

# Design av portabel lyftbalk

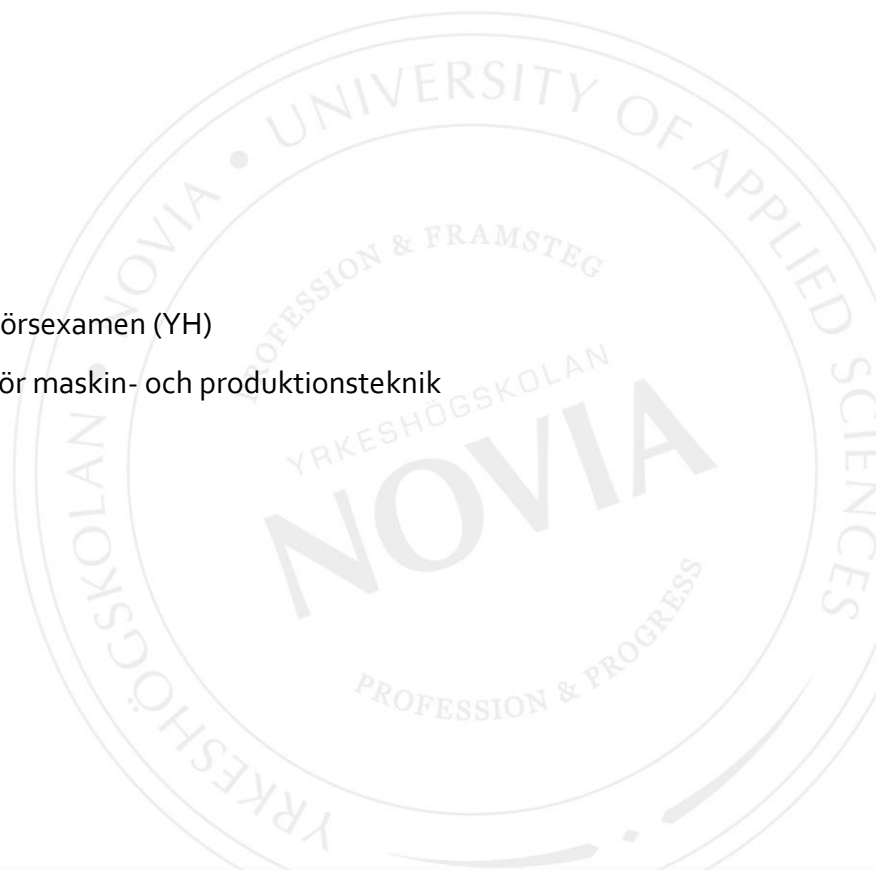
Dimensionering samt analys av  
ramverkskonstruktion

Robin Laine

Examensarbete för ingenjörsexamen (YH)

Utbildningsprogrammet för maskin- och produktionsteknik

Vasa 2019



## EXAMENSARBETE

Författare: Robin Laine

Utbildning och ort: Maskin- och produktionsteknik, Vasa

Handledare: Kenneth Ehrström

Titel: Design av portabel lyftbalk

---

Datum 10.3.2018

Sidantal 39

Bilagor 5

---

### Abstrakt

Detta examensarbete omfattar konstruktion av ett lyftredskap; lättviktad portabel lyftbalk ämnad till takplåt.

Syftet med arbetet var att komma fram till en konstruktionslösning för en lyftbalk som är lätthanterlig och har låg egenvikt.

Arbetet innehåller utredning av lyftredskapens allmänna bestämmelser i Finland, konstruktion och analys av lyftredskap.

Lyftbalken dimensionerades enligt konventionella handräkningsmetoder och analyser för hållfasthet, deformation samt buckling gjordes med FEM. Konstruktionen som analyserades var konstruerad som ett ramverk, finita element analyser gjordes med en 1D-modell på den globala konstruktionen.

---

Språk: svenska

Nyckelord: ramverk, FEM, lyftredskap

---

## OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Robin Laine

Koulutus ja paikkakunta: Kone- ja tuotantotekniikka, Vaasa

Ohjaaja(t): Kenneth Ehrström

Nimike: Kannettavan nostopalkin suunnittelu

---

Päivämäärä 11.3.2019

Sivumäärä 39

Liitteet 5

---

### Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö sisältää nostoapuvälineen suunnittelu; kevyt, kannettava nostopalkki tarkoitettu kattopeltien nostoon.

Työn aikomus oli suunnitella ratkaisu kevyeen nostopalkkiin mikä olisi helppo siirtää.

Työ sisältää selvitys nostoapuvälineiden yleiset määräykset suomessa, rakenteen suunnittelu ja sen lujuuslaskenta.

Nostopalkin rakenteen mitoitus tehtiin perinteisillä käsilaskelmalla. Lujuus, muodonmuutos ja nurjahdusanalyysit tehtiin FEM ohjelmalla.

Nostopalkin rakenne päätettiin tehdä ristikkotyypiseksi.

---

Kieli: ruotsi

Avainsanat: ristikko, FEM, nostoapuväline

---

## BACHELOR'S THESIS

Author: Robin Laine

Degree Programme: Machine and production engineering

Supervisor(s): Kenneth Ehrström

Title: Design of a portable lifting beam

---

Date 11.3.2019

Number of pages 39 Appendices 5

---

### **Abstract**

This bachelor's thesis embraces the construction of a portable lifting beam that is meant to be used for lifting metal roof sheets.

The purpose of this thesis was to come up with a solution for a lifting beam that would be light and easy to move by hand.

The work embraces an investigation regarding the regulations of lifting attachments in Finland, design and analysis of the construction.

The lifting beam was dimensioned with conventional methods and the construction were then tested and analyzed for deformation, stresses and buckling with FEM.

The design of the lifting beam was made as a truss.

---

Language: Swedish

Key words: framework, truss, FEM, lifting attachment

---

# Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Företaget .....	1
1.2	Uppdrag och syfte.....	1
1.3	Avgränsningar.....	2
2	Problem.....	2
2.1	Krav och önskemål .....	2
3	Metod.....	2
4	Lagar, förordningar, direktiv .....	3
4.1.1	Arbetarskyddslag .....	3
4.1.2	Förordning om maskiners säkerhet.....	3
4.1.3	Förordning om säker användning och besiktning av arbetsutrustning .....	3
4.2	Standarder och allmänna bestämmelser angående lyftredskap.....	4
4.2.1	Verifikation av lyftredskap .....	4
4.2.2	Teknisk dokumentation .....	5
4.2.3	Bruksanvisningen .....	6
4.2.4	Statiskt hållfasthetsprov.....	7
4.2.5	CE-märkning .....	7
4.2.6	Märkningar på lyftredskapet.....	9
5	Konstruktionstekniska aspekter .....	10
5.1	Lyftbalkens tvärsnitt .....	10
5.2	Val av material.....	12
5.3	Val av konstruktion.....	16
6	Dimensionering av lyftbalk .....	18
6.1	Generell dimensionering .....	19
6.1.1	Grov dimensionering av rörprofiler.....	19
6.2	FE-analys av global konstruktion .....	21
6.2.1	Olika alternativ för meshning.....	21
6.2.2	Tillvägagångssätt med FEM.....	22
6.2.3	FEM analys på 1D-modellen.....	23
6.3	Dimensionering av skarvförband.....	25
6.3.1	Skarvförbandets låsning .....	25
6.3.2	Dimensionering av kil mot skjuvning .....	27
6.3.3	Dimensionering mot skjuvning vid hylsans kilspår .....	27
6.3.4	Kontroll av yttryck vid kil .....	28
6.3.5	FE-analys av skarvförband .....	28
6.4	Kontroll av stoppare för infästning .....	29
6.4.1	Beräkning av last på stopparen samt kontroll mot skjuvning vid svetsfog ...	30

6.4.2	FE-analys av stoppare.....	31
7	Resultat.....	32
7.1	FE-analys av 1D-Element modellen.....	32
7.2	FE-analys av skarvförband.....	34
7.3	FE-analys av stoppare.....	37
8	Slutsats.....	38
8.1	Slutsats av analys.....	38
8.2	Metoder för tillverkning.....	38
8.3	Metoder för verifiering.....	39
9	Diskussion.....	39
10	Källförteckning.....	40
	Bilageförteckning.....	-
	Bilaga 1 - Trådmodellen.....	-
	Bilaga 2 – Grov uppskattning av rörprofiler.....	-
	Bilaga 3 – Dimensionering av skarvförband.....	-
	Bilaga 4 – Beräkning av sidokraft på stoppare.....	-
	Bilaga 5 – Resultat av FEA på den globala konstruktionen.....	-

## Figurförteckning

Figur 1: Illustration över användningen av en lyftbalk till takplåt.....	1
Figur 2: CE-märkning.....	8
Figur 3: Slankt sammansatt tvärsnitt .....	11
Figur 4: Illustration över vippning (Svenskt Stål AB, 2010) .....	11
Figur 5: Stabilt sammansatt tvärsnitt .....	11
Figur 6: Skiss av sammansatt balkkonstruktion .....	16
Figur 7: Skiss av balksektion.....	16
Figur 8: Flödesdiagram över dimensioneringsgången.....	18
Figur 9: Belastningsfall vid lyft av takplåt .....	19
Figur 10: Frikroppsdiagram för grov uppskattning av dimensioner på spannens rörprofil. 20	
Figur 11: 1D-modell av balksektion.....	23
Figur 12: 1D-modell på global konstruktion .....	23
Figur 13: Villkor vid linjär statisk analys.....	24
Figur 14: Villkor vid linjär bucklingsanalys .....	24
Figur 15: Skiss av skarvförband .....	25
Figur 16: Skiss på genomskärning av skarvförband.....	26
Figur 17: Illustration över skjuvning i hylsan .....	27
Figur 18: Meshad sammanställning på skarvförband.....	28
Figur 19: Stoppare för att förhindra att remmen glider .....	29
Figur 20: Reaktionsdiagram för krafter vid stopparen .....	30
Figur 21: Belastningsfall i finita element analysen för stopparen .....	31
Figur 22: Knäckning av den global konstruktionen .....	33
Figur 23: Deformation av skarvförband i finita element analys.....	34
Figur 24: Skarvförbandets spänningsfördelning i genomskärning.....	35
Figur 25: Spänningar i godtyckliga element i skarvförbandet .....	36
Figur 26: Elementala spänningar i FEM-analys av stopparen.....	37

# 1 Inledning

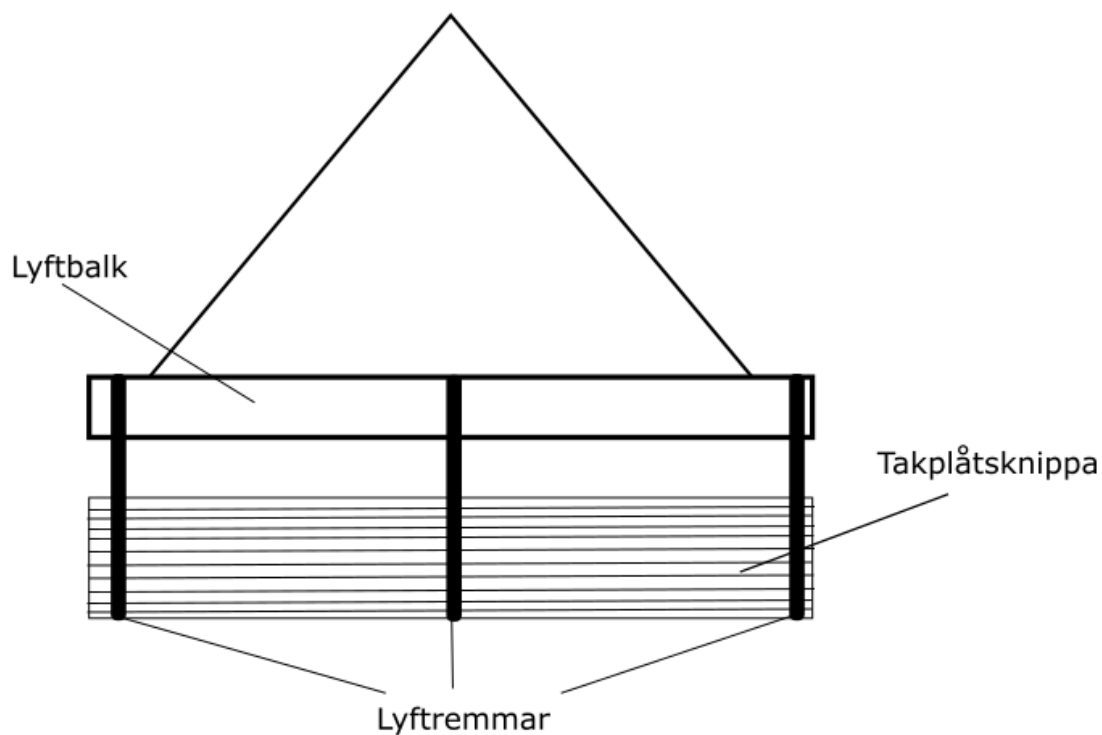
Detta examensarbete görs på uppdrag av Vikströms Plåtslageri AB och omfattar konstruering och dimensionering av ett lyftredskap; portabel lyftbalk.

## 1.1 Företaget

Vikströms Plåtslageri AB är ett företag som är beläget i Pedersöre. Det grundades år 1979 och har varit verksamt sedan dess. Till företagets verksamhet hör: takläggning, plåtsnickeri, försäljning av plåtprodukter såsom takplåt, taksäkerhetsprodukter, plåtlistor, takavrinningsprodukter. Företaget har en stor egen produktion av plåtprodukter.

## 1.2 Uppdrag och syfte

Uppdraget går ut på att hitta på en konstruktion för en lättviktad, portabel lyftbalk till takplåt. Syftet med lyftbalken är att takplåten skall kunna lyftas upp på taket med hjälp av en kranbil, då detta underlättar taklägningsprocessen. Lyftbalkens funktion är att fördela plåtknippans massa på flera olika punkter och därmed förhindra knäckning av plåten, se figur 1.



Figur 1: Illustration över användningen av en lyftbalk till takplåt.



### **1.3 Avgränsningar**

För att uppdraget skall kunna förverkligas så görs en utredning av de bestämmelser som för lyftredskap gäller i Finland. Först görs en konstruktion på lyftbalken, beräkningar görs sedan på konstruktionen. Nödvändiga tillvägagångssätt för tillverkning och provning beskrivs. Skisser med diverse basmått görs. Arbetet omfattar ej tillverkningen av balken.

## **2 Problem**

Företaget har i nuläget tre stycken lyftbalkar med längderna 6 m, 8 m och 12 m. Dessa balkar är av typen I-balk och de är tillverkade i stål. Problemet med dessa balkar, speciellt den 12 m långa är att den är otymplig att använda. På grund av dess höga egenvikt så finns det risk att takplåten bucklas. Dess längd gör att den endast kan transporteras med hjälp av en lång kran- eller lastbil.

### **2.1 Krav och önskemål**

De krav som ställts av uppdragsgivaren är att:

- Lyftbalken skall vara ihopfällbar eller demonterbar.
- Dess längd skall vara minst 12 m.
- En plåtknipa på 1000 kg skall kunna hanteras.

De önskemål som eftersträvas är:

- Lyftbalkens egenvikt skall vara låg.

## **3 Metod**

Metoden som används i arbetet är att först reda ut de byråkratiska bestämmelser gällande lyftredskap i Finland. Därefter görs ett koncept på en konstruktion med avseende på de krav som ställs av bestämmelser samt uppdragsgivar. Konstruktionen dimensioneras med handräkning och sedan testas med finita element metoden. Analyserna tolkas och en slutsats görs med avseende på de resultat som erhålls. Metoder för tillverkning och förverkligande av lyftbalken tas även upp i detta arbete.

## **4 Lagar, förordningar, direktiv**

Det finns ett antal olika bestämmelser och direktiv gällande lyftredskap. Detta kapitel är en sammanfattning av de lagar, förordningar och direktiv som är väsentliga vid planering, tillverkning och användning av ett lyftverktyg.

### **4.1.1 Arbetarskyddslag**

Arbetarskyddslagen 738/2002 i Finland har som syfte att trygga arbetstagare och förhindra olycksfall i arbetet. Lagen omfattar allmänna skyldigheter hos arbetsgivare samt särskilda säkerhetsåtgärder som bör vidtas vid olika arbetsomständigheter. (Statsrådet, 2019)

Enligt arbetarskyddslagen så skall arbetstagarnas fysiska hälsa beaktas för de risker som den fysiska belastningen i arbetet ger upphov till. Arbetet skall vid behov underlättas med hjälpmedel. I arbetet får endast sådana arbetsredskap och anordningar användas som överensstämmer med bestämmelser gällande dem. Då arbetsredskap eller anordningar används så skall det ses till att de är korrekt installerade, monterade och har de nödvändiga märkningarna. Vilka typer av märkningar som arbetsredskapet skall ha beror på dess klassifiering och användningsområde. (Statsrådet, 2019)

### **4.1.2 Förordning om maskiners säkerhet**

Finlands nation är medlem i den Europeiska Unionen. Det hör till nationens ansvar att se till att de direktiv som stiftas av Europaparlamentet samt rådet följs. Statsrådet i Finland har därmed stiftat en förordning; maskiners säkerhet 400/2008, i den omfattas de grundläggande hälso- och säkerhetskrav som ställs vid konstruktion och tillverkning av maskiner samt deras idrifttagande och utsläppande på marknaden, förordningen fullbordar Europaparlamentet och rådets direktiv 2006/42/EG. (Statsrådet, 2019)

### **4.1.3 Förordning om säker användning och besiktning av arbetsutrustning**

Förordningen om säker användning och besiktning av arbetsutrustning är en förordning som tillämpas vid användning och besiktning av maskiner, redskap och andra tekniska anordningar samt olika kombinationer av dessa i sådant arbete som avses i arbetarskyddslagen 738/2002. (Statsrådet, 2019)

## 4.2 Standarder och allmänna bestämmelser angående lyftredskap

Detta kapitel är en summering av de väsentliga åtgärder som bör tas vid planering, tillverkning samt användning av lyftverktyg i Finland.

Vid förflyttning av en last så kan lyftredskap- och anordningar vara till nytta. En lyftanordning är den anordning som förflyttning av lasten utförs med. Ett lyftredskap är ett från lyftanordningen löstagbart redskap, dess konstruktion skall vara beräknad att tåla de materialpåfrestningar som uppkommer vid hantering av en last. Vid användning av ett lyftredskap så kopplas lasten till redskapet och redskapet till en lyftanordning, detta kan göras med inbyggda funktioner i lyftredskapet eller med hjälp av lyftremmar, kedjor, sling etc. dessa anses även som lyftredskap och omfattas även av bestämmelserna. Till bestämmelserna hör europeiska unionens harmoniserande standard SFS-EN 13155 + A2 vilken inriktar sig på lyftredskap och anordningar. Standarden är av typ C, vilket innebär att den har tolkningsföreträde gentemot A och B typens standarder. SFS-EN 13155 + A2 kan endast tillämpas vid lyftverktyg vars planerade maximala livslängd är mindre än 20 000 lyft.

De generella bestämmelser som gäller lyftredskap är enligt förordningen om säker användning och besiktning av arbetsutrustning:

- Ett skadat lyftredskap får ej användas.
- Lyftredskapet skall förvaras på ett ändamålsenligt sätt.
- Märkningar och kondition av lyftredskapet skall granskas innan användning.
- Ifall märkning om maximal arbetslast saknas så får lyftredskapet inte användas.
- Infästning av lyftredskapet skall göras vid de planerade infästningspunkterna.

Ifall ett lyftredskap måste styras för hand så skall detta ske från planerade punkter för handtag. Om ett lyftredskap byggs upp utav flera enskilda komponenter (lyftredskap) så skall en låsning finnas som förhindrar att lasten kan frigöra sig under arbete. Låsningarna skall vara väl synliga och det skall vara enkelt att avgöra ifall låsningen är funktionerande. Ifall mekanismer som håller lasten förlitar sig på friktion så skall den erforderliga friktionskraften ha en säkerhetsfaktor om minst två (2). (SFS, Suomen Standardisoimisliitto, 2009)

### 4.2.1 Verifikation av lyftredskap

Standarden SFS-EN 13155 + A2 omfattar de krav som ställs för idrifttagande av olika typer lyftredskap. För att ett lyftredskap skall kunna tas i drift så måste en typverifikation göras,

det görs med hjälp av att säkerställa att lyftredskapet konstrueras och testas enligt de bestämmelser som standarden innefattar. Ifall lyftredskapet byggs upp utav flera serietillverkade komponenter så skall en typverifikation göras av det sammansatta lyftredskapet, samt en individuell verifikation göras för varje enskild tillverkad komponent.

Verifikation av en lyftbalk innefattar att de krav som ges i standarden uppfylls, dessa krav kan delas upp i tre stycken huvudkategorier:

- teknisk dokumentation
- statiskt hållfasthetsprov
- märkningar av balken.

#### **4.2.2 Teknisk dokumentation**

Den tekniska dokumentationen för en maskin skall göras samt sparas av tillverkaren i minst tio år efter lyftredskapets tillverkningsdatum. Alla deldokument gällande konstruktionen behöver ej ständigt vara tillgängliga men tillverkaren skall kunna uppvisa den fullständiga konstruktionstekniska dokumentation ifall det krävs av myndigheterna. Ifall en olycka sker så skall tillverkaren kunna uppvisa dokumentation på att en riskanalys av lyftredskapet är gjord och att lyftredskapet är konstruerat på basis av de krav och bestämmelser som gäller. Den tekniska dokumentationen för maskiner skall enligt förordningen om maskiners säkerhet innehålla:

- Beskrivning av maskinen.
- Allmän ritning över maskinen samt dess styranordning.
- Sakenlig beskrivning över maskinens funktion.
- Fullständiga detaljritningar, uträkningar, testresultat samt övrig information som gäller vid granskning av maskinens säkerhet enligt de maskinspecifika kraven.
- Dokument för bedömning av risker som uppstår vid användning av maskinen:
  - o väsentliga krav på säkerhet vid användning av maskinen
  - o särskilda säkerhetsåtgärder som bör tas under användning
  - o förutspående av vanliga riskscenarion som kan uppstå.

- Lista över de standarder som använts vid planering och tillverkning av maskinen samt hänvisning till dessa med avseende på de vidtagna åtgärderna.
- Redovisning av de väsentliga testresultat som erhållits, av antingen tillverkaren eller tillverkarens utvalda representant.
- Kopia av maskinens bruksanvisning.

#### **4.2.3 Bruksanvisningen**

I standarden SFS-EN 13155 + A2 så anges bestämmelser gällande bruksanvisningen för ett lyftredskap. Bruksanvisningen skall finnas tillhand för de personer som är involverade i användningen av lyftbalken. Bruksanvisningen skall vara tillgänglig på nationens officiella språk. Informationen som anges skall vara tillräckligt tydlig och omfattande för ett att säkert bruk av lyftverkyget skall kunna säkerställas, i huvudsak skall informationen omfatta:

- tillverkarens kontaktuppgifter
- lyftredskapets planerade användningsområden
- anvisningar för montering, användning och underhåll
- angiven maximal arbetslast vid olika karakteristiska belastningsfall
- temperaturområdet inom vilket lyftredskapet får användas
- hantering och förvaring av verktyget
- övriga instruktioner för användning.

För lyftbalkar bör även särskild information anges, såsom upphängningspunkter samt det vertikala avståndet mellan dem. (SFS, Suomen Standardisoimisliitto, 2009)

För att säkerställa att lyftredskapets kondition hålls i skick under dess totala livslängd så skall det ges tillräckligt med information angående ändamålsenligt underhåll detta är i huvudsak:

- tidsintervaller för underhåll
- register över underhåll och service
- reparations- samt felsökningsanvisningar

- särskilda åtgärder som bör vidtas vid specifika komponenter
- eventuella säkerhetsåtgärder vid reparation
- bruk av ursprungliga reservdelar.

Det skall även framkomma information angående de åtgärder som är nödvändiga efter eventuell reparation eller återkoppling av lyftredskapet.

#### **4.2.4 Statiskt hållfasthetsprov**

För typverifikation av en lyftbalk skall ett test i form av ett lastprov utföras. Testet utförs genom att under en minut belasta lyftbalken statiskt med en tre (3) gånger så stor last som den planerade maximala arbetslasten. Testet kan utföras i en testrigg eller genom ett lyftprov. Ett test med en två (2) gångers arbetslast skall också utföras med en 6° större vinkel än den maximala tillåtna arbetsvinkeln för lyftbalken. Belastningsfallet skall vara av samma karaktär som det vilken lyftbalken är tänkt att arbeta under, lasten appliceras stötfritt. Efter testet skall lyftbalken undersökas för sprickor och andra defekter. Kriterier för typverifikation är att lyftbalken skall tåla en tre gånger så stor last som den maximala arbetslasten med en godtagbart liten deformation, för individuell verifikation gäller en två gånger så stor last som den maximala arbetslasten utan bestående defekter eller deformation. (SFS, Suomen Standardisoimisliitto, 2009)

Märken på lyftremmar sling och kedjor skall granskas enligt standarderna:

- EN 818-4 - Kortlänkade kättingar för lyftändamål - Del 4: Kättingslingor.
- EN 818-5 - Kortlänkad kätting för lyftändamål - Del 5: Kättinglängor.
- prEN 13414-1 – Stållinestroppar – Del 1: Stroppar för allmänna lyftändamål.
- EN 1492-1 - Textila sling - Del 1: Lyftband tillverkade av syntetfiber, för generell användning.

#### **4.2.5 CE-märkning**

CE-märkningen (se figur 2) har som syfte att underlätta transport av produkter inom EU-området. I Finland har märkningen varit obligatorisk för maskiner och elektriska anordningar sedan år 1995. Förkortningen CE kommer från franskans Conformité Européenne, vilket betyder Europeisk överensstämmelse. För att en maskin skall kunna CE-

märkas förutsätts det att maskinen är konstruerad enligt EU:s maskinspecifika direktiv och förordningar.



**Figur 2: CE-märkning**

Ifall en maskin säljs inom EU-området så är CE-märkningen ett tecken på att maskinen har granskats efter de direktiv och förordningar som krävs av EU. CE-märkningen görs på tillverkarens eget ansvar och tillverkaren skall se till att de nödvändiga dokument som krävs för CE-märkning finns till förfogande. I förordningen om maskiners säkerhet ställs krav på att alla lyftredskap skall vara CE-märkta.

Arbetskyddsförvaltningen har sammanställt ett dokument gällande säkerheten kring lyftredskap, ett lyftredskap får CE-märkas när följande kriterier är uppfyllda (Arbetskyddsförvaltningen, 2019):

- bruksanvisning skall vara gjord
- väsentliga säkerhetskrav skall informeras om
- riskbedömning utgående från ovannämnda punkt
- lyftredskapets och lyftögonblickets riskfaktorer skall vara kända
- direkta faror skall elimineras så gott som möjligt och övriga faror skall varnas om
- dokument gällande konstruktionstekniska detaljer skall vara sammanställt
- lyftredskapet skall ha de erforderliga märkningarna
- provning av lyftredskapet skall utföras och godkännas.

Vid CE-märkning av maskinen så skall även ett dokument skrivas och undertecknas av tillverkaren som försäkrar att produkten uppfyller de rättsliga specifika kraven som ställs av de direktiv stiftade av det Europeiska parlamentet samt rådet. (EU, CE-märkning, 2019)

#### 4.2.6 Märkningar på lyftredskapet

Enligt förordningen om säker användning av maskiner så skall en maskin vara märkt med:

- CE-märkning
- maskinens tillverkningsår
- tillverkarens kontaktuppgifter
- benämning på maskinen
- serie- eller typmärkning
- eventuell serienummer.

För lyftredskap skall det även finnas märkning för den maximala arbetslasten samt för dess egenvikt, ifall egenvikten överskrider 50 kg eller 5 % av den maximala arbetslasten.



## 5 Konstruktionstekniska aspekter

Detta kapitel omfattar konstruktionstekniska aspekter gällande lyftbalken såsom val av balktvärsnitt samt material och konstruktion.

### 5.1 Lyftbalkens tvärsnitt

Enligt de krav och önskemål som ställts på lyftbalken så skall den vara minst 12 m lång lätthanterlig, samt vara demonterbar eller ihopfällbar.

Vid belastning av en lyftbalk så utsätts den för böjspänningar, dessa kan förekomma som både tryck- och dragspänningar i olika delar av balktvärsnittet. För att med hjälp av balkteori analytiskt räkna ut en böjspänning i ett balktvärsnitt så används formeln:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (1)$$

var

$M_b$  är böjmomentet i balktvärsnittet

$W_b$  är böjmotståndet i balktvärsnittet

Formeln för böjmotståndet är

$$W_b = \frac{I}{e} \quad (2)$$

var

$I$  är tvärsnittets böjtröghetsmoment

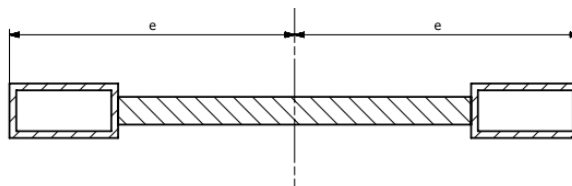
$e$  är den vinkelräta spännvidden från tvärsnittets neutrallinje till den perifera punkten där böjmotståndet uppträder.

Om formlerna (1) och (2) slås ihop fås

$$\sigma_b = \frac{M_b * e}{I} \quad (3)$$

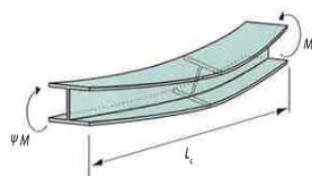
Som man kan se i formel (3) så minskar böjspänningen  $\sigma_b$  ifall böjtröghetsmomentet  $I$  ökar. Vid konstruktion av en böjtålig balk så eftersträvas det att böjtröghetsmomentet är tillräckligt stort så att sträckgränsen för konstruktionens material ej överskrids. (Valtanen, 2016)

Tidiga efterforskningar till arbetet visade att det finns en mycket begränsad tillgång på färdiga balkar med tvärsnitt vars böjtröghetsmoment skulle vara tillräckligt stora för tillfredsställa ändamålet. Balken väljs därför att göras som ett sammansatt tvärsnitt. Se figur 3.



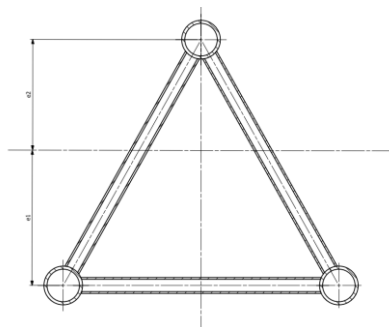
**Figur 3: Slankt sammansatt tvärsnitt**

Figuren 3 representerar ett sammansatt tvärsnitt med en stor spännvidd. Ett problem med det sammansatta tvärsnittet i figur 3 är det är väldigt slankt. En lyftbalk tillverkad av denna typs tvärsnitt kan riskera att vippa på grund av den höga slankheten och låga vridstyvheten i tvärsnittet. Se figur 4.



**Figur 4: Illustration över vippning (Svenskt Stål AB, 2010)**

För att förhindra att detta fenomen inträffar väljs en annan variant av sammansatt tvärsnitt, se figur 5.



**Figur 5: Stabilt sammansatt tvärsnitt**

I figur 5 ses ett triangulärt sammansatt tvärsnitt som till sin natur är mycket stabilt med tanke på vridning.

## 5.2 Val av material

Ett önskemål för lyftbalken är att dess egenvikt skall vara låg. Den skall helst gå att hantera utan extra hjälpmedel eller lyftanordning. Tidiga analytiska försök visade att stålkonstruktioner med erforderlig hållfasthet var för tunga och därmed inte ändamålsenliga, därför väljs aluminium som material.

Aluminium är den vanligaste metallen i jordskorpan. Aluminium framställs av bauxit vilken är en vanlig jordart. Framställning av aluminium är i första hand en väldigt energikrävande process, en stark fördel med aluminium är att det går att återvinna med endast 5 % av den energi som krävs för framställning med bauxit, i det långa loppet så är det en metall som kan ses som en investering att framställa.

Både densitet och elasticitetsmodul för aluminium är ungefär en tredjedel av stålets. Detta innebär att ifall en aluminiumbalk och en stålbalk med samma tvärsnitt utsätts för en lika stor belastning så har aluminiumbalken en tre gånger så stor nedböjning jämfört med stålbalken, detta kan kompenseras vid val av profil samt konstruktion. Aluminium är ett material som kan stränggjutas och urvalet av profiler är därmed stort, svetsbarheten i de legeringar som vanligen används för konstruktioner är god. Till skillnad från stål så sjunker hållfastheten för aluminium inte vid låga temperaturer. Vanligtvis är aluminiumkonstruktioner 40 – 60 % lättare än stålkonstruktioner med samma hållfasthet, detta innebär att det även logistiskt sett är mera fördelaktigt. Vid tillverkning av aluminiumkonstruktioner så är detta även en fördel då delarna är lättare att hantera.

Korrosionsbeständigheten i aluminium är god, detta är på grund av att ett oxidskikt bildas på ytan av metallen när den kommer i kontakt med luft. Tjockleken på det oxidskikt som bildas efter endast några sekunders kontakt med luft är ungefär 1 nm, med tidens gång så växer detta oxidskikt och metallens korrosionsbeständighet ökar. Vanligtvis blir oxidskiktet som uppstår i kontakt med luft 10 - 20 nm. Ifall skiktet repas så uppstår ett nytt skikt nästan omedelbart. Det naturliga oxidskiktet växer snabbare när temperaturen stiger eller luftfuktigheten ökar. Aluminiumets oxidskikt kan nötas bort vid höga pH-värden, detta är inget som i detta arbete beaktas med tanke på balkens användnings- och förvaringsomständigheter. (Lukkari, 2001)

Vid dimensionering av aluminiumkonstruktioner så kan man inte direkt använda sig av samma metoder som vid dimensionering med stål. En väsentlig skillnad vid svetsning av aluminium till skillnad från stål är att aluminiumets hållfasthet sjunker vid svetsfogarna, detta är på grund av att många av de vanliga aluminiumlegeringar som används vid konstruktioner är värmebehandlade för att öka på hållfastheten, när materialet sedan svetsas så fördärras denna värmebehandling och materialet försvagas.

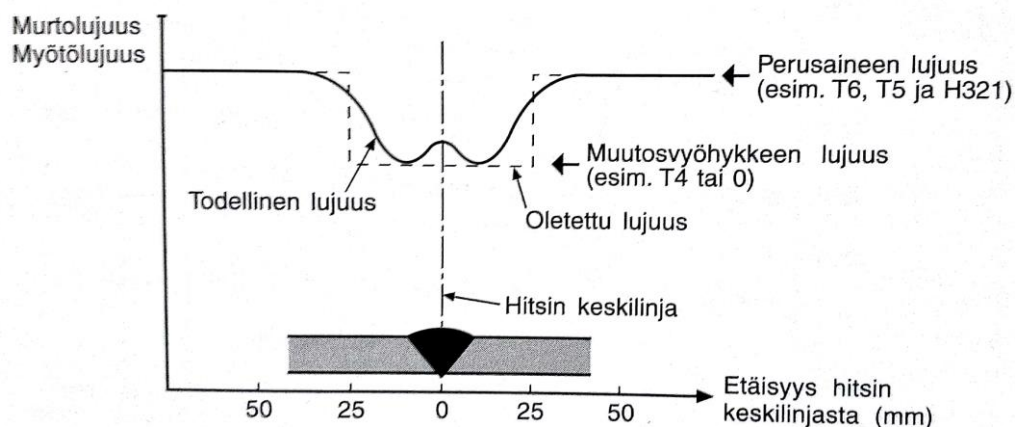


**Bild 1: Haveri av aluminiumkonstruktion**

På bilden ses haveri av en aluminiumkonstruktion vid svetsfogen, konstruktionen tillhörde ett väderskyddstak. (Privat, 2019)

Värmebehandlade konstruktionsaluminium betecknas med T (*thermally treated*), det finns olika klasser av värmebehandlingar de vanligaste är T4 och T6, var T6 innebär en högre hållfasthet än T4, det försvagade området kallas vanligen för HAZ (*Heat Affected Zone*), som tumregel antas HAZ vara 25 mm från svetsfogen.

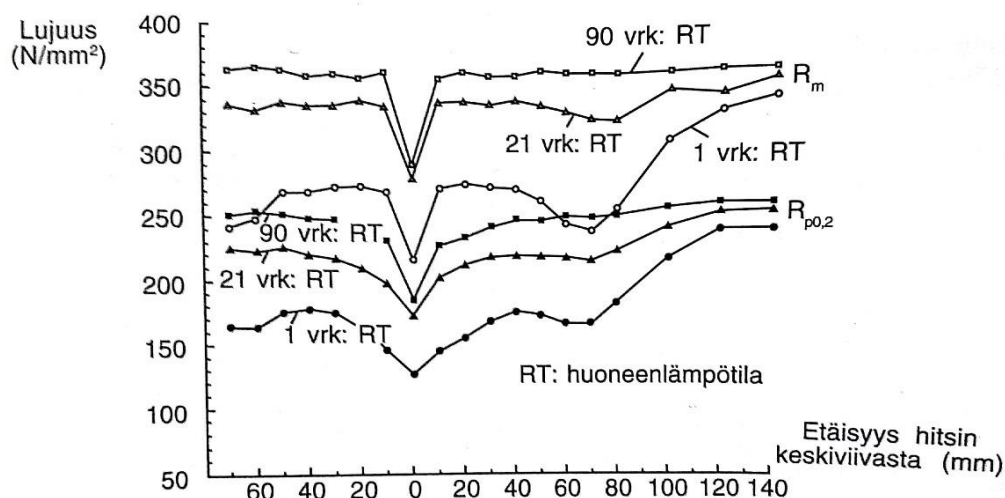
**Tabell 1: Försvagning av aluminium vid svetsfogar**



Det försvagade områdets storlek kring svetsfog (Lukkari, 2001)

Som man kan se i tabell 1 så är det god praxis att vid dimensionering anta att HAZ är 25 mm från svetsfogens centrum samt har en värmebehandlingsgrad på T4. (Lukkari, 2001)

**Tabell 2: Hållfastheten vid åldring av aluminium**



**Svetsfogens naturliga åldring och dess inverkan på hållfastheter för legering EN AW 7020 T6.**

**Materialtjocklek 4 mm. Svetsprocess TIG. Svetsämne AlMg5 (Lukkari, 2001)**

Vid åldring av aluminium så återställs hållfastheten vid HAZ gradvis med tiden. Åldringen kan ske i rumstemperatur eller försnabbat i en höjd temperatur på 120 – 130 °C. Vid dimensionering så beaktas för säkerhetsskull hållfastheten för tillståndet T4. (Lukkari, 2001)

En tillverkare av aluminiumprofiler som uppdragsgivaren varit i kontakt med i tidigare skeden har en katalog på deras produkter. De har ett antal standard-rörprofiler. Olika legeringar som finns tillgängliga i deras sortiment ses i tabell 3.

Tabell 3: Olika aluminiumlegeringars egenskaper

Identifier	EN AW-6060				EN AW-6063				EN AW-6101A	EN AW-6101B	EN AW-6005A		EN AW-6082				
Chemical identifier	EN AW-Al MgSi				EN AW-Al Mg0.7Si				EN AW-EAl MgSi(A)	EN AW-EAl MgSi(B)	EN AW-Al SiMg(A)		EN AW-Al Si1MgMn				
Temper designations	T4	T5	T6	T66	T4	T5	T6	T66	T6	T6	T4	T6	T4	T5	T6		
Strength requirements	Tensile strength $R_m$ (min) MPa (N/mm <sup>2</sup> )		120	140	170	195	120	160	195	225	200	215	180	250	205	270	270
	Yield strength $R_{p0.2}$ (min) MPa (N/mm <sup>2</sup> )		60	100	140	150	65	110	160	180	170	160	90	200	110	230	250
	Elongation A min (A <sub>50%</sub> min) PURSO		16	8	8	8	10-14	7-10	8-10	8-10	10	8	15	8-10	14	8	8-10
	Brinell hardness (HBW)		40	50	55	65	40	55	60	75	65	65	55	80	60	75	90
	Main alloying elements %		Si 0.30-0.6 Mg 0.35-0.6				Si 0.20-0.6 Mg 0.45-0.9				Si 0.30-0.7 Mg 0.40-0.9	Si 0.30-0.6 Mg 0.35-0.6	Si 0.50-0.9 Mg 0.40-0.7		Si 0.70-1.3 Mg 0.60-1.2		
	Aluminium content %		98.5				98.5				98.5	98.5	98.0		97.5		
	Characteristics		Alloyed, hardenable and extrudable alloy with good tensile properties and good surface quality. Very well suited for anodising.				Alloyed, hardenable and extrudable alloy with good tensile properties and good surface quality. Very well suited for anodising.				The same tensile properties as the alloy EN AW-6060 / 6063.	The same tensile properties as the alloy EN AW-6060 / 6063 Good electrical conductivity $\geq 32$ MS/m.	An easily hardenable construction alloy with good tensile properties. Not very well suited for anodising or bending.		An easily hardenable construction alloy with excellent tensile properties. Not very well suited for anodising or bending. Larger dimension and shape tolerances than the other alloys.		
General characteristics		Modulus of elasticity: 70,000 N/mm <sup>2</sup>				Electrical conductivity: 30-32 Y $\geq$ MS/m				Coefficient of thermal expansion (change in length): 2-100°C 10-6/°C	Density: 2.70 kg/dm <sup>3</sup>	Electrical conductivity 20°C: 49-55 IACS %		Thermal conductivity 20°C: 190-210 W/m°C			

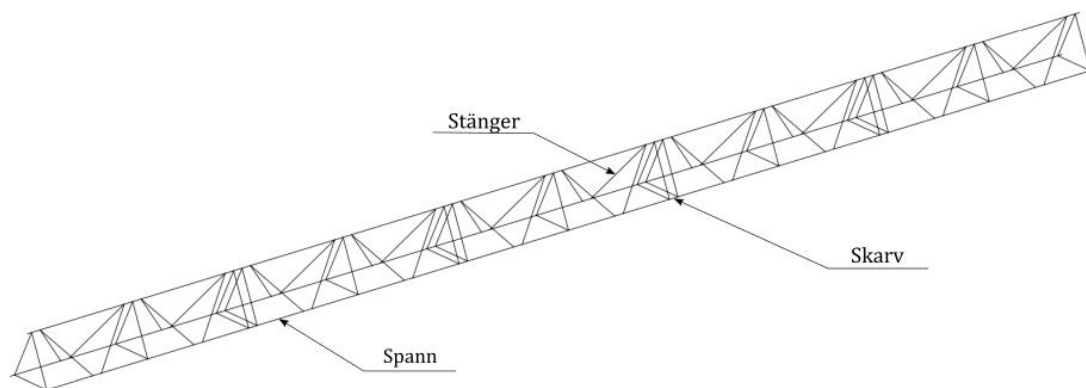
(Purso, 2019)

En aluminiumlegering som är lämplig med avseende på hållfastheten vid HAZ så är AW-6082, nackdelen med denna legering är att tvärsnittets toleranser är grövre.

AW-6082 legeringen har en sträckgräns  $\sigma_{HAZ0.2\%}$  på 110 MPa vid T4, det vill säga svetsade områden, konstruktionen dimensioneras enligt denna sträckgräns. (Purso, 2019)

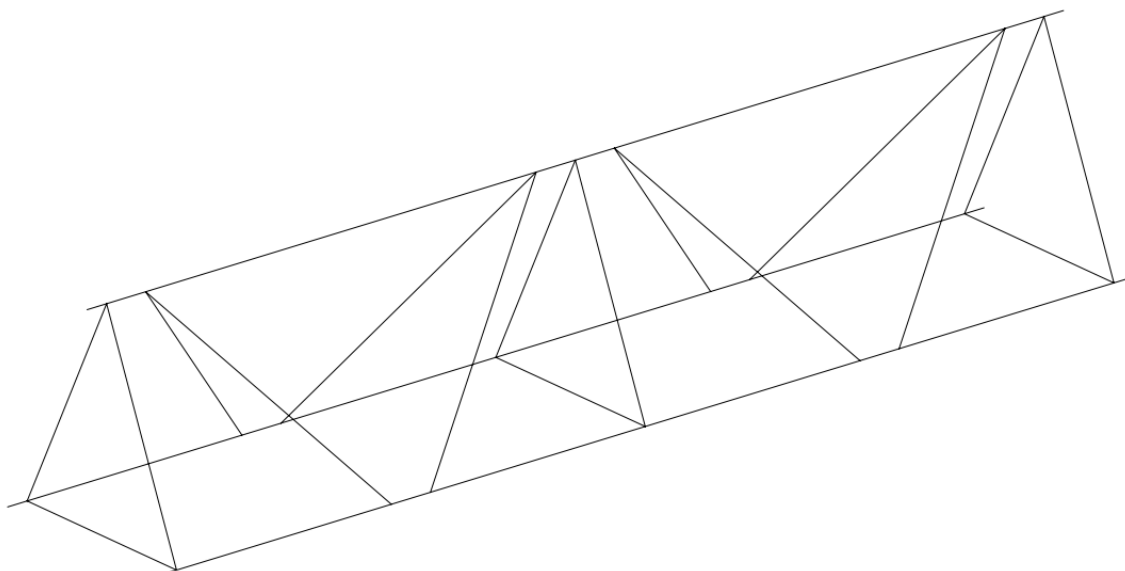
### 5.3 Val av konstruktion

Det triangulära sammansatta tvärsnitt skall hållas ihop med hjälp av stänger. För att fördela spänningarna jämnt i balken så väljs konstruktionen att göras som ett ramverk, se figur 6.



**Figur 6: Skiss av sammansatt balkkonstruktion**

Balken som ses på bilden är konstruerad som ett ramverk. För att underlätta transport och hantering av lyftbalken så väljs konstruktionen att skarvas ihop med hjälp av sektioner, se figur 7.



**Figur 7: Skiss av balksektion**

I figur 7 ses en såkallad balksektion, av vilka den fullständiga balken skall byggas upp utav.

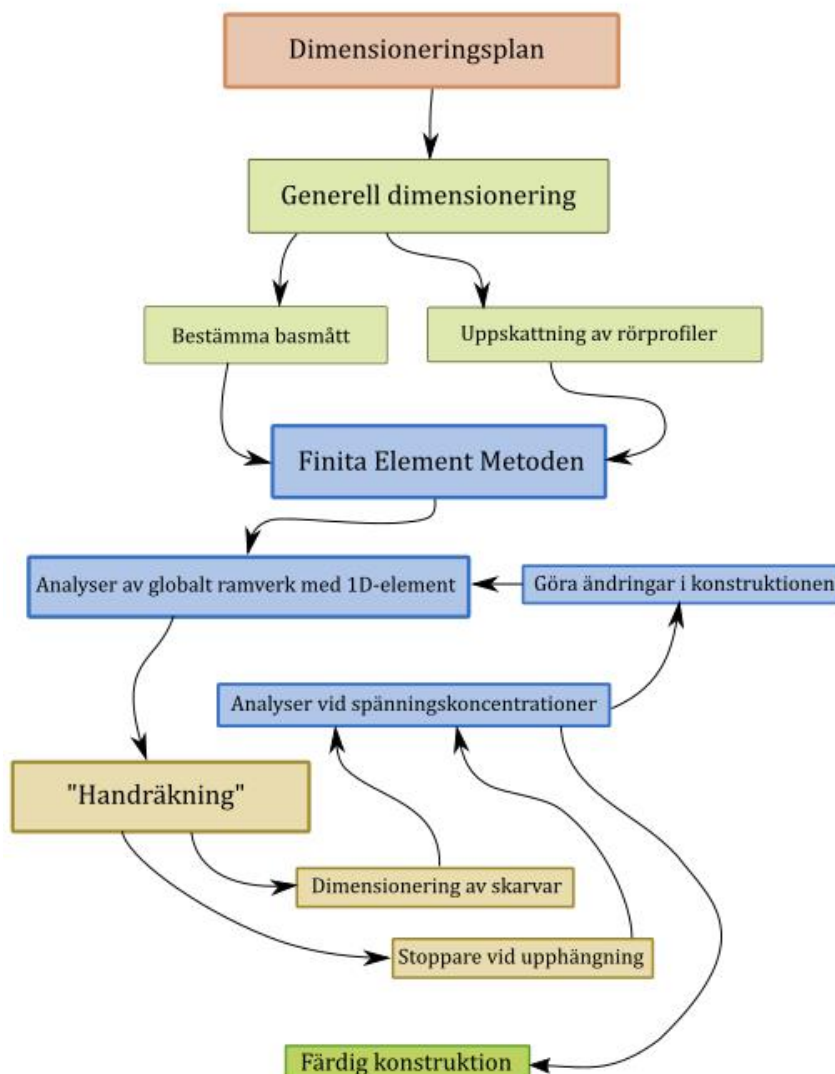
Ett ramverk består av övre- samt undre spann, dessa är sammanfogade med stänger. Det övre spannet utsätts huvudsakligen för dragkraft och det undre spannet för tryckkraft, stängerna utsätts för både tryck- och dragkrafter. Skillnaden mellan ett ramverk och ett fackverk är att ramverket har styva leder och därmed är momentupptagning möjlig i stängerna. (Dahlblom & Olsson, 2015)

När en slank profil utsätts för tryckkraft så riskerar den att knäckas, vid vilken kraft knäckningen sker beror på profilens längd och tvärsnitt, längden som knäckning beräknas på kallas för knäcklängd. Genom att placera stängerna på så sätt som i bild så kan man minska på knäcklängden i det undre spannet och därmed förebygga att spannet knäcks. Det övre spannet utsätts för dragkraft och där uppstår ingen risk för knäckning. Knäckning är en form av buckling och i kapitel 6.2 beskrivs tillvägagångssättet för en bucklingsanalys gjord med finita element metoden.



## 6 Dimensionering av lyftbalk

I detta kapitel beskrivs tillvägagångssätt som använts vid dimensionering och analys av lyftbalken. Se figur 8 för ett flödesdiagram över arbetsgången.



**Figur 8: Flödesdiagram över dimensioneringsgången**

Först bestäms basmått på konstruktionen efter lämplighet, sedan uppskattas rörprofilernas storlek, efter detta görs en FEM-analys på den globala konstruktionen. När den är gjord så kan skarvförband och stoppare dimensioneras med "handräkning" med avseende på de krafter som fås ut ur den globala konstruktionsanalysen och därefter kan skarvförband och stoppare analyseras med FEM.

Den slutgiltiga slutsatsen över konstruktionen kommer att göras med avseende på resultaten som fås ut ur analyserna med finita element metoden. Detta är möjligt i och med att kravet för typverifikation av lyftredskapet i slutändan görs med ett statiskt provlyft med tre gånger den maximala arbetslasten.

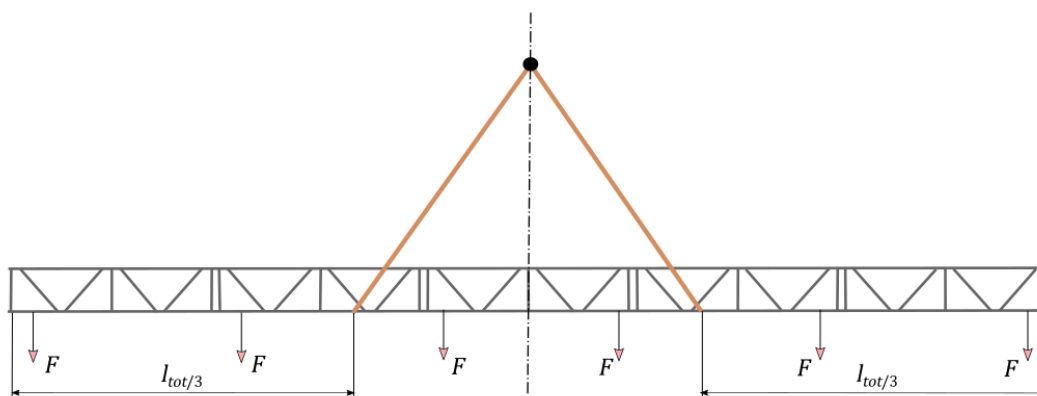
## 6.1 Generell dimensionering

Bredden på ramverket, det vill säga yttre avståndet mellan de två undre spannen dimensioneras enligt takplåtsprofilen som skall lyftas, denna är av typen dubbelfalsmodell och är 540 mm bred. Bredden väljs att vara 500 mm, orsaken till detta är att plåtknippan som skall lyftas är tänkt att fästas i lyftbalken med hjälp av lyftremmar, då balken görs lite smalare än plåtknippan så kommer lyftremmarna att bidra med friktion på plåtknipans sidor vilket förhindrar att plåtknippan glider vid placering på ett lutande tak. Höjden på ramverket kan ses som en variabel, den kan under dimensioneringens gång justeras vid behov, ifall höjden ökas så ökar böjtröghetsmomentet i tvärsnittet och därmed balkens böjtålighet men detta leder även till att stängerna blir längre vilket orsakar att de blir mera benägna för knäckning. Ramverket väljs att ha en godtycklig höjd på 500 mm. Se bilaga 1 för basmått på en balksektion.

En balksektion väljs att vara 2,5 m lång med avseende på att den skall kunna transporteras på tvären på kranbilens flak. Den ihopplockade balken skall bestå av totalt fem stycken sammansatta sektioner.

### 6.1.1 Grov dimensionering av rörprofiler

Lyftbalkens belastningsfall kan ses i figur 9. I figuren ses upphängningspunkterna för takplåt samt lyftkedjor. Avståndet mellan infästningspunkterna för lyftkedjorna är tredjedel av den totala balklängden.

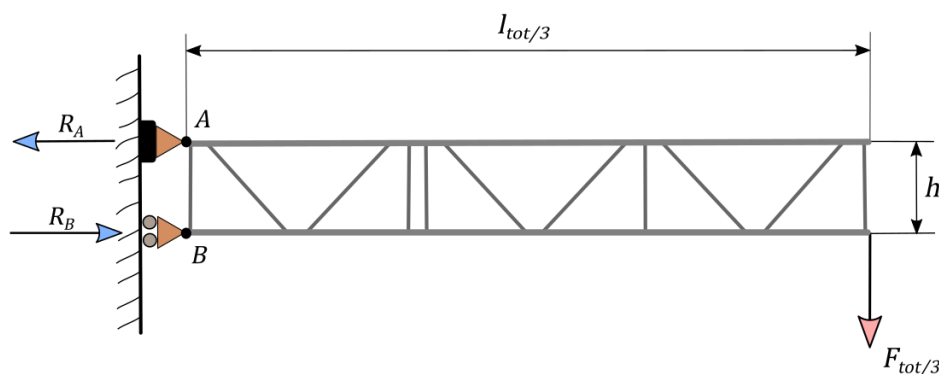


**Figur 9: Belastningsfall vid lyft av takplåt**

Orsaken till att upphängningspunkterna för lyftkedjorna i figur 9 är fästa på en tredjedel av den totala balklängden är för att beakta ett "worst case scenario". Mera optimalt vore att flytta upphängningspunkterna längre ut mot balken ändor. Upphängningspunkterna är

placerade på det nedre spannet för att fördela punktkrafterna på fyra ställen istället för två i det övre spannet.

För att grovt uppskatta ett startprofil så beräknas reaktionskraften  $R_A$  enligt figur 10 med avseende på statisk jämvikt. I figur 10 så ses ett statiskt belastningsfall av typen "cantilever", det statiska belastningsfallet är tänkt att representera ett så kallat "worst case scenario" var endast en lyftrem är fastsatt längst ut på balkens ända, kraften  $F_{tot/3}$  väljs att vara 10 000 N med avseende på att lyftbalken önskas klara av en 1000 kg arbetslast. För typverifikation av en lyftbalk så krävs ett provlyft med tre gånger den maximala arbetslasten, det vill säga 3000 kg som fördelas jämnt balken mellan upphängningspunkterna. Längden  $l_{tot/3}$  används i beräkningarna. Se bilaga 2 för beräkning av figur 10.



**Figur 10: Frikroppsdiagram för grov uppskattning av dimensioner på spannens rörprofil**

Stödskraften  $R_A$  beräknas med avseende på momentjämvikt kring punkten B i figur:

$$\sum M_B = 0$$

$$M_B = R_A * h - F * l_{tot/3} \quad \rightarrow$$

$$R_A = \frac{F * l_{tot/3}}{h} \quad (4)$$

Reaktionskraften  $R_A$  antas vara den största dragkraft som uppträder i övre spannet belastningsfallet i figur. På grund av att konstruktionen är svetsad på många olika ställen så dimensioneras det övre spannet enligt HAZ spänningen  $\sigma_{HAZ0.2\%}$  som för det valda materialet. En erforderlig ytarea för det övre spannets tvärsnitt beräknas.

$$\sigma_{HAZ0.2\%} = \frac{R_A}{A_{spann}} \quad \rightarrow$$

$$A_{spann} = \frac{R_A}{\sigma_{HAZ0.2\%}} \quad (5)$$

Som profil för spannen väljs rörprofilen  $\varnothing 63 \times 4$ , vars tvärsnittsarea är nära den som beräknas med hjälp av formel (4), den finns även i tillverkarens sortiment. För att underlätta tillverkning av konstruktionen så väljs det övre samt undre spannet att ha samma profil. Orsaken till att rörprofil valdes som tvärsnitt för spannen var på grund av att underlätta i tillverkningen av den triangulära konstruktionen. Vid val av profil för stängerna så väljs godtyckligt  $\varnothing 26 \times 3$  vilket är en profil som finns i tillverkarens sortiment samt har en tjocklek som är relativt nära spannprofilernas, detta underlättar vid svetsningen.

## 6.2 FE-analys av global konstruktion

finita element metoden är en metod som används för att göra olika typer av analyser på konstruktioner. I detta arbete används mjukvaran NX-Nastran vilken finns till förfogade via läroanstalten. Analyser som görs är; linjär statisk, linjär buckling, icke-linjär statisk.

### 6.2.1 Olika alternativ för meshning

För att kunna göra en FEA (Finita Element Analys) på en konstruktion så måste konstruktionen meshas, detta innebär att konstruktionens geometri byggs upp med hjälp av element. I mjukvaran finns det olika elementtyper att välja på, de skiljer sig från varandra.

Lyftbalkens huvudmått är mycket stora i förhållande till de profilers tvärsnitt vilka balken är tänkt att bestå av. Vid val av mesh i FE-modellen så bör detta beaktas, meshningsmetoder som används i detta arbete är :

- 3D-mesh
- 1D-mesh

#### 3D-Mesh

Vid 3D-meshning byggs en mesh upp med avseende på en solid kropp. Meshen består av 3D-element och dess yttre konturer följer de på den solida kroppens. Vid slanka solida kroppar har 3D-meshning en klar nackdel; för att utgöra skillnad på inre drag- och tryckspänningar i områden av en slank solid kropps tvärsnitt, bör tvärsnittet (balkar och liv), i de områden som är utsatt för böjmoment, delas upp i minst två element. Detta förfarande är vedertagen praxis vid 3D-meshning och leder till mycket små elementstorlekar i förhållande till den slanka kroppens längd, vilket innebär en modell med många element vilka i sin tur sammanlagt innehåller mycket information. Desto mera information en modell innehåller desto längre tid tar det för mjukvaran att lösa simuleringarna.

## 1D-Mesh

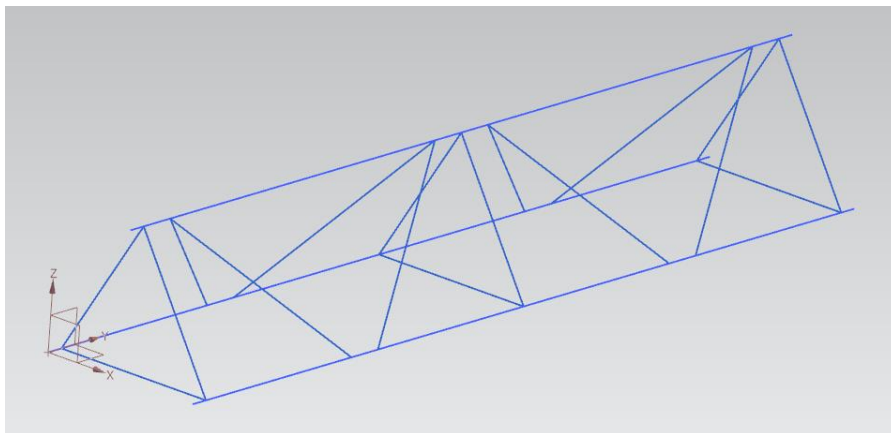
Vid 1D-meshning byggs en mesh upp med hjälp av noder och linjer mellan noderna. Linjerna representerar 1D-elementens neutrallinje. Linjerna ansluts med varandra i noderna, anslutningarna kan göras som styva leder eller friktionsfria leder. Fördelen med 1D-meshning är att modellen innehåller avsevärt mycket mindre mängd information än vid 3D-meshning och är därmed den minst krävande meshen med avseende på datorkapacitet.

### 6.2.2 Tillvägagångssätt med FEM

För att få en inblick över materialspänningarnas fördelning i fackverket används den så kallade "hotspot-metoden", i den nämnda metoden använder man sig av en lättare mesh för att få en bild över kraft- och spänningsfördelningen i den globala konstruktionen för att sedan använda sig av en finare mesh i de områden var spänningskoncentrationer- och övergångarna äger rum. Orsaken till att denna metod används är för att spara tid. Tidsbesparingen erhålls på grund av att detta tillvägagångssätt långt använder sig av den minst informationskrävande meshen som är nödvändig för analysen. I praktiken utförs detta med hjälp av att först bygga upp en FE-modell på den globala konstruktionen med hjälp av 1D-meshning. Simuleringar görs därefter enligt det belastningsfall som lyftbalken är planerad att provbelastas med för kravet på giltig typverifikation. Analyser som görs är statiska linjära samt buckling. Ändringar på konstruktionen kan vid behov göras i detta skede. När tryck och dragkrafter i fackverket har analyserats och optimerats görs en 3D-meshad modell vid kritiska områden i konstruktionen var spänningskoncentrationer- och övergångar förekommer. 3D-meshen belastas i simuleringarna med avseende på de spänningar som fås ut ur analysen med 1D-modellen.

### 6.2.3 FEM analys på 1D-modellen

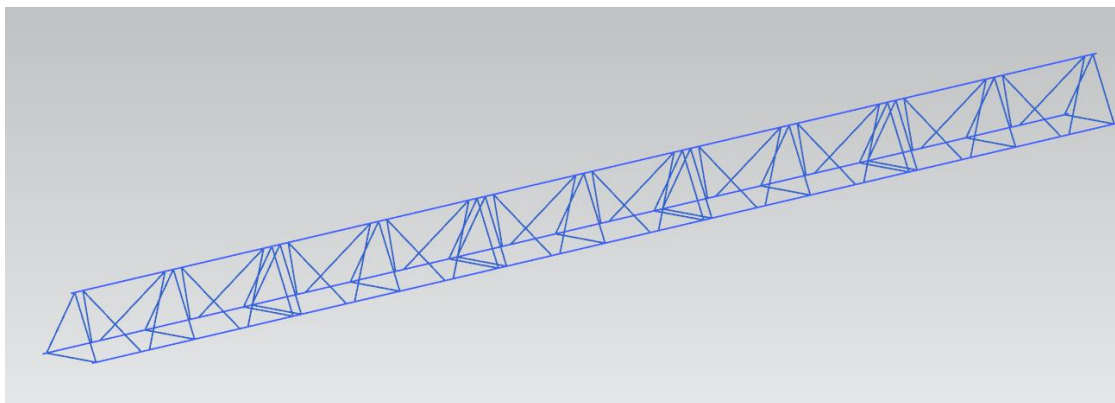
En modell på en balksektion modelleras med punkter och linjer. Linjernas korrelation med punkterna åstadkoms med hjälp av associativ geometri. Vid associativ geometri så anges varje punkt ett namn och punkternas samband beskrivs med linjer i mjukvaran.



**Figur 11: 1D-modell av balksektion**

Nodernas placering i det globala koordinatsystemet samt förhållande till varandra parametreras för att eventuella ändringar på konstruktionen skall underlättas. Se bilaga 1 för den parametriserade modellen.

Balksektionen mönstras sedan i axiell riktning så att totalt fem stycken sektioner fås, detta ger en global längd på 12,5 m.

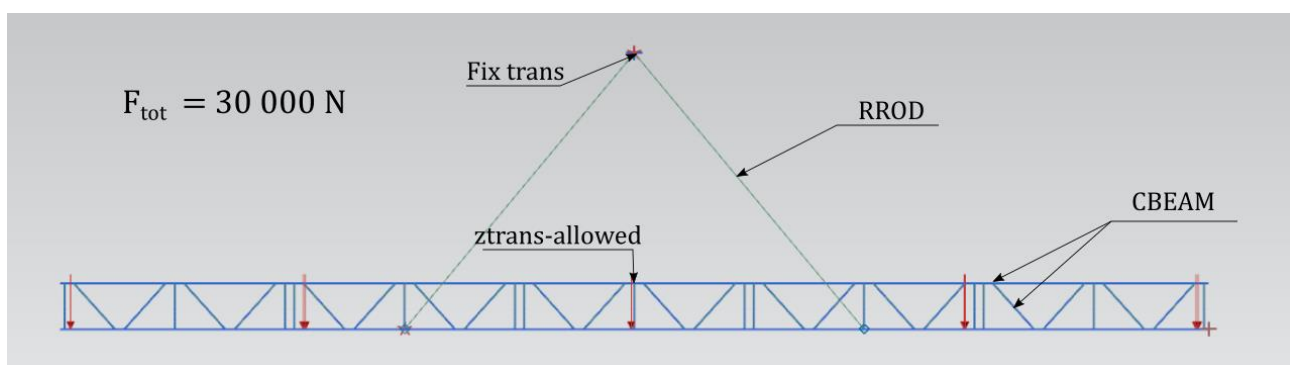


**Figur 12: 1D-modell på global konstruktion**

1D-meshen som byggs upp för ramverket använder sig av två stycken 1D-elementtyper; CBEAM och RROD. CBEAM-elementen är så kallade balkelement med ett bestämt balktvärsnitt, linjerna representerar balktvärsnittets neutrallinje. De sammankopplade noderna är låsta i frihetsgraderna 4, 5 och 6 det vill säga de rotativa frihetsgraderna, detta innebär att momentupptagning i noderna är möjlig, neutrallinjen tillåts böjas mellan noderna.

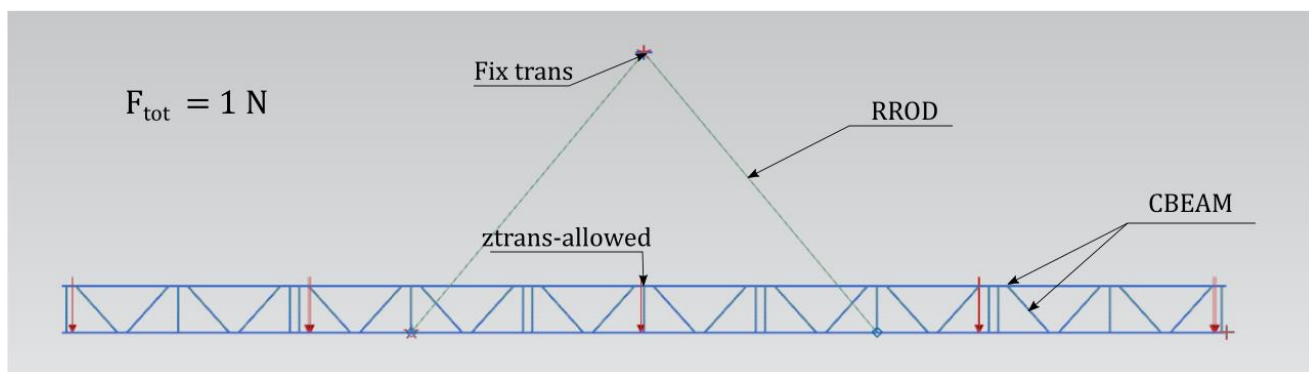
RROD-elementen, så kallade stångelement, är ledade i noderna och tillåts därmed att rotera, de är styva i axiell riktning, ingen momentupptagning är möjlig. (Siemens, 2019)

För att göra en linjär statisk analys så väljs rörprofilerna att vara balkelement med respektive tvärsnitt. För upphängning av balken så används stångelement, dessa skall representera lyftkedjorna, som antas vara styva i axiell riktning och fritt roterbara i upphängningspunkterna. Som constraints så fixeras upphängningspunkten för lyftkedjorna till lyftkroken i translativ riktning. Punkten för lyftkroken placeras 3 m ovanför ramverkets nedre spann. En nod i mitten på balken fixeras i fem frihetsgrader, alla förutom translativ Z-rörelse, detta är för att förhindra en roterande frikroppsrotation. Lasten är fördelad på de planerade upphängningspunkterna för plåtknippan.



**Figur 13: Villkor vid linjär statisk analys**

Den linjära analysen för buckling görs med samma constraints som i den linjära statiska analysen, skillnaden är att en last på totalt 1 N används för att i sin tur räkna ut den kritiska bucklingslasten med hjälp av en lastfaktor som mjukvaran beräknar för olika bucklingsscenario.



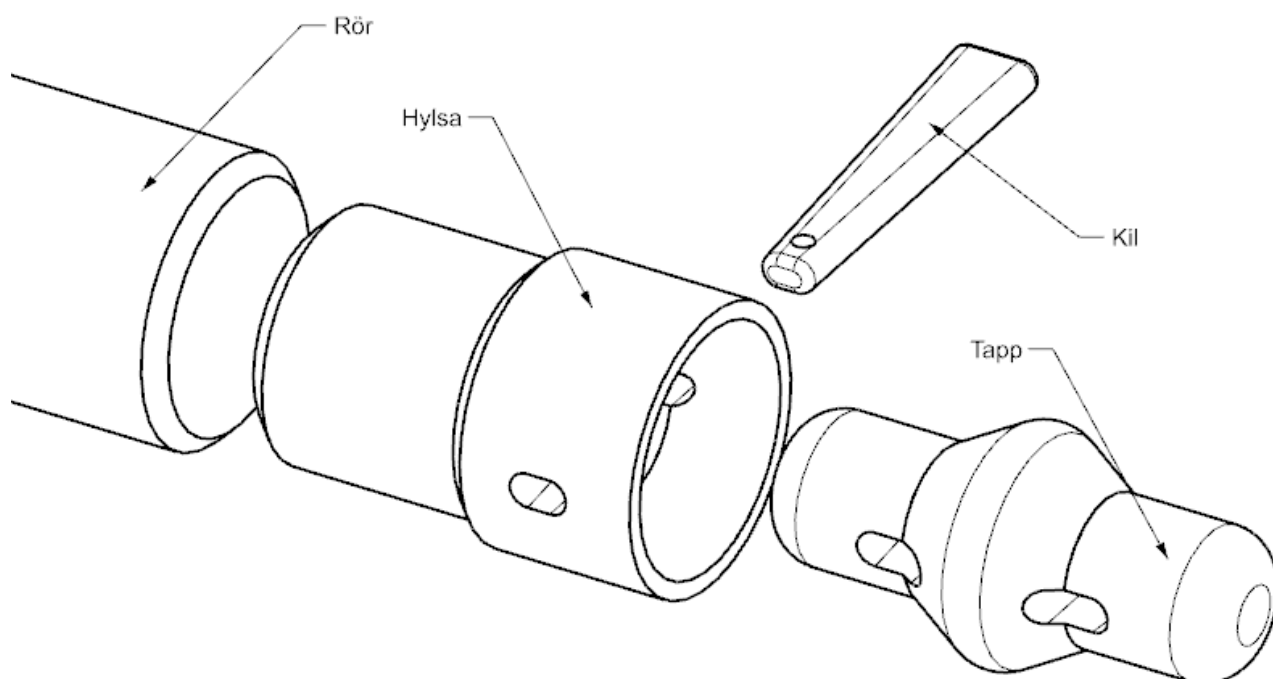
**Figur 14: Villkor vid linjär bucklingsanalys**

Som material väljs aluminium, legeringen spelar i detta fall ingen större betydelse då materialets sträckgräns ej beaktas i linjära analyser, utan materialets töjning är konstant linjär vid stigande spänningsnivåer. Elasticitetsmodulen är den väsentliga parametern, den är för

det material som används 70 GPa. Vinkeln mellan RROD-elementen och det nedre spannet är 50°.

### 6.3 Dimensionering av skarvförband

När finita element analyser är gjorda på spänningarna och krafter som uppträder i spann och stänger i det globala ramverket så används dessa resultat vid dimensionering av skarvförband. Komponenterna som skarvförbandet skall bestå av är; hylsa, tapp och kil. Ett skarv skissas upp, se figur 15.



**Figur 15: Skiss av skarvförband**

Hylsan skall tryckas in i ändan på spanns rör och svetsas fast vid fasningen som ses i figur 15. För att undvika böjspänningar i svetsfogen så bör hylsan göras med en liten greppassning till spannets rör.

#### 6.3.1 Skarvförbandets låsning

Skarvförbandet skall låsas med en kil, den skall hållas på plats med hjälp av kraftbetingad fixering i kombination med en låspinne. Tappens kona har som funktion att stadga upp skarvförbandet, helst vill man vid tanke på demontering undvika att konförbandet mellan



hylsa och tapp överstiger sin självlåsningsgräns, vilken i konförbandet mellan hylsa och tapp är:

$$\tan(\beta) < \mu$$

var  $\mu$  är friktionskoefficienten mellan materialen.

$\beta$  är vinkeln i figur 16.

Kilen skall slås in med hjälp av en hammare, för att kilen skall fastna så bör dess självlåsningsgräns överskridas. Självlåsningsgränsen i kilförbandet överskrids då:

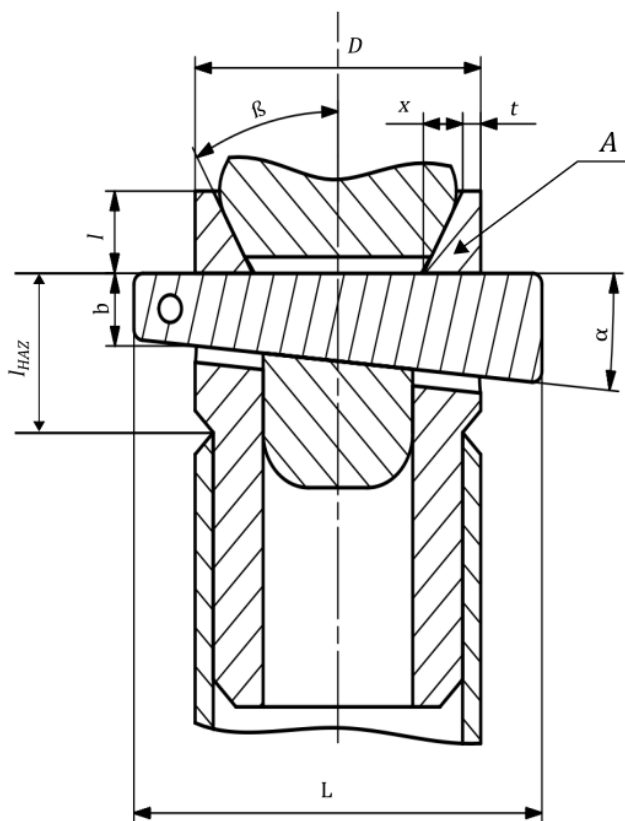
$$\alpha < 2 * \mu$$

var  $\mu$  är friktionskoefficienten mellan materialen.

$\alpha$  är vinkeln i figur 16.

(Valtanen, 2016)

När självlåsningsgränsen är överskriden så kommer kilens erforderliga utdragningskraft att öka i takt med att förbandets axiella dragkraft ökar, förbandet är med andra ord självverkande vilket innebär att kilen ej behöver slås i med stor kraft. I det nedre spannet så kommer förbandet utsättas för axiell tryckkraft och då säkrar låspinnen att kilen faller ur.



Figur 16: Skiss på genomskärning av skarvförband

### 6.3.2 Dimensionering av kil mot skjuvning

Kilen skjuvas av vid två ytor, kilen dimensioneras efter den minsta kilbredden  $b$  vilken beräknas genom att först anta en godtycklig kiltjocklek och material och sedan dimensionera  $b$  med avseende på den erforderliga arean som kilen bör ha för att skjuvning skall undvikas. I eurokoden SFS-EN 1993-1-8 så finns det en formel angiven för dimensionering av skjuvning nitar var säkerhet beaktas, denna formel används vid dimensioneringen.

$$F_{max} = \frac{0,6 * \sigma_{rm} * A_{skjuv}}{\gamma_{M2}} \quad (6)$$

Var

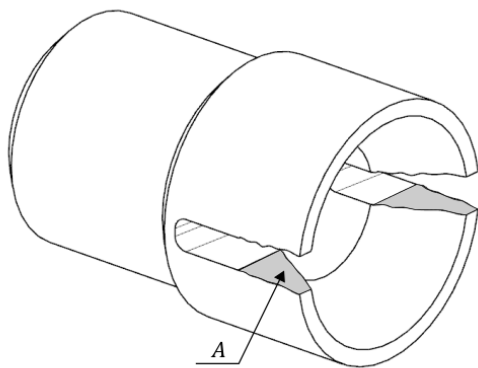
$\sigma_{rm}$  är brottgränsen för materialet

$A_{skjuv}$  är den totala skjuvarean

$\gamma_{M2}$  är partialkoefficienten enligt standarden

### 6.3.3 Dimensionering mot skjuvning vid hylsans kilspår

För att undvika att urrivning av kilen sker (se figur 17) så beräknas avståndet  $l$  i figuren 16 med avseende på den totala skjuvarean  $A_{tot} = 4 * A$



Figur 17: Illustration över skjuvning i hylsan

Den totala skjuvarean beräknas enligt

$$A_{tot} = 4 * (l * t + \tan(\beta) * l^2) \quad (7)$$

Skjuvningen dimensioneras enligt materialets sträckgräns vid tillståndet T6 eftersom avståndet är 25 mm från svetsfogens mitt är beaktat.  $l$ ,  $t$ ,  $\beta$  är enligt figur 16.

### 6.3.4 Kontroll av yttryck vid kil

När dragkraft uppstår i förbandet så kommer ett yttryck att uppstå mellan kil, hylsa och tapp. Detta yttryck kontrolleras så det ej överskrider materialets sträckgräns. Kontaktytans area mellan kil och hylsa beräknas enligt:

$$A_{kil.hylsa} = 2((x + t)t_{kil}) \quad (8)$$

kontaktytan mellan kil och tapp beräknas enligt:

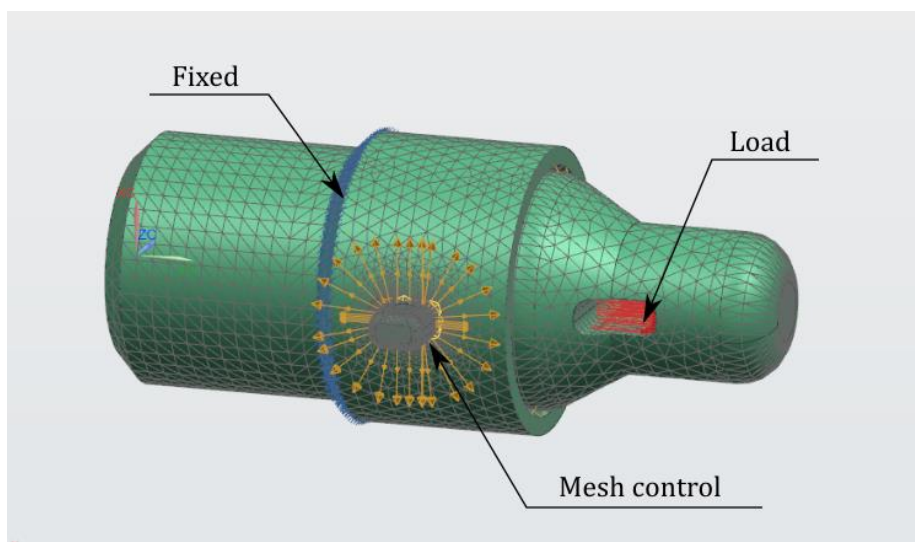
$$A_{kil.tapp} = t_{kil}(D - 2(x + t)) \quad (9)$$

Där  $D$ ,  $x$  och  $t$  är enligt figur 16,  $t_{kil}$  är kilens tjocklek

Observera att avrundningar på kilen försummas vid denna kontroll, finita element analys görs på det dimensionerade skarvförbandet. Se bilaga 3 för uträkningar på skarvförbandet i mathcad.

### 6.3.5 FE-analys av skarvförband

När förbandet är dimensionerat så görs en spännings och deformationsanalys med finita element metoden i NX Nastran. Förbandets komponenter ritas upp som solida kroppar i CAD-modulen och en sammanställning av komponenterna görs. Soliderna meshas med en 3D-mesh i mjukvaran och ”mesh control” funktionen används vid kontaktytorna för att förfina meshen där spänningskoncentrationerna uppstår, se figur 18.



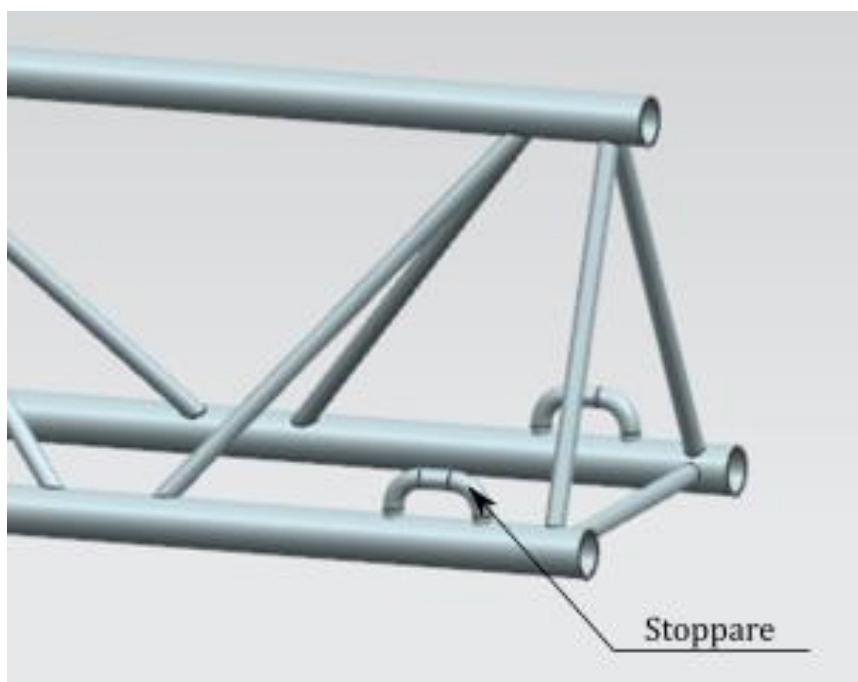
**Figur 18: Meshad sammanställning på skarvförband**

Som kontaktytor väljs ”surface to surface contact” vid tappens och hylsans kona samt vid kil och hylsa, ”surface to surface gluing” väljs mellan kontaktytorna vid tapp och kil. Den

fasade ytan var svetsfogen är tänkt att vara väljs att vara fixerad i alla frihetsgrader. En jämnt utbredd last appliceras på det fria kilspåret i tappen, lastens storlek är den maximala axiella kraft som fåtts ut ur tidigare analys med 1D-trådmodellen. Som material väljs stål för tapp samt kil och aluminium för hylsan. Stålets elasticitetsmodul är 210 GPa och aluminiumets 70 GPa.

#### 6.4 Kontroll av stoppare för infästning

Infästningen av lyftbalk till lyftanordningens krok skall ske med hjälp av lyftremmar samt lyftkedjor. Lyftremmar skall viras runt balkens nedre spann på fyra punkter och sedan skall dessa kopplas till lyftkedjorna som i sin tur kopplas till kroken. För att förhindra att remmarna glider längs spannen vid lyft så svetsas stoppare fast i de nedre spannen. Stopparna är tillverkade av samma rörprofil som stängerna, se figur 19.



**Figur 19:** Stoppare för att förhindra att remmen glider

### 6.4.1 Beräkning av last på stopparen samt kontroll mot skjuvning vid svetsfog

Den minsta vinkeln  $\theta$  mellan lyftrem och spann bestäms att vara  $45^\circ$ , reaktionskraften på stopparen  $R_{stoppare}$  beräknas genom

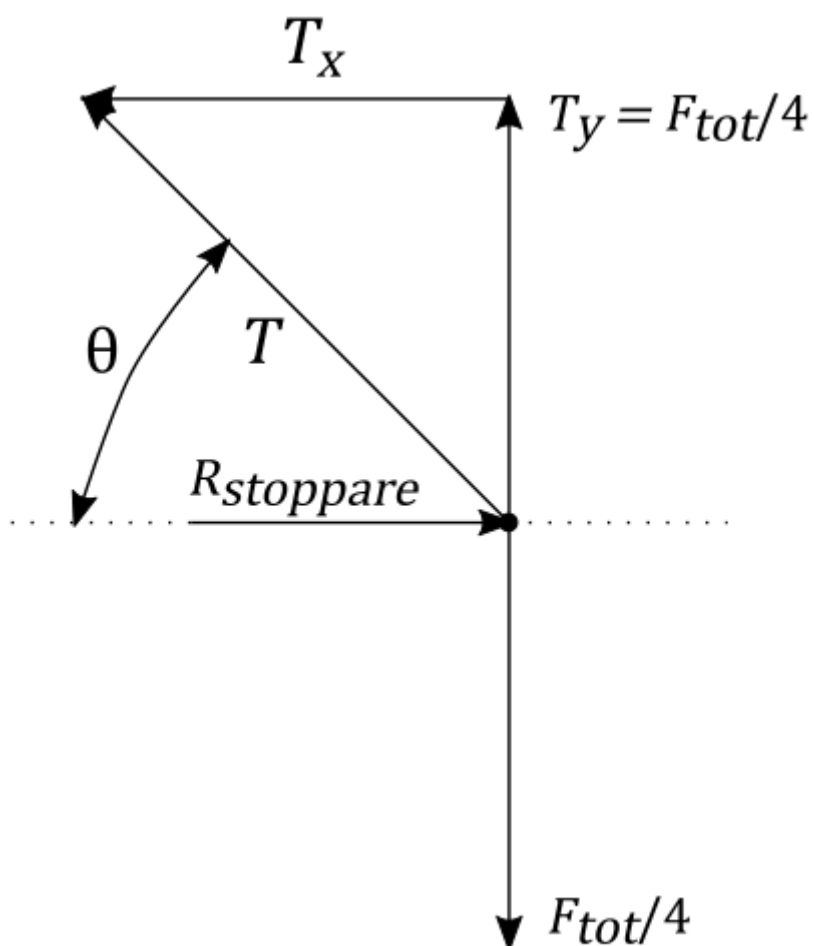
$$R_{stoppare} = T_y * \mu_f - T_x \quad (10)$$

var

$T_y$  är den vertikala kraftkomponenten i en upphängningspunkt

$T_x$  är den horisontella kraftkomponenten i en upphängningspunkt

$\mu_f$  är friktionskoefficient mellan spann och rem

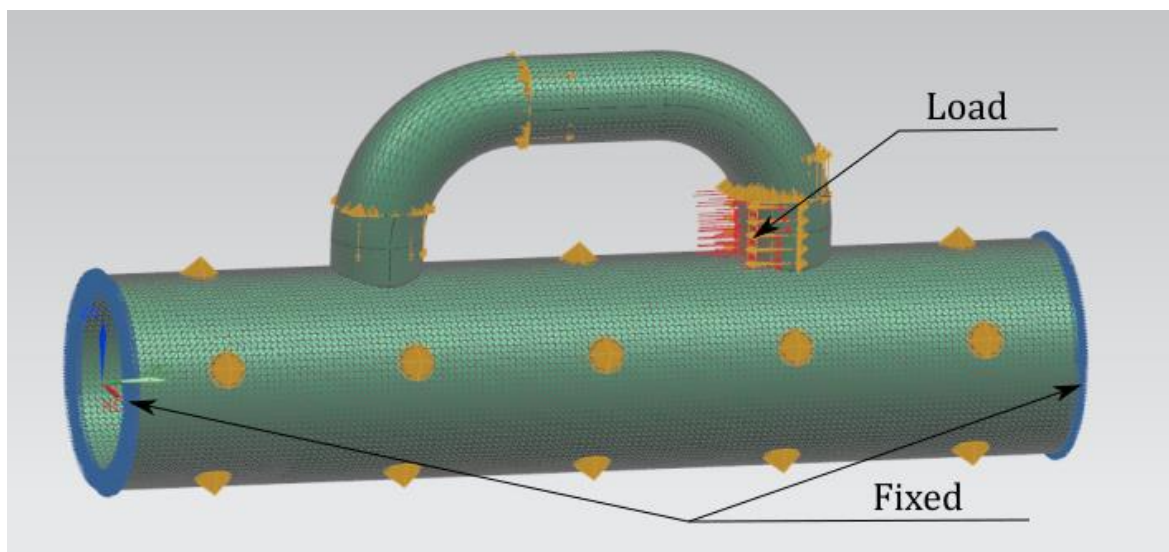


**Figur 20: Reaktionsdiagram för krafter vid stopparen**

Se bilaga 4 för uträkningar av stopparen i mathcad.

### 6.4.2 FE-analys av stoppare

En finita element analys görs på stopparen med hjälp av de krafter som räknats ut i kapitel 6.4.1. En CAD-modell görs på området var stopparen är placerad och den meshas med en 3D-mesh och belastas med en jämnt utbredd kraft där var remmen kan tänkas trycka på. För att kraften skall kunna appliceras på ytorna så används ”*split body*” funktionen i mjukvaran för att separera soliden vid de nödvändiga ytorna som kraften appliceras på, dessa separata solider limmas sedan ihop igenom med ”*surface to surface*” contact funktionen. Spannets rör fixeras i båda ändor i alla frihetsgrader, se figur 21.



**Figur 21: Belastningsfall i finita element analysen för stopparen**

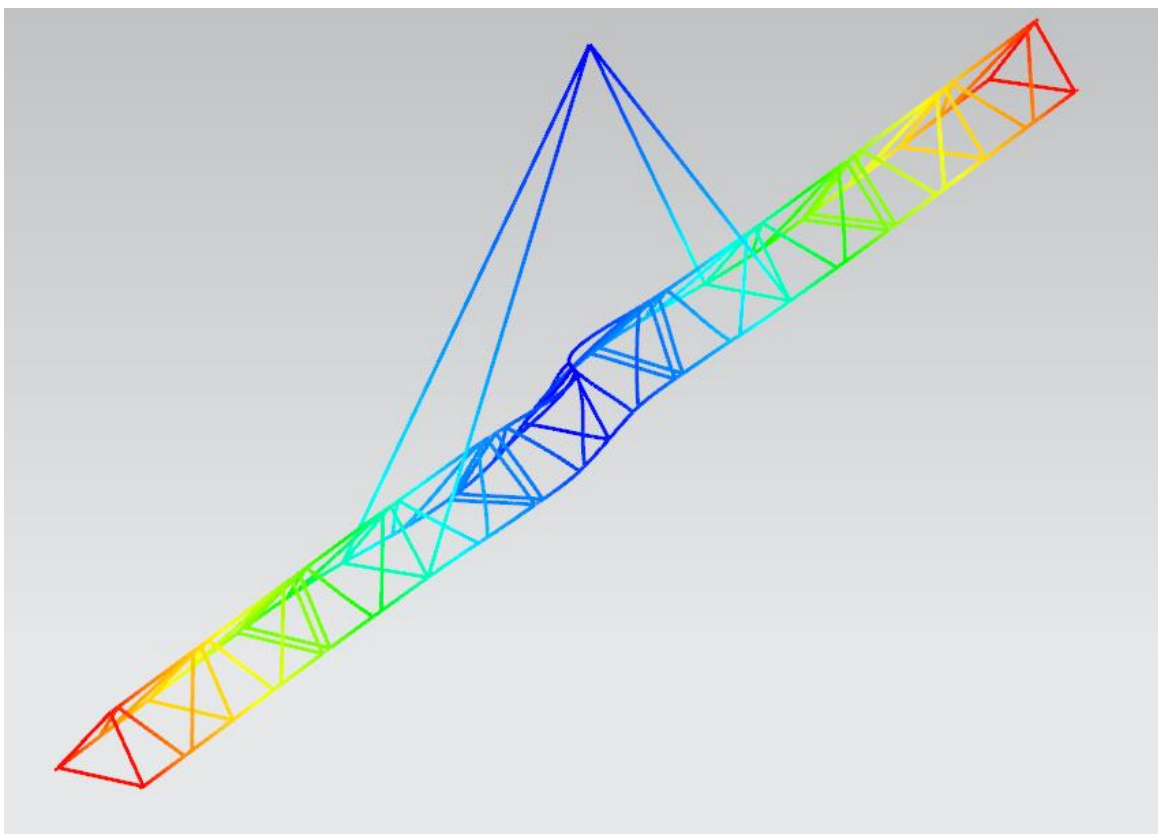
En linjär statisk analys samt en linjär bucklingsanalys görs för belastningsfallet. I den linjära bucklingsanalysen används 1 N som last, den görs främst för kontroll av lokal buckling av spannet.

## 7 Resultat

I detta kapitel presenteras resultat av FE-analyserna gjorda enligt tidigare kapitel. I bilagorna ses resultaten av ”handräkningarna” samt kraft och spänningsanalys av den globala konstruktionen.

### 7.1 FE-analys av 1D-Element modellen

Resultatet av finita element analysen på 1D-modellen presenteras i detta kapitel. I bilaga 5 ses resultaten av FE-analyserna på den globala konstruktionen. Enligt den statiska linjära analysen så deformeras konstruktionen på sådant sätt att balkens ändor böjs ner totalt ~ 56 mm med en total last på 30 kN. Denna nedböjning är relativt liten till den balklängd som befinner sig på ytter om lyftremmarna. I den statiska linjära analysen så görs inga iterationer för att beakta hur balken ytterligare skulle deformeras efter elastisk deformation. Ifall balkens nedböjning vore större så hade en icke-linjär analys kunnat göras för att kontrollera hur balken ytterligare skulle ha deformerats när lasten ligger på den böjda balken. Den maximala spänningen (von Mises) som uppträder i konstruktionen är ~ 100 MPa vilket är under sträckgränsen för AW 6082 T4 vilken är 110 MPa, i von Mises spänningarna beaktas den sammansatta spänningen som uppkommer av drag/tryck och böj spänningar. Detta resultat tyder på att konstruktionen i sin helhet kommer att tåla de påfrestningar som den utsätts för vid lastprovet som krävs för typverifikation. Eftersom analysen är linjär så kan resultaten som fås från analyserna divideras med en faktor 3 för att få ut de spänningar som uppträder vid den maximala arbetslasten om 10 kN. I bucklingsanalysen som gjordes med en total last om 1 N så förekommer ett globalt knäckningsfenomen av konstruktionen, se figur 22. Detta fenomen antas bero på att RROD-elementens (lyftkedjornas) vinkel bidrar till en axiell tryckkraft i konstruktionen.



**Figur 22: Knäckning av den global konstruktionen**

Fenomenet i figur 22 inträffar vid en lastfaktor på  $\sim 75\,000$  vid en total last av 1 N vilket innebär att säkerheten mot att detta scenario inträffar är:

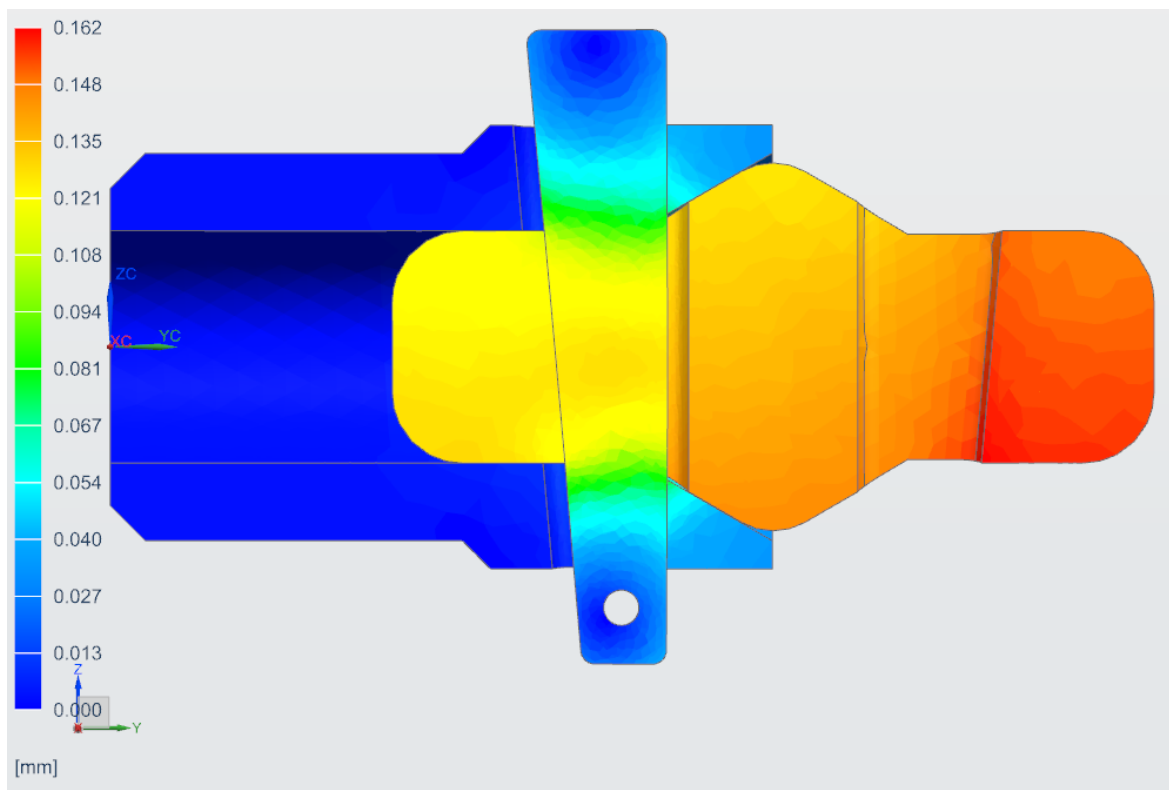
$$s\ddot{a}kerhet = \frac{75\text{ kN}}{30\text{ kN}} = 2,5$$

detta är säkerheten mot global knäckning vid belastningsfallet för typverifikation, den maximala arbetslasten för lyftbalken är 10 000 N och då är säkerheten mot att detta scenario inträffar 7,5. I verkligheten så kommer plåtknippan att vara fäst i balken med lyftremmar, detta kan antas bidra med ytterligare stabilitet mot global knäckning av i axiell riktning i och med att plåtknippan är mycket styv i sidled.



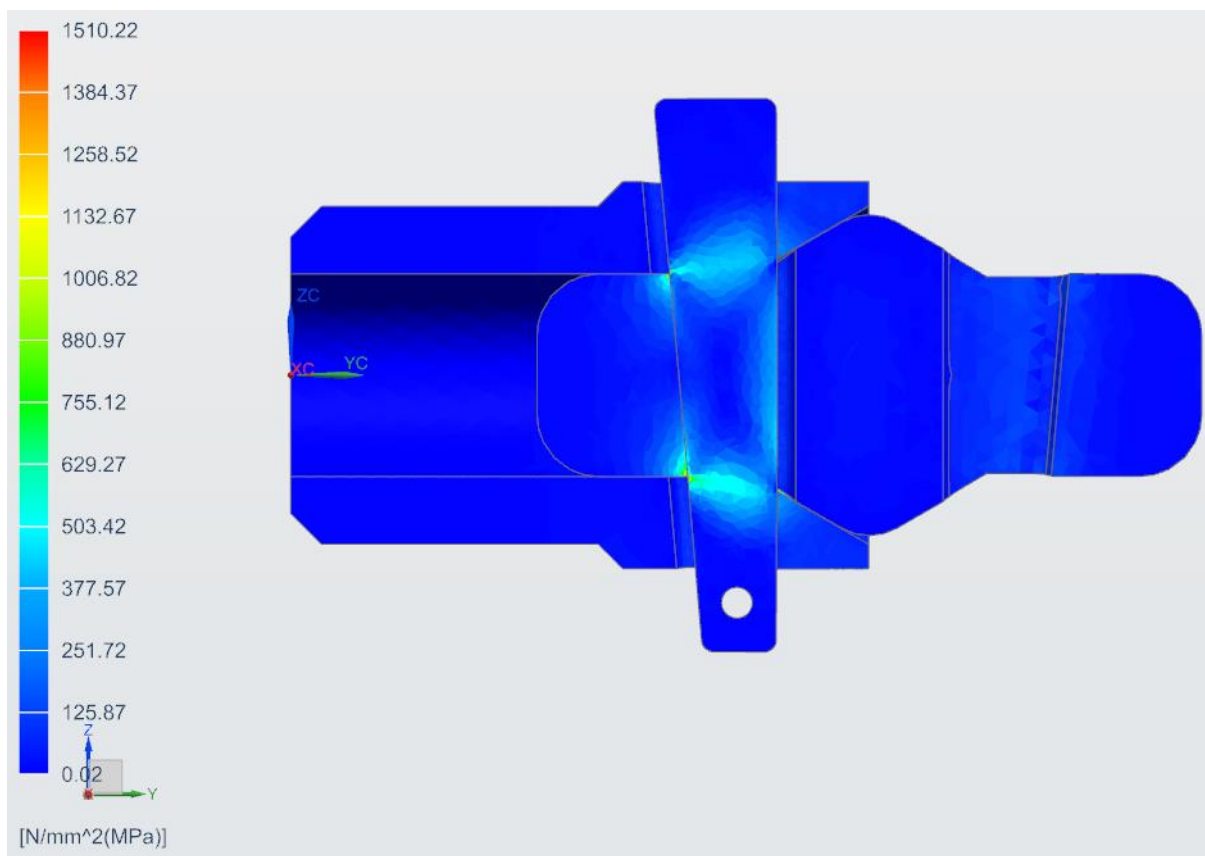
## 7.2 FE-analys av skarvförband

Resultatet av den statiska linjära analysen som gjordes på skarvförbandet presenteras i detta kapitel. Se bilaga 3 för handräkningar av skarvförbandet. Förbandet belastades med en total dragkraft på 55 kN som fåtts ur tidigare analys med 1D modellen vars totala belastning var 30 kN. Den största deformationen som uppstår i förbandet är  $\sim 0,16$  mm, se figur 23.



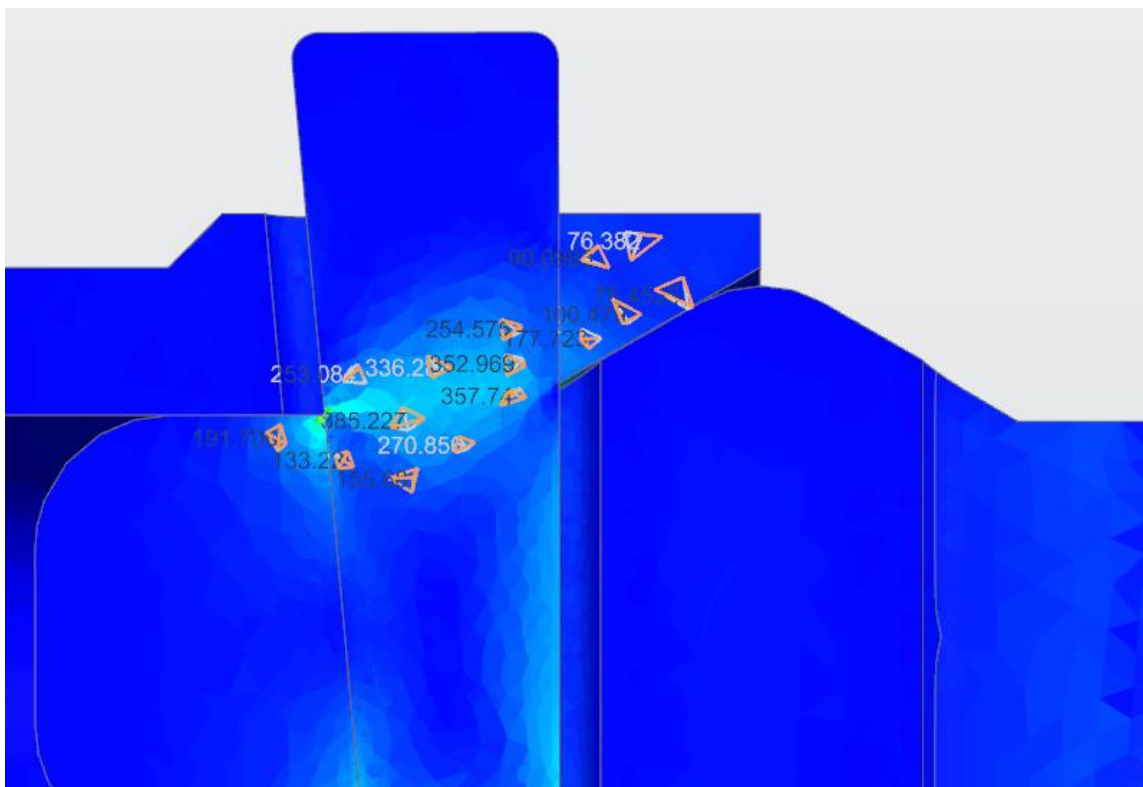
**Figur 23: Deformation av skarvförband i finita element analys**

Deformationen som uppstår i förbandet bör beräknas in vid val av förbandets komponenters geometriska toleranser. Med antagande av att analysen är linjär så är den totala deformationen vid arbetslast  $\sim 0,05$  mm. De högsta spänningarna som förekommer i förbandet är relativt stora. De nodala element spänningarna ligger runt 5000 MPa och elementspänningarna ligger runt 2500 MPa. Dessa höga spänningar uppstår i enskilda element där var spänningsövergång sker mellan kil och tapp samt kil och hylsa i förbandet. Dessa spänningar fördelar sig från de enstaka elementen snabbt vidare till mera acceptabla spänningar i omgivande element. Se figur 24 för en spänningsfördelning vid genomskärning av skarvförband.



**Figur 24: Skarvförbandets spänningsfördelning i genomskärning**

Vid hylsan så fördelas spänningarna snabbt till en tillåten nivå, majoriteten av elementen nära kilen ligger i hylsan under 200 MPa, de flesta element befinner sig alltså under spänningsnivå för sträckgränsen av AW 6082 T6. I tappen så ligger en stor del av elementen under spänningsnivån 400 MPa, vid antagande att förbandet brister av skjuvning så är det materialets skjuvbrottgräns som är avgörande. Kil och tapp bör därmed vara gjorda av ett material vars skjuvbrottgräns ligger omkring 400 MPa. Se figur 25 för spänningen i godtyckliga element i förbandet.



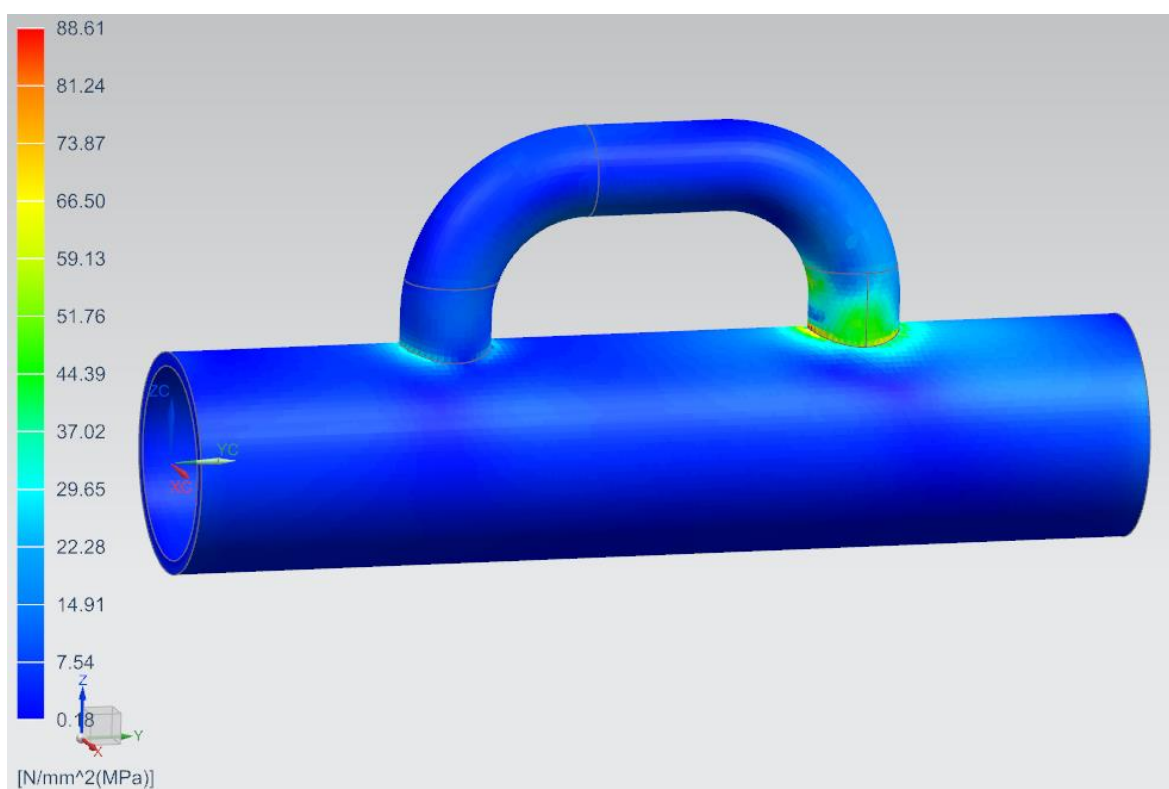
**Figur 25: Spänningar i godtyckliga element i skarvförbandet**

Man kunde göra en icke-linjär analys på förbandet för att kontrollera hur stor den eventuella plastiska deformationen är. Den tros vara förhållande vis liten i och med att spänningarna snabbt fördelar sig ut i komponenterna från de områden var spänningskoncentrationerna förekommer. Orsaken till att den icke-linjära analysen valdes bort var brist på datorkapacitet i förhållande till tid. I en icke-linjär analys så gör mjukvaran iterationer för att beakta den plastiska deformationen som uppstår efter att sträckgränsen hos materialet överskrids, detta innebär en avsevärt mera kapacitetskrävande analys. En annan orsak att den icke-linjära statiska analysen ej gjordes var för att mjukvaran ej stöder kontaktvillkoret ”*surface to surface contact*” i modulen för icke-linjära analyser, endast ”*surface to surface gluing*”. Användning av kontaktvillkoret ”*surface to surface contact*” är att föredra vid analys av detta förband på grund av att det stämmer bäst överens med verkligheten.

### 7.3 FE-analys av stoppare

Resultatet av finita element analysen som gjordes på stopparen tas upp i detta kapitel. Se bilaga 4 för ”handräkningar”.

Stopparen belastades med en total jämnt utbredd kraft på 6 kN på de ytor som ses i figur 21 i kapitel 5.4.2. Den högsta elementala spänningsnivån som uppkommer i analysen är ~ 90 MPa. Denna spänning förekommer i några enstaka element vid den kant på stopparen som kraften ligger på, se figur 26.



**Figur 26: Elementala spänningar i FE-analys av stopparen**

Svetsfogen beaktas ej i analysen, i verkligheten så strävar man efter att göra en kälsvets som har mera ytareal än själva röret, detta bidrar alltså med sänkt spänning. I bucklingsanalysen bidrog lastfaktorn mot lokal buckling med en säkerhetsfaktor på 10 gånger lasten.

## 8 Slutsats

Detta kapitel omfattar slutsatser som görs av analyser samt tips för metoder vid tillverkning och verifiering av lyftbalken.

### 8.1 Slutsats av analys

Eftersom inga källor har hittats för förverkligande av en ramverkskonstruktion enligt denna analytiska metod så kan med säkerhet inga slutsatser dras om huruvida balken kommer att tåla de erforderliga påfrestningarna eller inte.

Enligt de analyser och uträkningar som gjort så antas lyftbalken tåla 3000 kg ifall den konstrueras enligt basmåttens angivna i kapitel 5 och bilaga 1 och belastas enligt det planerade belastningsfallet. Behövliga remmar och lyftkedjor väljs enligt behov för specifik last. Balkens sektioner kommer med valda rörprofiler och skarvförband att väga ~ 25 kg styck.

### 8.2 Metoder för tillverkning

På grund av att en ramverkskonstruktion långt förlitar sig på ”den svagaste länken” så bör mycket omsorg läggas på kvalitetskontroll vid tillverkningen av lyftbalken. Eftersom konstruktionen har många svetsfogar och materialhållfastheten för aluminium sjunker vid svetsade områden så bör svetsfogarna granskas noga innan balken typverifieras.

Hylsa och tapp till skarvförband kan lämpligen tillverkas i en CNC-svarv med roterande verktyg. Komponenterna kan då bearbetas i en enda uppspanning vilket ofta är att föredra i produktivitetssyfte vid maskinbearbetning. Kilar kan tillverkas genom utskärning med exempelvis en vatten eller laserskärare, de utskärda kilar kan sedan rundas av med lämplig metod till samma radie som fräsverktyget vilket använts vid tillverkning av kilspår i hylsa och tapp.

Skarvförbandet kunde testas genom provdragning, detta vore en billig åtgärd för att säkerställa att förbandet håller innan hela konstruktionen tillverkas. Ifall brister märks vid provdragningen så kunde förbandets dimensioner ändras och ett nytt dragprov genomföras.

Vid tillverkning av ramverket så vore det med avseende på måttoleranser bra att göra en fixtur för fixering av spannens ändor. Detta på grund av att aluminiumets värmeutvidgning

är stor och toleranserna på det sammansatta tvärsnittet vid skarvförbanden är ganska så snäva.

Inga beräkningar eller analyser gjordes på vinklade belastningsfall, det vore bra att göra analyser på belastningsfall där balken är vinklad på grund av att det vid lyft av takplåt ibland är fördelaktigt att ha en färdigt inställd vinkel på lyftbalken innan plåten sänks ner på taket. I regel så är plåtar vars längd överskrider 12 m ämnade för flacka tak och då behövs oftast ingen förinställd vinkel på lyftbalken.

### **8.3 Metoder för verifiering**

För att lyftbalken skall kunna typverifieras så kan ett statiskt lyftprov göras på den sammansatta 12,5 m långa balken. Ifall balken skall användas i andra längder såsom 5 m, 7,5 m och 10 m så bör statiska belastningsprov också göras vid dessa längder. Det vore också möjligt att tillverka en testrigg för individuell verifiering av enskilda balksektioner. Riggens belastningsfall skall isåfall representera det belastningsfall som uppkommer vid användning, detta kunde exempelvis vara ett belastningsfall i likhet med figur 10.

I bruksanvisningen bör förekomma maximal vinkel på lyftkedjorna samt maximal arbetslast för olika längder av balken, det bör även finnas tillräckligt med information angående upphängningspunkter samt remmar och andra lyftredskap som skall användas i samband med balken. Vid användning av balken på en gemensam arbetsplats så vore det bra att se till att bruksanvisningen alltid följer med balken, en låda för bruksanvisningen kunde monteras på en balksektion som alltid skickas med balkpaketet. Klistermärken som anger lyftförbud vid stoppare och stänger kunde klistras på.

## **9 Diskussion**

Arbetet har varit intressant och krävande. Det har varit krävande är att lära sig finita element modulen i mjukvaran. Det finns många olika metoder att välja på när man gör analyser med finita element och det gäller att hitta en lämplig metod som går snabbt att arbeta med när man gör sina analyser. Man vill också säkerställa att lösningarna av meshen är rätt gjorda, i början av arbetet provades ett antal lösningar som vid närmare eftertanke konstaterades vara icke-realistiska.

Det har också gått mycket tid åt att reda ut de bestämmelser som gäller för lyftredskap. I slutändan så är ändå kravet för typverifikation det som är viktigaste vid detta arbete, det vill säga provlyftet med en tre gånger så stor arbetslast.

## 10 Källförteckning

Arbetskyddsförvaltningen, 2010. *Työsuojeluoppaita ja -ohjeita 12. Nostoapuvälineet. Turvallisuus..* [Online]  
<https://docplayer.fi/312324-Työsuojeluoppaita-ja-ohjeita-12-nostoapuvälineet-turvallisuus-työsuojeluhallinto.html>

[Använd 2019].

Dahlblom, O. & Olsson, K.-G., 2015. *Struktur Mekanik, Modellering och analys av ramar och fackverk*. 2 red. Lund: Studentlitteratur AB.

EU, 2006. *Europaparlamentets och rådets direktiv 2006/42/EG*. [Online]  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/sv/TXT/?uri=CELEX:32006L0042>

Lukkari, J., 2001. *Alumiinit ja niiden hitsaus*. Tampere: Metalliteollisuuden Keskusliitto.

Privat, 2019. *Haveri av aluminiumkonstruktion*. Österbotten: u.n.

Purso, 2019. *Purso*. [Online]  
Available at: <https://purso.fi/en/home/>  
[Använd 2019].

SFS, Suomen Standardisierungsliitto, 2009. *SFS-EN 13155 + A2*, u.o.: Suomen Standardisierungsliitto.

Siemens, 2019. <https://docs.plm.automation.siemens.com>. [Online]  
[https://docs.plm.automation.siemens.com/data\\_services/resources/nxnastran/10/help/en\\_US/tDocExt/pdf/element.pdf](https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/tDocExt/pdf/element.pdf)

Statsrådet, F., 2019. *Arbetskyddslagen 738/2002*. [Online]  
<https://www.finlex.fi/sv/laki/ajantasa/2002/20020738>  
[Använd 2019].

Statsrådet, F., 2019. *Förordning om maskiners säkerhet 400/2008*. [Online]  
<https://www.finlex.fi/sv/laki/ajantasa/2008/20080400>  
[Använd 2019].

Statsrådet, F., 2019. *Förordning om säker användning och besiktning av arbetsutrustning 12.6.2008/403*. [Online]  
<https://www.finlex.fi/sv/laki/ajantasa/2008/20080403>  
[Använd 2019].

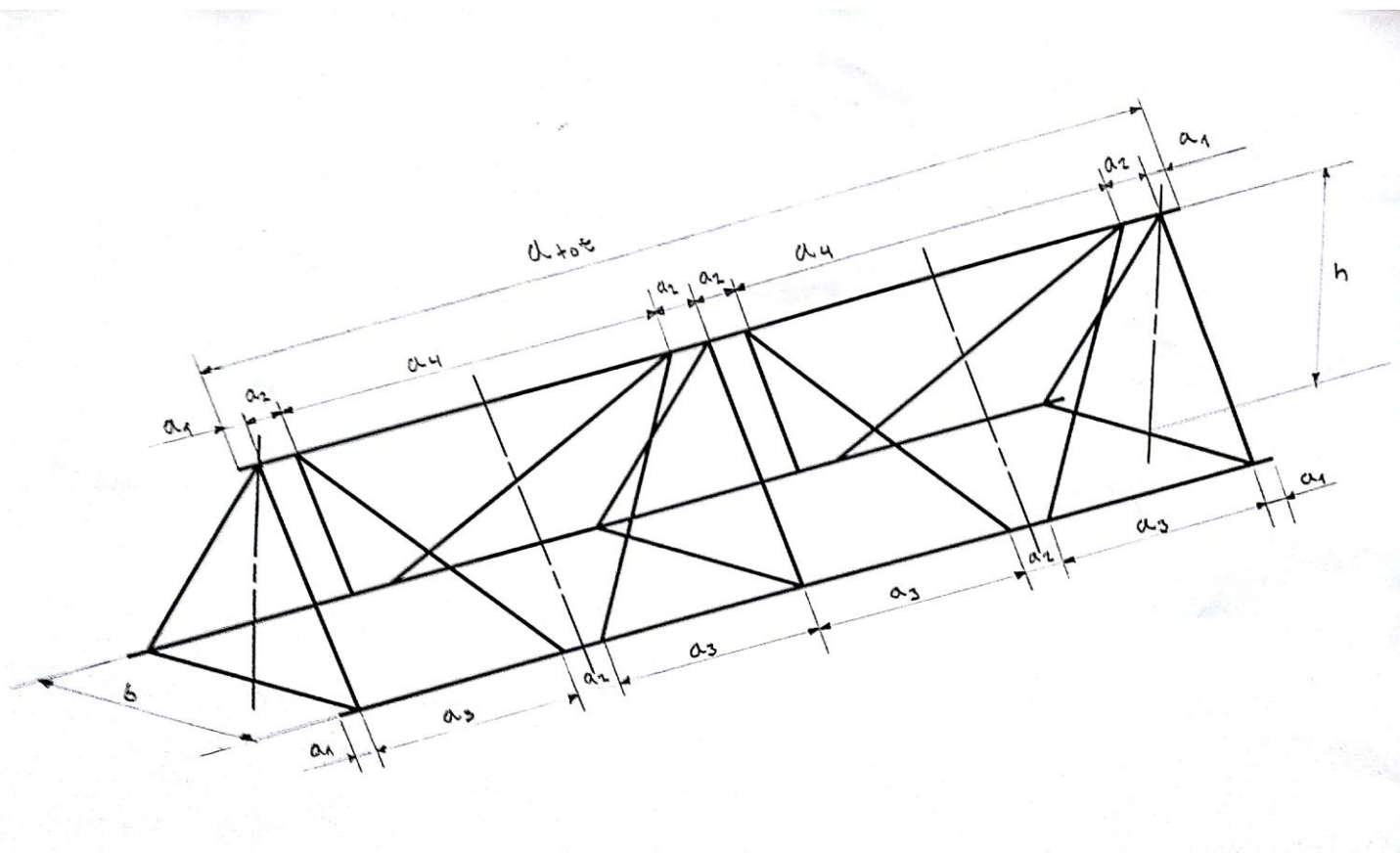
Svenskt Stål AB, 2010. *Plåthandboken: att konstruera och tillverka i höghållfast stål*. u.o.:SSAB Center of Excellence.

Unionen, E., 2019. *EU, CE-märkning*. [Online]  
[https://europa.eu/youreurope/business/product/ce-mark/index\\_sv.htm](https://europa.eu/youreurope/business/product/ce-mark/index_sv.htm)

Valtanen, E., 2016. *Tekniikan Taulukkokirja*. Mikkeli: Genesis-Kirjat OY.

# Bilageförteckning

## Bilaga 1 - Trådmodellen



Parameter	Definition	Värde	Enhet
atot	konstant	2500	mm
b	variabel	440	mm
h	variabel	500	mm
a1	variabel	50	mm
a2	variabel	100	mm
a3	$(atot - (2*a2 + 2*a1))/4$	-	mm
a4	$(atot - (4*a2 + 2*a1))/2$	-	mm



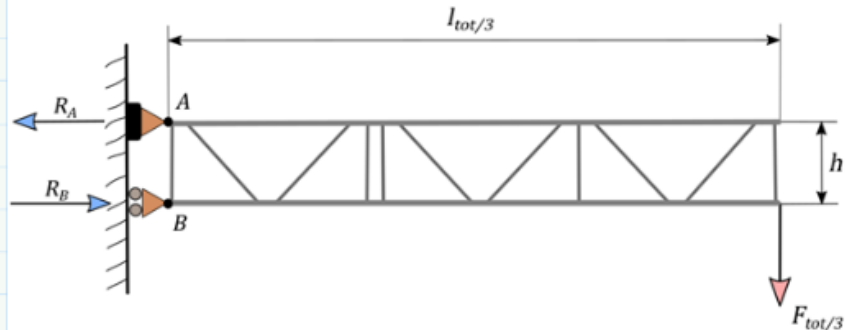
## Bilaga 2 – Grov uppskattning av rörprofiler

### Grov uppskattning av spannets rörprofiler

$$F := 10000 \text{ N}$$

$$h := 500 \text{ mm}$$

$$l := \frac{12.5 \text{ m}}{3} = 4.167 \text{ m}$$



Reaktionskraft enligt momentjämvikt kring punkt A:

$$R_A := F \cdot \frac{l}{h} = 83.333 \text{ kN} \quad \text{Beräknad reaktionskraft}$$

$\sigma_{HAZ0.2} := 110 \text{ MPa}$  Aluminiumets sträckgräns vid T4

$$A_{\text{erforderlig}} := \frac{R_A}{\sigma_{HAZ0.2}} = 7.576 \text{ cm}^2 \quad \text{Erforderlig tvärsnittsarea för spannets rörprofil}$$

Kontroll av tryckspänning i nedre balktvärsnitt med valda rörprofiler för spann:

$t := 4 \text{ mm}$  Den valda rörprofilens tjocklek

$d_o := 63 \text{ mm}$  Den valda rörprofilens yttre diameter

$$d_i := d_o - 2 \cdot t$$

$R_B := R_A$   $R_B$  med avseende på symmetri

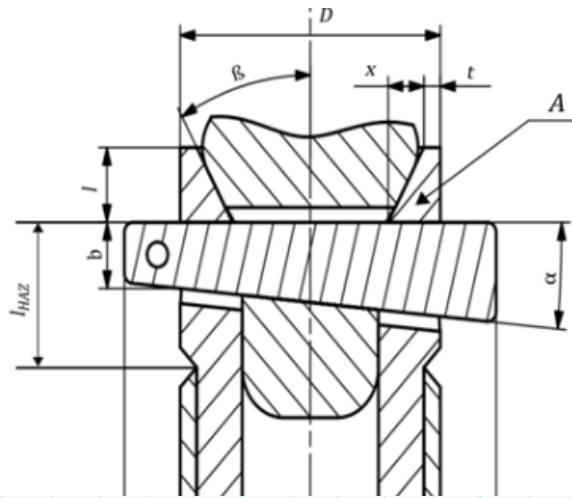
$$A_{63 \times 4} := \frac{\pi \cdot (d_o^2 - d_i^2)}{4} = 7.414 \text{ cm}^2 \quad \text{Balkens tvärsnittsarea}$$

$A_{\text{nedre}} := 2 \cdot A_{63 \times 4} = 14.828 \text{ cm}^2$  Total balktvärsnittsarea vid punkt B

$$\sigma_{\text{nedre}} := \frac{R_B}{A_{\text{nedre}}} = 56.199 \text{ MPa} \quad \text{Tryckspänning OK!}$$

## Bilaga 3 – Dimensionering av skarvförband

### Dimensionering av skarvförband



### Dimensionering mot skjuvning vid hylsans kilspår

$$t := 4 \text{ mm}$$

Måttet  $t$  i figur

$$\sigma_{240} := 240 \text{ MPa}$$

Sträckgräns för Aluminium

Erforderlig area för skjuvning:

$$A_{slit} := \sigma_{240} = \frac{F_{max}}{A_{slit}} \xrightarrow{\text{solve, } A_{slit}, \text{ explicit}} \frac{F_{max}}{\sigma_{240}} = 2.292 \text{ cm}^2$$

$$\beta := 30 \text{ deg}$$

Guess Values	$l := 10 \text{ mm}$
Constraints	$A_{slit} = 4 \cdot (l \cdot t + \tan(\beta) \cdot l^2)$
Solver	$l := \text{find}(l) = 7.083 \text{ mm}$

Avrundas till:  $l := 15 \text{ mm}$  med avseende på lämpligt avstånd från HAZ

## Kontroll av kontaktryck mellan hylsa och kil

Definition av variabler:

$$x := l \cdot \cos(\beta) = 12.99 \text{ mm} \quad x \text{ enligt figur}$$

$$t := 4 \text{ mm} \quad t \text{ enligt figur}$$

$$D := 63 \text{ mm} \quad D \text{ enligt figur}$$

Totala kontaktytan beräknas mellan kil och hylsa:

$$A_{kil.hylsa} := 2 \cdot ((x + t) \cdot t_{kil}) = 3.398 \text{ cm}^2$$

Kontaktspänningar mellan kil och hylsa beräknas:

$$\sigma_{kil.hylsa} := \frac{F_{max}}{A_{kil.hylsa}} = 161.856 \text{ MPa} \quad \text{OK!}$$

Total ytarea mellan kil och tapp beräknas:

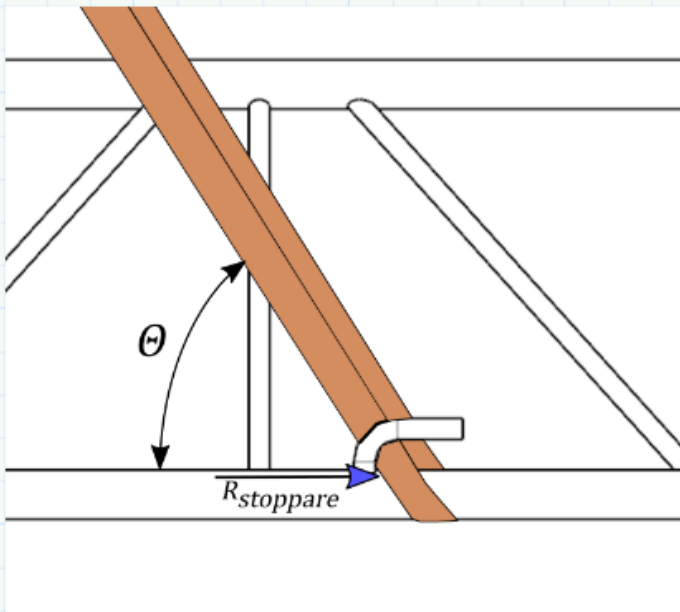
$$A_{kil.tapp} := t_{kil} \cdot (D - 2 \cdot (x + t)) = 2.902 \text{ cm}^2$$

Kontaktspänningar mellan kil och tapp beräknas:

$$\sigma_{kil.tapp} := \frac{F_{max}}{A_{kil.tapp}} = 189.529 \text{ MPa} \quad \text{OK!}$$

## Bilaga 4 – Beräkning av sidokraft på stoppare

### Beräkning av stoppare



Reaktionskraft per stoppare

$F_{tot} := 30 \text{ kN}$  Totala lasten, fördelas jämnt vid alla fyra upphängningspunkter

$\theta := 45 \text{ deg}$  Minsta vinkeln mellan remm och spann

$\mu_f := 0.2$  Friktionskoefficient mellan remm och spann

$$R_{stoppare} := \frac{F_{tot}}{4} \cdot \mu_f - \frac{F_{tot}}{4} \cdot \tan(\theta) = -6 \text{ kN}$$

Svetsens area antas samma som rörprofilens, spänningarna beräknas:

$D := 26 \text{ mm}$  Stängernas rörprofilers diameter

$t := 3 \text{ mm}$  Stängernas rörprofilers tjocklek

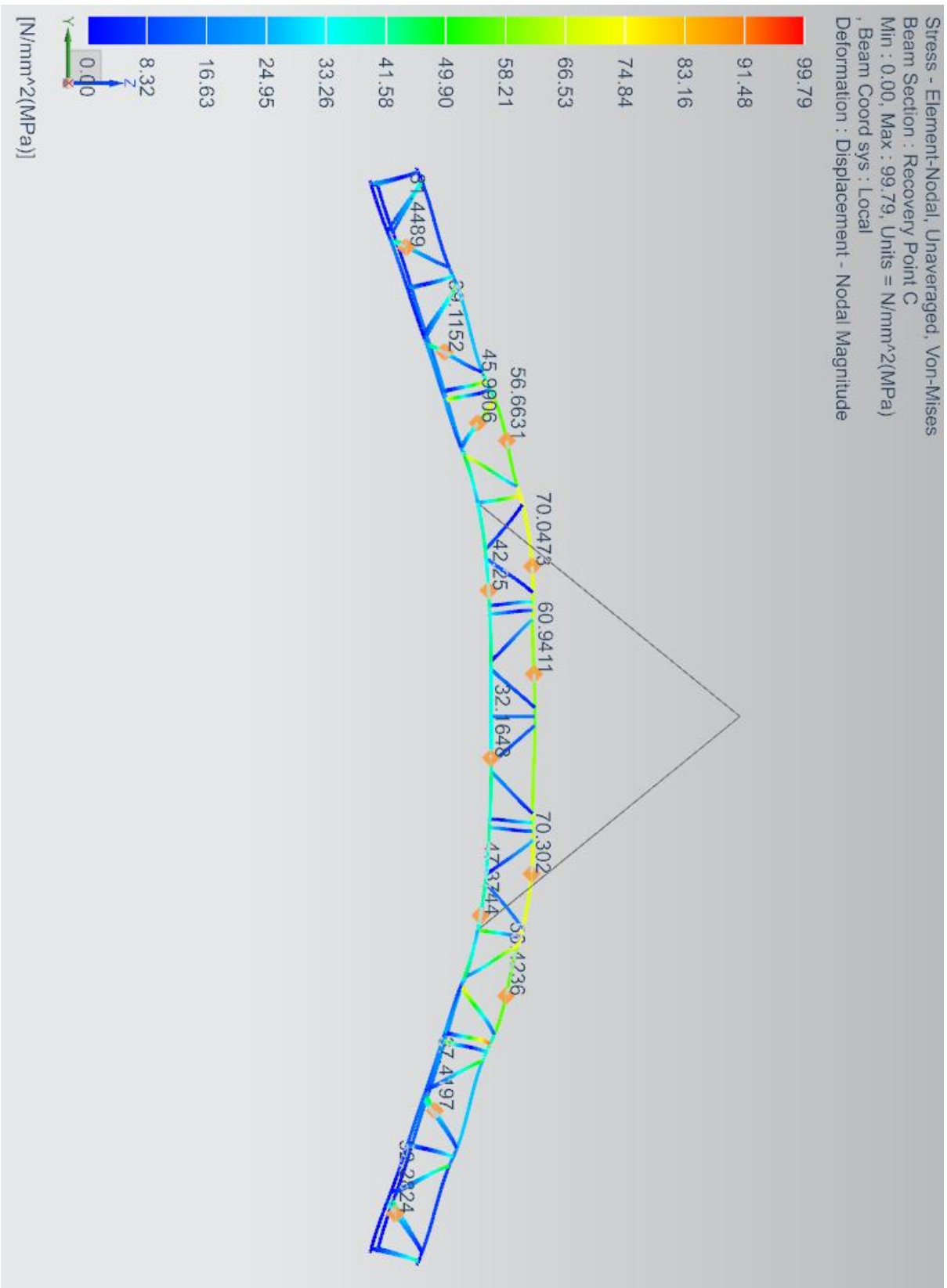
$$d := D - 2 \cdot t$$

$$A_{26 \times 3} := \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = 2.168 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_{svets} := \frac{R_{stoppare}}{A_{26 \times 3}} = -27.679 \text{ MPa} \quad \text{OK!}$$

## Bilaga 5 – Resultat av FEA på den globala konstruktionen

Screenshot: spänningar i godtyckliga element i den globala konstruktionen med 30 000 N



# Screenshot: stångkrafter i godtyckliga element i den globala konstruktionen med 30 000 N

Beam Resultants - Element-Nodal, Unaveraged, Axial Force NXX

Min : -35209.4, Max : 54795, Units = N

Coord sys : Native

Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

