(1+2 \cdot 1)324282,26}{1,86 \cdot 16 \cdot 160^2}} - 1 \right] \\
 & 1,15 \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{1+1}} \sqrt{2 \cdot 324282,26 \cdot 1,86 \cdot 16}
 \end{aligned} \right\} \\
 & = \min \begin{cases} 4,77 \text{ kN} \\ 4,77 \text{ kN} \\ 1,98 \text{ kN} \\ 3,37 \text{ kN} \\ 3,37 \text{ kN} \\ 6,16 \text{ kN} \end{cases} = 1,98 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

För trä-trä förband krävs en inlimningslängd på 540 mm och högre för att balansera kapaciteten, $F_{v,Rk}$ kring 6,16 kN

Maximalt antal skruvar som får plats i höjddled beräknas enligt:

$$n_{skruv/rad} = \frac{h - (2,5 + 2,5)d}{5d} + 1 = \frac{810 - (2,5 + 2,5)16}{5 \cdot 16} + 1 = 10,125 \rightarrow 10 \text{ skruvar}$$

Maximalt antalet rader beräknas enligt:

$$n_{kolumner} = \frac{b - 2 \cdot 2,5d}{5d} + 1 = \frac{0,300 - 2 \cdot 2,5 \cdot 16}{5 \cdot 16} + 1 = 3,75 \rightarrow 3 \text{ st kolumner}$$

$$F_{vk} = F_{v,k} \cdot N_{förbindare} \cdot N_{skär} \cdot N_{rader} = 4,40 \text{ kN} \cdot 10 \text{ st} \cdot 1 \text{ st} \cdot 3 \text{ st} = 132,125 \text{ kN}$$

$$F_{vd} = k_{mod} \frac{F_{vk}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{132,125}{1,25} = 95,13 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{F_{vd}} = \frac{137,9}{95,13} = 1,4496 \rightarrow \approx 145\%$$

Alltså överskrider belastningen tvärkraftskapaciteten med 45%. Dimensionering är alltså inte möjlig enligt EC med de valda limträdimensionerna.

F_{vk} för det balanserade fallet (inlimningslängd > 510 mm) blir då $7,15 \cdot 10 \cdot 3 = 214,5 \text{ kN}$ vilket resulterar i att utnyttjandegraden blir $137,9/214,5 \rightarrow 64\%$, vilket är ok!

Sammanfattning av resultaten för $d=16$ visas i tabell 3.7.

Tabell 3.7 – Resultat för d=16mm

d=16 mm	
$f_{h,0,k}$ [MPa]	29,62
$f_{h,\alpha,k}$ [MPa]	1,86
k_{90} [-]	1,59
$M_{y,Rk}$ [Nm]	324 282,26
l_{min} [mm]	160
$F_{v,Rk}$ (c) [kN]	4,77
$F_{v,Rk}$ (d) [kN]	4,40
$F_{v,Rk}$ (e) [kN]	7,15
$n_{skruv/rad}$ [st]	10
n_{rader} [st]	3
F_{vk} [kN]	132,125
F_{vd} [kN]	95,13
V_{Ed}/F_{vd} [%]	145

Dimensionering för tvärkraft enligt limträhandboken (Carling, 2008).

$$R_{vk} = 12d^2 \sqrt{\frac{f_{yk}}{240}} = 12 \cdot 16^2 \sqrt{\frac{640}{240}} = 5,01 \text{ kN/skruv}$$

Bärförmågan vid tvärkraft enligt Limträhandboken är per skruv. Total bärförmåga fås genom:

$$R_{vk,total} = R_{vk,total} \cdot N_{förcbindare} \cdot N_{skär} \cdot N_{rader} = 5,01 \cdot 10 \cdot 1 \cdot 3 = 150,497 \text{ kN}$$

$$R_{vd} = k_{mod} \frac{R_{vk,total}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{150,50}{1,25} = 108,36 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{R_{vd}} = \frac{137,9}{108,36} = 1,27 \rightarrow \approx 127\%$$

Dimensionering enligt Limträhandboken är inte heller tillräcklig.

3.1.1.4 Dragkraft

Dragkraften för en skruv är enligt EC, där A_s för M16=157mm²:

$$N_{pl,Rd} = \frac{f_y \cdot A_s}{\gamma_{M0}} = \frac{640 \text{ MPa} \cdot 157 \text{ mm}^2}{1,0} = 100,48 \text{ kN}$$

För samtliga dragbelastade skruvar:

$$N_{pl,Rd,totalt} = N_{pl,Rd} \cdot \frac{N_{skruvar}}{2} \cdot N_{rader} = 100,48 \cdot \frac{10}{2} \cdot 3 = 1507,2 \text{ kN}$$

Man dividerar ovanstående ekvation med två för att hälften av skruvarna är dragbelastade och andra hälften är tryckbelastade. Se figur 3.7 för en schematisk bild över skruvarnas placering.

Kvoten blir:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{770,88}{1507,2} = 0,5115 \rightarrow \approx 51\%$$

Enligt typgodkännande (Anon., Tillverkningsbeskrivning, 2012) gäller för limfogen:

$$d_{ekv} = \min \left\{ \frac{1,15d}{d+1} = \min \left\{ \frac{1,15 \cdot 16}{16+1} = \min \left\{ \frac{18,4}{17} = 1,08 \right. \right. \right.$$

$$\omega = \frac{0,016 \cdot l_i}{\sqrt{d_{ekv}}} = \frac{0,016 \cdot 160}{\sqrt{17}} = 0,62$$

$$R_{td} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,6 \frac{f_{bu,k} \cdot A_s}{1,2} \\ \frac{\pi \cdot d_{ekv} \cdot l_i \cdot f_{ax,k} \cdot \frac{\tan \omega}{\omega} \cdot \kappa_{mod} \cdot \kappa_1}{1,25} \end{array} \right.$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 0,6 \frac{800 \cdot 157 \text{mm}^2}{1,2} \\ \frac{\pi \cdot 16 \cdot 160 \cdot 5,5 \cdot \frac{\tanh 0,62}{0,62} \cdot 0,9 \cdot 0,8}{1,25} \end{array} \right.$$

$$= \min \left\{ \begin{array}{l} 62,8 \text{kN} \\ 22,65 \text{kN} \end{array} \right. = \mathbf{22,65 \text{kN}}$$

Detta innebär att limfogen går till brott innan skruven, vilket är negativt då det innebär ett sprött brott!

För inlimningslängd på 510 går istället skruven till brott innan limfogen enligt:

$$R_{td} = \min \left\{ \begin{array}{l} 62,8 \text{kN} \\ 81,21 \text{kN} \end{array} \right. = \mathbf{62,8 \text{kN}}$$

Då skruven går till brott innan limmet innebär det att man har ett segt brott, vilket föredras!

Enligt Limträhandboken (översta ekvationen avser limfogen och understa ekvationen avser skruven):

$$R_{td} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{10 \cdot d \cdot L \cdot \kappa_r}{\gamma_n} \\ \frac{0,5 \cdot A_{net} \cdot f_{buk}}{\gamma_n} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{10 \cdot 16 \cdot 160 \cdot 0,8}{1,0} \\ \frac{0,5 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot 800}{1,0} \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 16,38 \text{ kN} \\ 80,42 \text{ kN} \end{array} \right. = \mathbf{16,38 \text{ kN}}$$

$$R_{td,total} = 16,38 \cdot \frac{10}{2} \cdot 3 = 245,7 \text{ kN}$$

För ökade inlimningslängden, 510mm, fås $R_{td,total} = 62,8 \text{kN} \cdot 15 = 942 \text{kN}$

Den totala utdragningskapaciteten divideras med två för hälften av skruvarna belastas av en dragkraft och hälften av skruvarna belastas med en tryckkraft.

3.1.1.5 Samtida tvärkraft och dragkraft

För fallet med minimal inlimningslängd:

$$\left(\frac{F_{ax,d}}{R_{ax,d}}\right)^2 + \left(\frac{F_{tr,d}}{R_{tr,d}}\right)^2 = \left(\frac{155,8}{245,7}\right)^2 + \left(\frac{137,9}{108,4}\right)^2 = 1,99 > 1 \quad 3.4$$

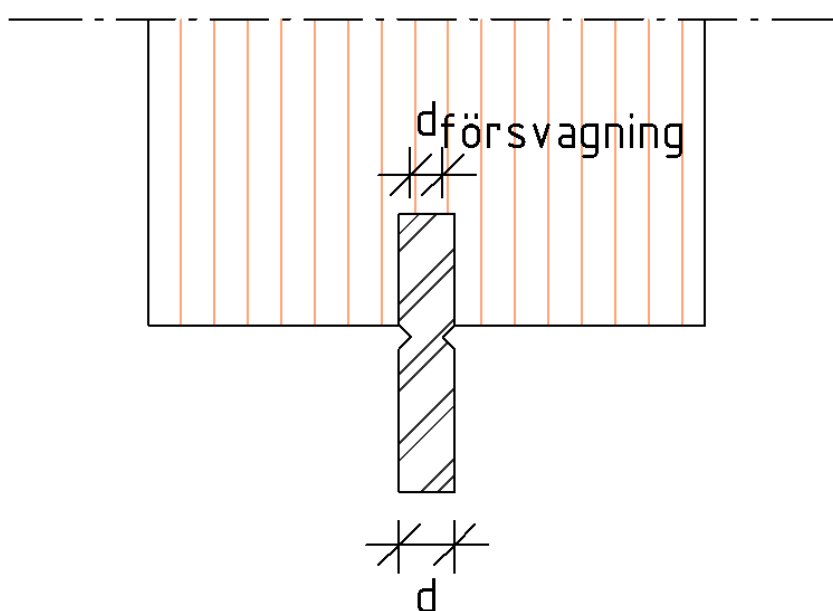
För fallet med ökad inlimningslängd, 510mm:

$$\left(\frac{155,8}{942}\right)^2 + \left(\frac{137,9}{108,4}\right)^2 = 1,64 > 1$$

Då värdet är högre än 1,0 är förbandet EJ OK med avseende på tvär- och dragkraft. Det som får förbandet att falla är tvärkraftskapaciteten.

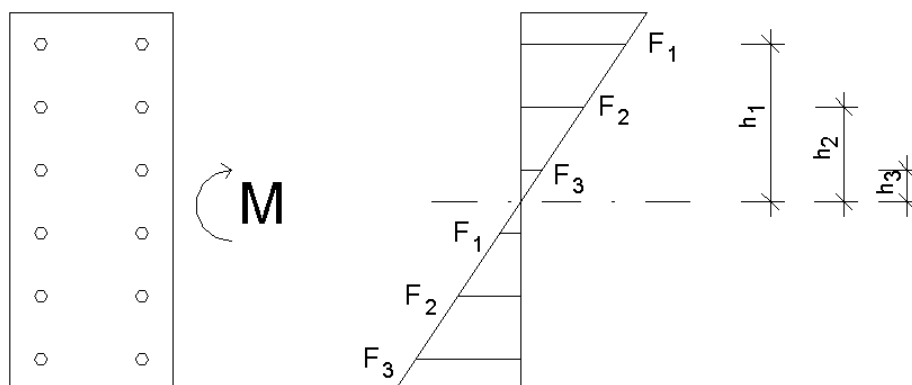
3.1.1.6 Moment

Momentet som uppkommer i ramhörnet måste kunna tas upp av förbandet för att säkerställa att byggnaden inte fallerar. Det innebär att skruvarna även måste dimensioneras för momentet. Detta görs genom att dela upp momentet i verkande tryck- och dragkrafter som sedan används för att dimensionera skruvarna. Till en början räknades på skruvar med hållfasthetsklass 8.8 med anledningen att de är vanligare. Detta resulterade i att limbrott skedde innan dragbrott i skruven. För att undvika att sprött brott sker kan man exempelvis använda skruvar med lägre hållfasthetsklass eller introducera en defekt (även lokal försvagning). I detta fall krävdes en kombination av båda. Denna approach leder till att full plasticering kan utnyttjas. Vanligtvis håller man sig inom att förminska diametern med 10% - 20% (konsultation med R.Crocetti, 2014). Försvagningen orsakas vid tillverkning av skruvarna, figur 3.6 visar principskiss.



Figur 3.6 – Lokal försvagning på skruven.

Då plasticering inte uppnås gäller:



Figur 3.7 – Principskiss för då plasticering ej uppnås.

$$M_x = (F_1 \cdot h_1 + F_2 \cdot h_2 + F_3 \cdot h_3)2 \quad 3.5$$

Tvåan i formeln uppkommer pga. tryck- och dragkrafterna på vardera sida är lika stor.

Genom trigonometri (likformiga trianglar) fås:

$$\frac{F_1}{h_1} = \frac{F_2}{h_2} \rightarrow F_2 = F_1 \cdot \frac{h_2}{h_1} \quad 3.6$$

$$\frac{F_1}{h_1} = \frac{F_3}{h_3} \rightarrow F_3 = F_1 \cdot \frac{h_3}{h_1} \quad 3.7$$

Då vi har 10 skruvar per kolumn i 3 rader fås F_4 och F_5 på liknande sätt.

Insättning ger:

$$M_x = 2 \cdot F_1 \left(h_1 + \frac{h_2^2}{h_1} + \frac{h_3^2}{h_1} + \frac{h_4^2}{h_1} + \frac{h_5^2}{h_1} \right) 3rader \rightarrow F_1 = \frac{M_x}{2 \left(h_1 + \frac{h_2^2}{h_1} + \frac{h_3^2}{h_1} + \frac{h_4^2}{h_1} + \frac{h_5^2}{h_1} \right) 3rader} = \quad 3.8$$

$$\frac{562,74}{2 \left(0,365 + \frac{0,285^2}{0,365} + \frac{0,205^2}{0,365} + \frac{0,125^2}{0,365} + \frac{0,045^2}{0,365} \right) 3rader} = 124,88 \text{ kN} \approx 124,9 \text{ kN}$$

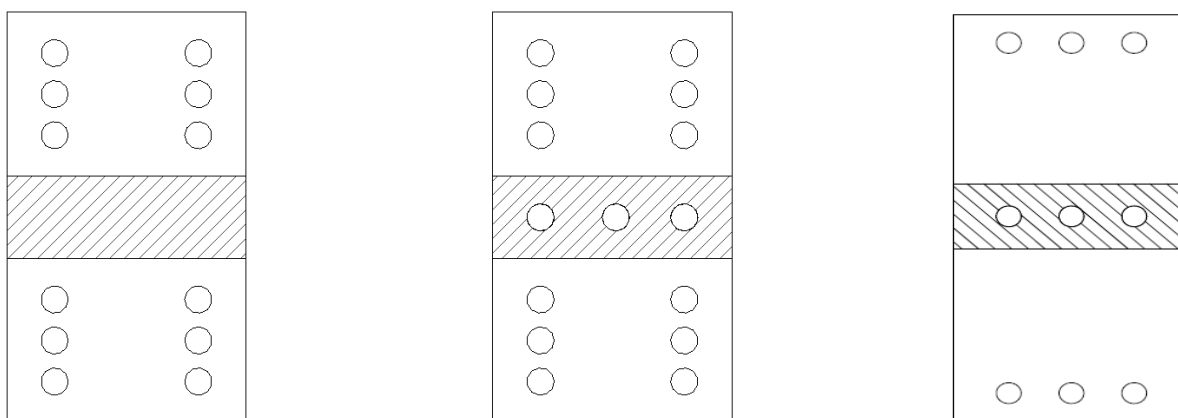
Där F_1 är utdragskraften, alternativt tryckkraften.

På samma sätt som i ekvation 3.8 fås krafterna F_2 - F_{10} som redovisas i tabell 3.8.

Tabell 3.8 - Krafterna i skruvarna vid elastisk böjning.

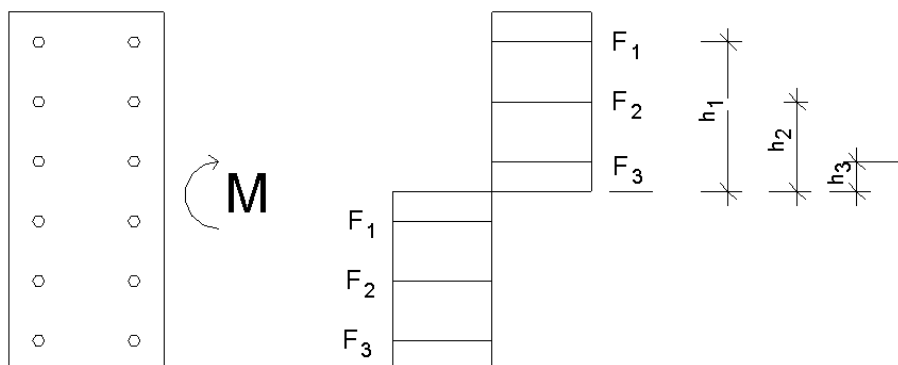
Skruv	Kraft [kN]
F ₁	124,9
F ₂	97,5
F ₃	70,1
F ₄	42,8
F ₅	15,4
F ₆	- 15,4
F ₇	- 42,8
F ₈	- 70,1
F ₉	- 97,5
F ₁₀	- 124,9

Nackdelen med den linjärelastiska modellen, speciellt då man är tvungen att ha många skruvar, är att de innersta skruvarna inte tar upp någon kraft pga. den nästintill obefintliga hävarmen. Det skulle av den enkla anledningen innebära att de innersta skruvar inte behövs, se figur 3.8 (t.v.) där det skrafferade området markerar vart skruvar inte behövs för att ta upp moment. Skulle man ha en stor tvärkraft kan det skrafferade området användas för att öka tvärkraftskapaciteten. Det mest optimerade utförandet är enligt den högra bilden i figur 3.8 där skruvarna har största möjliga hävarm. Dock kan det vara svårt att uppnå liknande utformning om krafterna är stora och tvärsnittet är litet.



Figur 3.8 – Olika lösningar på hur man kan ta upp tvärkrafter och moment.

För full plasticering gäller:



Figur 3.9 – Schematisk figur över full plasticering av skruvarna.

Vid full plasticering är krafterna F_1 , F_2 & F_3 lika. Detta ger för fallet med 10 skruvar per kolumn i 3 rader:

$$M_X = F_1(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5)3 \rightarrow F_1 = \frac{M_X}{(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5)3} = \frac{562,74}{3(1,025)} = 183,0 \text{ kN}$$

$$F_{d,total} = F_1 \cdot N_{skruvar \text{ i drag}} = 183,0 \cdot 5st \cdot 3rader = 2745,07 \text{ kN}$$

Tabell 3.9 - Hävarmsavstånd

Hävarmsavstånd	[mm]
h1	$h/2 - 2,5d = 365$
h2	$h1 - 5d = 285$
h3	$h2 - 5d = 205$
h4	$h3 - 5d = 125$
h5	$h4 - 5d = 45$
$\Sigma (h1-h5) =$	1,025

Detta innebär att de femton skruvarna som utsätts för drag har kapaciteten att ta upp 2745,07 kN, vilket är större än den utsatta dragkraften på 155,8 kN. Full plasticering av skruvarna ger:

$$\left(\frac{F_{ax,d}}{R_{ax,d}}\right)^2 + \left(\frac{F_{tr,d}}{R_{tr,d}}\right)^2 = \left(\frac{155,8}{2745,07}\right)^2 + \left(\frac{137,9}{108,4}\right)^2 = 1,62 > 1$$

Vilket även det är otillräckligt då tvärkraftskapaciteten är för låg. Dock minskas kvoten en aning jämfört med tidigare (se ekvation 3.4). Även här är tvärkraftskapaciteten begränsande.

3.2 Parameterstudie

Resultaten från fallstudien tyder på att en dimensionering av förbandet är mycket svår, om inte omöjlig med gällande normer och rekommendationer. Av den anledningen kräver förbandet förstärkning för att undersöka ifall dimensionering då är möjlig. Innan man kan

förstärka förbandet krävs en parameterstudie för att ta reda på vilka parametrar som är avgörande i dimensioneringen. Vidare krävs en förståelse av förbandets beteende samt vilka parametrar som är mest avgörande och vilka som är mindre viktiga i detta sammanhang. Det sistnämnda är viktigt då en parameterstudie kan upprättas för tusentals parametrar som kan påverka beteendet. Då är det viktigt att kunna avgränsa sig till de som påverkar beteendet mest.

Modelleringen gjordes i ABAQUS CAE version 6.13, ett program utvecklat av Dassault Systemes, för att uppskatta spänningarna och krafterna i anslutningen. Arbetet i ABAQUS görs i två huvuddelar. Den första delen är uppritning av geometrier, tilldelning av materialegenskaper, laster, upplagsvillkor och även elementindelning och meshing. Den andra delen i ABAQUS är analysering av simuleringen. Del ett redovisas härnedan medan del två redovisas i resultat under kapitel fyra i denna rapport.

Vidare delas arbetet i ABAQUS upp i två faser. Fas ett avser arbetet för att kunna bilda en uppfattning om förbandets egenskaper och fas två avser resterande arbete som kan användas i resultatdelen.

3.2.1 Förståelse av förbandets egenskaper – Fas ett

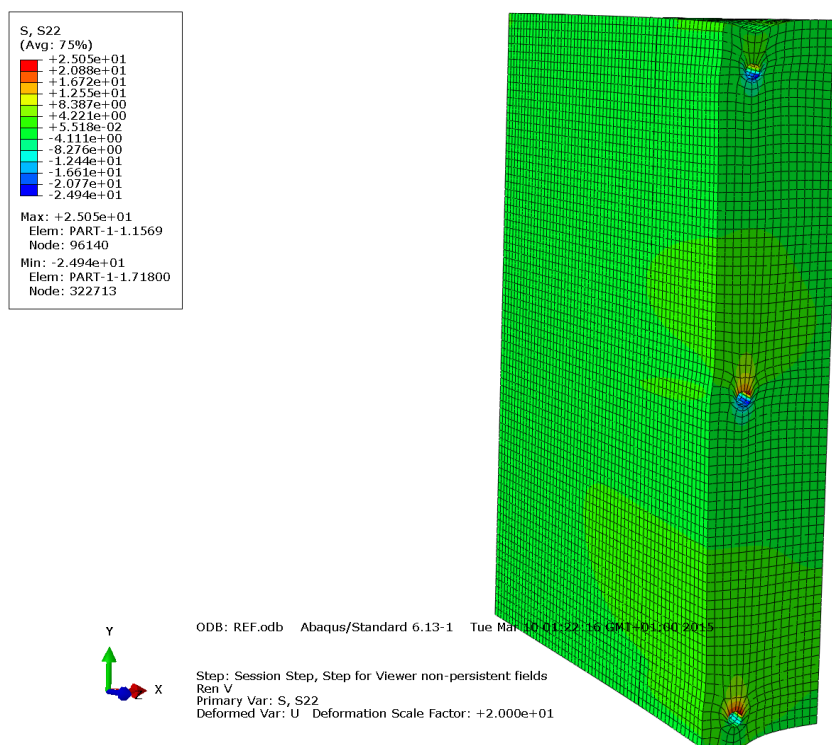
Vid ingången till modelleringen fanns många frågetecken som behövdes redas ut. Frågor var t.ex.:

- Hur ska limmet modelleras?
- Vilka upplagsvillkor är mest realistiska?
- Hur ska belastningen ske?
- Vilka element ska användas? Exempelvis skaelement, 3d solider, linjära elementtyper eller kvadratiska elementtyper osv.
- Hur och vad resultaten ska visa?
- Är tvärkraftsfördelningen konvex eller konkav?

Av den anledningen påbörjades modelleringen med att förstå sig på förbandets egenskaper.

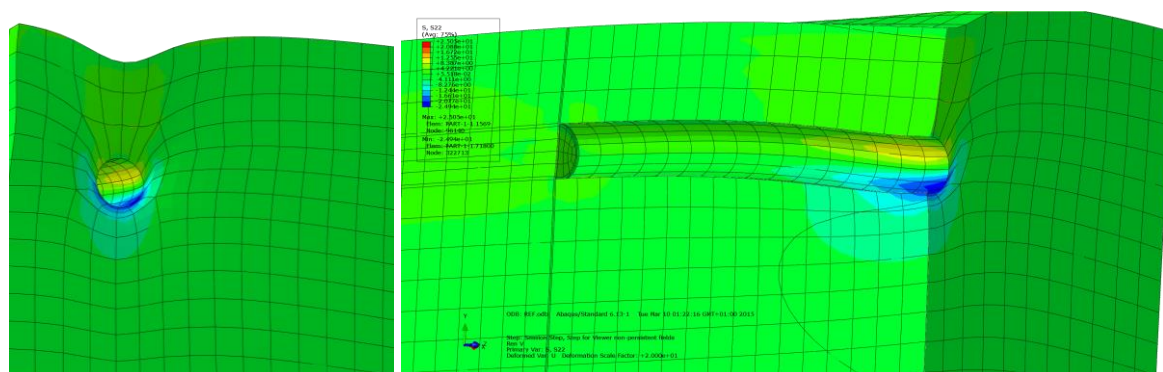
Det mesta av lärdomarna från denna underrubrik användes i senare modellering som ligger grund till resultaten, t.ex. kopplingen där lasterna sattes.

Ett referensfall introducerades för att möjliggöra en lättare jämförelse vid ändringar av parametrar. Detta referensfall beskrivs närmare under metoden för parameterstudien.

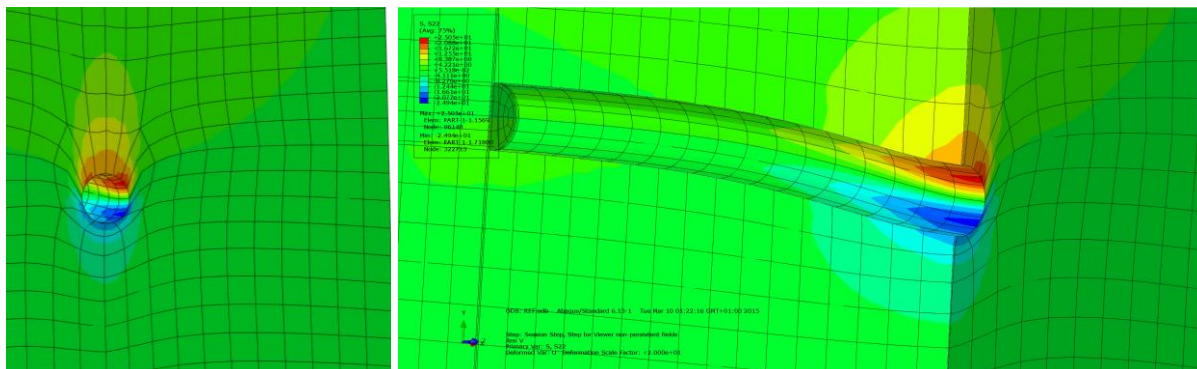


Figur 3.10 - Referensfallet där antalet skruvar är tre

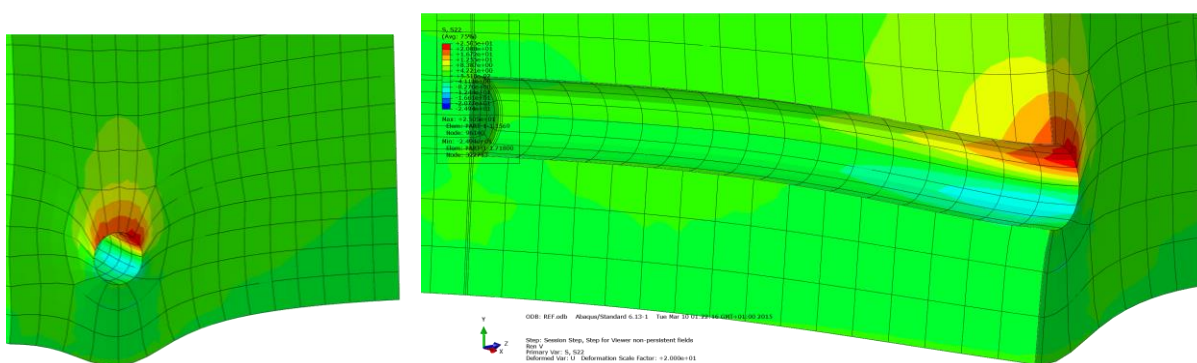
Utifrån modelleringen i fas ett kunde man klart och tydligt observera var maximala- och minimala spänningar uppstod. Det ledde till tidsbesparing då man inte behöver ta ut spänningar i $2 \cdot n_{\text{skruvar}}$ (tryck- och dragspänningar på varje skruvs underkant respektive överkant). Istället räckte det med att visa tryckspänningar i överkant av balken och dragspänningar i underkant av balken då dessa två lägen gav max- respektive minvärden, se figurer 3.10 – 3.12.



Figur 3.11 – Tryck- och dragspänningar i överkanten av balken för referensfallet.

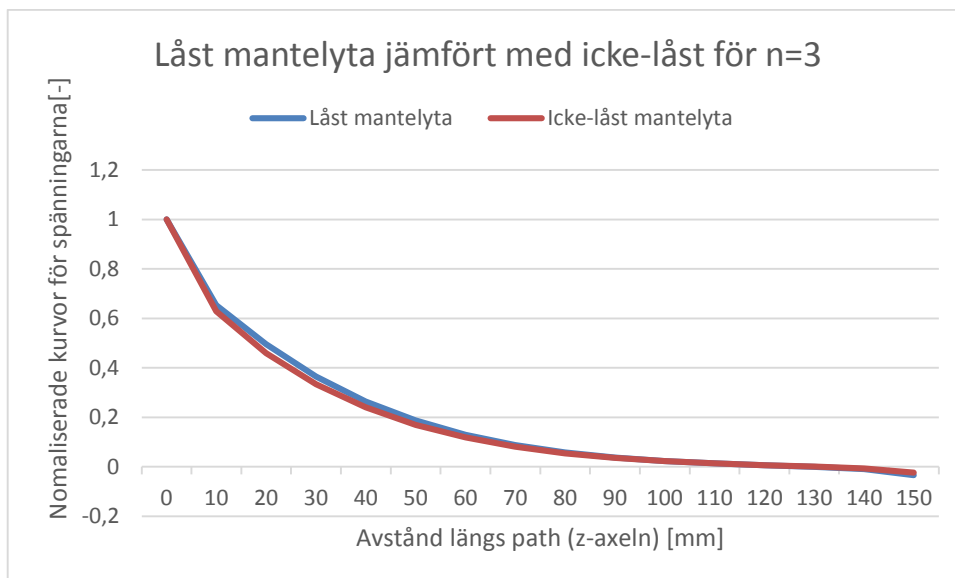


Figur 3.12 - Tryck- och dragspänningar i mitten av balken för referensfallet.



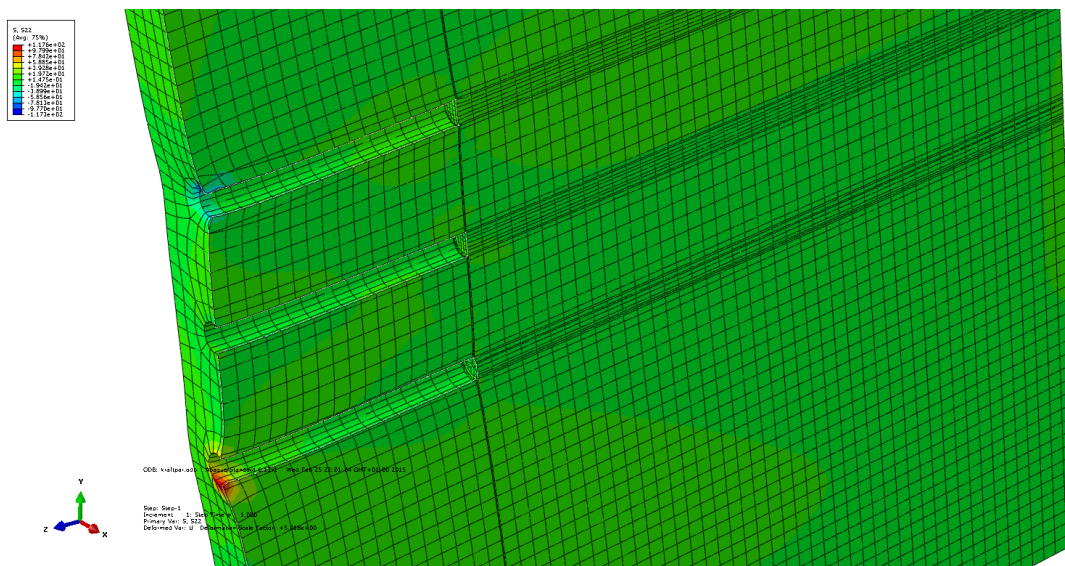
Figur 3.13 - Tryck- och dragspänningar i underkanten av balken för referensfallet.

Inledningsvis modellerades förbandet med utstickande skruvar ("extrudelängd" på 50mm). Då uppkom problem med att skruvarna böjdes mycket och att stora tryck- och dragspänningar från denna böjning belastade kontaktytan mot träet. Ett mer realistiskt fall är att stålhubben/stålnät som används för att fästa två träelement ihop sitter betydligt mycket närmare balk- eller pelarände. En lös åtdragning av muttrarna vid infästning av stålhubben möjliggör några fåtal millimeter i glapp medan en korrekt montering och åtdragning av muttrarna eliminerar detta glapp helt. När detta fall introducerades minskades extrudelängden till fem millimeter. Figur 3.14 visar en jämförelse mellan låst mantelyta och icke-låst mantelyta. Låst mantelyta innebär att kontakten är korrekt utförd och icke-låst mantelyta simulerar ett glapp på 5mm. Som man ser är skillnaden liten. För att simulera förbandet valdes låst mantelyta för fortsatta studier då detta sätt är den mest korrekta.

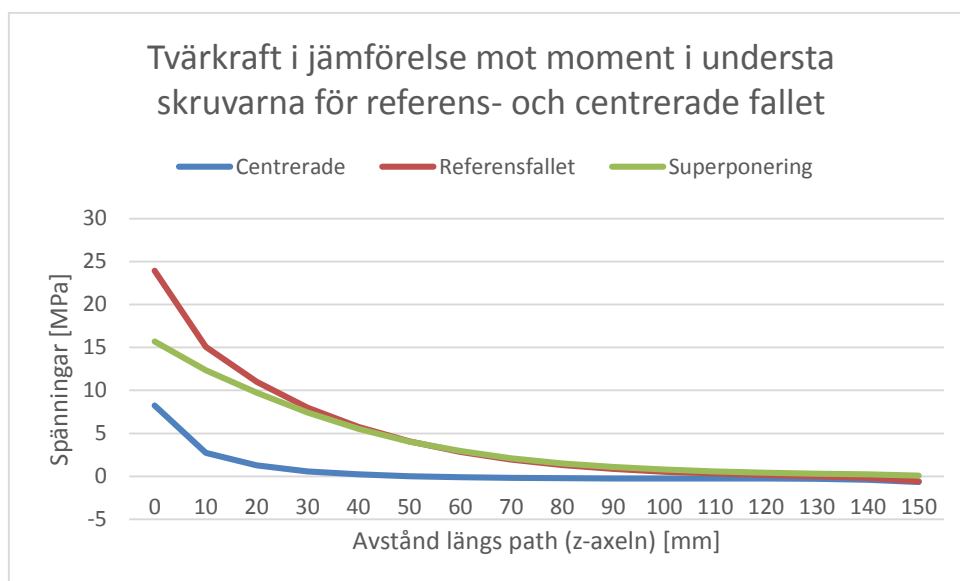


Figur 3.14 - Jämförelse av låst mantelyta och icke-låst mantelyta för $n=3$

Det observerades även att man introducerar ett moment som är en följd av hävarmen (68,95kN är symmetrilasten multiplicerat med hävarmen 0,6m som är längden på modellerad balk resulterar i ett moment på 41,4kNm). Symmetrilasten beskrivs närmare längre fram i rapporten). I figur 3.15 kan man observera att maximala dragspänning i underkanten av de tre centrerade skruvarna är ca 118MPa och att den maximala tryckspänningen i överkanten av skruvarna är ca 117MPa. Dessa värden är klart högre än spänningarna som erhöles från referensfallet se tabell för drag i underkant av balken för referensfallet under bilaga III som är ca 25MPa i dragspänningar i underkant. Denna skillnad tyder på att det finns ett moment.



Figur 3.15 - Tre centrerade skruvar. Max dragspänning = 118 MPa och max tryckspänning = 117 MPa



Figur 3.16 - Jämförelse av det centrerade fallet, referensfallet och referensfallet subtraherat med centrerade fallet (superponering)

Som man ser i ovanstående figur 3.16 utgör spänningarna pga. momentet en stor del. Momentet i figur 3.16 innebär att balkänden lastas med endast en tvärkraft vilket resulterar i att skruvarna utsätts för både tvär- och momentbelastning. Tvärkraft innebär att balkänden belastas med både en tvärkraft och ett mothållande moment för att eliminera momentets inverkan på skruvarna.

3.2.2 Del 1 – Uppritning av förbandet

När förståelsen var tillräcklig började det riktiga arbetet med att först göra parameterstudien och därefter förstärka förbandet. I detta avsnitt redovisas arbetsgången för uppritning av förbandet som från och med nu benämns referensfallet. Samma arbetsgång kan användas för att öka antalet skruvar, diameter på skruvarna, avstånd osv. Dock är det lättare att kopiera ett referensfall och lägga till på en redan halvfärdig modell, vilket jag personligen har utnyttjat för att spara tid.

Tabell 3.10 - Referensfallets geometriska data för parameterstudien, se även figur 3.14.

Referensfallet				
n_{skruv} [st]	d [mm]	e_1 [mm]	e_2 [mm]	l_g [mm]
3	16	$2,5d = 40$	$2,5d = 40$	160

När referensfallet är uppritat det är och kontrollerat att allt stämmer ritas resterande modeller som senare skall användas i parameterstudien. Parametrarna som ändras är antalet skruvar (n), skruvdiameter (d), vågräta kantavståndet (e_1), horisontella kantavståndet (e_2), samt inlimningsdjupet (l_g). Tabell 3.10 och 3.11 redovisar värdena för referensfallet och parametrarna som undersöks i parameterstudien.

Tabell 3.11 – Upplägg inför parameterstudien

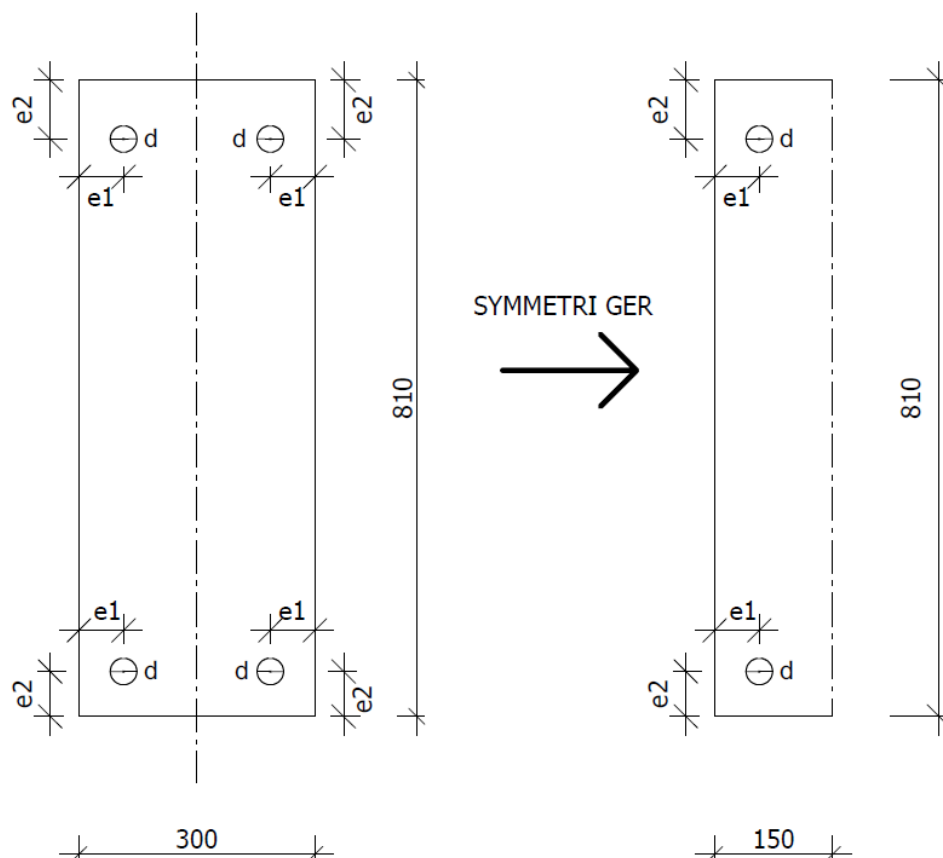
Fall		n	d	e1	e2	lg
1	Referens	3	16	2,5d	2,5d	160
2	1	2				
3	2	5				
4	3	9				
5	4	13				
	Referens	3	16	2,5d	2,5d	160
6	1		20			
7	2		24			
	Referens	3	16	2,5d	2,5d	160
8	1			1,5d		
9	2			3,5d		
	Referens	3	16	2,5d	2,5d	160
10	1				1,5d	
11	2				3,5d	
	Referens	3	16	2,5d	2,5d	160
12	1					100
13	2					300

Den geometriska indatan som används för uppritningen kommer från dimensioneringen i bilaga II i denna rapport. Anledningen till att dimensionering gjordes var för att bistå med verklighetstroga siffror och laster.

För att förenkla modelleringen och bespara tid utnyttjades symmetri. Det innebär t.ex. att n_{skruv} som finns i tabell 3.10 och 3.11 i symmetrisnittet utgör tre stycken skruvar. I hela förbandet multipliceras antalet med två vilket motsvarar totalt sex skruvar för $n_{skruv}=3$ st. Se figur 3.17 för en skiss på symmetrisnittet. Vidare sammanfattar tabell 3.12 indatan till symmetrimodellen.

Tabell 3.12 – Indata till symmetrimodellen. Materialegenskaper från (Andersson & Larsson, 2014), (Persson, 2011), (Andersson & Odén, 2009) och (Larsson, 2008)

Indata till symmetrimodellen	
Bredd	150 mm
Höjd	810 mm
Längd	600 mm
$d_{\text{hål}} (d_{\text{skruv}} + 1\text{mm})$	17 mm
l_{min}	160 mm
Estål	200 GPa
Eepoxi	1,5 GPa
$E_{L,\text{limträ}}$	13 700 MPa
$E_{R,\text{limträ}}, E_{T,\text{limträ}}$	460 MPa
E_{luft}	0,1 MPa
$\nu_{LR,\text{limträ}}, \nu_{LT,\text{limträ}}$	0,3
$\nu_{RT,\text{limträ}}, \nu_{TR,\text{limträ}}$	0,02
$\nu_{RL,\text{limträ}}, \nu_{TL,\text{limträ}}$	0,02
$G_{RL,\text{limträ}}, G_{LT,\text{limträ}}$	850 MPa
$G_{RT,\text{limträ}}$	34 MPa



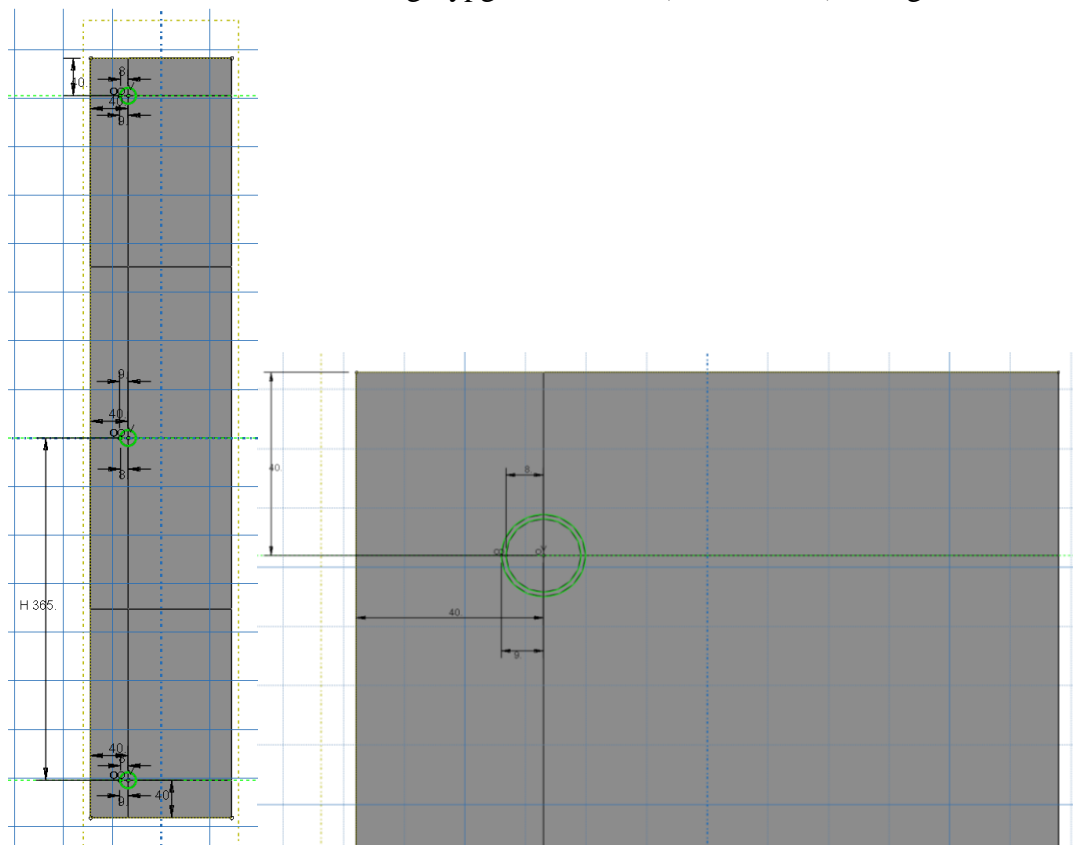
Figur 3.17 – Geometrin på balkände innan och efter symmetri utnyttjas.

Inlimningslängden, l_{min} som ej syns i figur 3.17, är avståndet mellan balkände och hålets ändyta längs balklängden. Vidare är antalet skruvar, n sett ur symmetriskt perspektiv.

Genomgång av arbetsgången i ABAQUS

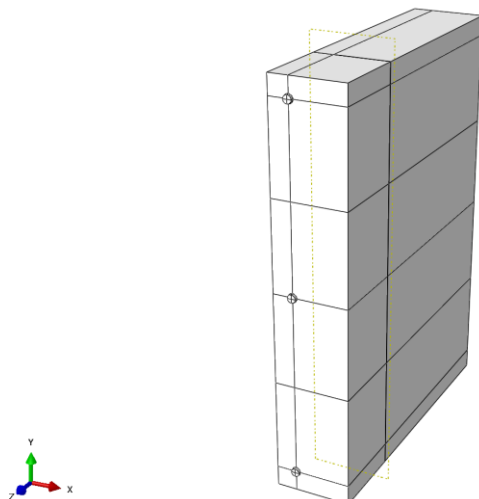
Geometri

1. Årbetet i ABAQUS inleddes med att rita upp förbandet som en 3D solid med måtten $h \times b = 810 \times 150 \text{ mm}$ (symmetrisnitt). Balken fick längden 600 mm för att säkerställa att man fick med eventuella spänningar längre in i balken.
2. Balken partitionerades där skruvarna och limmets geometri angavs. I detta exempel visas $d=16$ med kantavstånd enligt typgodkännande ($2,5d=40 \text{ mm}$), se figur 3.18.



Figur 3.18 – Skruvar och limfogens partitionering ur 3D soliden.

3. Extrudelängden på skruvarna är här satta till 5 mm. Det motsvarar ett möjligt fall då man inte kan garantera att ändplåten på stålhubben och muttern precis ligger mot varandra.
4. Balken med skruvarnas & limmets geometrier partitionerades i mindre ytor för att underlätta meshen längre fram, mer om detta i avsnitt "Mesh".
5. Vid skruvens botten skapades ett 1 mm tjockt luftrum för att simulera verkligheten då dels limmet fäster dåligt mot ändträ och dels för att beroende på hur man trycker in skruven kan man få ett glapp.



Figur 3.19 – Förbandet med skruvar och partitioner

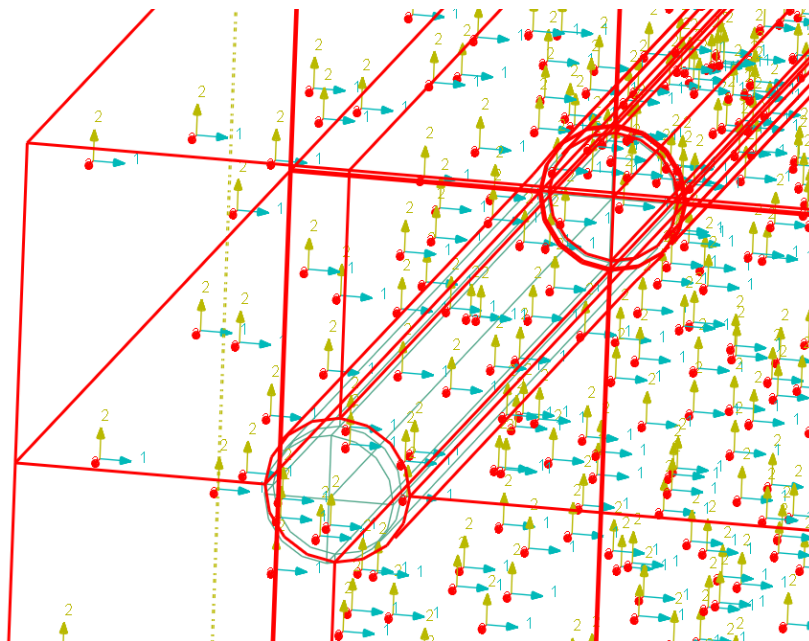
Materialegenskaper

6. Materialegenskaper skapades för skruv, lim, limträ och ”luft”. Dessa material modelleras som linjärelastiska med hållfastheter från tabell 3.12. Då trä är ett ortotropiskt material användes ”engineering constants” för att mata in hållfastheterna. Man skulle även kunna använda ett ”orthotropic material” i ABAQUS där man matar in lite fler värden. Därefter tilldelades olika delar olika material och det kontrollerades för att säkerställa att allt gått rätt till. Metoden med ”orthotropic material” valdes bort pga. att det är lättare att använda ”engineering constants” genom att man behöver färre inmatningar.



Figur 3.20 - Genomskäring. Beige är skruven, grönt är limmet, blått är luftglappet vid skruvänden och rött avser limträet.

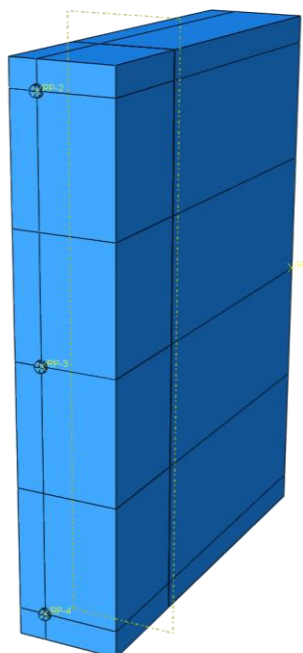
7. Fiberriktningen anges genom att globala riktningarna i ABAQUS sätts lika lokala riktningar. Då hållfastheten för limträet i detta fall var lika i tangentiell- och radiell riktning innebär det att x-axeln motsvarar vinkelrätt fibrerna, y-axeln motsvarar vinkelrätt fibrerna och z-axeln motsvarar parallellt fibrerna i limträet, se figur 3.21.



Figur 3.21 - Materialorientering

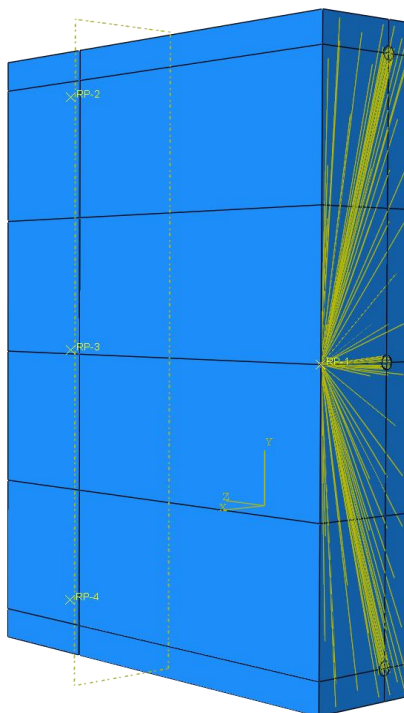
Assembly

8. En Reference Point, RP, lades till i mitten på symmetrisnittet för att simulera en stelkropps rörelse/jämn lastfördelning baksidan av balken och RP. Detta innebär att lasten direkt kan placeras på RP istället för att dela upp lasten i olika komponenter, se figur 3.22.



Figur 3.22 – Assembly med RP i mitten av skruvarna

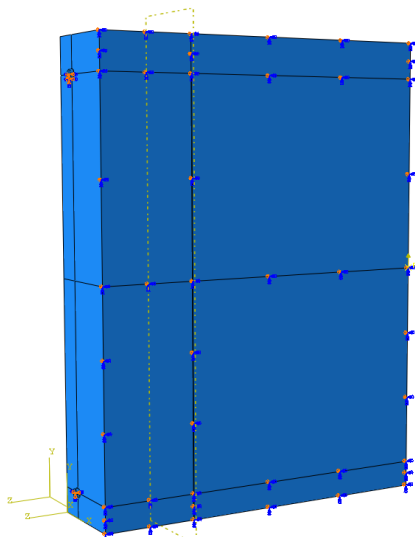
9. RP sattes även i skruvarna för att kunna simulera perfekt montering mot stålhubben genom att låsa mantelytan på skruvarna. RP i skruvarna medför även att krafter kan tas ut i form av reaktionskrafter vilket kan användas som kontroll.
10. Kopplingar ("coupling") gjordes mellan RP på baksida av balk mot RP enligt punkt 8 för att koppla rörelsen till RP. På samma sätt gjordes kopplingar för att koppla mantel- och ändyta på skruvarna mot skruvarnas RP, se figur 3.23.



Figur 3.23 - Koppling ("Coupling") av baksidan på balken

Laster & upplagsvillkor

11. För att simulera ett glapp mellan stålhubb och skruvar sattes endast fast inspänning på skruvändarna. För fallet med korrekt montering utan glappet sattes fast inspänning på både mantel- och ändytan av skruvarna. Där balken delas pga. symmetri sattes en x-symmetri. Det krävdes även en x-symmetri på RP då noderna längs linjen RP sitter på inte fick symmetriska upplagsvillkor. Figur 3.24 visar detta.

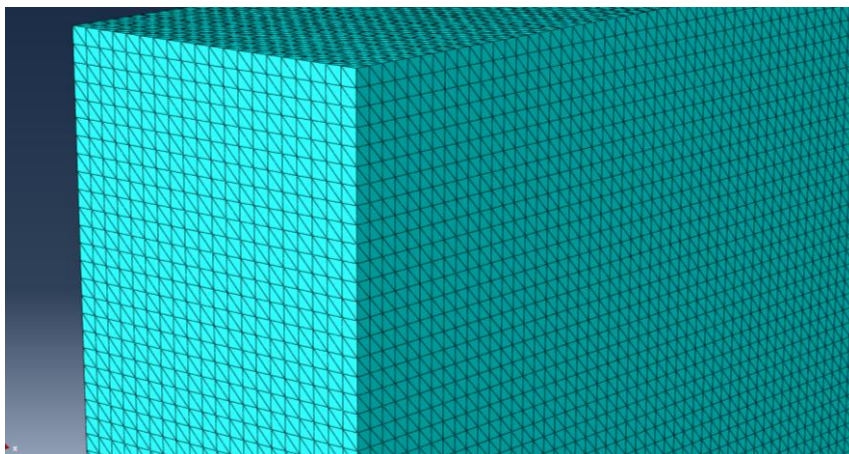


Figur 3.24 – Upplagsvillkor (fix vid skruvar, x-symmetri vid symmetrisnitt och RP)

12. Två laster placerades på förbandet. Båda dessa laster placerades på RP (baksida av balken) för att ge en jämn last fördelad på båda skruvarna. Tvärkraften är satt till 68,95 kN (symmetrilast av 137,9 kN som finns i tabell 3.3) och momentet är satt till 41,4 kNm. Momentet är ett mothållande moment för att eliminera momentet som uppkommer vid tvärkraften pga. hävarmen ($68,95 \cdot 0,6 = 41,4 \text{ kNm}$).
13. Ett lastfall ("loadcase") upprättades i ABAQUS. Anledningen till att man använder lastfall är för att det är både tidsbesparande och enklare att sätta upp ett lastfall där man har tvärkraften och ett annat lastfall med bara det mothållande momentet. Dessa två lastfall kan man sedan under analysen av resultatet superponera för att antingen lägga till eller ta bort värdet. I detta fall kommer det mothållande momentet subtraheras från tvärkraften för att resultera i en ren tvärkraft vid skruvarna.

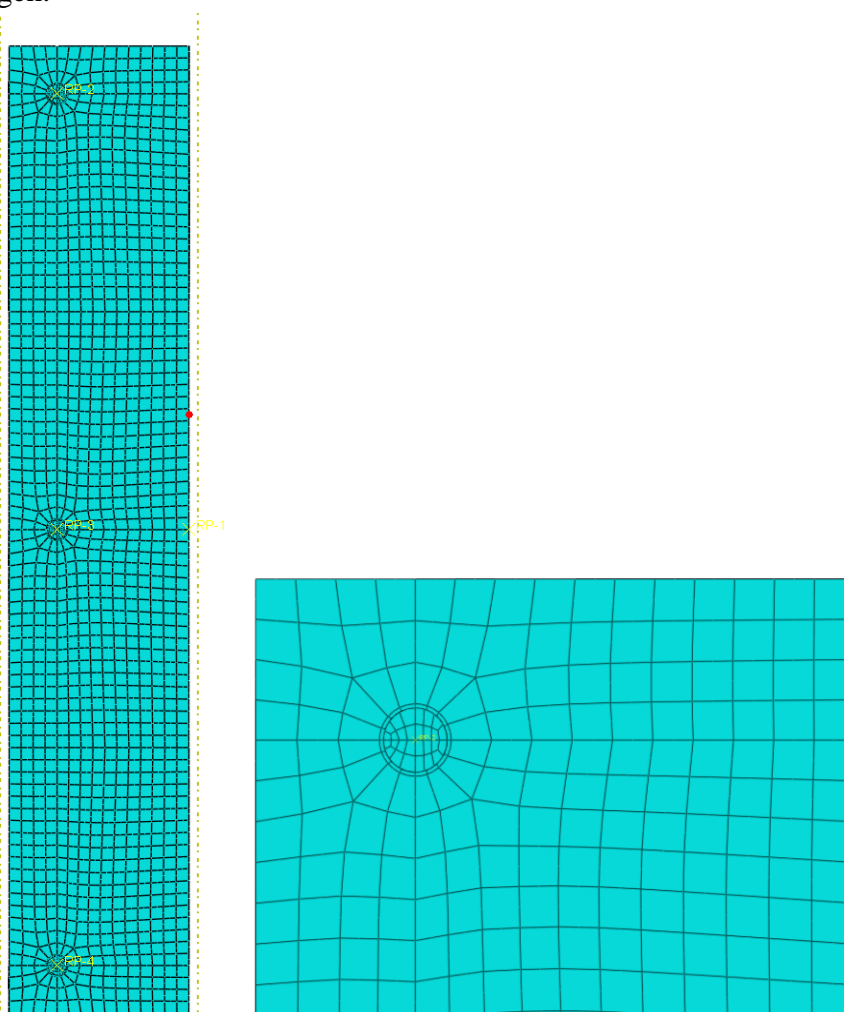
Mesh

14. Utan partition enligt punkt 4 skulle man inte kunna använda hex-element. Hex-element kännetecknas av dess regelbundna struktur och ger färre antalet element. Ju fler element man har i ABAQUS desto mer tid tar en full simulering att genomföra. I jämförelse finns även tet-element som är formade som tetraeder, se figur 3.25. Dessa tet-element skulle exempelvis inte kräva någon vidare partition men det ger mycket fler element och noder vilket kräver mycket längre tid att genomföra en simulering. Från 800.000 element med tet-element kunde jag gå ner till under 80.000 hex-element. Tiden för att köra en simulering med tet-element avbröts efter 6h i jämförelse med ca. 1,5h för hex-element.



Figur 3.25 - Mesh av hela förbandet med tet-element.

15. Inledningvis blev meshen dålig kring skruvarna. Detta åtgärdades med en curvature controll som minskar elementstorleken om de blir dåliga. Dessutom kan man i ABAQUS använda funktionen "Seed edges" som möjliggör mindre element där det krävs som mest, exempelvis kring limfogen och skruvar. Figur 3.26 visar slutresultatet för meshingen.



Figur 3.26 - Mesh sett framifrån. T.v. hela förbandet och t.h. översta delen

16. Reducerad integration kryssas bort då det oftast ger sämre resultat genom att förenkla lösningen. Dessutom används kvadratiska element vilket resulterar i fler noder. Kvadratiska element användes då de ger bättre resultat vid fall där böjning uppkommer.

Vid modellering av andra fall än ovan beskrivna referensfallet gjordes ungefär punkt 1-16 för varje fall. Dock kunde man kopiera en modell och ändra i den befintliga för att spara tid.

3.3 Förstärkning

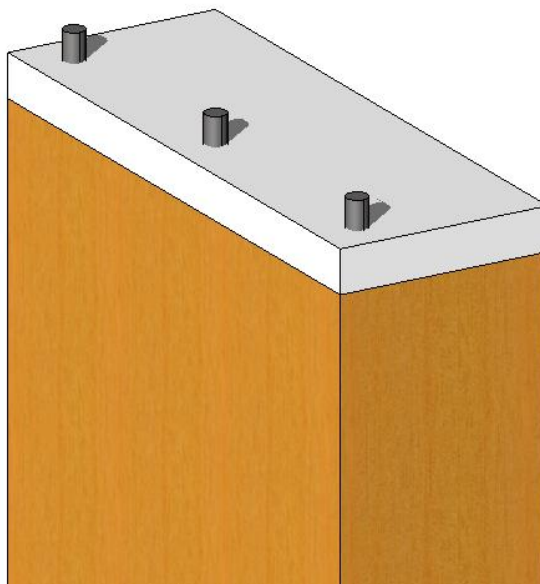
Det sista steget i detta examensarbete är att undersöka behovet av förstärkning, hur och var man eventuellt behöver förstärka. Möjliga förstärkningsmetoder är:

- Skruvar i kritiska områden ("vanliga" skruvar som skruvas in för att ta upp dragspänningar)
- "Förstärkningsstrumpa" (att trä på ett material med mer lämpliga egenskaper på balkände)
- Ersätta den yttersta delen av materialet (i detta sammanhang rör det sig om att eventuellt ersätta de inledande 40-60mm av balken mot ett lämpligt material)

Ett möjligt förstärkningsfall är att förstärka på ett vanligt och hederligt sätt genom att skruva in självborrande skruvar för att ta upp dragkrafter. Problemet med tvärbelastade inlimmade skruvar är att de stora spänningarna uppstår lokalt, för det mesta 0-40 mm in räknat från balkände, se resultat t.ex. figur 4.2. Enligt Eurokod SS-EN 1995-1-1:2004/A1:2008 måste kantavståndet för en axiellt belastad självborrande skruv vara 10d. Då dessa skruvar oftast har en diameter mellan 6-12mm innebär att avståndet från kanten minst måste vara 60-120mm. Med en sådan förstärkning skulle spänningarna instinktivt minska en aning men det innebär vidare att man inte kan få bukt med de lokala spänningstopparna på ett effektivt sätt. Av den anledningen väljs inte denna förstärkningsmetod.

Det tredje förstärkningsfallet är ganska självförklarande. Man använder helt enkelt ett mer passande material där det behövs. I detta fall exempelvis stål de första ca. 40 mm av balken.

Förstärkningen valdes enligt andra punkten ovan, en så kallad "förstärkningsstrumpa" då det är det enklaste sättet att förstärka balkänden samtidigt som – ursprungliga tankar – var att detta sätt skulle vara tillräckligt bra. En strumpa kan man exempelvis limma fast med 2-komponents epoxi och få bra vidhäftning. Strumpan möjliggör även att dess material kan lätt ändras efter situation och behov. Exempelvis kan man använda glasfiber, kolfiber, stål och plywood, se figur 3.27 för en principskiss över hur man kan förstärka.



Figur 3.27- Skiss på förstärkningen. Beroende på valt material hos förstärkningen kan det vara nödvändigt att "trästrumpan över balken".

Angreppssättet för att modellera förstärkningen i ABAQUS var att utnyttja membranelement där man förutsätter att böjstyvheten i förstärkningen är mycket liten. Detta stämmer bra för tunna material, gränsen går ungefär vid stålplåt med tjockleken 1mm. Då man i membranet endast räknar med normalstyvhet, som beror på $E_{\text{referens}} = E_{\text{godtyckligt}} t_{\text{godtycklig}}$, kan man tänka sig att förstärkningen görs med ett godtyckligt material med en referens E-modul. I detta fall användes en referens E-modul motsvarande stål, 200GPa där tjockleken varierar i tre steg om 1mm; 0,1mm och 0,01mm.

Detta godtyckliga material kan exempelvis motsvara en stålplåt med $E_{\text{stål}} = 200\text{GPa}$ och tjockleken 1mm eller en glasfiberförstärkning med $E_{\text{glasfiber}} = 17,2\text{ GPa}$ och tjockleken ca 11,6mm ($200\text{GPa}/17,2\text{GPa} = 11,628\text{mm}$) eller en kolfiberförstärkning med $E_{\text{kolfiber}} = 180\text{ GPa}$ och tjockleken 1,1 mm ($200\text{GPa}/180\text{GPa}=1,1\text{mm}$).

Sammanbindningen mellan förstärkningsmembranet och förbandet, beskrivet i avsnitt 3.2.2, gjordes med tie-kommandot i ABAQUS och simulerar en god vidhäftning.

4 Resultat och diskussion

I detta avsnitt kommer resultat och diskussioner för respektive delmoment av rapporten redovisas för att förenkla för läsaren.

4.1 Fallstudie

4.1.1 Resultat

Dimensionering enligt EC med minimal inlimningslängd var ej möjligt enligt gällande normer. Man har dock en liten chans ifall man producerar förbandet med 16x6 skruvar á 10mm (96 skruvar totalt!). Utnyttjandegraden blir då 99,2%. Om man ökar inlimningslängden kan dimensioneringen göras möjlig.

Tabell 4.1 - Resultat vid olika diametrar på skruvarna.

	d=10	d = 12	d=16	d = 20	d = 24	d = 30
$f_{h,0,k}$ [MPa]	31,73	31,03	29,62	28,21	26,80	24,68
$f_{h,a,k}$ [MPa]	2,12	2,03	1,86	1,71	1,57	1,37
k_{90} [-]	1,5	1,53	1,59	1,65	1,71	1,8
$M_{y,Rk}$ [Nm]	95545,72	153490,85	324282,26	579280,93	930594,48	1662365,4
l_{min} [mm]	100	120	160	200	288	450
$F_{v,Rk}$ (c) [kN]	2,12	2,92	4,77	6,84	10,83	18,51
$F_{v,Rk}$ (d) [kN]	2,01	2,74	4,40	6,31	8,52	12,45
$F_{v,Rk}$ (e) [kN]	3,27	4,45	7,15	10,24	13,61	19,02
$n_{skruv/rad}$ [st]	16	13	10	8	6	5
n_{rader} [st]	6	5	3	3	2	2
F_{vk} [kN]	193,15	177,86	132,125	151,32	102,29	124,54
F_{vd} [kN]	139,07	128,06	95,13	108,95	73,65	89,67
V_{Ed}/F_{vd} [%]	99	108	145	127	187	154

Tvärkraftskapaciteten för d=16 enligt EC beräknades till 95,1kN och enligt Limträhandboken till 108,4kN.

4.1.2 Diskussion

Som man ser i tabell 4.1 verkar en dimensionering enligt EC ej vara möjlig. Detta beror till en stor del pga. att man sätter hålkantstrycket till 10% jämfört med vanliga skruvar, vilket reducerar hållfastheten väsentligt! Det ges inte heller några orsaker till varför hålkantstrycket reduceras med 90%.

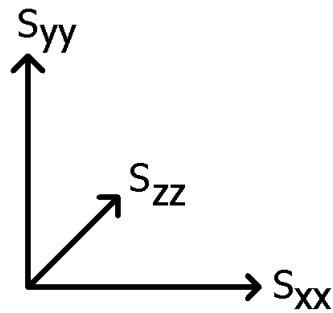
Man ser även att dimensionering enligt Limträhandboken ger ungefär 13% högre kapacitet än enligt Eurokod. Med endast två parametrar som styr resultatet kan man fråga sig hur bra dimensionering enligt Limträhandboken är. Då Eurokod är gällande normer bör dessa väga tyngre än Limträhandbokens anvisningar.

4.2 Parameterstudie

I parameterstudien används referensfallet, se avsnitt 3.2. Vid varje nytt fall ändrades endast en parameter åt taget. Parametrarna som varierades är:

- Antalet skruvar n (2, 3, 5, 9 och 13)
- Kantavståndet e_1 (1,5d; 2,5d och 3,5d)
- Kantavståndet e_2 (1,5d; 2,5d och 3,5d)
- Skruvdiameter d (16mm, 20mm och 24mm)
- Inlimningslängd l_g (100mm, 160mm och 300mm)

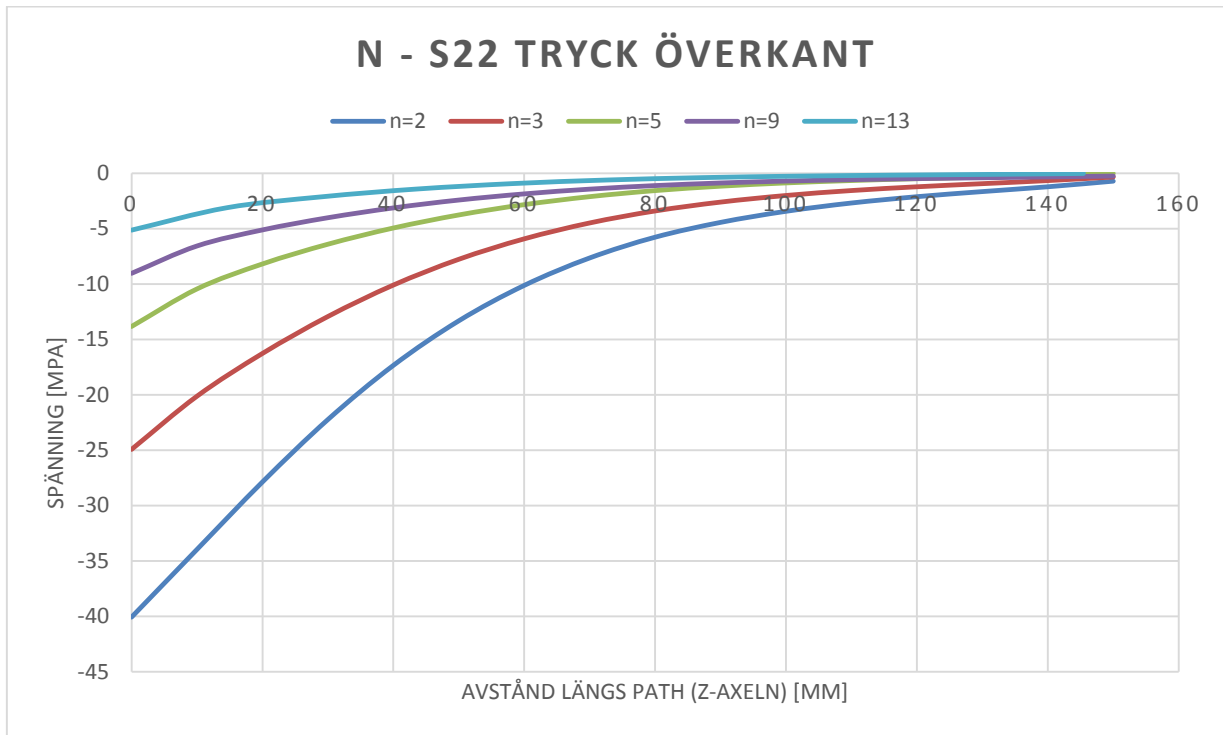
Koordinatsystemet för samtliga figurer i resultatdelen följer nedanstående figur 4.1



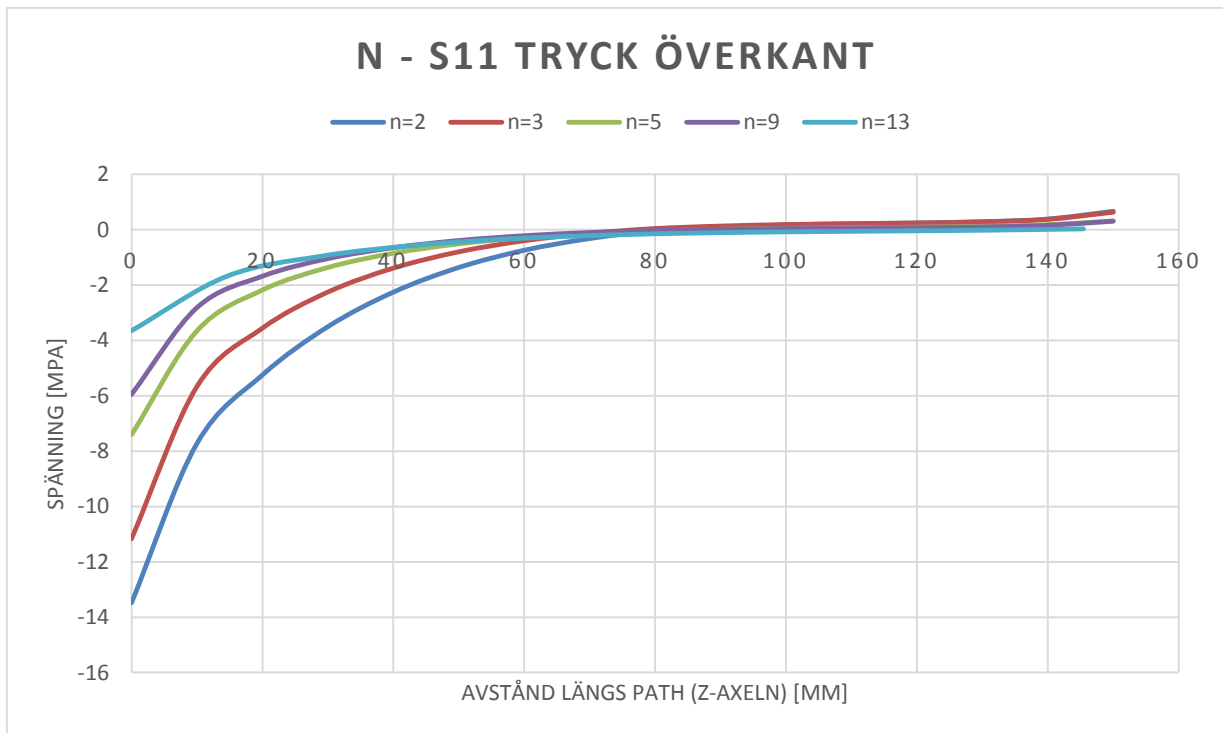
Figur 4.1 - Koordinatsystemet för resultaten

4.2.1 Resultat

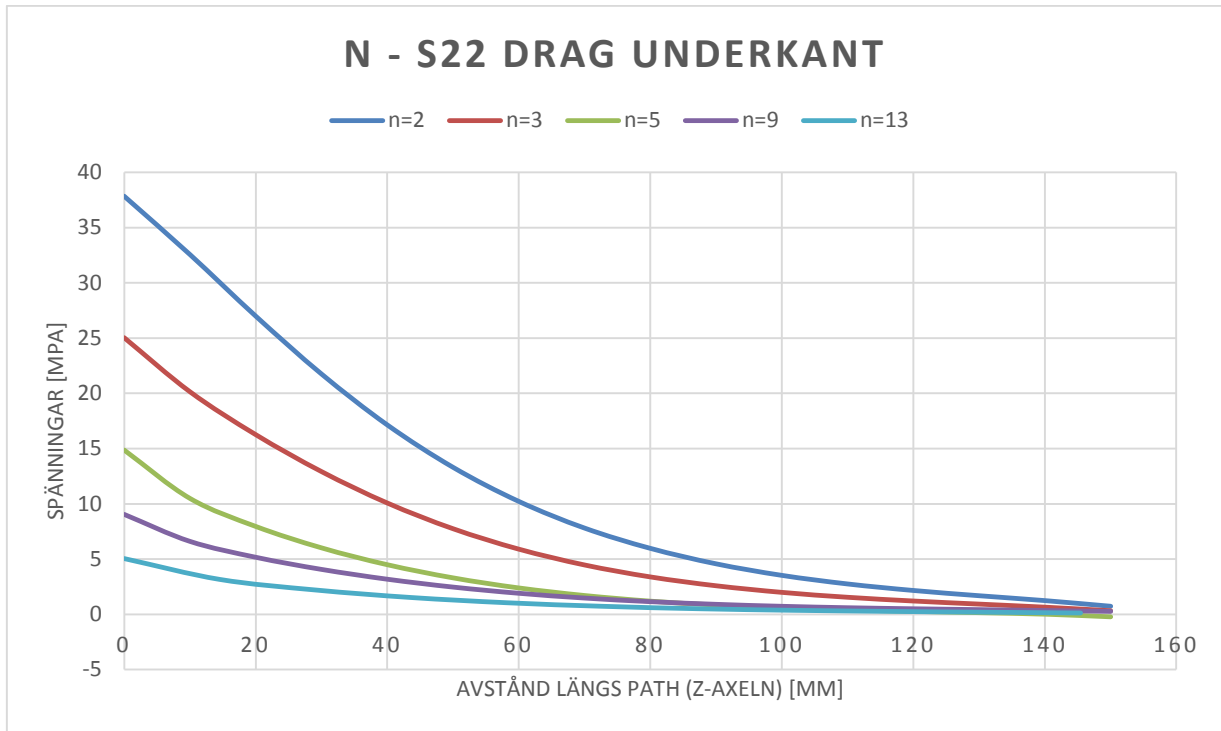
Figur 4.2–4.5 avser ökning av antalet skruvar (n). Ju fler skruvar desto lägre blir spänningarna.



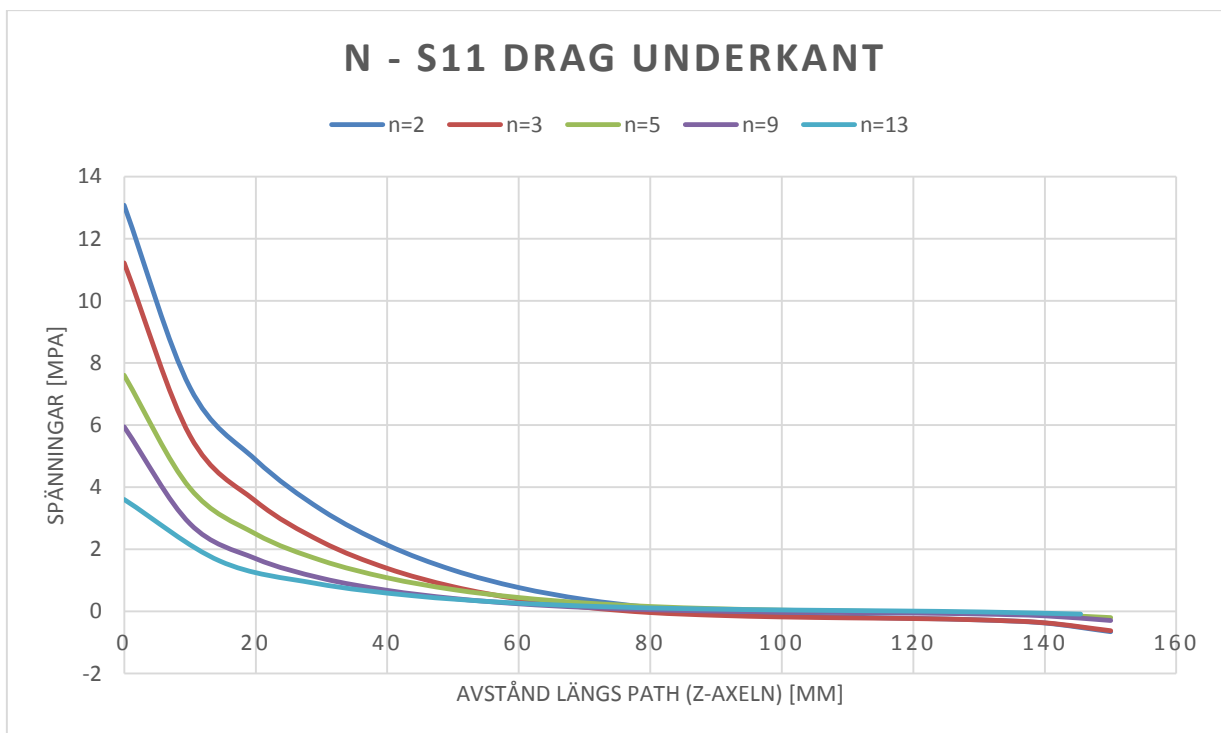
Figur 4.2 – Antalet skruvar, n varierar. Spänning i y-riktning i balkens överkant.



Figur 4.3 – Antalet skruvar, n varierar. Spänning i x-riktning i balkens överkant.



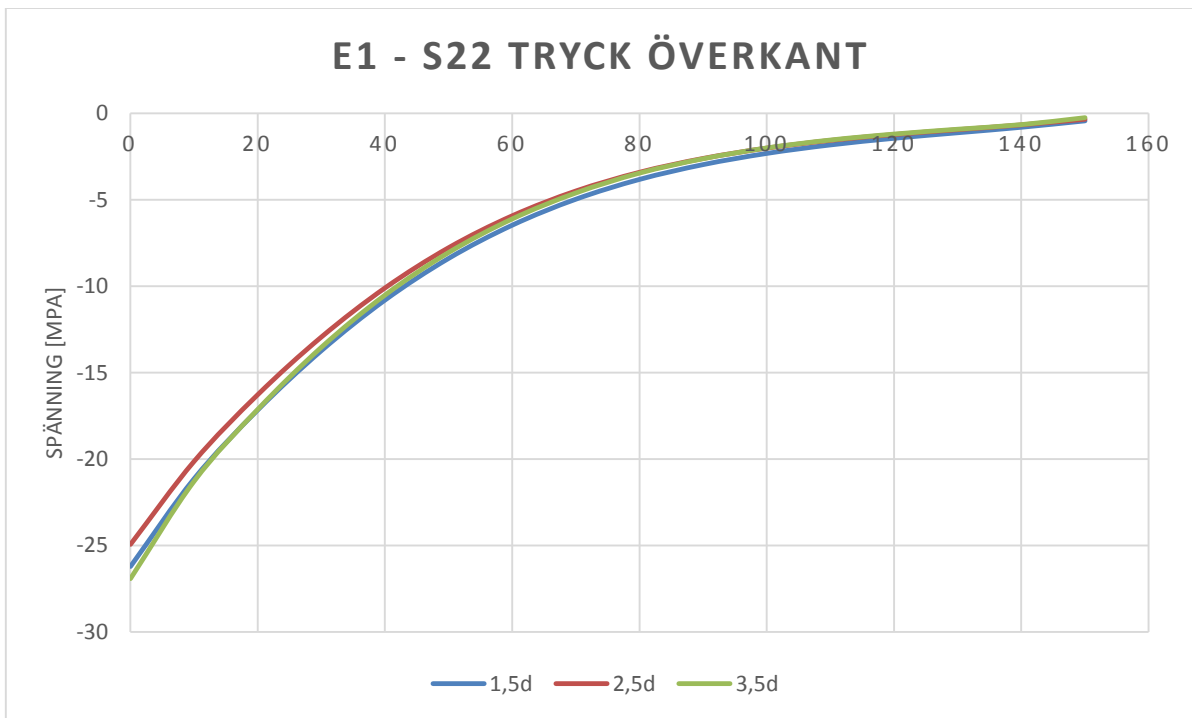
Figur 4.4 – Antalet skruvar, n varierar. Spänning i y-riktning i balkens underkant.



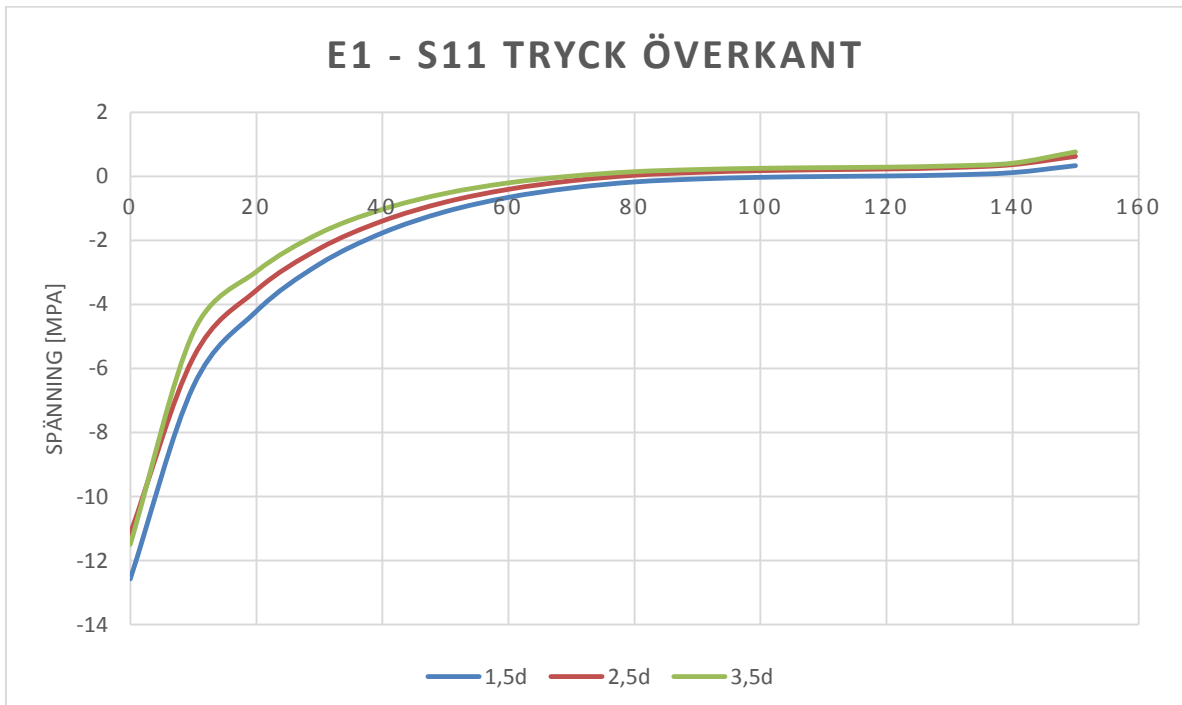
Figur 4.5 – Antalet skruvar, n varierar. Spänning i x-riktning i balkens underkant.

4. Resultat och diskussion

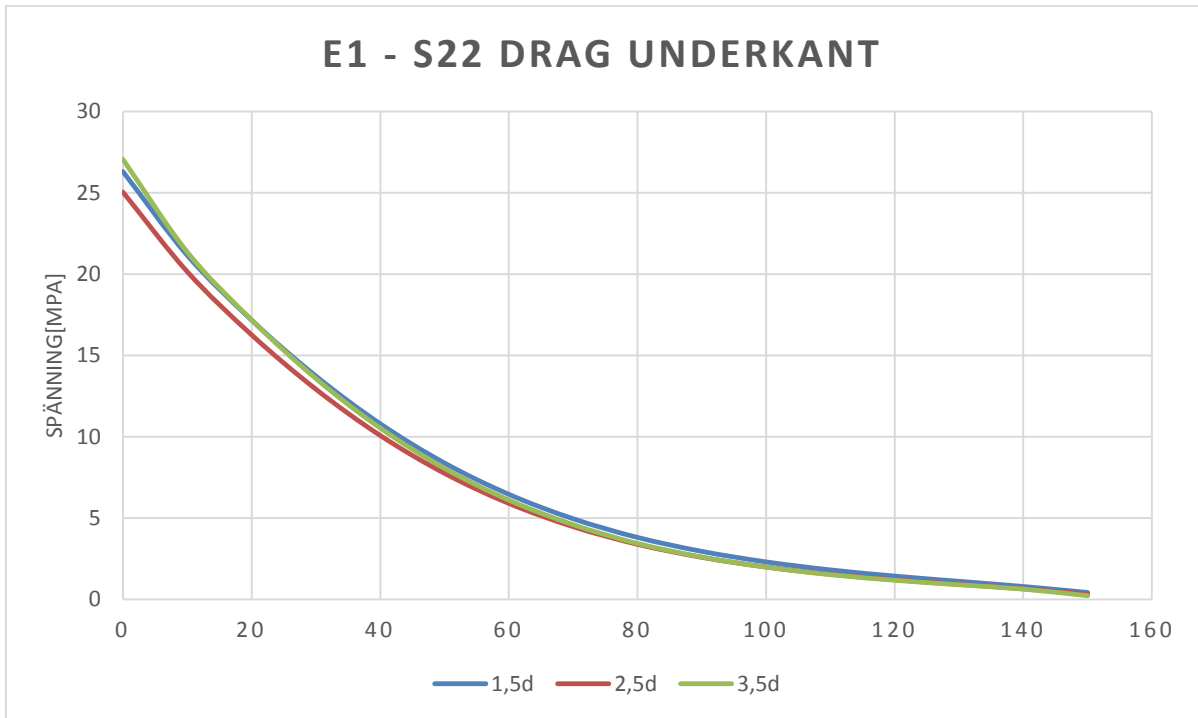
Figur 4.6–4.9 avser ändring av kantavståndet (e_1). Spänningarna ändras endast marginellt.



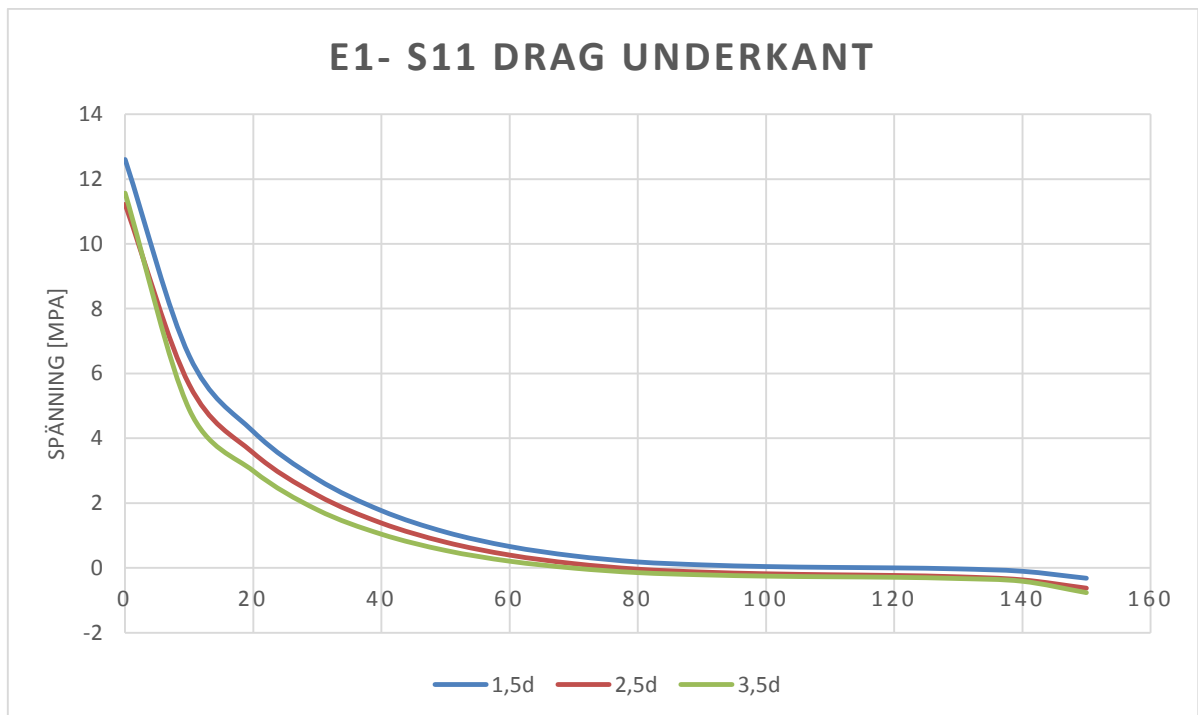
Figur 4.6 – Kantavståndet, e_1 varierar. Spänning i y-riktning i balkens överkant.



Figur 4.7 – Kantavståndet, e_1 varierar. Sett ur spänning i x-riktning i balkens överkant.



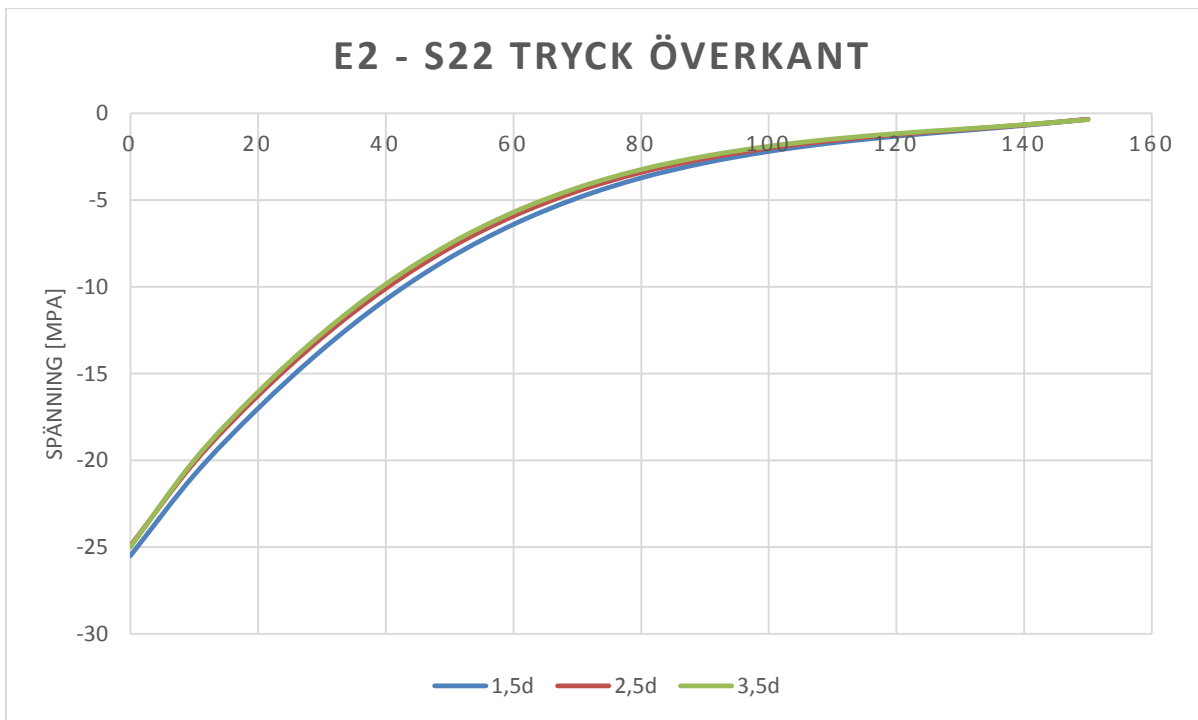
Figur 4.8 – Kantavståndet, e1 varierar. Spänning i y-riktning i balkens underkant.



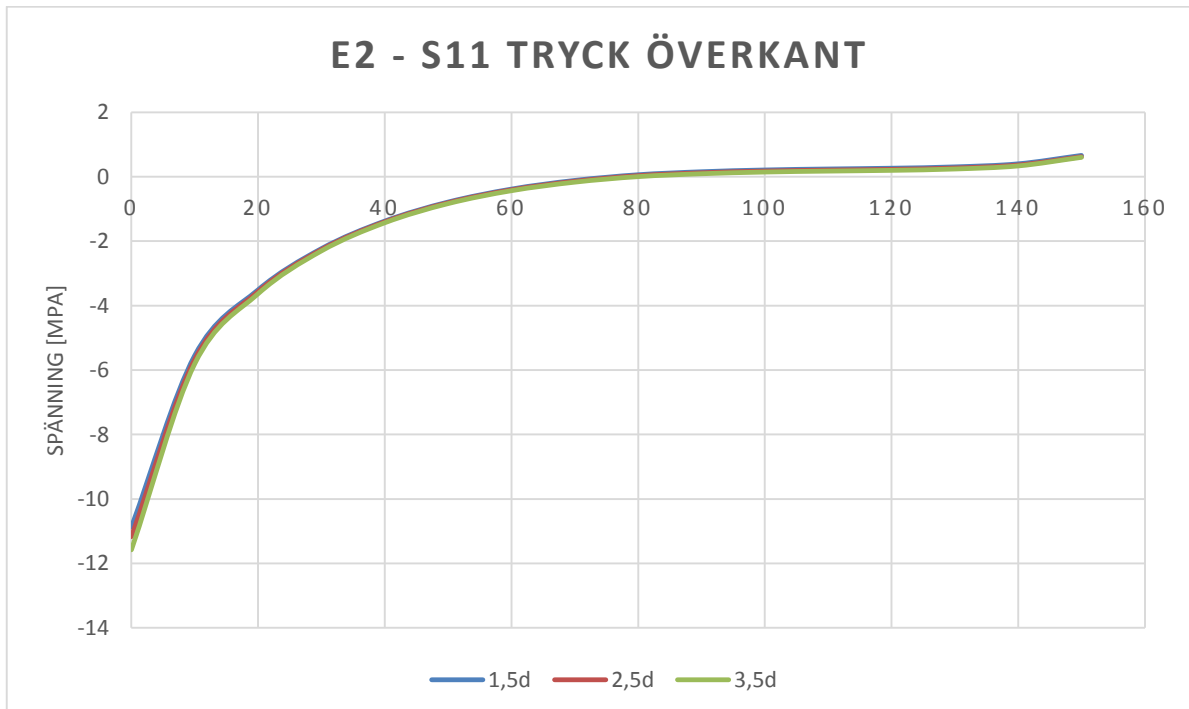
Figur 4.9 – Kantavståndet, e1 varierar. Spänning i x-riktning i balkens underkant.

4. Resultat och diskussion

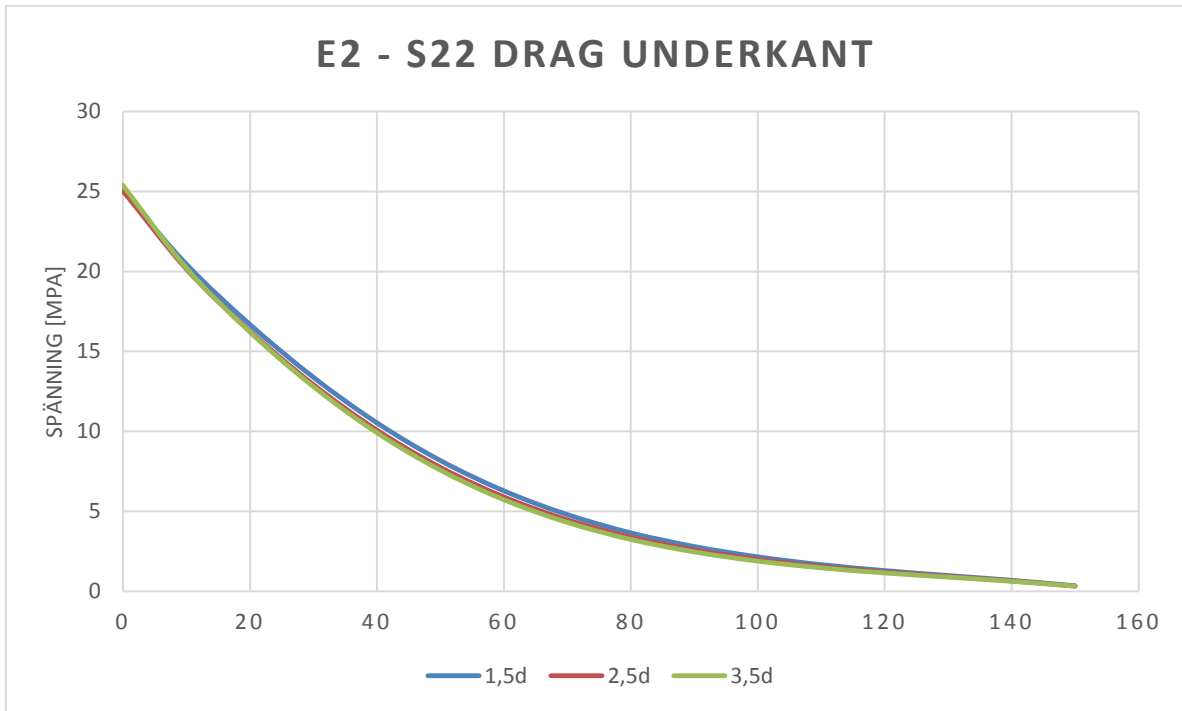
Figur 4.10–4.13 avser ändring av kantavståndet (e_2). Spänningarna ändras endast marginellt.



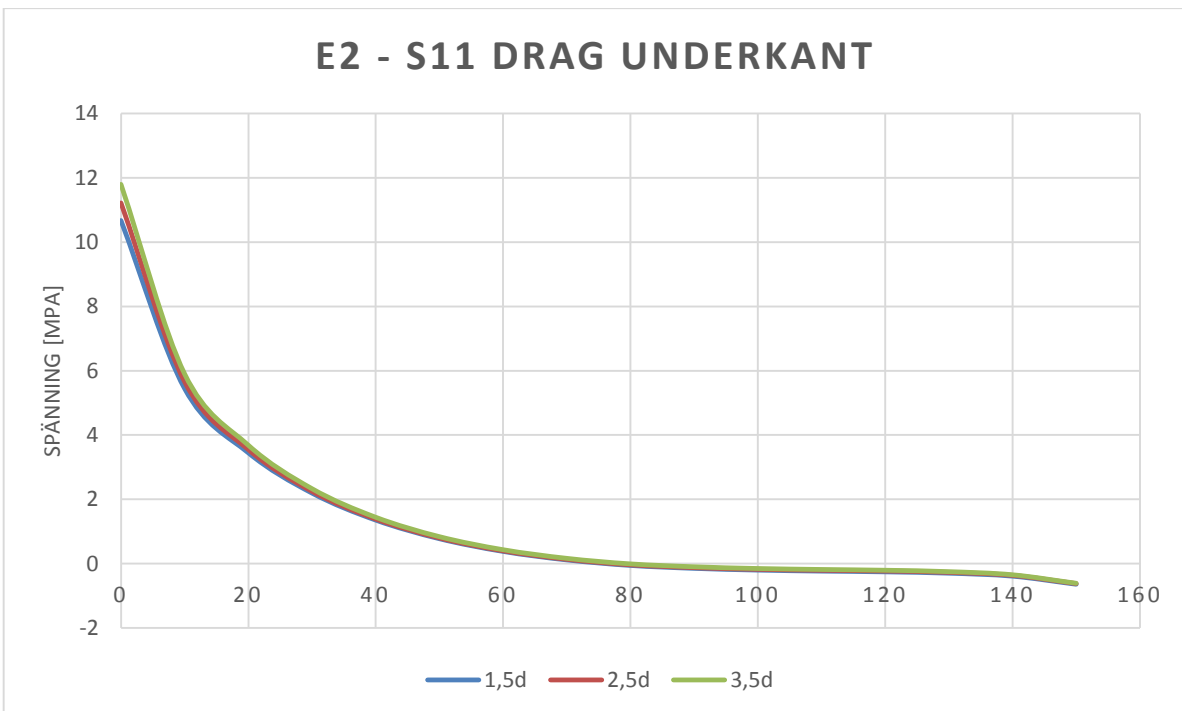
Figur 4.10 – Kantavståndet, e_2 varierar. Spänning i y-riktningen i balkens överkant.



Figur 4.11 – Kantavståndet, e_2 varierar. Spänning i x-riktningen i balkens överkant.



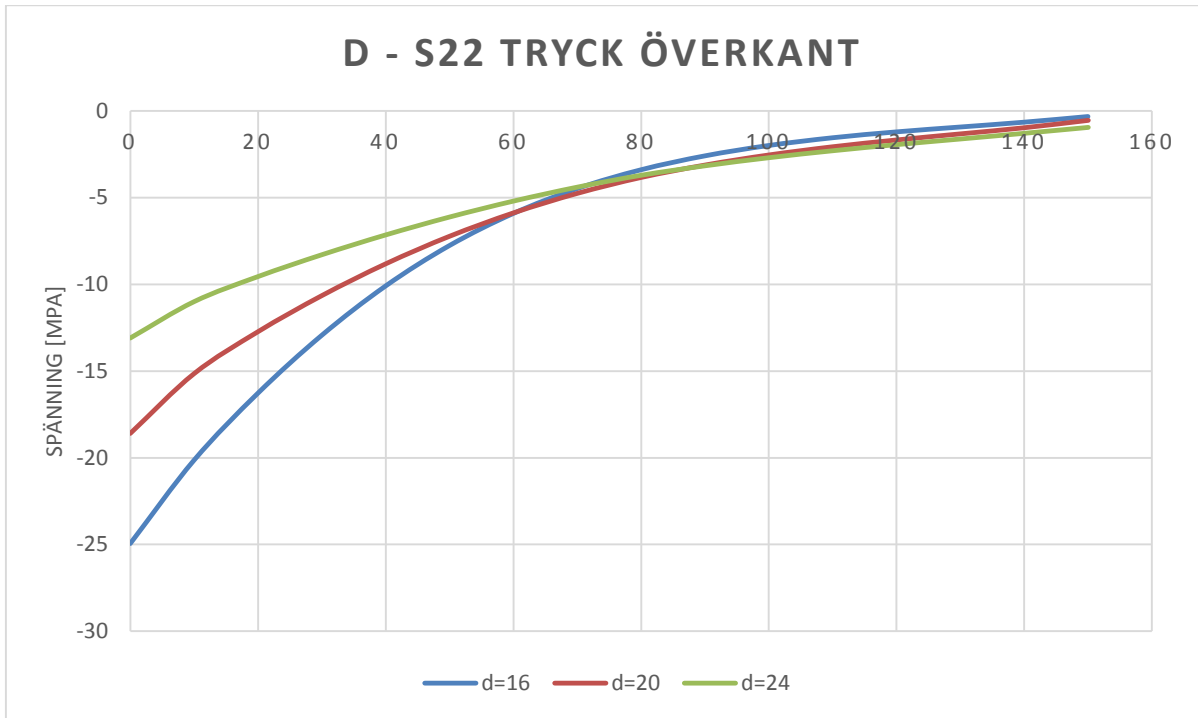
Figur 4.12 – Kantavståndet, e_2 varierar. Spänning i y-riktningen i balkens underkant.



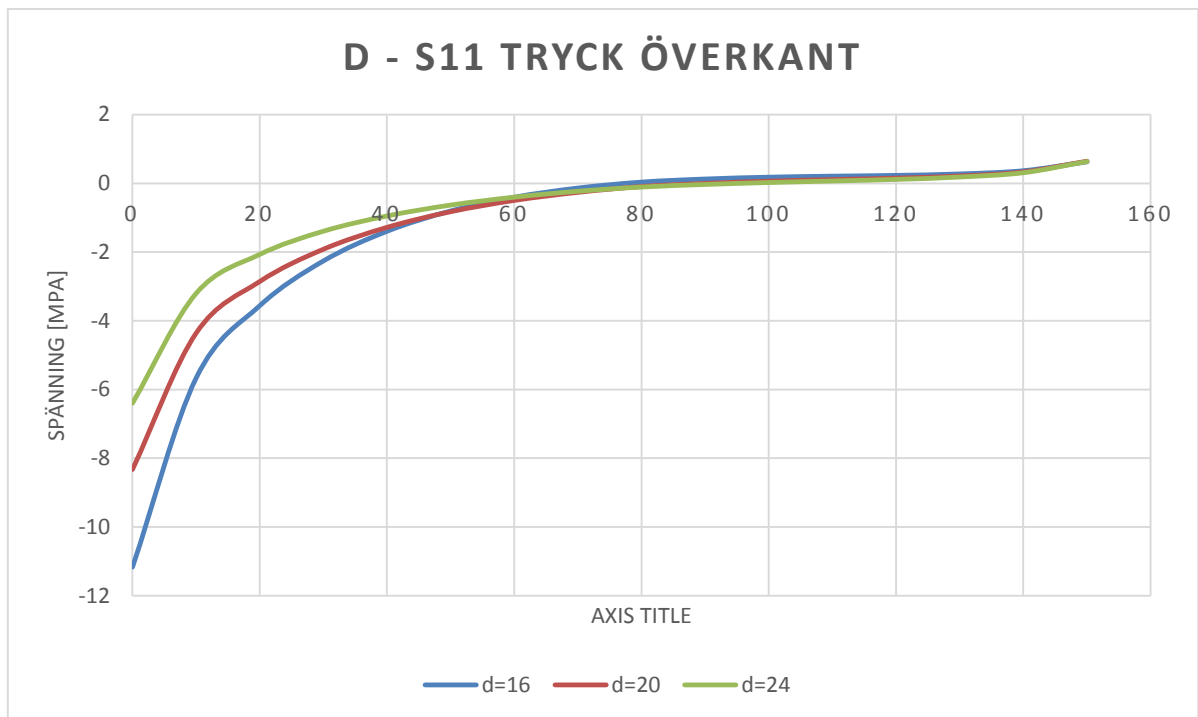
Figur 4.13 – Kantavståndet, e_2 varierar. Spänning i x-riktningen i balkens underkant.

4. Resultat och diskussion

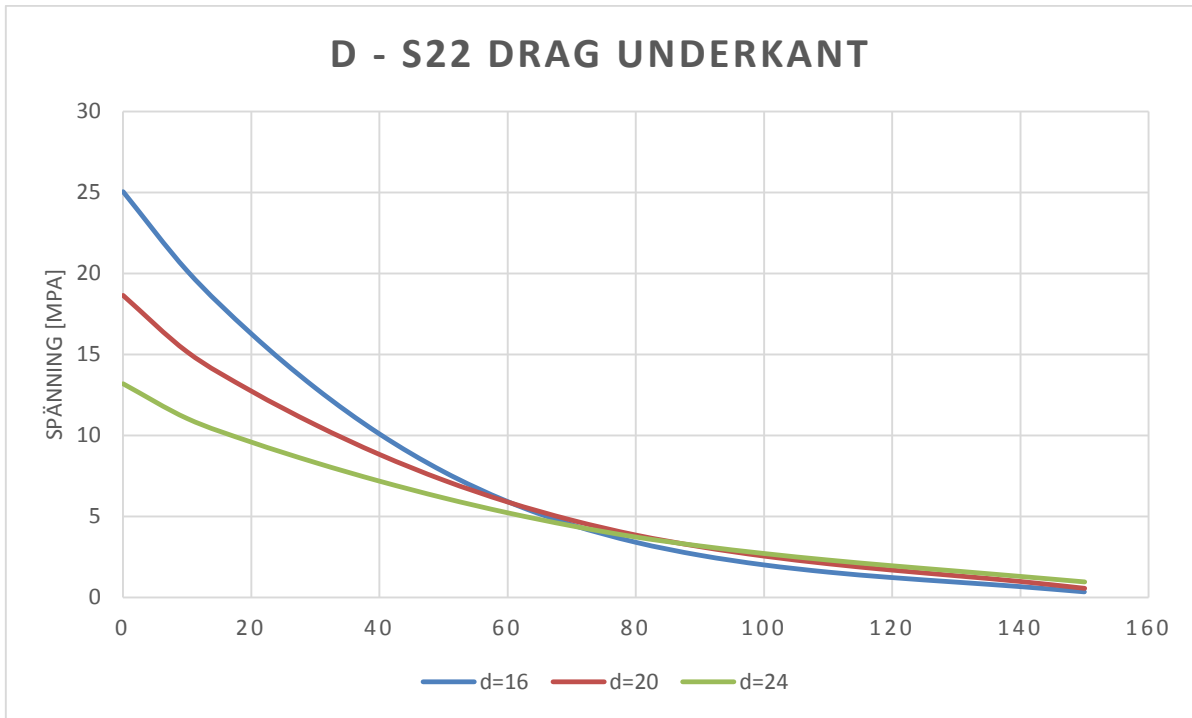
Figur 4.14–4.17 avser ändring av skruvdiametern (d). Spänningarna minskar vid ökad skruvdiameter.



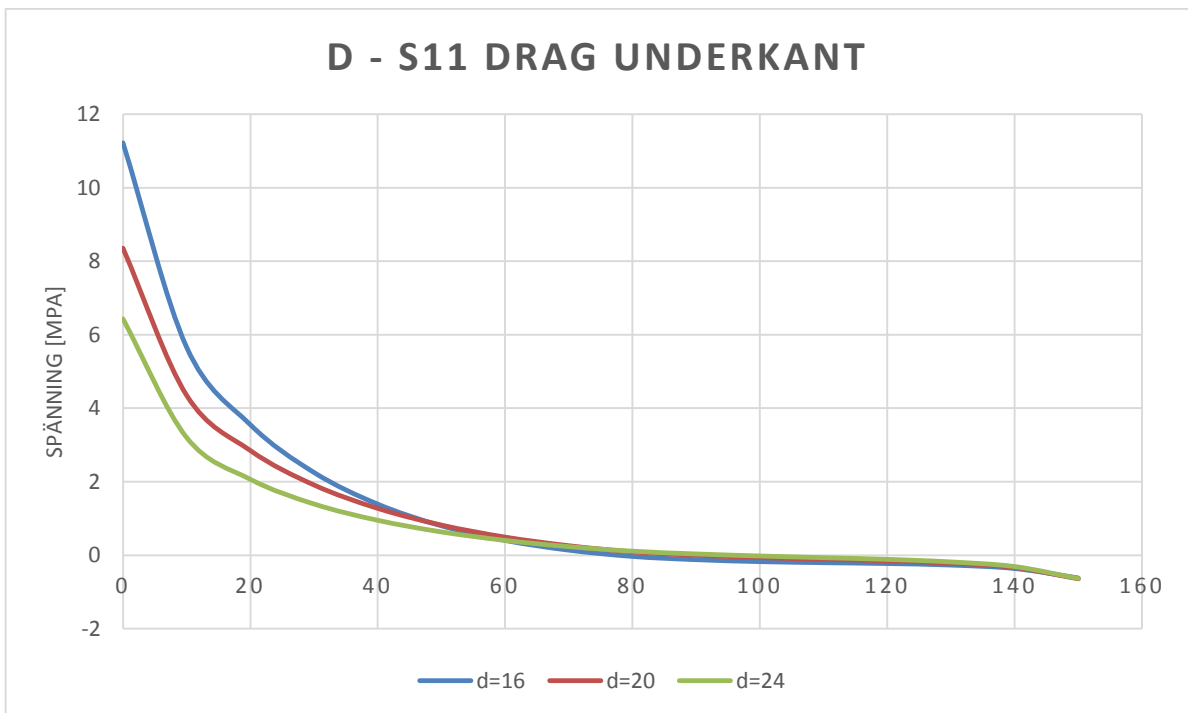
Figur 4.14 – Diametern varierar. Spänning i y-riktningen i balkens överkant.



Figur 4.15 – Diametern varierar. Spänning i x-riktningen i balkens överkant.



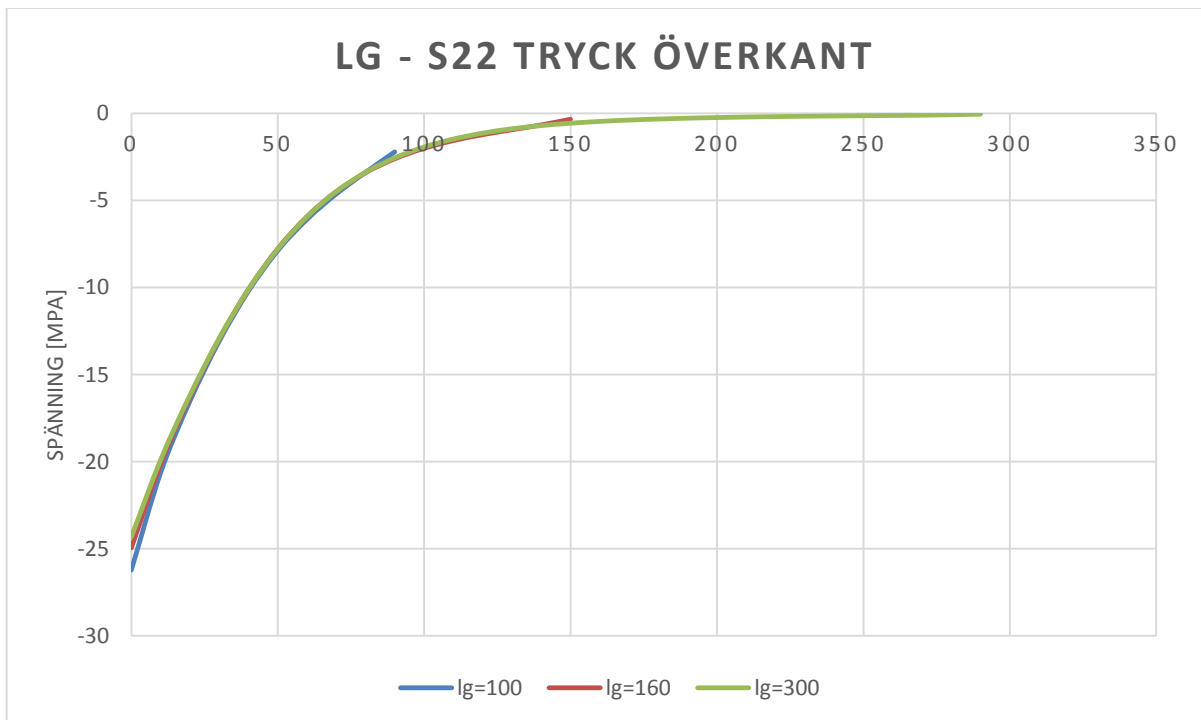
Figur 4.16 – Diametern varierar. Spänning i y-riktningen i balkens underkant.



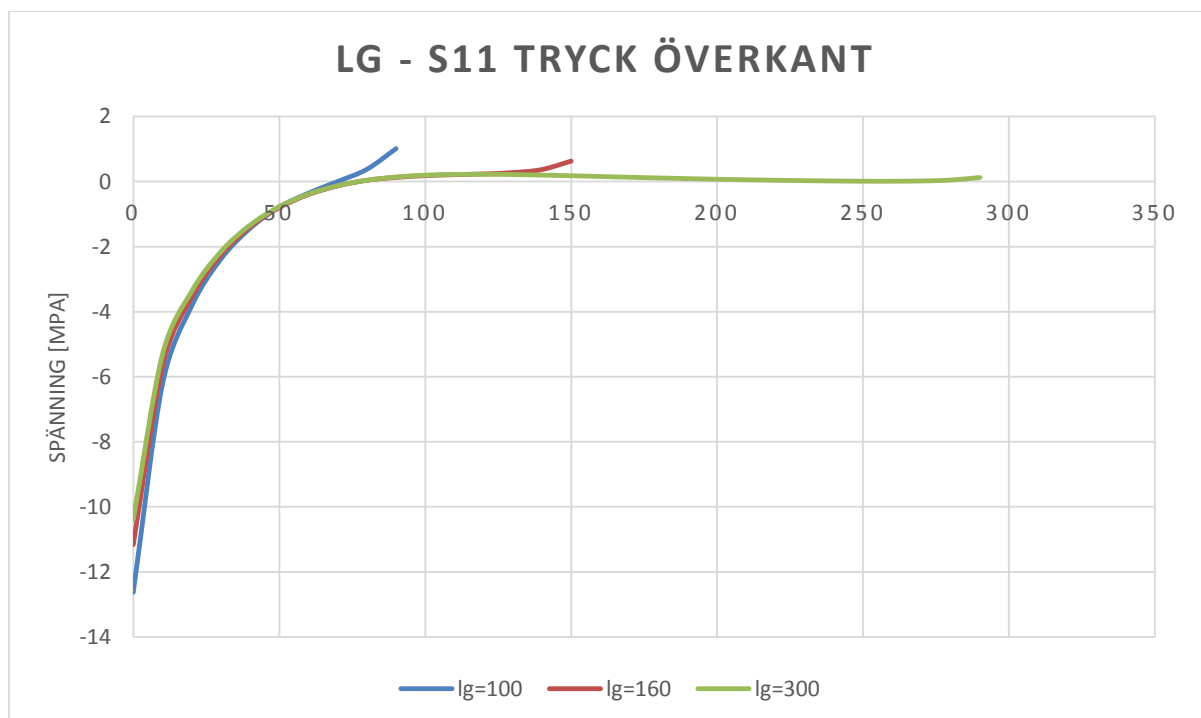
Figur 4.17 – Diametern varierar. Spänning i x-riktningen i balkens underkant.

4. Resultat och diskussion

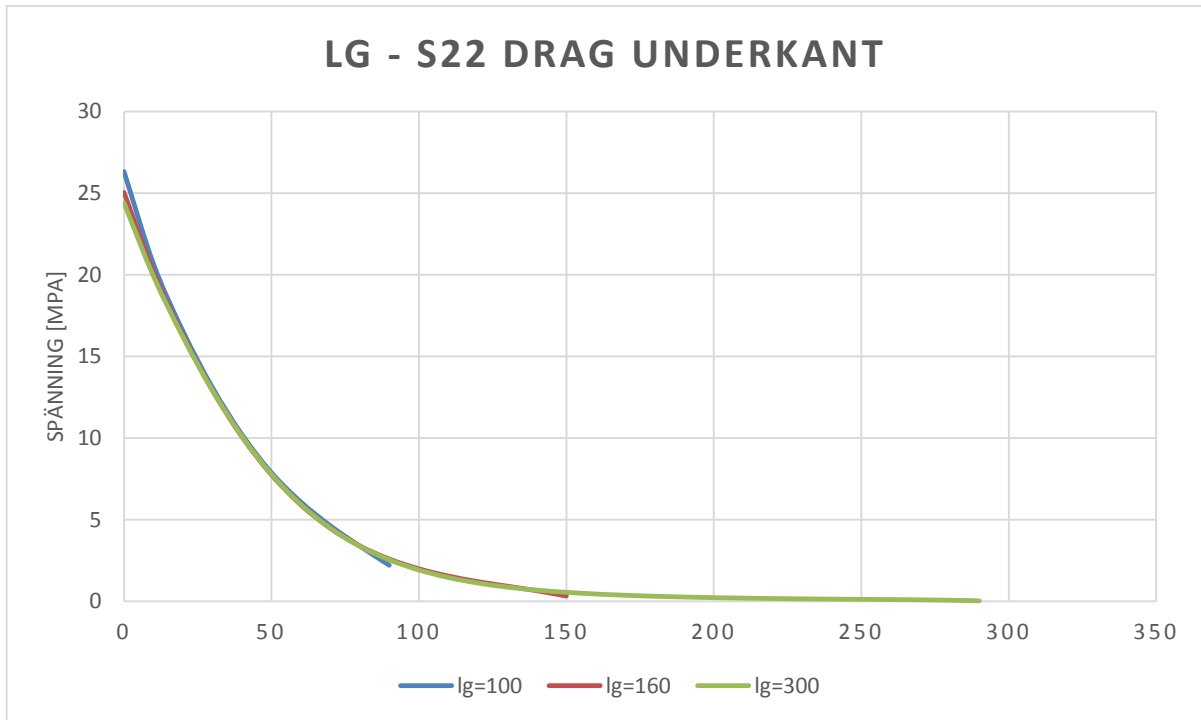
Figur 4.18–4.21 avser ändring av inlimningslängd (l_g). Spänningarna minskar marginellt.



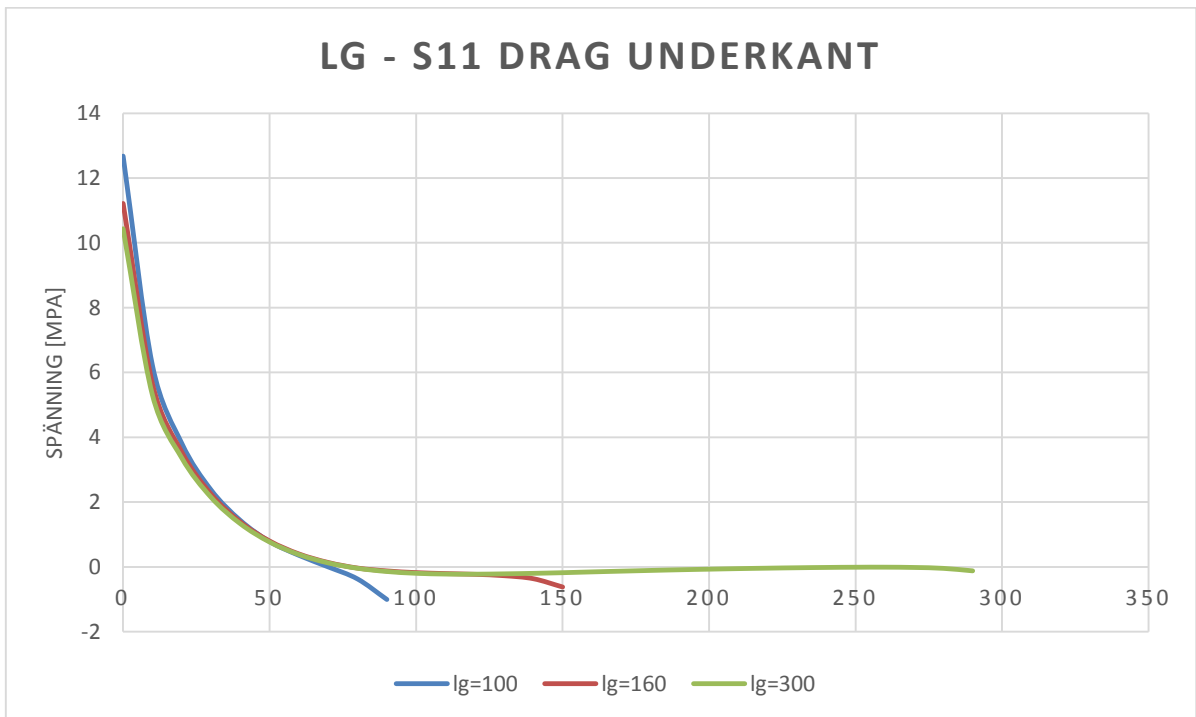
Figur 4.18 – Inlimningsdjupet varierar. Spänning i y-riktningen i balkens överkant.



Figur 4.19 – Inlimningsdjupet varierar. Spänning i x-riktningen i balkens överkant.



Figur 4.20 – Inlimningsdjupet varierar. Spänning i y-riktningen i balkens underkant.



Figur 4.21 – Inlimningsdjupet varierar. Spänning i x-riktningen i balkens underkant.

4. Resultat och diskussion

Krafterna i skruvarna redovisas i tabell 4.2 med storheten [kN]. Krafterna är reaktionskrafter för översta skruven, mitterskruven och understa skruven. För fallet n=2 saknas skruv i mitten vilket syns i tabellen som tomrum. R_{Fx} innebär kraften i x-axelns riktning, på samma sätt innebär R_{Fy} och R_{Fz} krafterna i y-axeln respektive z-axelns riktning.

Tabell 4.2 – Resultat från parameterstudien i ABAQUS. Mått i [mm] och krafter i [kN]. Positiva krafter (+) innebär drag och negativa (-) innebär tryck.

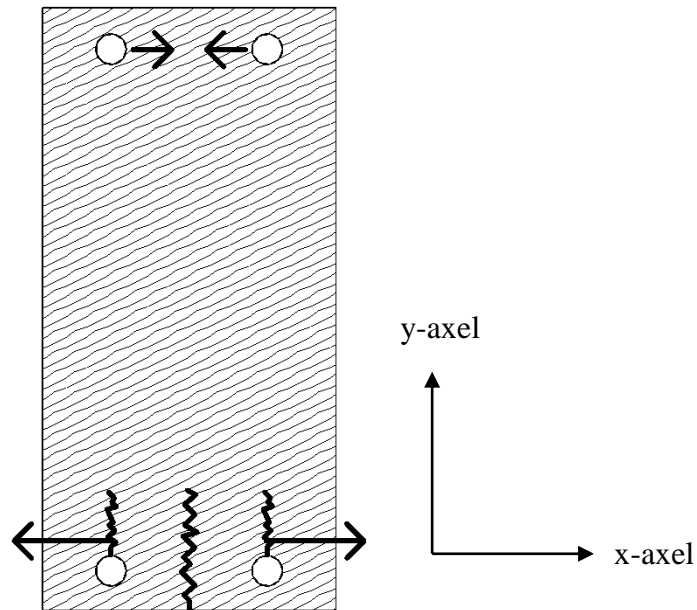
	Överkant			Mitt			Underkant		
	R _{Fx}	R _{Fy}	R _{Fz}	R _{Fx}	R _{Fy}	R _{Fz}	R _{Fx}	R _{Fy}	R _{Fz}
REF	1,7	-20,7	-54,8	0	-27,5	0	-1,7	-20,7	54,8
n=2	1,8	-34,5	-54,8				-1,8	-34,4	54,8
n=3 (REF)	1,7	-20,7	-54,8	0	-27,5	0	-1,7	-20,7	54,8
n=5	1,3	-11,5	-45,6	0	-15,6	0	-1,3	-11,5	45,6
n=9	1	-5,9	-34,3	0	-8,4	0	-1	-5,9	34,3
n=13	0,8	-4	-28,8	0	-5,7	0	-0,8	-4	28,7
e1=1,5d	3,1	-20,5	-54,8	0	-27,9	0	-3,1	-20,5	54,8
e1=3,5d	0,9	-20,8	-54,8	0	-27,4	0	-0,9	-20,8	54,8
e2=1,5d	1,8	-20,4	-52,9	0	-28,5	0,9	-1,8	-20,1	52
e2=3,5d	1,7	-21	-56,7	0,1	-26,7	-1,2	-1,7	-21,3	57,9
d=20	2	-20,5	-54,3	0	-28	0	-2	-20,5	54,3
d=24	2,3	-20,3	-53,8	0	-28,3	0	-2,3	-20,3	53,8
lg=100	1,8	-20,8	-54,8	0	-27,4	0	-1,8	-20,8	54,8
lg=300	1,6	-20,7	-54,8	0	-27,6	0	-1,6	-20,7	54,8

Kontroll görs för krafterna genom att addera kraften i y-riktningen för alla skruvar. Denna summa ska motsvara den symmetriska lasten på F=68,95kN. För referensfallet adderas 20,7+27,5+20,7=68,9kN. Skillnaden är pga. avrundning.

Krafterna i y-riktningen (R_{Fy}) visar att tvärkraftsfördelningen är konvex för samtliga fall. Det vill säga att den mittersta skruven tar större kraftandel av tvärkraften än de yttre skruvarna i förbandet.

Reaktionskrafterna vid ändring av kantavstånden resulterar i väldigt små skillnader. Av detta kan man dra slutsatsen att kantavstånden i typgodkännandet är rimliga.

Figur 4.22 visar möjlig sprickbildning och utifrån reaktionskrafterna i tabell 4.2.



Figur 4.22 - Möjlig sprickbildning pga. reaktionskrafterna

4.2.2 Diskussion

Graferna visar endast linjärelastiska spänningar vilket gör det svårt att uppskatta en brottlast. Dessutom är materialvärden från EC 5% fraktiler vilket innebär att endast 5% av materialen har lägre hållfastheter än de angivna. För att uppskatta brottspänningarna och brottlasterna skulle man dels behöva använda sig av medelvärden på hållfastheter men även modellera enligt plastisk teori eller brottmekanik.

Tittar man på fallet med $n=13$ skruvar i figur 4.2–4.5 kan man se att den minsta spänningen som uppstår är ca 5MPa i tryckspänning och ca 5MPa i dragspänning för S22 (spänningar i y-riktning). Detta kan jämföras med träets karaktäristiska hållfasthetsvärden på 3,3MPa för tryck vinkelrätt fiberriktningen och 0,5MPa för drag vinkelrätt fiberriktningen. Då $n=13$ är det största antalet skruvar som modellerades i ABAQUS kan man dra slutsatsen att det inte var tillräckligt. För S11 (spänningar i x-riktning) fås tryck- och dragspänningar på ca 3,5MPa som även de är högre än de karaktäristiska värdena för limträ GL32h. Detta innebär vidare att handberäkningarna som gjordes i fallstudien inte är orimliga och att parameterstudiens resultat tyder på att modelleringen gav bra resultat. Skillnaden mellan handberäkningen för $d=16$ (som gäller för fallen då antalet skruvar ändrades) är att i handberäkningen utgår man från 10x3 skruvar medan i parameterstudien utgår man från 13x2 skruvar. Skillnaden på 4 skruvar kan göra de lite svårt att jämföra. Dessutom måste man tänka på att typgodkännandet rekommenderade avstånd på $5d$ mellan två skruvar vilket underskrids vid $n=13$ (motsvarar ca $3,5d$). Detta kan medföra att en undersökning om gruppeffekt krävs vilket innebär att man måste reducera kraften varje skruv tar med hänsyn till klossbrott. Detta görs dock ej i denna rapport.

Ändring av inlimningsdjupet, l_g ger minimala skillnader i spänningar. Detta antyder att typgodkännandets rekommendationer är tillräckliga.

Det går även att observera att S22 avtar snabbare än S11, se figur 4.2 och 4.3. Anledningen är okänd och kan indikera på ett ”tak”.

4.3 Förstärkning

Förstärkningen gjordes genom att utnyttja en så kallad ”förstärkningsstrumpa” och fästa detta godtyckliga material på balkänden. Vidare gjordes ett antagande att ”förstärkningsstrumpan” har god vidhäftning med balken. Se avsnitt 3.3. för närmare redogörelse.

Förstärkningen i denna rapport gjordes både för referensfallet med $n=3$ skruvar och för fallet med flest antalet skruvar, $n=13$ st.

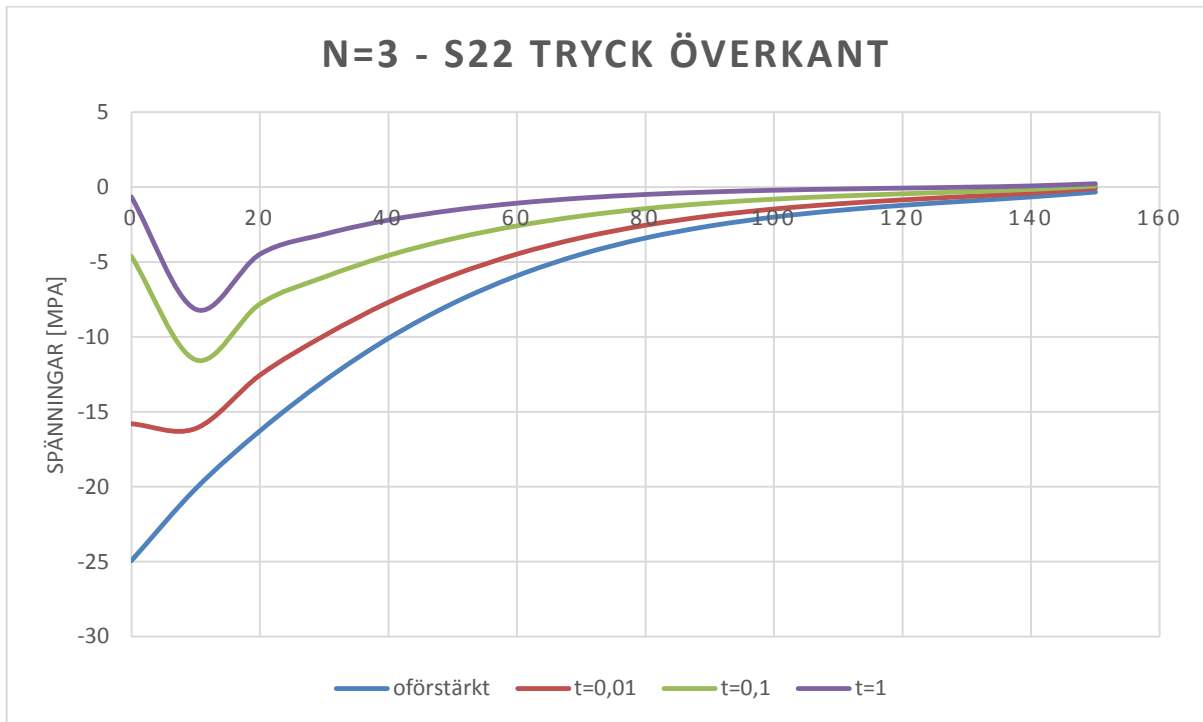
Förstärkningens E-modul fixerades till 200GPa med varierande tjocklek om tre steg:

- 1mm,
- 0,1mm
- 0,01mm

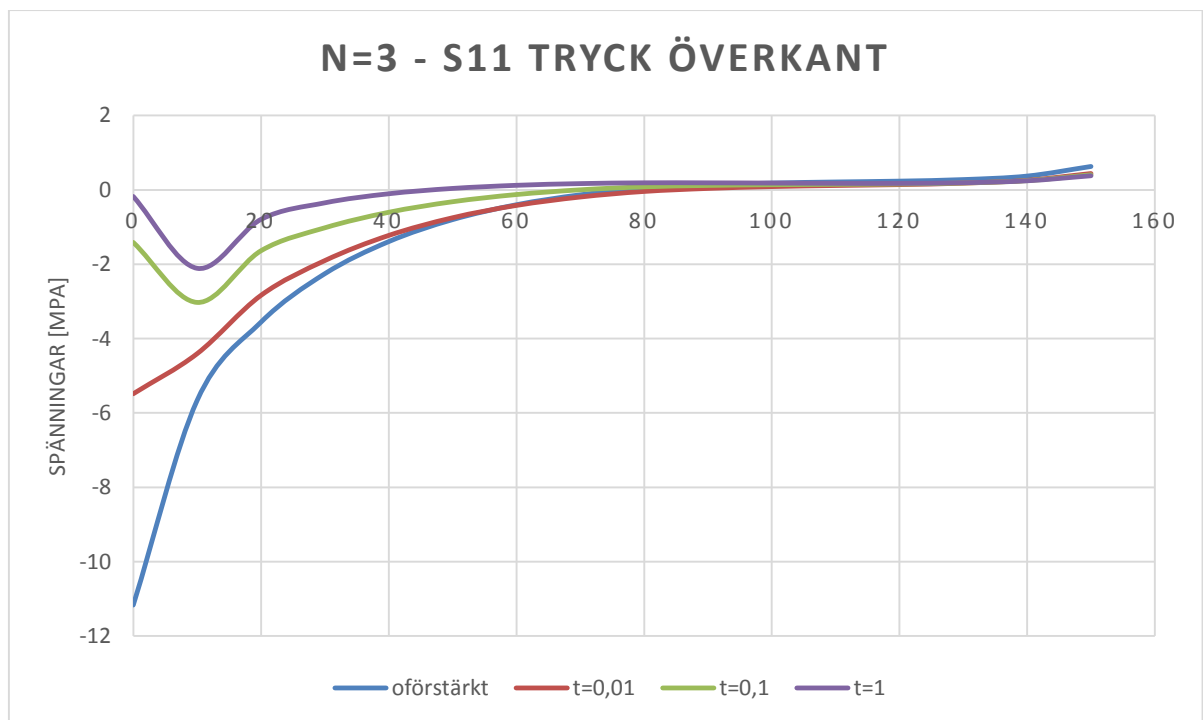
Genom att utnyttja förhållandet $E_{\text{referens}} = E_{\text{godtycklig}} t_{\text{godtycklig}}$, kan förstärkningen motsvara en mängd olika linjärelastiska förstärkningsmaterial såsom stål, kolfiber och glasfiber.

4.3.1 Resultat

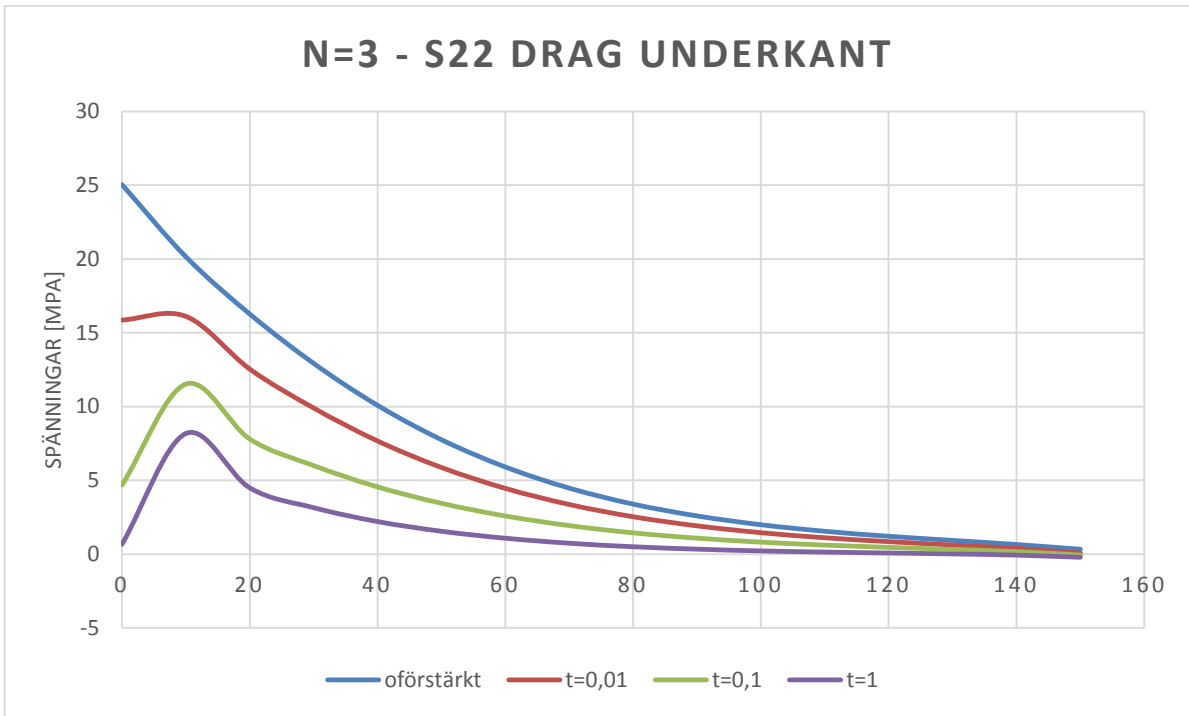
För förstärkningsfallet med $n=3$ skruvar (figur 4.23 – 4.26) kan man observera att effekten av förstärkningen är att spänningarna nära balkände sjunker kraftigt.



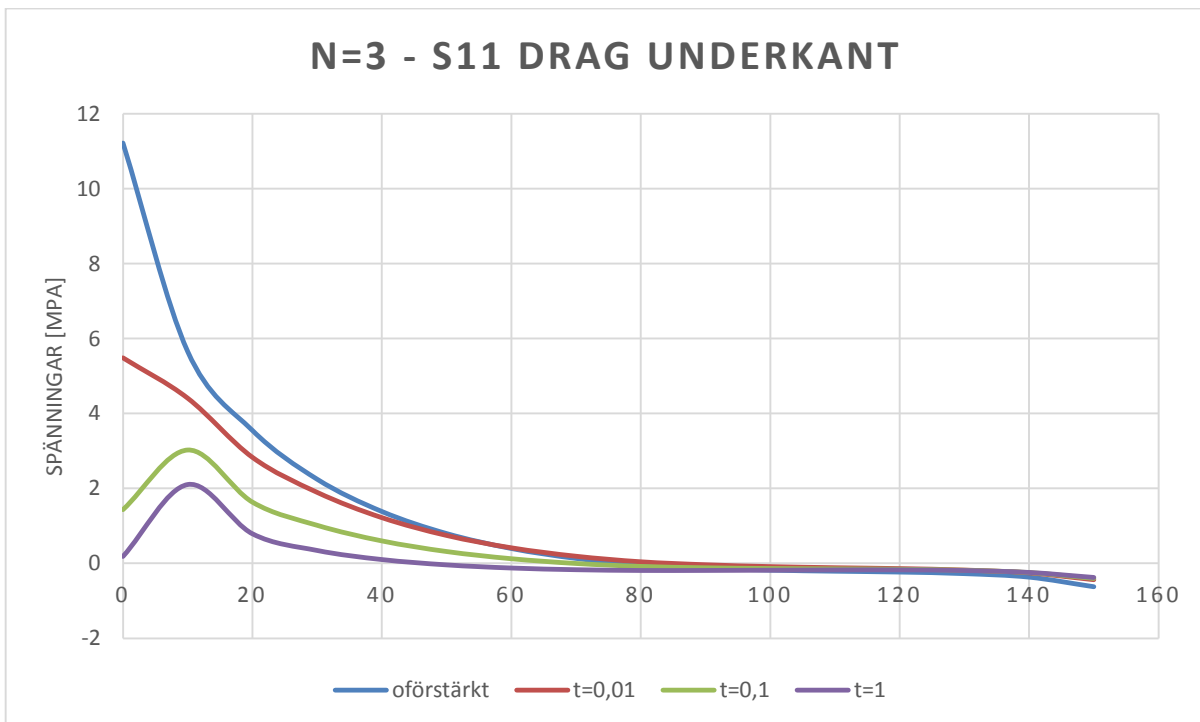
Figur 4.23 – Spänningar längs med inlimmad skruv. Oförstärkta fallet i jämförelse med olika förstärkningstjocklekar för spänning i y-axeln med tryck i överkant.



Figur 4.24 - Spänningar längs med inlimmad skruv. Oförstärkta fallet i jämförelse med olika förstärkningstjocklekar för spänning i x-axeln med tryck i överkant.



Figur 4.25 - Spänningar längs med inlimmad skruv. Oförstärkta fallet i jämförelse med olika förstärkningstjocklekar för spänning i y-axeln med drag i underkant.

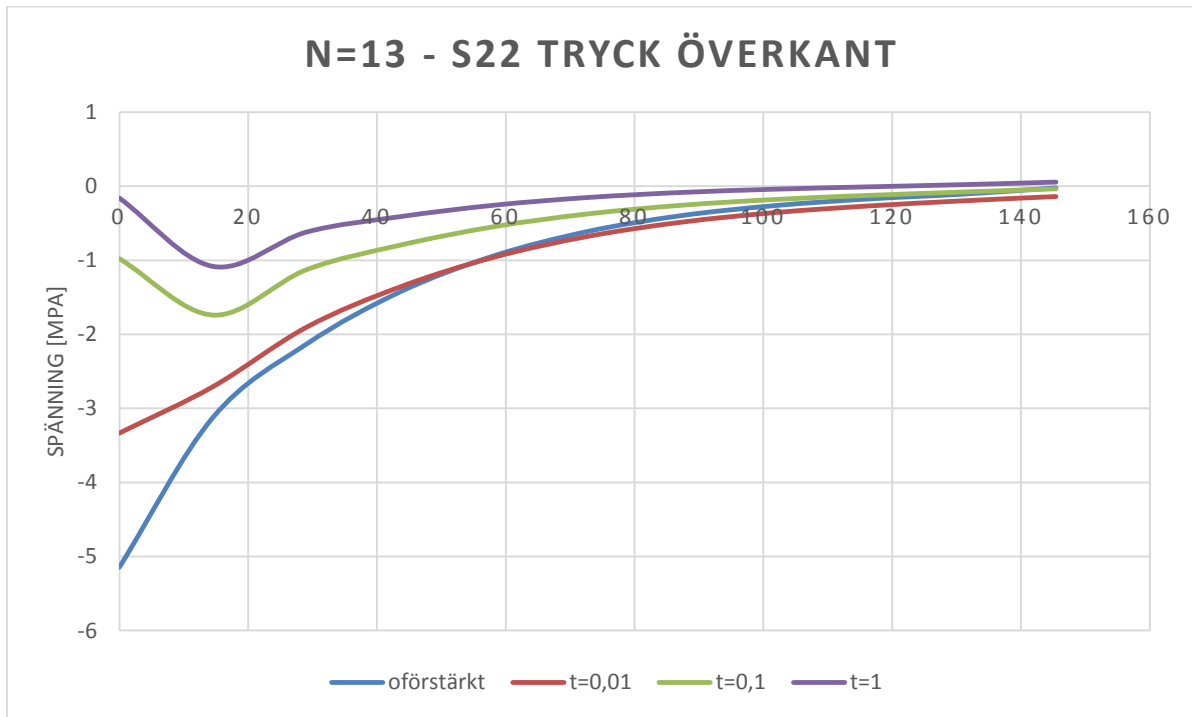


Figur 4.26 - Spänningar längs med inlimmad skruv. Oförstärkta fallet i jämförelse med olika förstärkningstjocklekar för spänning i x-axeln med drag i underkant.

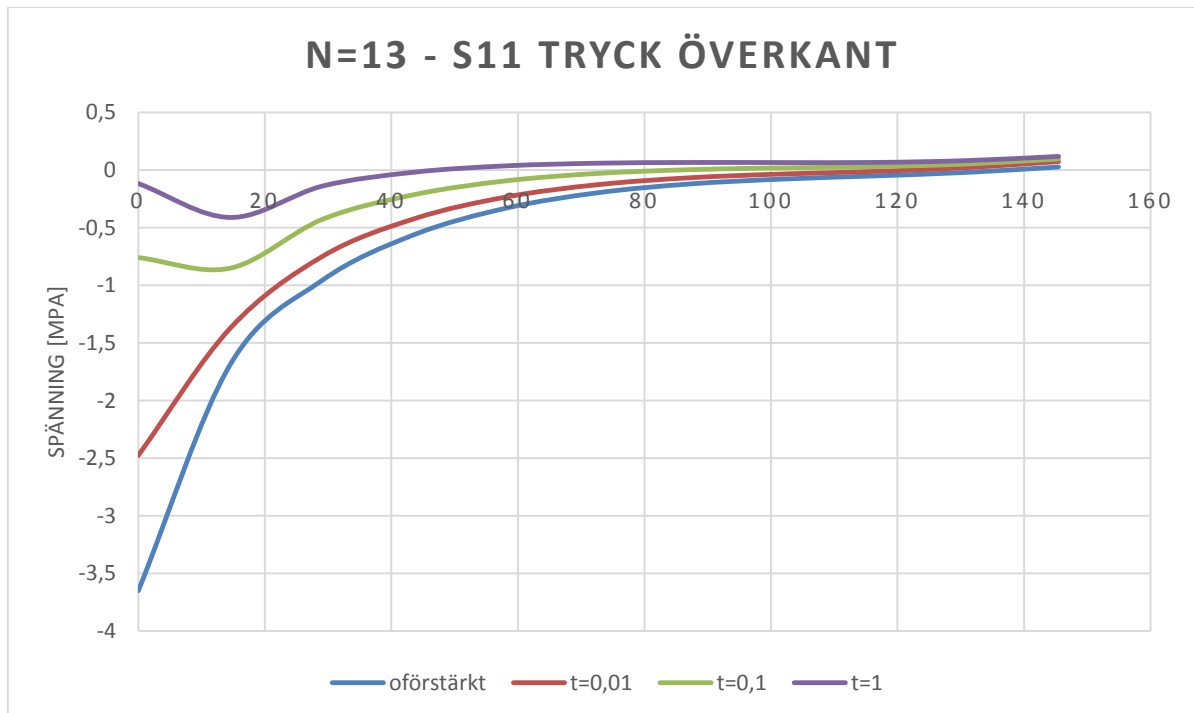
Dimensioneringen klaras ej med förstärkning för $n=3$. Spänningstopparna ca 10mm in i balken är högre än vad träet klarar i tryck och drag vinkelrätt fibrerna se tabell 3.4 samt figur 4.23–4.26.

4. Resultat och diskussion

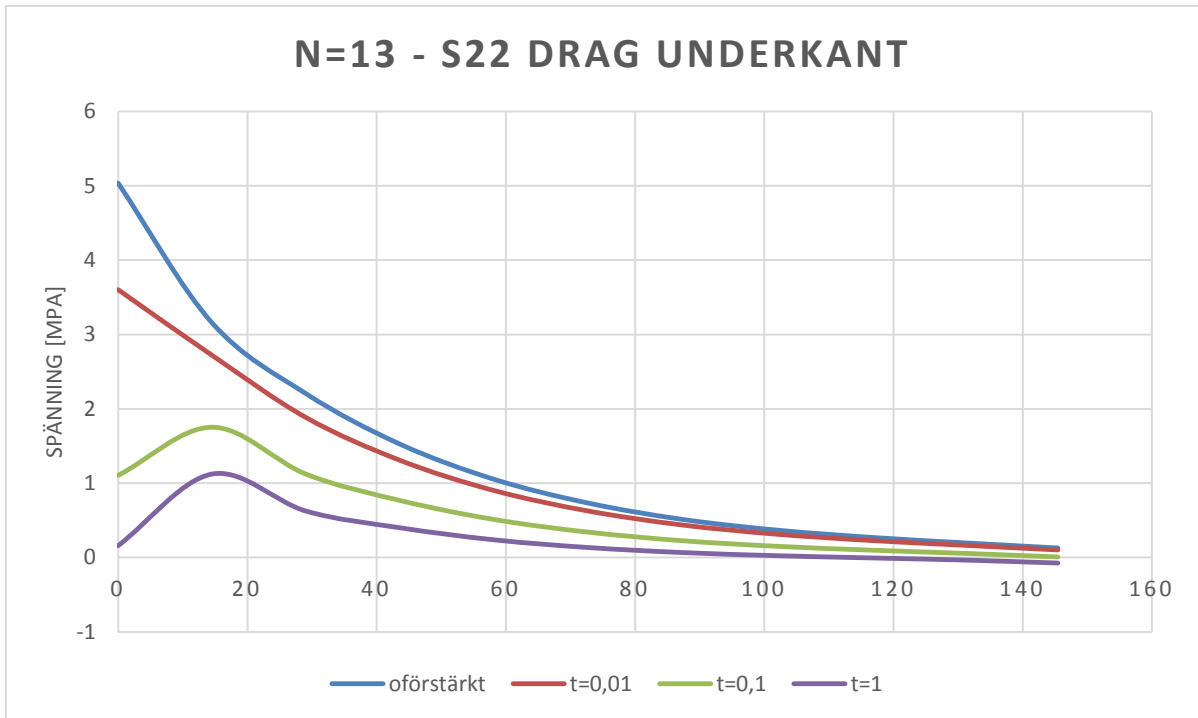
För förstärkningsfallet med $n=13$ skruvar (figur 4.27 – 4.30) kan man observera att effekten av förstärkningen är att spänningarna nära balkände sjunker på samma vis som för $n=3$ skruvar. Spänningsreduktionen är snarlik den med $n=3$ skruvar.



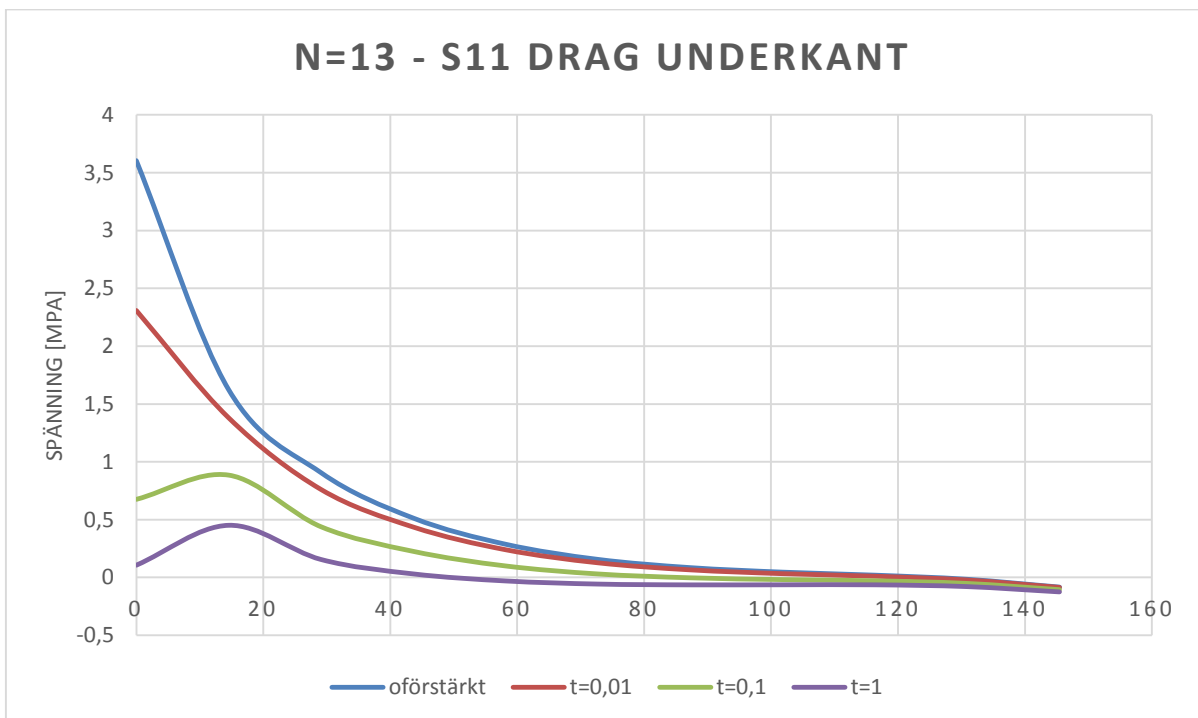
Figur 4.27 – Spänningar längs med inlimmad skruv. Oförstärkta fallet i jämförelse med olika förstärkningstjocklekar för spänning i y-axeln med tryck i överkant.



Figur 4.28 - Spänningar längs med inlimmad skruv. Oförstärkta fallet i jämförelse med olika förstärkningstjocklekar för spänning i x-axeln med tryck i överkant.



Figur 4.29 - Spänningar längs med inlimmad skruv. Oförstärkta fallet i jämförelse med olika förstärkningstjocklekar för spänning i y-axeln med drag i underkant.



Figur 4.30 - Spänningar längs med inlimmad skruv. Oförstärkta fallet i jämförelse med olika förstärkningstjocklekar för spänning i x-axeln med drag i underkant.

Dimensionering är möjlig för både $t=0,1$ mm och $t=1$ mm godtyckligt material med $E=200$ GPa. Det betyder att en glasfiberförstärkning med $t=1,2$ mm och en kolfiberförstärkning

med $t=0,1\text{mm}$ skulle möjliggöra att dimensioneringen är möjlig. Vidare skulle spänningarna minska med uppskattningsvis ca 13% om modelleringen gjordes med totalt 30skruvar.

4.3.2 Diskussion

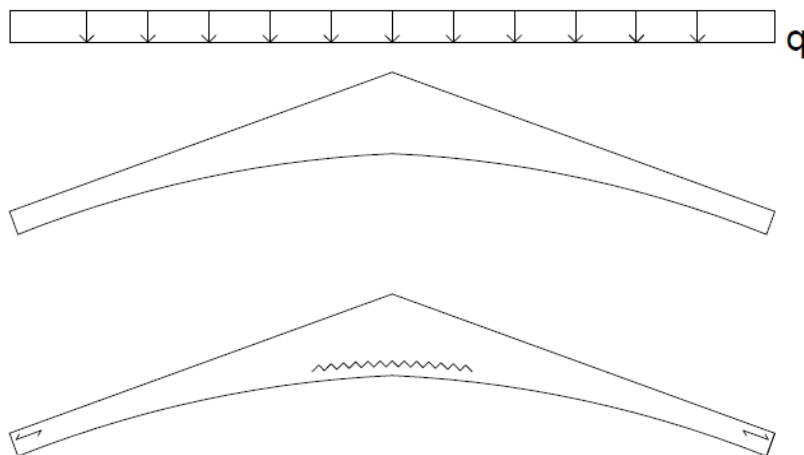
För det förstärkta fallet fås goda resultat vilket tyder på att en dimensionering av inlimmade skruvar i ett momentbelastat ramhörn är möjligt.

Det råder lite tvivelaktigheter kring modelleringen av förstärkning med $E=200\text{GPa}$ och $t=1\text{mm}$ då man genom att använda membranelement antar att böjstyvheten är väldigt låg. Membranelement lämpar sig bäst för låga elasticitetsmoduler och tunna material. Detta är ett gränsfall. För att försäkra sig om att resultaten är bra borde en kontroll ha gjorts genom att modellera med skalelement i ABAQUS istället för membranelement. Detta gjordes inte för att avklara rapporten inom tidsramen. Dock är inte resultaten orimliga då dimensioneringen möjligtvis klaras med en tjocklek på $0,1\text{mm}$.

4.4 Allmän diskussion

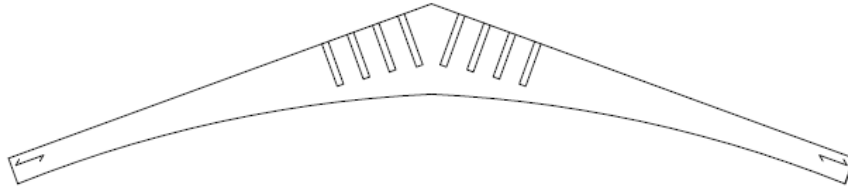
Till en början nämns hur inlimmade skruvar möjliggör estetiskt tilltalande anslutningar men i efterhand används stålhubbar. Detta kan vara motsägelsefullt och man kan fråga sig varför man skulle använda sig av svårare metoder för att uppnå samma resultat. Anledningen till att stålhubb används i denna rapport var för att möjliggöra vinkeln mellan pelare och tak på ett enkelt sätt. Dessutom är lagerhallen för stor för att kunna transporteras till plats med kopplade element. Användning av en stålhubb möjliggör att man kan bygga stort med inlimmade skruvar då man enligt svenskt typgodkännande inte får limma på plats.

Ett problem som kan uppstå med att använda bumerangbalkar beskriven i kapitel två i denna rapport är att det lätt uppstår sprickor pga. att drag- och tryckresultanterna är motsatt varandra och verkar för att spräcka upp balken, se figur 4.31.



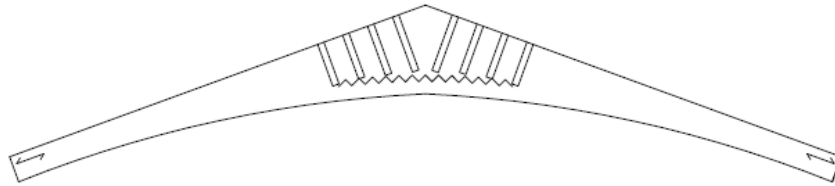
Figur 4.31 – Initial sprickbildning

Man skulle då kunna förstärka bumerangbalken med inlimmade skruvar för att förhindra uppsprickningen enligt figur 4.32.



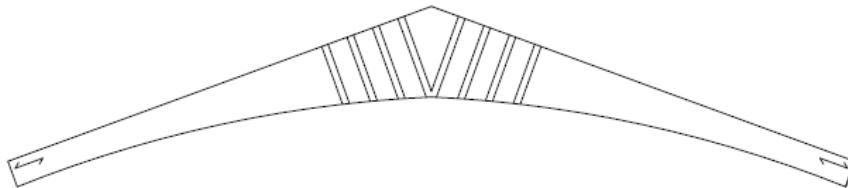
Figur 4.32 – Förstärkning med inlimmade skruvar

Det som då kan uppstå är att man får sprickor precis under de inlimmade skruvarna som i figur 4.33.



Figur 4.33 – Sprickbildning under förstärkningen

Man blir då tvungen att istället förstärka längs hela tvärsnittshöjden för att förhindra sprickor. Eller undviker man bumerangbalkar.



Figur 4.34 – Slutgiltig förstärkningslayout

Som man ser i tabell 2.2 för limtyp och limtjocklek ser man att skjuvmodulen minskar med ökad tjocklek. Denna minskning är enligt en andragradskurva. Genom att använda en liten limtjocklek sparar man både material (och därmed håller ner kostnaden) samt får en högre hållfasthet. Av den anledningen är det onödigt att använda mycket lim.

Från figur 2.15 kan man dra slutsatsen att EPX är att föredra jämfört med PRF och PUR vid relativ fuktighet på 85%. Vid en förhöjd temperatur beter PRF sig bättre än både EPX och PUR.

Man kan observera att typgodkännandet i princip följer Riberholts rekommendationer som publicerades 1988 med en liten skillnad. Man utgår i första hand ifrån att limmet har dålig kontakt. Dessutom ökas avståndet (centrum till centrum) från Riberholts förslag på 4d till 5d i typgodkännandet. Kantavstånden minskar istället från 2,8d till 2,5d i typgodkännandet. Anledningen till att man utgår från att limmet har dålig kontakt tros vara att det i verkligheten är svårt att urskilja bra och dålig kontakt. Att anta sämre värden motsvarar att man överdimensionerar pga. osäkerhet. Dessutom kan det ha gjorts försök där man fått andra värden. Detta då det alltid skiljer sig mellan olika försök. Exempelvis kan fukthalt, träslag, förspruckna tvärsnitt, kvistar osv. skilja två olika försök åt.

4.5 Felkällor

Det fanns lite problematik kring var spänningarna skulle tas ifrån. I ABAQUS är man tvungen att rita en path som programmet redovisar utdata ifrån. Då exempelvis den globala elementstorleken ligger på ca 10mm uppstår problem kring att rita denna path kring maxvärden. Det går delvis inte att urskilja max- och minvärden då färgskalan inte tillåter detta och dels kan man inte välja noder hursomhelst då den globala elementstorleken är 10mm. Det resulterar i att man endast kan välja noder på pathen i multiplar om 10. Elementstorleken skulle kunna reduceras till exempelvis 5mm eller ännu mindre element om 1mm men då uppstår ett annat problem – tidsaspekten för simuleringen. Med en elementstorlek på 10mm tog varje simulering ungefär 1,5h att slutföra. Endast parameterstudien krävde fjorton simuleringar vilket motsvarar ca 22h i simuleringstid. För att ge en jämförelse tar en global elementstorlek på 15mm ca 40min vilket innebär att en reduktion av elementstorleken på en tredjedel mer än fördubblar beräkningstiden. Det skulle alltså inte vara hållbart att minska den globala elementstorleken till fem eller en millimeter. Dessutom var skillnaden i resultaten väldigt små då elementstorleken sattes till 15mm och 10mm. En annan approach var att utnyttja kvadratiska istället för linjära element. Det medför att man får extra noder som pathen kan sättas på. Kvadratiska element ansågs som bästa lösningen och parameterstudien är gjord där dessa element utnyttjas.

Ett annat problem med valet av spänningarna var huruvida max- och/eller minspänningar skulle väljas för de olika lastfallen separat (som tidigare nämnt var ena lastfallet ren tvärkraft vid skruvarna samt tvärkraft och moment andra lastfallet) eller att välja en lämplig path som överensstämmer hyfsat bra med båda lastfallen. Skillnaden är att om max- och/eller minspänningarna för varje lastfall väljs separat får man det absolut största- och minsta värdet, nackdelen är att man inte kan superponera värdena och jämföra.

5 Slutsatser och fortsatta studier

5.1 Slutsatser

Vid beräkning av minimal inlimningslängd är slutsatsen från denna rapport att inlimmade skruvar inte är lämpade för höga moment- och tvärkraftsbelastningar enligt gällande typgodkännande. Detta på grund av att förbandets tvärkraftskapacitet är lägre än vad som krävs. Ökar man inlimningsdjupet kan dimensionering göras möjlig, men behöver vidare undersökningar.

Då parameterstudien utfördes genom ändring av endast en parameter i taget kan man egentligen inte uttala sig om huruvida dimensionering av förbandet är möjligt eller inte. Detta då man i verkligheten kan kombinera ändring av olika parametrar – förslagsvis diameter och antalet skruvar.

Det man kan observera av resultaten från parameterstudien är att man överskrider begränsningarna på materialen. Vare sig det är lim, stål eller trä som går till brott krävs en förstärkning av ändytan för att minimera risken för sprickbildning. Initieras en spricka reduceras bärförmågan avsevärt.

Vid en förstärkning av ändytan reduceras de lokala spänningarna till tillåtna värden där man kan anta att en dimensionering kan göras möjlig. Men för att vara säker krävs laboratorieförsök för att säkerställa att modellen överensstämmer med verkligheten.

5.2 Fortsatta studier

För att i framtiden kunna använda inlimmade skruvar behöver mer forskning bedrivas. Man behöver göra försök kring tvärkraftsbelastningen och även samtidigt tvär- och axiell belastning. Man behöver även göra försök på olika förstärkningstyper och vilka som skulle lämpa sig bäst beroende på olika situationer och begränsningar. Det skulle även vara intressant att få fram data på ungefär hur många inlimmade skruvar det behövs för att motsvara ett spik- eller skruvförband samt jämföra kostnaderna för att utföra de olika lösningarna.

Forskning kring hur förbandet klarar sig i brandförlopp och förhöjda temperaturer behöver även göras. Detta då lim har, precis som andra material, en tendens att förlora hållfastheten med ökad temperatur.

Man behöver även undersöka utmattningen och hur cykliska laster påverkar limmet och inlimmade skruvar för att försäkra sig om att en eventuell lösning klarar kraven för exempelvis att en byggnad ska kunna stå i 50 eller 100 år.

Det man såg i denna rapport är att axiellt självborrande skruvar som förstärkning inte var optimala för detta fall pga. krav på kantavstånd. Dock kunde man konstatera att spänningarna skulle minska trots att skruvarna är tvungna att skruvas in där spänningarna inte är maximala, där spänningarna redan har sjunkit. Av den anledning kan det finnas ett behov av att undersöka hur mycket nytta självborrande skruvar enligt EC gör för fall där spänningarna är höga vid en ändyta.

6 Litteraturförteckning

- Andersson, B., & Larsson, G. (2014). *Verification of buckling analysis for Glulam arches*. Lund: Division of Structural Mechanics, LTH.
- Andersson, D., & Odén, J. (2009). *Träs skjuvhållfasthet & limträbalkars tvärkraftskapacitet - provningar & beräkningar*. Lund: div. of Structural Mechanics, LTH.
- Anon. (2012). *Dimensioneringsanvisningar (2012-02-01) hörande till typgodkännandebevis 1396/78 "I limträ inlimmad skruv" (2012-05-10)*. Karlskrona: SP SITAC.
- Anon. (2012). *Tillverkningsbeskrivning (2009-10-13) hörande till typgodkännandebevis 1396/78 "I limträ inlimmad skruv" (2012-05-10)*. Karlskrona: SP SITAC.
- Batchelar, M., & McIntosh, K. (1998). *Structural joints in glulam*. Montreux.
- Bengtsson, C., & Johansson, C.-J. (2001). *GIROD - Glued in Rods for Timber Structures*. Borås: SP Swedish National Testing and Research Institute.
- Carling, O. (2008). *Limträ: Handbok*. Stockholm: Svenskt Limträ AB.
- Dassault Systemes. (6.13). ABAQUS CAE.
- Ehlbeck, J., & Werner, H. (1988). *Design of joints with laterally loaded dowels. Proposals for improving the design rules in the CIB-Code and the draft Eurocode 5*. Karlsruhe: CIB.
- Engström, B. (2011). *Design and analysis of deep beams, plates and oter discontinuity regions*. 2011: Chalmers University of Technology.
- Faye, C., & et al. (2004). *French data concerning glued-in rods*. Edingburgh: International council for building resarch studies and documentation working commission W18A - Timber structures.
- Fragiacomo, M., & Batchelar, M. (2012). *Timber Frame Moment Joints with Glued-In Steel Rods. I: Design*.
- Frühwald Hansson, E., & Crocetti, R. (03 2014). *F10 Stål- och träbyggnadsteknik*. LTH, Lund, Skåne, Sverige.
- Frühwald Hansson, E., & Crocetti, R. (03 2014). *F8 Stål- och träbyggnadsteknik*. LTH, Lund, Skåne, Sverige.
- Frühwald Hansson, E., & Crocetti, R. (03 2014). *F9 Stål- och träbyggnadsteknik*. (Frühwald Hansson,Eva; Crocetti, Roberto) LTH, Lund, Skåne, Sverige.
- Isaksson, T., & Mårtensson, A. (2010). *Byggkonstruktion - Regel- och formelsamling*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Isaksson, T., Mårtensson, A., & Thelandersson, S. (2010). *Byggkonstruktion*. Lund: Studentlitteratur AB.

- Johansson, C.-J. (den 1 Maj 2012). *GIROD - Glued-in rods for timber structures*. SP/Linnéuniversitetet.
- Källander, B. (2004). *Glued in Rods in load bearing timber structures - status regarding european standards for test procedures*. Borås: SP Swedish National Testing and Research Institute.
- Larsson, O. (2008). *Shear capacity in adhesive glass-joints*. Lund: div. of Structural Mechanics, LTH.
- Lindgren, G. (2004). *Underlag för reviderat typgodkännande - Inlimmad skruv*. Stockholm: Svenskt Limträ AB.
- Persson, J. (2011). *Numerical analysis of compression perpendicular to the grain in glulam beams with and without reinforcement*. Lund: div. of Structural Mechanics, LTH.
- Promat. (Januari 2006). *Brandisolering av bärande stålkonstruktioner med PROMATECT*. Stockholm, Sverige.
- Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajcic, V., O'Neill, C., McPolin, D., Widmann, R., (Unpublished). *Glued-in rods*.
- Riberholt, H. (1988). *Glued bolts in glulam - proposals for CIB code*. Parksville, Canada: International council for building research studies and documentation working commission W18A - Timber structures.
- Schlaich, J., Schäfer, K., & Jennewein, M. (den 20 11 2014). *Schlaich Truss Models PCI 1987*. Hämtat från Scribd.: <http://www.scribd.com/doc/57204681/Schlaich-Truss-Models-PCI-1987>
- Schober, K.-U., Drass, M., & Becker, W. *Adhesive strength of timber joints with unconventional glued-in rods*. Institute of Innovative Structures.
- SS-EN-1995-1-1:2004/A1:2008: Eurokod 5: Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1-1: Allmänt - Gemensamma regler och regler för byggnader; Svensk Standard, 2004 och 2008.
- SS-EN-ISO-898-1:1999: Eurokod: Fästelement - Fästelement av kolstål och legerade stål - Hållfasthetsfordringar - Del 1: Skruvar och pinnskruvar; Svensk Standard, 2009.
- Svensson, K., & Lundqvist, L. (2012). *TYPGODKÄNNANDEBEVIS 1396/78*. Karlskrona: SP SITAC.
- Tlustochowicz, G., Serrano, E., & Steiger, R. (2010). *State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods*. RILEM.
- Trautz, M. (2009). *Self-tapping screws as reinforcement for timber structures*. Valencia, Spain: International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

6. Litteraturförteckning

- TräGuiden. (den 26 11 2014). *Större bärverk av trä*. Hämtat från TräGuiden:
<http://www.traguiden.se/TGtemplates/popup1spalt.aspx?id=870> den 02 10 2014
- Walker, J., & Xiao, R. (2014). *Strength of glued-in rods under combined axial and lateral loading*. University of Bath.
- Whale, L., Smith, I., & Larsen, H. (1987). *Design of nailed and bolted joints-proposals for the revision of existing formulae in draft Eurocode 5 and the CIB Code. CIB-W18A/20-7-1*. Dublin, Ireland: CIB.

Bilaga I – Ramanalys

Ramanalys 5.3.004
© StruSoft 2005

1 (11)

Projekt: Datum: 2014-11-24
 Utfört av: Signatur:
 Projektfil: \\fs-n.net.lth.se/home/lavo10sfi\Windows\Desktop\plRam2.fra Företagsnamn:

SAMMANFATTNING

- 5 noder
- 2 stöd
- 0 fjädrar
- 2 leder
- 4 element
- 2 tvärsnitt
- 8 laster
- 3 baslastfall
- 3 lastfall

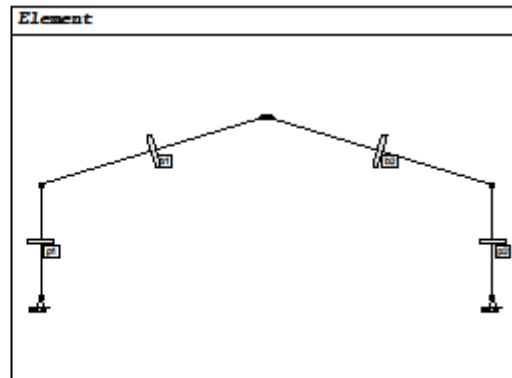
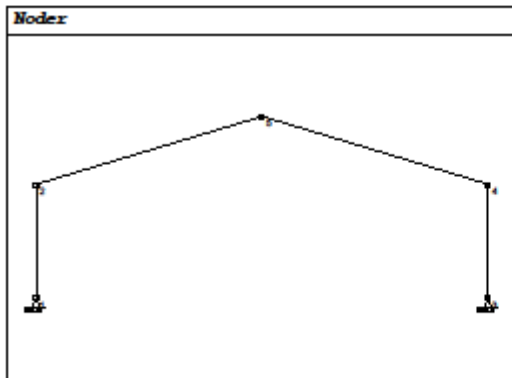
\\fs-n.net.lth.se/home/lavo10sfi\Windows\Desktop\Ram2.fra

Noder

X (m)	Y (m)	X	Y	M	X (m)	Y (m)	X	Y	M	X (m)	Y (m)	X	Y	M	X (m)	Y (m)	X	Y	M	
1	0	0	F	F	4	20.000	5.000			3	20.000	0	F	F						
2	0	5.000			5	10.000	8.000													

Element

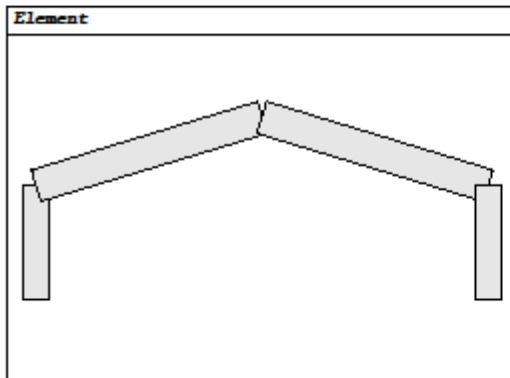
Namn	Nod 1	Nod 2	Init- (I=Led)	Namn	Nod 1	Nod 2	Init- (I=Led)	Namn	Nod 1	Nod 2	Init- (I=Led)
p1	1	2	Nej	b2	5L	4	Nej				
b1	2	5L	Nej	p2	3	4	Nej				



Ramanalys 5.3.004
© StruSoft 2005

2(11)

Projekt: Datum: 2014-11-24
 Utfört av: Signatur:
 Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\homelawo10sfil\Windows\Desкто plRam2.fra Företagsnamn:



Tvärsnittsdata

Namn	Riktn.	Area (m ²)	I (m ⁴)	h (m)	s (m)	E-modul (kN/m ²)
215x1215 / L 40	y-y	2.612e-1	3.21e-2	1.215	0.608	1.04e7
215x1440 / L 40	y-y	3.096e-1	5.35e-2	1.440	0.720	1.04e7

Tvärsnitt/element

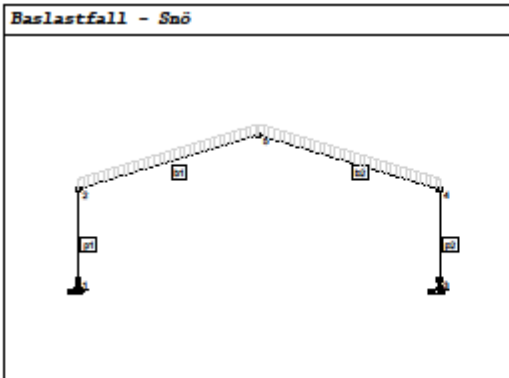
Element	Tvärsnitt	Riktn.	Längd (m)	Vikt (kg)
p1	215x1215 / L 40	y-y	5.000	679.185
b1	215x1440 / L 40	y-y	10.440	1680.806
b2	215x1440 / L 40	y-y	10.440	1680.806
p2	215x1215 / L 40	y-y	5.000	679.185
Summa			30.881	4719.982

Tvärsnittsspecifikation

Tvärsnitt	Längd (m)	Antal	Vikt (kg)	Tvärsnitt	Längd (m)	Antal	Vikt (kg)
215x1215 / L 40	5.000	2	1358.370				
215x1440 / L 40	10.440	2	3361.612	Summa	30.881	4	4719.982

Projekt: Datum: 2014-11-24
 Utfört av: Signatur:
 Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\home\awo10sfil\Windows\Desktop\Företagsnamn: plRam2.fra

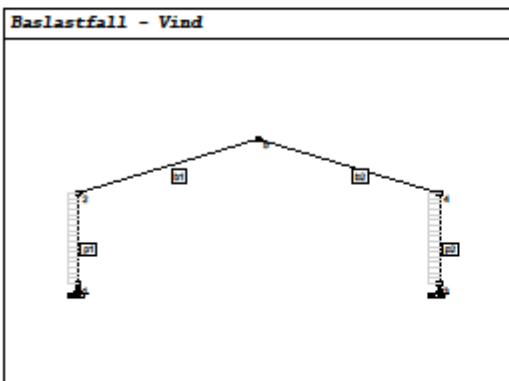
Baslastfall: Snö



Utbredd last

Element	Riktn.	Lastintensitet	L1 (m)	L2 (m)
b1	Y / q (kN/m)	9.6	0	0
b2	Y / q (kN/m)	9.6	0	0

Baslastfall: Vind



Utbredd last

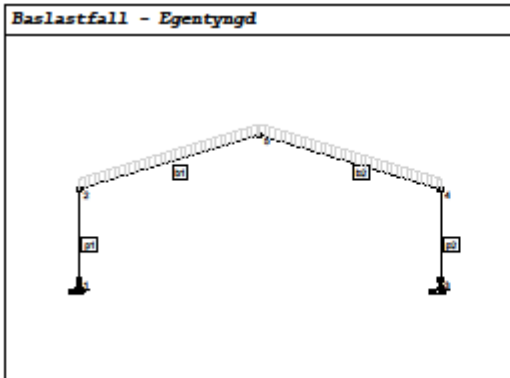
Element	Riktn.	Lastintensitet	L1 (m)	L2 (m)
p1	X / q (kN/m)	2.6	0	0
p2	X / q (kN/m)	2.6	0	0

Ramanalys 5.3.004
© StruSoft 2005

4(11)

Projekt: Datum: 2014-11-24
Utfört av: Signatur:
Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\homelawo10sfil\Windows\Desкто\Företagsnamn: plRam2.fra

Baslastfall: Egentyngd



Utbredd last

Element	Riktn.	Lastintensitet	L1 (m)	L2 (m)
b1	Y / q (kN/m)	2.0	0	0
b2	Y / q (kN/m)	2.0	0	0

Baslastfall

Namn	Bet.	Namn	Bet.	Namn	Bet.
Snö	B1	Vind	B2	Egentyngd	B3

Lastfall

ID	Namn	Kombination	ID	Namn	Kombination
1	SNÖ HL	1.2*B3+1.5*B1+0.45*B2	3	BRUK SNÖ HL	1*B3+0.2*B1
2	VIND HL	1.2*B3+1.2*B1+1.5*B2			

Resultat

Max pos. moment - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	0	-25.579	-40.926	BRUK SNÖ HL	b2	27.769	-3.501	-115.500	SNÖ HL
b1	35.183	-2.929	-93.951	VIND HL	p2	562.741	109.623	-176.860	SNÖ HL

Max pos. moment - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-0.013	-25.615	-40.926	BRUK SNÖ HL	b2	26.925	-3.812	-115.819	SNÖ HL
b1	34.772	-2.776	-94.152	VIND HL	p2	566.482	110.321	-176.876	SNÖ HL

Max neg. moment - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-533.491	-109.623	-173.935	SNÖ HL
b1	-533.491	135.099	-154.980	SNÖ HL
b2	-562.741	-137.901	-155.820	SNÖ HL
p2	0	25.579	-40.926	BRUK SNÖ HL

Ramanalys 5.3.004
© StruSoft 2005

5(11)

Projekt: Datum: 2014-11-24
 Utfört av: Signatur:
 Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\homelawo10sfil\Windows\Desкто Företagsnamn:
 plRam2.fra

Max neg. moment - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-536.850	-110.249	-173.918	SNÖ HL
b1	-536.877	135.410	-155.290	SNÖ HL
b2	-566.518	-138.246	-156.139	SNÖ HL
p2	0.013	25.615	-40.926	BRUK SNÖ HL

Max spänningar - 1:a ordn.

Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall
p1	9.4	SNÖ HL	b2	7.1	SNÖ HL			
b1	6.7	SNÖ HL	p2	10.0	SNÖ HL			

Max spänningar - 2:a ordn.

Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall
p1	9.5	SNÖ HL	b2	7.1	SNÖ HL			
b1	6.7	SNÖ HL	p2	10.0	SNÖ HL			

Jämviktskontroll - 1:a ordn.

Lastfall	X-riktn.	Y-riktn.	X-riktn.	Y-riktn.
	kN	kN	kN	kN
SNÖ HL	11.700	-350.794	-11.700	350.794
VIND HL	39.000	-290.658	-39.000	290.658
BRUK SNÖ HL	0	-81.852	0	81.852

Jämviktskontroll - 2:a ordn.

Lastfall	X-riktn.	Y-riktn.	X-riktn.	Y-riktn.
	kN	kN	kN	kN
SNÖ HL	11.700	-350.794	-11.700	350.794
VIND HL	39.000	-290.658	-39.000	290.658
BRUK SNÖ HL	0	-81.852	0	81.852

Max pos. tvärkraft - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	0	-25.579	-40.926	BRUK SNÖ HL
b1	-533.491	135.099	-154.980	SNÖ HL
b2	0	30.099	-105.420	SNÖ HL
p2	0	115.473	-176.860	SNÖ HL

Max pos. tvärkraft - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-0.013	-25.615	-40.926	BRUK SNÖ HL
b1	-536.877	135.410	-155.290	SNÖ HL
b2	-0.172	29.754	-105.740	SNÖ HL
p2	0.253	116.171	-176.876	SNÖ HL

Min neg. tvärkraft - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-533.491	-109.623	-173.935	SNÖ HL
b1	0	-32.901	-104.580	SNÖ HL
b2	-562.741	-137.901	-155.820	SNÖ HL
p2	0	25.579	-40.926	BRUK SNÖ HL

Projekt: Datum: 2014-11-24
Utfört av: Signatur:
Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\homelawo10sfil\Windows\Deskt
plRam2.fra Företagsnamn:

Min neg. tvärkraft - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-536.850	-110.249	-173.918	SNÖ HL
b1	-0.146	-32.590	-104.890	SNÖ HL
b2	-566.518	-138.246	-156.139	SNÖ HL
p2	0.013	25.615	-40.926	BRUK SNÖ HL

Max pos. normalkraft - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	0	-25.579	-40.926	BRUK SNÖ HL	b2	0	7.350	-24.500	BRUK SNÖ HL
b1	0	-7.350	-24.500	BRUK SNÖ HL	p2	127.894	25.579	-40.926	BRUK SNÖ HL

Max pos. normalkraft - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-0.013	-25.615	-40.926	BRUK SNÖ HL	b2	-0.008	7.332	-24.517	BRUK SNÖ HL
b1	-0.008	-7.332	-24.517	BRUK SNÖ HL	p2	128.086	25.615	-40.926	BRUK SNÖ HL

Min neg. normalkraft - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-533.491	-109.623	-173.935	SNÖ HL	b2	-562.741	-137.901	-155.820	SNÖ HL
b1	-533.491	135.099	-154.980	SNÖ HL	p2	0	115.473	-176.860	SNÖ HL

Min neg. normalkraft - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-536.850	-110.249	-173.918	SNÖ HL	b2	-566.518	-138.246	-156.139	SNÖ HL
b1	-536.877	135.410	-155.290	SNÖ HL	p2	0.253	116.171	-176.876	SNÖ HL

Min neg. spänningar - 1:a ordn.

Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall
p1	-10.8	SNÖ HL	b2	-8.1	SNÖ HL			
b1	-7.7	SNÖ HL	p2	-11.3	SNÖ HL			

Min neg. spänningar - 2:a ordn.

Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall
p1	-10.8	SNÖ HL	b2	-8.1	SNÖ HL			
b1	-7.7	SNÖ HL	p2	-11.4	SNÖ HL			

Max abs. moment - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-533.491	-109.623	-173.935	SNÖ HL	b2	-562.741	-137.901	-155.820	SNÖ HL
b1	-533.491	135.099	-154.980	SNÖ HL	p2	562.741	109.623	-176.860	SNÖ HL

Max abs. moment - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-536.850	-110.249	-173.918	SNÖ HL	b2	-566.518	-138.246	-156.139	SNÖ HL
b1	-536.877	135.410	-155.290	SNÖ HL	p2	566.482	110.321	-176.876	SNÖ HL

Max abs. tvärkraft - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-533.491	-109.623	-173.935	SNÖ HL	b2	-562.741	-137.901	-155.820	SNÖ HL
b1	-533.491	135.099	-154.980	SNÖ HL	p2	0	115.473	-176.860	SNÖ HL

Projekt: Datum: 2014-11-24
 Utfört av: Signatur:
 Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\homelawo10sfil\Windows\Desкто
 plRam2.fra Företagsnamn:

Max abs. tvärkraft - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-536.850	-110.249	-173.918	SNÖ HL	b2	-566.518	-138.246	-156.139	SNÖ HL
b1	-536.877	135.410	-155.290	SNÖ HL	p2	0.253	116.171	-176.876	SNÖ HL

Max abs. spänningar - 1:a ordn.

Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall
p1	10.8	SNÖ HL	b2	8.1	SNÖ HL			
b1	7.7	SNÖ HL	p2	11.3	SNÖ HL			

Max abs. spänningar - 2:a ordn.

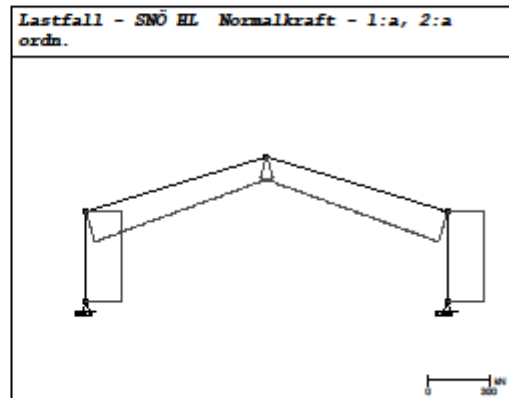
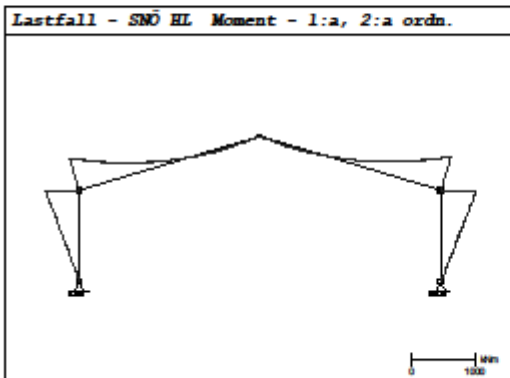
Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall	Element	Sig MPa	Lastfall
p1	10.8	SNÖ HL	b2	8.1	SNÖ HL			
b1	7.7	SNÖ HL	p2	11.4	SNÖ HL			

Max abs. normalkraft - 1:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	0	-103.773	-173.935	SNÖ HL	b2	-562.741	-137.901	-155.820	SNÖ HL
b1	-533.491	135.099	-154.980	SNÖ HL	p2	0	115.473	-176.860	SNÖ HL

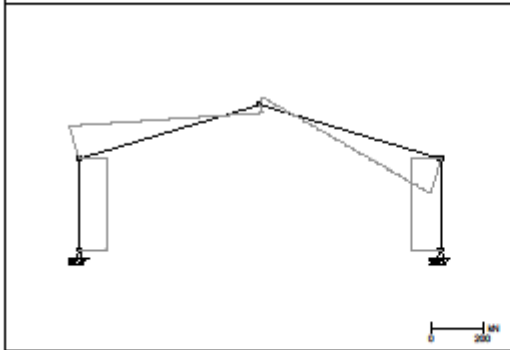
Max abs. normalkraft - 2:a ordn.

Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall	Element	M kNm	V kN	N kN	Lastfall
p1	-0.230	-104.399	-173.918	SNÖ HL	b2	-566.518	-138.246	-156.139	SNÖ HL
b1	-536.877	135.410	-155.290	SNÖ HL	p2	0.253	116.171	-176.876	SNÖ HL

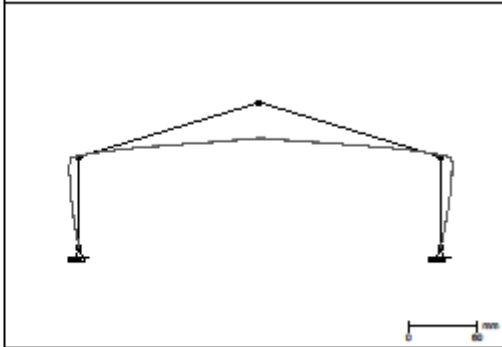


Projekt: Datum: 2014-11-24
 Utfört av: Signatur:
 Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\homelawo10sfil\Windows\Desktop1Ram2.fra Företagsnamn:

Lastfall - SNÖ HL Tvärkraft - 1:a, 2:a ordn.



Lastfall - SNÖ HL Deformation - 1:a, 2:a ordn.



Lastfall - SNÖ HL Nodsnittkrafter - 1:a ordn.

Element	Nod	M kNm	V kN	N kN	Element	Nod	M kNm	V kN	N kN
p1	1	0	-103.773	-173.935	b2	5	0	30.099	-105.420
	2	-533.491	-109.623	-173.935		4	-562.741	-137.901	-155.820
b1	2	-533.491	135.099	-154.980	p2	3	0	115.473	-176.860
	5	0	-32.901	-104.580		4	562.741	109.623	-176.860

Lastfall - SNÖ HL Nodsnittkrafter - 2:a ordn.

Element	Nod	M kNm	V kN	N kN	Element	Nod	M kNm	V kN	N kN
p1	1	-0.230	-104.399	-173.918	b2	5	-0.172	29.754	-105.740
	2	-536.850	-110.249	-173.918		4	-566.518	-138.246	-156.139
b1	2	-536.877	135.410	-155.290	p2	3	0.253	116.171	-176.876
	5	-0.146	-32.590	-104.890		4	566.482	110.321	-176.876

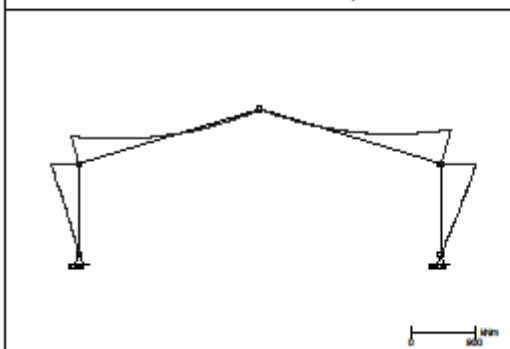
Stödreaktioner - 1:a ordn. Lastfall: SNÖ HL

Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm	Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm
1	103.773	173.935	0	3	-115.473	176.860	0

Stödreaktioner - 2:a ordn. Lastfall: SNÖ HL

Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm	Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm
1	104.102	173.918	0	3	-115.802	176.876	0

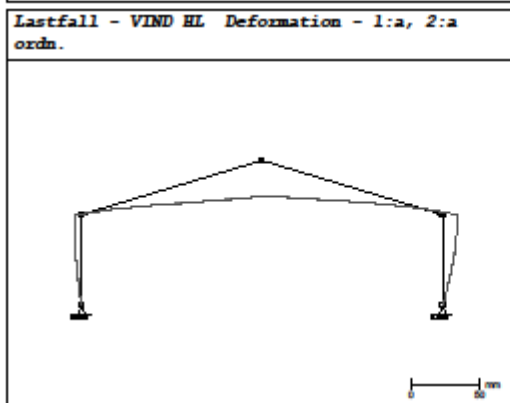
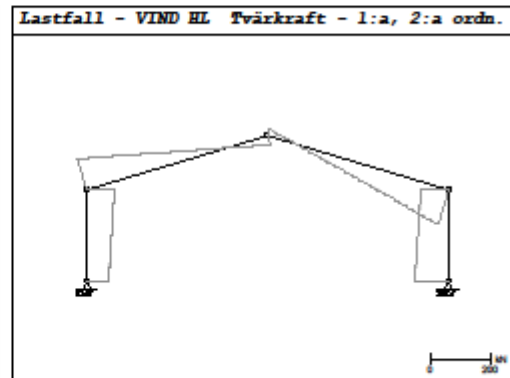
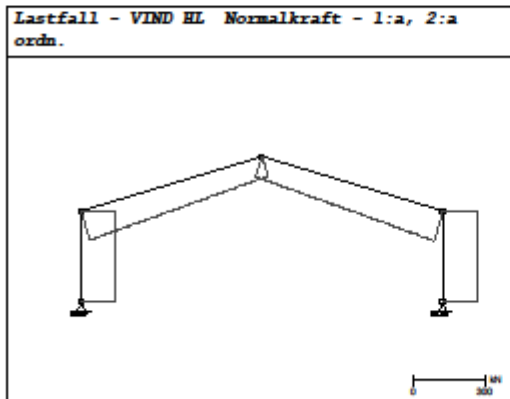
Lastfall - VIND HL Moment - 1:a, 2:a ordn.



Ramanalys 5.3.004
© StruSoft 2005

9 (11)

Projekt: Datum: 2014-11-24
Utfört av: Signatur:
Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\homelawo10sfil\Windows\Desktop\Ram2.fra Företagsnamn:



Lastfall - VIND HL Nodsnittkrafter - 1:a ordn.

Element	Nod	M kNm	V kN	N kN	Element	Nod	M kNm	V kN	N kN
p1	1	0	-71.231	-140.454	b2	5	0	21.431	-88.401
	2	-405.403	-90.831	-140.454		4	-502.903	-117.769	-130.161
b1	2	-405.403	108.431	-127.359	p2	3	0	110.331	-150.204
	5	0	-30.769	-85.599		4	502.903	90.831	-150.204

Lastfall - VIND HL Nodsnittkrafter - 2:a ordn.

Element	Nod	M kNm	V kN	N kN	Element	Nod	M kNm	V kN	N kN
p1	1	-0.136	-71.686	-140.409	b2	5	-0.145	21.157	-88.628
	2	-407.318	-91.186	-140.409		4	-505.903	-118.043	-130.388
b1	2	-407.325	108.608	-127.560	p2	3	0.197	110.884	-150.249
	5	-0.073	-30.592	-85.800		4	505.869	91.384	-150.249

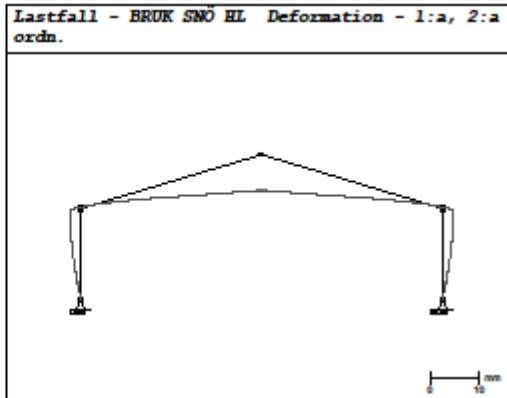
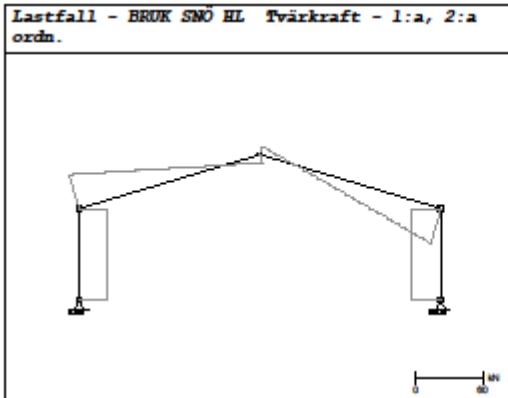
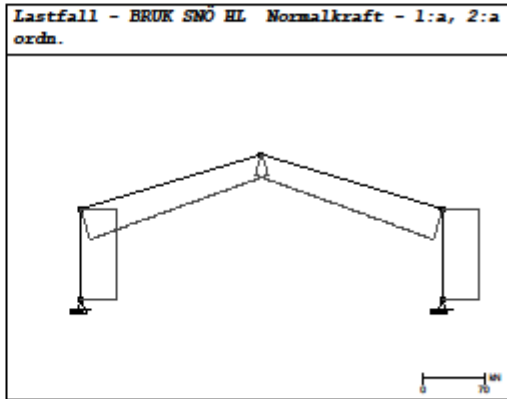
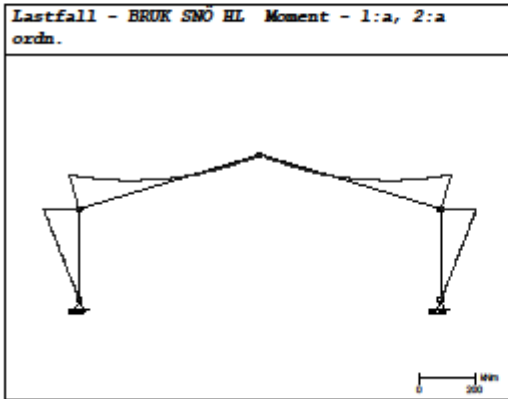
Stödreaktioner - 1:a ordn. Lastfall: VIND HL

Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm	Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm
1	71.231	140.454	0	3	-110.331	150.204	0

Stödreaktioner - 2:a ordn. Lastfall: VIND HL

Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm	Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm
1	71.554	140.409	0	3	-110.554	150.249	0

Projekt: Datum: 2014-11-24
 Utfört av: Signatur:
 Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\homelawo10sfil\Windows\Desktop\Ram2.fra Företagsnamn:



Lastfall - BRUK SNÖ HL Nodsnittkrafter - 1:a ordn.

Element	Nod	M kNm	V kN	N kN	Element	Nod	M kNm	V kN	N kN
p1	1	0	-25.579	-40.926	b2	5	0	7.350	-24.500
	2	-127.894	-25.579	-40.926		4	-127.894	-31.850	-36.260
b1	2	-127.894	31.850	-36.260	p2	3	0	25.579	-40.926
	5	0	-7.350	-24.500		4	127.894	25.579	-40.926

Lastfall - BRUK SNÖ HL Nodsnittkrafter - 2:a ordn.

Element	Nod	M kNm	V kN	N kN	Element	Nod	M kNm	V kN	N kN
p1	1	-0.013	-25.615	-40.926	b2	5	-0.008	7.332	-24.517
	2	-128.086	-25.615	-40.926		4	-128.087	-31.868	-36.277
b1	2	-128.087	31.868	-36.277	p2	3	0.013	25.615	-40.926
	5	-0.008	-7.332	-24.517		4	128.086	25.615	-40.926

Stödreaktioner - 1:a ordn. Lastfall: BRUK SNÖ HL

Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm	Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm
1	25.579	40.926	0	3	-25.579	40.926	0

Ramanalys 5.3.004
© StruSoft 2005

11 (11)

Projekt: Datum: 2014-11-24
Utfört av: Signatur:
Projektfil: \\fs-n.net.lth.se\home\awo10sfi\Windows\Desкто\Företagsnamn:
plRam2.fra

Stödreaktioner - 2:a ordn. Lastfall: BRUK SNÖ HL

Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm	Nod	Rx kN	Ry kN	Rm kNm
1	25.597	40.926	0	3	-25.597	40.926	0

7 Bilaga II – Dimensionering av elementen

7.1 Böjmoment

$$M_{Rd} = f_{md} \cdot W \cdot k_{crit}$$

där,

M_{Rd} = Dimensionerande momentkapacitet [Nm]

f_{md} = Dimensionerande böjhållfasthet parallellt fibrerna [MPa]

W = Böjmotstånd i aktuell riktning. $W = \frac{b \cdot h^2}{6}$ för rektangulära tvärsnitt

k_{crit} = Reduktionsfaktor som beaktar risken för vippning

$$k_{crit} = \begin{cases} 1 & \text{för } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{för } 0,75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \lambda_{rel,m}^{-2} & \text{för } 1,4 \leq \lambda_{rel,m} \end{cases}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{m,crit}}}$$

Där $\sigma_{m,crit}$ är kritisk böjpåkänning vid stabilitetsbrott enligt elasticitetsteori med karakteristiska värden på elasticitetsmodul och skjuvmodul enligt (SS-EN 1995-1-1, 6.3.3)

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{L_{ef} \cdot W_y}$$

7.1.1 Pelare i nod 3

Pelaren tar inte upp moment i nod tre, (pelarfoten) och därmed är momentkapaciteten inte av intresse.

7.1.2 Pelare i nod 4

$$M_{Rd} = 20,48 \text{ MPa} \cdot \frac{(0,3 \cdot 0,810^2)}{6} \cdot k_{crit} = 671,85 \text{ kNm}$$

7.1.3 Balk i nod 4

$$M_{Rd} = 20,48 \text{ MPa} \cdot \frac{(0,3 \cdot 0,810^2)}{6} \cdot k_{crit} = 671,85 \text{ kNm}$$

7.1.4 Balk i nod 5

Balken tar inte upp moment i nod fem, (nocken) och därmed är momentkapaciteten inte av intresse.

7.2 Tryck

$$N_{c,Rd} = f_{cd} \cdot A \cdot k_c$$

där,

$N_{c,Rd}$ = Dimensionerande bärförmåga vid tryck parallellt fiberriktningen [N]

f_{cd} = Dimensionerande tryckhållfasthet parallellt fibrerna [MPa]

A = Tvärsnittsarea [m²]

k_c = hänsyn till knäckning [-]

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} \text{ för } \lambda_{rel} > 0,3$$

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

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}}$$

$$\lambda = \frac{\beta \cdot L}{i}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{h}{\sqrt{12}}$$

7.2.1 Pelare i nod 3

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{0,300}{\sqrt{12}} = 0,0866 \text{ m}$$

För knäckningskurvor enligt Eulers knäcklängder används fallet ”stång fast inspänd i ena änden och ledad i andra”. Vidare används det praktiska värdet jämfört med det teoretiska enligt SS-EN 1993-1-1, 6.3.1.2.

$$\lambda = \frac{\beta \cdot L}{i} = \frac{0,8 \cdot 5}{0,0866} = 46,19$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{46,19}{\pi} \sqrt{\frac{29}{11100}} = 0,75$$

$$k = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5(1 + 0,1(0,75 - 0,3) + 0,75^2) = 0,80$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{0,80 + \sqrt{0,80^2 - 0,75^2}} = 0,91$$

$$N_{c,Rd} = 18,56 \text{ MPa} \cdot (0,30 \cdot 0,30) \cdot 0,91 = 1527,75 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{176,86}{1527,75} = 0,11577 \rightarrow \approx 12\% \text{ utnyttjandegrad}$$

7.2.2 Pelare i nod 4

Pelare i nod fyra beräknas på samma sätt som i nod tre och man får:

$$i = \frac{0,810}{\sqrt{12}} = 0,2338 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{0,8 \cdot 5 \text{ m}}{0,2338} = 17,11$$

$$\lambda_{rel} = \frac{17,11}{\pi} \sqrt{\frac{29}{11100}} = 0,28$$

$$k = 0,5(1 + 0,1(0,28 - 0,3) + 0,28) = 0,54$$

$$k_c = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 - 0,28^2}} = 1,0$$

$$N_{c,Rd} = 18,56 \text{ MPa} \cdot (0,81 \cdot 0,30) \cdot 1 = 4510,1 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{155,82}{4510,1} = 0,039 \rightarrow \approx 4\% \text{ utnyttjandegrad}$$

7.2.3 Balk i nod 4

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{h}{\sqrt{12}} = \frac{0,810}{\sqrt{12}} = 0,2338 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{\beta \cdot L}{i} = \frac{0,8 \cdot 10,44}{0,2338} = 35,72$$

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{35,72}{\pi} \sqrt{\frac{29}{11100}} = 0,58$$

$$k = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2) = 0,5(1 + 0,1(0,58 - 0,3) + 0,58^2) = 0,68$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{0,68 + \sqrt{0,68^2 - 0,58^2}} = 0,96$$

$$N_{c,Rd} = 18,56 \text{ MPa} \cdot (0,81 \cdot 0,30) \cdot 0,96 = 4329,94 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{176,86}{4329,94} = 0,0359 \rightarrow \approx 4\% \text{ utnyttjandegrad}$$

7.2.4 Balk i nod 5

$$i = \frac{0,200}{\sqrt{12}} = 0,0577$$

$$\lambda = \frac{0,8 \cdot 10,44}{0,0577} = 144,66$$

$$\lambda_{rel} = \frac{144,66}{\pi} \sqrt{\frac{29}{11100}} = 2,35$$

$$k = 0,5(1 + 0,1(2,35 - 0,3) + 2,35^2) = 3,37$$

$$k_c = \frac{1}{3,37 + \sqrt{3,37^2 - 2,35^2}} = 0,17$$

$$N_{c,Rd} = 18,56 \text{ MPa} \cdot (0,20 \cdot 0,30) \cdot 0,17 = 192,40 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{30,10}{192,40} = 0,156 \rightarrow \approx 16\% \text{ utnyttjandegrad}$$

7.3 Böjmoment och normalkraft

Om $\lambda_{rel} \leq 0,3$, d.v.s. inte förekommer ingen risk för knäckning bör ekvationerna nedan uppfyllas:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + k_m \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} + \left(\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^2 \leq 1,0$$

$$k_m \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} + \left(\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^2 \leq 1,0$$

Om $\lambda_{rel} > 0,3$, d.v.s. det förekommer risk för knäckning bör istället ekvationerna nedan uppfyllas:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + k_m \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} + \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

$$k_m \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} + \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$$

där,

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ = Dimensionerande lasteffekt av böjmoment kring y- resp. z-axeln [Nm]

$N_{c,Ed}$ = Dimensionerande lasteffekt av tryckkraften [N]

$M_{y,Rd}$, $M_{z,Rd}$ = Dimensionerande bärförmåga vid böjning [Nm]

$N_{c,Rd}$ = Dimensionerande bärförmåga vid tryck [N]

k_m = reduktionsfaktor = 0,7 för rektangulära tvärsnitt och 1,0 för övriga tvärsnitt

7.3.1 Pelare i nod 3

Pelarna antas vara stadgade kring z-axeln av styva skivor vilket medför att faktorn $k_m = 0$.

Vidare utsätts pelaren vid stöden (inklusive nod tre) inte av någon momentbelastning vilket resulterar i att detta stycke inte är applicerat mer än att undersöka utnyttjandegraden p.g.a. normalkraften som sedan tidigare blev 32 %.

7.3.2 Pelare i nod 4

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{562,74}{671,85} + \frac{176,86}{4510,08} = 0,8768 \leq 1,0 \rightarrow OK!$$

7.3.3 Balk i nod 4

$$\frac{562,74}{671,85} + \frac{155,82}{4329,9} = 0,8389 \leq 1,0 \rightarrow OK!$$

(Minskas balkens höjd till 0,765m blir utnyttjandegraden i stället 94%)

7.3.4 Balk i nod 5

På samma sätt som för fallet av pelare i nod tre saknas momentbelastning i nocken.

Utnyttjandegraden p.g.a. normalkraft är 16 %.

Man bör även kontrollera samtida inverkan av moment och tryckkraft vid maximala fältmomentet hos balken för att kunna säkerställa att balken klarar sig även i det snittet. Det görs inte i denna rapport då fokus ligger på förbandet i ramhörn.

7.4 Dimensionering av nock och pelargrund

Resultatet under 7.4 är de optimerade mått på tvärsnitten i nock och pelarfot.

7.4.1 Pelare i nod 3

Pelaren i nod tre utsätts ej för en momentbelastning vilket resulterar i att man ej behöver ta hänsyn till effekten av sprickor, k_{crit} .

$$V_{Rd} = \frac{A \cdot f_{vd}}{1,5} = \frac{(0,30 \cdot 0,3) \cdot 2,24MPa}{1,5} = 134,4 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{115,47}{134,4} = 0,8592 \rightarrow \approx 86\%$$

7.4.2 Balk i nod 5

På samma sätt som pelaren i nod tre beaktas inte k_{crit} då det inte förekommer någon momentbelastning.

$$V_{Rd} = \frac{A \cdot f_{vd}}{1,5} = \frac{(0,20 \cdot 0,3) \cdot 2,24MPa}{1,5} = 89,6 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = \frac{30,1}{89,6} = 0,33594 \rightarrow \approx 34\%$$

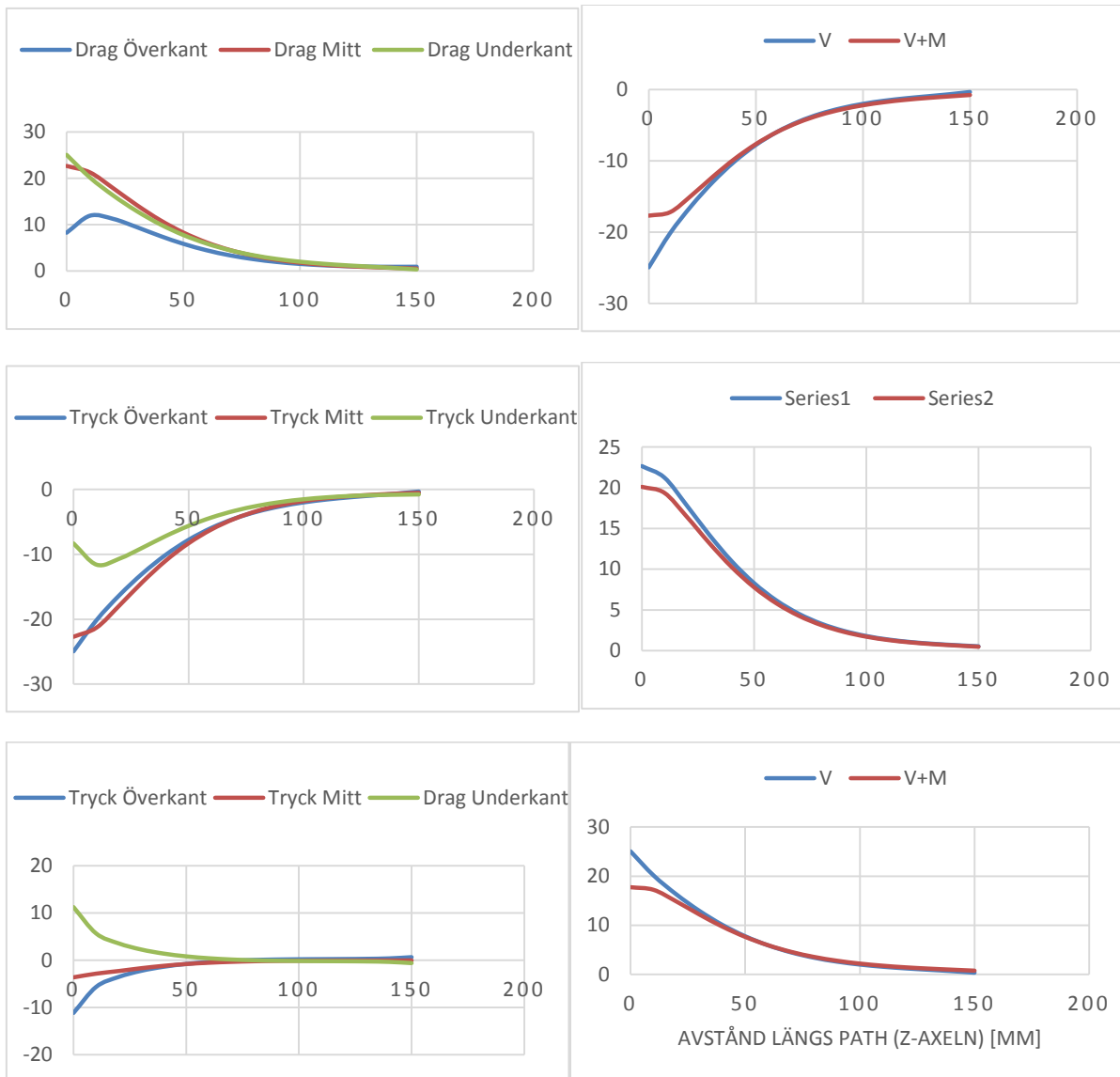
Tvärsnittshöjden på nocken kan minskas för att uppnå en högre utnyttjandegrad. Dock kommer den psykologiska aspekten in där icke-konstruktörer som ser den smala tvärsnittshöjden kan bli rädda för att det är underdimensionerat. En annan aspekt är att klara momentmax i fält som ligger ungefär 2/3 in i balken sedd från ramhörnet. Av den anledningen låter vi tvärsnittshöjden förbli 200mm.

Bilaga III – Rådata från ABAQUS

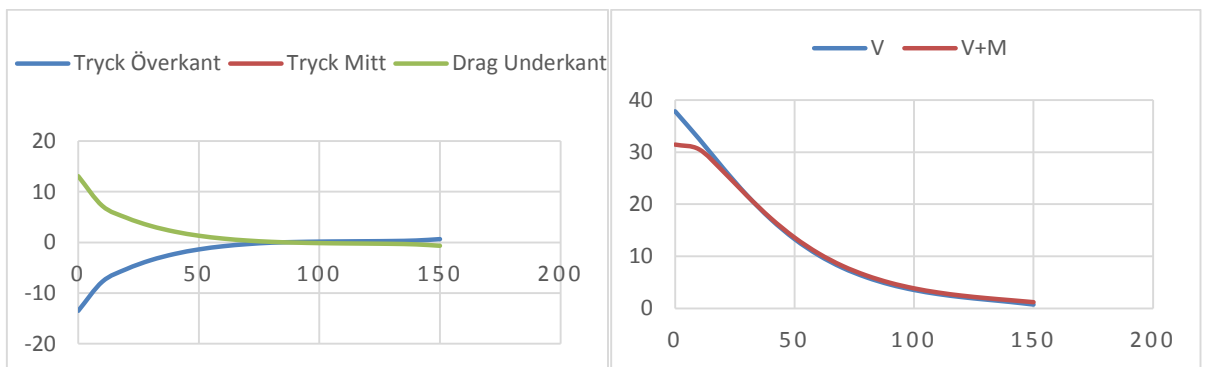
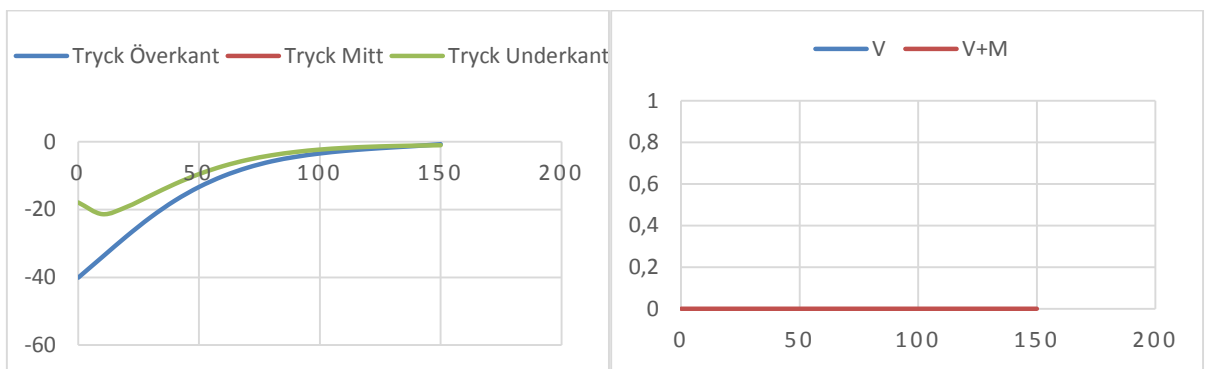
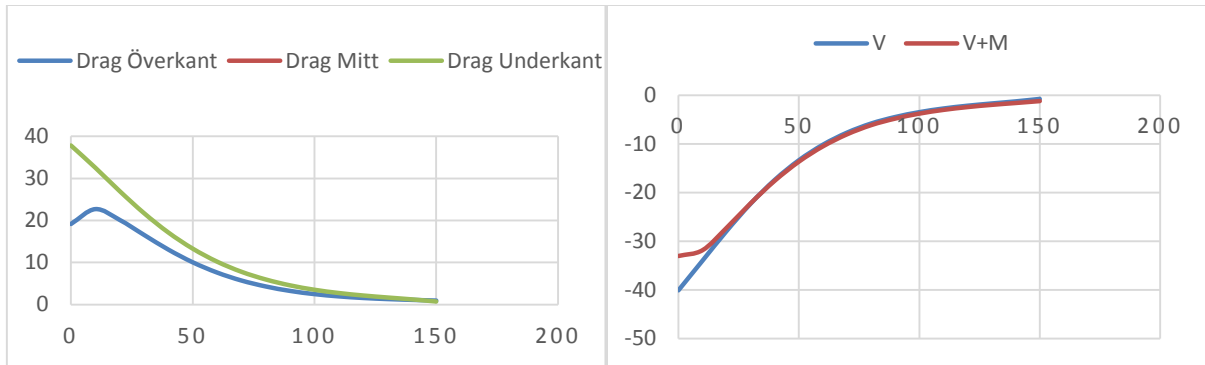
Förklaringar till tabellerna:

- Spänningar i MPa på y-axlarna och avstånd längs path (längs z-axeln) i mm på x-axlarna.
- S11 motsvarar spänningar i x-axeln, S22 motsvarar spänningar i y-axeln och S33 motsvarar spänningar z-axeln.
- Ren tvärkraft avser pålagd tvärkraft vilket resulterar i en tvärkraft + utdragning/intryckning pga. moment vid skruvarna. Tvärkraft + moment avser tvärkraft + mothållande moment vilket resulterar i en ren tvärkraft vid skruvarna.
- Alla grafer har likadant upplägg. Raderna till vänster avser i turordning räknat nedåt:
 - S22 Drag
 - S22 Tryck
 - S11 Tryck och drag
- Raderna till höger avser i turordning räknat nedåt:
 - Ren tvärkraft VS tvärkraft + moment i överkant
 - Ren tvärkraft VS tvärkraft + moment i mitten
 - Ren tvärkraft VS tvärkraft + moment i underkant

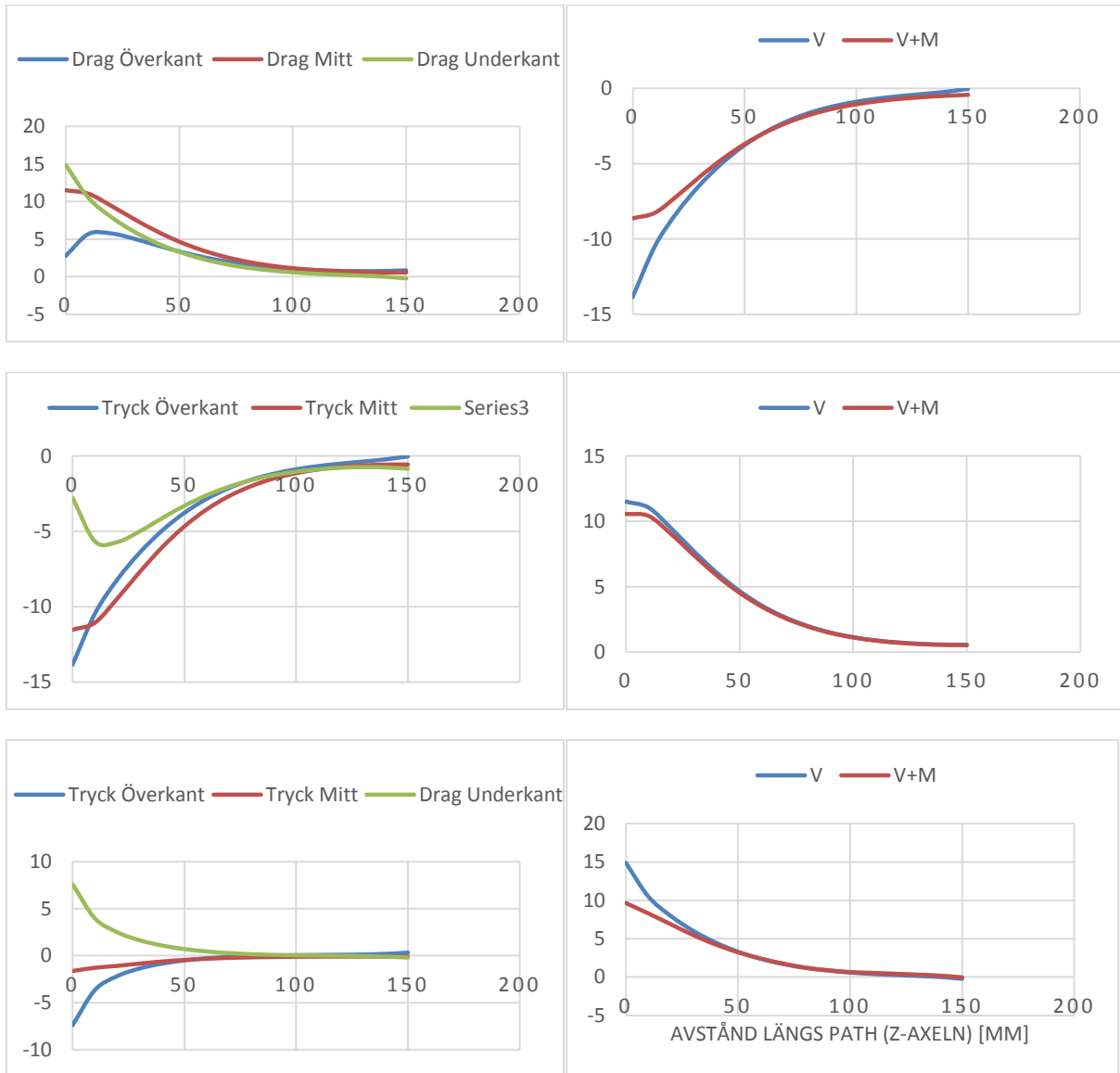
Referensfallet, $n=3$; $e_1=e_2=2,5d$; $d=16\text{mm}$; $l_g=160\text{mm}$



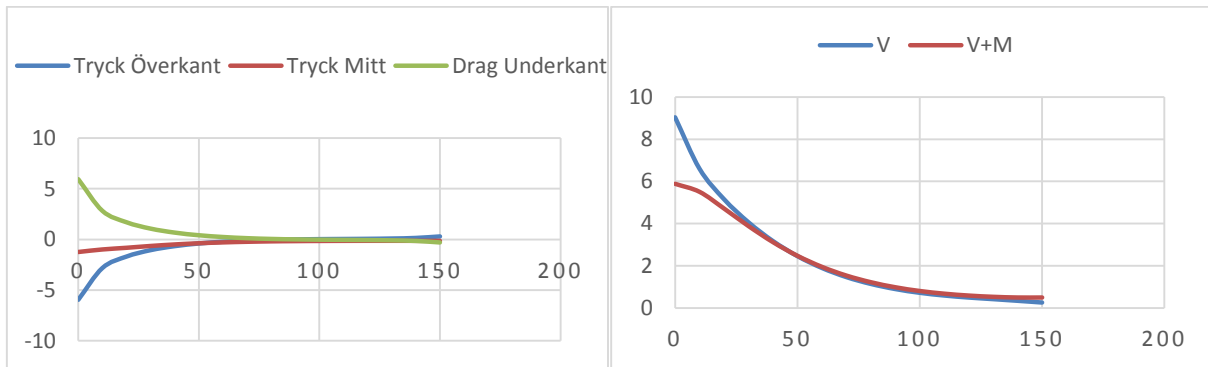
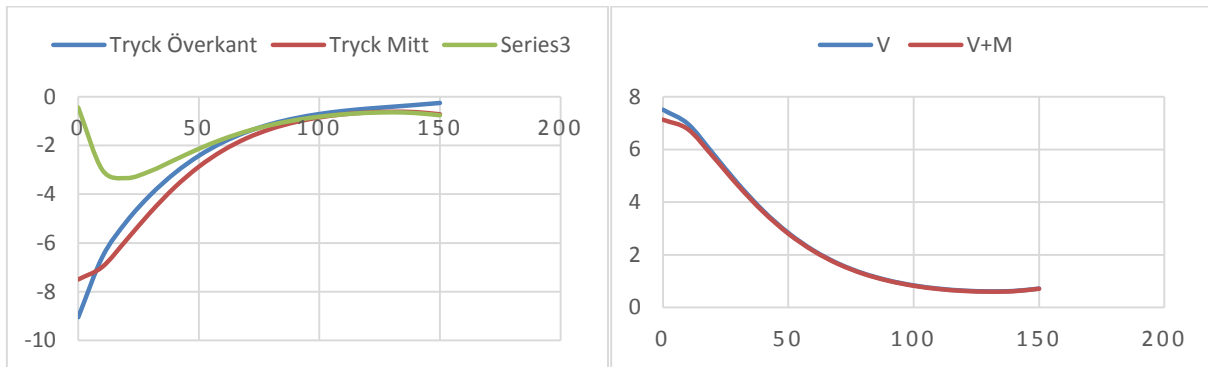
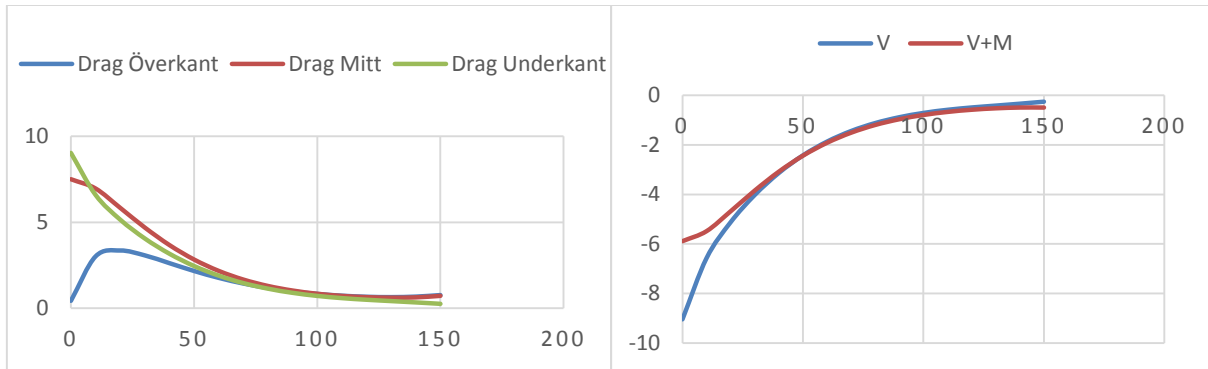
n=2



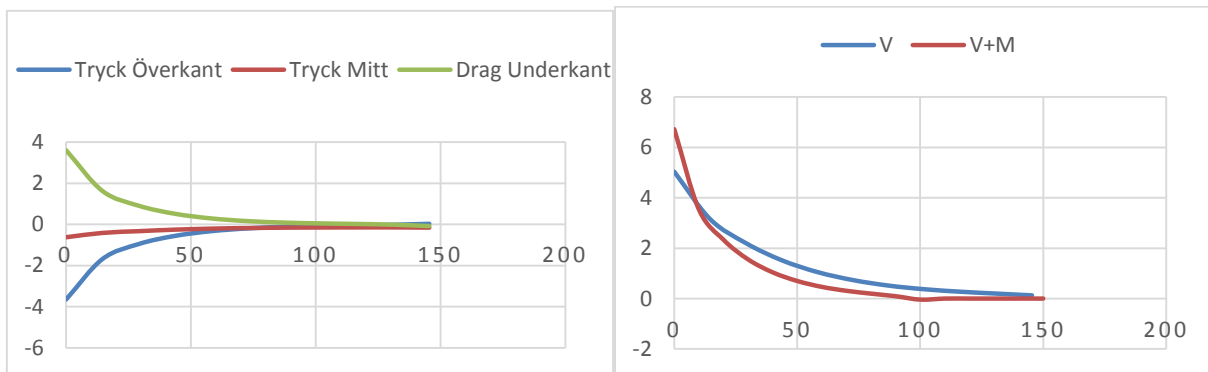
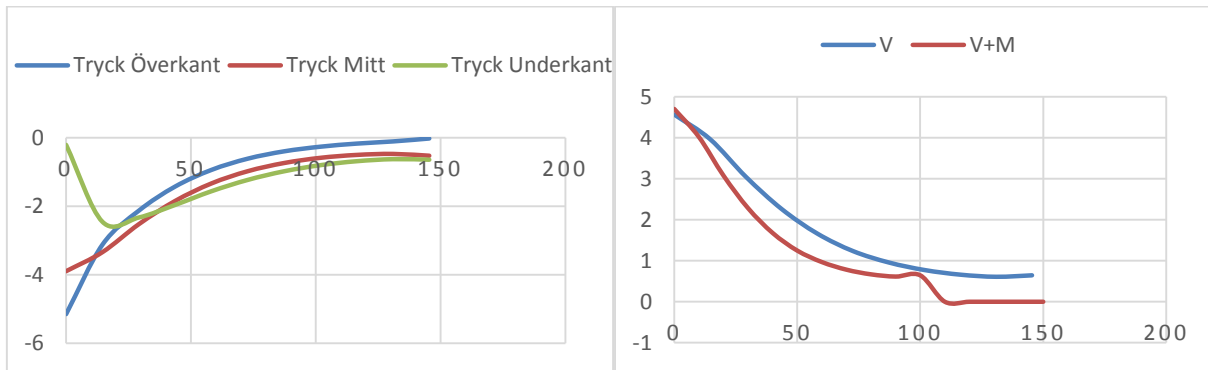
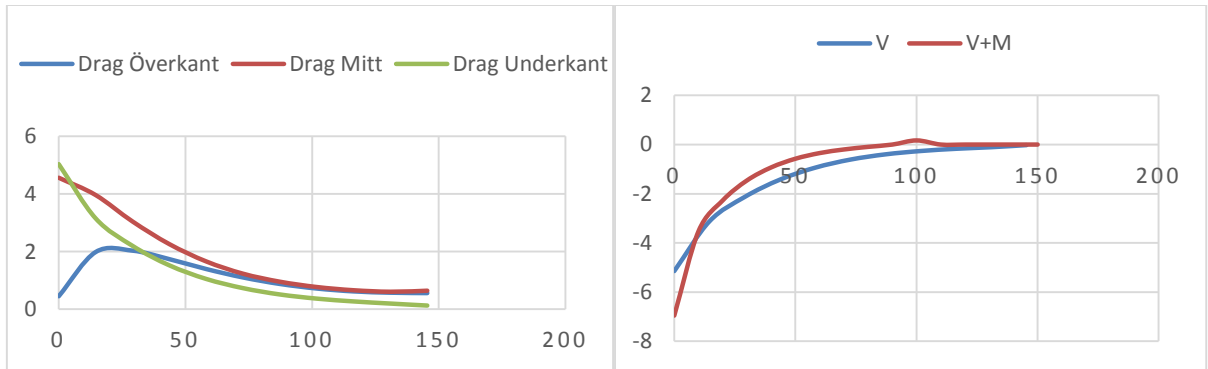
n=5



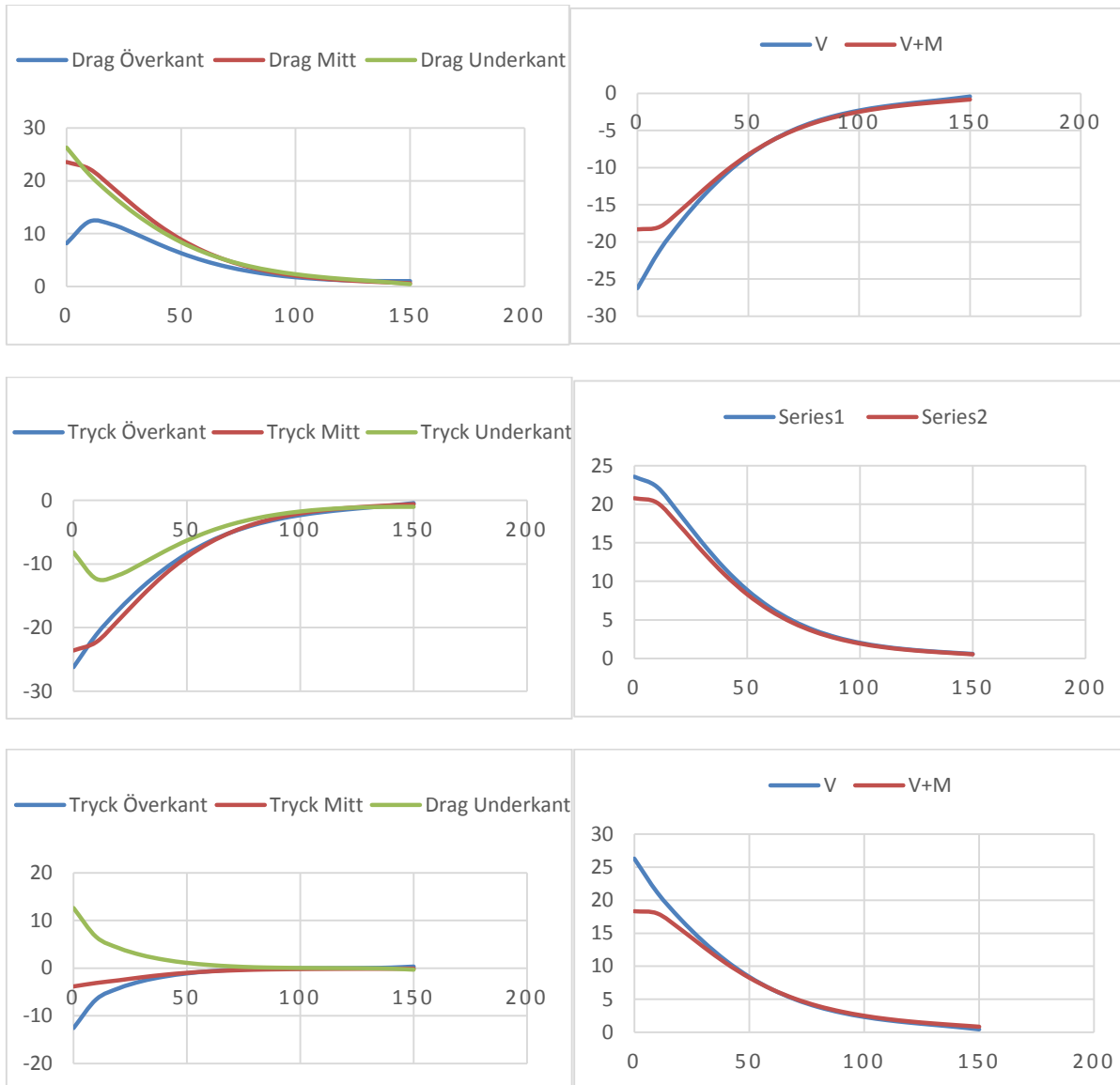
n=9



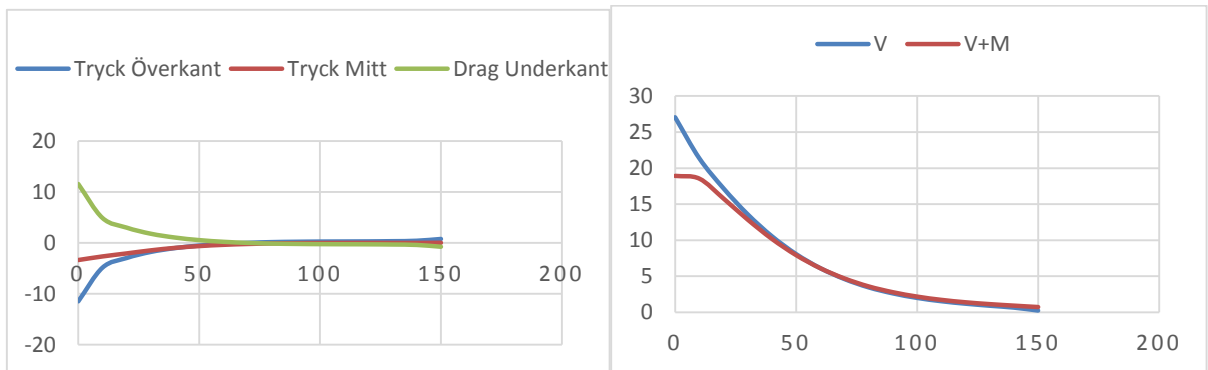
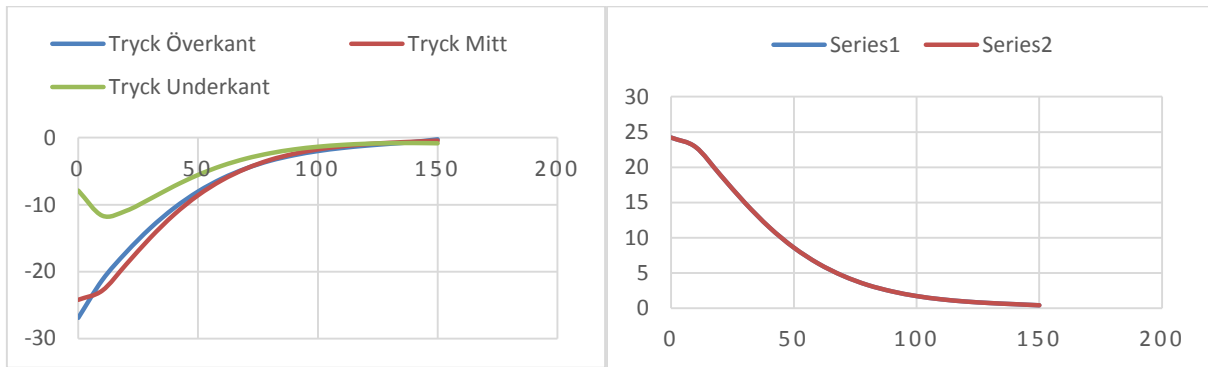
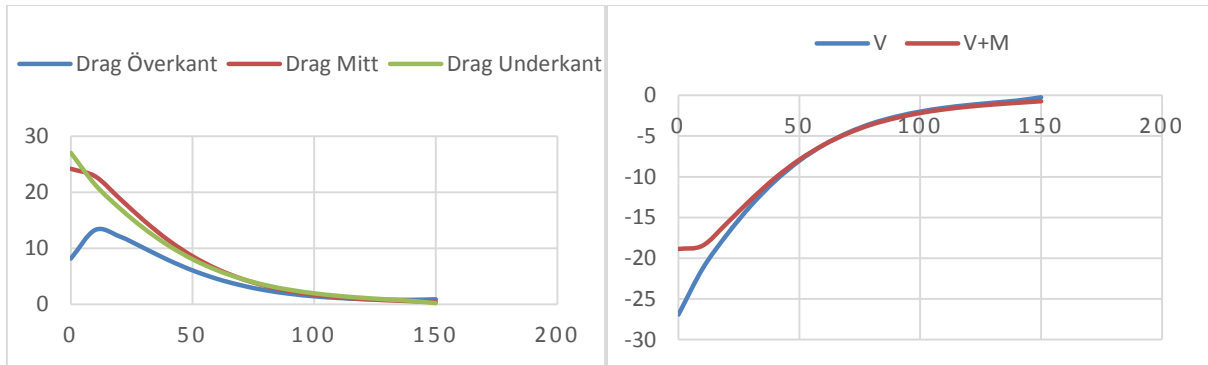
n=13



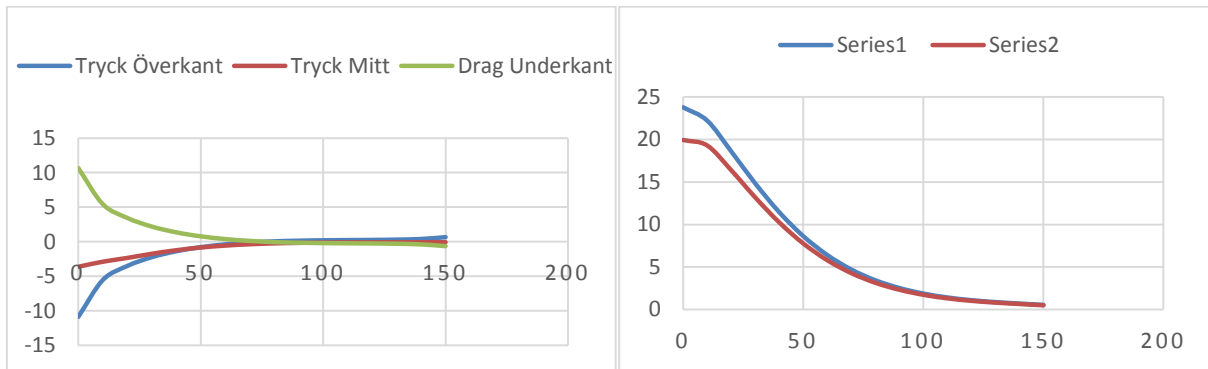
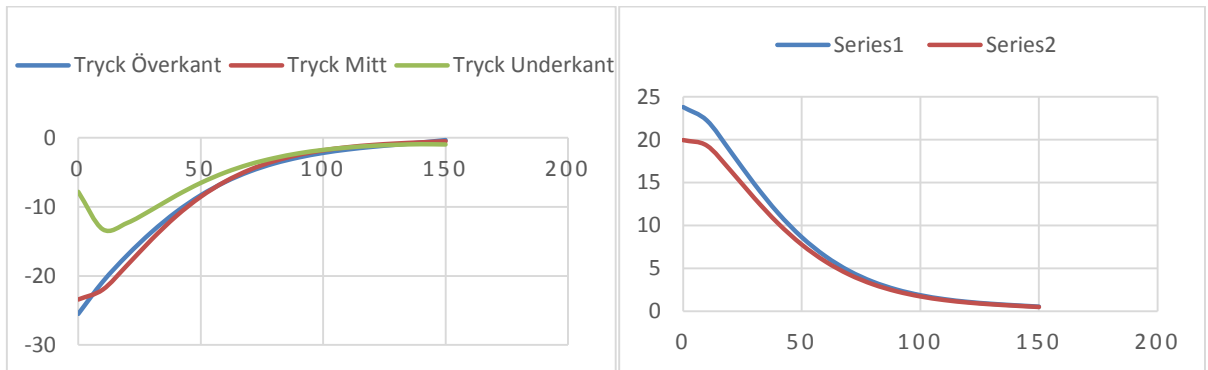
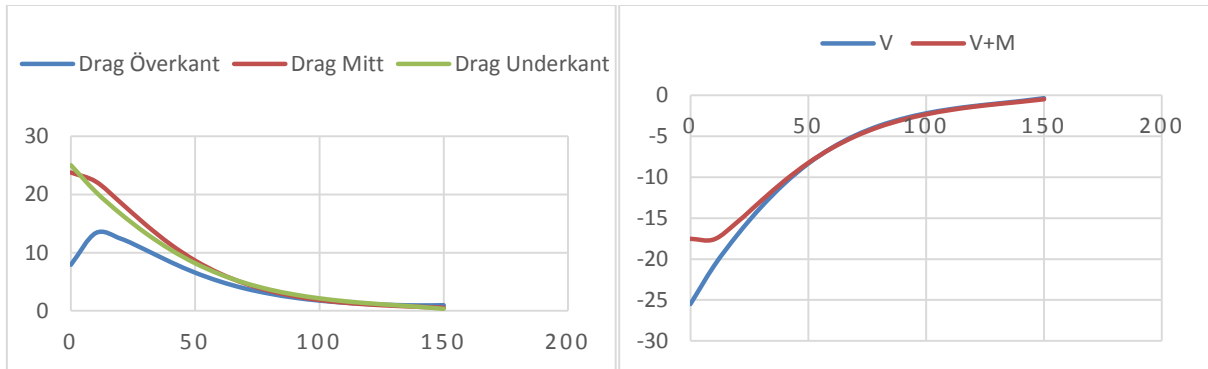
$e_1=1,5d$



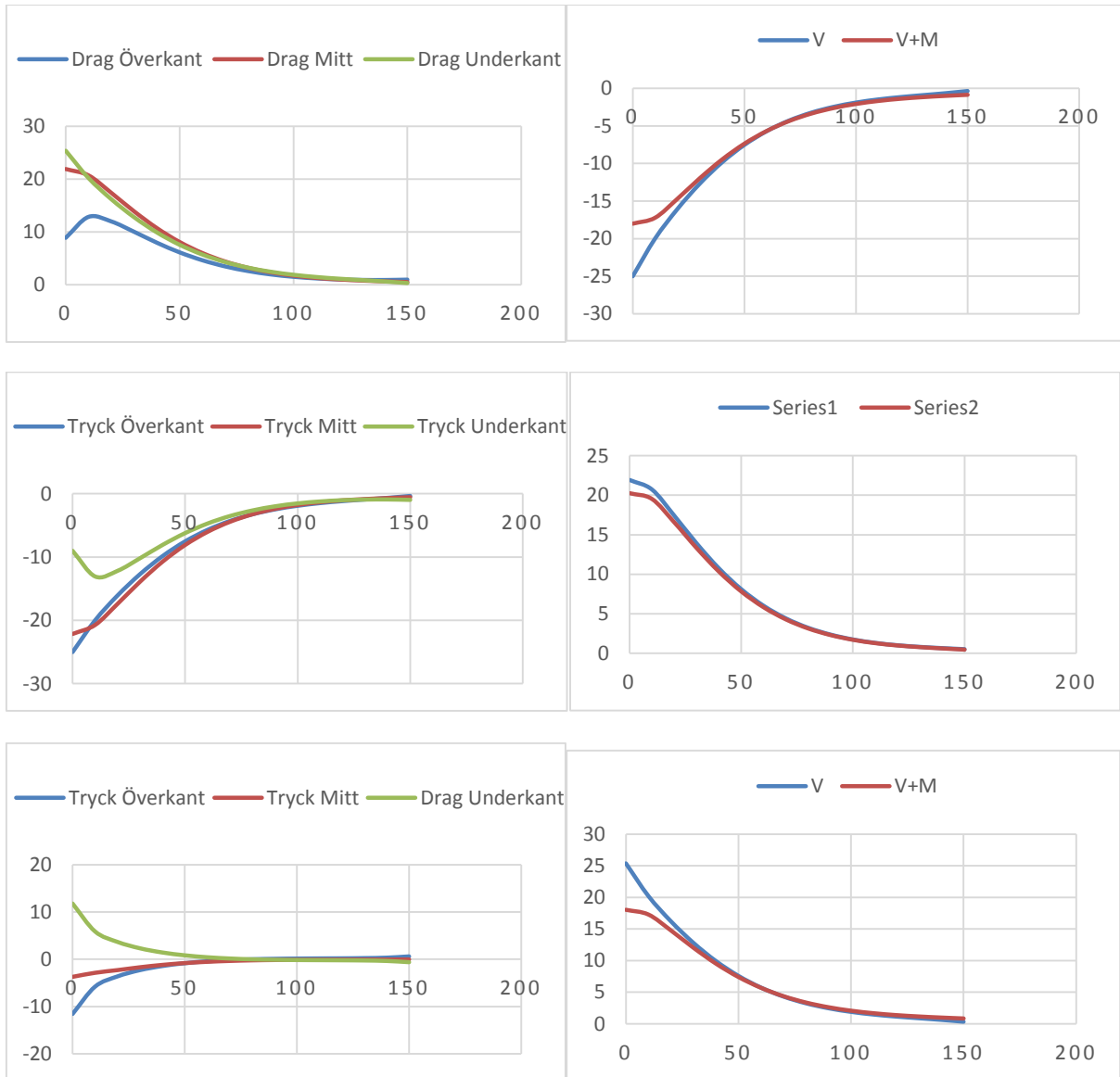
$e_1=3,5d$



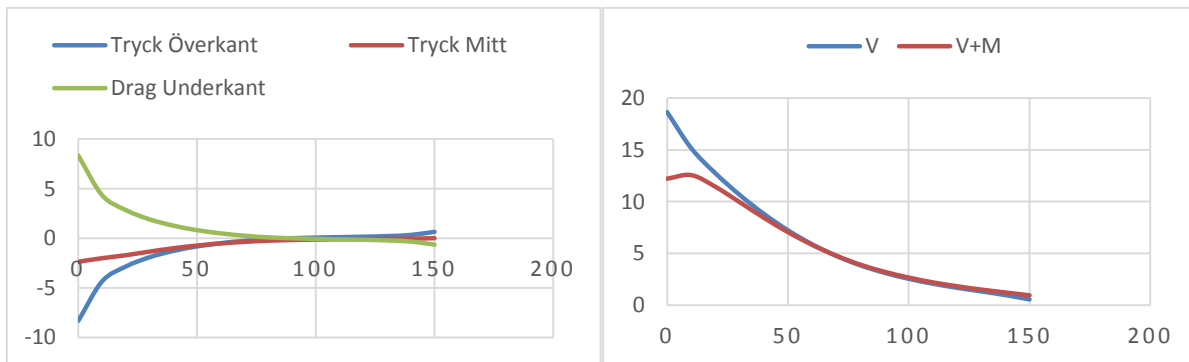
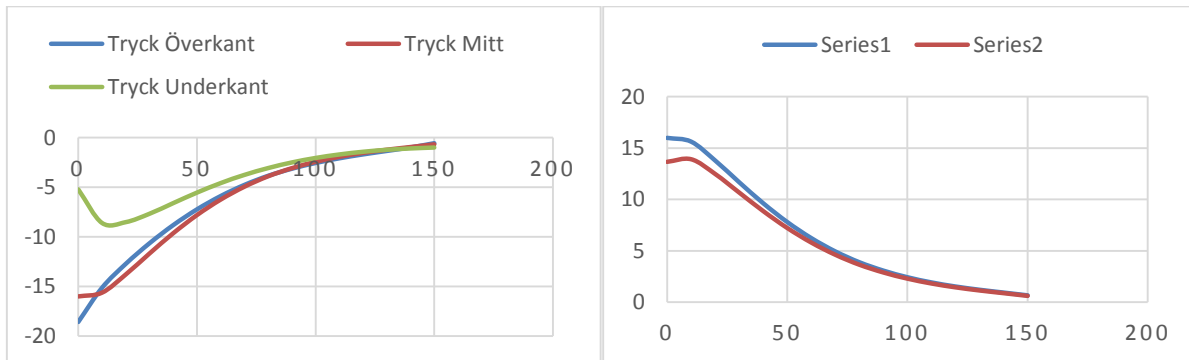
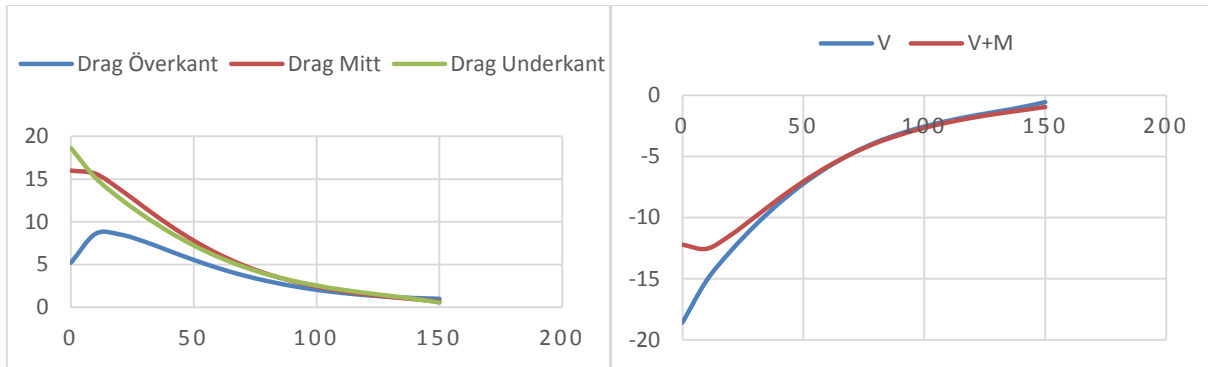
$e_2=1,5d$



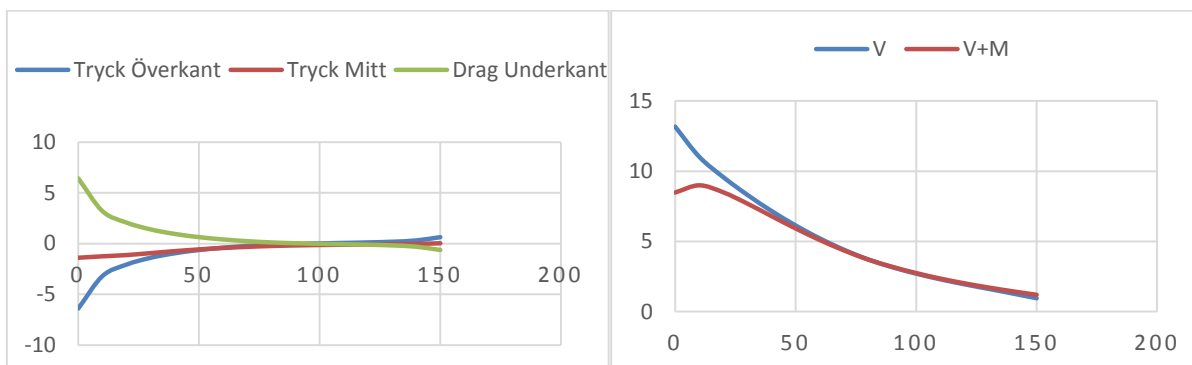
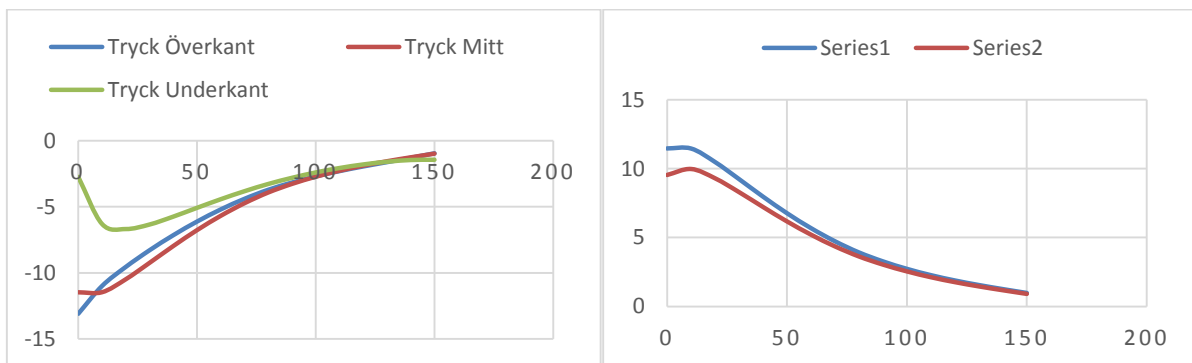
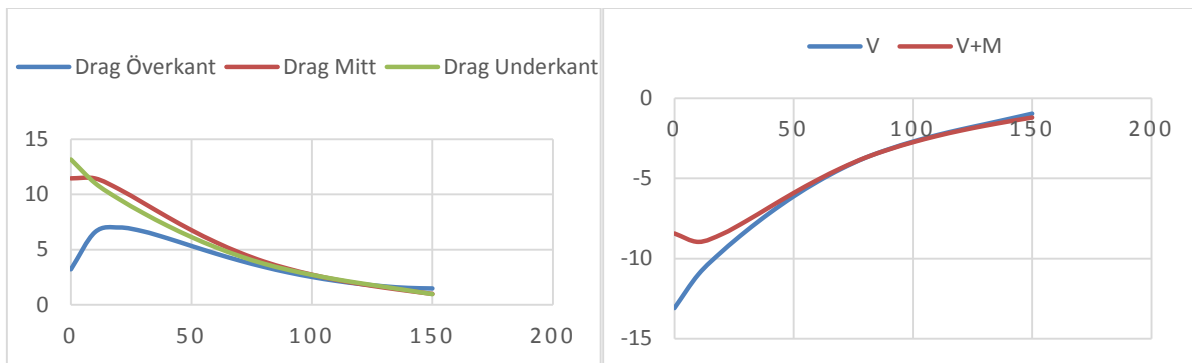
$e_2=3,5d$



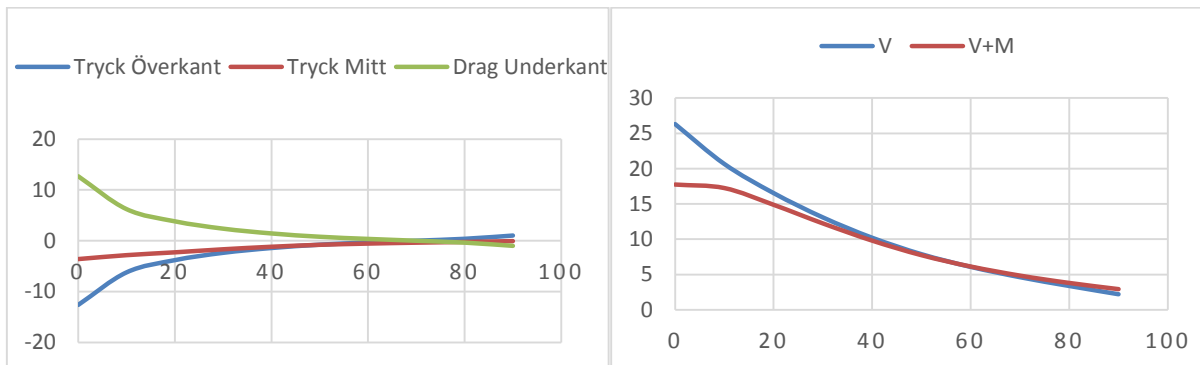
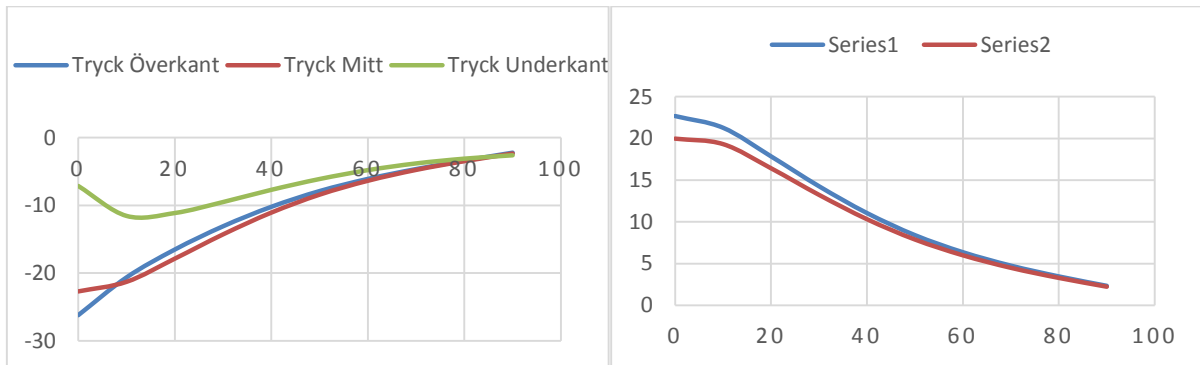
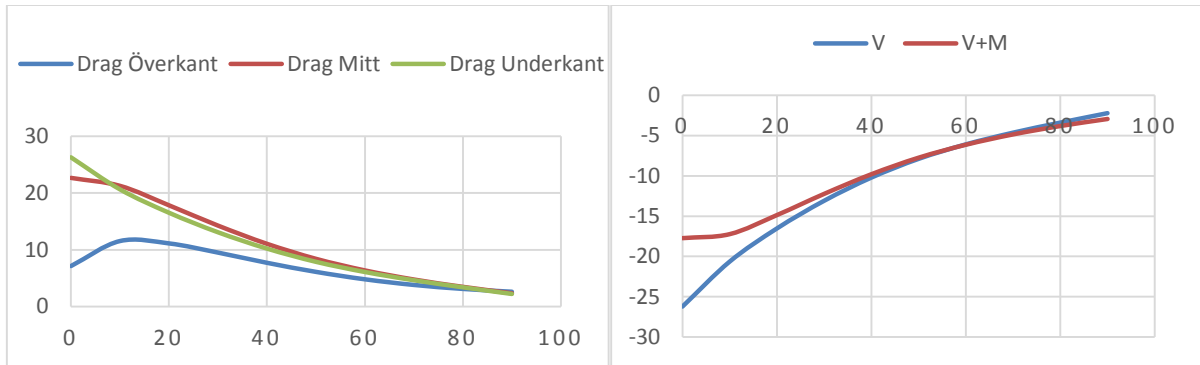
d=20mm



d=24mm



$l_g=100\text{mm}$



$l_g=300\text{mm}$

