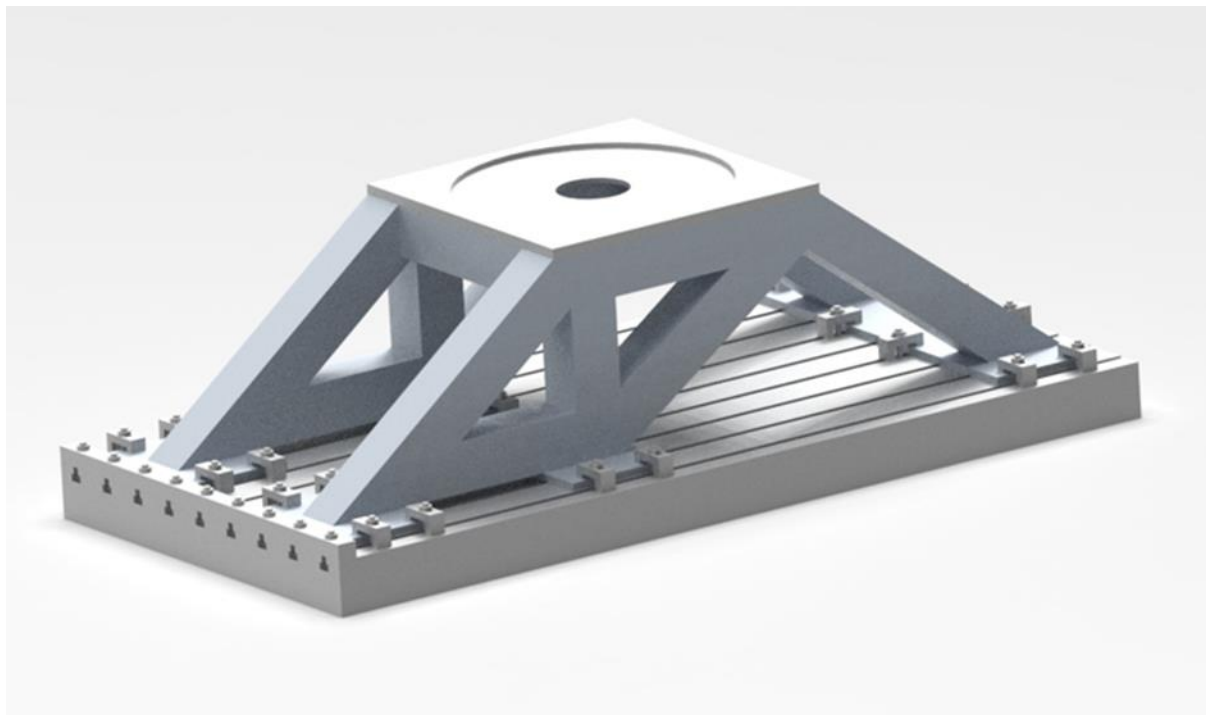




CHALMERS



Konstruktion av skjutrigg till 155mm/L52

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

Gustav Klasson
Linus Ljungberg

INSTITUTIONEN FÖR INDUSTRI – OCH MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se

**INSTITUTIONEN INDUSTRI – OCH
MATERIALVETENSKAP
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA**

Göteborg, Sverige 2025
www.chalmers.se



CHALMERS

Konstruktion av skjutrigg till 155mm/L52

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

GUSTAV KLASSON
LINUS LJUNGBERG

Institutionen för Industri – och Materialvetenskap
Avdelningen för Material – och beräkningsmekanik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2025

Konstruktion av skjutrigg till 155mm/L52
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik
GUSTAV KLASSON
LINUS LJUNGBERG

© GUSTAV KLASSON & LINUS LJUNGBERG, 2025

Institutionen för Industri – och Materialvetenskap
Avdelningen för Material – och beräkningsmekanik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
[Slutlig konstruerad skjutrigg monterad på spårplatta genom klämjärn, se sidorna 40-41 för mer information.]

Tryckeri/Institutionen för Industri – och Materialvetenskap
Göteborg, Sverige 2025

Förord

Detta examensarbete är genomfört vid institutionen Industri- och materialvetenskap på Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Arbetet är på 15 HP av totalt 180 HP inom högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik, på halvtid under fem månaders tid. Uppdraget är genomfört i samarbete med BAE Systems Bofors som arbetar med innovation och produktion till försvarsindustrin.

Vi vill i första hand tacka vår handledare och examinator Magnus Ekh, professor på institutionen för industri- och materialvetenskap för hans stora engagemang, handledning och lärorika diskussioner under examenarbetets gång.

Vi vill även tacka Kent Evermark för handledning och stort intresse för vårt projekt på BAE Systems Bofors. Slutligen skulle vi även vilja tacka alla vi träffat på BAE Systems Bofors, för det trevliga bemötandet samt hjälpsamheten vi fått ta del av under examenarbetets period.

Gustav Klasson och Linus Ljungberg

Abstract

This project focuses on the design of a firing rig intended for the test firing of highly loaded artillery components such as barrels, breech blocks, muzzle brakes, and recoil dampers. Initially an information-gathering phase was conducted by collecting requirements and needs from engineers at the company with experience in previous design projects. Their input from them formed the foundation of the work.

The company aims to achieve a more efficient testing process by using a stationary firing rig that enables test firing of the recoiling components in complete assemblies. With such a rig, it becomes easy to mount heavily loaded components onto the rig, conduct test firings, and remove them for inspection. This setup makes it possible to stock pre-tested components that can be used by the production department during the manufacturing of artillery systems.

The goal of the project was to use multiple simulations as decision support to arrive at a final concept that meets all requirements of the rig. Based on the project background, the objective was to design a stationary firing rig with a focus on structural strength to withstand the forces generated by the firing impulse. The rig should provide a good working height and accessibility, creating a practical and safe working environment for easy assembly and disassembly during test firing. The development of additional equipment for the rig, such as cradle extensions, split yokes, and foldable yoke supports, is not covered in this report.

The result of the project consists of a solution for a firing rig constructed from rectangular beam profiles with dimensions of 250x250 mm and a wall thickness of 15 mm. The rig is equipped with square and rectangular plates to allow stable and secure attachment between the firing rig and the track plate, specifically adapted to the dimensions of the track plate. A plate is welded on top of the firing rig with an interface adapted to the trunnion fork and bearing. The rig is fixed to the track plate using clamping brackets and a mechanical stop. A structural strength analysis using Ansys confirmed that the final design meets the requirements to withstand the stresses encountered during test firing, ensuring long service life, safety, and good ergonomics during firing.

Sammanfattning

Detta projekt innefattar hur en skjutrigg kan konstrueras som är avsedd för anskjutning av högt belastade artillerikomponenter som exempelvis eldrör, bakstycke, mynningsbroms och rekyldämpare. Inledningsvis genomfördes en informationssökning, behov och krav insamlades från ingenjörer på företaget med stor erfarenhet av tidigare konstruktionsarbeten och denna informationsinhämtning ligger till grund för arbetet.

Företaget vill uppnå en mer effektiv testprocess, genom att använda sig av en stationär skjutrigg som möjliggör anskjutning av de rekylerande delarna i kompletta paket. Med en skjutrigg blir det möjligt att enkelt montera högt belastade detaljer på skjutriggen, genomföra anskjutning och slutligen lyfta ur dessa för inspektion. Det gör det möjligt att lagerhålla färdigt anskjutna detaljer som sedan kan nyttjas vid tillverkning av artillerisystem.

Målet med projektet var att med hjälp av simuleringar som beslutsunderlag komma fram till ett slutligt koncept som uppfyller kraven med skjutriggen. Stort fokus blev att konstruera en stationär skjutrigg med strukturell hållfasthet för att klara krafterna som bildas från impulsen vid skjutning. Skjutriggen ska erbjuda en god arbetshöjd och åtkomlighet, vilket skapar en praktisk och säker arbetsmiljö för enkel montering och demontering vid provskjutning. Utvecklingen av diverse kringutrustningar tillhörande skjutriggen som: förlängning av vagga, delbart ok, fällbart stöd av ok, har inte utvecklats i denna rapport.

Resultatet av arbetet består av en lösning på en skjutrigg byggd med rektangulära balkprofiler med måtten 250x250 mm och en godstjocklek på 15 mm. Riggen är utrustad med kvadratiska samt rektangulära plattor för att möjliggöra stabil och säker infästning från skjutrigg till spårplatta, särskilt anpassat till spårplattans dimensioner. Ovanpå skjutriggen är en platta svetsad med anpassat gränssnitt till klyka och lager. Skjutriggen fixeras i spårplattan med hjälp av klämjärn samt ett mekaniskt stopp. Genom en strukturell hållfasthetsanalys i Ansys med det slutliga konceptet bekräftades det att konstruktionen klarar kraven för de påfrestningar den utsätts för vid provskjutning för att säkerställa lång livslängd, säkerhet och god ergonomi vid användning.

INNEHÅLL *TABLE OF CONTENTS*

Kapitel Chapter	Sida nr Page No.
1 Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Syfte	9
1.3 Avgränsningar	9
1.4 Precisering av frågeställning	10
2 Teori.....	12
2.1 Krafter som uppstår vid skjutning.....	13
2.2 Eldrör	13
2.3 Ok.....	14
2.4 Mynningsdämpare	14
2.5 Rekyldämpare.....	14
2.6 Vagga	14
2.7 Bakstycke.....	15
2.8 Klyka.....	15
2.9 Ammunition.....	15
3 Metod.....	16
3.1 Litteraturgenomgång.....	16
3.2 Behovsanalys/Kundundersökning.....	16
3.3 Kravspecifikation.....	17
3.4 Idégenerering.....	19
3.5 Konzeptutvärdering	19
3.6 Detaljkonstruktion	20
3.7 Verifiering genom numeriska simuleringar/beräkningar	20
3.8 Materialval	20
4 Resultat	21
4.1 Behovsanalys/Kundundersökning.....	21
4.2 Kravspecifikation.....	21
4.3 Lastfall och idégenerering.....	22
4.4 Konzeptutvärdering	24
4.4.1 Vinkel på balkprofilerna.....	24
4.4.2 Jämförelse vinkel och vinkel utåt.....	25
4.4.3 Balksystem	26
4.4.4 Dimensionering	28
4.4.5 Detaljkonstruktion skjuttrigg	29

4.4.6	60/40 Lastfall	30
4.4.7	10 grader elevation	31
4.4.8	Resultat från olika skjutfall	32
4.4.9	Livslängdsanalys och bucklingsfall	33
4.4.10	2D – Analys	35
4.4.11	Montering i spårplatta	39
5	Diskussion.....	41
6	Slutsatser och fortsatt arbete	43
	Referenslista.....	45
	Bilaga A – Behovsanalys.....	46
	Bilaga B – Test vinklar	48
	Bilaga C – Test vinklar utåt	53
	Bilaga D – Test olika balksystem	54
	Bilaga E – Test olika balkbredder och godstjocklek.....	62
	Bilaga F – Test slutlig konstruktion spänningar/deformationer, asymmetriskt lastfall, elevation, utmattning och buckling	66
	Bilaga G – Förenklad 2D-modell och python script för 2D – analys	72
	Bilaga H – Ritning	74

1 Inledning

BAE Systems är ett multinationellt företag där cirka 107 000 personer arbetar i mer än 40 olika länder med fokus på innovation och produktion till försvarsindustrin. Detta examensarbete görs i samarbete med BAE Systems Bofors gällande konstruktion och dimensionering av en skjutrigg.

1.1 Bakgrund

Vid provskjutning av hårt belastade detaljer genomför BAE Systems Bofors idag en kontroll och validering genom att montera dessa detaljer i kompletta artilleripjäser, exempelvis genom ARCHER eller FH77 (Haubits). De hårt belastade detaljerna som ska anskjutas är eldrör, bakstycke med mekanism, mynningsbroms och rekylbromsar. Detaljerna behöver monteras och provskjutas för att sedan plockas ut och inspekteras. Efter inspektionen kan delarna verifieras beroende på resultatet från skjutningarna. BAE Systems Bofors vill därför undersöka möjligheten av konstruktion och dimensionering av en stationär skjutrigg. Detta för att möjliggöra anskjutning av de högt belastade delarna från en stationär skjutrigg istället.

1.2 Syfte

Syftet med detta exjobb är konstruktion av en skjutrigg för att enkelt placera hårt belastade detaljer på skjutriggen, genomföra anskjutning och för att slutligen lyfta ur dessa för inspektion. Detta skulle möjliggöra anskjutning av flera färdiga detaljer under en kortare period och det gör det möjligt att lagerhålla färdiga anskjutna detaljer som produktion kan nyttja vid tillverkning av system.

1.3 Avgränsningar

För att säkerställa att de ställda kraven uppfylls införs avgränsningar. De skapar den yttre ramen för projektet och gör att fokus läggs på rätt områden som slutligen leder till uppfyllda krav och önskemål som BAE Systems Bofors har med arbetet.

- Detaljritningarna kommer inte att vara fullständiga för tillverkning.
- En fysisk prototyp av det slutgiltiga konceptet kommer inte att tillverkas.
- Arbetet kommer inte att inkludera utveckling av skjutriggens kringutrustning som innefattar fällbart stativ för ok, hydraulaggregat, förlängning av vagga, delbart ok samt klämförband.

1.4 Precisering av frågeställning

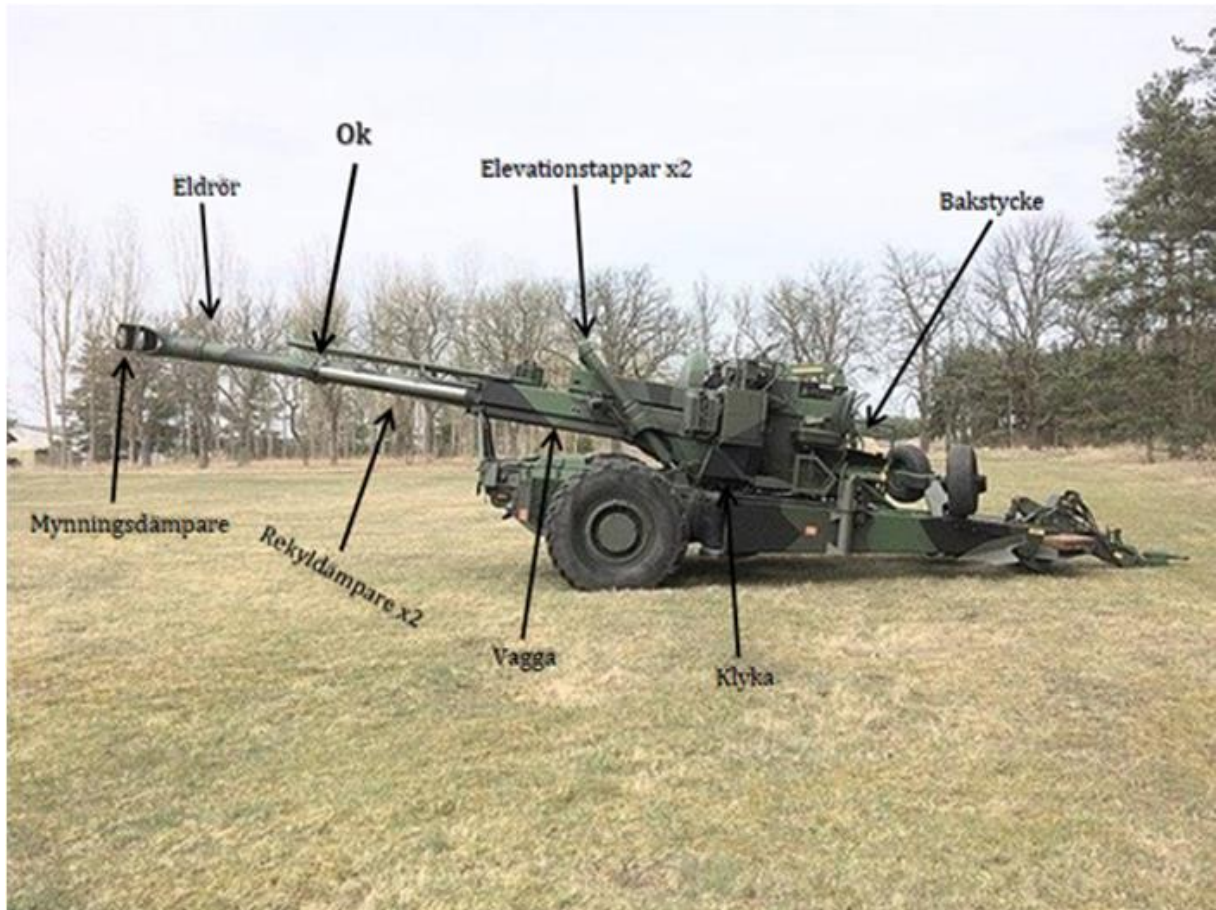
- Hur kan en skjutrigg konstrueras för att passa de givna gränssnitten?
- Hur kan skjutriggen optimeras för att möta hållfasthetskraven?
- Hur kan skjutriggen dimensioneras för att möta tyngdkraven?

ORDLISTA

Symbol	Storhet	Enhet
F	Kraft	[N]
I	Impuls	[Ns]
E	Elasticitetsmodul	[Pa]
m	Massa	[kg]
a	Acceleration	[m/s^2]
σ	Spänning	[Pa]
δ	Deformation	[mm]
l	Längd	[m]
t	Tid	[s]
M	Moment	[Nm]
g	Tyngdacceleration	[m/s^2]
A	Area	[m^2]
σ_y	Sträckgräns	[MPa]
D	Knutförsjutning	[mm]
D	Stångdeformation	[mm]
P	Lastvektor	[N]
N	Stångkrafter	[N]

2 Teori

Teorin som presenteras nedan är avsedd att ge grundläggande förståelse för ingående delar som kommer att monteras på skjutriggen och vilka krafter som uppstår vid artilleriskjutning. För att illustrera vilka delar som kommer att användas till skjutriggen visas en bild på Haubits 77B nedan enligt figur 1 som är omarbetad för att synliggöra respektive komponenter.



Figur 1 – Haubits 77B och dess delar, baserad på https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Haubits_77B.jpg, ursprungligen skapad av Stridsvagn122, licenserad under CC BY-SA 4.0. Denna version är också licenserad under CC BY-SA 4.0.

2.1 Krafter som uppstår vid skjutning

Artilleripjäsens grundfunktion är att skjuta indirekt eld över långa avstånd och för att kunna genomföra det skjuts höghastighetsprojektiler ut ur mynningen på eldröret. Genom att använda sig av krafterna från drivladdningen under förbränningen accelereras projektilen ut ur eldröret. Vid antändning av drivladdningen uppkommer en hög impuls under en kort period som accelererar de rekylrande delarna bakåt. Impulsen från kraften F för tiden t kan beskrivas av ekvation (1).

$$I = \int_0^t F(t)dt \quad (1)$$

Denna impuls bidrar till en hög horisontell kraft som verkar bakåt i strukturen och som minimeras av dämparna för att sedan ledas vidare genom skjuttriggen. Massan hos vaggan och de rekylrande delarna har en gemensam tyngdpunkt som bidrar till en vertikal kraft nedåt och ett moment som leds vidare genom strukturen och reaktionskrafterna från lasterna behöver tas upp av skjuttriggen. ("Rörelsemängd", 2024)

2.2 Eldrör

Eldröret är cylindriskt utformat och av kalibern 155mm vilket är den invändiga diametern vid mynningen. Eldröret benämns som 155mm/ L52 och med det menas att den totala längden på eldröret kan beräknas genom ekvation (2):

$$l = 155 * 52 = 8060 \text{ mm} \quad (2)$$

Den geometriska utformningen inuti eldröret är spiralformade spår som gör att projektilen kan börja rotera inuti röret. Innan projektilen lämnar mynningen roterar den ett visst antal varv men så fort projektilen lämnar mynningen börjar den rotera tusentals varv per sekund. Detta ger upphov till gyroeffekter som gör att projektilen börjar rotera kring sin axel vilket stabiliserar banan som den färdas i och ökar precisionen vid nedslag. ("Eldrör", 2024)

2.3 Ok

Eldröret består av olika delkomponenter som monteras på eldröret och oket är en av dessa komponenter. Oket ett kraftigt metallstycke som omsluter eldröret och låses i bakkant genom en ansats på eldröret och i framkant genom en mutter. Okets funktion är att förbinda eldröret med rekylbromsarna genom att det finns yttre hål på oket som är lagrade vilket gör att kolvstängerna hos rekyldämparna kan monteras. (BAE Systems Bofors, personlig kommunikation, 11 mars, 2025)

2.4 Mynningsdämpare

En delkomponent som monteras längst ut på eldröret är mynningsdämparen. Vid skjutning genereras heta rökgaser från explosionen av ammunitionen inuti eldröret och dessa gaser tar sig sedan med en hög hastighet ut genom mynningen. Dämparen är konstruerad sådan att leda gaserna snett bakåt för att öka dämpningen hos systemet och minska impulsen som genereras. (BAE Systems Bofors, personlig kommunikation, 11 mars, 2025)

2.5 Rekyldämpare

Eldröret består även av rekyldämpare som är monterade på varsin sida av eldröret för att tillåta rörelse och dämpning av systemet. Vid rekylering trycks en kolvstång in i cylindern som gör att hydrualvätska strömmar förbi kolven och därmed bromsas kolven in som i sin tur bromsar eldrörets rörelse bakåt. I samband med denna rörelse trycks en skiljekolv bakåt som komprimerar kvävgasen som är skiljt från hydrualvätskan. Kvävgasen lagrar denna energi och trycker skiljekolven framåt när dämpningen bakåt är genomförd och rekyldämparen återgår till sitt ursprungliga läge. (BAE Systems Bofors, personlig kommunikation, 11 mars, 2025)

2.6 Vagga

Vaggan fungerar som en övre struktur som är stationär vid skjutning. Det finns elevationstappar som sitter monterade på vaggan för att kunna möjliggöra elevation. Dessutom finns det glidskenor, hädanefter benämnda gejdrazar som tillåter att eldröret kan translatera bakåt och framåt vid skjutning. Rekyldämparna monteras i den främre delen av vaggan genom att skruva fast dem i sidostycken. Bakre fästena för rekyldämparna kan

monteras fast i elevationstapparnas fäste på vaggan. (BAE Systems Bofors, personlig kommunikation, 11 mars, 2025)

2.7 Bakstycke

Bakstycket består av ett kraftigt metallstycke, laddlucka och gejdrar. Eldröret som i bakkant har utvändiga gängor monteras i bakstyckets inre gängor. Laddluckan som är koniskt utformad är lagrad i bakstycket och kan öppnas och stängas för insättning av ammunition. Gejdrarna är monterade på bakstycket för att kunna röra sig både fram och bakåt vid skjutning. (BAE Systems Bofors, personlig kommunikation, 11 mars, 2025)

2.8 Klyka

Klykan sitter lagrad i vaggan genom lagringstappar och förbinder vaggan till skjuttriggen för att överföra krafterna från den övre delen av strukturen, genom skjuttriggen för att slutligen leda ner det i marken. Klykan möjliggör att vaggan kan eleveras i höjddled vid skjutning med hjälp av lagringstapparna. (BAE Systems Bofors, personlig kommunikation, 11 mars, 2025)

2.9 Ammunition

Ammunitionen är uppbyggd av en projektil och en drivladdning. Projektillen är verkansdelen som innehåller högexplosiva ämnen vid nedslag och som omsluts av en kopparring. Drivladdningen, hädanefter benämnt karduser förpackas i kapslar och monteras bakom projektillen vid isättning av ammunitionen. Antalet karduser kan justeras och fler kapslar medför en större mängd krut som i sin tur ökar explosionen och utgångshastigheten ur eldröret. ("Kardus", 2024.; "Projektil", 2024)

Vid explosion tvingas kopparringen som har två huvudfunktioner, att täta trycket som uppstår bakåt genom att komprimera kopparringen i ett koniskt utformat utrymme. Den andra funktionen är att kopparringen börjar följa de spiralformade räffloras spår i eldröret. Det innebär att projektillen snurrar några varv kring sin axel innan den lämnar mynningen. Detta tidsförlopp sker väldigt snabbt vilket genererar en hög acceleration och rotation vid mynningens utlopp.

3 Metod

I detta kapitel kommer det att tas upp alla ingående delar i metoden som används för att systematiskt och iterativt komma fram till ett tillförlitligt resultat och en produkt som uppfyller alla krav och behov. Metodavsnittet är baserad på vissa delar av boken som Lindstedt och Burenus (2016) tar upp om hur man metodmässigt går tillväga för att skapa en slutlig produkt som uppfyller kundens önskemål och krav.

3.1 Litteraturgenomgång

Arbetet inleddes med en förstudie och litteraturgenomgång. Ett besök på plats i Karlskoga genomfördes för visning av befintliga skjutriggar och ett besök i produktion för visning av olika vapensystem och artillerisystem. I samband med detta mottogs litteratur i form av kompendier som innefattade teorin av äldre artilleripjäser och deras ammunition. Teorin behandlade konstruktion och uppbyggnad av en artilleripjäs för att skapa sig en grundförståelse för hur systemet är uppbyggt och vilka krafter som uppstår i pjäsen. Det genomfördes även intervjuer av olika personer med erfarenhet från tidigare projekt för att få en övergripande förståelse av problemformuleringen, komponenternas funktioner, arbetets begränsningar och utmaningar samt företagets specifika önskemål för projektet.

3.2 Behovsanalys/Kundundersökning

Syftet med behovsanalysen är att identifiera problem och utmaningar som finns med skjutriggen. Målet är att identifiera relevanta nyckelbehov för att i ett senare skede värdera olika behov. Metoden för insamling av behov är främst genom intervjuer med ingenjörer som har stor erfarenhet av tidigare konstruktionsarbeten samt tidigare presentationer. Metoden är lämplig i det avseendet att det finns mycket information att inhämta från dessa personer för att kunna skapa en strukturell hållbar konstruktion som är anpassad för förutsättningarna.

(Lindstedt & Burenus, 2016)

Nedan presenteras exempel på frågor som har ställts under projektets gång:

- Varför behövs skjutriggen?
- Vilken problematik finns med montering/demontering av riggen?
- Vilket gränssnitt finns att utgå ifrån för konstruktion av riggen?

Utifrån undersökningen sammanställs samtliga behov och sedan viktas enligt tabell 1:

Tabell 1 – Exempel på utformning av behovsanalysen för att systemet identifiera och värdera de olika behoven.

Nummer	Behov	Viktning
1	Konstruktionen möjliggör...	
2	Konstruktionen behöver...	
3	Konstruktionen är...	
4	Konstruktionen minimerar...	
5	Konstruktionen uppfyller...	
...

Viktning sker i form av att om raden är grön är det ett behov som är kritiskt till skillnad från om den är gul är det icke-kritiskt men av intresse att uppfylla.

3.3 Kravspecifikation

Syftet med kravspecifikationen är att definiera kraven för detta projekt samt säkerställa att de tekniska och funktionella aspekterna är beskrivna på ett tydligt sätt. Med en tydlig kravspecifikation som systematiskt dokumenterar kraven ges en bättre övergripande bild av den önskade utgången av produkten samt att projektet kan styras på ett effektivt sätt.

(Lindstedt & Burenus, 2016)

Metod för att ta fram krav

Kraven har identifierats genom flera olika aspekter:

- Litteraturstudie från tidigare arbeten.
- Intervjuer och diskussion med ingenjörer samt sakkunniga med koppling till liknande arbete och erfarenhet inom ämnet.
- Analys av befintliga system och komponenter.

De nämnda kraven har delats in i olika kategorier som innefattar krav och önskemål. Dessa är indelade i olika viktningar med hjälp av färgkod där grönt representerar ett krav och gult representerar ett önskemål. Önskemålen är viktade på en skala från ett till fem där fem är det mest önskvärda önskemålet.

Dokumentering av kravspecifikation

Dokumenteringen av kravspecifikation har utförts genom en strukturerad tabellform liknande följande mall, se tabell 2:

Tabell 2 – Grundmall för kravspecifikation

<i>Kriterier/ funktioner</i>	Målvärde	Krav/önskemål	Verifieringsmetod	Referens
Enkelt byta rekylerade delar	-		3D-Modelering	Kund
<i>Prestanda</i>				
Maxlaster	N		Analys	Kund
<i>Miljö</i>				
Temperaturer	°C		Data	Kund
Yttre påverkan	-			
<i>Livslängd</i>				
Antal cykler	Kvantitet		Analys	Kund
År				
<i>Storlek</i>				
Längd	m		3D-modelering	Kund
Bredd	m			
höjd	m			
<i>Massa</i>	-		Data	Kund
<i>Ergonomi</i>				
Användarvänligt	-		Uppskattning	Kund
<i>Material</i>				

Korrosionsbeständigt	-		Data	Kund
-----------------------------	---	--	-------------	-------------

Genom arbetets gång kan vissa krav justeras genom nya insikter och tekniska förutsättningar. Ändringar dokumenteras genom versionshantering för att kunna spåra hur krav och önskemål har utvecklats. En väldefinierad kravspecifikation säkerställer att projektet genomförs enligt planens ramar. Med dokumentering och validering av kraven säkerställs att slutresultatet uppfyller kundens förväntningar.

3.4 Idégenerering

Idégenereringen genomfördes för att systematiskt hitta flertalet olika lösningar som ligger till grund för det slutliga konceptet. Målet var att utveckla koncept som uppfyller både behovsanalysen och kravspecifikationen. Metoder som användes var exempelvis brainstorming mellan oss studenter för att fritt kunna generera olika lösningar utan att begränsa sig initialt. (Lindstedt & Burenus, 2016)

Det genomfördes enligt nedan:

- Enklare skisser för hand på olika tänkbara konstruktioner för att hitta olika geometrier som kan tänkas användas och kombineras.

Lämpligheten för detta pass grundar sig i att eftersom rent geometriskt finns det olika vägar att gå och det är därför en värdefull aktivitet för att hitta olika konstruktionslösningar.

3.5 Konceptutvärdering

Syftet med konceptutvärderingen är att i utvecklingsprocessen försöka komma fram till det vinnande konceptet som uppfyller kraven som ställs på konstruktionen och olika behov som är värdefulla att uppfylla. Med hjälp av tidigare framtagna idéer kan olika koncept kombineras och analyseras för att iterativt hitta det mest optimala alternativet. (Lindstedt & Burenus, 2016)

Simuleringar som beslutsunderlag

För att skapa en grundförståelse hur de olika geometrierna tar upp laster i konstruktionen var det första steget att med hjälp av de enkla skisserna modellera flertalet olika 3D – modeller.

Utifrån dessa modeller simulerades det statiska lastfallet i form av horisontell kraft, vertikal kraft och ett moment genom ANSYS för att analysera spänningar och deformationer i konstruktionerna. Identifiering av kritiska delar utförs för att senare kunna optimera dem. En annan fördel är identifiering av delar som inte upplever lika stora påfrestningar som i ett senare skede kan användas för att minimera materialåtgången och minska vikten på strukturen. Utifrån denna verifiering kan det slutliga konceptet väljas och förbättras.

3.6 Detaljkonstruktion

Syftet med detaljkonstruktionen är att med hjälp av det vinnande konceptet ta fram en tekniskt genomförbar konstruktion som är anpassad för de givna gränssnitten. 3D – modelleringarna utfördes med hjälp av CAD programmet Solid Edge. Det är även en förberedande del för att kunna simulera lastfallet och få precisa resultatet som överensstämmer med verkligheten. Delkomponenter skapades i 3D – programmet för att sedan sätta ihop alla ingående delar till en assembly. På den slutliga modellen skapades även en enklare ritning för att på ett översiktligt sätt visa ingående delar.

3.7 Verifiering genom numeriska simuleringar/beräkningar

Syftet med hållfasthetsanalysen var att kontrollera att konstruktionen håller för de stora lasterna som den utsätts för. Med hjälp av den skapade detaljkonstruktionen simulerades konstruktionen i ANSYS för att utvärdera hur motståndskraftig den är mot de applicerade lasterna. Simuleringen gav information om vilka komponenter som är kritiska och hur stora spänningar och töjningar de utsätts för. En approximativ 2D analys genomfördes för att kunna göra en rimlighetsbedömning av resultaten från 3D – analysen i ANSYS. Den approximativa analysen baserades på materialet som är skrivet av Alfredsson m.fl. (u.å.) där information om metoden inhämtades och applicerades genom jämviktsekvationer, matrisformuleringar och python kod.

3.8 Materialval

Ett materialval genomfördes utifrån en lista på material som kunde användas för skjutriggen som är hämtad från BAE Systems Bofors.

4 Resultat

I denna del presenteras slutligen den föreslagna lösningen på en skjutrigg som uppfyller samtliga krav och vissa önskemål. Stort fokus har legat på en konstruktion som är strukturellt hållfast men samtidigt väl dimensionerad för givna gränssnitt.

4.1 Behovsanalys/Kundundersökning

Kundutlåtanden som har inhämtats från tidigare intervjuer och presentationer har sammanställts i bilaga A, det är endast färgen som avgör om det är ett behov som måste uppfyllas (grön) eller är av intresse (gul).

4.2 Kravspecifikation

Kravspecifikationen har sammanställts och uppdateras under arbetets gång då nya insikter och krav tillkommit. Slutliga kravspecifikationen för skjutriggen har sammanställts enligt tabell 3.

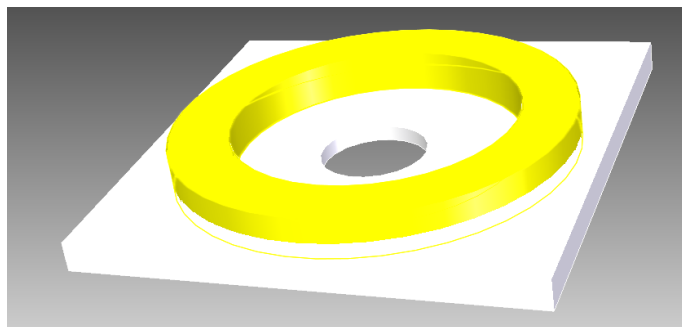
Tabell 3 – Slutlig kravspecifikation som är utformad utifrån den sammanställda behovsanalysen.

Chalmers	Dokumenttyp	Kravspecifikation			
	Projekt	Skjutrigg 155/L52			
Utfärdare: Gustav Klasson Linus Ljungberg		Skapad: 2025-03-18			
		Modifierad: 2025-05-04			
Kriterier	Målvärde	K/O	Vikt	Verifieringsmetod	Referens
Funktioner skjutrigg					
Möjliggör anskjutning av rekylrande delar och passar med befintlig prototypvagga		K		Modellering	BAE Systems
Enkelt byta rekylrande delar på plats med tillgängliga hjälpmedel		K		Modellering	BAE Systems
Vara anpassad för montage i tillgänglig spårplatta		K		Modellering	BAE Systems
Elevationsordning	Max 10 grader	K		Tidigare användning	BAE Systems
1. Prestanda					
1.1	Bärighet				
1.2	Laster vid skjutning	> Vikt rekylrande delar + vagga	K		Hållfasthetsberäkning BAE Systems
		Horisontell kraft, vertikal kraft och ett moment med dynamisk lastfaktor	K		Hållfasthetsberäkning BAE Systems
1.3	Assymetrisk lastfördelning	± 10%	K		Hållfasthetsberäkning BAE Systems
1.4	Säkerhetsfaktor skjutrigg	3	K		Hållfasthetsberäkning BAE Systems
2. Miljö (omgivande)					
2.1	Temperatur användningsområde	-40 °C till 80 °C	K		Materialval BAE Systems
2.2	Korrosionsbeständig	Ja	K		Materialval BAE Systems
3. Livslängd					
3.1	Livslängd	20 000 - 30 000 skott	K		Analys/Simulering BAE Systems
3.2	Livslängd	>10 ⁶ lastcykler	O	2	Analys/Simulering BAE Systems
4. Storlek (Baseras på spårplattans dimensioner 4500x2250mm)					
4.1	Längd	< 4m	K		3D - modellering BAE Systems
4.2	Bredd	< 2m	K		3D - modellering BAE Systems
4.3	Höjd	< 2m (Arbets höjd)	K		3D - modellering BAE Systems
5. Massa (Baseras på transportalternativ)					
5.1	Vikt	Max 5 ton med hjullastare L90	K		Hållfasthetsberäkning BAE Systems
6. Ergonomi					
6.1	God arbetshöjd	> 1m < 1,5m	O	5	Uppskattning BAE Systems
6.2	Lätt åtkomligt för lyftanordningar		O	4	Uppskattning BAE Systems
9. Material (Materialdata)					
9.1	Sträckgräns	355 Mpa	K		Materialval BAE Systems
9.4	Svetsbarhet	Utmärkt	K		Materialval BAE Systems

4.3 Lastfall och idégenerering

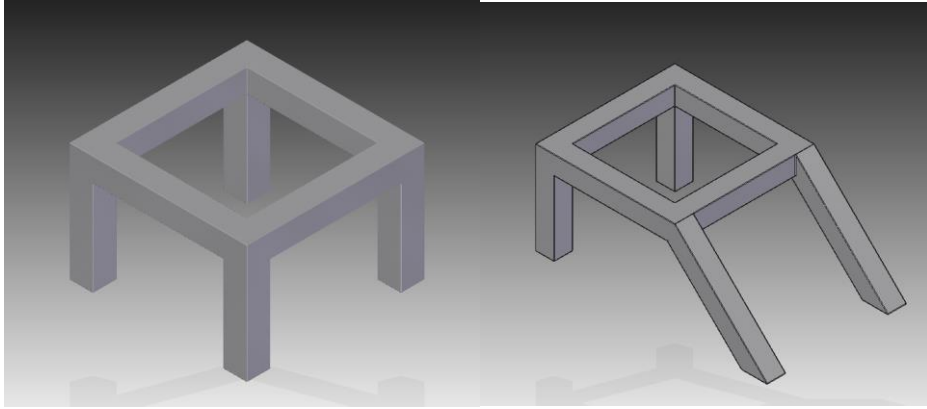
För att analysera olika strukturer inhämtades data gällande krafterna som påverkar lagret som sitter i skjutpjäsens klyka. Utifrån informationen om krafterna som uppstår gjordes ett ingenjörsmässigt antagande där det skapades ett lager som är nedsänkt och klämd i en platta som fästs på toppen av diverse konstruktioner som testas. Krafterna är beräknade med antagande att pjäsen sitter horisontellt monterad med 0° elevation. På lagret ansattes en vertikal och horisontell kraft samt ett moment. Materialet som användes vid simuleringarna i Ansys är konstruktionsstål med en sträckgräns på 355 MPa.

Fler villkor som lades till i analysen är tyngdkraften hos strukturen och att skjuttriggen är fast inspänd i spårplattan. Lagret och plattan är väl dimensionerade och lagret har även ett annat material med högre sträckgräns. Anledningen till detta är att skjuttriggen ska vara den kritiska delen vid hållfasthetsanalysen för att kunna inhämta information hos kritiska punkter i skjuttriggen. Lagret är markerat med gul färg, se figur 2.



Figur 2 – Lager och platta

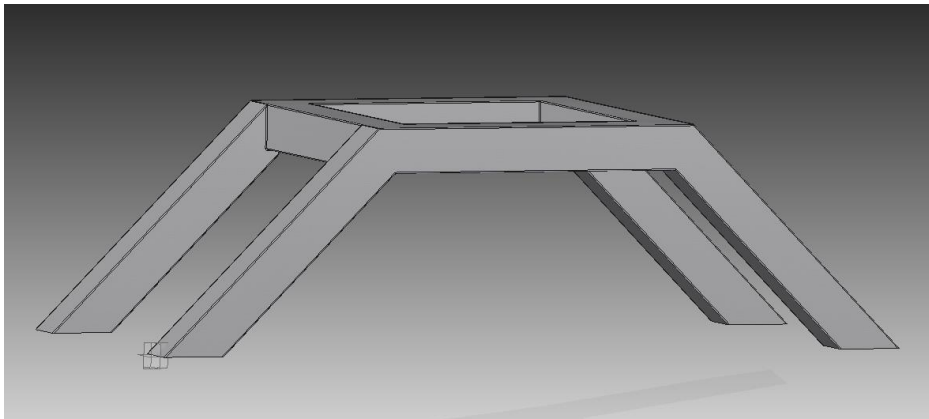
I början av idégenereringsprocessen skapades det skisser av olika geometrier och koncept på hur konstruktionen av skjuttriggen skulle kunna se ut. Inledningsvis skapades enklare konstruktioner i Solid Edge för att möjliggöra hållfasthetsanalys i ANSYS. Simuleringarna resulterade i information om hur krafterna från impuls, tyngdkraft och momentet påverkar strukturerna. Detta för att skapa en bättre grundförståelse hur konstruktionerna tar upp krafterna men även för att det slutliga konceptet skulle ha en godtycklig utgångspunkt för att möta hållfasthetskraven.



Figur 3 – Raka ben

Figur 4 – Raka ben + snedställda ben

Figur 3 är den enklaste konstruktionen på grund av att den endast har fyra vertikala ben som är symmetriska. Figur 4 består av vertikala ben framåt i strukturen men har längre ben bakåt som är vinklade i 45 grader. Idéen är att de vinklade benen bakåt blir styva och bättre tar hand om tryckkrafterna som genereras i strukturen.



Figur 5 – Snedställda ben

Figur 5 består av vinklade ben fram och baktill med vinkel på 45 grader. Tanken är att en pyramid-konstruktion med symmetri är stabil och bättre omhändertar tryck- och dragkrafter som uppkommer vid skjutning. De tre enklare konstruktionerna är konstruerade med rektangulära 200x200mm stålvalsprofiler med en godstjocklek på 10mm. Efter analys och simulering i Ansys framkom det att figur 5 var en tillförlitlig utgångspunkt på grund av att maximal spänning och deformationer i konstruktionen är mycket mindre än för övriga geometrier. Därför skapades fler analyser där olika vinklar på strukturens ben testades och analyserades.

4.4 Konceptutvärdering

I detta avsnitt presenteras resultaten från de simuleringar som har utförts i syfte att möjliggöra en systematisk utvärdering av de olika koncepten. Resultaten utgör grunden för det slutliga konceptvalet.

4.4.1 Vinkel på balkprofilerna

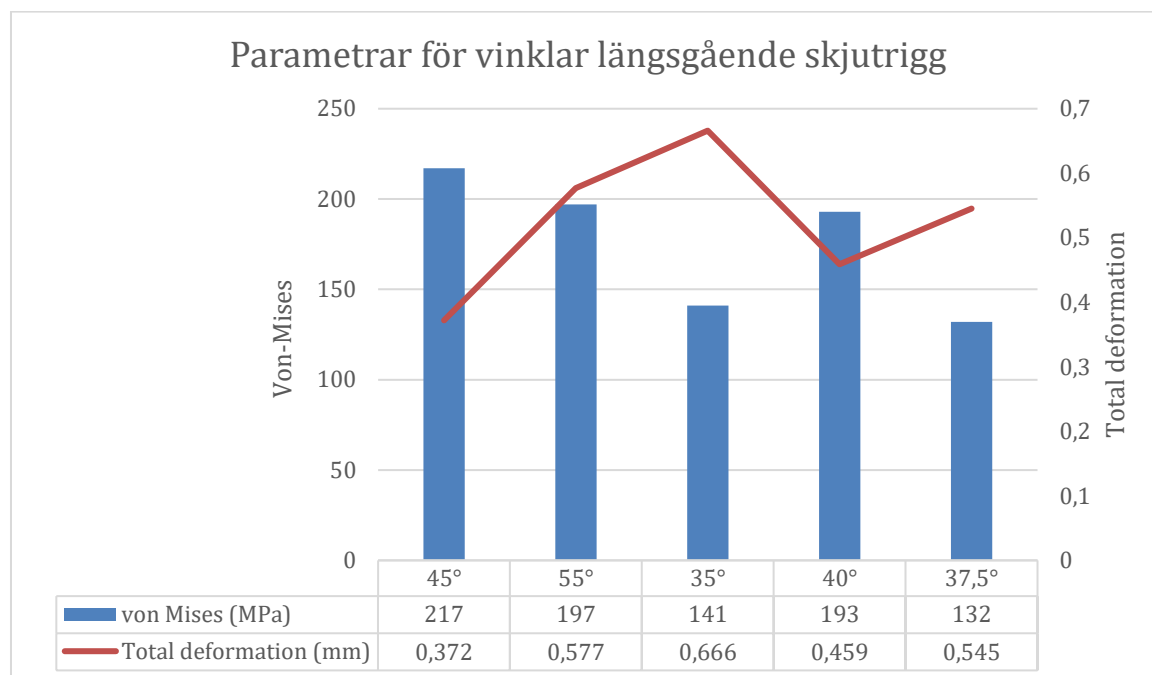
Efter beslut att jobba vidare från en skjutrigg enligt figur 5 som grund blev nästa steg att utvärdera benens vinklar för att se hur olika vinklar gör strukturer mer eller mindre stabil. Flera olika vinklar testades och simulerades i Ansys där det huvudsakliga fokuset ligger på von Mises spänningar samt total deformation, se bilaga B. Vinkeln som varierades ses i figur 6.



Figur 6 – Vinkel snedställda ben

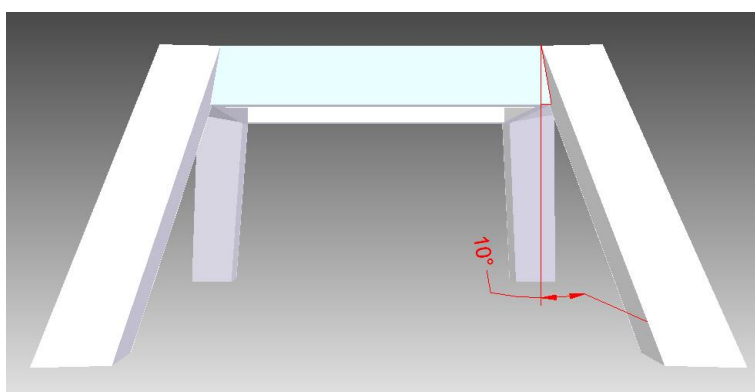
Resultatet från vinkelanalysen kan ses i tabell 4 och det konstateras att maximal spänning uppkommer vid 45° respektive minimal spänning uppkommer vid vinkeln $37,5^\circ$. Maximal deformation inträffar vid en vinkel på 35° och den minsta deformationen sker vid en vinkel på 45° . På grund av spårplattans dimensioner begränsas även längden hos strukturen i längsriktning vilket innebär att vinkel 35° inte hade fått plats på spårplattan. Det beslutades därför att gå vidare med vinkeln $37,5^\circ$ på grund av lägst spänning jämfört med övriga vinklar och den totala deformationen var hanterbar.

Tabell 4 – Test av olika vinklar för skjutriggen enligt figur 6.



4.4.2 Jämförelse vinkel och vinkel utåt

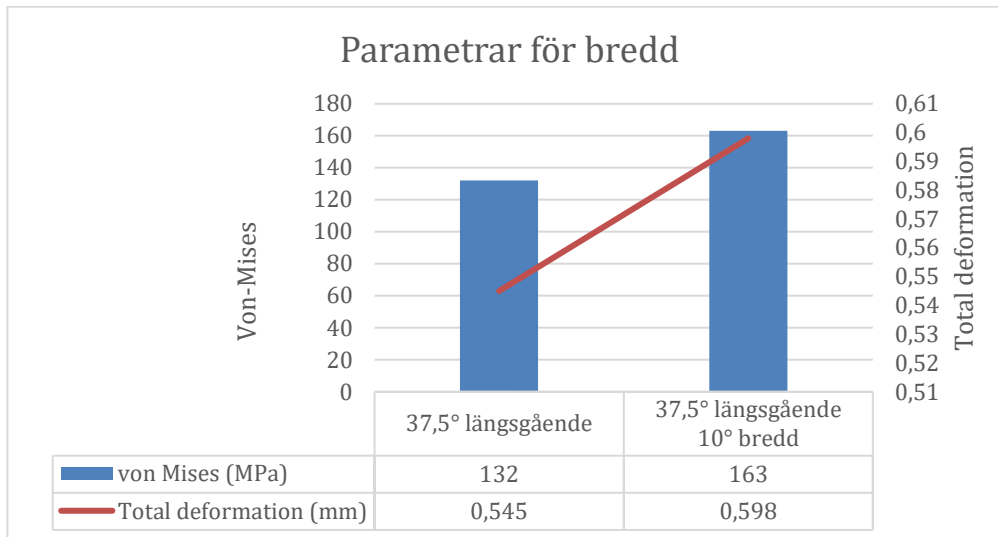
Baserat på grundtanken för konstruktionen med en geometri likt en pyramid med symmetri fortsattes därefter arbetet genom att analysera en vinkel i skjutriggens bredd. Det som testades var en vinkel i bredd-led på 10°. Resultatet jämfördes med föregående konstruktion, se figur 7.



Figur 7 – Utåtvinklade ben.

Efter analys och simulering i Ansys med fokus på von Mises spänning samt total deformation konstaterades det att konstruktionen påverkas negativt med en vinkel på 10°, se bilaga C. Utvecklingsprocessen gick vidare utan att analysera flera fall på grund av att dimensionerna i spårplattan inte möjliggjorde en större vinkel, se tabell 5.

Tabell 5 – Jämförelse mellan längsgående ben och utåtvinklade ben

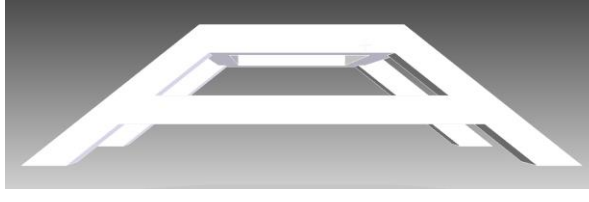
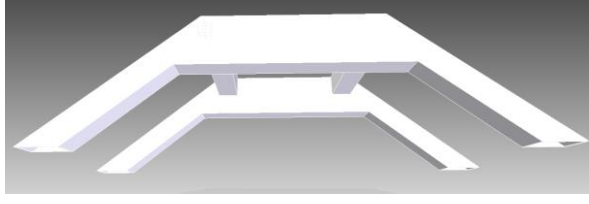




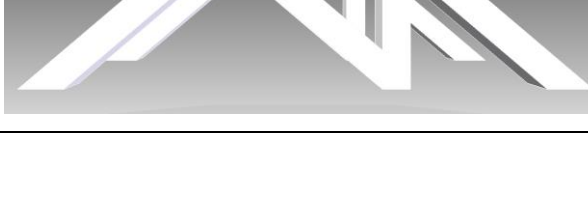


4.4.3 Balksystem

I nästa skede av konstruktionsprocessen analyserades och simulerades olika fall av balksystem, se bilaga D. Skulle en styv konstruktion med liten förmåga att röra på sig vara gynnsamt för resultatet eller är en konstruktion anpassad för mer rörlighet att föredra. I åtanke var att en konstruktion mer anpassad för dragkrafter skulle vara att föredra genom att försöka göra balksystem utformade för att ta upp mer dragkrafter och på så sätt minska tryckkrafterna och fördela krafterna i konstruktionen.

Genom att ta lärdom av hur strukturen beter sig av olika fall och kombinera balksystem som gav ett gynnsamt utfall i simuleringar. Det resulterar i att ytterligare få ner önskade spänningar samt deformationer i skjuttriggen för att i kommande utveckling kunna dimensioneras till en lägre vikt. Se tabell 6 som tydligt illustrerar de olika geometrier som simulerats.

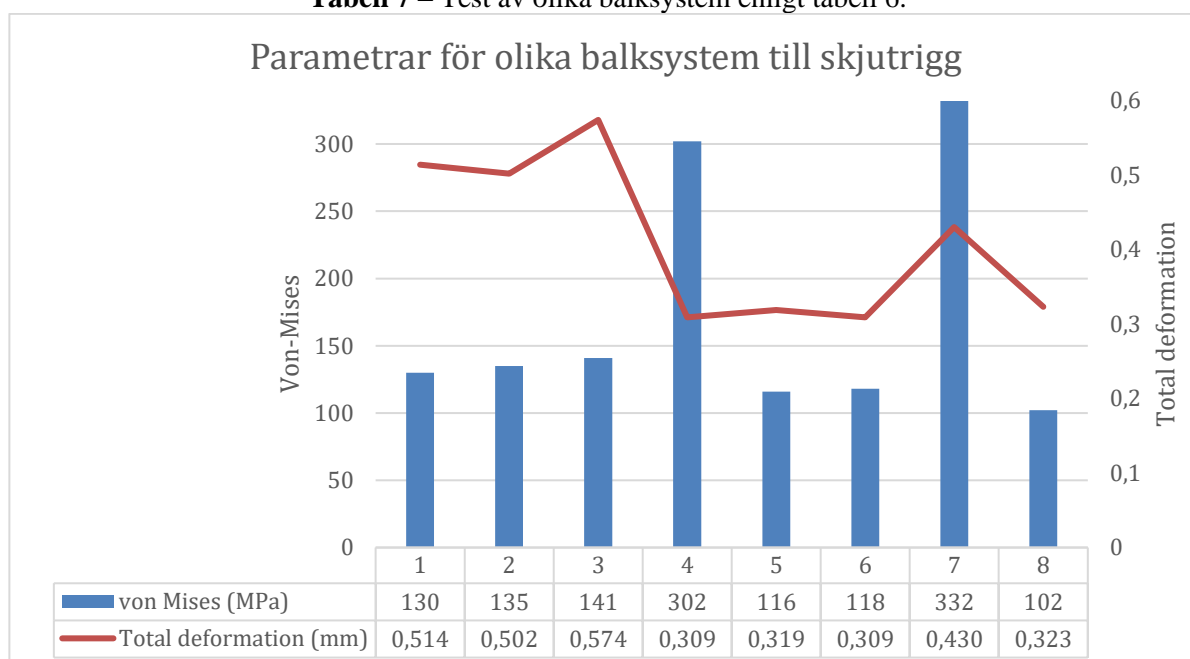
Tabell 6 – Test av olika balkgeometrier

Nr	Namn	Geometri	Kommentar
1	Längsgående balk 500mm		Längsgående balkar som sammankopplar strukturens ben 500mm från toppbalks övre punkt.
2	Längsgående balk 0mm		Längsgående balkar som sammankopplar strukturens ben med toppens geometri.
3	Kortsida balk 500mm		Balkar på strukturens kortsidor 500mm från toppbalks övre punkt.
4	Nedåtgående balk		Nedåtgående balkar baktill i strukturen.
5	Triangel baktill		Nedåtgående balk som kopplas till strukturs bakre ben.
6	Triangel fram- och baktill		Liknande nr 5 fram och baktill i strukturen.
7	Balksystem mitt		Ett balksystem anpassat för att ta upp dragkrafter i strukturen.

8	Fackverk		Ett fackverk utformat för god styvhet och stabilitet i strukturen.
---	----------	--	--

Analyserna genomfördes i Ansys och redovisas nedanför enligt tabell 7. Resultatet av dessa analyser är att geometri 8 var den konstruktionen med den lägsta spänningen på 102 MPa samt en total deformation på 0,323mm.

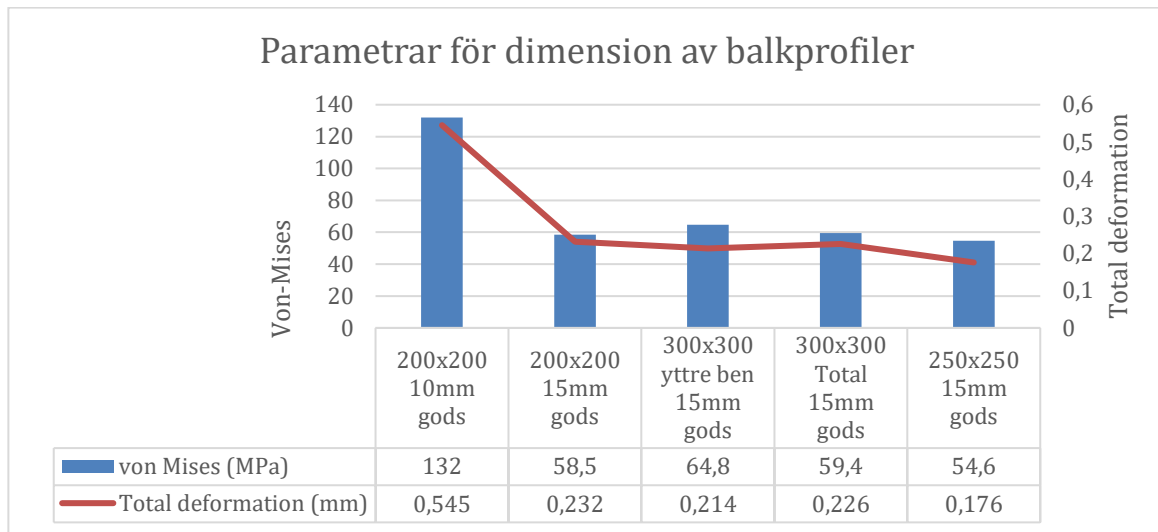
Tabell 7 – Test av olika balksystem enligt tabell 6.



4.4.4 Dimensionering

Genom analys och simulering i Ansys av olika tjocklekar på balkprofiler med diverse godstjocklek blev resultatet att konstruera en skjutrigg byggd på 250x250mm balkprofiler med 15mm i godstjocklek. Detta gör att skjutriggen blir enkel att tillverka samt lätt att arbeta med om eventuella ombyggnationer blir aktuella. Dimensioner som har analyserats redovisas nedanför, se tabell 8 och även bilaga E.

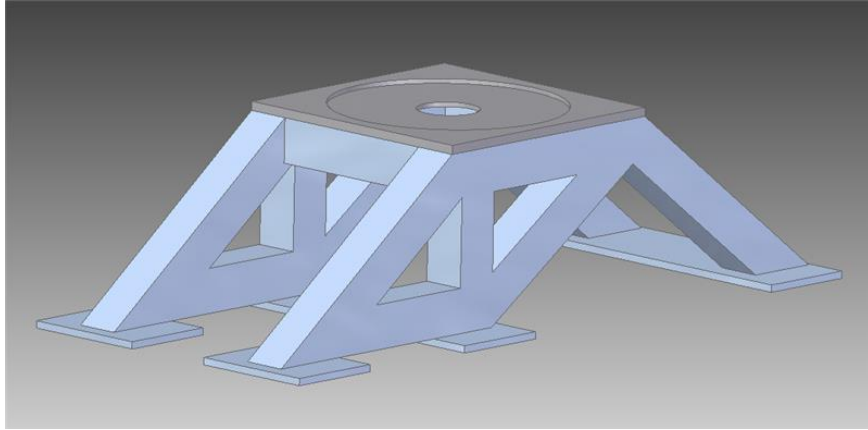
Tabell 8 – Dimensionering av balksystem



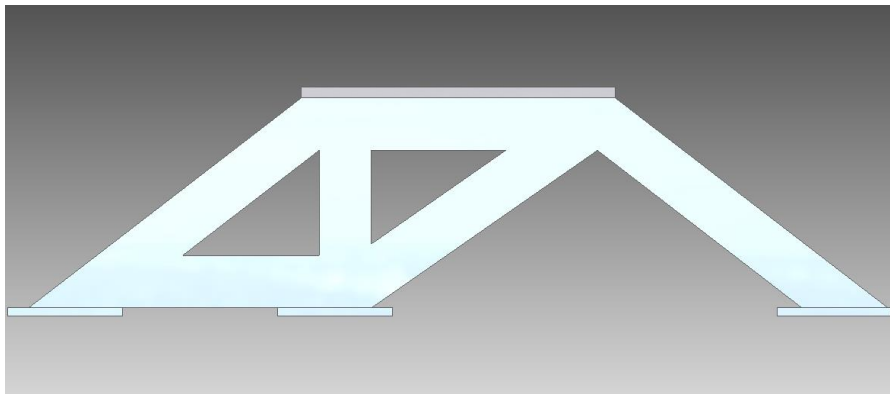
4.4.5 Detaljkonstruktion skjutrigg

När konstruktionen var dimensionerad var nästa steg att konstruera kvadratiska plattor som monteras fast under skjutriggen genom svetsning. Framtill finns en rektangulär platta monterad tvärs över de främre benen. Detta för att ha en större area som ger ökad möjlighet att klämma ner och hålla emot den dragkraft som bildas på grund av kraftmomentet som uppstår vid skjutning. Plattan med anpassade gränssnitt för lagret dimensionerades ner till 50mm i höjddled. Den slutliga totala massan för skjutriggen landar på 3110 kg.

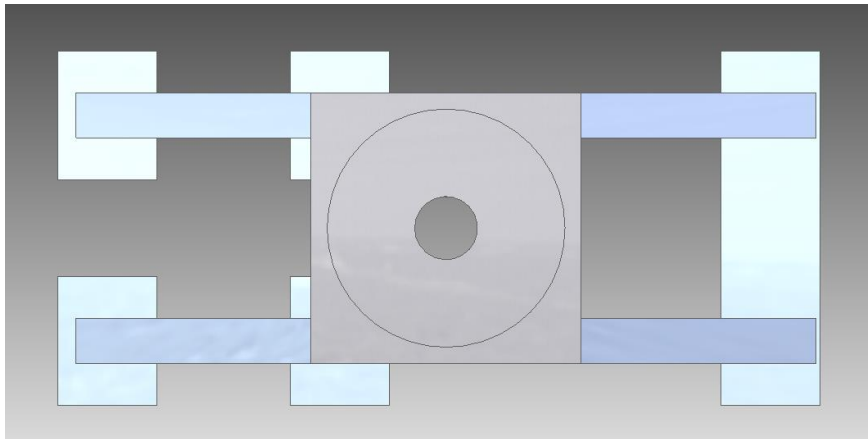
När konstruktionen var klar genomfördes ny analys och simulering i Ansys där meshen förfinades ytterligare genom att öka antalet element och noder för att få mer tillförlitliga resultat. Det resulterade i en von Mises spänning på 79,5 MPa samt en total deformation av 0,212 mm. Nedan i figurer 8,9,10 presenteras den slutliga detaljkonstruktionen av skjutriggen.



Figur 8 – Slutlig konstruktion



Figur 9 – Slutlig konstruktion vy från sidan

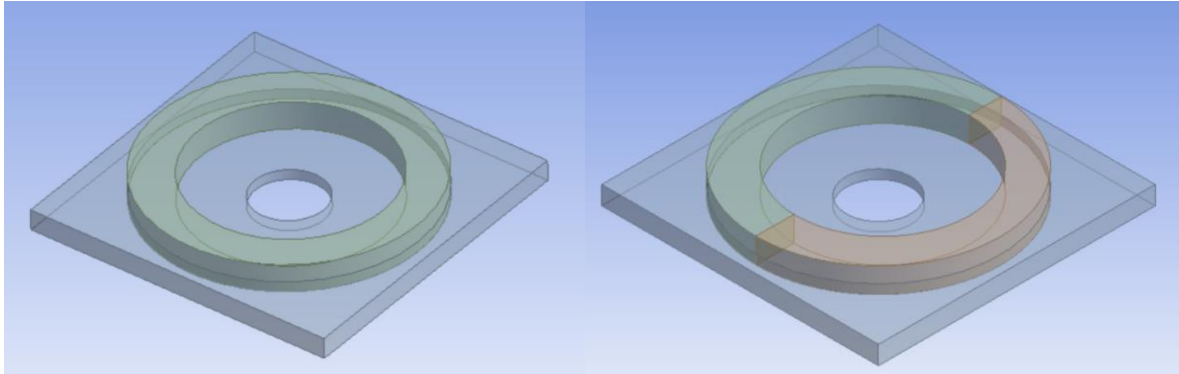


Figur 10 – Slutlig konstruktion vy från ovasida

4.4.6 60/40 Lastfall

Från intervju med anställd person från BAE Systems konstaterades att det var viktigt att göra en analys där krafterna fördelades ojämnt över strukturen. Det simulerades genom att ena delen av strukturen tar upp 60% av lasterna till skillnad från andra sidan som tar upp 40% av lasterna. Det framkom att vid en eventuell defekt rekyldämpare skulle skjutriggen kunna snedbelastas och skadas eller i värsta fall haverera. Detta analyserades genom ett ingenjörsmässigt antagande där samma lager delades i två olika delar.

På så sätt kunde laster delas upp i asymmetrisk fördelning och simuleras huruvida konstruktionen skulle reagera vid eventuell snedbelastning. Figur 11 nedan visar hur det vanliga lastfallet applicerades på plattan till skillnad från figur 12 som visar hur det asymmetriska lastfallet applicerades.



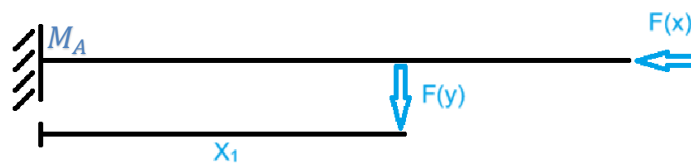
Figur 11 – Lager och platta

Figur 12 – Lager delat på mitten och platta

I bilaga F syns att snedbelastningen av konstruktionen resulterar i en von Mises spänning på 80,8 MPa och en total deformation av 0,214 mm. Det konstateras att resultatet från denna analys uppfyller kravspecifikationen och kräver därför ingen åtgärd.

4.4.7 10 grader elevation

Från intervju av anställd person hos BAE Systems konstaterades även ett krav på att konstruktionen skulle klara skjutning vid elevation av eldrör på 10°. För att analysera detta i Ansys räknades de nya lastfallen ut genom jämvikts- samt momentekvationer. Se figurer 13 och 14 samt ekvationerna 3,4,5 och 6.



Figur 13 – Elevation vid 0 grader

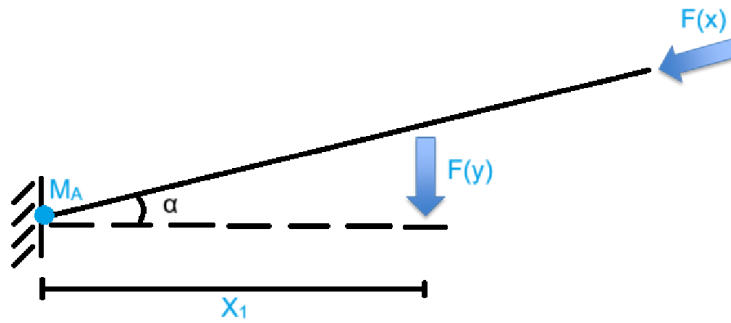
Momentet vid inspänningen A är:

$$M_A = F(y) * X_1 \quad (3)$$

Där lasten $F(y)$ appliceras vid $X_1 = 2,7\text{m}$ (tyngdpunkt). Krafterna vid inspänningen A är:

$$F_{AX} = F(x)$$

$$F_{AY} = F(y)$$



Figur 14 – Elevation vid 10 grader

Inspänningsmomentet vid A:

$$M_A = F(y) * \cos(\alpha) * X_1 \quad (4)$$

Krafterna vid A:

$$F_{AX} = -F(y) * \sin(\alpha) + F(x) * \cos(\alpha) \quad (5)$$

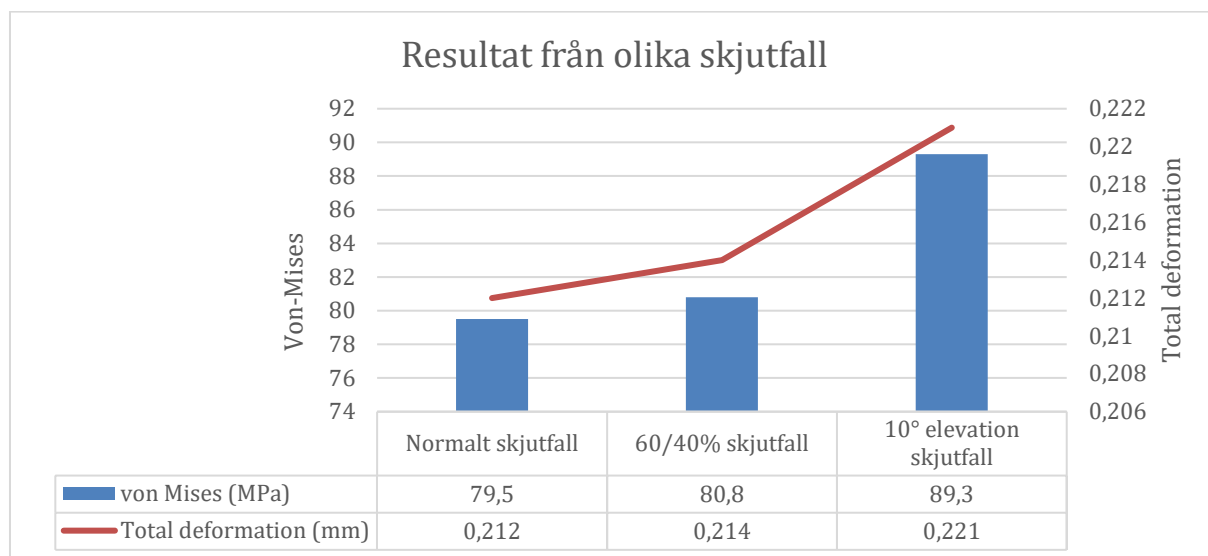
$$F_{AY} = F(y) + F(x) * \sin(\alpha) \quad (6)$$

De framräknade lasterna analyserades och simulerades i Ansys. Det resulterade i en maximal von Mises spänning av 89,3 MPa samt en total deformation på 0,221 mm, se bilaga F.

4.4.8 Resultat från olika skjutfall

Enligt tabell 9 jämförs resultaten från framtagna simulering vid ett normalt skjutfall som innebär 0° elevation, en asymmetrisk lastfördelning av 60/40% samt vid 10° elevation. Det konstateras att skjutfallet med störst påverkan på konstruktionen är 10° elevation och det lastfallet blir utgångspunkten i kommande livslängdsberäkningar, se även bilaga F.

Tabell 9 – Resultat av spänningar och deformation från olika lastfall



Från tabell 9 kan slutsatser dras om säkerhetsfaktorn där materialet som använts i analysen är vanligt konstruktionsstål med en sträckgräns på 355 MPa. Jämförande med den framtagna spänningen från skjutfall 10° elevation kan en säkerhetsfaktor bestämmas enligt ekvation 7.

$$FOS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{max}} = \frac{355 * 10^6}{89,3 * 10^6} = 3,98 \quad (7)$$

4.4.9 Livslängdsanalys och bucklingsfall

För att analysera och simulera skjutriggens livslängd har utgångspunkten varit det skjutfall där störst påfrestning uppkommer, det vill säga vid 10° elevation och resultaten från utmattningsanalysen presenteras nedan i tabell 10.

Tabell 10 – Livslängdsanalys

Benämning	Värde
Design Life	10 ⁶ cykler
Life	8,19 * 10 ⁶ cykler
Damage	1,22
Safety factor	0,966

Vid genomförande av livslängdsanalysen valdes medelspänningsteorin Goodman som är inbyggt i Ansys som antar linjärt samband mellan utmattningshållfasthet och draghållfasthet. Värdena ovan från tabell 10 är det värsta tänkbara scenariot fallet gällande utmattning. Design life beskriver antalet cykler som skjutriggen borde klara och informationen är hämtad från kravspecifikationen som ett önskemål, kravet är långt under önskemålet.

Utgångspunkten blev i detta fall 1 miljon cykler. Life definieras som den beräknade livslängden innan utmattning uppstår, det vill säga utmattning sker efter 818 680 cykler vilket är mindre än designkravet. Damage definieras som hur mycket av skjutriggens livslängd som är förbrukad per belastningscykel enligt ekvation 8.

$$Damage = \frac{Design\ Life}{Life} = \frac{10^6}{8,19 * 10^5} = 1,22 \quad (8)$$

Säkerhetsfaktorn definieras som hur mycket säkrare lasten är än vad som krävs för att möta designkravet, i detta fall är $0,96 < 1$ vilket innebär att lasten är lite för hög för att möta designkravet, se även bilaga F.

Konstruktionen har även testats för olika bucklingsfall. De olika bucklingsfallen kan ses i tabell 11.

Tabell 11 – Fem olika typer av bucklingsfall som simulerats i ANSYS

Mode	Load multiplier
1	185
2	190
3	224
4	231
5	233

De simulerades i fem olika fall av buckling där fall 1 resulterade i minsta kraftmultiplikatorn av 185,42, se bilaga F. Det innebär att man behöver lägga på cirka 185 gånger så stor last för att konstruktionen ska ge vika och det finns därför ingen risk att skjutriggen kommer att buckla.

4.4.10 2D – Analys

En approximativ 2D – modell skapades från en sidovy av den slutliga strukturen för att genomföra analysen antas balkarna i detta fall vara förenklade i form av stänger, se bilaga G. Därefter skapades jämviktsekvationer med införda knutförskjutningar i de två noderna. Laster i form av horisontell kraft, tyngdkraft, vertikal kraft och ett moment uppdelades lika mellan de två noderna. Indata för genomförande av 2D – analysen är längderna hos stängerna, elasticitetmodulen, arean för stängerna samt vinklar, enligt tabell 12,13,14.

Tabell 12 – Längder på balkarna

Benämning	Värde
L1	1,23 m
L2	0,75m
L3	1,33 m
L4	1,53 m
L5	1,23 m

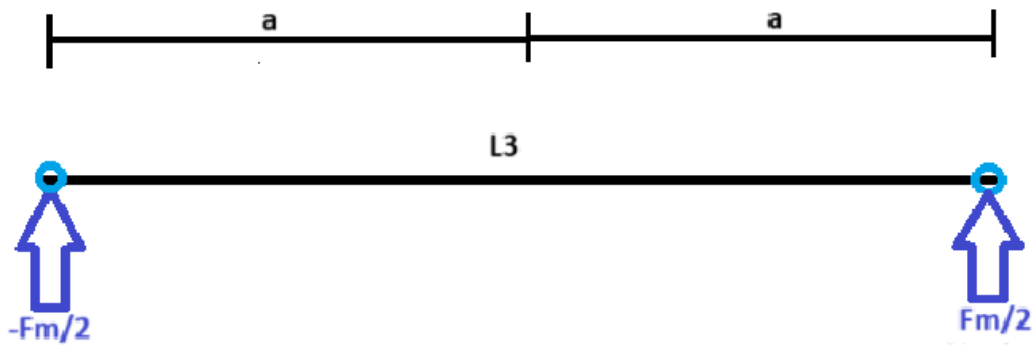
Tabell 13 – Vinklar som används

Benämning	Värde
β	52,5 °
φ	61,5 °

Tabell 14 – Area och elasticitetsmodul

Benämning	Värde
A	0,0625 m ²
E	200 GPa

För att använda sig av momentet i 2D – analysen gjordes den om till en kraft enligt ekvationerna nedan, där hävarmen är mellan de två noderna och positiv riktning är moturs, enligt figur 15 nedan.



Figur 15 – Sträckan L3 mellan de två noderna och krafterna som uppdelas av momentet med hävarmen a.

Krafterna som momentet tillför löses ut ur ekvation 7 där avståndet bestäms enligt ekvation 8, för att slutligen bestämma krafterna enligt ekvation 9.

$$M = F_m * a \quad (7)$$

$$a = \frac{L3}{2} \quad (8)$$

$$F_m = \frac{M}{a} \quad (9)$$

Införande av knutförskjutningsmatrisen **D** och stångdeformationer **d** enligt ekvation 10 och 11.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Därefter skapades kraftvektorn \mathbf{P} och stångkrafterna \mathbf{N} enligt ekvation 12 och 13.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Jämviktsekvationer skapades enligt ekvationerna 14,15,16 och 17, se bilaga G för införda stångkrafter och knutförskjutningar.

$$D_1 : \rightarrow : N_3 - N_1 * \sin(\beta) - \frac{F_x}{2} = 0 \quad (14)$$

$$D_2 : \uparrow : -N_1 * \cos(\beta) - N_2 - \frac{F_y}{2} - \frac{F_g}{2} - \frac{F_m}{2} = 0 \quad (15)$$

$$D_3 : \rightarrow : -N_3 - N_4 * \sin(\varphi) + N_5 * \sin(\beta) - \frac{F_x}{2} = 0 \quad (16)$$

$$D_4 : \uparrow : -N_4 * \cos(\varphi) - N_5 * \cos(\beta) - \frac{F_y}{2} - \frac{F_g}{2} + \frac{F_m}{2} = 0 \quad (17)$$

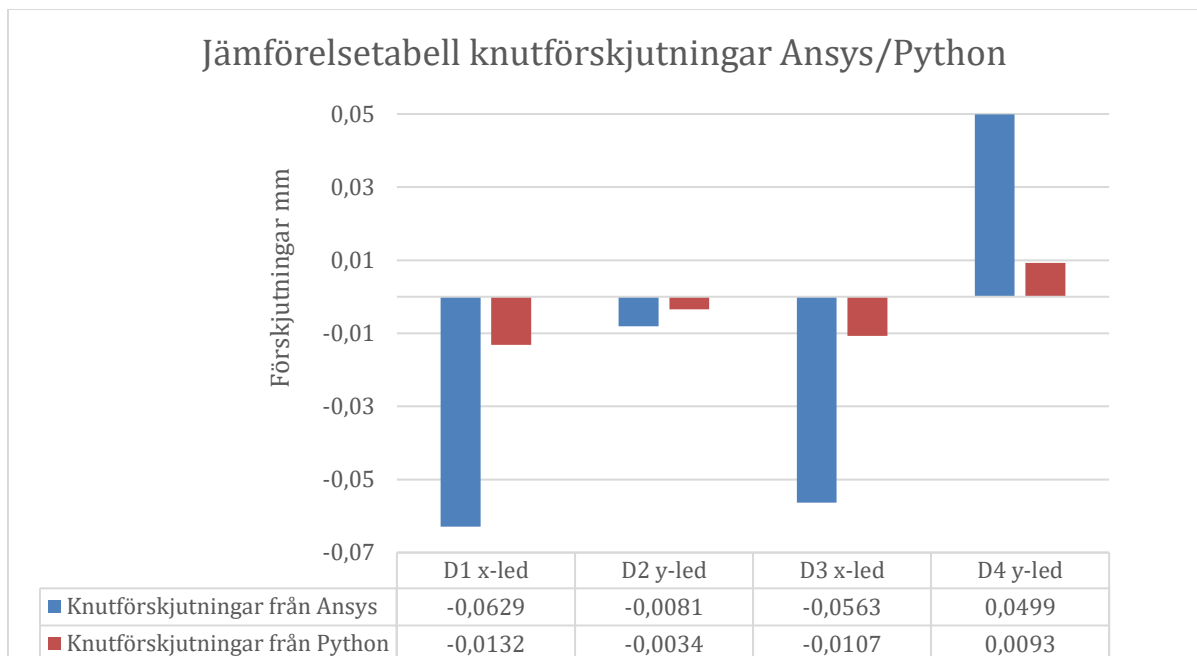
Stångkrafterna flyttades över till andra sidan jämlighetstecknet och koefficienterna som stod framför \mathbf{N}_i användes för att definiera \mathbf{A}^T matrisen och lastvektorn som är kvar i vänsterledet användes för att definiera \mathbf{P} , se ekvationer 18 och 19.

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} \sin(\beta) & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \cos(\beta) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \sin(\varphi) & -\sin(\beta) \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\varphi) & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (18)$$

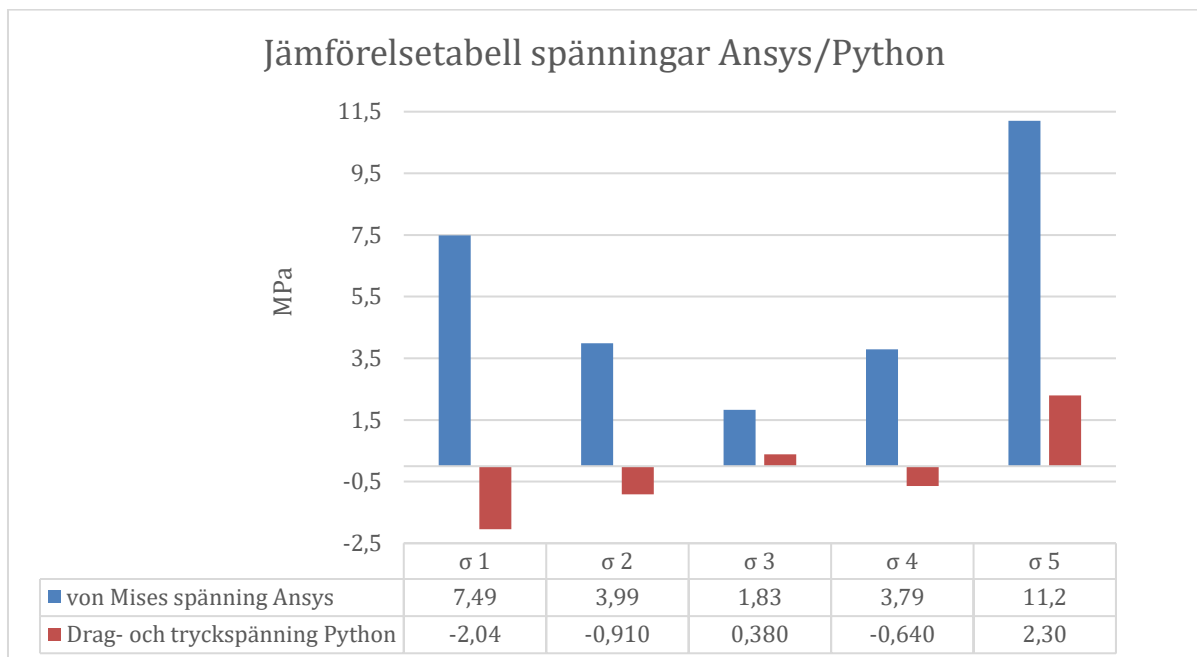
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} -\frac{F_x}{2} \\ \frac{F_y}{2} - \frac{F_g}{2} - \frac{F_m}{2} \\ -\frac{F_x}{2} \\ -\frac{F_y}{2} - \frac{F_g}{2} + \frac{F_m}{2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Detta underlag infördes sedan i Python och fortsatta beräkningar hänvisas till bilaga G. Resultatet från beräkningarna i Python redovisas nedan i tabell 15 och 16.

Tabell 15 – Knutförskjutningar från 2D – modellen i Python och den 3D simulerade modellen i ANSYS



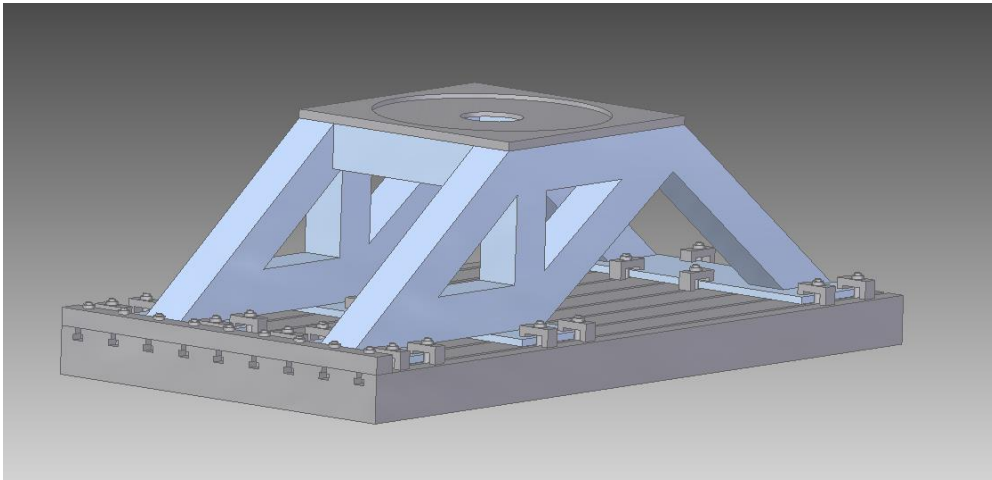
Tabell 16 – Spänningar från 2D – modellen i Python och den 3D simulerade modellen i ANSYS



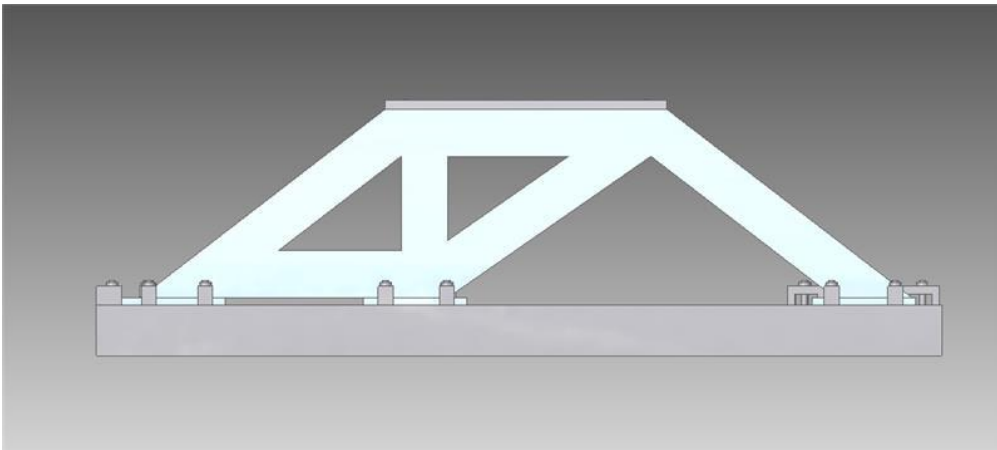
Skillnaderna i resultat i jämförelsetabellerna beror på antaganden om att strukturen är ett 2D stångsystem. Detta är en alltförstor förenkling för att noggranna resultat skall fås.

4.4.11 Montering i spårplatta

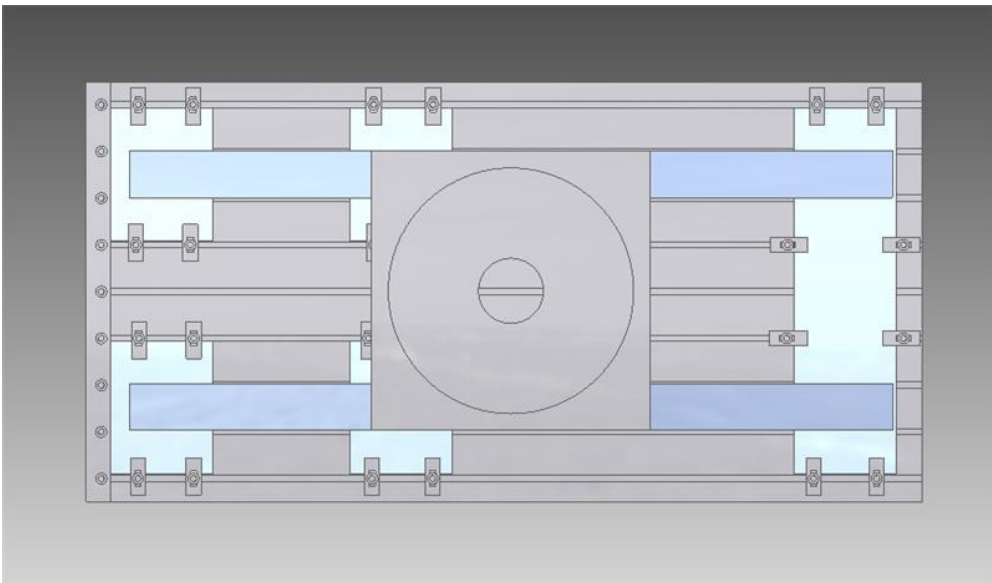
Plattorna kläms fast i spårplattan med hjälp av klämjärn utformade för att passa spårplattans dimensioner. I spårplattans bakre del finns ett mekaniskt stopp som skruvas fast i alla spår för att klämma ett fyrkantstål. Detta för att kunna ta upp den stora tryckkraft som bildas i bakre delen av konstruktionen från impulsen. För att hålla ner dragkrafterna framtill i skjutriggen erhåller den rektangulära plattan en större yta för att kunna ha fler fästpunkter, se figur 16,17 och 18.



Figur 16 - Slutgiltig konstruktion med spårplatta och klämjörn



Figur 17 - Slutgiltig konstruktion med spårplatta och klämjörn, vy från sidan.



Figur 18 - Slutgiltig konstruktion med spårplatta och klämjörn, vy från ovan.

5 Diskussion

Syftet med arbetet har varit att möjliggöra anskjutning av rekylerande delar med hjälp av en stationär skjutrigg stort fokus på att möta hållfasthetskraven från lasterna men samtidigt erbjuda en god ergonomi vid montering och demontering. Resultaten från Ansys visar att det slutliga konceptet med benvinklar på $37,5^\circ$ och en fackverkskonstruktion uppfyller kravspecifikationen och flertalet olika behov. Ett intressant resultat är att genom konceptutvärderingen kunde von Mises spänningarna och deformationen systematiskt minskas för att säkerställa en stabil konstruktion med relativt låg vikt. Detta på grund av att skjutriggen erhåller en bra balans mellan tryck- och dragkrafter som sprider sig i konstruktionen.

Utgångsgeometrin i arbetet var en snedställd balkstruktur på grund av dess förmåga att motstå böjspänningar vilket även bekräftades av låga von Mises spänningar genom samtliga koncept. Det skjutfallet med högst påverkan på skjutriggen var vid 10° elevation och en maximal spänning på 89,25 MPa uppstod då vilket resulterade i en säkerhetsfaktor på 3,98 mot plasticering vilket kan betraktas som ett godtagbart resultat.

En annan viktig observation är att skjutriggen tar upp snedbelastningar vid asymmetrisk lastfördelning utan att nämnvärt öka spänningarna och deformationerna jämfört med skjutfallet vid symmetrisk lastfördelning. Detta resulterar i att konstruktionen har en god förmåga att hantera asymmetriska lastfördelningar vilket är vad som krävs i en verklig testmiljö.

Simuleringarna i Ansys är baserade på förenklade antaganden som till exempel infästningen mellan skjutriggen och spårplattan. Klämförbanden har inte analyserats i Ansys utan det är endast skjutriggen som har fixerats i sina nedre infästningsplattor. Dessutom har inte det mekaniska stoppets förmåga att motstå tryckkrafterna som uppstår verifierats vid skjutning. Ett annat antagande vid simuleringarna är en tillräcklig förfinad mesh med ökade antal element och noder. Den högre meshupplösningen bidrog till att säkerställa ett mer pålitligt resultat, speciellt i områden där höga spänningskoncentrationer förväntades som i exempelvis skarpa övergångar.

En förenklad 2D - analys gjordes där balkarna ersattes med stänger som endast har möjligheten att ta upp drag- och tryckkrafter till skillnad från i 3D - analysen där balkprofilerna tar upp drag- tryck-, skjuv- och böjspänningar. I 2D - analysen antogs två noder som kan förskjutas i x – och y-led till skillnad från balkprofilerna som sitter ihop och är styva. Resultaten från den förenklade analysen är dock intressanta då knutförskjutningarnas riktningar stämmer överens med 3D-analysen, de följer samma mönster och värdena är rimliga.

När det kommer till spänningarna i 2D-modellen är det svårare att jämföra riktningarna. Detta eftersom von Mises spänningen alltid är positiv medan spänningarna i 2D-modellen representeras i drag- och tryckspänningar. Von Mises spänningarna är uttagna i mitten av balkarna, där det förväntades ge ett närmare resultat mot 2D-modellens spänningar. Resultaten för deformationer och spänningar från den approximativa 2D – modellen visar ändå på att 3D – analyserna i Ansys ger rimliga resultat vilket var det huvudsakliga syftet med 2D – analysen.

Ett oväntat resultat vid simulering av olika vinklar för benen var att vinkeln $37,5^\circ$ presterade bättre än både 35° och 40° . Grundidén var att större vinkel resulterade i lägre spänningar men sambandet mellan strukturens höjd och benens vinklar visade sig ha en optimal balans vid $37,5^\circ$. Detta visade att små förändringar gällande vinklar har stora effekter hur strukturen beter sig och fördelar lasterna. Sammanfattningsvis är skjutriggen även relativt väl dimensionerad med lång livslängd, låg vikt och enkel att tillverka. Med hjälp av resultaten i Ansys som verifierades med den approximativa 2D-modellen har det bidragit till en slutprodukt som är robust och säker vid användning med avseende på att skjutriggens utmattningsresultat överstiger kravet på 30 000 skott avsevärt.

6 Slutsatser och fortsatt arbete

Arbetet har resulterat i ett lösningsförslag av en stationär skjutrigg med möjlighet att anskjuta rekylterande system tillhörande Archer samt Haubits 77B i kompletta paket, i stället för att testa komponenter i befintliga artillerisystem. Det resulterar i en mer effektiv testmetod som förenklar hantering och minskar ledtider. Genom en iterativ konstruktionsprocess via CAD-modellering och strukturell verifiering via finita elementanalyser i Ansys har skjutriggen konstruerats med avseende på angivna gränssnitt ifrån spårplatta och klyka samt dimensionerade begränsningar av storlek och vikt från kravspecifikation. Konceptet med benvinklar på $37,5^\circ$ valdes som grund, då den visade lägst von Mises spänning och minst total deformation.

Vidare förstärktes skjutriggen ytterligare med ett fackverk, vilket ökade konstruktionens styvhet och resulterade i en god kombination av hållfasthet och vikt. Konstruktionen dimensionerades av rektangulära balkprofiler 250x250 mm med 15 mm i godstjocklek. Det ger en lösning med god hållbarhet, låg vikt samt praktisk tillverkningsbarhet. Skjutriggen utrustades sedan med kvadratiska samt rektangulära plattor för att möjliggöra en stabil och säker infästning vid förbindning av skjutrigg till spårplattan, särskilt anpassat till spårplattans dimensioner.

Plattorna svetsas fast i skjutriggens struktur och fixeras i spårplattan med hjälp av klämjärn samt ett mekaniskt stopp. På grund av begränsat utrymme i spårplatta används bultar med dimension M33 för mekaniskt stopp samt klämförband. Ovanpå skjutriggen sitter en platta monterad via svetsning med en tjocklek på 50 mm. För framtida användning av skjutriggen kan det bli aktuellt att anskjuta olika artillerisystem. Att istället för svetsning använda sig av ett bultförband från platta till skjutrigg skulle det finnas en möjlighet att montera andra plattformar med anpassade gränssnitt för aktuella artillerisystem.

Verifierande analyser i Ansys visar på att skjutriggen klarar kraven för de påfrestningar den utsätts för vid skjutning för att säkerställa hållfasthet och säkerhet vid användning. Detta inkluderar samtliga skjutfall, det vill säga asymmetrisk lastfördelning, skjutning vid horisontellt läge och 10° . Livslängdsanalys verifierade att skjutriggen klarar minst 818 680 cykler.

Tyngdpunktens placering är förhållandevis centrerad i strukturen vilket möjliggör transport av skjutriggen genom lyftning från sidan med hjälp av gaffeltruck. Sammanfattningsvis har projektet resulterat i en lösning av en skjutrigg konstruerad med fokus på strukturell hållfasthet som erhåller en god arbetshöjd och åtkomlighet, vilket skapar en praktisk och säker arbetsmiljö för enkel montering och demontering vid provskjutning.

Fortsatt arbete

En analys och simulering av infästningen av konstruktionen till spårplattan behöver genomföras. Detta för att säkerställa att det mekaniska stoppet klarar av tryckkraften som bildas bakåt. Den rektangulära plattan i strukturens front behöver hållas på plats och motstå dragkrafterna som bildas vid skjutning. Det behöver även genomföras momentberäkningar för det mekaniska stoppet samt klämförbanden.

Med beaktande på att enkelt kunna byta de anskjutna rekylade delarna på plats med hjälp av hjullastare typ L90 behöver vaggan förlängas baktill. Detta bildar en avlastningsplata för att skapa möjligheten att sänka ned de kompletta paketen med rekylade delar som efter avlastning sedan kan tryckas in i sina gejdor till önskat ändläge.

För att byta rekylade delar på plats behöver oket avlastas då det inte sitter vid ett jämviktsläge. Detta genom att tömma gasen i rekylcylindrarna eller genom att rekylera eldröret. Vid montering av eldröret genom oket är det små toleranser vilket innebär en väldigt fin passning vilket kan resultera att rekylämparna snedbelastas och tar skada. Genom att utveckla en låsning av oket för att förhindra att rekylämparna skjuts ut tillsammans med ett anpassat delbart ok med överfall som följer skjutriggen och inte eldröret, ges möjlighet att lyfta ett komplett paket med samhöriga rekylade delar bakåt ut från gejdorna och sedan rakt upp utan att nödvändigtvis behöva rekylera eldröret vilket resulterar i ett mer komponentsäkert byte med färre arbetsmoment.

För att säkert genomföra byte av rekylande system behöver det utvecklas ett fällbart stöd till oket. Under ett byte kommer rekylämparna ej vara i sitt inre läge vilket gör att oket är monterat ute på cylinderns kolvaxel som bildar en hävarm. När det kompletta paketet läggs ner finns övervägande risk att rekylämparna blir snedbelastade och därför havererar. Detta förhindras då genom ett fällbart anpassat stöd för att ta upp tyngdkraften från rekylade systemet.

Referenslista

1. Rörelsemängd. (2024, 3 juli). I *Wikipedia*.
<https://sv.wikipedia.org/wiki/Rörelsemängd#Impuls>
2. Kardus. (2024, 21 oktober). I *Wikipedia*. <https://sv.wikipedia.org/wiki/Kardus>
3. Projektil. (2024, 19 november). I *Wikipedia*. <https://sv.wikipedia.org/wiki/Projektil>
4. Eldrör. (2024, 15 december). I *Wikipedia*. <https://sv.wikipedia.org/wiki/Eldrör>
5. (Burenius & Lindstedt, 2016) Lindstedt, P., & Burenius, J. (2016) The value model: How to master product development and create unrivalled customer value. Value Model Arusid AB.
6. Alfredsson, S., Enelund, S., & Ekh, M. (u.å.) Matrisformulerad förskjutningsmetod för analys av stångbärverk. Chalmers Tekniska Högskola.

Bilaga A – Behovsanalys

Behovsanalys

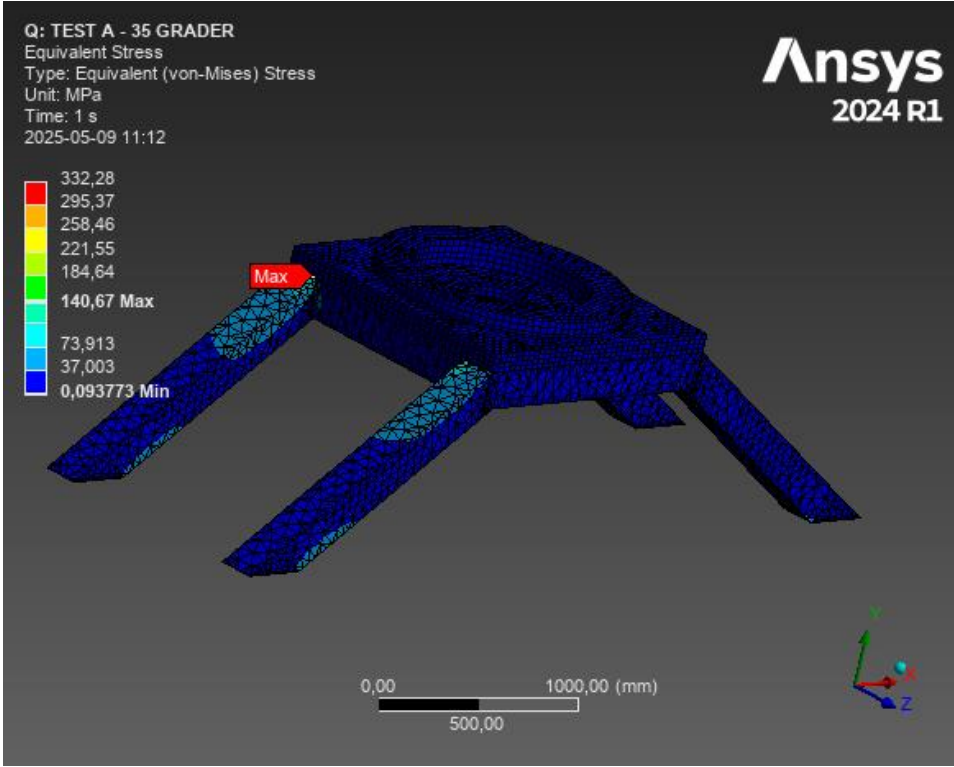
Nummer	Behov	Viktning
1	Skjutriggen möjliggör anskjutning av rekylerande delar	
2	Skjutriggen behöver dimensioneras sådan att den passar på spårplattan och för att därefter kunna förankras i och omhänderta lasterna	
3	Skjutriggen behöver kunna lastas i lastbil	
4	Skjutriggen behöver ha en lång livslängd	
5	Skjutriggen behöver ha en optimal arbetshöjd	
6	Skjutriggen behöver klara ett visst antal skott	
7	Skjutriggen behöver anpassas för att ta upp de rekylerande krafterna	
8	Skjutriggen behöver passa givet gränssnitt med klyka och lager	
9	Skjutriggen behöver kunna förflyttas vid behov	
10	Skjutriggen behöver kunna eleveras i höjdled ett visst antal grader	
12	Skjutriggen behöver ha ett delat ok för att underlätta monteringen på skjutplatsen	
13	Skjutriggen behöver klara olika typer av väderförhållanden	
14	Skjutriggen behöver vara tillräcklig hög för att hydraulik ska få plats under riggen	
15	Skjutriggen behöver ha ett fällbart stöd för att hålla oket	
16	Skjutriggen behöver klara av en assymetrisk lastfördelning	
17	Skjutriggen är enkel att tillverka	
18	Skjutriggen är anpassad för att kunna lyftas med hjullastare	
19	Skjutriggen är anpassad för framtida visioner om att testa fullständiga detaljer i stället för endast rekylerande delar	
20	Skjutriggen är enkel att montera på plats	
21	Skjutriggen är anpassad så att hjullastaren kan sänka ner de rekylerande delarna enkelt	

22	Skjutriggen minimerar andelen arbetsmoment för montering/demontering	
23	Skjutriggen uppfyller viktkraven för att kunna transporteras med hjullastare	

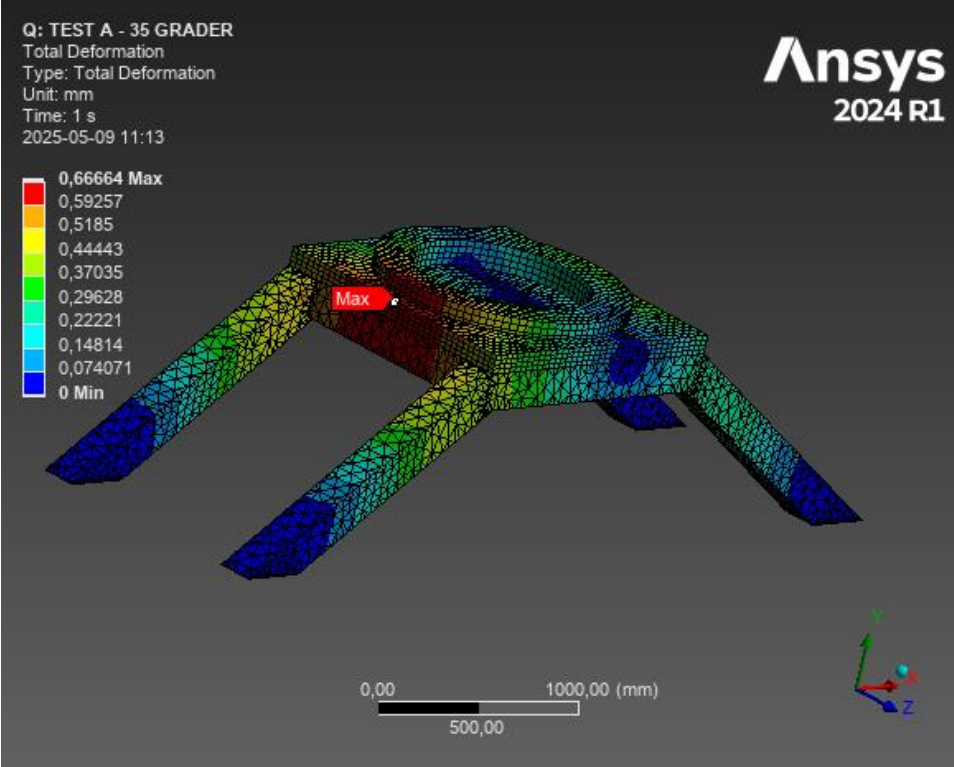
Bilaga B – Test vinklar

35 grader

Von-Mises

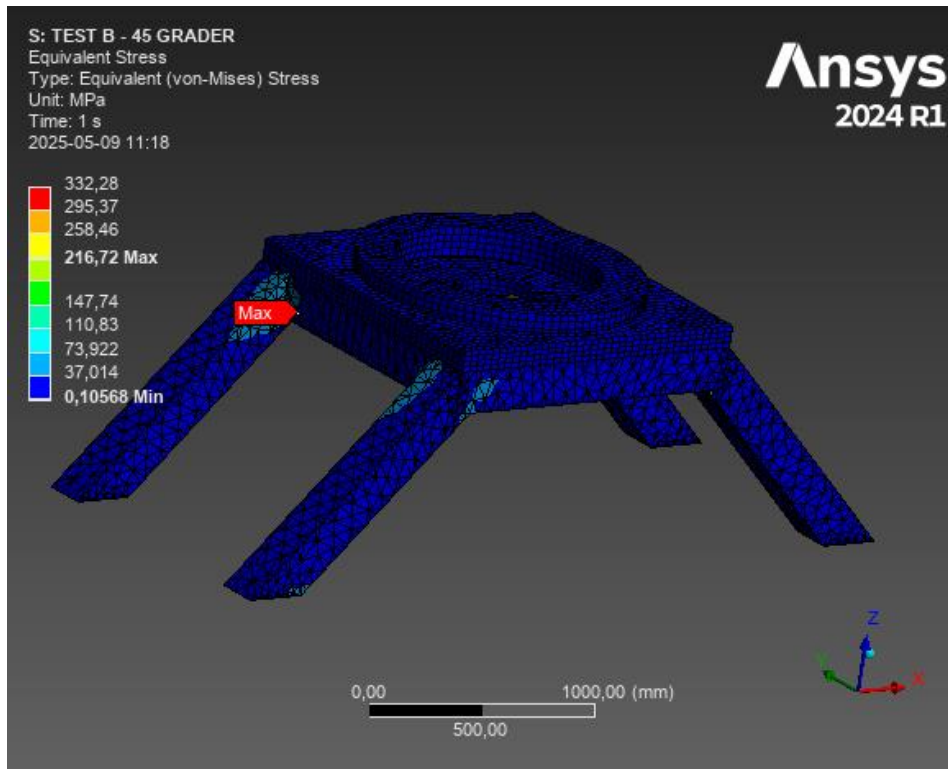


Deformation

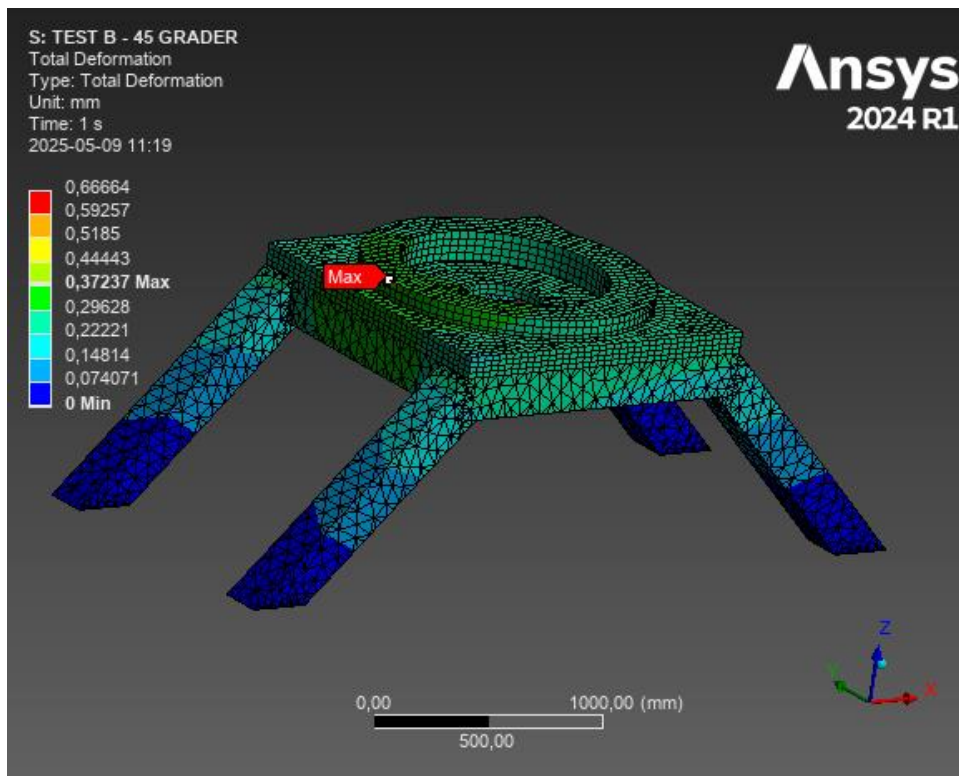


45 grader

Von- Mises

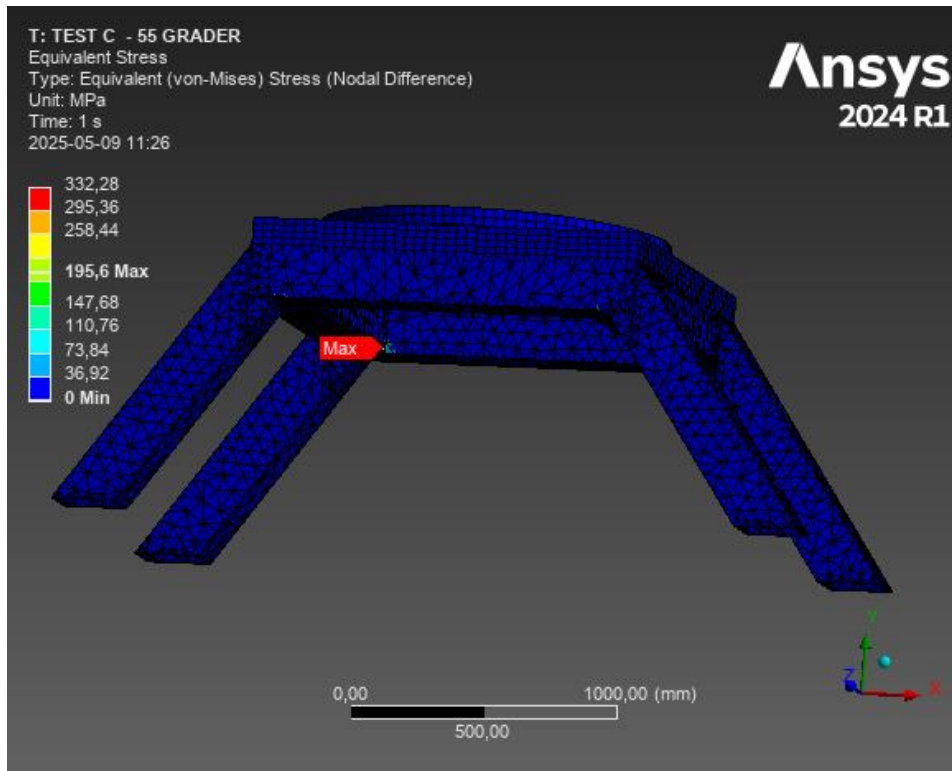


Deformation

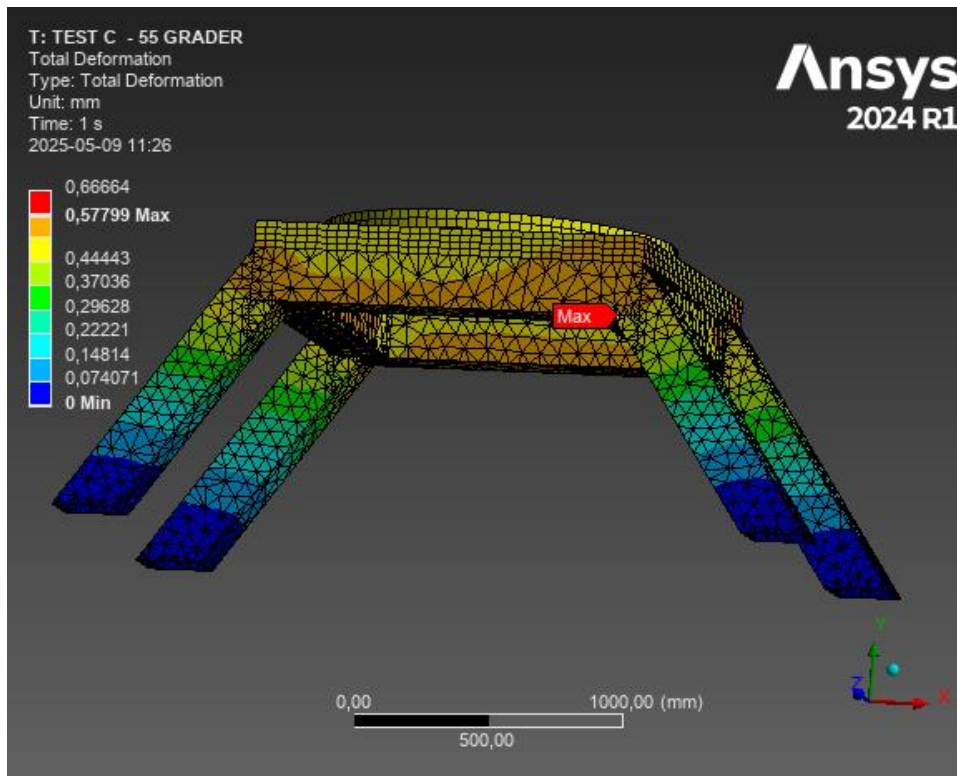


55 Grader

Von-Mises

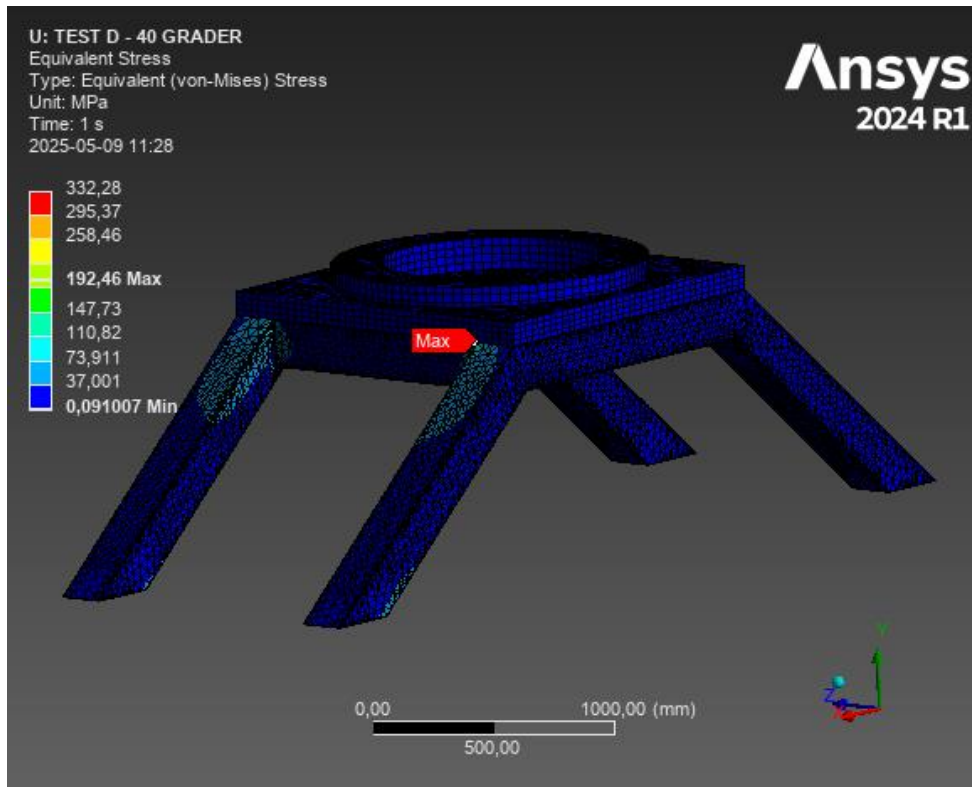


Deformation

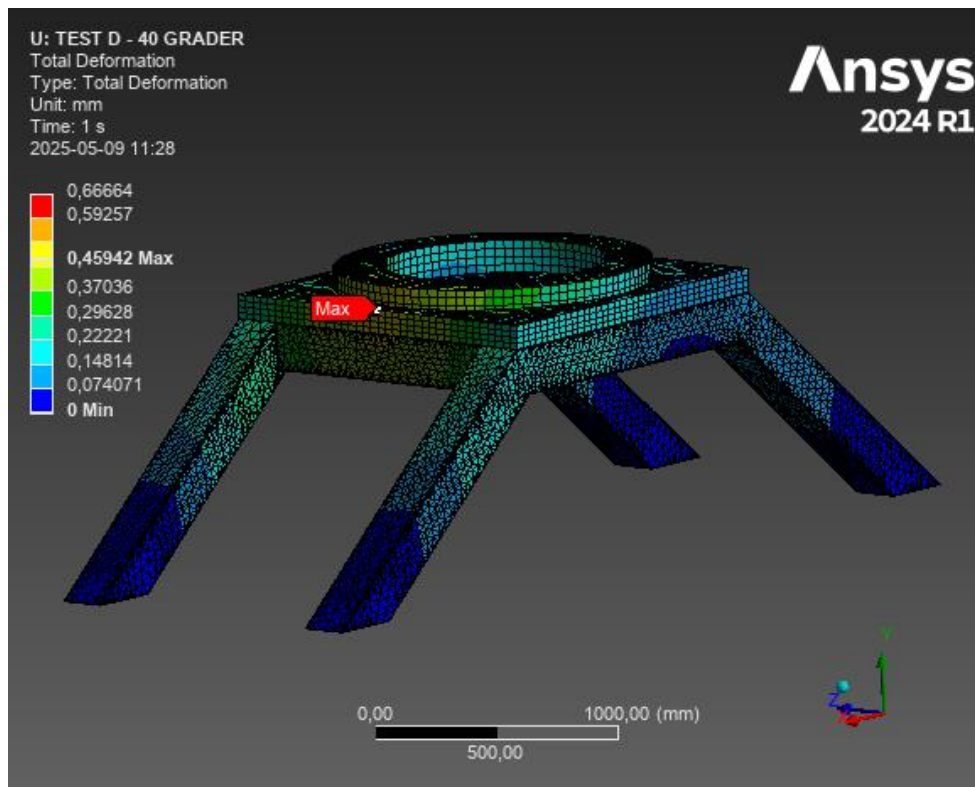


40 Grader

Von-Mises

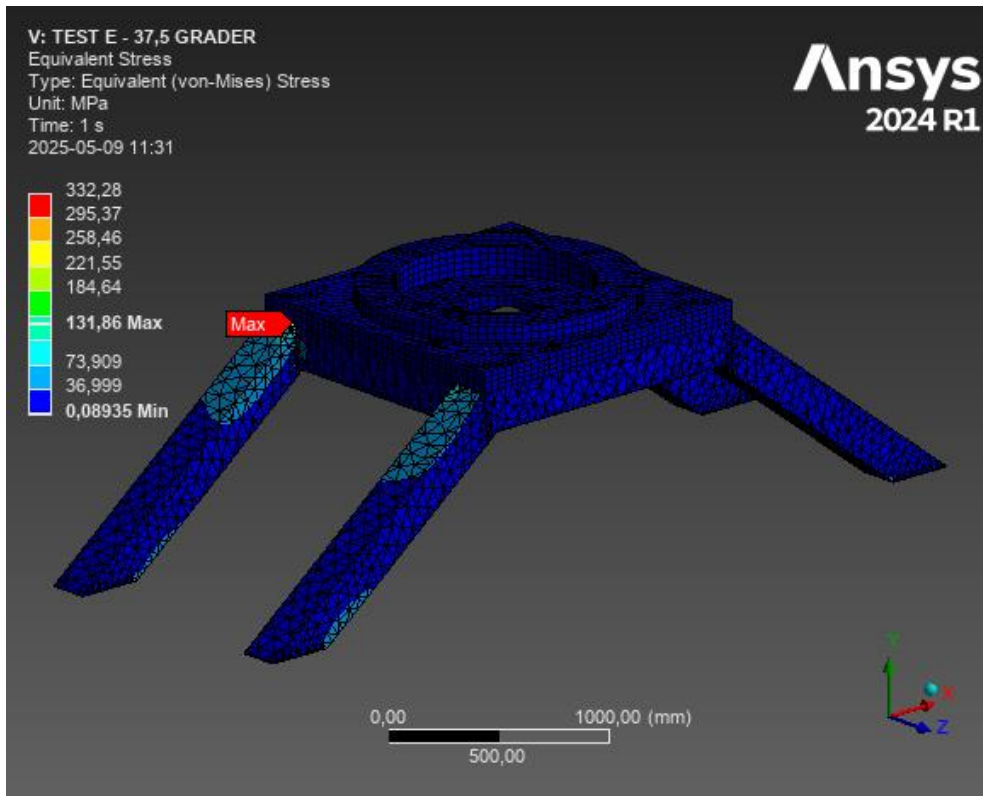


Deformation

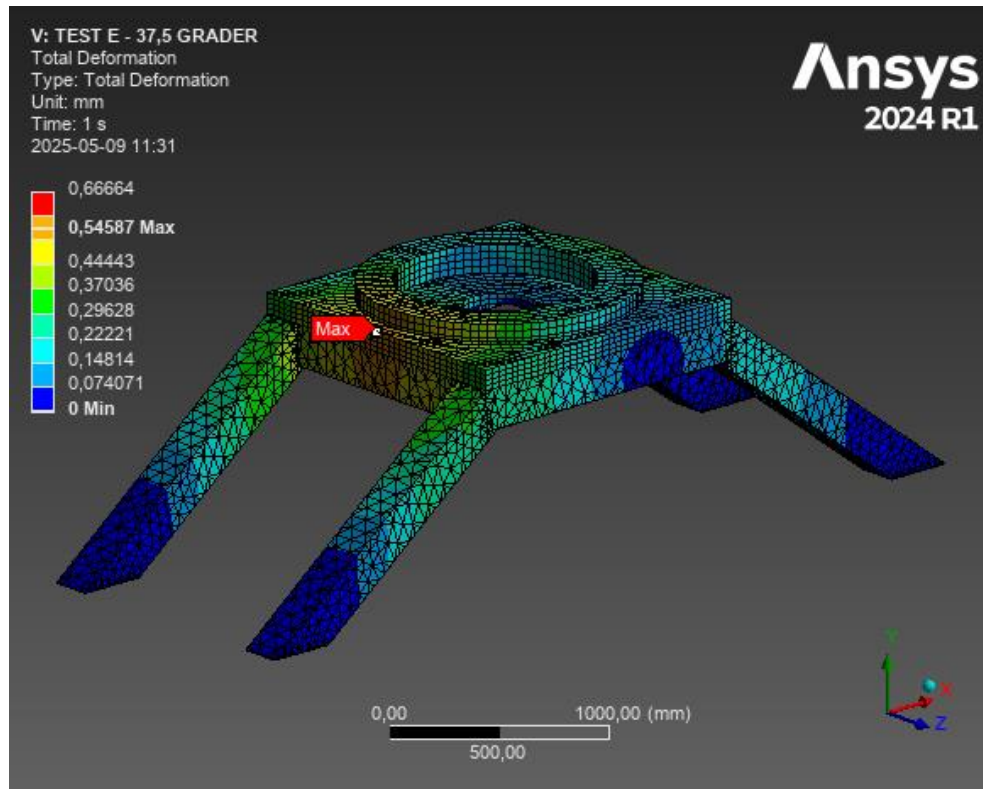


37,5 Grader

Von-Mises



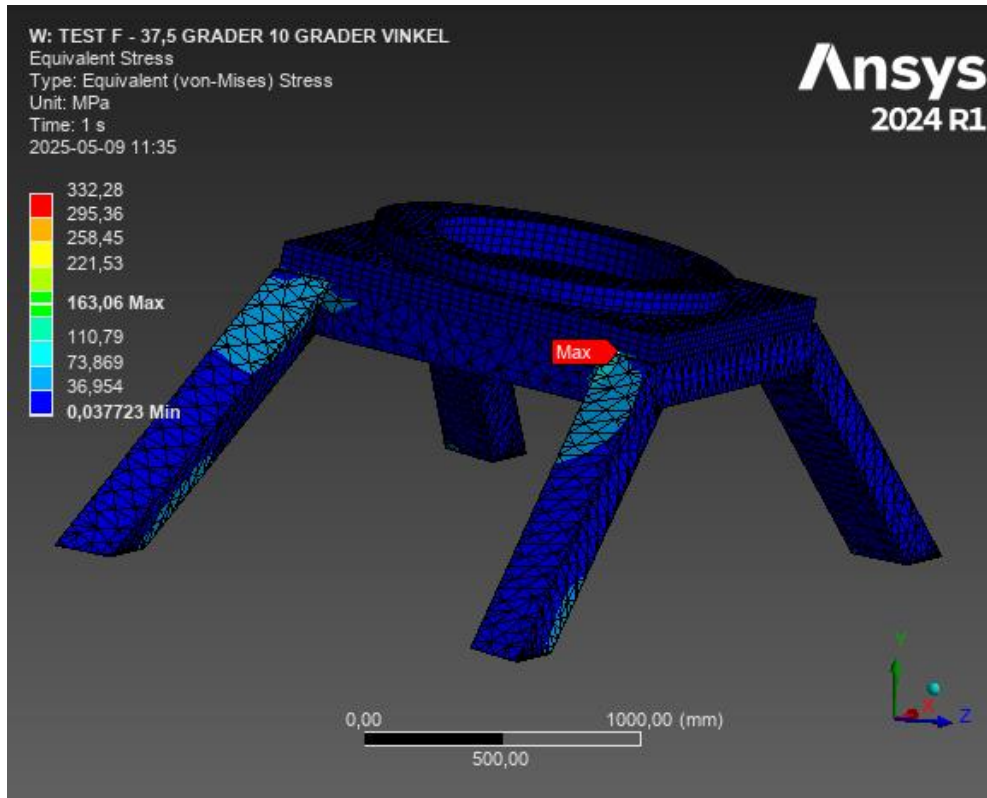
Deformation



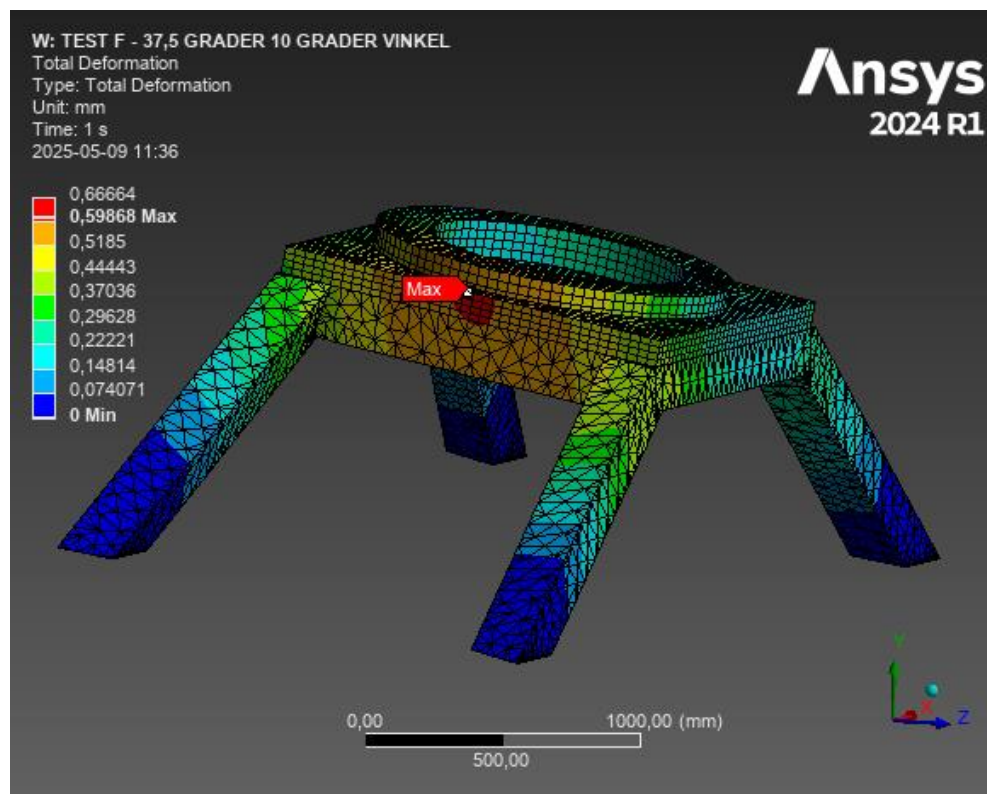
Bilaga C – Test vinklar utåt

37,5 Grader med 10 grader vinkel utåt

Von-Mises



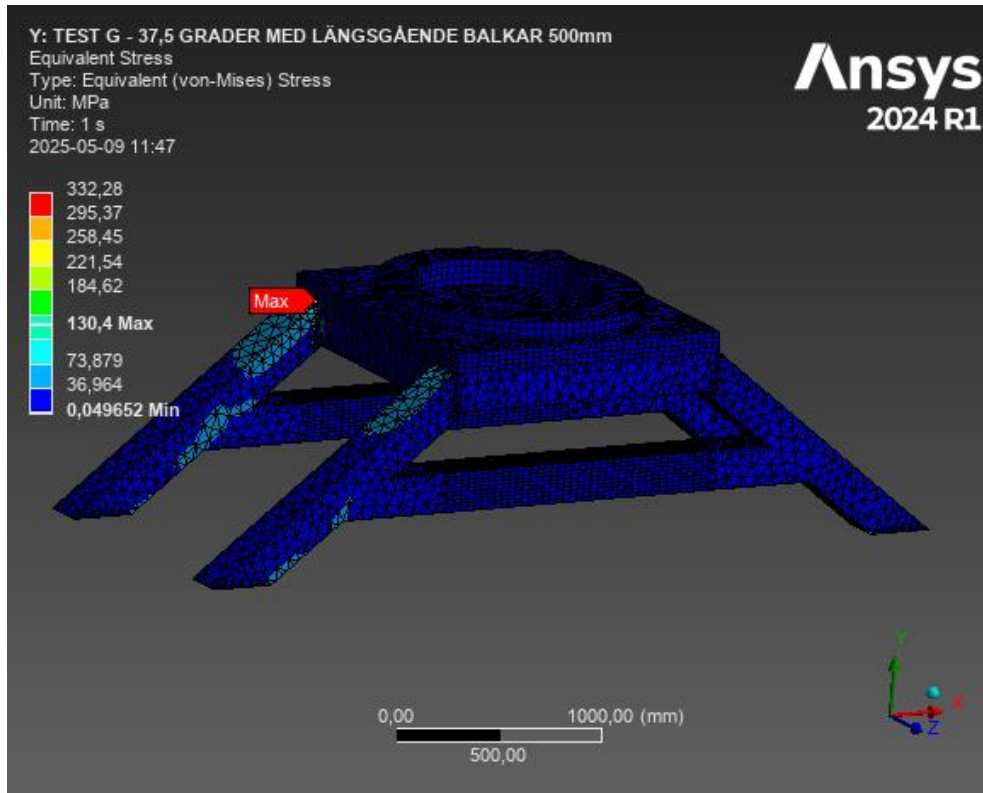
Deformation



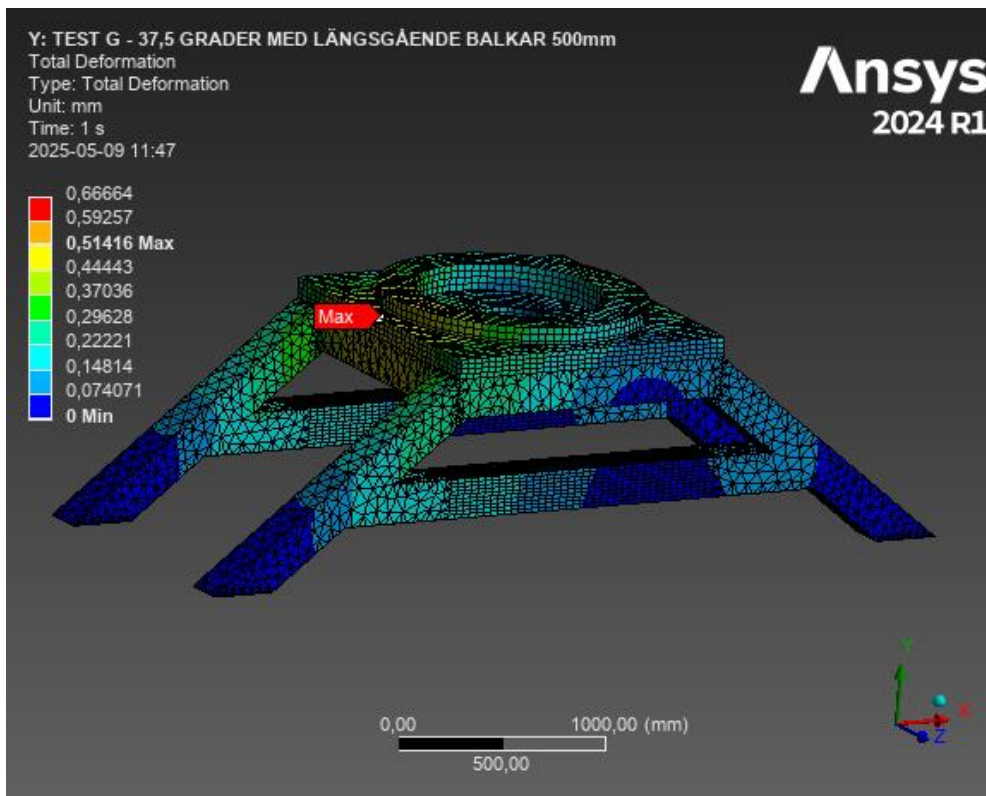
Bilaga D – Test olika balksystem

37,5 Grader längsgående balkar 500mm

Von-Mises

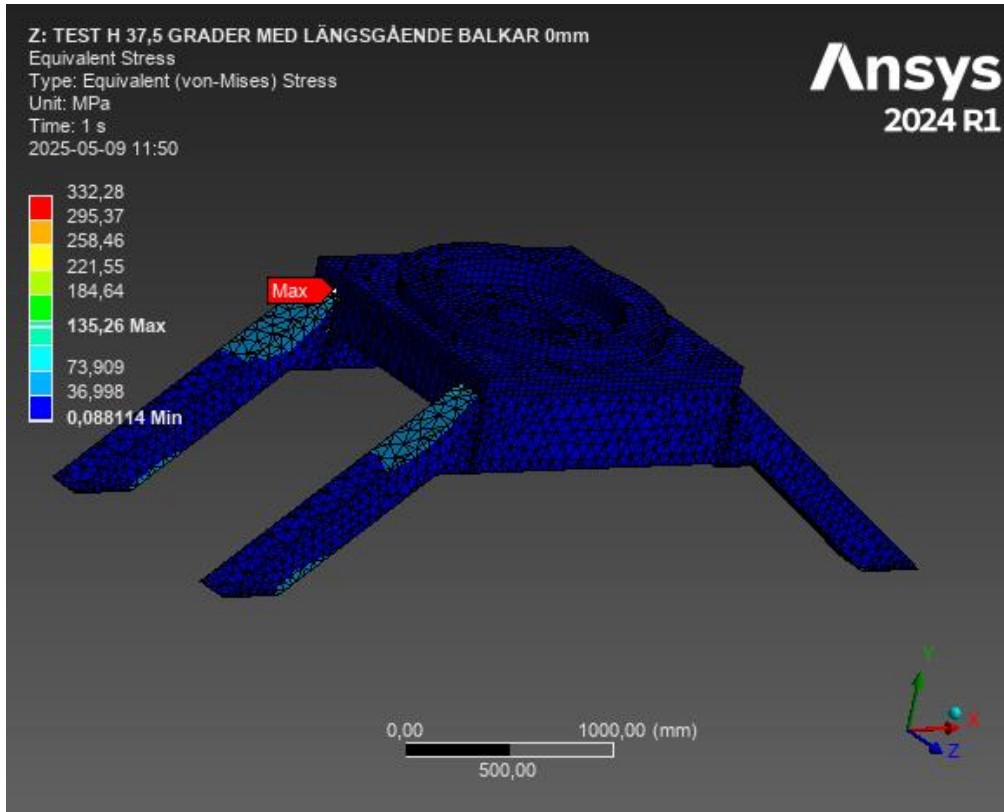


Deformation

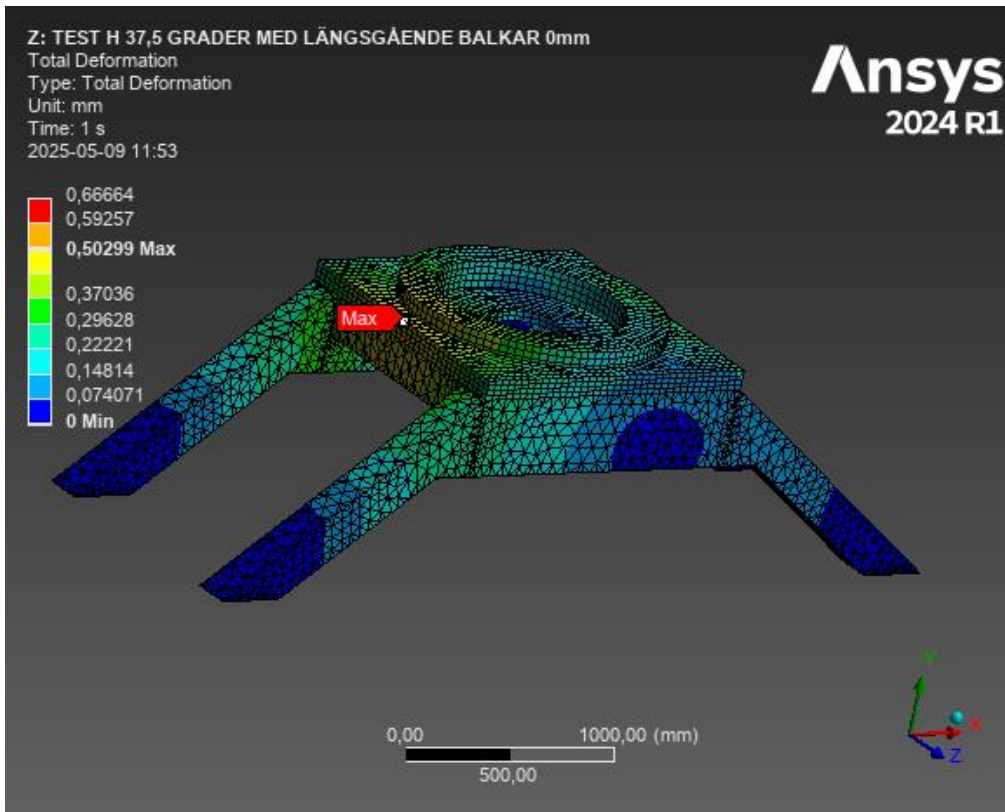


37,5 Grader med längsgående balkar 0mm

Von-Mises

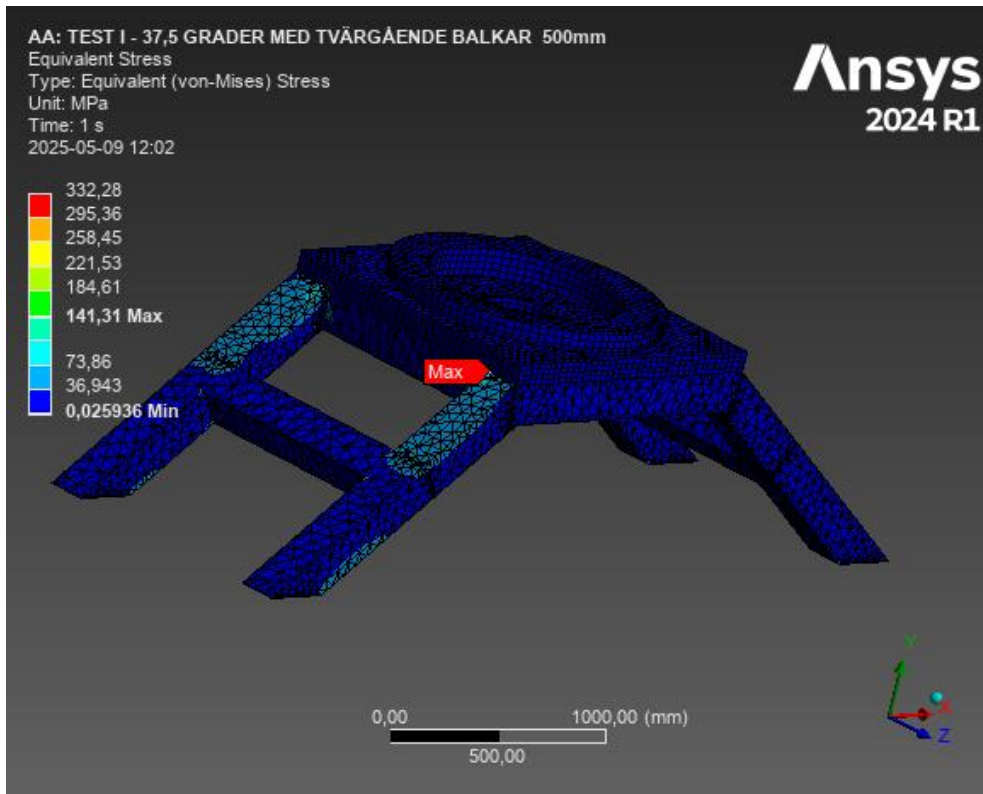


Deformation

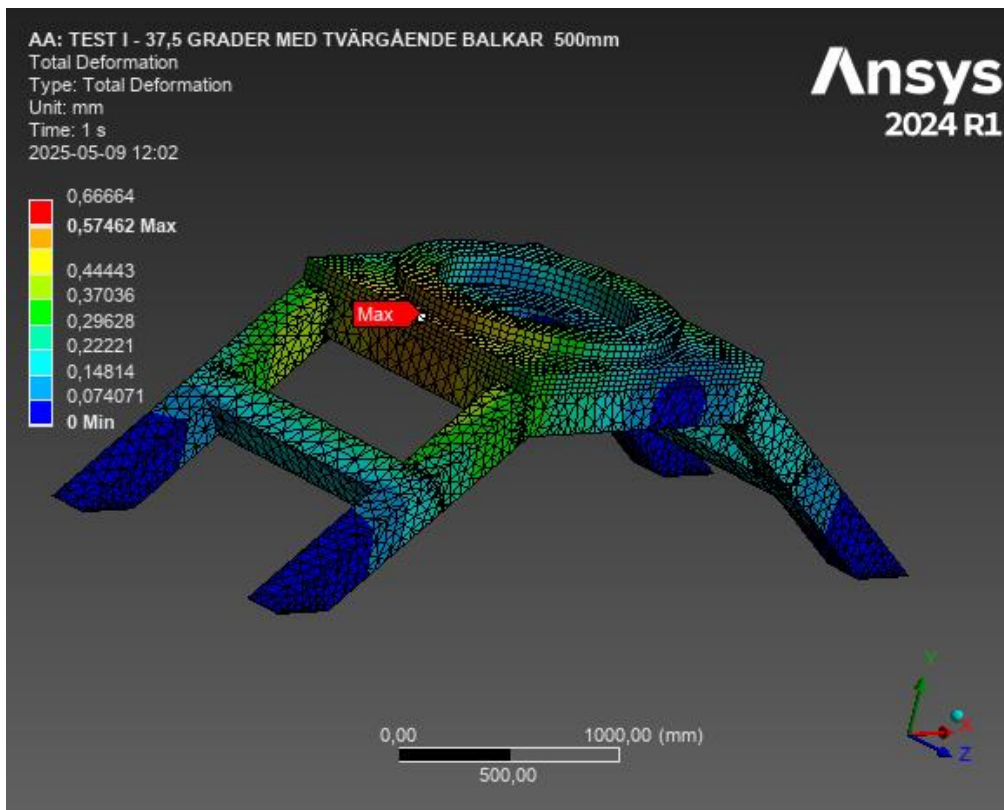


37,5 Grader med tvärgående balkar 500mm

Von-Mises

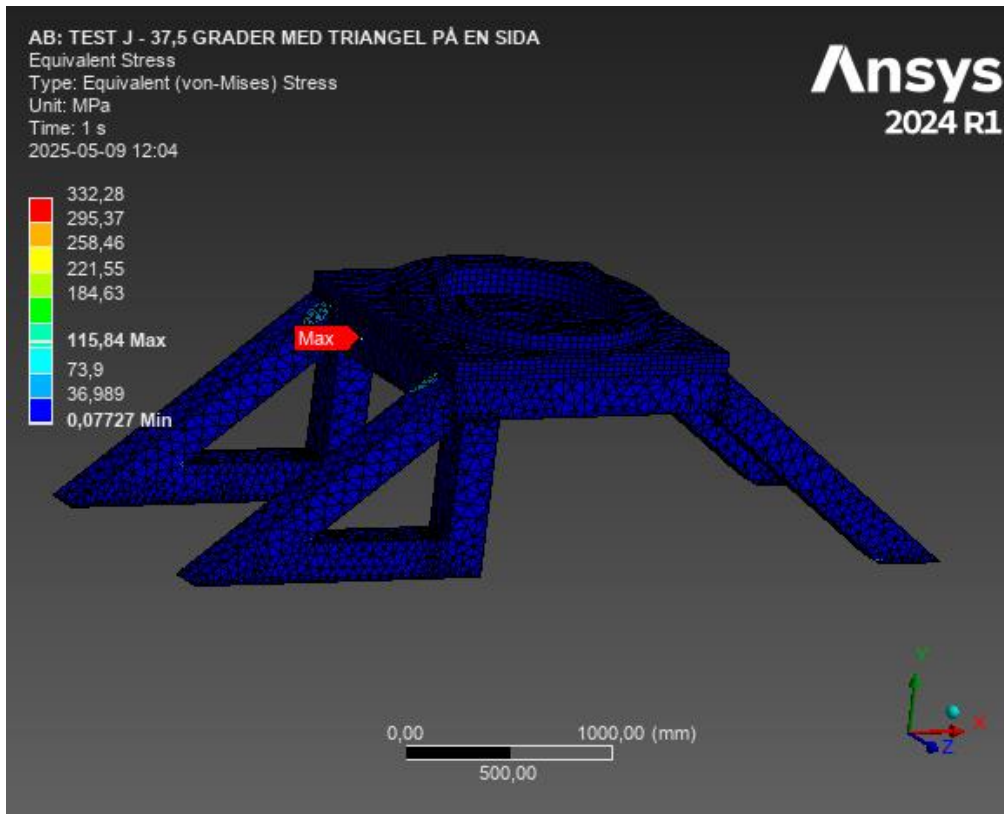


Deformation

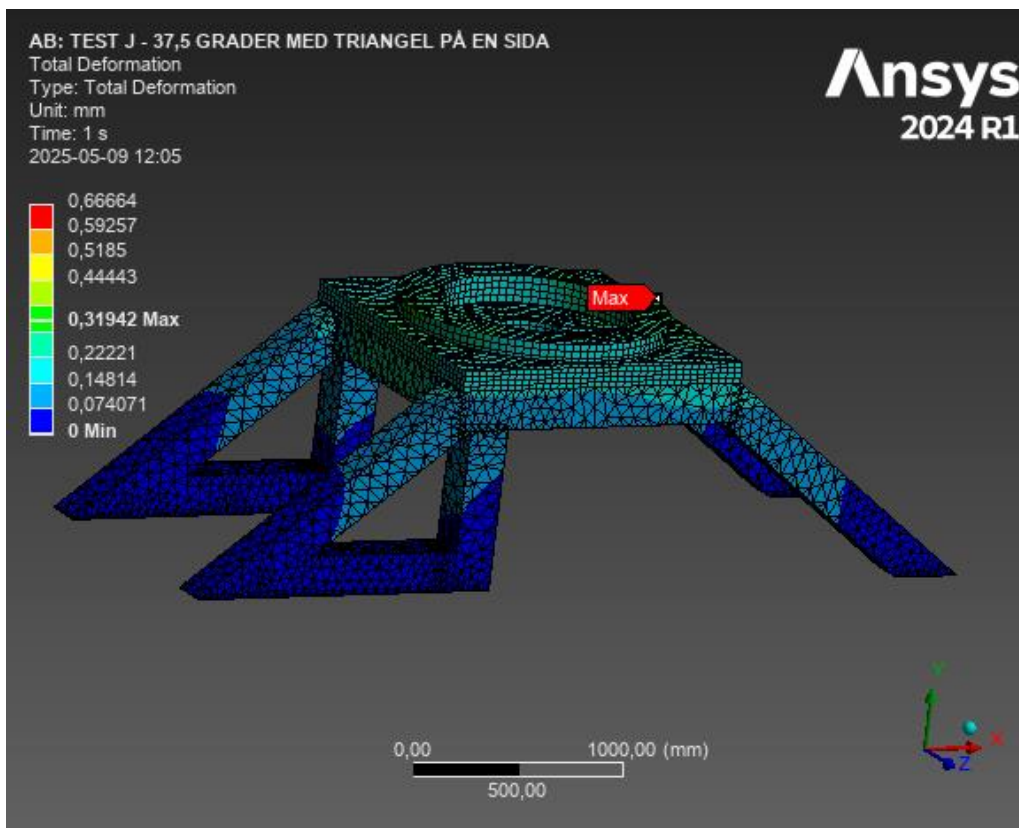


37,5 Grader med triangel på en sida

Von-Mises

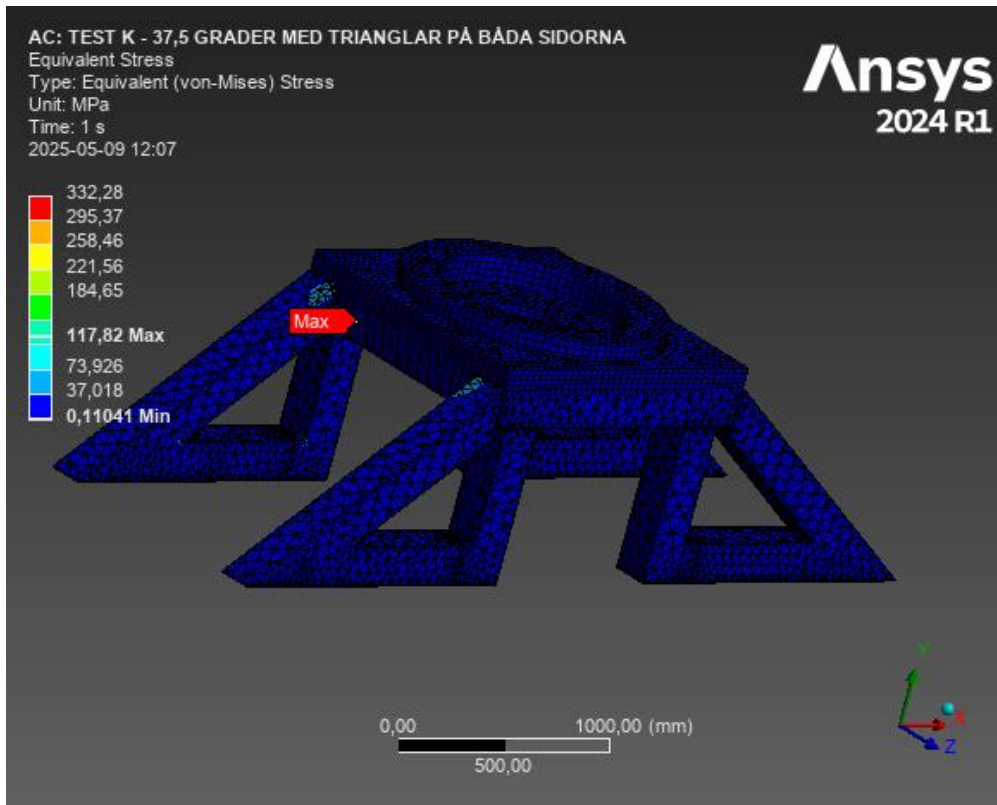


Deformation

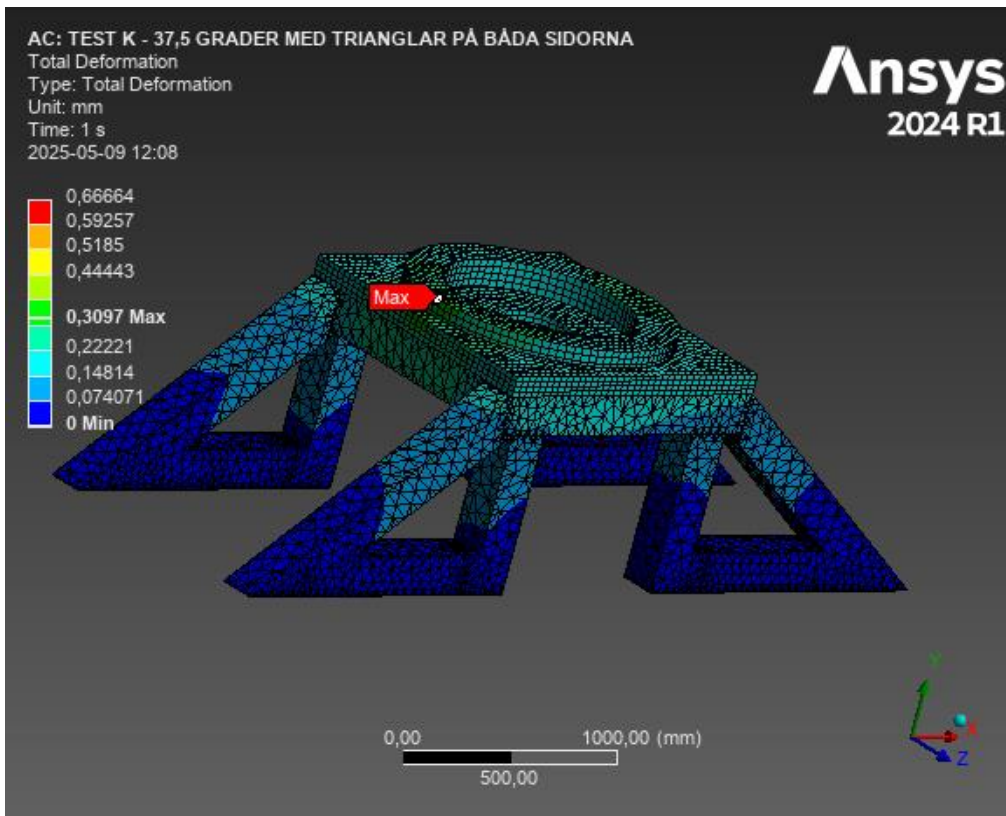


37,5 Grader med triangel på båda sidorna

Von-Mises

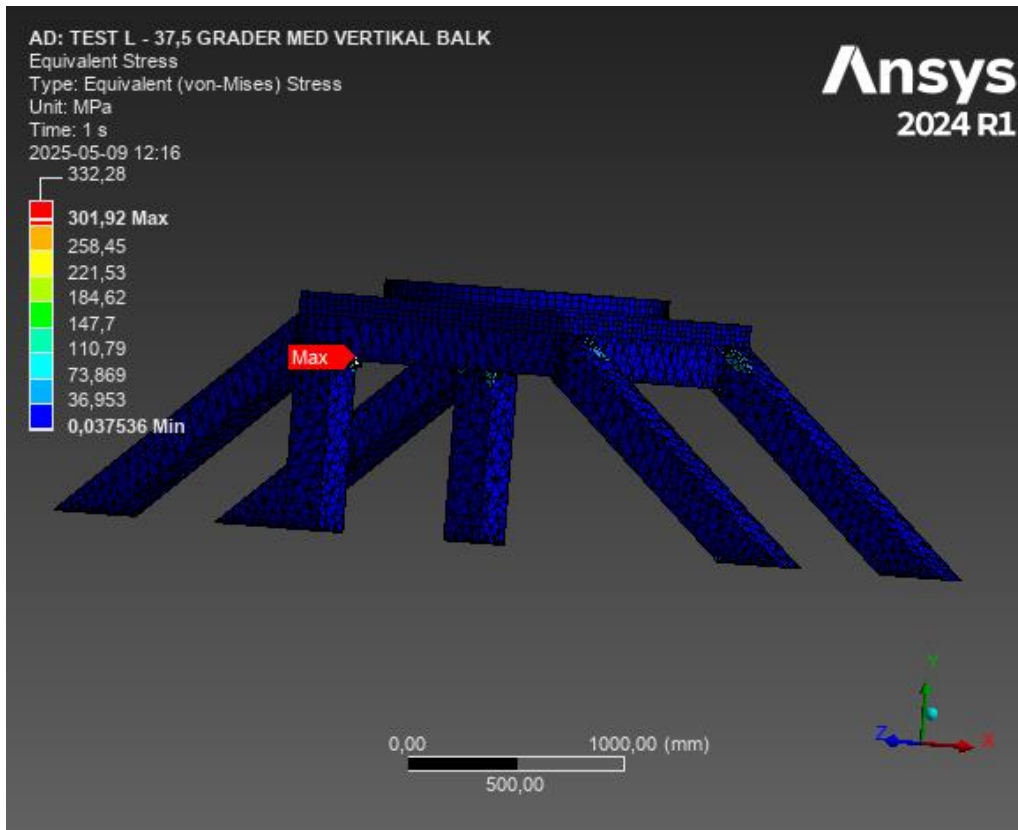


Deformation

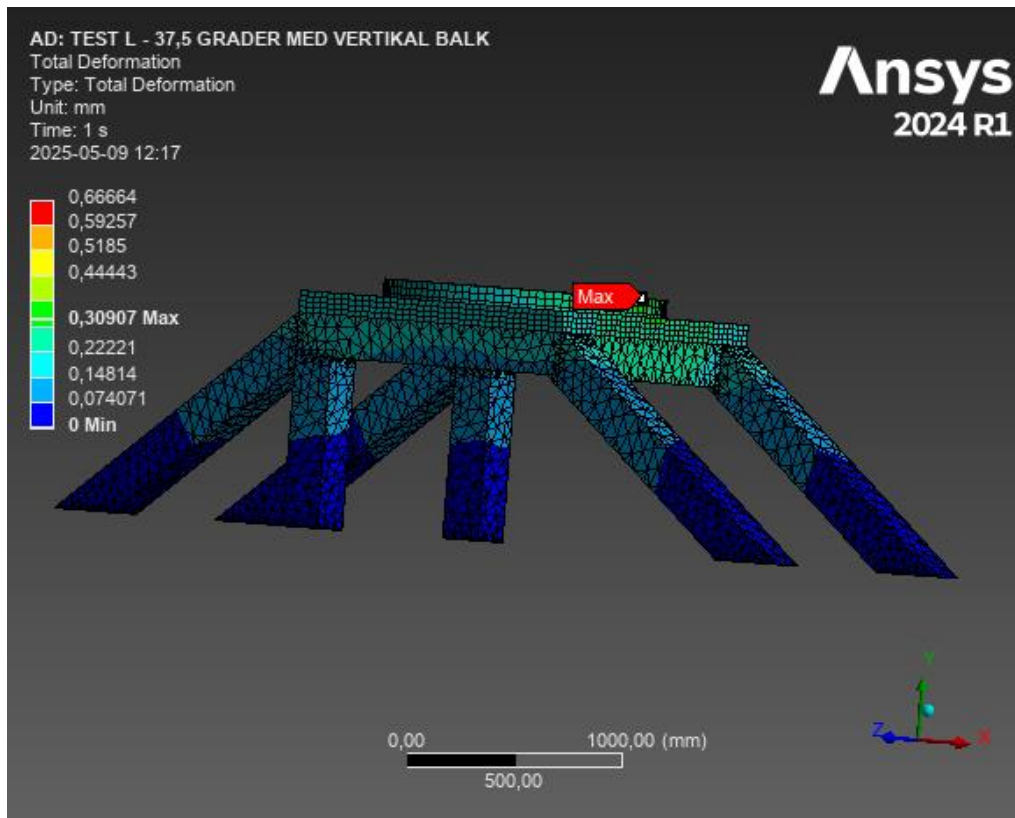


37,5 Grader med vertikal balk

Von-Mises

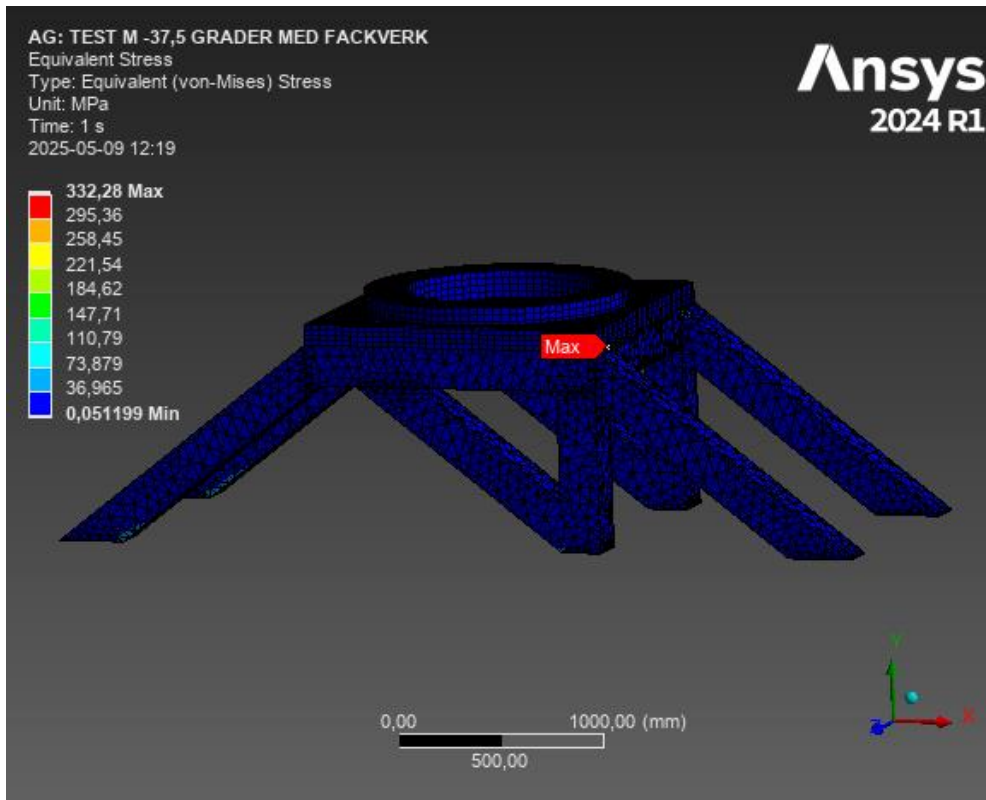


Deformation

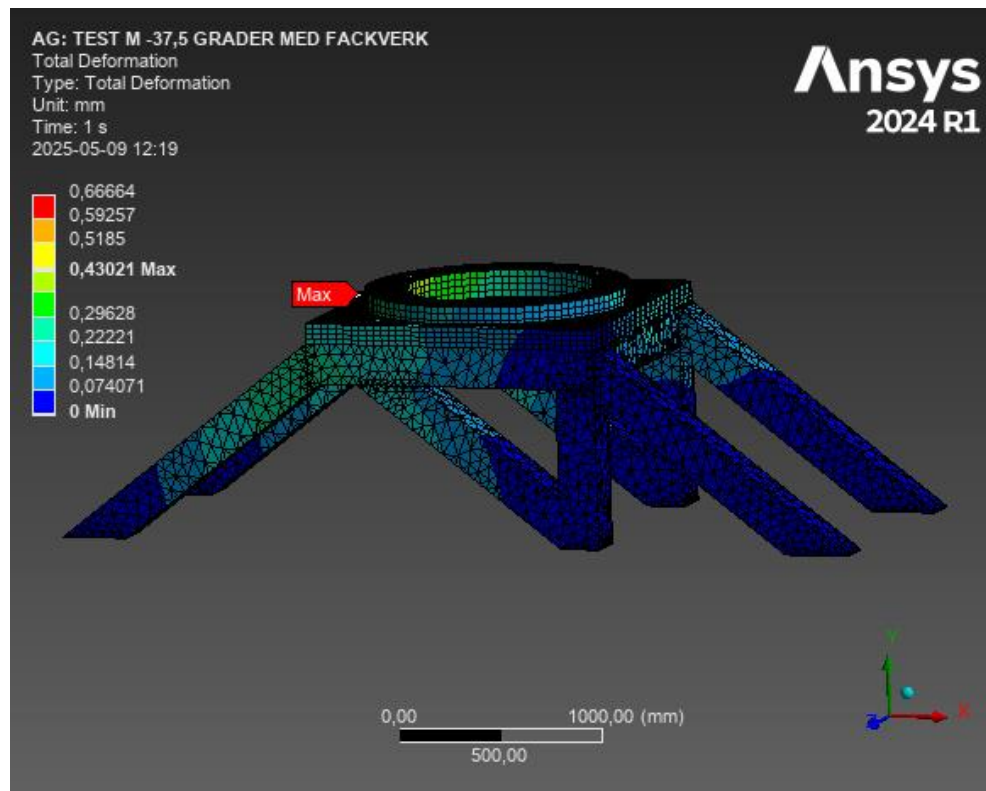


37,5 Grader med fackverk

Von-Mises

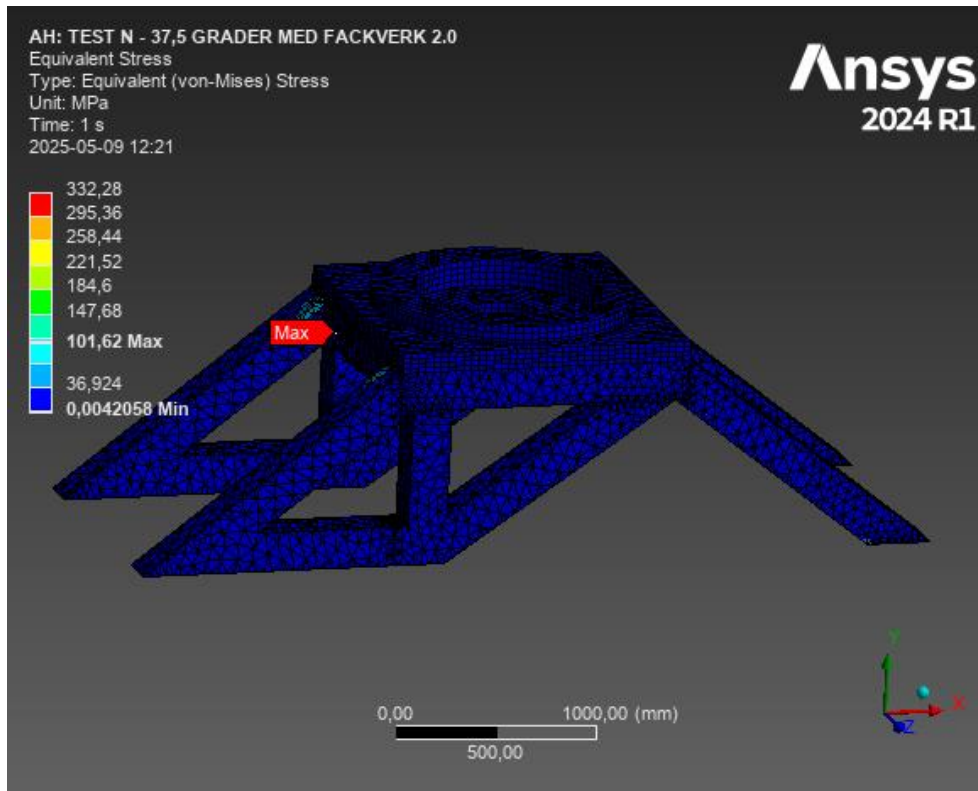


Deformation

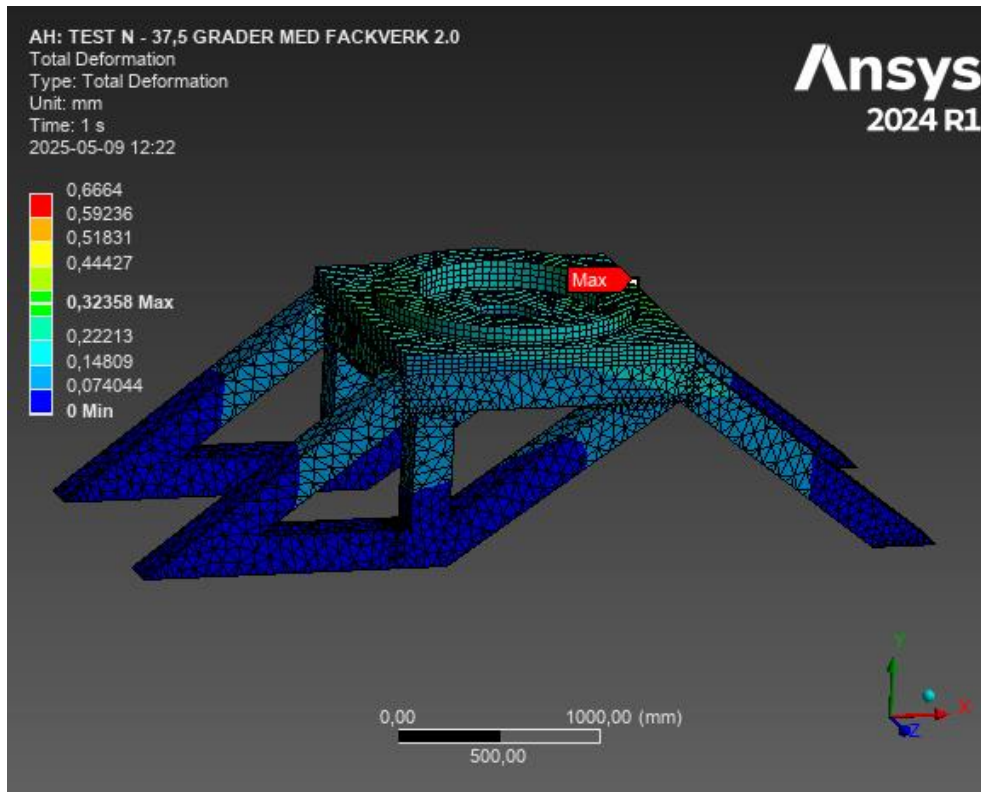


37,5 Grader med fackverk 2.0

Von-Mises



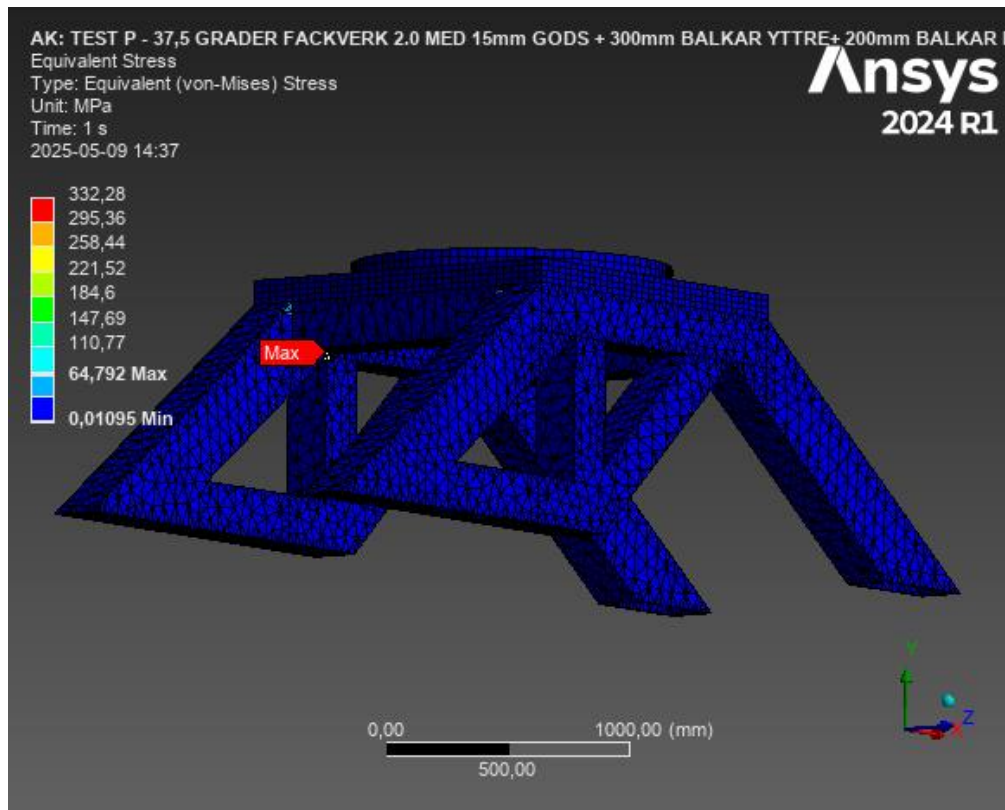
Deformation



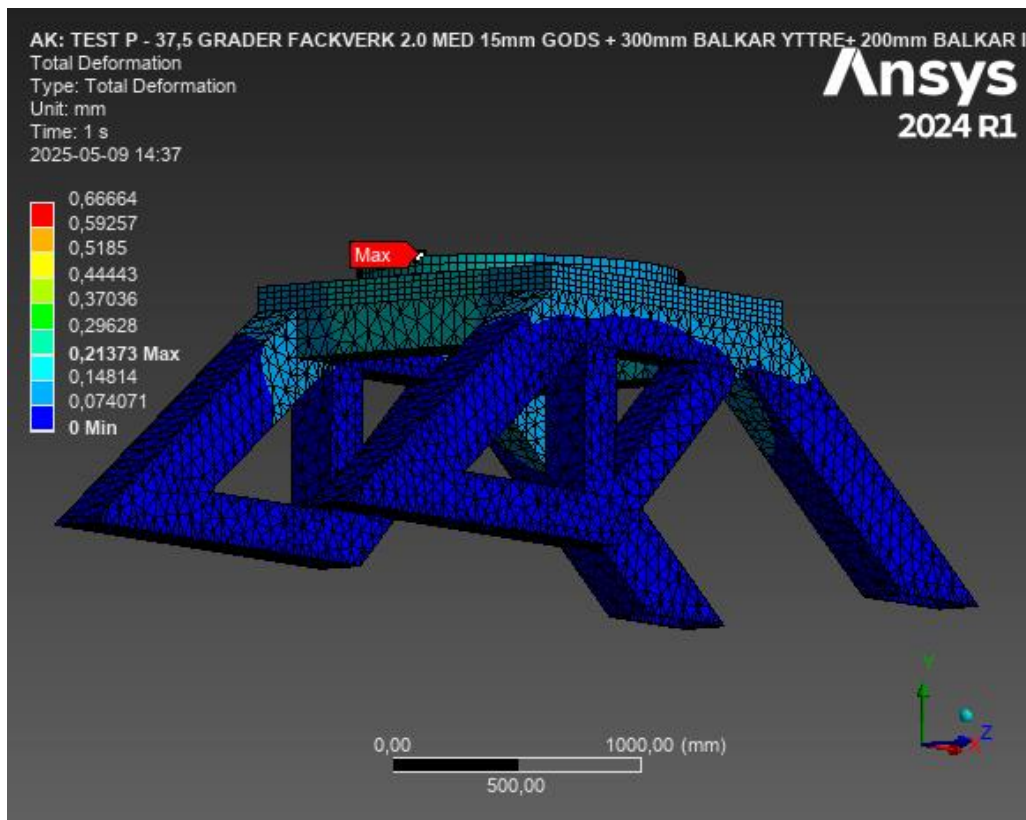
37,5 Grader med fackverk 2.0 med 15mm godstjocklek och balkbredd 300mm yttre + 200 mm

balkbredd inre

Von-Mises

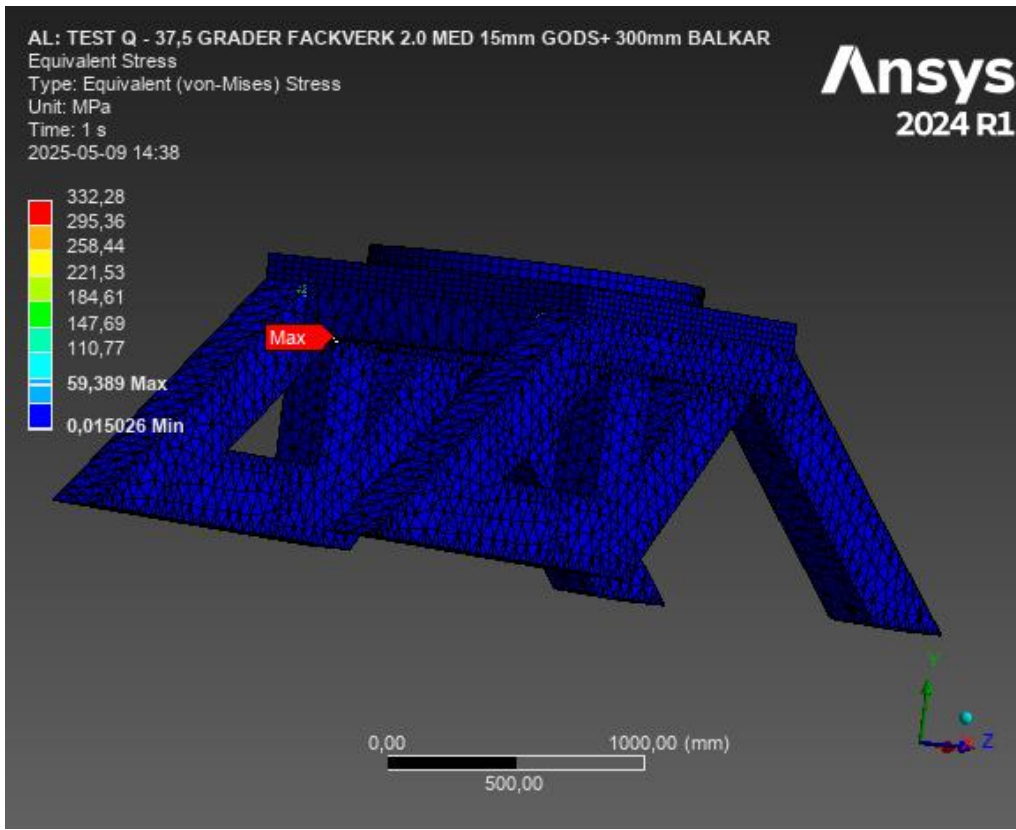


Deformation

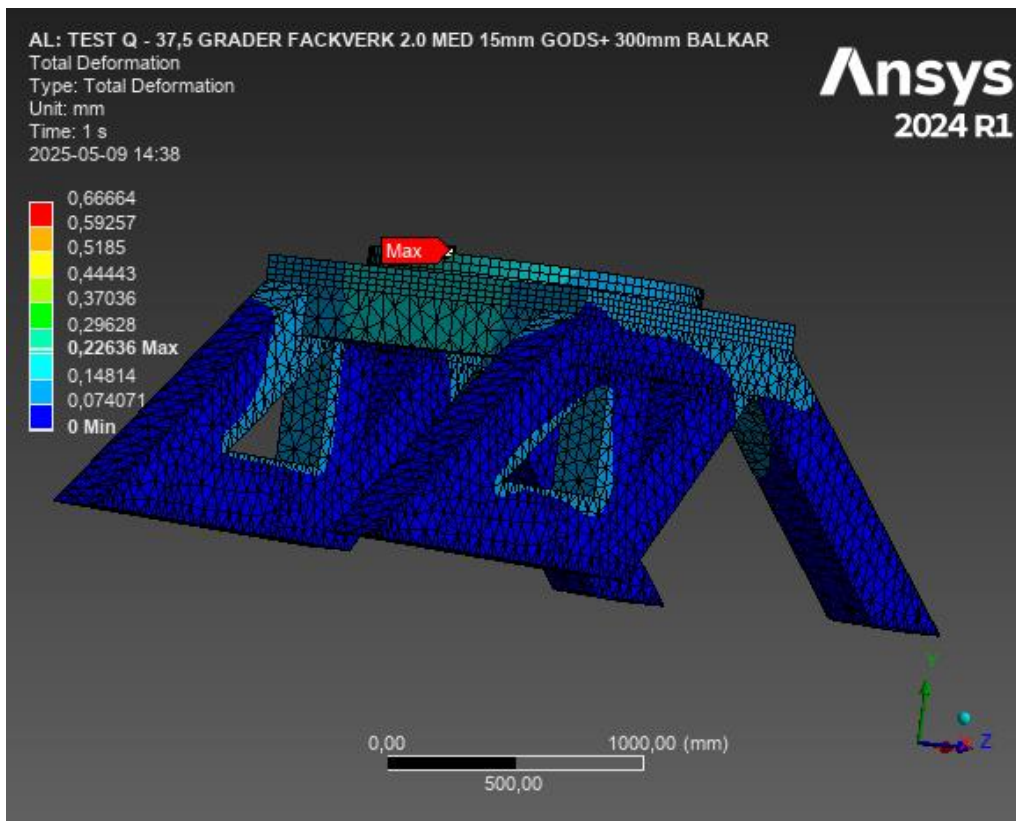


37,5 Grader med fackverk 2.0 med 15mm godstjocklek och balkbredd 300mm

Von-Mises

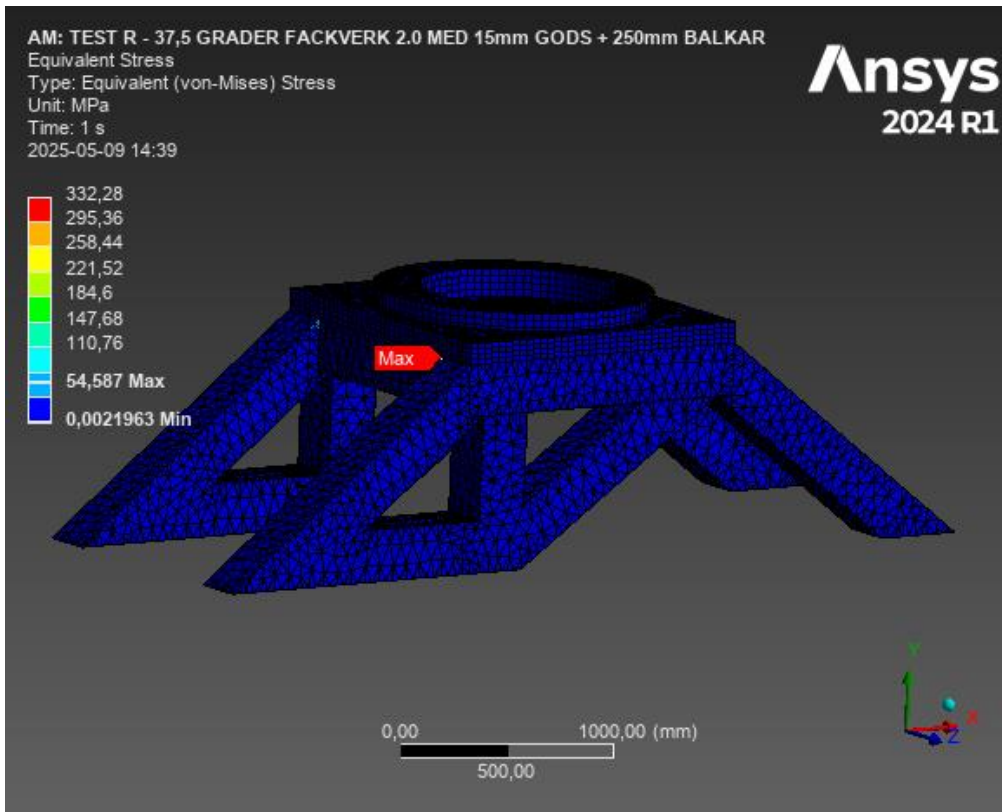


Deformation

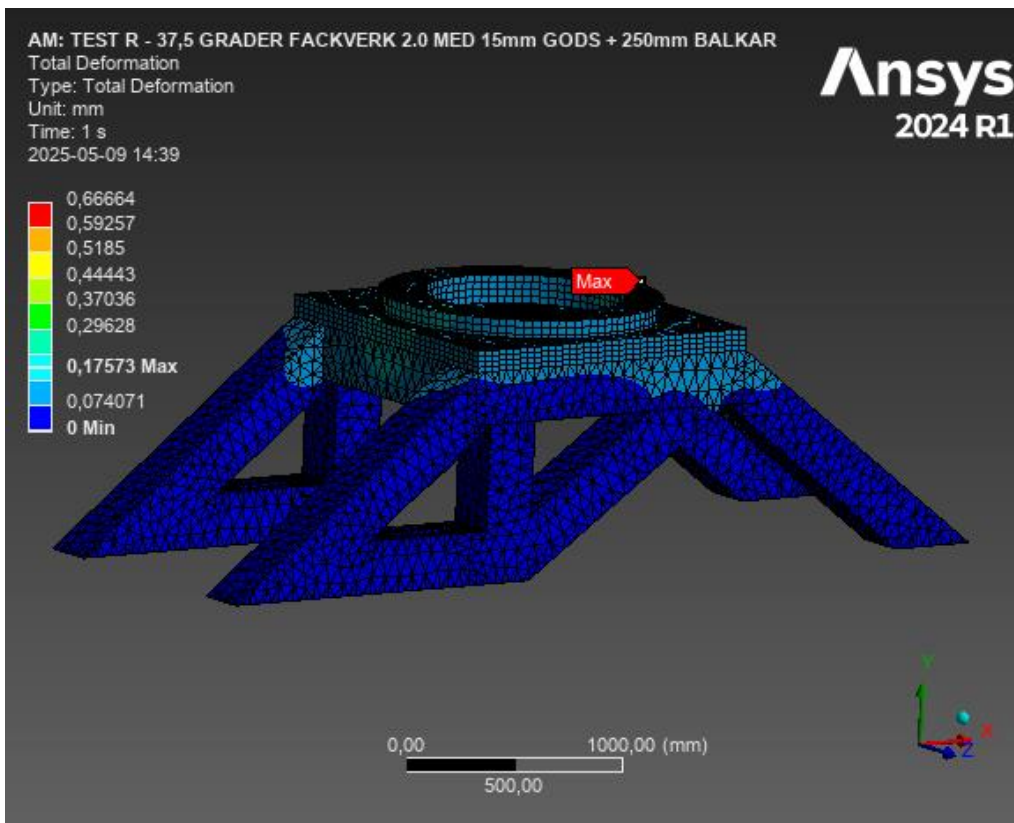


37,5 Grader med fackverk 2.0 med 15mm godstjocklek och balkbredd 250mm

Von-Mises



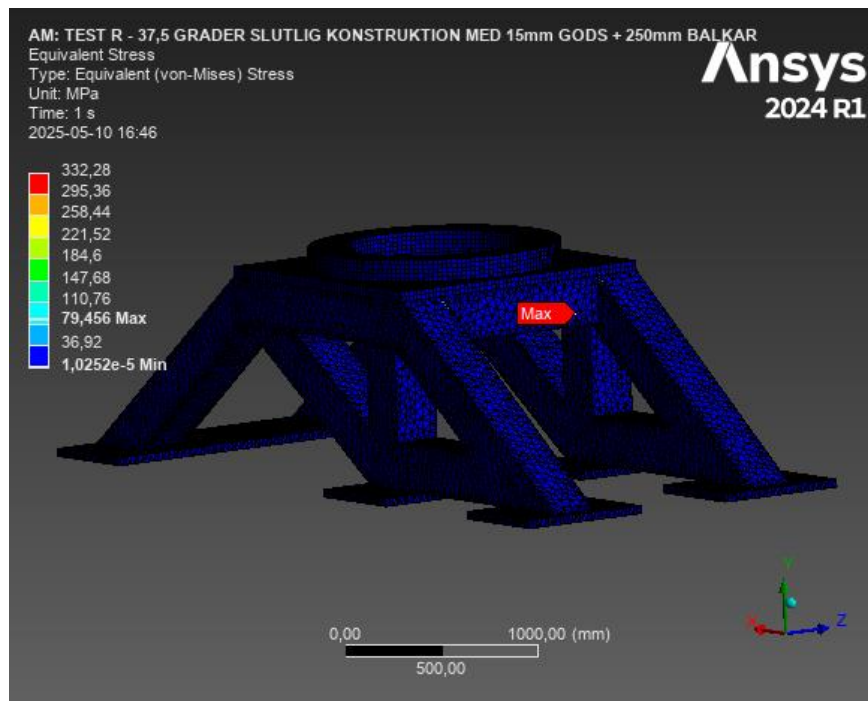
Deformation



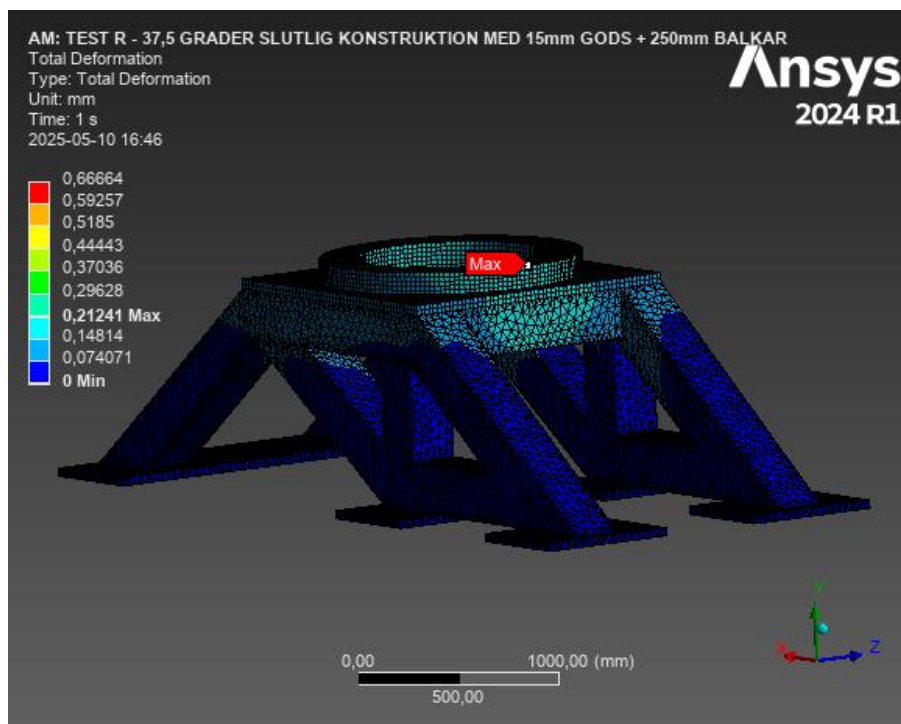
Bilaga F – Test slutlig konstruktion spänningar/deformationer, asymmetriskt lastfall, elevation, utmattning och buckling

37,5 Grader slutlig konstruktion med 15mm godstjocklek och balkbredd 250mm (Tjockleken hos plattan minskades, plattor förseddes under strukturen för infästning mot spårplatta, noggrannare mesh med mer element och noder)

Von-Mises



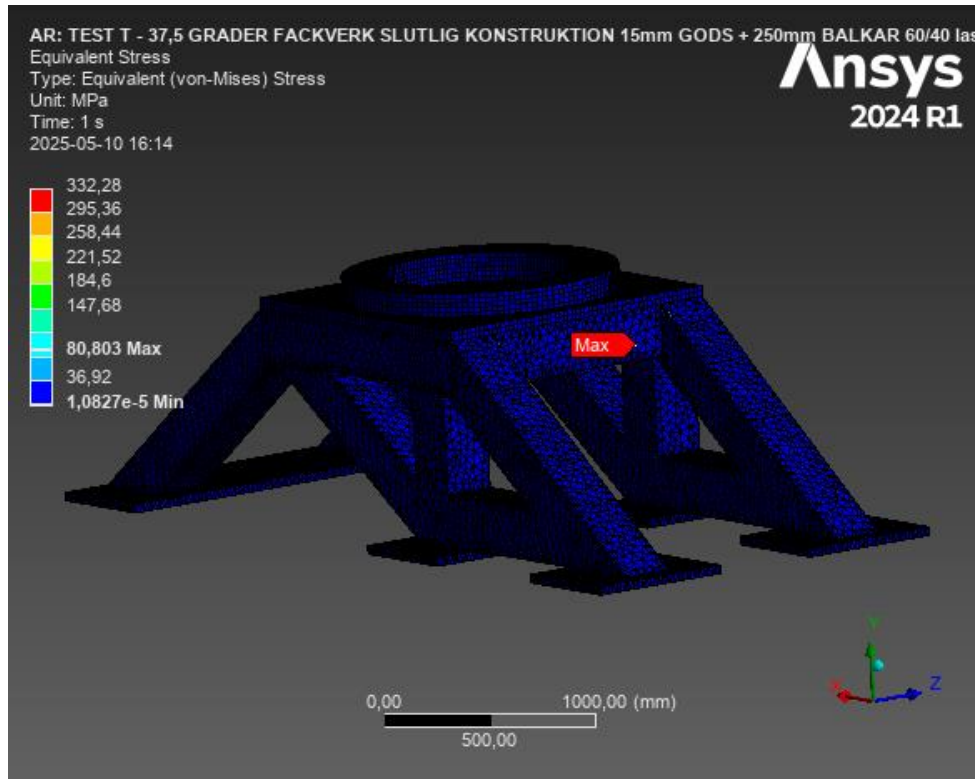
Deformation



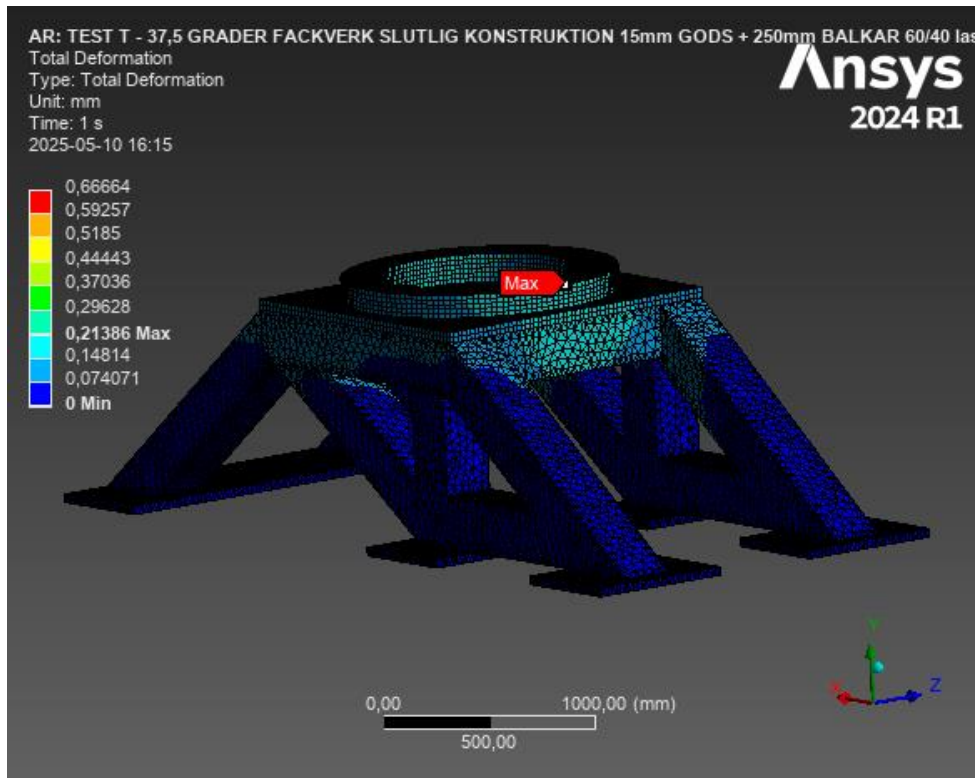
37,5 Grader slutlig konstruktion med 15mm godstjocklek och balkbredd 250mm med 60/40

lastfall

Von-Mises

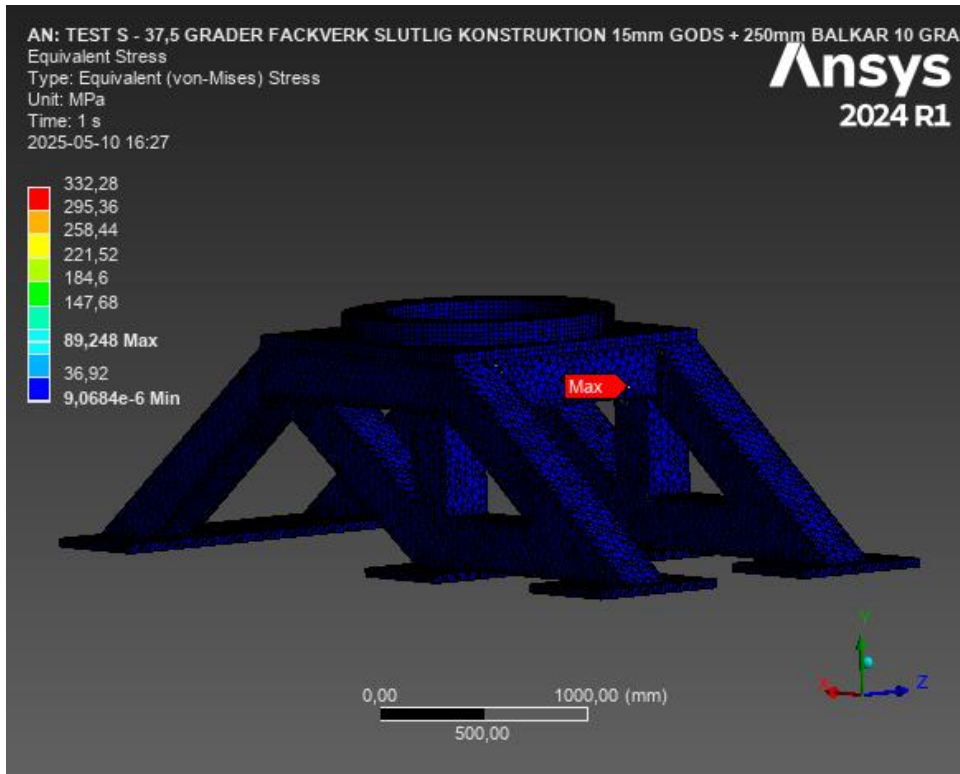


Deformation

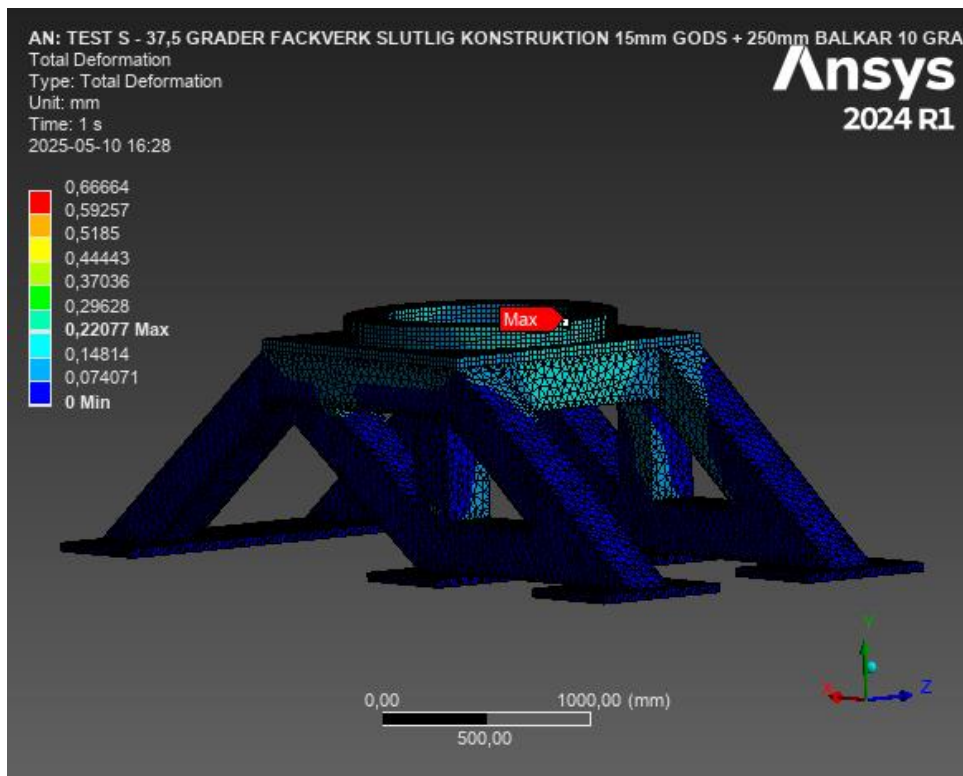


37,5 Grader slutlig konstruktion med 15mm godstjocklek och balkbredd 250mm med 10 grader elevation

Von-Mises

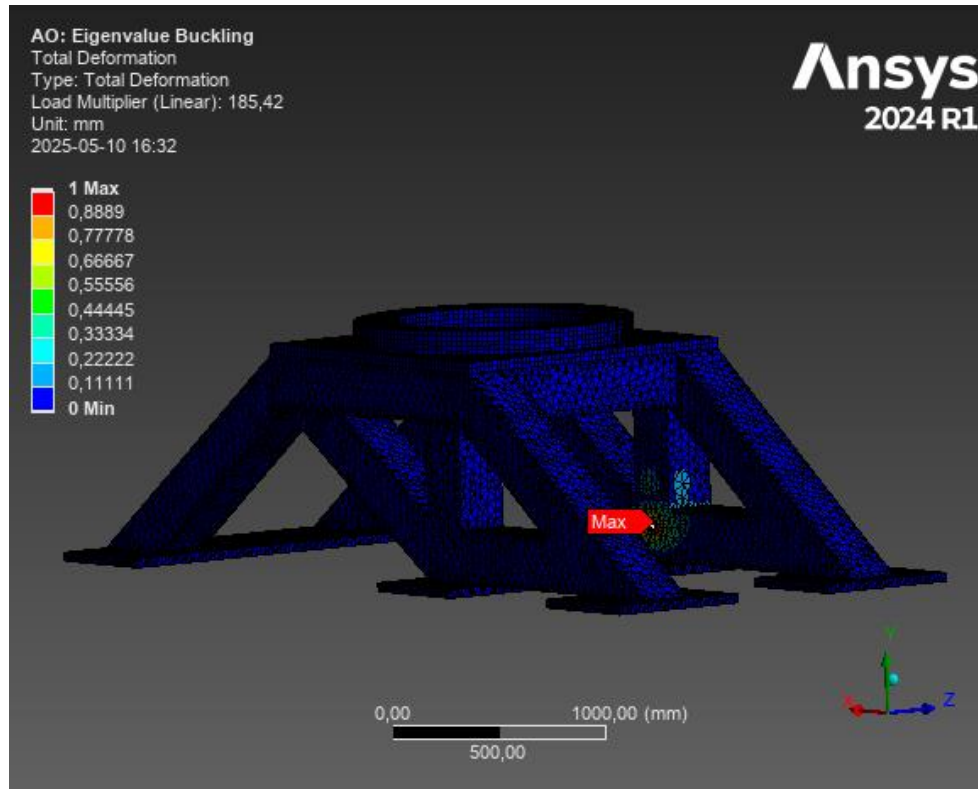


Deformation



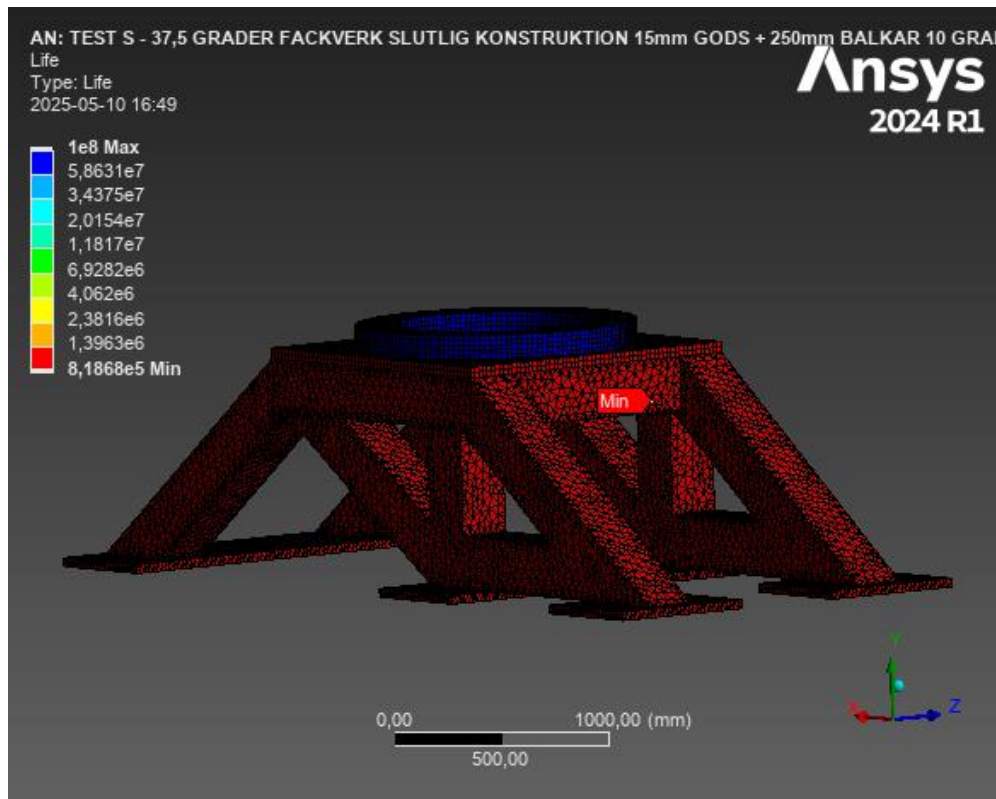
37,5 Grader slutlig konstruktion med 15mm godstjocklek och balkbredd 250mm test mot buckling vid 10 grader elevation

Mode 1 – Endast denna visas på grund av värsta bucklingsfallet

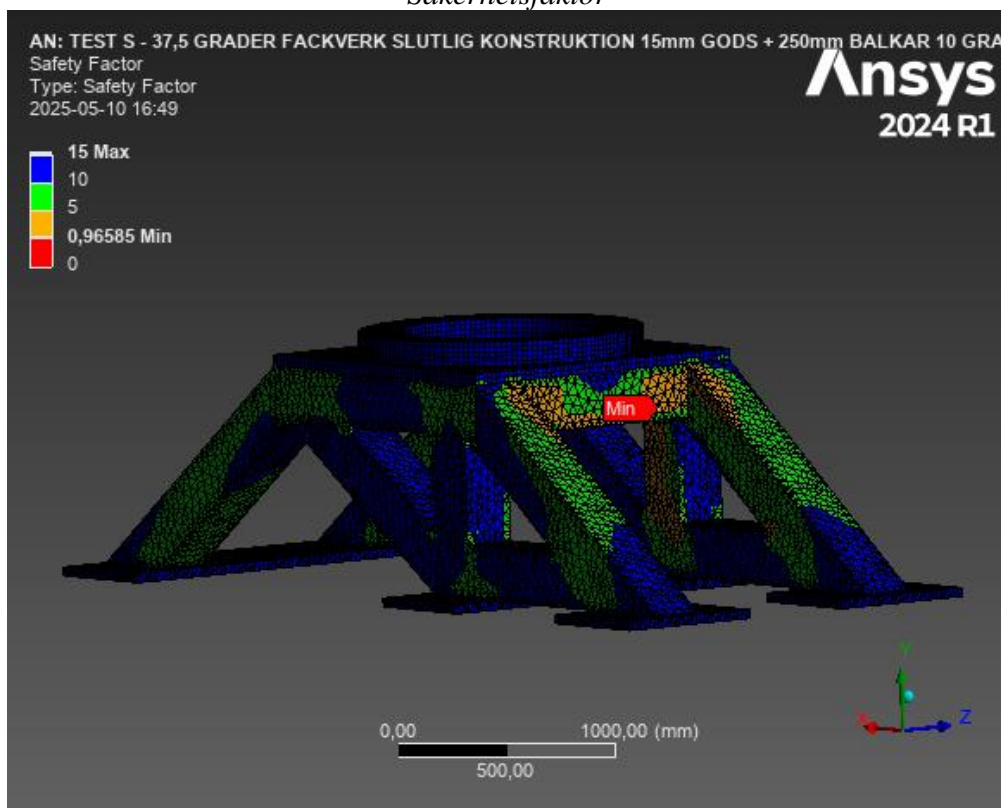


37,5 Grader slutlig konstruktion med 15mm godstjocklek och balkbredd 250mm test mot utmattning vid 10 grader elevation

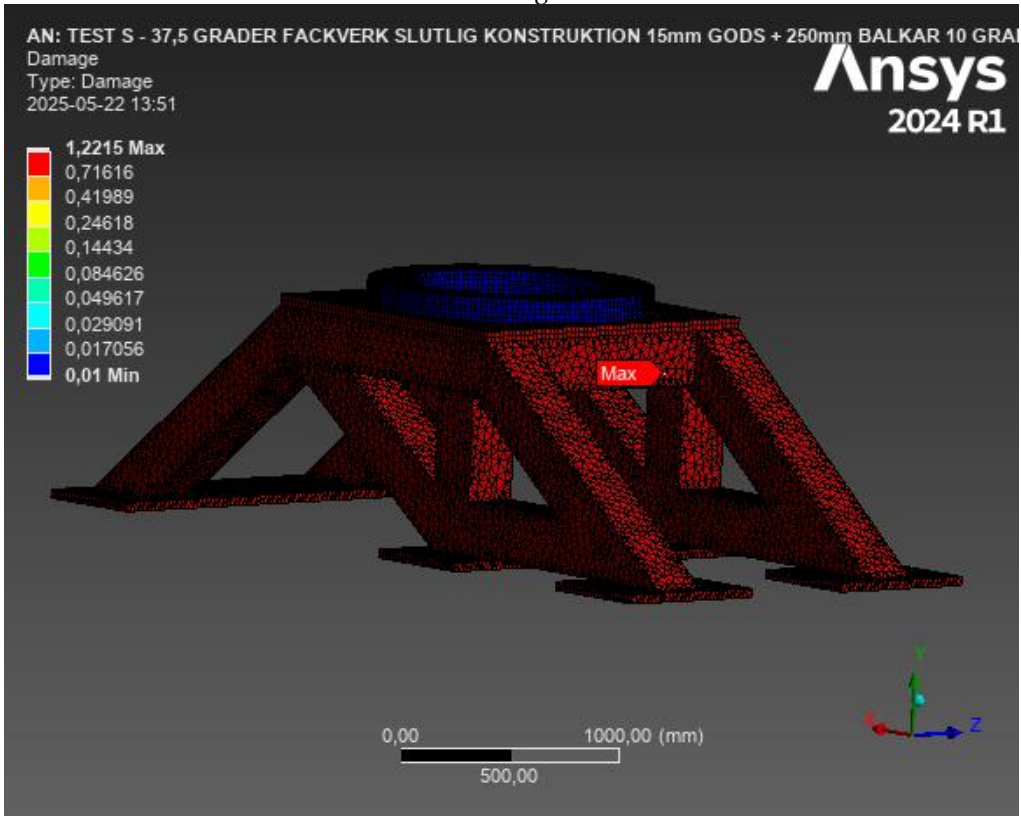
Life



Säkerhetsfaktor

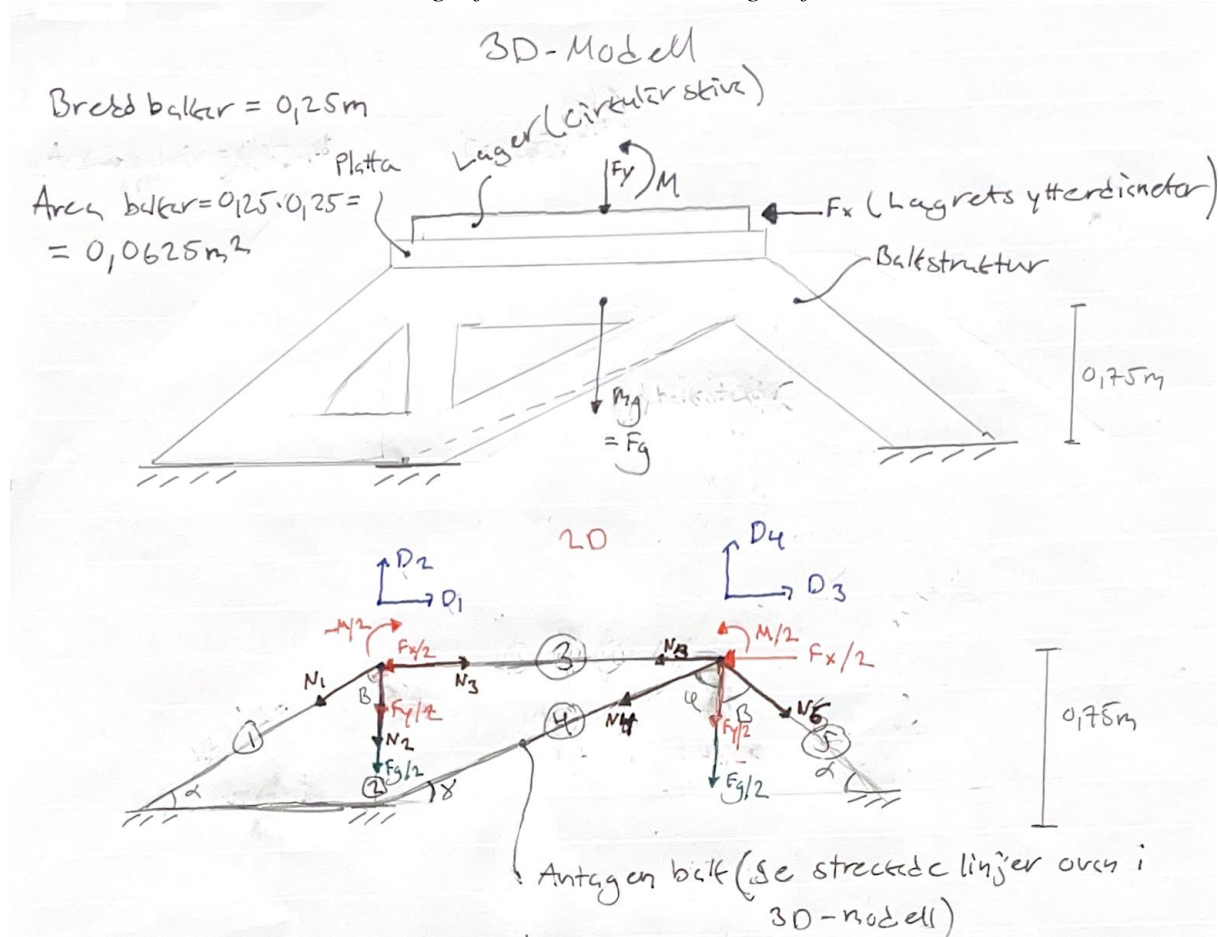


Damage



Bilaga G – Förenklad 2D-modell och python script för 2D – analys

2D – modell handritad för att uppställning av knutförskjutningsmatrisen, lastvektorn, stångdeformationer och stångkrafter



Python script för 2D – Analysen som beräknar matriserna för slutliga resultaten av knutförskjutningar och spänningar i strukturen med hjäl

```
1. import numpy as np
2.
3. B = 0.9163 # Vinkel 52.5° i radianer
4. fi = 1.0647 # Vinkel 61.0° i radianer
5. Fx = ... # Horisontell kraft dividerat med 2 för att vi kollar på en sida (2D)
6. Fy = ... # Vertikal kraft dividerat med 2 för att vi kollar på en sida (2D)
7. Fg = (3362*9.81)/2 # Massa hos balkstruktur + lager + platta, tyngdpunkt i mitten, dividerat med 2
   för att vi kollar på en sida (2D)
8. Moment = ... # Moment dividerat med 2 för att vi kollar på en sida (2D)
9. a = 0.665135 # Hävarm
10. Fm = (Moment)/a # Kraft från momentet
11. E = 200e9 # E-modul
12. Area = 0.25 * 0.25 # Areal
13. L = [1.23201, 0.75, 1.33027, 1.52713, 1.23201] #Längderna L1 till L5
14.
15. # Skapar en 5x5 matris fylld med nollor
16. matrix = np.zeros((5, 5))
17.
18. # Fyller diagonalen med värdena E*A / L_i
19. for i in range(5): #(6)
20.     matrix[i, i] = E * Area / L[i]
21.
22. # At-matrisen
23. At = np.array([[np.sin(B), 0, -1, 0, 0], # Rad 1
24.                [np.cos(B), 1, 0, 0, 0], # Rad 2
25.                [0, 0, 1, np.sin(fi), -np.sin(B)], # Rad 3
26.                [0, 0, 0, np.cos(fi), np.cos(B)]] # Rad 4
27.
28.
29. # Tranformering av At matrisen
30. A=np.transpose(At)
31.
32. # Lastvektorn (P)
33. P = np.array([[ -Fx / 2], [ -Fy / 2 - Fg/2 - Fm/2], [ -Fx / 2], [ -Fy / 2 -Fg/2 + Fm/2]])
34.
35. # Beräkning styvhetsmatrisen K
36. K = At @ matrix @ A
37.
38. # Beräkning inversen av K
39. Kinvers = np.linalg.inv(K)
40.
41. # Beräkning av knutförskjutningar
42. D = Kinvers @ P
43. Dmax = np.max(D)
44.
45. # Beräkning av displacements d
46. d = A @ D
47. dmax = np.max(d)
48.
49. # Beräkning av inre krafter N
50. N = matrix @ d
51.
52. # Skriv ut resultaten
53. print("Deformationer D:", D)
54. print("Displacements d:", d)
55. print("Inre krafter N:", N)
56. print('Max deformation i stängerna', dmax)
57. print('Maximal nodförskjutning',Dmax)
```

Bilaga H – Ritning

Ritning – Enklare ritning i skala 1:20 med en vy från sidan, vy från ovan, vy framifrån i skjutriktning samt ett snitt A-A

