



# CHALMERS



## Konstruktionslösning av slagutmattningsrigg för Volvo Technology AB

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet i Maskinteknik

Robin Nilsson

Arvid Sälle

**INSTITUTIONEN FÖR**

**INDUSTRI- OCH MATERIALVETENSKAP / INDUSTRIAL AND MATERIAL SCIENCE**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026

[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)

Konstruktionslösning av slagutmattningsrigg för Volvo Technology AB

Arvid Sälle

Robin Nilsson

© Arvid Sälle, Robin Nilsson (2026)

Institutionen för Industri- och Materialvetenskap

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Omslag: Rendering av CAD-modell av slagutmattningsrigg

Tryckeri: Institutionen för Industri- och Materialvetenskap

Göteborg, Sverige 2026

## Sammanfattning

Slagutmattningsprover är ett värdefullt verktyg för att utvärdera en komponents livslängd under verkliga driftsförhållanden. Testet innebär att två komponenter utsätts för upprepade slag, ofta upp till 1 miljon cykler med konstant anslagsenergi. För att resultaten ska vara tillförlitliga krävs hög noggrannhet samt reproducerbarhet i varje enskilt slag. På Volvo Technology AB har en egentillverkad slagutmattningsrigg använts för att verifiera att en komponent i växellådan klarar cykliska stötbelastningar. På grund av ökad efterfrågan på slagutmattningsprover har ytterligare krav tillkommit, som inte uppnås av befintlig rigg. Därför finns ett behov av att utveckla en mer noggrann och konfigurerbar slagutmattningsrigg som kan användas för flera olika komponenter. Syftet med detta examensarbete är att ta fram en konstruktionslösning för denna testrigg.

Inledningsvis undersöktes den befintliga lösningen tillsammans med uppdragsgivaren med syftet att kartlägga kundkrav och önskemål på den nya lösningen. Ett nytt koncept togs fram genom en systematisk produktutvecklingsprocess, där flera alternativa koncept sållades bort med hjälp av beslutsmatriser. Det slutgiltiga konceptet låg till grund för beräkningar som styrde designprocessen. En testcykel simulerades i LS-DYNA med realistiska CAD-modeller vilket gav ett uppskattat värde på den belastning som riggen behövde dimensioneras för. Resultaten visar att extruderade aluminiumprofiler, särskilt typen 60 x 60 mm Profile 12 från Aluflex, har tillräcklig hållfasthet för den beräknade belastningen.

Designprocessen styrdes av tidigare beräkningar samt kundkrav och önskemål gällande tillverkning och montering. Resultatet är en komplett mekanisk konstruktionslösning, utveckling av ett mätsystem som räknar antal testcykler och stannar systemet vid testets slut rekommenderas som vidare utveckling.

Rapporten är skriven på svenska.

**Keywords:** Teknisk design, FEM-simulering, produktutveckling, CAD, pneumatik, maskinkonstruktion, testrigg

## Abstract

Impact fatigue testing is an important tool for evaluating the lifespan of a component under real operating conditions. The test involves two components that are subjected to cyclic impacts, commonly up to 1 million cycles with constant impact energy. To ensure reliable results, high accuracy and repeatability in every impact are needed. At Volvo Technology AB, impact fatigue tests are conducted with a custom, in-house constructed test rig. The results are used to verify that gearbox components can withstand cyclic impact loads. The current impact fatigue test rig fails to meet accuracy and repeatability requirements. Because of this, there is a demand for a new, more accurate and flexible impact fatigue test rig that can be used for various components. The purpose of this degree project is to develop a design solution for this test rig.

The work was initiated by examining the current solution together with the client, with the aim of identifying customer requirements. A new concept was developed through a structured product development process where different concepts were evaluated and refined using decision matrices. The final concept formed a basis for calculations, which formed the basis for the design process. The impact was simulated in LS-DYNA using realistic CAD models which provided an estimate of the load that the rig needs to withstand. The results showed that extruded aluminum profiles, especially the 60 x 60 mm Profile 12 from Aluflex have sufficient strength to meet the calculated load.

The design process was guided by earlier calculations and customer requirements and needs regarding manufacturing and assembling. The result is a complete mechanical design solution, development of a system that counts the number of test cycles and stops the test at the right time is recommended as further development.

The report is written in Swedish.

**Keywords:** Technical design, FEM simulations, product development, CAD, pneumatics, mechanical engineering, test rig

## Förord

Denna rapport beskriver ett examensarbete på 15 högskolepoäng genomfört vid Chalmers Tekniska Högskola, i samarbete med Volvo Technology AB under vårterminen 2026.

Vi vill rikta ett stort tack till handledare Martin Sundberg samt tekniska stödpersoner Johan Söderström, Hans Froom och Muhammad Kashif vid Volvo Technology AB för deras värdefulla stöd och vägledning under arbetets genomförande. Vi vill även tacka examinatorn Ragnar Larsson.

*Göteborg, juni 2026*

*Arvid Sälle och Robin Nilsson*

# Innehållsförteckning

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 1. Inledning.....                                              | 1  |
| 1.1 Bakgrund .....                                             | 1  |
| 1.2 Problemformulering .....                                   | 1  |
| 1.3 Syfte .....                                                | 2  |
| 1.4 Avgränsningar .....                                        | 2  |
| 2. Metod .....                                                 | 3  |
| 2.1 Utvärdering av befintlig lösning .....                     | 3  |
| 2.2 Kartläggning av krav och önskemål från uppdragsgivare..... | 3  |
| 2.3 Informationsinsamling .....                                | 3  |
| 2.4 Idégenerering.....                                         | 4  |
| 2.5 Grundläggande beräkning .....                              | 4  |
| 2.6 Eliminering.....                                           | 4  |
| 2.7 Funktionsanalys.....                                       | 4  |
| 2.8 Konceptval och utveckling.....                             | 5  |
| 2.9 Beräkning .....                                            | 5  |
| 2.10 Design och materialval.....                               | 5  |
| 2.11 FEM-analys .....                                          | 6  |
| 2.11.1 Ram .....                                               | 6  |
| 2.11.2 Rörlig del.....                                         | 8  |
| 2.12 Utvärdering av konstruktionslösning .....                 | 9  |
| 3. Förstudie.....                                              | 10 |
| 3.1 Befintlig lösning.....                                     | 10 |
| 3.1.1 Fördelar .....                                           | 11 |
| 3.1.2 Nackdelar .....                                          | 12 |
| 3.2 Kundkrav .....                                             | 14 |
| 3.3 Informationssökning.....                                   | 15 |
| 3.3.1 Hertz kontaktag .....                                    | 15 |
| 3.3.2 Utmattning av metaller.....                              | 16 |
| 4. Resultat.....                                               | 17 |
| 4.1 Genererade lösningar.....                                  | 17 |
| 4.1.1 Vertikal kollision.....                                  | 17 |
| 4.1.2 Horisontell kollision.....                               | 18 |
| 4.1.3 Vertikal kollision med hävarm.....                       | 18 |

|                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.4 Pendel .....                                          | 20  |
| 4.1.5 Svänghjul.....                                        | 20  |
| 4.1.6 Power hammer.....                                     | 21  |
| 4.2 Eliminering av koncept .....                            | 22  |
| 4.3 Konceptval .....                                        | 24  |
| 4.4 Utveckling av valt koncept.....                         | 25  |
| 4.5 Beräkningar .....                                       | 29  |
| 4.5.1 Dynamisk FEM .....                                    | 29  |
| 4.5.2 Beräkningar för pneumatik och ändstoppsdämpare .....  | 30  |
| 4.6 Design och materialval.....                             | 32  |
| 4.6.1 Design av ram.....                                    | 33  |
| 4.6.2 Rörlig del.....                                       | 39  |
| 4.6.3 Hållare för övre- och undre mikrobrytare .....        | 43  |
| 4.6.4 Fästplatta för justerbar fot .....                    | 43  |
| 4.6.5 Hållare för mekaniska stoppen samt mikrobrytare ..... | 44  |
| 4.7 Design av luft och styrsystem .....                     | 45  |
| 4.7.1 Luftsystemet .....                                    | 45  |
| 4.7.2 Styrsystemet .....                                    | 45  |
| 4.8 Val av komponenter .....                                | 47  |
| 5 Utvärdering och rekommendation för vidareutveckling ..... | 50  |
| 5.1 Kravuppfyllnad och teknisk utvärdering.....             | 50  |
| 5.1.1 Kravuppfyllnad.....                                   | 50  |
| 5.1.2 Teknisk utvärdering.....                              | 53  |
| 5.2 Utvärdering av FEM-simuleringar .....                   | 54  |
| 5.3 Rekommendation för vidare utveckling.....               | 56  |
| 6 Slutsats .....                                            | 57  |
| Bilagor .....                                               | i   |
| Referenslista: .....                                        | xix |

# 1. Inledning

I följande kapitel presenteras bakgrund och syfte med examensarbetet samt de avgränsningar och frågeställningar som arbetet utgår ifrån.

## 1.1 Bakgrund

På Volvo Technology AB i Lundby har man behov av att testa växellådskomponenter mot slagutmattning. För att göra detta har en provrigg konstruerats men på grund av tillkomna önskemål har det uppstått ett behov av en ny testrigg.

Arbetet avser utveckling av en konstruktionslösning för en förbättrad slagutmattningsrigg. Den testrigg som finns i nuläget är byggd in-house, av komponenter som funnits på plats. Den är konstruerad för att testa en viss detalj med en bestämd anslagsenergi. Testriggens mätsystem tappar dock ibland räkningen på antalet genomförda provcykler, samtidigt som konstruktionen inte är tillräckligt styv för att med god noggrannhet träffa samma område efter många cykler.

Utmattningsprovning av enskilda växellådskomponenter är viktigt eftersom komponenterna utsätts för ett stort antal belastningscykler och därför måste uppnå tillräcklig livslängd utan att slitas ut. Genom att utföra utmattningstester på komponentnivå kan det verifieras innan den kompletta växellådan tillverkas, vilket både är tids- och kostnadseffektivt.

## 1.2 Problemformulering

Utmaningen ligger i att utveckla en ny slagutmattningsrigg som är tillräckligt styv för att hantera slagkrafter utan att provobjektens kontaktpunkt förflyttas. Slagutmattningsriggen ska kunna testa många olika komponenter, utföra slagutmattningsprover snabbt och ha en tillfredsställande livslängd. I utvecklingsprocessen ingår en produktutvecklingsprocess med idégenerering, sållning och utveckling av koncept där målet är att finna det koncept som bäst möter de krav som ställts. Utöver konceptutvecklingsprocessen behöver konceptet utvecklas till en realiserbar konstruktionslösning med hjälp av CAD-mjukvara och konstruktionsberäkningar.

## 1.3 Syfte

Examensarbetet syftar till att utveckla en konstruktionslösning av en slagutmattningsrigg för slagutmattningsprovning av olika typer av komponenter, som utför tester med god noggrannhet i många cykler. Slagutmattningsriggen ska utföra provet med låg cykeltid och med konstant anslagsenergi vid varje slag, där värdet av lösningen är tidsbesparing samt ökad noggrannhet vid slagutmattningstester med många cykler.

## 1.4 Avgränsningar

Med syfte att hålla examensarbetet fokuserat och genomförbart inom tidsramen har vissa delar medvetet valts bort från arbetets innehåll.

Ingen tillverkning kommer att ske under examensarbetet.

Arbetet avhandlar inte utveckling av fullständiga styr- och mätsystem. Utveckling av styr- och mätsystem är att betrakta endast som grund för framtida utveckling.

Endast ett koncept kommer att väljas ut från produktutvecklingsprocessen för vidare detaljkonstruktion. Det innebär att andra möjliga alternativ inte analyseras eller jämförs i detalj.

Slutligen kommer inte en fullständig lönsamhetsanalys att göras. Bedömningar om driftskostnader, total tillverkningskostnad och återbetalningstid inkluderas inte, då fokus ligger på att utveckla och verifiera en teknisk lösning. En översiktlig uppskattning av tillverkningskostnad kan dock komma att behandlas i begränsad omfattning.

## 2. Metod

I detta kapitel beskrivs den metodik som tillämpats under projektet. Metoden är uppdelad i ett antal delmoment som tillsammans har syftet att säkerställa en strukturerad och systematisk utvecklingsprocess. Kapitlet omfattar analys av befintlig lösning, kravinsamling, informationssökning, generering och utvärdering av koncept samt beräkning, konstruktion och verifiering. Metoden har utformats med erfarenhet av tidigare arbeten i produktutveckling vid Chalmers tekniska högskola.

### 2.1 Utvärdering av befintlig lösning

En grundläggande utvärdering av den befintliga lösningen genomförs för att identifiera problemområden hos den nuvarande konstruktionen, utöver de som nämnts av uppdragsgivaren. Syftet är att identifiera lärdomar från den befintliga lösningen som kan tillämpas vid utveckling av den nya lösningen.

### 2.2 Kartläggning av krav och önskemål från uppdragsgivare

Krav och önskemål på lösningen sammanställs och utvecklas i en kravspecifikation för att tydligt definiera målen med den nya lösningen. Detta görs med tidigare utvärdering av befintlig lösning som utgångspunkt där problemområdena som funnits i utvärderingen utvecklas till konkreta krav som behöver uppfyllas för att åtgärda problemen. Önskemål värderas på en numerisk skala, ett lågt värde ger stor positiv påverkan på resultatet och ett högt värde ger liten positiv påverkan.

### 2.3 Informationsinsamling

Informationssökning görs i syfte att fördjupa kompetens kring arbetsområdet, med fokus på slagutmattning. Information söks från internet, kursmaterial och information från tekniska kontakter på Volvo Technology AB.

## 2.4 Idégenerering

För att skapa olika koncept för att lösa problemet tillämpas en idégenereringsprocess i form av brainstorming. Metoden möjliggör generering av många lösningar utan tidig kritisk filtrering, vilket bedömdes lämpligt i den tidiga konceptfasen.

## 2.5 Grundläggande beräkning

De genererade konceptens relevans kontrolleras genom att beräkna deras förväntade prestanda. Nyckeltal såsom maximal cykeltid och drivsystemsegenskaper beräknas inför kommande konceptval. Syftet är att verifiera konceptens möjlighet att uppfylla prestandakraven.

## 2.6 Eliminering

Genererade koncept som inte uppfyller kraven om cykeltid eller ställer orimliga krav på undersystem elimineras med en elimineringsmatris. Kompetens från Volvo Technology AB används även för att eliminera koncept utifrån praktisk relevans och tillverkningsbarhet. Syftet är att undvika att arbeta med koncept som inte uppfyller grundläggande krav, genom att kombinera koncept som förkastats i elimineringsmatrisen med andra koncept och dellösningar kan nya koncept skapas.

## 2.7 Funktionsanalys

Återstående koncept utvecklas genom att definiera funktioner för att tydliggöra hur konceptet är avsett att fungera. Funktionsanalysen genomförs med hjälp av funktionsträd, där en övergripande funktion delas upp i underfunktioner för att tydligt definiera konceptens verkansprincip.

## 2.8 Konceptval och utveckling

Återstående koncept värderas med hjälp av en Kesselringmatris där det högst rankade konceptet går vidare i processen, Kesselringmatrisen möjliggör ett objektiva urval av koncept genom viktning och systematisk poängsättning. Konceptet som blev högst rankat i Kesselringmatrisen utvecklas genom att ange lösningar till delfunktionerna på konceptet, flera olika kombinationer av dellösningar definieras i en konceptkatalog. Lösningarna i konceptkatalogen värderas genom systematisk jämförelse med Pughs metod samt Kesselringmatris och den bästa kombinationen av dellösningar väljs ut för vidare utveckling. Kriterierna som används i beslutsmatriserna härstammar från kravspecifikationen.

## 2.9 Beräkning

Inför design och materialvalsprocessen uppskattas belastningar i konstruktionen, eftersom spänningarna som uppstår vid varje slag är av stort intresse. Designen anpassas även så att anslagsenergin faller inom gränsvärdena. Belastningar på komponenter är viktigt att veta inför materialval och design, för att inte underdimensionera komponenterna.

## 2.10 Design och materialval

För att bestämma vilka material som komponenterna ska bestå av används definierade vikt- och monteringsbegränsningar.

Efter att beräkningar på berörda komponenter samt materialval har genomförts, görs en detaljkonstruktion där konceptet designas i detalj och utvecklas till en slutlig konstruktionslösning.

För att säkerställa att konstruktionen kommer att hålla används FEM-simuleringar. FEM-simulering möjliggör tidseffektiva och verklighetstroga hållfasthetsberäkningar, analytiska hållfasthetsberäkningar är speciellt utmanande vid stötblastningar. Med hjälp av resultaten av FEM-simuleringarna itereras design och materialval.

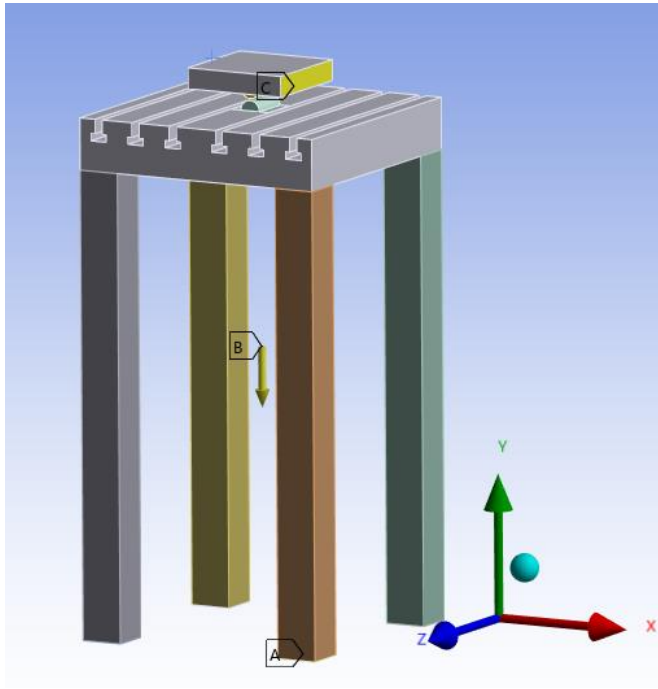
## 2.11 FEM-analys

Slagbelastningen från ett fallande provobjekt med olika anslagsenergier analyserades med dynamiska FEM-simuleringar i LS-DYNA genom Ansys Workbench. Syftet med simuleringarna var att utvärdera konstruktionens respons och användes som underlag för dimensionering av ingående komponenter. Simulering är ett lämpligt tillvägagångssätt eftersom krafter som uppstår vid slag är beroende av styvhet i kollisionssytorna, motsvarande analytisk modell behöver vara mycket omfattande för att ta hänsyn till styvhet och tröghet i systemet.

### 2.11.1 Ram

Modellen är uppbyggd av shell- och solid-element se Figur 1, för att minska beräkningstid samtidigt som tillräcklig noggrannhet uppnås. T-spårsplattorna samt provobjekten är i solid-element, då deras geometri inte är lämplig för att förenklas till shell-element.

Benen modelleras med shell-element och förenklades till ett kvadratisk tvärsnitt för att kunna anpassas med vald elementtyp. Denna förenkling motiveras av att benen huvudsakligen utsätts för tryckbelastning, samt att knäckningsrisken bedöms vara låg, vilket verifierades med linjär knäckningsanalys. Tvärsnittsarean antas därför vara den avgörande parametern för modellens strukturella beteende.



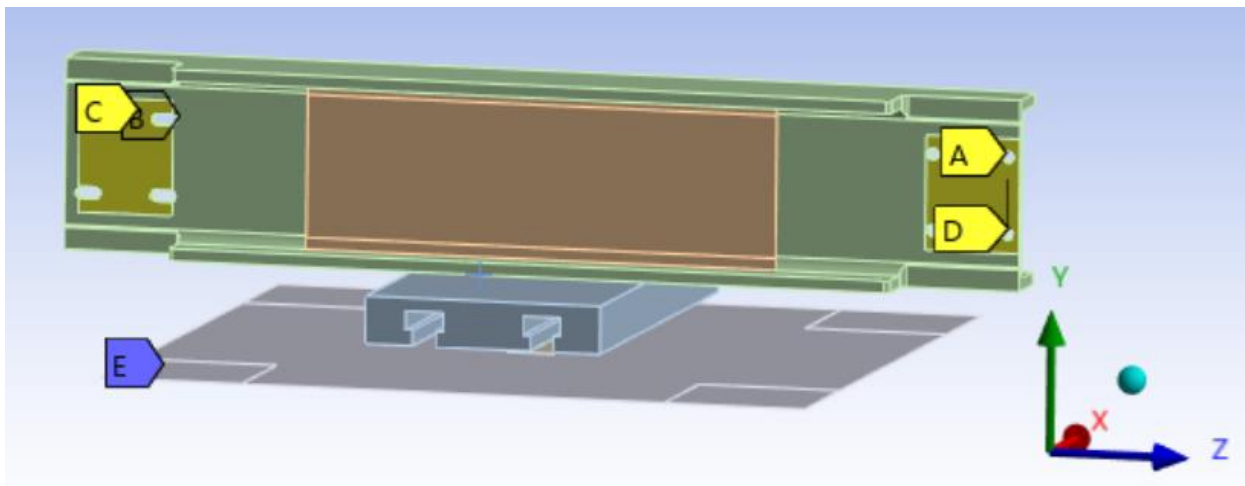
Figur 1. FEM-modell nedre delen av ramen

Randvillkor vid simulering av benen enligt modellen i Figur 1:

- Fixed support applicerades på undersidan av de fyra benen för att representera kontakten mellan golv och benen. Då slagutmattningsriggen inte utsätts för några betydande externa krafter i x- och z-led bedömdes detta vara ett rimligt randvillkor.
  - Den rörliga delen tilldelades en släpphöjd på 300 mm, vilket motsvarar den maximala höjd som används vid provning i slagutmattningsriggen.
  - Displacement applicerades på de två sidorna längs provobjektet markerat C i Figur 1 , där rörelse endast tilläts i y-led medan rotation kring samtliga axlar låstes.
- Randvillkoret användes för att representera glidskenorna och säkerställa att den rörliga delen endast kunde förflyttas i y-led.
- Gravitationsacceleration motsvarande  $9,81 \text{ m/s}^2$  applicerades i negativ y-riktning.

### 2.11.2 Rörlig del

Dynamiska FEM-simuleringar av den rörliga delen genomfördes i LS-DYNA med olika anslagsenergier enligt modellen i Figur 2. Simuleringarna genomfördes i syfte att utvärdera den rörliga delens respons under belastning samt användes för dimensionering av ingående komponenter. Balken och övre T-spårsplattan modellerades med solid-element, medan de extra vikterna modellerades med shell-element. Detta motiveras av att balken samt T-spårsplattan har geometrier som inte lämpar sig för modellering med vare sig beam- eller shell-element. Den undre T-spårsplattan förenklades till en plan platta utan T-spår och modellerades med shell-element för att minska beräkningstiden.



Figur 2. FEM-modell rörliga delen

Randvillkor vid simulering av rörlig balk enligt modellen i Figur 2:

- Fixed support applicerades på undersidan av den förenklade T-spårsplattan vid de ytor där benen är monterade.
- Displacement applicerades på de 8 skruvhålen för att representera skruvförbandet mellan balken och glidskenorna, där rörelse endast tilläts i y-led.
- Displacement applicerades på balkens baksida vid kontaktytan mellan balken och glidskenorna, där rörelse i x-led är låst.
- Släpphöjd på 300 mm tilldelades till den rörliga delen, vilket motsvarar den maximala höjd som används vid provning i slagutmattningsriggen.

## 2.12 Utvärdering av konstruktionslösning

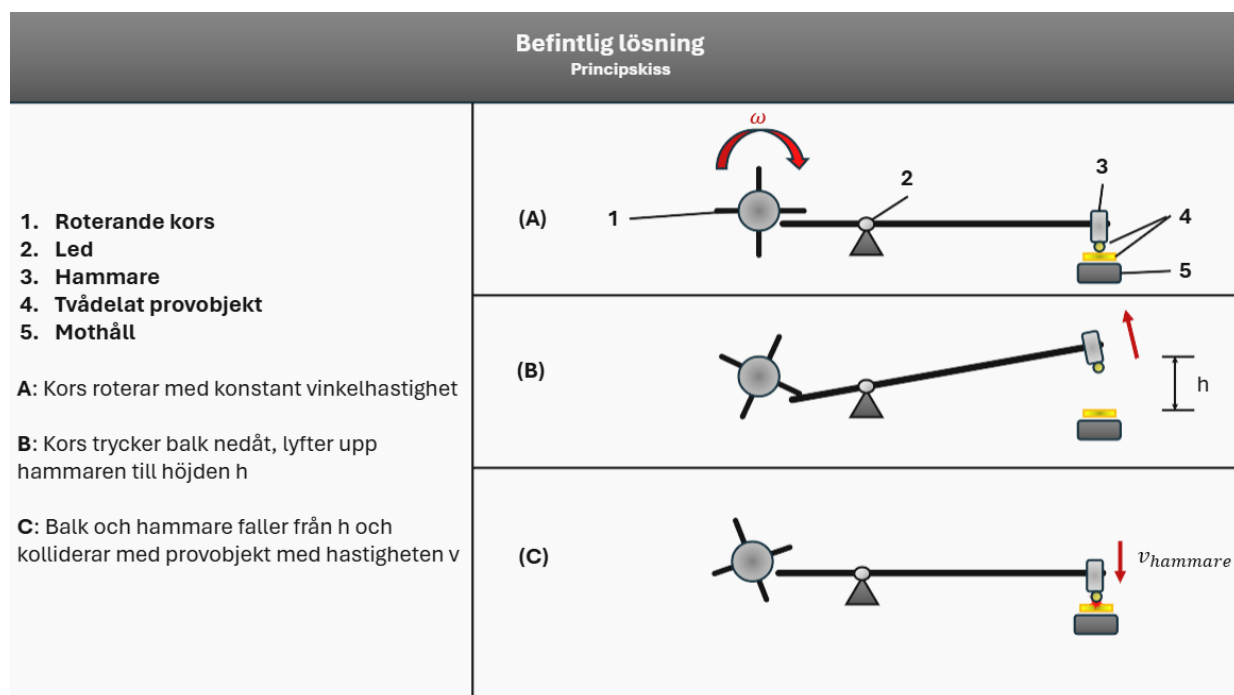
Konceptet utvärderas mot kundkrav och befintlig lösning för att säkerställa att lösningen uppfyller kraven på ett tillfredsställande sätt. Krav som inte kan verifieras eller som inte uppfylls utgör grund för eventuella rekommendationer för vidare utveckling. Experimentell verifiering genomförs inte inom ramen för detta arbete, vilket huvudsakligen beror på tids- och resursbegränsningar. För att verifiera konstruktionen används analytiska beräkningar och FEM-simuleringar.

### 3. Förstudie

Inledningsvis utvärderades den befintliga lösningen, följt av informationsinsamling om kollision och slagutmattning.

#### 3.1 Befintlig lösning

Den befintliga lösningen (se Figur 3), skapar en kollision mellan två provobjekt genom att lyfta och släppa en vikt fäst på en hävarm, en motor driver ett korshjul med konstant vinkelhastighet vilket gör kontakt med hävarmen och lyfter denna.



Figur 3. Befintlig lösning, hävarm.

Den befintliga testtriggen (se Figur 4), är konstruerad för att testa en typ av komponent med några få anslagsenergier, konstruktionen bedöms inte vara tillräcklig när fler komponenter ska slagutmattningsprovas.



*Figur 4. Befintlig testrigg*

### 3.1.1 Fördelar

Den befintliga lösningen har flera positiva aspekter:

#### **Enkel konstruktion**

Lösningen är enkel att tillverka på grund av få komponenter och lösa dimensionstoleranser med undantag för lagringselementet.

#### **Pålitlig anslagsenergi**

Lyfthöjden är konstant på grund av korshjulets geometri, detta leder till konstant anslagsenergi.

#### **Enkelt drivsystem**

Drivsystemet består av en konstant roterande servomotor vilken är enkel att styra.

### 3.1.2 Nackdelar

Nackdelar som identifierats är:

#### **Hög belastning på drivenhet**

Belastningen på servomotor och tillhörande planetväxel blir hög på grund av momentarmen från hävarmen. Detta har, i kombination med felaktig kil, lett till att planetväxelns utgående axel slitits ut (se Figur 5).



*Figur 5.* Planetväxel med utslitet kilspår på utgående axel.

#### **Högt kontakttryck mellan korshjul och balk**

Stor kraft från korshjulet kombinerat med liten kontaktyta mellan korshjul och balk skapar ett högt kontakttryck. Detta kräver god smörjning i kontaktytan (se Figur 6). Detta presenteras som en nackdel eftersom kontaktytorna regelbundet behöver penslas med fett.



*Figur 6.* Korshjul och balk, befintlig rigg.

### **Låg styvhet i horisontell riktning**

När provobjekten kolliderar skapas mycket stora kontaktkrafter, i ett perfekt scenario är dessa krafter endast vertikala men små avvikelser i provobjektens infästning och slitage leder till vissa horisontella krafter. Riggens geometri gör att styvheten blir låg i sidled vilket leder till att provobjektens kollisionsyta inte blir samma efter varje test. Symptomet har lindrats med styrskenor utmed balken, men dessa tillåter fortfarande ett spel på ungefär 10mm (se Figur 7).



*Figur 7. Styrskenor för balk, befintlig rigg.*

### **Passar endast provobjekt i en viss storlek**

På grund av att riggens hävarm rör sig i en cirkulär bana måste kollisionspunkten ligga på samma höjd som hävarmens rotationspunkt, annars kommer kontaktkraften inte att bli vertikal vilket den behöver vara för att testet ska vara tillförlitligt.

### **Hög cykeltid**

Korshjulet får inte rotera för snabbt då det finns risk att nästa pinne kontaktar hävarmen innan provobjekten kolliderat. Därför är cykeltiden idag cirka två sekunder vilket man önskar minska till omkring en sekund.

## 3.2 Kundkrav

En lista över kundkrav och önskemål upprättades, se Bilaga 1. Utöver krav som formulerats utifrån fördelar och nackdelar i avsnitt 3.1 sammanställdes även krav rörande dimensioner och testparametrar från kunden. Vissa krav kompletterades även med ett önskemål, önskemålet är viktat på en skala 1–6 där 1 har störst positiv påverkan på resultatet.

Kraven som inledningsvis uttalades av kunden var:

- Dimensioner
- Maxvikt provobjekt
- Anslagsenergi
- Frekvens/cykeltid

För värden se Bilaga 1.

### 3.3 Informationssökning

Fakta kring slagutmattning och kollisionförlopp presenteras i följande kapitel. Hertz kontaktlag undersöks i syftet att få förståelse om sambandet mellan kontaktkraft och anslagsenergi, mer specifikt för att fastställa ifall samma anslagsenergi ger samma kontaktkraft oberoende av lyfthöjd och rörlig massa. Vidare undersöks fenomen som elastisk kollision och metallutmattning.

#### 3.3.1 Hertz kontaktlag

För att undersöka om den maximala kontaktkraften endast är beroende av anslagsenergin undersöks Hertz kontaktlag.

Hertz kontaktlag bygger på elasticitetsteori och antar små deformationer i de kolliderande kropparna. Lagen beskriver sambandet mellan de krafter och deformationer som uppstår vid friktionsfri normalkontakt av två godtyckligt stora halvcirkulära kroppar, som konsekvens av anslagsenergi. (Argatov, I. 2024)

Hertz kontaktlag säger att kontaktkraften mellan två kroppar i ett idealfall är lika med en styvhetskoefficient multiplicerad med en deformationssträcka.

$$F = kw^{\frac{3}{2}}$$

*Ekvation 1. Kraftsamband från Hertz kontaktlag (Argatov, I. 2024, ekvation 3)*

Ekvation 1 multipliceras med en sträcka ( $w$ ) för att få energi, se ekvation 2. Vänsterledet består av systemets kinetiska energi.

$$\frac{m}{2}(V_0^2 - \dot{w}^2) = \frac{2}{5}kw^{\frac{5}{2}}$$

*Ekvation 2. Samband mellan kinetisk energi och deformationsenergi (Argatov, I. 2024, ekvation 5)*

Ekvation 2 kan skrivas om för att definiera maximala deformationssträckan, se ekvation 3.

$$w_m^0 = \left(\frac{5m}{k}\right)^{\frac{2}{5}} * \left(\frac{V_0}{2}\right)^{\frac{4}{5}}$$

*Ekvation 3. Maximal deformationssträcka (Argatov, I. 2024, ekvation 6)*

Eftersom kontaktkraften  $F$  är direkt relaterad till deformationssträckan (se ekvation 1) definieras maximala kontaktkraften i ekvation 4 genom insättning av ekvation 3 i ekvation 1.

$$F_m = k * \left( \left( \frac{5m}{k} \right)^{\frac{2}{5}} * \left( \frac{V_0}{2} \right)^{\frac{4}{5}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Ekvation 4. Maximal kontaktkraft

Där

$k = \text{styvhetskoefficient}$ ,  $w = \text{deformationssträcka}$ ,  $\dot{w} = \text{hastighet}$ ,  $V_0$   
 $= \text{anslagshastighet}$

Ekvation 4 kan skrivas om för att tydligare visa sambandet mellan maximal kraft och kinetisk tillika anslagsenergi, se ekvation 5.

$$F_m = 5 * k^{\frac{2}{5}} * \left( \frac{m * v_0^2}{2} \right)^{\frac{3}{5}}$$

Ekvation 5. Maximal kontaktkraft som funktion av kinetisk energi (parentesen)

Detta innebär att provet, under idealiserade antaganden enligt Hertz teori, kan utföras med valfri anslagshastighet och massa så länge anslagsenergin är densamma. Yttre omständigheter, såsom deformationer långt från kontaktytan i de kolliderande kropparna, kan däremot utgöra en felkälla.

### 3.3.2 Utmattning av metaller

Materialutmattning definieras som den progressiva försvagningen av materialet som uppstår vid cyklisk belastning, materialutmattningen sker avsevärt under materialets statiska sträckgräns och enligt uppskattningar sker cirka 80–90% av brott i maskinkonstruktioner på grund av materialutmattning (Metallkomptens, Utmattningshållfasthet, 2026). Ett utmattningsbrott kan delas in i tre steg, det börjar med att mikrosprickor i materialet initieras, vid fortsatt cyklisk belastning ökar sprickans storlek och sista steget har sprickan nått den kritiska storleken att ett fullständigt brott i materialet sker. Materialutmattning kan både ske vid låg- samt högcykel belastning, vid lågcykelutmattning sker det under hög spänning och ett lågt antal cykler, vanligtvis under 100 000 cykler. Högcykelutmattning sker vid högt antal cykler, generellt mellan 10 000–10 000 000 cykler med låg spänning enligt (F.M. Shuaib m.fl., 2017).

## 4. Resultat

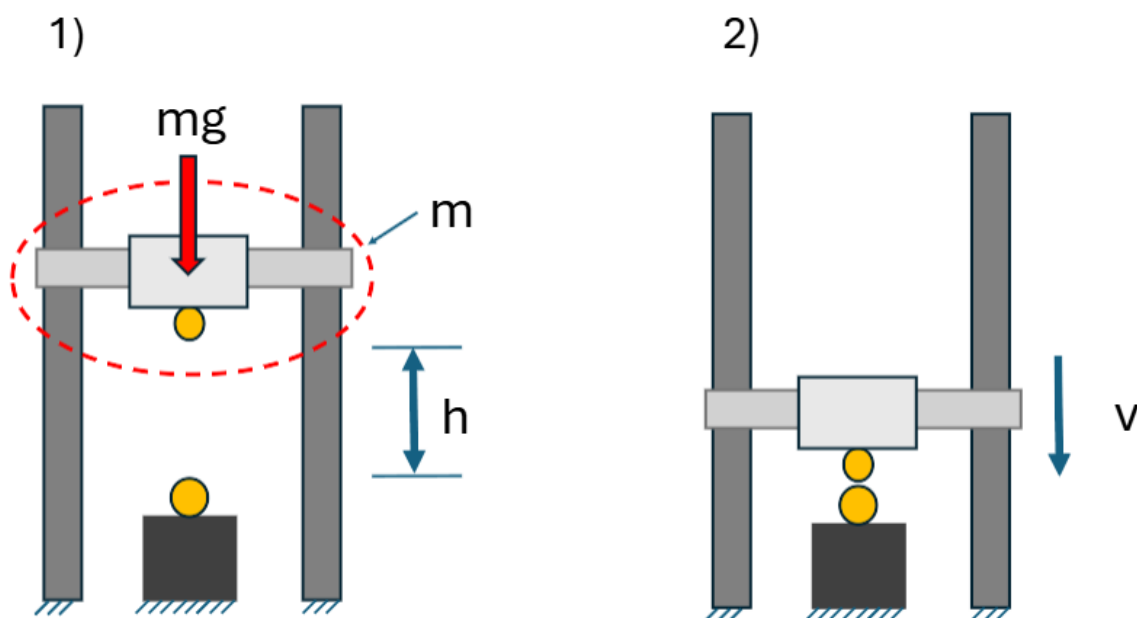
I kapitlet presenteras resultatet av examensarbetet. Processen började med att generera koncept för att utföra slagutmattningstest på växellådskomponenter. Konceptval, bakomliggande eliminering och utvärderingsprocesser presenteras, där det valda konceptet sedan vidareutvecklas. Slutligen beskrivs konstruktion, komponentval och beräkningar samt FEM-simulering.

### 4.1 Genererade lösningar

Den inledande konceptgenereringen resulterade i 6 lösningar vilka skulle kunna utföra testet. Samtliga består av en fast och en rörlig komponent där de två delarna av provobjektet sitter på varsin del.

#### 4.1.1 Vertikal kollision

Konceptet innebär att den rörliga komponenten lyfts och släpps av en mekanism (se Figur 8). Anslagsenergin blir ekvivalent med lägesenergin hos den rörliga delen i upplyft läge,  $E = m * g * h$ .



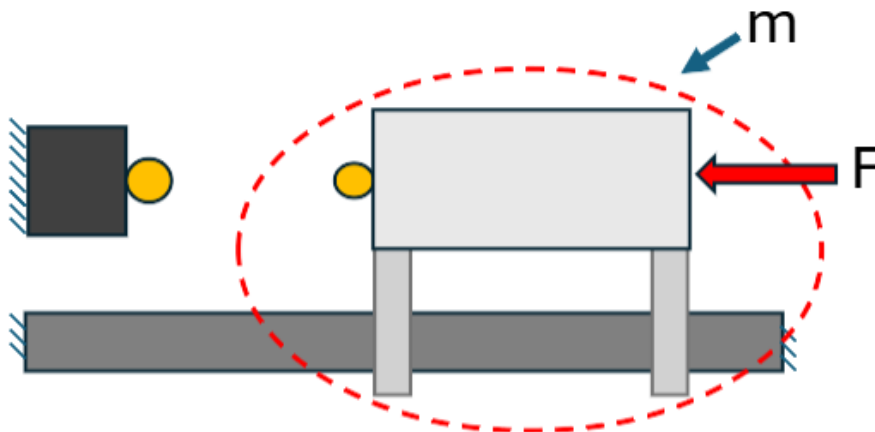
Figur 8. Skiss Vertikal kollision

#### 4.1.2 Horisontell kollision

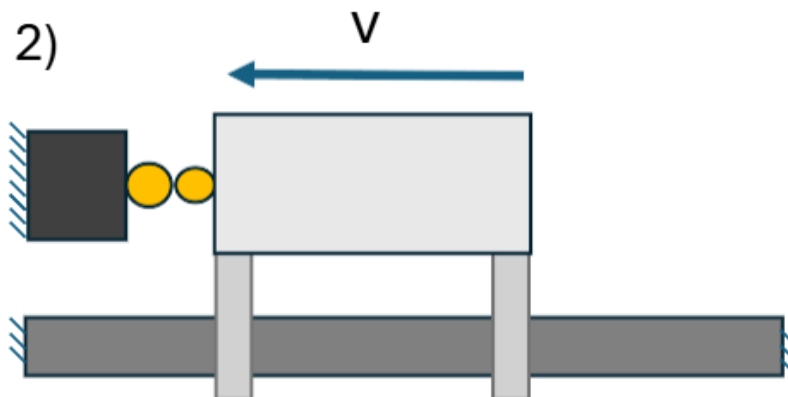
Den rörliga komponenten accelereras kontrollerat från startläget in i den fasta komponenten, (se Figur 9). Anslagsenergin bestäms av den kinetiska energin hos den rörliga delen vid

anslagsögonblicket,  $E_{kinetisk} = \frac{m \cdot v^2}{2}$ .

1)



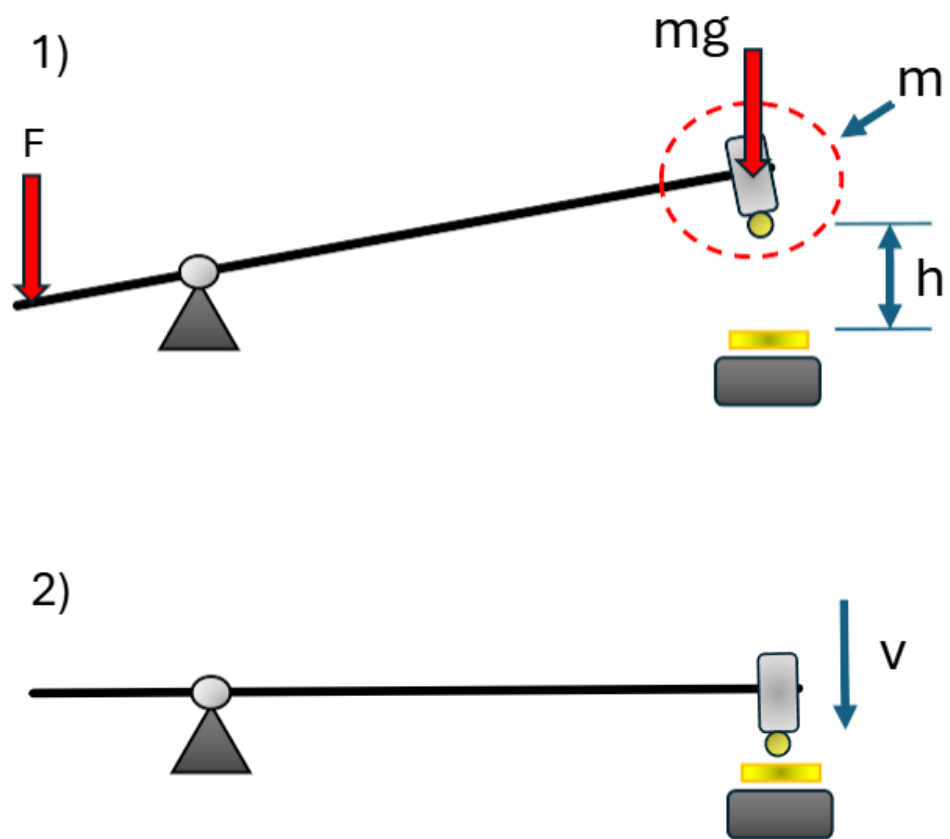
2)



Figur 9. Skiss Horisontell kollision

#### 4.1.3 Vertikal kollision med hävarm

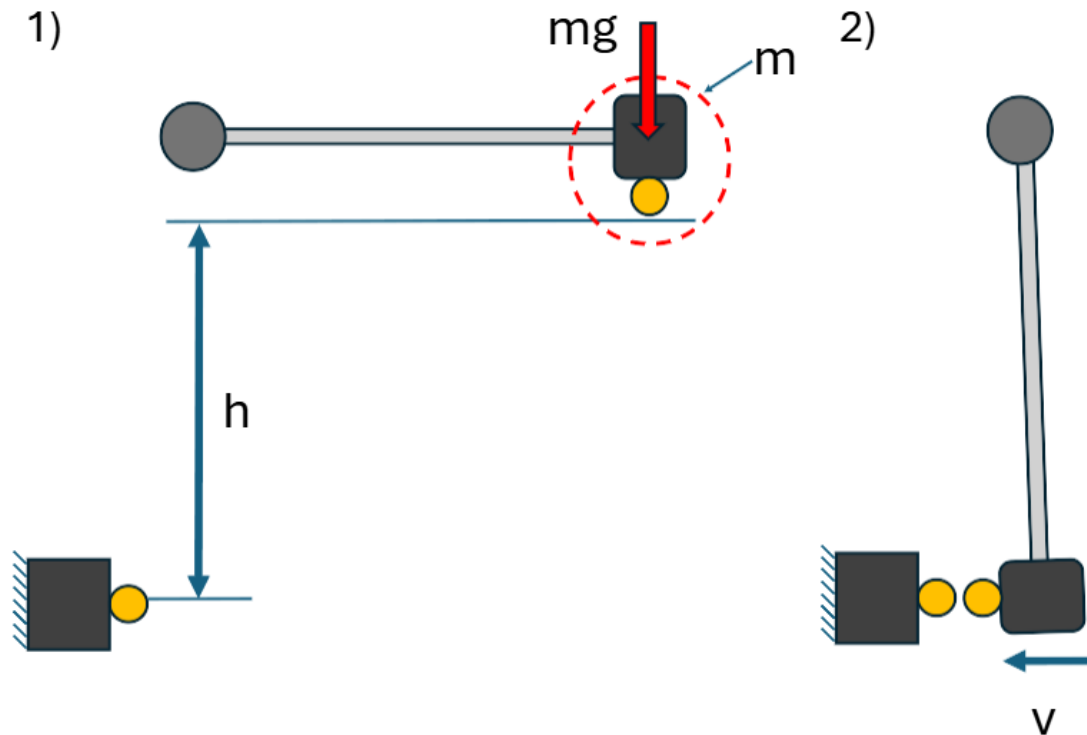
Konceptet liknar ”Vertikal kollision” men skiljer sig i upplyftarmmekanismens utförande. Detta koncept nyttjar en hävarm, där en kraft appliceras på den korta änden om lagringspunkten och den rörliga delen är fäst på andra änden av hävarmen (se Figur 10). Den rörliga delen lyfts upp och faller fritt tills den kolliderar med den fasta delen med en anslagsenergi lika med lägesenergin  $E = m \cdot g \cdot h$ .



Figur 10. Skiss Vertikal kollision med hävarm

#### 4.1.4 Pendel

Den rörliga komponenten monteras i änden av en pendelarm medan den fasta komponenten placeras i pendelns nedre läge (se Figur 11). Anslagsenergin bestäms av pendelns starthöjd och motsvarar systemets lägesenergi enligt  $E = m * g * h$ .

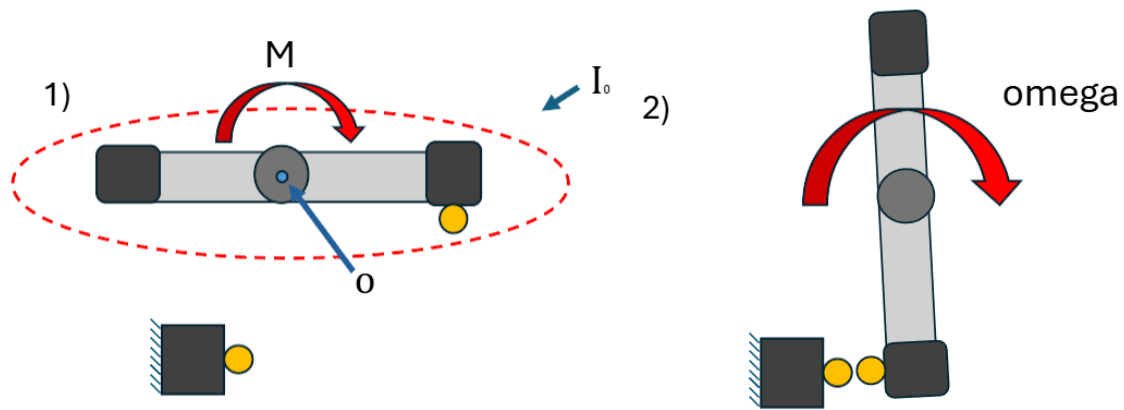


Figur 11. Skiss Pendel

#### 4.1.5 Svänghjul

Konceptet utnyttjar tröghetsmomentet hos ett svänghjul för att lagra energi till kollisionen mellan provobjekten (se Figur 12). Det ena provobjektet fästs på svänghjulet, det andra på en fast bas. Anslagsenergin motsvarar den lagrade energin hos svänghjulet, enligt sambandet

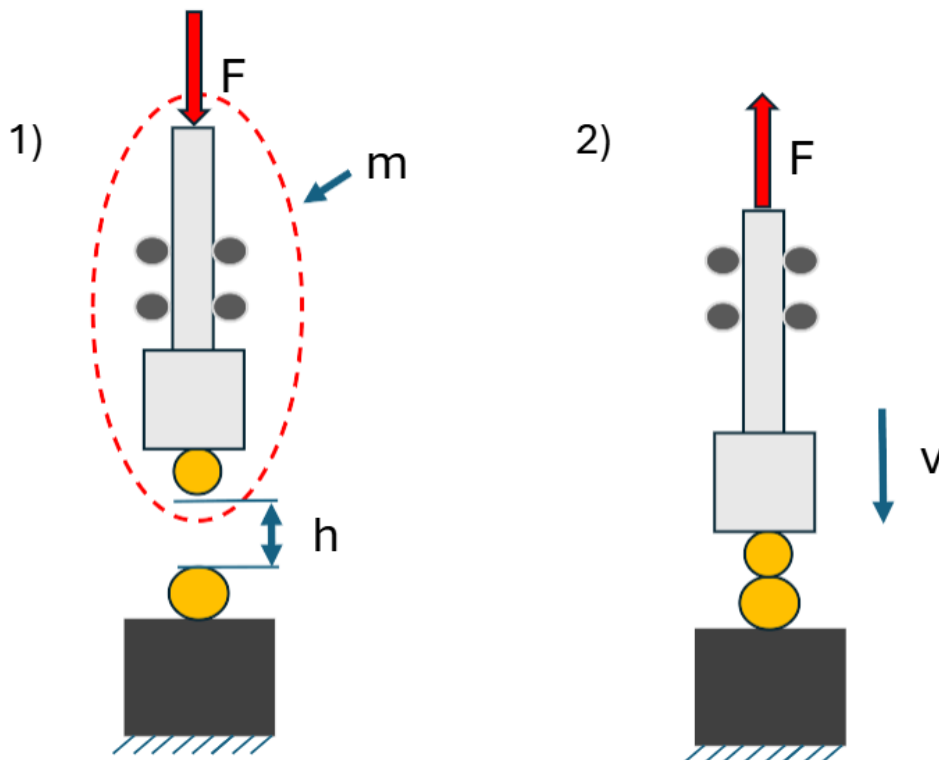
$E_{kinetisk} = \frac{I_o * \omega^2}{2}$ , där  $I_o$  är svänghjulets tröghet kring rotationsaxeln och  $\omega$  är vinkelhastigheten.



Figur 12. Skiss Svänghjul

#### 4.1.6 Power hammer

Konceptet liknar ”Vertikal kollision” men är oberoende av gravitationen, inspirationen kommer från lufthammare som används vid smide. Den rörliga delen både lyfts upp och accelereras nedåt av samma mekanism (se Figur 13). Anslagsenergin beror på den rörliga massans hastighet vid anslagsögonblicket enligt  $E_{kinetisk} = \frac{m \cdot v^2}{2}$ .



Figur 13. Power hammer

## 4.2 Eliminering av koncept

De genererade koncepten sammanställdes i en elimineringsmatris för kritisk granskning, se Tabell 1. Varje koncept bedömdes binärt mot elimineringskriterierna, om ett koncept inte uppfyllde samtliga kriterier eliminerades det ur vidare utvärdering. Kriterierna omfattade tekniska krav, geometriska begränsningar samt krav på realiserbarhet och formulerades utifrån definierade kundkrav och önskemål (se Bilaga 1).

Tabell 1. Elimineringmatris

| Chalmers                  | Elimineringsmatris för: Slagutmattningsrigg Volvo |                         |                           |                      |                  |                                           |             | Examensarbete IMS20x                                             |                                                                                               |
|---------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------------------|-------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Utfärdad av: Arvid, Robin |                                                   |                         |                           |                      |                  |                                           |             | Skapad: 2026-02-24                                               | Sid 1                                                                                         |
|                           |                                                   |                         |                           |                      |                  |                                           |             | + Ja<br>- Nej<br>? Information saknas<br>! Kontrollera kravspec. | + Behåll lösning<br>- Eliminera lösning<br>? Sök (mer) information<br>! Kontrollera kravspec. |
| Lösning                   | Elimineringskriterier                             |                         |                           |                      |                  |                                           |             | Kommentar                                                        | BESLUT                                                                                        |
|                           | Uppfyller dimensionskrav                          | Klarar tunga provobjekt | Klarar kravet om cykeltid | Lätt att konfigurera | Tillverkningsbar | Uppfyller krav om efterföljande kollision | Realiserbar |                                                                  |                                                                                               |
| Drop test                 | +                                                 | +                       | +                         | +                    | +                | ?                                         | +           |                                                                  | +                                                                                             |
| Horisontell kollision     | +                                                 | +                       | +                         | +                    | +                | +                                         | +           |                                                                  | +                                                                                             |
| Hävarm                    | +                                                 | +                       | +                         | +                    | +                | ?                                         | +           |                                                                  | +                                                                                             |
| Pendel                    | +                                                 | +                       | -                         |                      |                  |                                           |             | Hög beräknad cykeltid                                            | -                                                                                             |
| Svängghjul                | +                                                 | +                       | ?                         | +                    | +                | +                                         | -           | Kräver stort vridmoment annars hög cykeltid. Svårkontrollerat.   | -                                                                                             |
| Power hammer              | +                                                 | +                       | +                         | +                    | +                | ?                                         | -           | Svårt driva exakt                                                | -                                                                                             |

Då elimineringsprocessen utfördes i ett tidigt skede baserades bedömningarna på förenklade beräkningar och ingenjörsmässiga uppskattningar. För att utvärdera koncepten mot kriteriet om en cykeltid på 1 Hz, kontrollerades konceptens teoretiska cykeltid genom beräkningar med Python (se Bilaga 2).

Inget koncept eliminerades på grund av risken att provobjektet studsar efter kollisionen, eftersom efterföljande kollision visade sig vara av liten vikt för provets kvalitet. Samtal med kunden gav att testet tillåter efterföljande kollisioner då dessa även förekommer i komponenternas användningsområde (Ö. Bilen, personlig kommunikation, 6 mars 2026). Magnituden på den första efterföljande kollisionen beror på den kinetiska energin innan kollisionen samt systemets styvhet och självdämpande egenskaper. De koncept som eliminerades presenteras och motiveras nedan.

Power hammer-konceptet eliminerades eftersom komplexiteten i att uppnå den noggrannhet som krävs bedömdes vara för hög. Konceptet bedömdes därför inte vara realiserbart inom ramen för detta examensarbete.

Pendelkonceptet eliminerades eftersom det krävs en stor vinkeländring för att uppnå tillräckligt hög kinetisk energi vid slaget. Den stora vinkeländringen medför lång cykeltid. Tillsammans med feedback från kunden ledde detta till att konceptet eliminerades.

Med avseende på cykeltid och drivsystem eliminerades svänghjulskonceptet eftersom det inte var realiserbart. Eftersom svänghjulets kinetiska energi enbart genereras genom acceleration från drivsystemet bedömdes kraven på drivsystem som orealistiska. Konceptet avfärdades under samtal med kund, där kunden ansåg att det inte är några direkta fördelar med detta koncept. Sammantaget bedömdes konceptets nackdelar överväga dess fördelar.

Elimineringsprocessen reducerade antalet koncept till tre, vilka uppfyllde samtliga grundkrav och därmed kunde gå vidare till fortsatt utvärdering.

## 4.3 Konceptval

De tre återstående koncepten efter elimineringsmatrisen utvärderades med hjälp av en Kesselringmatris (se Tabell 2). Varje koncept tilldelades ett värde mellan 1 och 5 för varje kriterium, enligt bedömningsunderlaget i Bilaga 3. Kriterierna rangordnades utifrån deras relevans för huvudfunktionen enligt Bilaga 4, vilket gav vikter (w) vars summa är ett.

Vid viktningen bedömdes det tillsammans med uppdragsgivaren att noggrannhet för slag och justerbarhet för anslagsenergi är mest avgörande för tillförlitliga testresultat. Detta eftersom tillförlitliga och reproducerbara slag med korrekt anslagsenergi är avgörande för att erhålla användbara resultat från slagutmattningsprovnings. Bedömningskriteriet som tilldelades lägst vikt var storlekskriteriet, eftersom det bedömdes att en storlek mindre än den specificerade maxstorleken inte gynnar huvudfunktionen.

Koncepten utvärderades genom att multiplicera tilldelat värde (v) med kriteriets vikt (w), vilket gav ett viktat bidrag (t). De viktade bidragen summerades till ett totalt viktat värde för varje koncept, där det koncept som erhöll högst viktat värde valdes ut för vidare utveckling.

Tabell 2. Kesselringmatris 1

| Chalmers                      |       |    | Kesselingmatris 1 |       |                |         |        |                                 |                       |  |
|-------------------------------|-------|----|-------------------|-------|----------------|---------|--------|---------------------------------|-----------------------|--|
| Utfärdare: Arvid och Robin    |       |    |                   |       | Skapad: 260306 |         |        | Modifierad: 2026-03-09<br>Sid 1 |                       |  |
| Kriterier                     |       |    | Alternativ        |       |                |         |        |                                 |                       |  |
|                               |       |    | Ideal             |       | Droptest       |         | Hävarm |                                 | Horisontell kollision |  |
| Namn                          | w     | v  | t                 | v     | t              | v       | t      | v                               | t                     |  |
| Enkel konstruktion            | 0,103 | 5  | 0,513             | 4     | 0,410          | 3       | 0,308  | 2                               | 0,205                 |  |
| Justerbarhet anslagsenergi    | 0,179 | 5  | 0,897             | 5     | 0,897          | 4       | 0,718  | 5                               | 0,897                 |  |
| Tillgänglighet av komponenter | 0,128 | 5  | 0,641             | 2     | 0,256          | 3       | 0,385  | 1                               | 0,128                 |  |
| Noggrannhet för slag          | 0,205 | 5  | 1,026             | 4     | 0,821          | 3       | 0,615  | 3                               | 0,615                 |  |
| Storlek                       | 0,026 | 5  | 0,128             | 4     | 0,103          | 3       | 0,077  | 3                               | 0,077                 |  |
| Transport                     | 0,103 | 5  | 0,513             | 5     | 0,513          | 5       | 0,513  | 5                               | 0,513                 |  |
| Uppskattat servicebehov       | 0,103 | 5  | 0,513             | 3     | 0,308          | 3       | 0,308  | 4                               | 0,410                 |  |
| Beräknad Cykeltid             | 0,154 | 5  | 0,769             | 5     | 0,769          | 5       | 0,769  | 5                               | 0,769                 |  |
| T (Totalt viktat värde)       | 1,000 | 40 | 5                 | 32    | 4,077          | 29      | 3,692  | 28                              | 3,615                 |  |
| T / Tideal                    |       | 1  | 1,00              | 0,80  | 0,82           | 0,73    | 0,74   | 0,70                            | 0,72                  |  |
| Medel                         |       | 5  | 0,63              | 4,00  | 0,51           | 3,63    | 0,46   | 3,50                            | 0,45                  |  |
| Std-avvikelse                 |       | 0  | 0,21              | 0,75  | 0,24           | 0,78    | 0,19   | 1,25                            | 0,25                  |  |
| Median                        |       | 5  | 0,58              | 4,00  | 0,46           | 3,00    | 0,45   | 3,50                            | 0,46                  |  |
| Antal svaga punkter           |       | 0  |                   | 0     |                | 0       |        | 1                               |                       |  |
| Rangordning                   |       |    |                   | 1     |                | 2       |        | 3                               |                       |  |
| Beslut                        |       |    |                   | Vinst |                | Förlust |        | Förlust                         |                       |  |

## 4.4 Utveckling av valt koncept

En funktionsanalys identifierade konstruktionens huvudfunktion som att utföra slagutmattningsprov, delfunktionerna definierades som ”lyft och släpp rörlig del”, ”möjliggör inställning av lyfthöjd”, ”styrssystem” och ”hålla provobjekt”.

De genererade lösningarna för respektive delfunktion sammanställdes i en morfologisk matris (se Figur 14). Delfunktionerna listades vertikalt och dellösningarna listades horisontellt för varje delfunktion. Den morfologiska matrisen användes för att systematiskt generera en lösningsmängd där ett koncept bildades genom att välja en dellösning per delfunktion.

| Sub-Functions                        | Sub-Solutions   |                       |                                       |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Lyft och släpp provobjekt            | Luftkolv        | Linjär motor<br>✗     | Motor med kedja, frikopplande princip |
| Möjliggöra inställningar av lyfthöjd | Mekaniskt stopp | Givare och styrsystem | Relä/mikrobrytare                     |
| Styr lyftmekanism                    | Dator (PLC)     | Analogt<br>✗          | +                                     |
| Hålla provobjekt                     | Klämmekanism    | Elektromagnet<br>⊘    | +                                     |

Figur 14. Morfologisk matris med markeringar

För att minska lösningsmängden exkluderades dellösningen ”elektromagnet” på delfunktionen ”hålla provobjekt”. Vidare identifierades det att ett analogt styrsystem med reläer, mikrobrytare och mekaniskt stopp inte var kompatibelt med en linjär motor på grund av den komplexa motorstyrning som krävs. Därför exkluderades kombinationen ”linjär motor och analogt styrsystem” från den morfologiska matrisen så att endast tekniskt realiserbara koncept utvärderades vidare. För resulterande konceptkatalog se Tabell 3.

Tabell 3. Konceptkatalog

| Utvecklat koncept | Lyft och släpp rörlig del             | Möjliggör inställning av lyfthöjd | Styrsystem  | Håll provobjekt |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------|-----------------|
| Lösning 1         | Motor med kedja, frikopplande princip | Relä/mikrobrytare                 | Analogt     | Klämmekanism    |
| Lösning 2         | Motor med kedja, frikopplande princip | Relä/mikrobrytare                 | Dator (PLC) | Klämmekanism    |
| Lösning 3         | Motor med kedja, frikopplande princip | Givare och styrsystem             | Analogt     | Klämmekanism    |
| Lösning 4         | Motor med kedja, frikopplande princip | Givare och styrsystem             | Dator (PLC) | Klämmekanism    |
| Lösning 5         | Motor med kedja, frikopplande princip | Mekaniskt stopp                   | Analogt     | Klämmekanism    |
| Lösning 6         | Motor med kedja, frikopplande princip | Mekaniskt stopp                   | Dator (PLC) | Klämmekanism    |
| Lösning 7         | Linjär motor                          | Givare och styrsystem             | Dator (PLC) | Klämmekanism    |
| Lösning 8         | Luftkolv                              | Relä/mikrobrytare                 | Analogt     | Klämmekanism    |
| Lösning 9         | Luftkolv                              | Relä/mikrobrytare                 | Dator (PLC) | Klämmekanism    |
| Lösning 10        | Luftkolv                              | Givare och styrsystem             | Analogt     | Klämmekanism    |
| Lösning 11        | Luftkolv                              | Givare och styrsystem             | Dator (PLC) | Klämmekanism    |
| Lösning 12        | Luftkolv                              | Mekaniskt stopp                   | Analogt     | Klämmekanism    |
| Lösning 13        | Luftkolv                              | Mekaniskt stopp                   | Dator (PLC) | Klämmekanism    |

I första Pughmatrisen valdes lösning nr 1 till referenslösning och lösningarna 8,10 och 12 blev högst rankade, se Tabell 4. I Pughmatris 2 valdes lösning 8 som referenslösning, eftersom konceptet bedömdes ha lägst komplexitet. Pughmatris 2 resulterade i att lösning 7,9,10,11,12 placerades högst, se Tabell 5, och därav tillsammans med referenslösningen 8 utvärderades vidare i en Kesselringmatris.

Tabell 4. Pughmatris 1

| Chalmers                      | Pughmatris 1 (Relativ beslutsmatris): |   |                    |   |   |   |        |   |   |        |    |        |       |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|--------------------|---|---|---|--------|---|---|--------|----|--------|-------|
|                               |                                       |   | Skapad: 260311     |   |   |   |        |   |   |        |    |        | Sid 1 |
|                               |                                       |   | Modifierad: 260311 |   |   |   |        |   |   |        |    |        |       |
| Kriterier                     | Alternativ                            |   |                    |   |   |   |        |   |   |        |    |        |       |
|                               | 1                                     | 2 | 3                  | 4 | 5 | 6 | 7      | 8 | 9 | 10     | 11 | 12     | 13    |
| Enkel konstruktion            | <b>R</b>                              | 0 | 0                  | 0 | + | + | +      | + | + | +      | +  | +      | +     |
| Justerbarhet anslagsenergi    | <b>E</b>                              | 0 | 0                  | 0 | 0 | 0 | 0      | 0 | 0 | 0      | 0  | 0      | 0     |
| Tillgänglighet av komponenter | <b>F</b>                              | 0 | 0                  | 0 | 0 | 0 | -      | + | + | +      | +  | +      | +     |
| Antal rörliga delar           | <b>E</b>                              | 0 | 0                  | 0 | 0 | 0 | +      | + | + | +      | +  | +      | +     |
| Storlek                       | <b>R</b>                              | 0 | 0                  | 0 | 0 | 0 | 0      | 0 | 0 | 0      | 0  | 0      | 0     |
| Transport                     | <b>E</b>                              | 0 | 0                  | 0 | 0 | 0 | 0      | 0 | 0 | 0      | 0  | 0      | 0     |
| Uppskattat servicebehov       | <b>N</b>                              | 0 | 0                  | 0 | 0 | 0 | +      | 0 | 0 | 0      | 0  | 0      | 0     |
| Beräknad Cykeltid             | <b>S</b>                              | + | 0                  | + | 0 | + | +      | + | + | +      | +  | +      | +     |
| Enkelhet styrsystem           |                                       | - | 0                  | - | 0 | - | -      | 0 | - | 0      | -  | 0      | -     |
| Σ+                            |                                       | 1 | 0                  | 1 | 1 | 2 | 4      | 4 | 4 | 4      | 4  | 4      | 4     |
| Σ 0                           |                                       | 7 | 9                  | 7 | 8 | 6 | 3      | 5 | 4 | 5      | 4  | 5      | 4     |
| Σ -                           |                                       | 1 | 0                  | 1 | 0 | 1 | 2      | 0 | 1 | 0      | 1  | 0      | 1     |
| Nettovärde                    |                                       | 0 | 0                  | 0 | 1 | 1 | 2      | 4 | 3 | 4      | 3  | 4      | 3     |
| Rangordning                   |                                       | 5 | 5                  | 5 | 4 | 4 | 3      | 1 | 2 | 1      | 2  | 1      | 2     |
| Vidareutveckling              |                                       |   |                    |   |   |   |        |   |   |        |    |        |       |
| Beslut                        |                                       |   |                    |   |   |   | VIDARE |   |   | VIDARE |    | VIDARE |       |

Tabell 5. Pughmatris 2

| Chalmers                      | Pughmatris 2 (Relativ beslutsmatris): |    |                    |    |    |    |        |          |        |        |        |        |       |
|-------------------------------|---------------------------------------|----|--------------------|----|----|----|--------|----------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                               |                                       |    | Skapad: 260311     |    |    |    |        |          |        |        |        |        | Sid 1 |
|                               |                                       |    | Modifierad: 260311 |    |    |    |        |          |        |        |        |        |       |
| Kriterier                     | Alternativ                            |    |                    |    |    |    |        |          |        |        |        |        |       |
|                               | 1                                     | 2  | 3                  | 4  | 5  | 6  | 7      | 8        | 9      | 10     | 11     | 12     | 13    |
| Enkel konstruktion            | -                                     | -  | -                  | -  | -  | -  | 0      | <b>R</b> | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |
| Justerbarhet anslagsenergi    | 0                                     | 0  | 0                  | 0  | 0  | 0  | 0      | <b>E</b> | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |
| Tillgänglighet av komponenter | -                                     | -  | -                  | -  | -  | -  | -      | <b>F</b> | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |
| Antal rörliga delar           | -                                     | -  | -                  | -  | -  | -  | 0      | <b>E</b> | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |
| Storlek                       | 0                                     | 0  | 0                  | 0  | 0  | 0  | 0      | <b>R</b> | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |
| Transport                     | 0                                     | 0  | 0                  | 0  | 0  | 0  | 0      | <b>E</b> | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |
| Uppskattat servicebehov       | 0                                     | 0  | 0                  | 0  | 0  | 0  | +      | <b>N</b> | 0      | 0      | 0      | -      | -     |
| Beräknad Cykeltid             | -                                     | -  | -                  | -  | -  | -  | 0      | <b>S</b> | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |
| Enkelhet styrsystem           | 0                                     | -  | 0                  | -  | 0  | -  | -      |          | -      | -      | -      | 0      | -     |
| Σ+                            | 0                                     | 0  | 0                  | 0  | 0  | 0  | 1      | 0        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     |
| Σ 0                           | 5                                     | 4  | 5                  | 4  | 5  | 4  | 6      | 0        | 8      | 8      | 8      | 8      | 7     |
| Σ -                           | 4                                     | 5  | 4                  | 5  | 4  | 5  | 2      | 0        | 1      | 1      | 1      | 1      | 2     |
| Nettovärde                    | -4                                    | -5 | -4                 | -5 | -4 | -5 | -1     | 0        | -1     | -1     | -1     | -1     | -2    |
| Rangordning                   | 3                                     | 4  | 3                  | 4  | 3  | 0  | 1      | 0        | 1      | 1      | 1      | 1      | 2     |
| Vidareutveckling              |                                       |    |                    |    |    |    |        |          |        |        |        |        |       |
| Beslut                        |                                       |    |                    |    |    |    | VIDARE | VIDARE   | VIDARE | VIDARE | VIDARE | VIDARE |       |

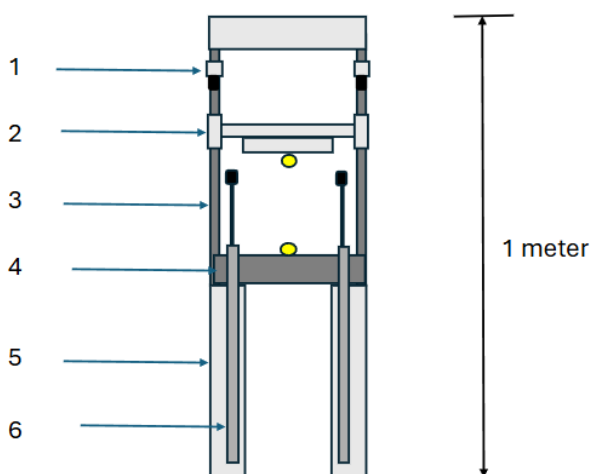
I Kesselringmatrisen sammanfördes lösning 7,9,10,11,12. Kriterierna värdesattes och rangordnades från 1–5, se Bilaga 5. Kriterierna viktades med avseende på uppgiftens betydelse, se Bilaga 6. Resultatet av Kesselringmatrisen var att lösning 8 och 12 låg närmast ideallösningen, se Tabell 6. Vid en närmare undersökning av dessa koncept utvecklades ett nytt koncept där de två lösningarna kombinerades. Detta resulterade i en lösning som både innehåller relä/mikrobrytare och ett mekaniskt stopp i ändläget. Det mekaniska stoppet medför att luftcylindern inte kan förflyttas över den höjd som används under provet.

Tabell 6. Kesselring matris 2

| Chalmers                      |       |            | Kesselringmatris 2 |                |       |       |       |                                  |       |         |       |         |       |       |       |  |
|-------------------------------|-------|------------|--------------------|----------------|-------|-------|-------|----------------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|--|
| Utfärdare: Arvid och Robin    |       |            |                    | Skapad: 260306 |       |       |       | Modifierad: 2026-03-11<br>Sida 1 |       |         |       |         |       |       |       |  |
| Kriterier                     |       | Alternativ |                    |                |       |       |       |                                  |       |         |       |         |       |       |       |  |
|                               |       | Ideal      |                    | 7              |       | 8     |       | 9                                |       | 10      |       | 11      |       | 12    |       |  |
| Namn                          | w     | v          | t                  | v              | t     | v     | t     | v                                | t     | v       | t     | v       | t     | v     | t     |  |
| Enkel konstruktion            | 0,159 | 5          | 0,795              | 5              | 0,795 | 5     | 0,795 | 5                                | 0,795 | 5       | 0,795 | 5       | 0,795 | 5     | 0,795 |  |
| Justerbarhet anslagsenergi    | 0,182 | 5          | 0,909              | 5              | 0,909 | 5     | 0,909 | 5                                | 0,909 | 5       | 0,909 | 5       | 0,909 | 5     | 0,909 |  |
| Tillgänglighet av komponenter | 0,114 | 5          | 0,568              | 1              | 0,114 | 3     | 0,341 | 3                                | 0,341 | 3       | 0,341 | 3       | 0,341 | 3     | 0,341 |  |
| Antal rörliga delar           | 0,136 | 5          | 0,682              | 5              | 0,682 | 5     | 0,682 | 5                                | 0,682 | 5       | 0,682 | 5       | 0,682 | 5     | 0,682 |  |
| Storlek                       | 0,023 | 5          | 0,114              | 3              | 0,068 | 3     | 0,068 | 3                                | 0,068 | 3       | 0,068 | 3       | 0,068 | 3     | 0,068 |  |
| Transport                     | 0,023 | 5          | 0,114              | 5              | 0,114 | 5     | 0,114 | 5                                | 0,114 | 5       | 0,114 | 5       | 0,114 | 5     | 0,114 |  |
| Uppskattat servicebehov       | 0,091 | 5          | 0,455              | 5              | 0,455 | 3     | 0,273 | 3                                | 0,273 | 3       | 0,273 | 3       | 0,273 | 3     | 0,273 |  |
| Beräknad Cykeltid             | 0,159 | 5          | 0,795              | 5              | 0,795 | 5     | 0,795 | 5                                | 0,795 | 5       | 0,795 | 5       | 0,795 | 5     | 0,795 |  |
| Enkelhet styrsystem           | 0,114 | 5          | 0,568              | 1              | 0,114 | 5     | 0,568 | 3                                | 0,341 | 1       | 0,114 | 1       | 0,114 | 5     | 0,568 |  |
| T (Totalt viktat värde)       | 1,000 | 45         | 5                  | 35             | 4,045 | 39    | 4,545 | 37                               | 4,318 | 35      | 4,091 | 35      | 4,091 | 39    | 4,545 |  |
| T / Tideal                    |       | 1          | 1,00               | 0,78           | 0,81  | 0,87  | 0,91  | 0,82                             | 0,86  | 1,00    | 1,01  | 0,90    | 0,90  | 1,05  | 1,05  |  |
| Medel                         |       | 5          | 0,56               | 3,89           | 0,45  | 4,33  | 0,51  | 4,11                             | 0,48  | 3,89    | 0,45  | 3,89    | 0,45  | 4,33  | 0,51  |  |
| Std-avvikelse                 |       | 0          | 0,22               | 1,48           | 0,31  | 0,89  | 0,27  | 0,99                             | 0,28  | 1,23    | 0,30  | 1,23    | 0,30  | 0,89  | 0,27  |  |
| Median                        |       | 5          | 0,57               | 5,00           | 0,45  | 5,00  | 0,57  | 5,00                             | 0,34  | 5,00    | 0,34  | 5,00    | 0,34  | 5,00  | 0,57  |  |
| Antal svaga punkter           |       | 0          |                    | 2              |       | 0     |       | 0                                |       | 1       |       | 1       |       | 0     |       |  |
| Rangordning                   |       |            |                    | 3              |       | 1     |       | 2                                |       | 3       |       | 3       |       | 1     |       |  |
| Beslut                        |       |            |                    | Förlust        |       | Vinst |       | Förlust                          |       | Förlust |       | Förlust |       | Vinst |       |  |

Kombinationen av lösning 8 och 12 bedömdes vara den mest lämpliga lösningen efter urvalsprocessen och valdes därför för vidare utveckling. För illustration av den valda lösningen (se Figur 15).

1. Ställbart stopp med mikrobrytare
2. Glidblock
3. Glidskena, monterad på ram
4. Fast del, t spår, mikrobrytare
5. Ram, aluminiumprofiler
6. Luftkolv, 500mm slaglängd. 2 m/s



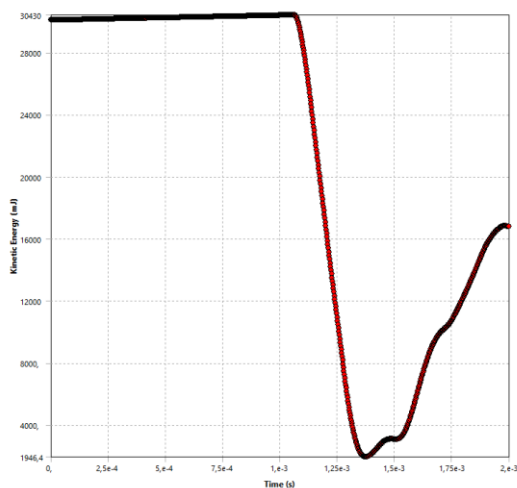
Figur 15. Illustration av valt koncept.

## 4.5 Beräkningar

Beräkningar utförs som underlag för designprocessen. På grund av kollisionskraftens komplexitet används dynamisk simulering av kollisionen med finita elementmetoden. Beräkningar utförs för att dimensionera pneumatik och dämpare i ställbara ändstopp, där ideala gaslagen antas gälla.

### 4.5.1 Dynamisk FEM

Med hjälp av FEM-modellen i LS-DYNA, beskriven i avsnitt 2.11.1, kunde den rörliga delens kinetiska energi under kollisionsförloppet bestämmas (se Figur 16). Simuleringen genomfördes med en massa på 10 kg och en fallhöjd på 300 mm. Analysen utfördes i syfte att öka förståelsen för energiöverföringen mellan den rörliga delen och den fasta delen vid kollisionen samt för att uppskatta hur stor andel av den kinetiska energin som överförts till den fasta delen.



Figur 16. Förändring av kinetisk energi under kollisionen med 30 J för den rörliga delen

#### 4.5.2 Beräkningar för pneumatik och ändstoppsdämpare

Luftcylindrarnas volymflödeskrav beräknades utifrån önskad prestanda. Luftcylindrar med en kolv diameter på 20 mm ( $d$ ) och slaglängd ( $L$ ) på 500 mm behöver arbeta med en frekvens på 1 Hz ( $f$ ) för att uppfylla kravet på cykeltid. Det ger ett volymflödeskrav på 38 liter tryckluft (5 bar) per minut. Beräkningen antar konstant rörelse samt en slaglängd på 500 mm och är därför att betrakta som ett värsta möjligt scenario.

$$\dot{V} = 2 \cdot \left( d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot L \right) \cdot 2f \cdot 1000 \cdot 60$$

*Ekvation 6. Volymflöde*

En typisk stor verkstadskompressor (Gesab, 2024) komprimerar omkring 1000 liter luft i minuten, vid ett arbetstryck på 5 bar motsvarar det 200 liter tryckluft. Det ger en teoretisk säkerhetsmarginal mot flödesbrist ( $\frac{V_{\text{konsumtion}}}{V_{\text{Produktion}}}$ ) på 5,2. Den beräknade säkerhetsmarginalen indikerar att lufttillförsel inte begränsar systemets prestanda.

För att beräkna översvängningen för den rörliga delen i övre läge användes sambandet mellan kinetisk energi hos rörlig del i släppögonblicket och lägesenergi hos rörlig del vid maxhöjden. Beräknad översvängning är betydande vid önskade lyfthastigheter, den utgör en felmarginal på 38% för anslagsenergin. Se Bilaga 7.

Felmarginalen för anslagsenergin minimeras med fasta stopp som bromsar ned den rörliga delen till en känd position i övre läge. Översvängningen för en 10 kg massa vid 0.3 meters lyfthöjd är ca 100 mm vid den önskade lyfthastigheten. För att eliminera översvängningen behöver 11 joule bromsas bort, se Bilaga 7. Påfrestningarna på ramen minimeras genom att välja en maximal tillåten bromskraft på 300 N per dämpare, det ger en säkerhetsfaktor på 4 med avseende på tillåten belastning på valda klämstopp. Enskild dämpare behöver absorbera 5,5 joule kinetisk energi vilket kräver en slaglängd på 16 mm vid en bromskraft på 300 N. Ett ytterligare nyckeltal som behövs vid val av dämpare är absorberad energi per timme. Eftersom dämparen ska absorbera 5 joule 60 gånger i minuten, krävs en dämpare som kan absorbera minst 18 000 Joule per timme.

Tryckfallet i luftsystemet uppskattades genom att beräkna tryckfallet över en 1 meters slang med 5 mm innerdiameter, med ett lufttryck på 5 bar och en omgivningstemperatur på 20 grader Celcius. Tryckfallet beror på volymflödet genom slangen, vilket är 38 liter per minut. Tryckfallet beräknas med Darcy-Weisbachs ekvation för tryckfall över rör, genom att först beräkna reynoldstal och friktionsfaktor. Se ekvationer 7, 8 och 9.

$$\rho \text{ (Densitet)} = 6.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad v \text{ (Flödeshastighet)} = 32 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$\mu \text{ (Dynamisk viskositet)} = 1.82 * 10^{-5} \text{ Pa} * \text{s}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = 52747$$

Ekvation 7. Reynoldstal

$$f = \frac{0.316}{Re^{\frac{1}{4}}} = 0.021$$

Ekvation 8. Friktionsfaktor då  $Re < 10^5$

$$P_{loss} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 12815 \text{ Pa} = 0.128 \text{ Bar}$$

Ekvation 9. Tryckfall över 1m luftslang (Darcy-Weisbach)

Tryckfallet över den enskilda slangen uppgår till 2,5% vid ett arbetstryck på 5 bar. Utifrån beräkningarna bedöms att luftslangar med 5 mm innerdiameter inte utgör någon betydande flaskhals i systemet. Beräkningen kan betraktas som ett värsta fall, eftersom den dimensionerade luftslangen betjänar båda luftcylindrarna vid ett volymflöde som är högre än det verkliga behovet.

## 4.6 Design och materialval

Under design och materialvalsprocessen har hänsyn tagits till önskemålet om in-house tillverkning samt möjlighet till framtida modifikationer. Resultatet är en modulär ramkonstruktion av aluminiumprofiler tillsammans med komponenter i konstruktionsstål som tillverkas i Volvos verkstäder (se Figur 17).



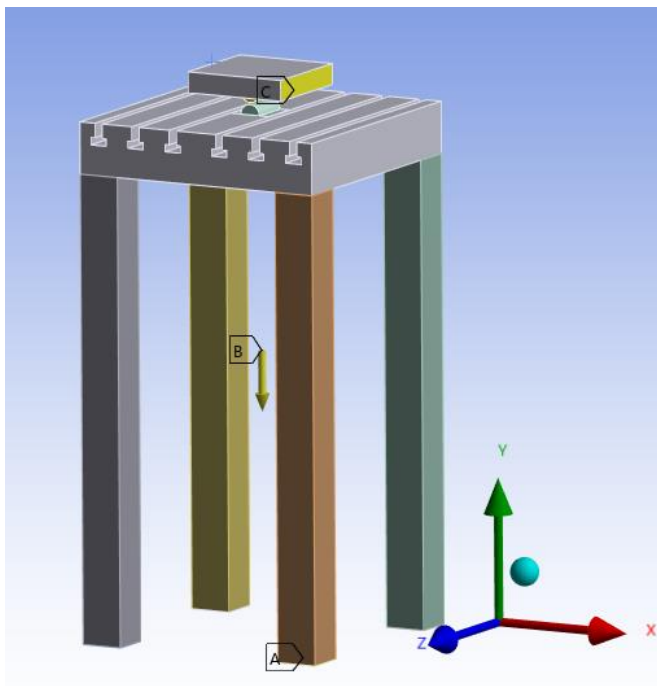
*Figur 17. Rendering av slutgiltig konstruktionslösning.*

#### 4.6.1 Design av ram

Tillsammans med uppdragsgivaren beslutades att använda extruderade aluminiumprofiler för ramen. Detta val gjordes eftersom profilerna möjliggör en hög justerbarhet även efter att ramen monterats ihop.

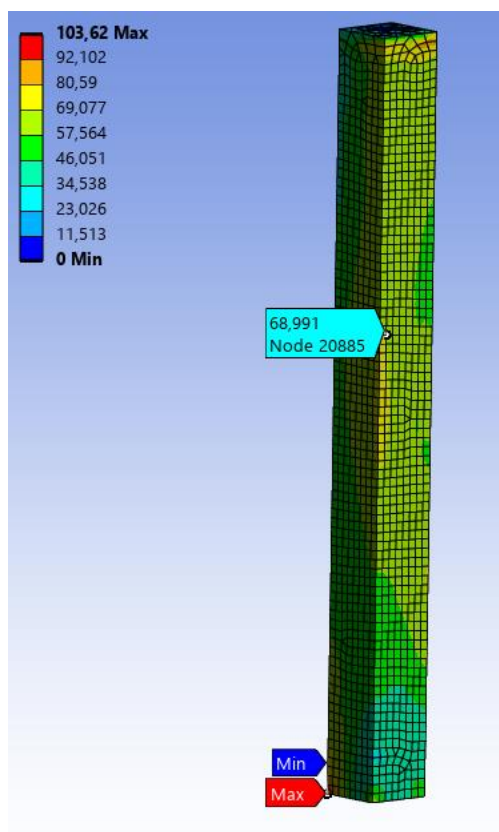
Ramens designprocess inleddes med att identifiera vilka delar som utsätts för högst belastning. Analysen visade att benen är mest kritiska, eftersom de ger den motkraft till kraften som uppstår vid kollision mellan provobjekten.

För att bestämma lämplig dimension på benen simulerades dessa i LS-DYNA enligt modellen i Figur 18 och de randvillkor som beskrivs i avsnitt 2.11.1. På undersidan av de fyra benen applicerades fixed support. Den rörliga delen tilldelades en massa på 17 kg och en fallhöjd på 300 mm, vilket motsvarar en anslagsenergi på 50 J. För att representera glidskenorna applicerades displacement, där rörelse endast tilläts i y-led. Gravitation motsvarande  $9,81 \frac{m}{s^2}$  applicerades i negativ y-riktning.

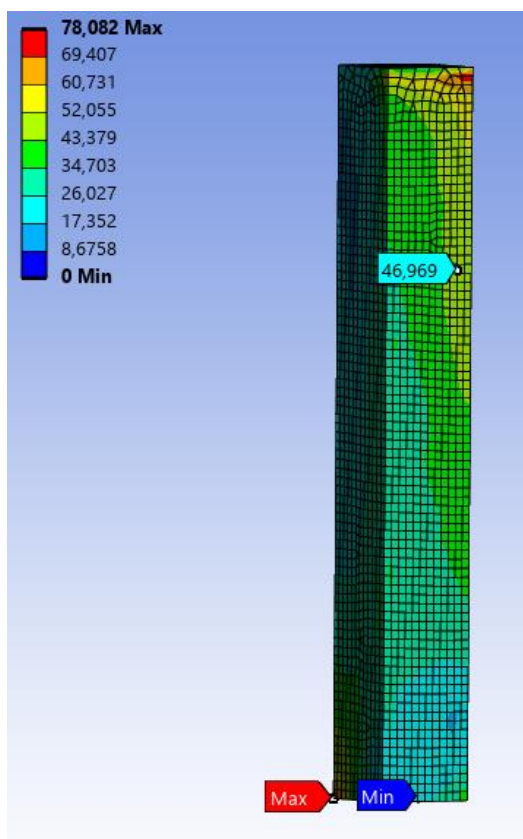


Figur 18. FEM-modell nedre delen av ramen

Resultatet visade att en profil med dimensionen 40x40 mm gav en maximal spänning på cirka 104 MPa i anslutningen till den fasta inspänningen (se Figur 19). Vid vidare analys identifierades denna spänningstopp som en singularitet, vilket innebär att den inte representerar den verkliga spänningsnivån. Den mer representativa maximala spänningen bedömdes därför vara cirka 70 MPa. Motsvarande värde för en profil med dimensionen 60x60 mm var cirka 50 MPa (se Figur 20).

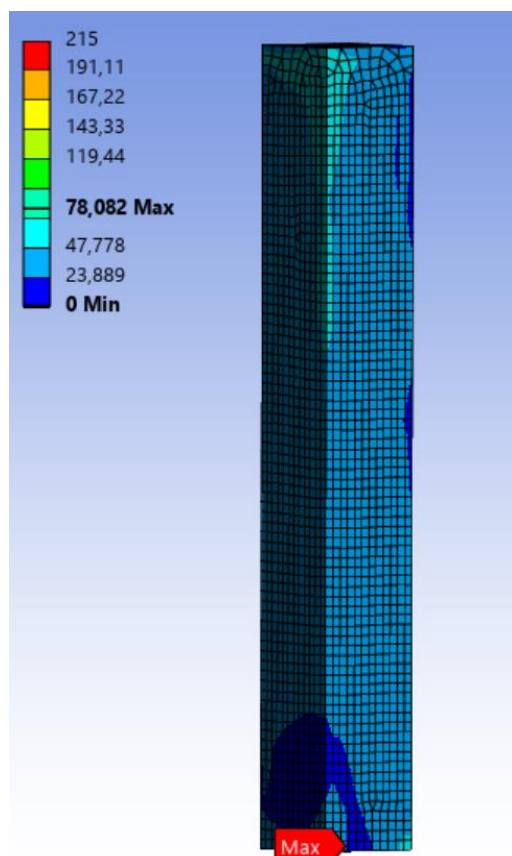


Figur 19. Spänningsplot (equivalent Von-mises) på förenklat 40x40 mm ben



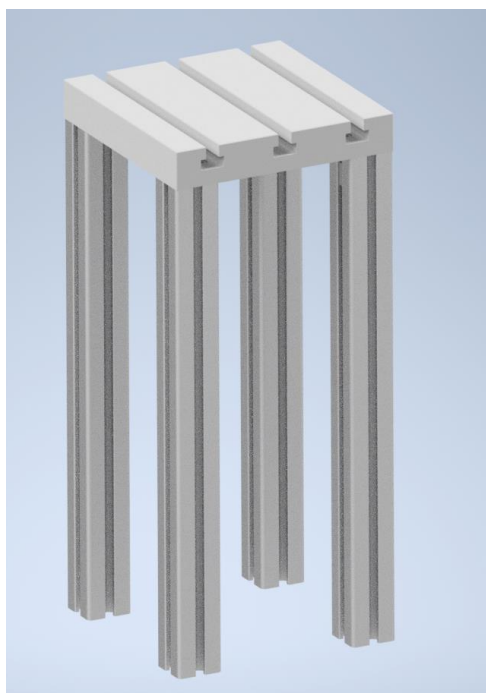
Figur 20. Spänningsplot (equivalent Von-mises) på förenklat 60x60 mm ben

Trots att 40x40 mm uppfyllde hållfasthetskraven valdes en profil med dimensionen 60x60 mm, eftersom hög styvhet och stabilitet bedömdes vara viktigare för att säkerställa repeterbara slagutmattningstester och lång livslängd. Detta resulterade i en säkerhetsfaktor på cirka 4,6 mot sträckgränsen enligt (aalco, 2026) och i Figur 21 visas spänningen i förhållande till sträckgränsen. För att förenkla monteringen av slagutmattningsriggen användes samma profil även i riggens övriga ramkonstruktion.



Figur 21. Spänningsplot (equivalent Von-mises) på förenklat 60x60 mm ben i förhållande till sträckgränsen.

Benen placerades direkt under T-spårsplattan för att säkerställa en stabil infästning av plattan (se Figur 22). Detta medför att kollisionskraften överförs vertikalt genom benen, vilket innebär att de huvudsakligen utsätts för tryckbelastning. Benens längd bestämdes utifrån den geometriska begränsningen att luftcylindrarna måste rymmas inom höjden mellan golvet och T-spårsplattans ovansida. En lägre placering av T-spårsplattan skulle innebära att rörliga delens rörelse hindras av luftcylindrarna (se Figur 23).



Figur 22. Benen tillsammans med T-spårsplattan

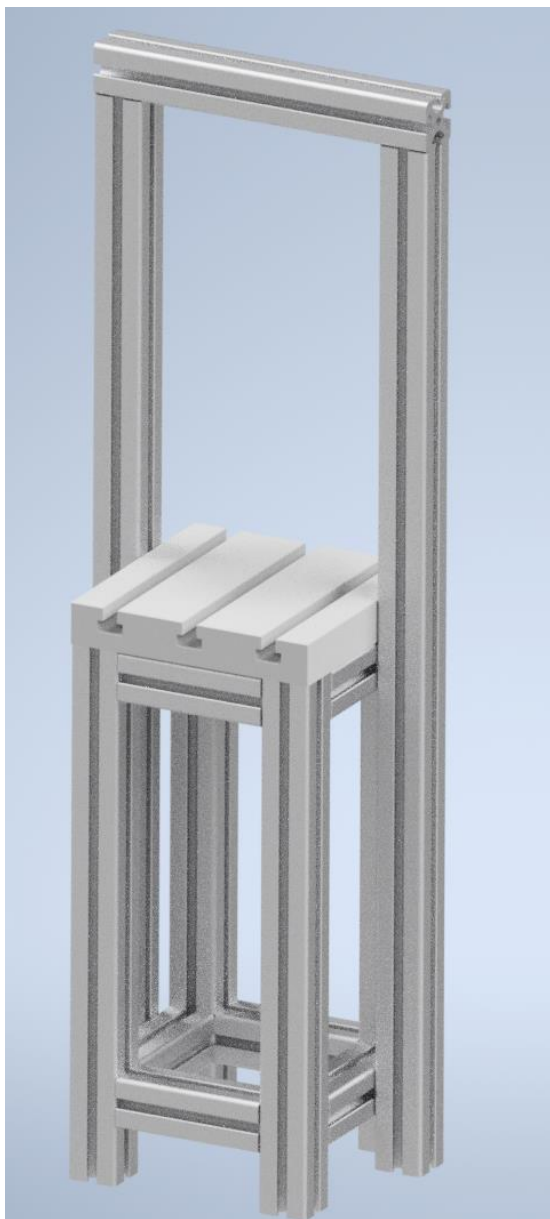


Figur 23. Vy framifrån tillsammans med luftcylindrarna

Två vertikala aluminiumprofiler placerades längs bottendelens motstående sidor en på vardera sida enligt Figur 24. Syftet var att möjliggöra justering av luftcylindrarnas höjddimensionering samt infästning av glidskenorna. Profilerna sträcker sig från luftcylindrarnas nedersta fästen upp till glidskenornas övre infästningspunkter.

De vertikala profilerna fixerades i bottendelen med hjälp av horisontella profiler mellan benen, vilket även bidrar till ökad stabilitet genom att hålla benen parallella. Ytterligare horisontella profiler placerades mellan resterande ben i samma syfte.

Konstruktionen medför att T-spårsplattan endast behöver fästas med fyra skruvar placerade i respektive hörn. Under montering är bottendelen dessutom självbärande utan T-spårsplattan.



Figur 24. Bottendelen tillsammans med vertikala profilerna

Glidskenorna placeras på profilens framsida för att möjliggöra justering av glidskenornas och glidblockens position (se Figur 25). Syftet är att undvika inbyggda spänningar, vilka annars kan leda till ökad friktion. Justeringen sker främst via glidblockens montering på balken (se Figur 26). Placeringen av glidskenorna på framsidan ökar även tillgängligheten för de justerbara ändstoppen. Den övre fästpunkten av glidskenan placeras så att den fästs i den övre horisontella profilen, vilket ger ett fast stopp i vertikalled utöver de andra fästpunkterna som endast hålls med klämkraften av skruvar och den friktion som uppstår mellan glidskena och aluminiumprofil.

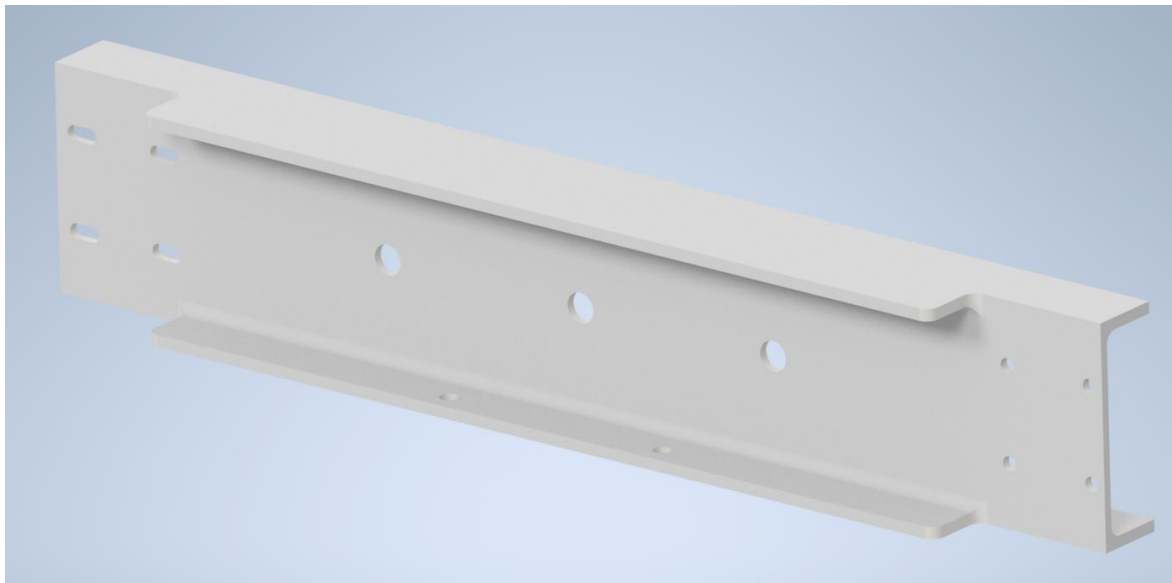


*Figur 25. Glidskenornas placering*

#### 4.6.2 Rörlig del

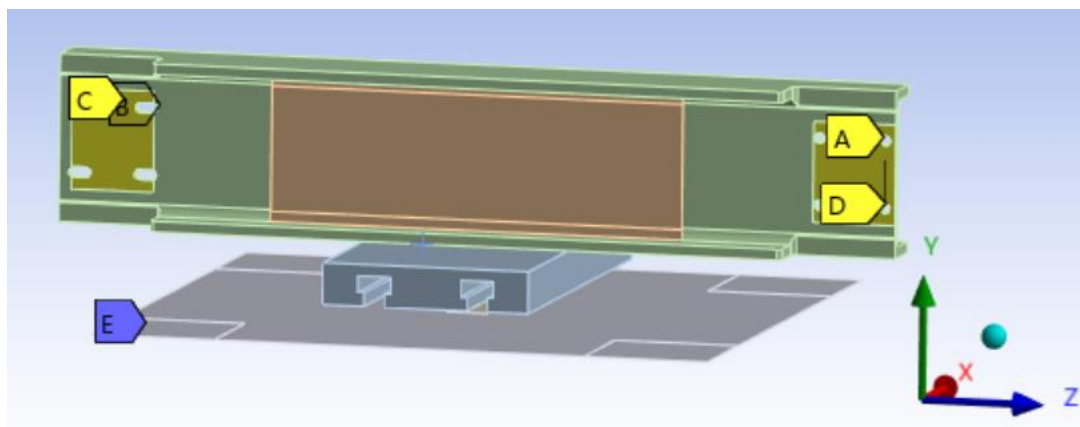
En IPE80 SS355 balk valdes för den rörliga delen med hänsyn till dess höga böjstyvhet samt att den har en stor kontaktyta för T-spårs plattan undertill (se Figur 26). Profilen medger även en fördelaktig placering av de extra vikterna, då dessa kan monteras på balkens liv.

Balkhöjden bestämdes utifrån kravet att balken ska klara de belastningar som uppstår vid kollisionen. Detta verifierades genom FEM-simuleringar i LS-Dyna vilket beskrivs nedan. För att få den vertikala delen (livet) på I-balken i kontakt med glidblocken fräses en del av den övre och undre flänsen bort i ändarna på balken.



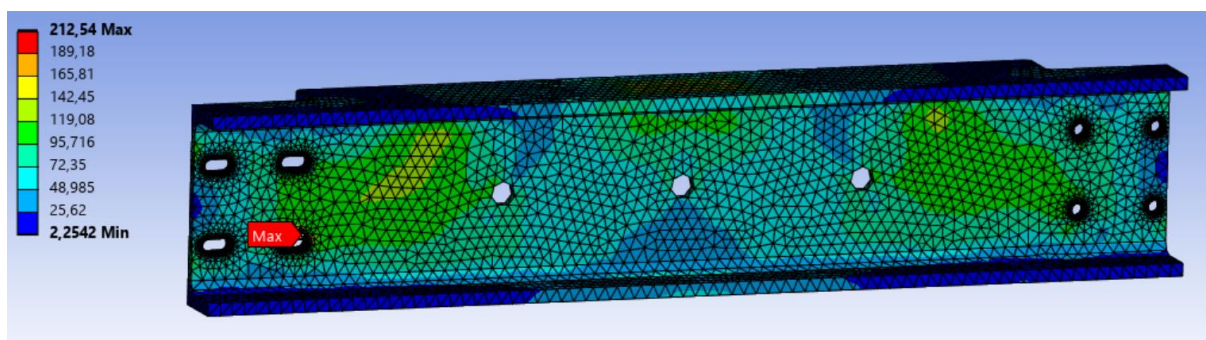
Figur 26. IPE80 Balk med modifieringar

Balken simulerades enligt modellen i Figur 27 och de randvillkor som beskrivs i avsnitt 2.11.2. Den undre förenklade T-spårsplattan fixerades vid de ytor där benen är monterade. Vid de 8 skruvhålen begränsades förflyttningen till y-led för att representera skruvförbandet mellan balken och glidskenorna. Vidare begränsades rörelsen i x-led vid balkens kontaktyta mot glidskenorna. En massa på 17 kg och en fallhöjd på 300 mm tilldelades på den rörliga delen, vilket motsvarar en anslagsenergi på 50 J.



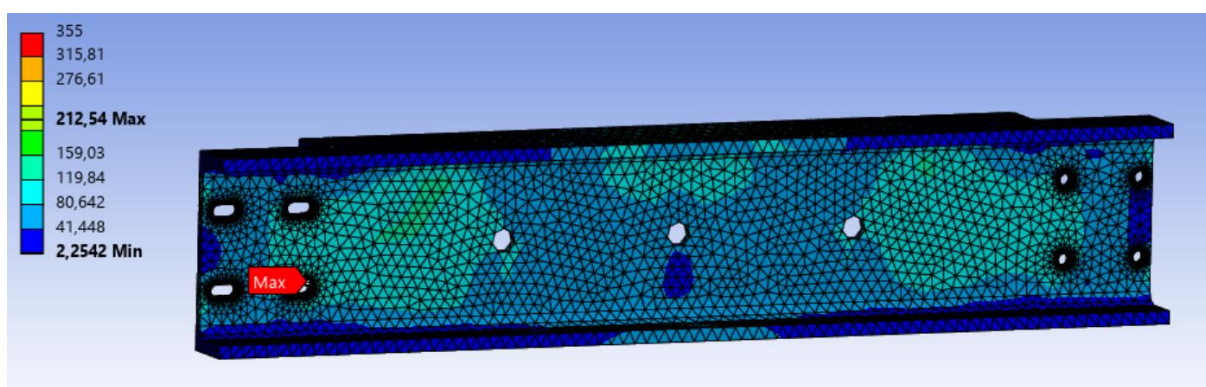
Figur 27. FEM-modell rörliga delen

Figur 28 visar spänningsfördelningen i balken, där högre spänningsnivåer kan observeras i närheten av de vänstra hålsparren. Spänningstoppen uppgår till cirka 60% av sträckgränsen.



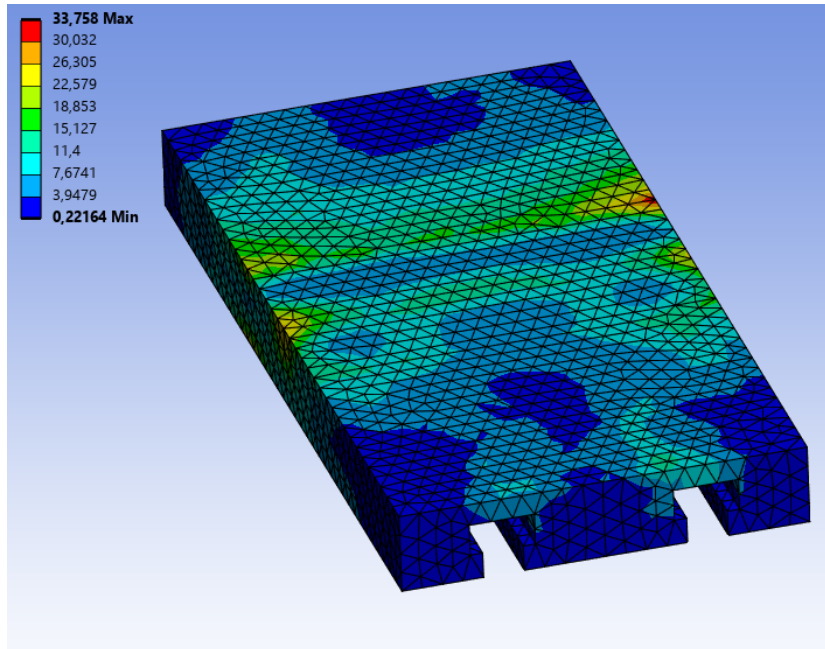
Figur 28. Spänningsplot (Von-mises) på IPE80 balk

Vidare visar Figur 29 spänningen i förhållande till sträckgränsen.



Figur 29. Spänningsplot (Von-mises) på IPE80 balk i förhållande till sträckgränsen

Figur 30 visar effektivspänningsfördelningen (Von Mises) på T-spårsplattan, där en spänningstopp uppstår i det 90 gradiga hörnet. Denna spänningstopp utgör en singularitet, eftersom hörnet saknar radie och därmed modelleras som oändligt vasst i FEM-modellen. Bortsett från singulariteten uppgår spänningen till cirka 20 MPa.



Figur 30. Spänningsfördelning T-spårsplattan i rörliga delen

Den rörliga delen (se Figur 31), består förutom av balken även av ett viktpaket, en T-spårsplatta för att fästa provobjektet på och två glidblock. Viktpaketet består av vattenskurna plåtar med tjocklek 5- och 10 millimeter, T-spårsplattan är gjord av aluminium för att minimera vikten av den rörliga delen och är infäst i balken med fyra skruvförband av storlek M6. För detaljerad sprängskiss se Bilaga 8.



Figur 31. Rörlig del inklusive komponenter.

Valet av linjär styrning baserades på den stötblastning som uppstår vid kollision. Låg friktion och hög stabilitet är avgörande för att minimera risken att de fastnar under testet.

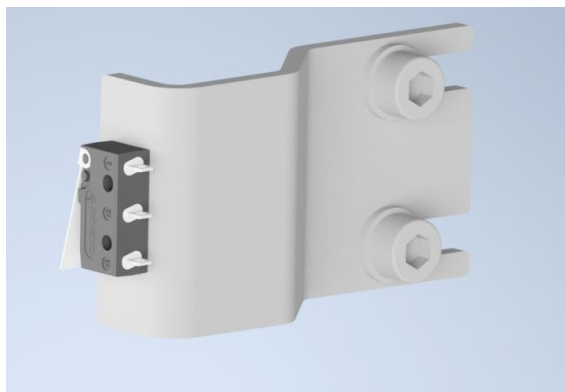
Belastningsfallet är speciellt då statisk belastning är mycket låg, belastningen på linjärstyrningen utgörs i stort sett bara av oförutsägbara kollisionskrafter. Valet blev glidskenor och glidblock av serien MSB20S från Aluflex (se Figur 32), på grund av dess tillgänglighet och höga märkbelastning. MSB20S levereras med en extra smörjenhet vilken kontinuerligt smörjer glidskenan och enligt (Aluflex, 2026) resulterar detta i att glidblocket kan åka 25 000 km utan underhåll.



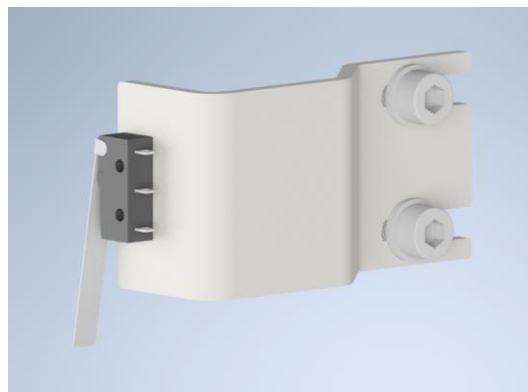
Figur 32. Skenstyrning MSB20S. (Aluflex, 2026). Återgiven med tillstånd

### 4.6.3 Hållare för övre- och undre mikrobrytare

De övre mikrobrytarna fästs i ramen med en konsol. Konsolen består av bockad plåt med spår i båda ändar som möjliggör justering av mikrobrytarens placering i förhållande till den rörliga delen (se Figur 33). Nedre mikrobrytare placeras så att de aktiveras av luftcylindrarna, konsolen är därför längre på grund av riggens geometri (se Figur 34).



Figur 33. CAD konsol för övre mikrobrytare



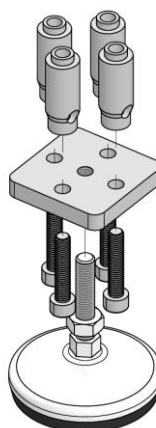
Figur 34. CAD konsol för nedre mikrobrytare

### 4.6.4 Fästplatta för justerbar fot

De justerbara fötterna fästs i ändarna av benen med en fästplatta av vattenskuren 10mm plåt. Plattan har 5 borrarade hål där det mittersta är gängat i storlek M10. Det gängade hålet används för att montera den justerbara foten, (se Figur 35 och Figur 36). De fyra övriga hålen är för att fästa plattan mot aluminiumprofilen med fyra ändfästen som gängas in i aluminiumprofilen.



Figur 35. Fästplatta tillsammans med maskinfot och fästelement



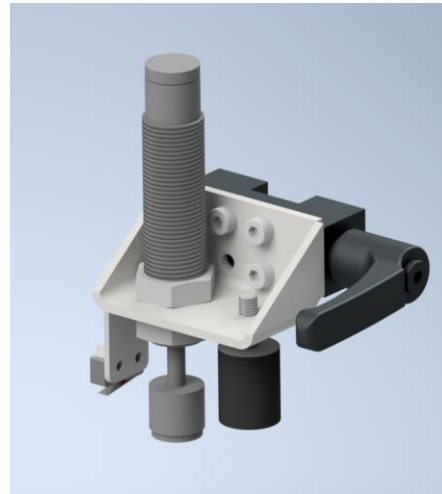
Figur 36. Sprängskiss Fästplatta tillsammans med maskinfot och fästelement

#### 4.6.5 Hållare för mekaniska stoppen samt mikrobrytare

En konsol utformades för att montera den hydrauliska dämparen, gummidämparen samt övre mikrobrytaren. Konsolen dimensionerades för en kraft på 300 N genom dämparen, en tjocklek på 3 mm valdes för att uppnå låg spänning och deformation. Plåtkonsolens hörn svetsas för att uppnå hög styvhet (Se Figur 37 samt Figur 38).



*Figur 37.* Plåtkonsol ändstopp med hållare för mikrobrytare.



*Figur 38.* Ändstopp med installerade komponenter.

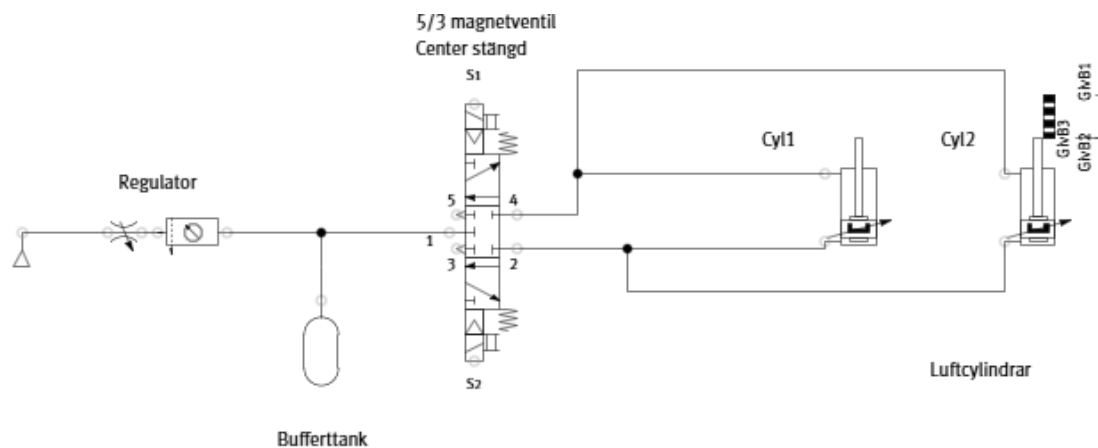
## 4.7 Design av luft och styrsystem

Slagutmattningsriggen använder pneumatik för att utföra slagutmattningstester, riggens rörelser kontrolleras analogt av mikrobrytare, reläer och en magnetventil. Luft och styrsystemet byggdes och simulerades i programmet FESTO Fluidsim.

### 4.7.1 Luftsystemet

Luftsystemet består av en huvudventil, en luftrenare med inbyggd regulator, en bufferttank, en 5/3 magnetventil och två dubbelverkande luftcylindrar (se Figur 39). Komponenterna kopplas samman med 5 mm (ID), 8 mm (OD) luftslang.

Luftflödet styrs med regulatoren och flödesventiler på magnetventilens avgasportar.



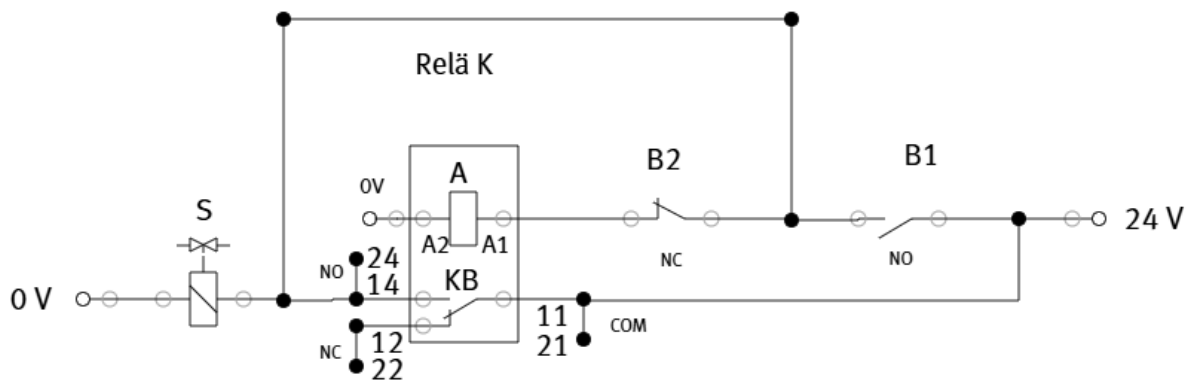
Figur 39. Kopplingsschema luftsystem.

### 4.7.2 Styrsystemet

Luftcylindrarnas rörelser styrs analogt av mikrobrytare, reläer och pneumatiska flödesventiler. Eftersom mikrobrytarna endast är aktiva då de fysiskt kontaktas behöver en tillfällig aktivering leda till ett bestående tillstånd i styrsystemet, detta uppnås med självhållande reläer.

Styrsystemet är utformat som en sekventiell tillståndsmaskin där självhållande reläer används för att lagra mikrobrytarnas aktiveringar. Systemets tillstånd förändras när nästa mikrobrytare aktiveras, exempelvis genom att bryta självhållningen hos ett relä.

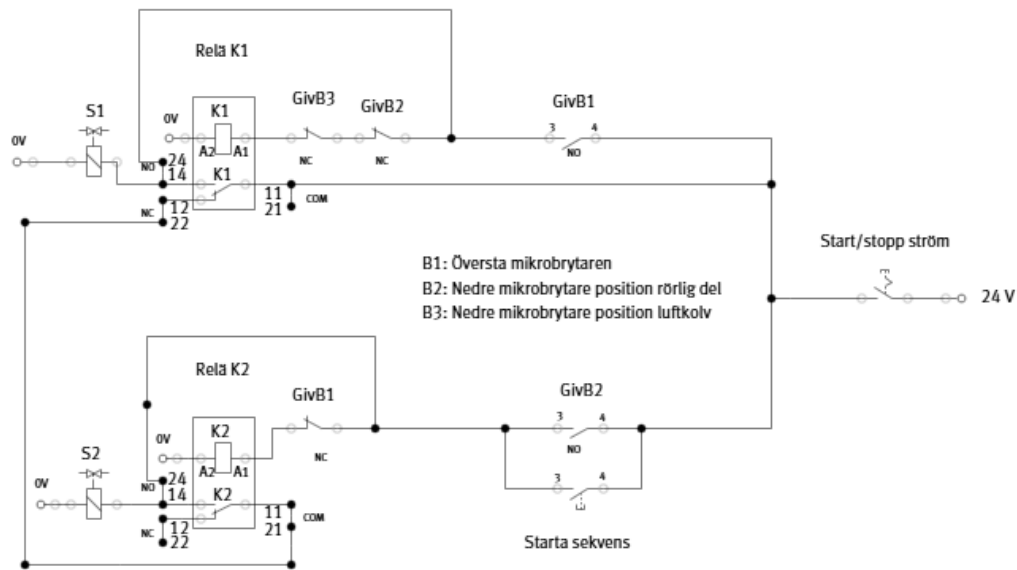
Självhållning hos ett relä (se Figur 40), uppnås genom att koppla den normalt öppna kontakten (14–24) till reläets spole (A). När brytaren B1 momentant sluter, spänningssätts spolen A vilken ändrar läget på KB och sluter kontakten mellan COM (11–21) och NO (14–24). Kopplingen mellan NO och A1 gör att reläet håller sitt tillstånd oberoende av B1, tills den normalt stängda kontakten B2 öppnas och bryter strömmen genom spolen.



Figur 40. Koppling av självhållande relä.

De två reläernas normalt öppna kontakter används för att spänningssätta den pneumatiska magnetventilens solenoider när reläerna aktiveras. Reläerna är kopplade så att båda inte kan vara aktiva samtidigt, detta minimerar risken för att systemet stannar till följd av att båda solenoider fastnar i öppet läge.

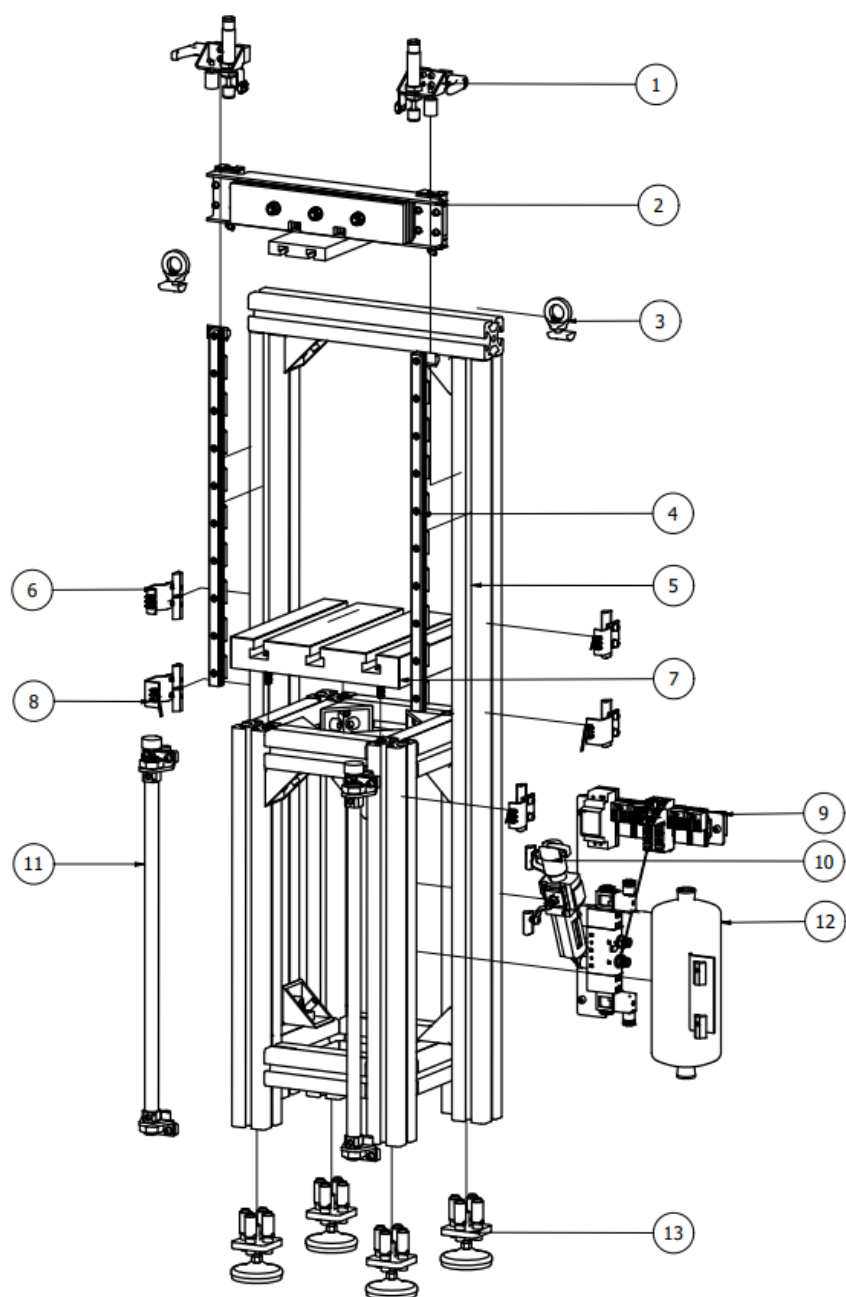
För kopplingsschema se Figur 41.



Figur 41. Koppling av styrsystem.

## 4.8 Val av komponenter

Slagutmattningsriggens komponenter har valts utifrån beräkningar utförda i 4.5 och tidigare bestämda kundkrav, bland annat har leverantörer valts med hänsyn till Volvo Technology AB:s leverantörsnät. Se Figur 42 samt Figur 43 för alla ingående komponenter, för mer detaljerad information se Bilaga 9–12.



Figur 42. Sprängskiss slagutmattningsrigg

| Bill of material |     |                                     |                                                    |
|------------------|-----|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Number           | QTY | Part                                | Description                                        |
| 1                | 2   | Stopper                             | Left and right are different, see assembly drawing |
| 2                | 1   | Carriage                            | See separate drawing                               |
| 3                | 2   | Lifting eye                         |                                                    |
| 4                | 2   | Guiderail 20x570                    | 10 M6 bolts and tslot nuts per rail                |
| 5                | 1   | Frame                               | See separate drawings                              |
| 6                | 3   | Lower T-slot plate<br>300x300x50    |                                                    |
| 7                | 1   | Carriage position<br>sensor assy    |                                                    |
| 8                | 2   | Aircylinder position<br>sensor assy |                                                    |
| 9                | 1   | Electrical panel                    | See assembly drawing                               |
| 10               | 1   | Pneumatic regulator                 |                                                    |
| 11               | 2   | Air cylinder SMC<br>C85N20-500      | See assembly drawing                               |
| 12               | 1   | Pneumatic buffer tank               |                                                    |
| 13               | 4   | Machinefoot assy                    | See separate drawing                               |

Figur 43. Bill of material komponenter

## 5 Utvärdering och rekommendation för vidareutveckling

I följande kapitel utvärderas hur väl den slutgiltiga konstruktionslösningen uppfyller de krav och önskemål som ställts. Vidare anges även rekommendationer på vidareutveckling för att uppnå alla krav som ställts och få en komplett slagutmattningsrigg.

### 5.1 Kravuppfyllnad och teknisk utvärdering

Nedan utvärderas hur väl det slutgiltiga konceptet uppfyller de krav och önskemål som ställts. Krav och önskemål härstammar från Bilaga 1.

#### 5.1.1 Kravuppfyllnad

Krav och önskemål utvärderas i Tabell 7. För tydligare redovisning i textform, se Bilaga 14. Experimentell verifiering uteslöts på grund av tids- och resursbegränsningar. Kontroll av konstruktionen i CAD, FEM och analytiska beräkningar användes därför som primära verifieringsmetoder.

Tabell 7. Kravuppfyllnadstabell

| No | Krav                                                | Målvärde                           | Aktuellt värde                            | Verifieringsmetod                                                                  | Osäkerhet                                                                                                                             | Resultat                                                                                |
|----|-----------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Dimensioner                                         | 500x700x2500 mm                    | 300x300x1400 mm                           | Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD                                          | Tillverknings toleranser kan ge mindre avvikelser.                                                                                    | Kravet uppfyllt                                                                         |
| 2  | Justerbar anslagsenergi                             | Ja                                 | Ja                                        | Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD                                          |                                                                                                                                       | Kravet uppfyllt                                                                         |
| 3  | Max vikt provobjekt                                 | 7 kg                               | 7 kg                                      | Analys av luftcylindrarnas lyftkraft samt FEM analys av rörlig balk                | Provobjekt med oväntad geometri kan ge oväntade belastningar.                                                                         | Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt                                           |
| 4  | Storlek provobjekt                                  | 250x250x250 mm                     | 250x250x250 mm                            | Teoreriskt verifierat med avläsning i CAD                                          | Två mycket stora (200 mm höga) provobjekt eliminerar lyfthöjden.                                                                      | Kravet uppfyllt                                                                         |
| 5  | Utbytbara fixturer för objekt                       | Ja                                 | Ja                                        | Teoreriskt verifierat med avläsning i CAD                                          |                                                                                                                                       | Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt                                           |
| 6  | Form provobjekt                                     | Två delar. En stationär, en rörlig | Två delar. En stationär, en rörlig        | Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD                                          |                                                                                                                                       | Kravet uppfyllt                                                                         |
| 7  | Normalkontakt                                       | Ja                                 | Ja                                        | Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD                                          | Oaktsam placering av provobjekt kan skapa sidokrafter.                                                                                | Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.                                          |
| 8  | Tillverkningsbarhet                                 | Ja, önskemål: inhouse              | Ja, inhouse                               | Med verkstadspersonal på Volvo samt tagit fram beställningslista.                  | Monteringstoleranser för glidskenor kan vara svåra att uppnå.                                                                         | Kravet uppfyllt. Önskemålet uppfyllt.                                                   |
| 9  | Cykeltid                                            | 1 Hz                               | 0,8 - 1,2 Hz                              | Analytisk beräkning. Falltid samt uppskattad lyfthastighet från luftcylindrar.     | Beräkningen bortser från acceleration, ventildynamik och tryckfallsvariationer, uppskattad osäkerhet 20 - 30%.                        | Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.                                          |
| 10 | Utbytbara slitdelar                                 | Ja                                 | Ja                                        | Teoreriskt verifierat med avläsning i CAD                                          | Slitdelar kan sluta tillverkas eller vara för svåra att byta                                                                          | Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.                                          |
| 11 | Noggrannhet för slag                                | ±1 mm                              | Som värst ±1 mm                           | Uppskattning baserad på linjärstyrningens precision samt styvhet i konstruktionen. | Noggrannheten kan även påverkas av deformationer i ram, toleranser vid montering och slitage.                                         | Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.                                          |
| 12 | Driftsäkerhet styrsystem                            | Vibrationsskyddat                  | Vibrationsskyddat                         | Med Ingenjörsmässig uppskattning.                                                  | Systemet har inte testats under vibration eller långvarig drift.                                                                      | Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.                                          |
| 13 | Spann anslagsenergi                                 | 0-50 Joule                         | 3,5-40 Joule                              | Analytisk energiberäkning baserad på lägesenergi.                                  | Förluster i systemet sänker eller höjer användbart energiintervall, beräkning baseras på en fallhöjd mellan 0,1 och 0,3 meter.        | Kravet delvis uppfyllt, särskilt vid högre energinivåer där relativa förluster minskar. |
| 14 | Transport                                           | Truck, Önskemål: egna hjul         | Travers, på eu pall                       | Teoreriskt verifierat med avläsning i CAD                                          | Praktisk hantering och ergonomi har inte verifierats.                                                                                 | Kravet delvis uppfyllt, önskemål ej uppfyllt.                                           |
| 15 | Livslängd, antal prover                             | 100 st                             | 100 st (med service)                      | Livslängdsdata från leverantörer.                                                  | Verklig livslängd kan påverkas av driftsförhållanden och underhåll.                                                                   | Kravet delvis uppfyllt, kräver regelbundet byte av slitdelar.                           |
| 16 | Helt automatiserat provförlöpp                      | Helt automatiskt                   | Kör automatiskt, saknar automatiskt stopp | Analys av styrsystem i FESTO Fluidsim                                              | Fördröjningar i verkliga komponenter kan påverka systemets funktion.                                                                  | Kravet delvis uppfyllt eftersom automatiskt stopp saknas.                               |
| 17 | Förberett för montering av accelerometer (Önskemål) | Ja                                 | Nej                                       | Teoreriskt verifierat med avläsning i CAD                                          |                                                                                                                                       | Önskemålet ej uppfyllt. Monteras i efterhand.                                           |
| 18 | Logga antal cykler (Önskemål)                       | Ja                                 | Nej                                       | Genomgång av styrsystem.                                                           |                                                                                                                                       | Önskemålet ej uppfyllt.                                                                 |
| 19 | Tolerans anslagsenergi                              |                                    | 5% 0-15%                                  | Data från leverantör samt Ingenjörsmässig beräkning.                               | Friktion från glidblock kan variera, ytterligare friktion kan tillkomma från förspänning i glidblocken eller variationer i smörjning. | Inte möjligt att verifiera inom ramen för arbetet.                                      |
| 20 | Efterföljande kollisioner (Önskemål)                |                                    | 0 0-10                                    | Test av monterad rigg.                                                             | Troligtvis stor variation beroende på testfall.                                                                                       | Inte möjligt att verifiera inom ramen för arbetet.                                      |

Konstruktionen bedöms vara färdigutvecklad ur ett konstruktionsperspektiv då den uppfyller många av de krav som definierades i kravspecifikationen. Två önskemål uppfylls däremot inte och ett önskemål samt ett krav går inte att verifiera inom ramen för arbetet.

Kravet om en justerbar anslagsenergi mellan 0 och 50 joule uppfylls delvis, anslagsenergin kan med nuvarande viktpaket och lyfthöjd justeras mellan 3,5 och 40 joule. Den övre gränsen beror på begränsningar i viktpaketets storlek samt förluster i systemet medans den lägre gränsen beror på minsta möjliga rörliga massa och lyfthöjd. Kravuppfyllnaden är tillräckligt god för kundens önskemål.

De önskemål som inte uppfylls ingår i vidare utveckling av slagutmattningsriggen. En avgränsning i arbetet var att utvecklingen fokuserade på konstruktionen och inte huvudsakligen mät- och styrsystemets utveckling.

Det krav som inte kunnat verifieras utgör en betydande risk för riggens praktiska användbarhet och kommer att behöva verifieras innan riggen tas i drift. Kravet bör verifieras genom att mäta den faktiska anslagsenergin vid en cykel och på så sätt uppskatta de förluster som uppkommer i systemet.

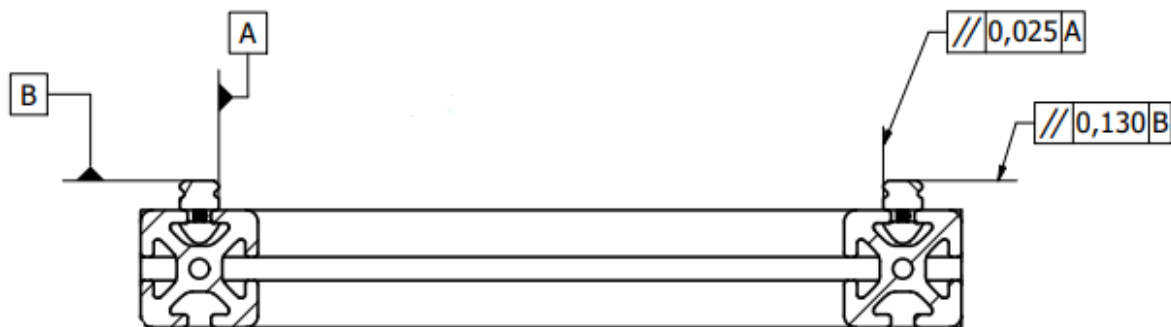
### 5.1.2 Teknisk utvärdering

Lösningen är robust och kan med sin modulära konstruktion repareras och uppgraderas vid behov.

Konstruktionen innehåller identifierade risker som kan påverka funktion och noggrannhet under driftsättningen. Riskerna är främst relaterade till friktion i glidskenorna samt luftcylindrarnas nedåthastighet.

Om luftcylindrarnas nedåtriktade rörelse inte är tillräckligt snabb för att möjliggöra den rörliga delens fria fall finns risk att cylindrarna bromsar rörelsen före anslag. Detta skulle minska anslagsenergin och därmed påverka testernas noggrannhet. Problemet kan åtgärdas exempelvis genom installation av snabbavgasventiler på utloppsportar.

Vid betydande friktion i glidskenorna bör detta tas i beaktande, eftersom friktionen kan hämma det fria fallet och därmed påverka anslagsenergin. Om friktionen orsakas av bristande parallellitet mellan glidskenorna bör parallelliteten förbättras. För toleransritning för glidskenornas montering se Figur 44.



Figur 44. Toleransritning montering glidskenor

Friktionen från glidblockens tätningar uppgår till cirka 6 N, vilket motsvarar ett arbete på ungefär 1,8 J vid en lyfthöjd på 0,3 m. Detta innebär att tester med anslagsenergi under cirka 36 J riskerar att få en avvikelse större än 5 %, vilket gör systemet mindre tillförlitligt i detta intervall.

## 5.2 Utvärdering av FEM-simuleringar

Nedan utvärderas de modellförenklingar som gjordes, tillförlitligheten av simuleringarna och hur det användes i designprocessen.

För att minska beräkningstiden för simuleringarna användes shell-element på de delar där det bedömdes lämpligt. Eftersom shell-element använder betydligt färre noder jämfört med solidmodellering ansågs detta vara fördelaktigt för att genomföra simuleringarna snabbare.

Eftersom aluminiumprofilerna har ett komplext tvärsnitt som inte är kompatibelt med shell-element valdes benen att modelleras som fyrkantströr med samma tvärsnittsarea som den valda profilen. Detta medför att tvärsnittet domineras av tunna väggar, vilket gör shell-element till ett lämpligt val. Vidare kontrollerades även hur knäckningsrisken skiljer sig mellan ben med förenklat tvärsnitt jämfört med det verkliga tvärsnittet enligt Euler fall 1. Resultatet visade att det förenklade tvärsnittet klarade 24 % högre belastning. Eftersom detta inträffade vid en belastning på 100 000 N med 40x40-profil bedömdes dock risken för knäckning vara låg.

En nackdel med användningen av ben med förenklat tvärsnitt med shell-element är att kontaktytan i ändarna mot både T-spårsplattan och golvet blir endast linjekontakter, vilket medför höga spänningskoncentrationer i dessa områden. Detta hanterades genom att de öppna ändarna på rören fylldes igen, vilket resulterade i en kvadratisk kontaktytan med samma yttermått som aluminiumprofilen. Kontaktyta blir därmed större jämfört med verkligheten, men eftersom spänningarna i övrigt var låga och den globala styvheten fortfarande bedömdes var representativ ansågs detta vara en rimlig förenkling.

För att verifiera simuleringarnas tillförlitlighet användes kriteriet att timglasenergin ska understiga 5 % av den inre energin enligt (Predictive Engineering, 2024). Timglasenergi är en icke-fysisk deformation med noll energi som kan uppstå vid användningen av underintegrerade element som använder enpunktsintegration. Resultatet från simuleringarna visade att det maximala förhållandet mellan timglasenergi och inre energi uppgick till 2 %, vilket är väl under gränsvärdet.

Vidare kontrollerades även att anslagshastigheten är korrekt vid en släpphöjd på 300 mm, vilket vid analytisk beräkning gav hastigheten 2,4261 m/s och i LS-DYNA var hastigheten 2,4257 m/s vilket ger ett fel på 0,01 % vilket ansågs vara ett minimalt fel.

Användandet av FEM-simuleringar i en iterativ designprocess möjliggjorde en effektiv utvärdering av designen, vilket resulterade i att konstruktionen kunde itereras med avseende på både funktion och hållfasthet. Vilket är extra fördelaktigt vid slagbelastning eftersom det är komplicerat och tidskrävande att utföra analytiskt.

Eftersom simuleringarna främst användes som stöd i designprocessen bör resultaten endast ses som uppskattningar. För att erhålla mer exakta resultat krävs randvillkor som bättre representerar de verkliga förhållandena samt en mer ingående analys av modellens konvergens, deformationer och styvhet. Endast enklare kontroller av LS-DYNA-modellen genomfördes inom ramen för arbetet, främst på grund av den höga komplexiteten av dynamiska simuleringar. Detta medför att vissa komponenter sannolikt är överdimensionerade. Då slagutmattningsriggen endast avses tillverkas i ett exemplar bedömdes det dock vara viktigare att säkerställa hög hållfasthet och driftsäkerhet än att minimera materialåtgången.

### 5.3 Rekommendation för vidare utveckling

För att riggen ska vara användbar i verkligheten krävs ett system som räknar antal cykler, som kan identifiera ett misslyckat test och stoppar riggen vid korrekt antal cykler.

En accelerometer bör monteras på slagutmattningsriggen. Monteringens görs då av Akustikavdelningen på Volvo Technology AB, accelerometern monteras på den rörliga delen. Den mätdata som är intressant under slagutmattningsprovet är accelerationen i vertikal- och horisontalld. Accelerometerdata används förslagsvis för att logga provobjektets prestanda över tid. En plötslig avvikelse i accelerometerdata, såsom plötsligt ökad eller minskad maxacceleration, kan användas för att stoppa provet om provobjektet går sönder eller lossnar.

Det krävs även ett system för att räkna antalet cykler, detta kan kombineras med mätdata från accelerometern. Den rörliga delens position bör även loggas med hjälp av en avståndsgivare. Mätdata från avståndsgivaren används för att logga anslagshastigheten och på så vis kontrollera den faktiska anslagsenergin för varje cykel. Systemet bör kunna stänga av tryckluften med en elektrisk avstängningsventil efter att korrekt antal cykler genomförts, eller vid misslyckat test.

## 6 Slutsats

Konstruktionslösningen är resultatet av en produktutvecklings- och designprocess där flera koncept genererades, utvärderades och successivt vidareutvecklades till ett slutgiltigt koncept. Produktutvecklingsprocessen genomfördes systematiskt med beslutsmatriser enligt en metod som tillämpats under tidigare kurser i produktutveckling på Chalmers.

Syftet med arbetet var att utveckla en konstruktionslösning för en förbättrad slagutmattningsrigg som noggrant kan testa flera olika komponenter med en kortare cykeltid jämfört med tidigare lösning. Arbetet har resulterat i en stabil och anpassningsbar konstruktionslösning baserad på aluminiumprofiler, där linjär skenstyrning möjliggör en kontrollerad translationsrörelse för den rörliga delen, på vilken det ena provobjektet är monterat. Det andra provobjektet monteras på en T-spårsplatta som är fast monterad på riggens ram. Konstruktionen innehåller två dubbelverkande luftcylindrar som utför provet tillsammans med ett analogt styrsystem.

Kravuppfyllnadsanalys visar att lösningen uppfyller många av de krav som inledningsvis ställts inför utvecklingen. Konstruktionen uppfyller alla mekaniska krav men uppfyller inte kraven på ett förbättrat mätsystem på grund av avgränsningarna. Konstruktionslösningen har för närvarande inget sätt att räkna cykler eller mäta uppnådd anslagsenergi.

Trots vissa avgränsningar och ej verifierade krav har arbetet resulterat i en konstruktionslösning som, efter vidare utveckling, kan skapa värde för Volvo Technology AB genom möjligheten att genomföra tillförlitliga slagutmattningsprov.

# Bilagor

## Bilaga 1: Kundkrav och önskemål

| Nr       | Kriterier                     | Krav                                            | Önskemål                                       | Vikt 1-7 (önskemål) |
|----------|-------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------|
| <b>1</b> | <b>Dimensioner</b>            |                                                 |                                                |                     |
| 1.1      | Bredd (m)                     | ≤ 0,7                                           |                                                |                     |
| 1.2      | Längd (m)                     | ≤ 2,5                                           |                                                |                     |
| 1.3      | Höjd (m)                      | ≤ 0,5                                           |                                                |                     |
| <b>2</b> | <b>Konstruktion</b>           |                                                 |                                                |                     |
| 2.1      | Anslagsenergi                 | Justerbar, mha vikt ELLER anslagshastighet      | Justerbar mha vikt OCH anslagshastighet        | 2                   |
| 2.2      | Anslagsenergi (J)             | 0 < x ≤ 50                                      |                                                |                     |
| 2.3      | Tolerans anslagsenergi (%)    | 5                                               |                                                |                     |
| 2.4      | Max vikt provobjekt (Kg)      | 7                                               |                                                |                     |
| 2.5      | Storlek provobjekt (mm)       | 0x0x0 < x ≤ 250x250x250                         |                                                |                     |
| 2.6      | Utbytbara fixturer för objekt | Ja                                              |                                                |                     |
| 2.7      | Form provobjekt               | Två delar, valfri form. En stationär en rörlig. |                                                |                     |
| 2.8      | Noggranhet för slag           | ≤1 mm åt varje håll                             |                                                |                     |
| 2.9      | Transport                     | Truck                                           | Egna hjul                                      | 5                   |
| 2.11     | Efterföljande kollisioner     |                                                 | Ingen efterföljande kollision                  | 7                   |
| 2.12     | Normalkontakt                 | Ja                                              |                                                |                     |
| 2.13     | Tillverkningsbar              | Ja                                              | I verkstaden (inhouse)                         | 4                   |
| <b>3</b> | <b>Prestanda</b>              |                                                 |                                                |                     |
| 3.1      | Cykeltid                      | 1 Hz                                            | >1 Hz                                          | 1                   |
| <b>4</b> | <b>Mätsystem</b>              |                                                 |                                                |                     |
| 4.1      | Accelerometer                 |                                                 | Förberett för montering                        | 6                   |
| <b>5</b> | <b>Styrsystem</b>             |                                                 |                                                |                     |
| 5.1      | Logga                         |                                                 | Antal cykler, Anslagsenergi, accelerometerdata | 3                   |
| 5.2      | Driftsäkerhet                 | Vibrationsskyddat                               |                                                |                     |
| 5.3      | Automatiserat                 | Helt automatiserat provförlopp                  |                                                |                     |
| <b>6</b> | <b>Livslängd</b>              |                                                 |                                                |                     |
| 6.1      | Antal prover                  | 100 prover                                      |                                                |                     |
| 6.2      | Utbytbara sliddelar           | Ja                                              |                                                |                     |

## Bilaga 1. Kundkrav och önskemål

## Bilaga 2: Cykeltider för koncept

|                                    |                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| Vertikal kollision (Drop test):    |                                       |
| -----                              |                                       |
| Lägsta möjliga cykeltid            | 0.43                                  |
| Längsta möjliga cykeltid           | 0.96                                  |
| Räknat på följande energiintervall | [ 9.8 19.6 29.4 39.2 49. ]            |
| -----                              |                                       |
| Horisontell kollision:             |                                       |
| -----                              |                                       |
| Lägsta möjliga cykeltid            | 0.6                                   |
| Längsta möjliga cykeltid           | 1.47                                  |
| Räknat på följande energiintervall | [ 7.5 16.88 26.25 35.63 45. ]         |
| -----                              |                                       |
| Svänghjul:                         |                                       |
| -----                              |                                       |
| Anslagsenergi                      | [ 0. 3.2 12.8 28.8 51.2]              |
| Cykeltid                           | [0. 0.4 0.8 1.2 1.6]                  |
| RPM                                | [ 0. 1507.96 3015.93 4523.89 6031.86] |
| Startvinkel (Grader)               | [ 0. 18.33 73.34 165.01 293.35]       |
| -----                              |                                       |
| Pendel:                            |                                       |
| -----                              |                                       |
| Anslagsenergi                      | [ 0. 2.4 9.36 20.2 33.86 49. ]        |
| Cykeltid                           | [0. 0.43 0.85 1.28 1.7 2.13]          |
| Startvinkel (Grader)               | [ 0. 18. 36. 54. 72. 90.]             |
| -----                              |                                       |

Bilaga 2: Cykeltider för koncept

## Bilaga 3: Kriterier Kesselringmatris

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| Enkel konstruktion     | Noggrannhet för slag |
| 1 Komplicerad          | 1 Usel               |
| 2 Relativt Komplicerat | 2                    |
| 3 Rimlig               | 3 Godkänd            |
| 4 Relativt enkelt      | 4                    |
| 5 Enkel                | 5 Utmärkt            |

|                            |                                |
|----------------------------|--------------------------------|
| Justerbarhet anslagsenergi | Storlek                        |
| 1 Komplicerad              | 1 Stort platskrav, ej flyttbar |
| 2 Relativt Komplicerat     | 2 Stort platskrav, flyttbar    |
| 3 Rimlig                   | 3 Mellanstort platskrav        |
| 4 Relativt enkelt          | 4 Litet platskrav              |
| 5 Enkel                    | 5 Mycket litet platskrav       |

|                                  |                         |
|----------------------------------|-------------------------|
| Tillgänglighet av komponenter    | Uppskattat servicebehov |
| 1 Finns hos specifik tillverkare | 1 100 000 cykler        |
| 2                                | 2                       |
| 3 Finns hos Volvos leverantörer  | 3 500 000 cykler        |
| 4                                | 4                       |
| 5 Allt i lager                   | 5 1 000 000 cykler      |

|                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| Beräknad Cykeltid | Transport              |
| 1 0,5 Hz          | 1 Komplicerad          |
| 2 0,75 Hz         | 2 Relativt komplicerad |
| 3 1 Hz            | 3 Rimlig               |
| 4 1,5 Hz          | 4 Relativt enkel       |
| 5 2 Hz            | 5 Enkel                |

Bilaga 3: Kriterier Kesselringmatris

## Bilaga 4: Kriterier Kesselringmatris 1 med vikt

| Kriterier:                    | Vikt: |
|-------------------------------|-------|
| Enkel konstruktion            | 4     |
| Justerbarhet anslagsenergi    | 7     |
| Tillgänglighet av komponenter | 5     |
| Noggrannhet för slag          | 8     |
| Storlek                       | 1     |
| Transport                     | 4     |
| Uppskattat servicebehov       | 4     |
| Beräknad Cykeltid             | 6     |

Bilaga 4: Kriterier Kesselringmatris 1 med vikt

## Bilaga 5: Kriterier Kesselringmatris

|                                  |                                |                               |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Enkel konstruktion               | Antal rörliga delar            | Beräknad Cykeltid             |
| 1 Komplicerad                    | 1 Många                        | 1 0,5 Hz                      |
| 2 Relativt Komplicerat           | 2                              | 2 0,75 Hz                     |
| 3 Rimlig                         | 3 Några                        | 3 1 Hz                        |
| 4 Relativt enkelt                | 4                              | 4 1,5 Hz                      |
| 5 Enkel                          | 5 Få                           | 5 2 Hz                        |
| Justerbarhet anslagsenergi       | Storlek                        | Transport                     |
| 1 Komplicerad                    | 1 Stort platskrav, ej flyttbar | 1 Komplicerad                 |
| 2 Relativt Komplicerat           | 2 Stort platskrav, flyttbar    | 2 Relativt komplicerad        |
| 3 Rimlig                         | 3 Mellanstort platskrav        | 3 Rimlig                      |
| 4 Relativt enkelt                | 4 Litet platskrav              | 4 Relativt enkel              |
| 5 Enkel                          | 5 Mycket litet platskrav       | 5 Enkel                       |
| Tillgänglighet av komponenter    | Uppskattat servicebehov        | Enkelhet styrsystem           |
| 1 Finns hos specifik tillverkare | 1 100 000 cykler               | 1 Kräver mycket programmering |
| 2                                | 2                              | 2                             |
| 3 Finns hos Volvos leverantörer  | 3 500 000 cykler               | 3 Enkel programmering         |
| 4                                | 4                              | 4                             |
| 5 Allt i lager                   | 5 1 000 000 cykler             | 5 Kräver ingen programmering  |

Bilaga 5: Kriterier Kesselringmatris

## Bilaga 6: Kriterier Kesselringmatris 2 med vikt

| Kriterier:                    | Vikt: |
|-------------------------------|-------|
| Enkel konstruktion            | 7     |
| Justerbarhet anslagsenergi    | 8     |
| Tillgänglighet av komponenter | 5     |
| Antal rörliga delar           | 6     |
| Storlek                       | 1     |
| Transport                     | 1     |
| Uppskattat servicebehov       | 4     |
| Beräknad Cykeltid             | 7     |
| Enkelhet styrsystem           | 5     |

Bilaga 6: Kriterier Kesselringmatris 2 med vikt

## Bilaga 7: Beräkning av översvängning för rörlig del

```
import numpy as np

#Hur stor blir översvängningen för den rörliga delen när den förs upp av luftkolvarna?

#Använder energi för att beräkna

m = 10 #kg massa för rörlig del
g = 9.8 #m/s^2
fMax = 300 #N max teoretisk total kolvkraft vid 5 bar
f = (fMax * 0.45) - (m*g) #Resulterande kraft, kolvkraften behöver strypas
l = 0.3 #m slaglängd

print("Resulterande kraft uppåt (n): ", f)

a = f/m

print("Resulterande acceleration uppåt (m/s^2): ", a)
print("Lyfttid (s): ", np.sqrt((2*l)/a))

vMax = np.sqrt(2*a*l) # Maxhastighet pga acceleration och slaglängd
print("Maxhastighet (m/s): ",vMax)

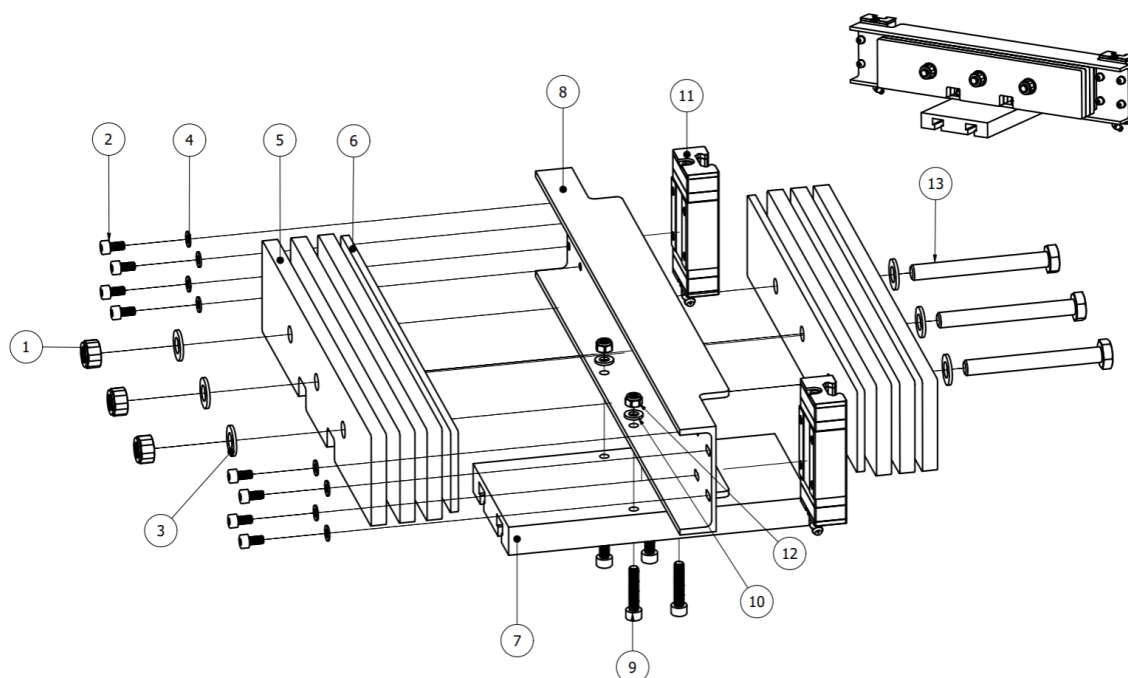
Ekin = m*(vMax**2)/2 #Kinetisk energi pga Vmax
print("Kinetisk energi (j) vid släppögonblicket: ", Ekin)

h = Ekin/(m*g) #Översvängning pga hastighet, använder samband kinetisk energi och lägesenergi
print("Översvängningshöjd (m): ", h)

print("Lägesenergi med översvängning inräknat: ", m*g*(l+h), " Lägesenergi utan: ", m*g*l)
print("Felmarginal pga översvängning:", ((m*g*(l+h))/(m*g*l)))
Resulterande kraft uppåt (n): 37.0
Resulterande acceleration uppåt (m/s^2): 3.7
Lyfttid (s): 0.40269363312841455
Maxhastighet (m/s): 1.489966442575134
Kinetisk energi (j) vid släppögonblicket: 11.100000000000001
Översvängningshöjd (m): 0.11326530612244899
Lägesenergi med översvängning inräknat: 40.5 Lägesenergi utan: 29.4
Felmarginal pga översvängning: 1.3775510204081634
```

Bilaga 7: Beräkning av översvängning för rörlig del

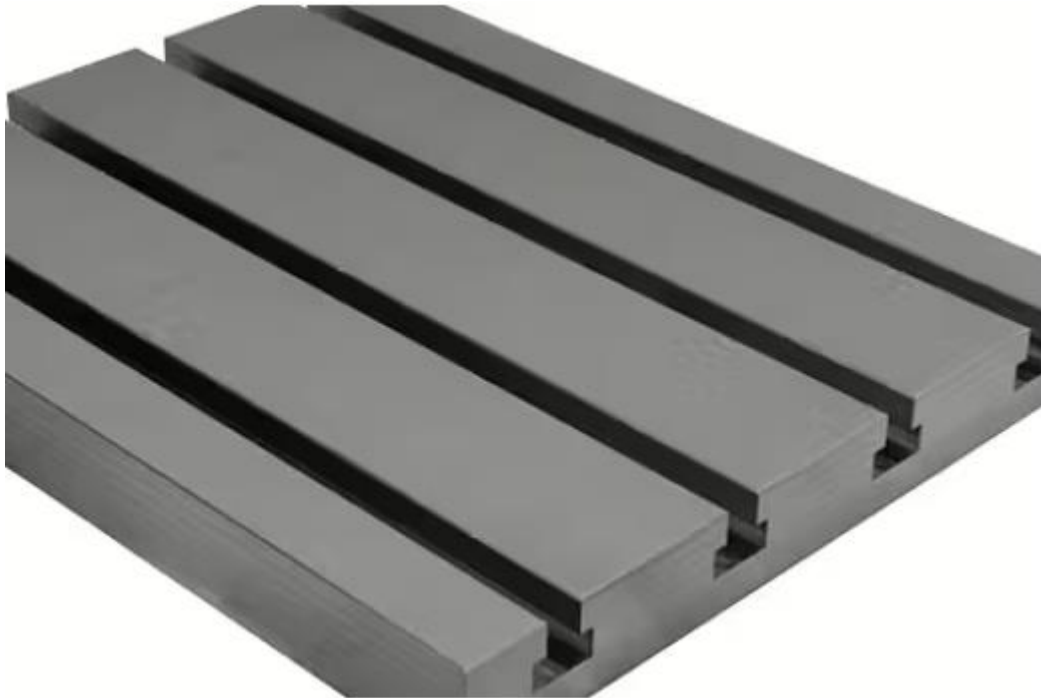
## Bilaga 8: Sprängskiss rörlig del



| Bill of material |     |                            |                                     |
|------------------|-----|----------------------------|-------------------------------------|
| Number           | QTY | Part                       | Description                         |
| 1                | 3   | Nut M10 NYLOC              |                                     |
| 2                | 8   | Screw M5x10                |                                     |
| 3                | 6   | Washer M10                 |                                     |
| 4                | 8   | Washer M5                  |                                     |
| 5                | 6   | Weight 1500g               | Adjust qty according to test energy |
| 6                | 2   | Weight 700g                |                                     |
| 7                | 1   | T-slot plate ALU 100x200mm |                                     |
| 8                | 1   | Milled I-beam              |                                     |
| 9                | 4   | Screw M6x30                |                                     |
| 10               | 4   | Washer M6                  |                                     |
| 11               | 2   | Slider MSB20S              |                                     |
| 12               | 4   | Nut M6 NYLOC               |                                     |
| 13               | 3   | Bolt M10x90                |                                     |

## Bilaga 9: Nedre T-spårsplatta

En 50 millimeter tjock T-spårsplatta med dimensionerna 300x300 millimeter används som nedre fästplatta se Figur 9.1 och fästs fast i ramen med 4 M8 fästelement. Plattan har valts med avseende på hållfasthet, plattans dimensioner överensstämmer med dimensionerna för nedre fästplatta i tidigare FEM analyser. Användandet av T-spårsplatta som fästplatta för provobjektet möjliggör flexibel fastsättning.



*Figur 9.1. TSP Steel 3030 Big block 50 mm. (Milltoolstore, 2026). Återgiven med tillstånd.*

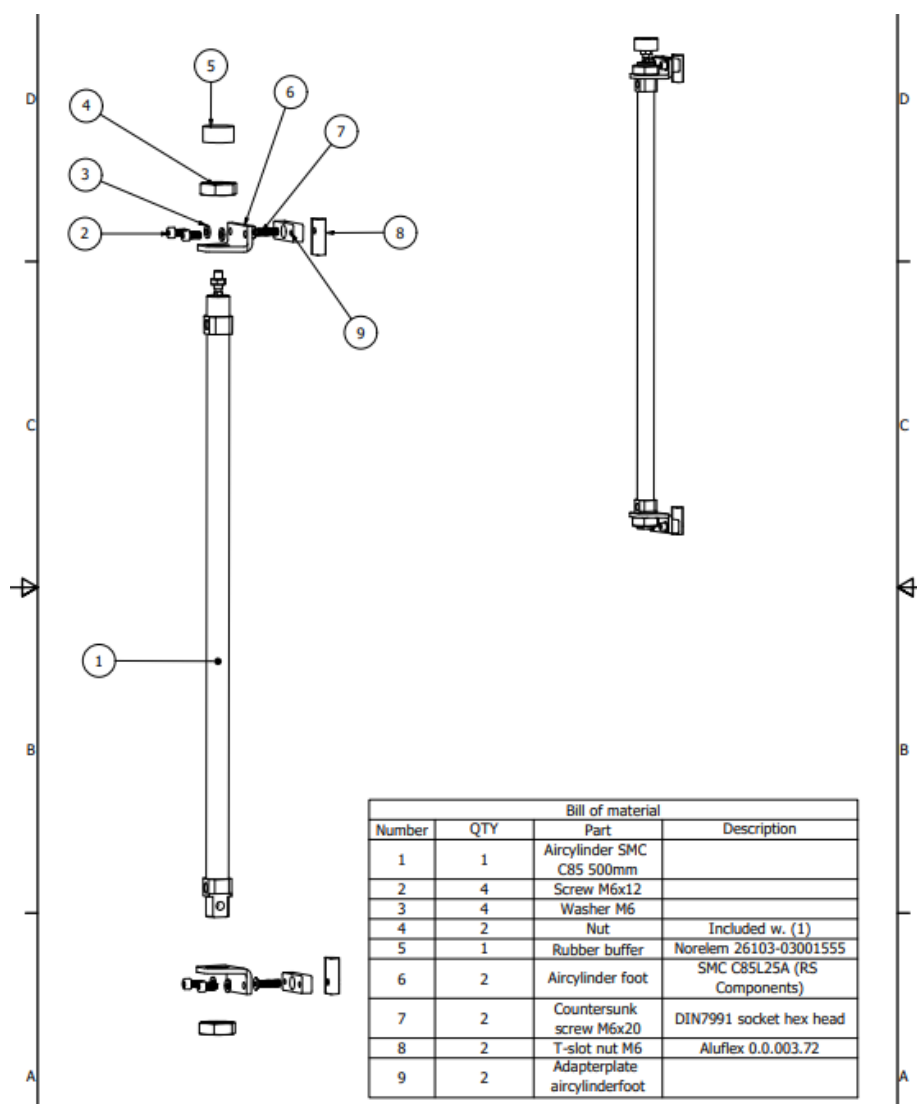
## Bilaga 10: Luftsystem

Luftcylindrar från SMC av modell CD85N20-500C-B har valts för att driva riggen, se Figur 10.1. De har en slaglängd på 500 millimeter, en specificerad maxhastighet på 1,5 m/s och har dubbelverkande funktion. Luftcylinderns tillåtna maxhastighet beror på luftcylinderns interna ändstopp (SMC, personlig kommunikation, 2026) vilket betyder att luftcylindern kan köras snabbare än den specificerade maxhastigheten på 1,5 m/s om den kompletteras med externa ändstopp.

Utifrån tidigare nämnda valdes slaglängd på 500 mm i stället för 300–400 mm eftersom kolven inte ska bottnas i något av läggen och på så sätt minskas slitaget på de interna ändstoppen. Luftcylindern ger en kraft på 160 N vid 5 bars tryck. För montering se sprängskiss nedan.



Figur 10.1. SMC CD85N20-500C-B. (RS Components, 2026). Återgiven med tillstånd



För att säkerställa lågt tryckfall över slangarna i luftsystemet väljs luftslangar med en innerdiameter på 5mm.

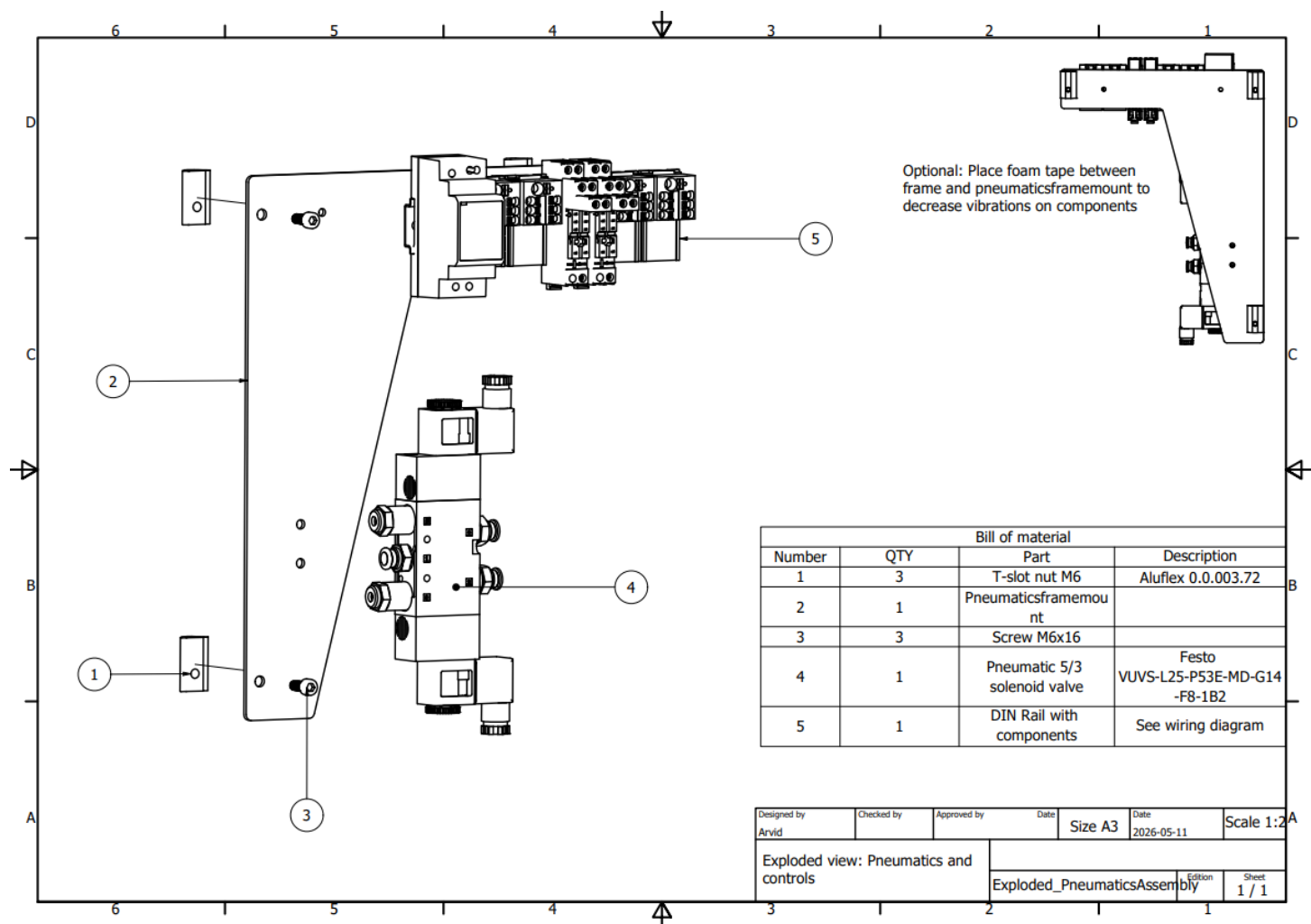
Tryckluften styrs med en elektrisk 5/3 styrventil från Festo, se Figur 10.2. Styrventilen har fem portar, en för inkommande tryckluft, två för utgående till cylindrar och två avgasportar. Styrventilen kontrolleras med elektricitet och tryckluft, en liten ström används för att dirigera ett pilottryck som i sin tur styr tryckluftens flödesbana. När ingen ström tillförs till någon sida av ventilen tillförs inte heller något tryck till något av utloppen.



Figur 10.2. Festo Magnetventil, (RS Components, 2026). Återgiven med tillstånd

## Bilaga 11: Styrsystem

Systemet styrs av mikrobrytare och reläer. Styrsystemet monteras på DIN skena, se sprängskiss, och matas med 24 V likström.



Mikrobrytarna som används är modellerna DB1C-A1LC och DB1C-A1LD från tillverkaren ZF. Det som skiljer dem åt är längden på armen, se Figur 11.1 och 2. De är av typen SPDT vilket betyder att brytaren matas med en ingångsspänning och kan kopplas antingen som normalt öppen (NO) eller normalt stängd (NC). Brytarna har en mekanisk livslängd på 15 miljoner aktiveringar.



Figur 11.1. Mikrobrytare DB1C-A1LC. (RS Components, 2026). Återgiven med tillstånd



Figur 11.2. Mikrobrytare DB1C-A1LD. (RS Components, 2026). Återgiven med tillstånd

Reläerna är av typen Finder 40 SPDT 24V. Se Figur 11.3.



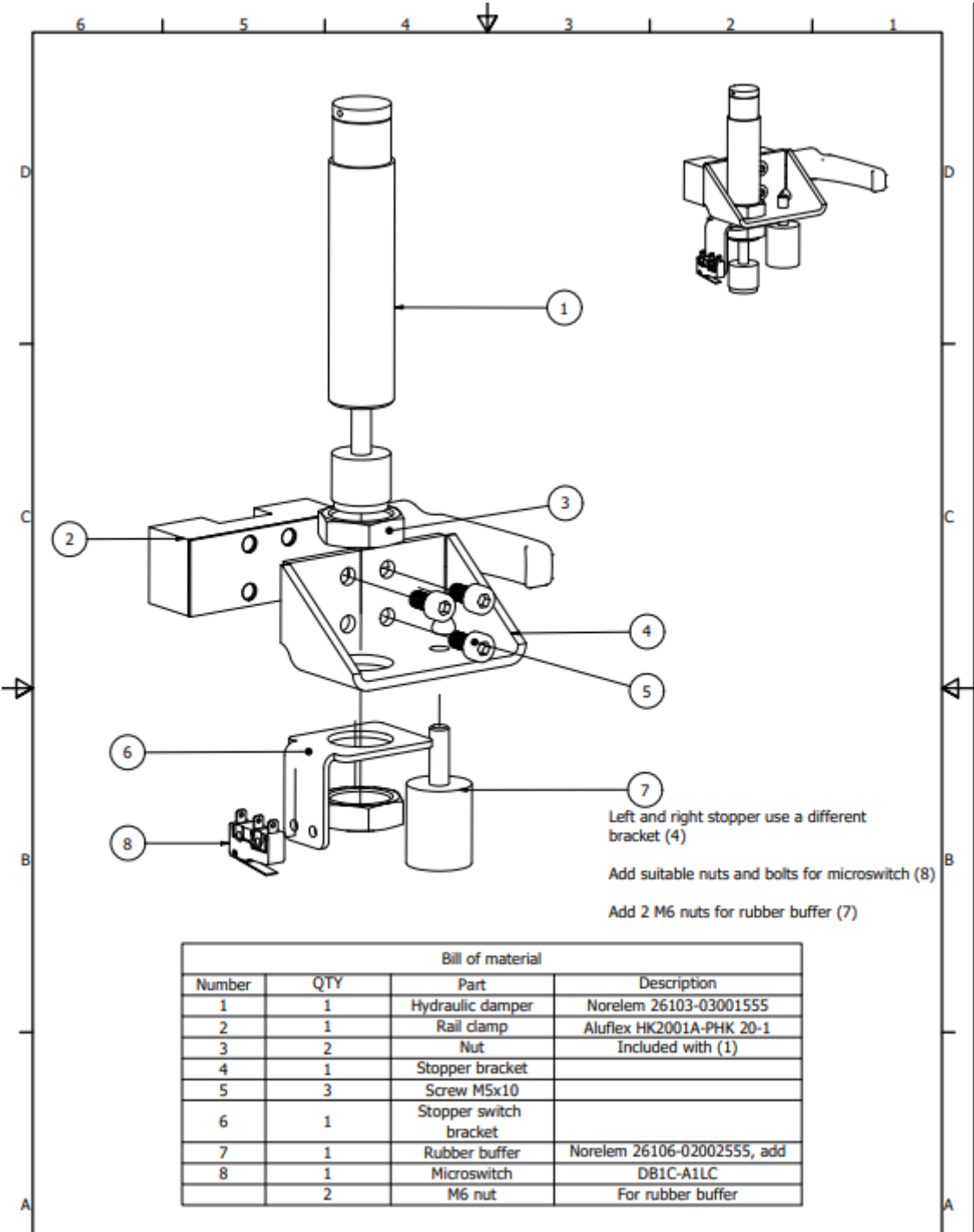
Figur 11.3. Finder 40 SPDT Effektrele 24V. (RS Components, 2026). Återgiven med tillstånd

Reläerna monteras på DIN skena i reläsocklar av typen Finder 95.05SPA, se Figur 11.4.



Figur 11.4. Reläsockel Finder 95.05SPA. (RS Components, 2026). Återgiven med tillstånd

Bilaga 12: Ändstopp för rörlig del



Ändstoppets höjd bestäms med ett manuellt klämelement från Aluflex, storleken beror på glidskenans storlek. För en glidskena med en bredd på 20mm används klämelement som passar glidskenan, se Figur 12.1. Hållkraften är 1200 N.



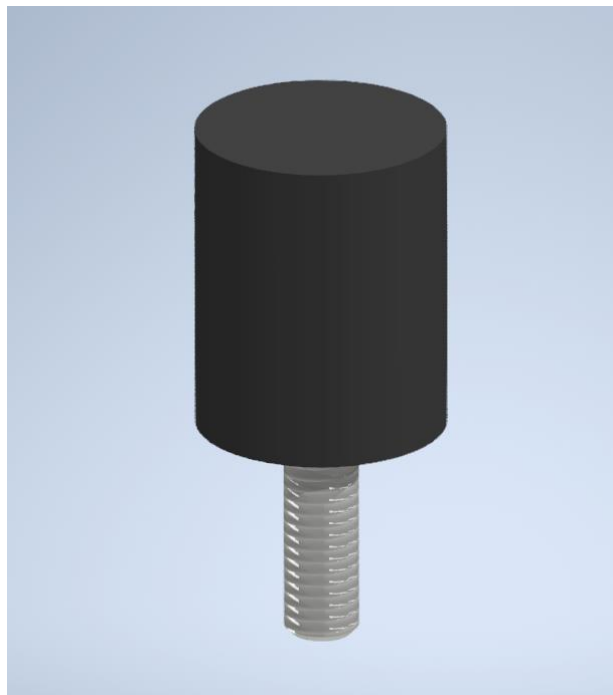
*Figur 12.1 Manuellt klämelement (Aluflex, 2026). Återgiven med tillstånd*

Enligt avsnitt 4.6 kommer den rörliga delen behöva bromsas ned i övre läge, därför har en dimensionerad hydraulisk dämpare valts, se Figur 12.2. Dämparen har en slaglängd på 16mm och har justerbar dämpning.



*Figur 12.2. Hydraulisk dämpare (Norelem, 2026). Återgiven med tillstånd*

En gummibuffert, se Figur 12.3, används som komplement till den hydrauliska dämparen, syftet är att skapa ett bestämt inställbart ändstopp.



Figur 12.3. Gummibuffertar. (Norelem, 2026). Återgiven med tillstånd

## Bilaga 13: Transportöglor

Ögleskruvar valdes för att ge möjligheten att uppfylla transportkravet genom att lyfta slagutmattningsriggen med en travers och på så sätt kunna transportera riggen på en lastpall. En svängbar ögleskruv valdes för att minimera risken att den skruvar ut sig från fästet och glider ur spåret i aluminiumprofilen, se Figur 13.1.



Figur 13.1. Ögleskruv. (Norelem, 2026). Återgiven med tillstånd

## Bilaga 14: Kravuppfyllnad

### Uppfyllda krav:

- **Dimensioner**, 500x700x2500 mm: Slagutmattningsriggen är LxBxH: 300x300x1400 mm.  
Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD  
Osäkerhet: Tillverkningsstoleranser kan ge mindre avvikelser.  
Resultat: Kravet uppfyllt.
- **Anslagsenergi**, Justerbar: Anslagsenergin justeras genom att placera vikter på den rörliga delen samt genom att justera släpphöjden mellan 0–300 mm.  
Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD  
Osäkerhet:  
Resultat: Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.
- **Max vikt provobjekt**, 7 kg: Den rörliga delen är dimensionerad för att bära en totalmassa på 14 kg, vilket gör att vid tyngre provobjekt används färre vikter.  
Verifierat: Analys av luftcylindrarnas lyftkraft samt FEM analys av rörlig balk  
Osäkerhet: Provobjekt med oväntad geometri kan ge oväntade belastningar.  
Resultat: Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.
- **Storlek provobjekt** 250x250x250 mm: Maximala avståndet mellan övre och undre T-spårsplatta är 400 mm. Vilket ger att ett provobjekt med höjd 250 mm går att testa.  
Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD  
Osäkerhet: Två mycket stora (200 mm höga) provobjekt eliminerar lyfthöjden.  
Resultat: Kravet uppfyllt.
- **Utbytbara fixturer för objekt**, Ja: Fixturer för att hålla fast provobjekten fästs i T-spårsplattorna.  
Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD  
Osäkerhet: Ingen.  
Resultat: Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.
- **Form provobjekt**, två delar, en stationär samt en rörlig: Ett provobjekt fästs i den rörliga delen och ett i den undre fasta T-spårsplattan.  
Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD  
Osäkerhet: Ingen.  
Resultat: Kravet uppfyllt.
- **Normalkontakt**, Ja: Glidskenorna är placerade så att den rörliga delen endast rör sig vertikalt.  
Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD  
Osäkerhet: Oaktsam placering av provobjekt kan skapa sidokrafter.  
Resultat: Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.

- **Tillverkningsbar:** Krav: Ja, önskemål: in house: De delar som inte köps färdiga från leverantör kan tillverkas in-house i verkstaden.

Verifierat: Med verkstadspersonal på Volvo samt tagit fram beställningslista.

Osäkerhet: Monteringstoleranser för glidskenor kan vara svåra att uppnå.

Resultat: Kravet uppfyllt. Önskemålet uppfyllt.

- **Cykeltid, 1 Hz:** Det tar ca 0,25 sekunder för objektet att falla, med en lyfthastighet på 1,5 m/s tar det 0,45 sekunder att lyfta upp det. Med marginal för acceleration och inbromsning ger detta en cykeltid på cirka 1 Hz.

Verifierat: Analytisk beräkning baserad på falltid samt uppskattad lyfthastighet från luftcylindrar.

Osäkerhet: Beräkningen bortser från acceleration, ventildynamik och tryckfallsvariationer, uppskattad osäkerhet 20 - 30%.

Resultat: Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.

- **Utbytbara slitdelar,** Ja: Delarna som utsätts för slitage är luftcylindrarna och glidblocken vilka båda är utbytbara.

Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD

Osäkerhet:

Resultat: Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.

- **Noggrannhet för slag  $\pm 1$  mm.** Gångparallellitet mellan glidblocket och skena är 0,016 mm enligt (Aluflex, 2026).

Verifierat: Uppskattning baserad på linjärstyrningens precision samt styvhet i konstruktionen.

Osäkerhet: Noggrannheten kan även påverkas av deformationer i ram, toleranser vid montering och slitage.

Resultat: Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.

- **Driftsäkerhet styrsystem.** Styrsystemet vibrationsskyddas med vibrationsabsorberande material mellan styrsystem och resten av konstruktionen.

Verifierat: Med ingenjörsmässig uppskattning.

Osäkerhet: Systemet har inte testats under vibration eller långvarig drift.

Resultat: Kravet uppfyllt, ej verifierat experimentellt.

#### **Delvis uppfyllda krav:**

- **Anslagsenergi, 0–50 Joule:** slagutmattningsriggen klarar att testa mellan 3.5 och 40 joule (exklusive vikt av provobjekt). Trots att kravet inte uppfylls i hela intervallet uppfylls det inom det praktiskt mest relevanta användningsområdet.

Verifierat: Analytisk energiberäkning baserad på lägesenergi.

Osäkerhet: Förluster i systemet kan sänka eller höja det användbara energiintervallet, beräkningen baseras på en fallhöjd mellan 0,1 och 0,3 meter.

Resultat: Kravet delvis uppfyllt, särskilt vid högre energinivåer där relativa förluster minskar.

- **Transport**, krav: med truck, önskemål: egna hjul. Detta har inte uppfyllts, men riggen är utrustad med lyftöglor och kan läggas på en EU pall för transport med truck. Rummet där den ska placeras är utrustat med travers. Uppdragsgivaren har bekräftat att lösningen är tillfredsställande.

Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD

Osäkerhet: Praktisk hantering och ergonomi har inte verifierats.

Resultat: Kravet delvis uppfyllt, önskemål ej uppfyllt.

- **Livslängd antal prover**, 100 st. För att uppfylla kravet behöver alla komponenter vara dimensionerade för uppåt 100 miljoner cykler. Tätningarna i luftcylindrarna är exempelvis dimensionerade för 10 miljoner cykler. Kravet är fortfarande möjligt att uppnå men kräver service av riggen, exempelvis genom att byta tätningar och eventuellt glidblock.

Verifierat: Livslängdsdata från leverantörer.

Osäkerhet: Verklig livslängd kan påverkas av driftsförhållanden och underhåll.

Resultat: Kravet delvis uppfyllt, kräver regelbundet byte av slitdelar.

- **Helt automatiserat provförlöpp**. Riggen kan köra provet automatiskt, men det finns inget som automatiskt stoppar provet efter rätt antal cykler.

Verifierat: Analys av styrsystem i FESTO Fluidsim

Osäkerhet: Fördröjningar i verkliga komponenter kan påverka systemets funktion.

Resultat: Kravet delvis uppfyllt eftersom automatiskt stopp saknas.

#### **Ej uppfyllda önskemål:**

- **Förberett för montering av accelerometer**. Inte förberett, med bakgrunden att accelerometer lånas från mätinstrumentsförrådet på Volvo Technology och sedan limmas fast på lämplig plats på slagutmattningsriggen.

Verifierat: Teoretiskt verifierat med avläsning i CAD

Osäkerhet: Ingen.

Resultat: Önskemålet ej uppfyllt. Monteras i efterhand.

- **Logga antal cykler**. Det finns inget system för att logga antal cykler, eftersom arbetet har fokuserat på utveckling av den mekaniska konstruktionen och enklare styrsystem.

Verifierat: Genomgång av styrsystem.

Osäkerhet: Ingen.

Resultat: Önskemålet ej uppfyllt.

### **Inte möjligt att verifiera:**

- **Tolerans anslagsenergi, 5%.** Motståndet från ett glidblock är 3 N från tätningarna enligt (Aluflex, 2026). Detta ger att vid användandet av två glidblock blir motståndet 6 N från glidblocken. Omvandlat till arbete över 0,3 meter blir det 1,8 J, vilket vid tester med anslagsenergi under 36 J utgör en felmarginal på över fem procent. En lösning är att extravikter alternativt högre lyfthöjd används för att kompensera för förlusterna.

Verifierat: Data från leverantör samt ingenjörsmässig beräkning.

Osäkerhet: Friktion från glidblock kan variera, ytterligare friktion kan tillkomma från förspänning i glidblocken eller variationer i smörjning.

Resultat: Inte möjligt att verifiera inom ramen för arbetet.

- **Efterföljande kollisioner (önskemål).** Efterföljande kollisioner beror till stor del på vilket provobjekt som testas samt vilken energi som används. Ett stort provobjekt av stål som testas för låg anslagsenergi kommer troligtvis att studsas mycket, medan ett litet provobjekt av mässing som testas för hög energi inte studsar på grund av självdämpande egenskaper och kvarstående deformationer. Oavsett så ger testet fortfarande relevanta provresultat då samma villkor gäller för komponenterna under drift.

Verifieringsmetod: Test av monterad rigg.

Osäkerhet: Troligtvis stor variation beroende på testfall.

Resultat: Inte möjligt att verifiera inom ramen för arbetet.

## Referenslista:

Aalco, (2026). Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 6063 - T6 Extrusions.

[https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6063-T6-Extrusions\\_158.ashx](https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6063-T6-Extrusions_158.ashx)

Aluflex. (2026). LINEAR GUIDES [Produktblad]. <https://www.aluflex.com/wp-content/uploads/2021/02/AluFlex-Linear-Guides-catalogue-2026-04-28.pdf>

Argatov, I (2024). *Viscoelastic Hertzian Impact*. Lubricants 2024, 12, 193.

<https://doi.org/10.3390/lubricants12060193>

Aluflex. 2026. Manuellt klämelement [fotografi].

<https://www.aluflex.com/se/produkt/hk1501a/>

Aluflex. 2026. Skenstyrning MSB20S [fotografi].

<https://www.aluflex.com/se/produkt/msb20s/>

Gesab. (11 april 2024) *Välj rätt kompressor – användningen avgör vilken modell som passar bäst.*

<https://www.gesab-sweden.se/2024/04/11/valj-ratt-kompressor-anvandningen-avgor-vilken-modell-som-passar-bast/>

Metallkompetens. (2026, 4 mars). *Utmattningshållfasthet.*

<https://metallkompetens.se/handbok/laglegerade-stal/egenskaper/utmattningshallfasthet/>

Milltoolstore. (2026). TSP Steel 3030 Big block 50 mm [fotografi].

<https://www.milltoolstore.se/sv/t-spar-bord/t-spar-bord-stal-precision-big-block/tsp-steel-3030-big-block-50-mm.html>

Norelem. 2026. Gummibuffertar [fotografi].

<https://www.norelem.se/sv/Produkt%C3%B6versikt/System-och-komponenter-f%C3%B6r-maskin--och-anl%C3%A4ggningskonstruktion/26000/Gummid%C3%A4mpare/Gummid%C3%A4mpare-st%C3%A5l-eller-rostfritt-st%C3%A5l-typ-D-cylindrisk-med-ytterg%C3%A4ngar-p%C3%A5-tv%C3%A5-sidor/Gummibuffertar-typ-d-st%C3%A5l/p/26106-01501555>

Norelem. 2026. Stötdämpare [fotografi].

<https://www.norelem.se/sv/Produkt%C3%B6versikt/System-och-komponenter-f%C3%B6r-maskin--och-anl%C3%A4ggningskonstruktion/26000/St%C3%B6td%C3%A4mpare/Industri-st%C3%B6td%C3%A4mpare-inst%C3%A4llbara/St%C3%B6td%C3%A4mpare-inst%C3%A4llbar-st%C3%A5l/p/26300-2015016>

Norelem. 2026. Ögleskruv [fotografi].

<https://www.norelem.se/sv/Produkt%C3%B6versikt/Flexibelt-standarddelsystem/07000/F%C3%A4stpunkter/%C3%96gleskruvar-vridbara-h%C3%B6gh%C3%A5llfasta-kvalitetsklass-10/%C3%96gleskruv-sv%C3%A4ngbar-st%C3%A5l-gul-plast-belagd/p/07695-10151>

Newcastle University, School of Computing Science. (u.å.). *Physics tutorial: Collision response*.

<https://research.ncl.ac.uk/game/mastersdegree/gametechnologies/physicstutorials/5collisionresponse/Physics%20-%20Collision%20Response.pdf>

Predictive Engineering. (2024). *LS-DYNA handbook for structural mechanics*.

<https://predictiveengineering.com/sites/default/files/LS-DYNA-Training/LS-DYNA-Handbook-2024.pdf>

RS Components. 2026, CD85N20-500C-B [fotografi].

<https://se.rs-online.com/web/p/pneumatiska-kolvstangscylinrar/2328751?gb=a>

RS Components. 2026, ZF Mikrobrytare, Spak ställdon, SPDT, 250 V ac 6 A Lödning IP50 [fotografi]. <https://se.rs-online.com/web/p/mikrobrytare/0517763>

RS Components. 2026, ZF Mikrobrytare, Lång gångjärnsspak ställdon, SPDT, 250 V ac 6 A Lödning IP50 [fotografi]. <https://se.rs-online.com/web/p/mikrobrytare/1594607>

RS Components. 2026, Finder 40 SPDT Effektrele, Kretskort, 24V dc spolspänning / 16A dc [fotografi]. <https://se.rs-online.com/web/p/effektrelaer/2826641>

RS Components. 2026, Finder Reläsockel, till 40.52, 40.61, 44.52, 44.62, 40,51 Serie Relä 8 250V ac 95 Skruv [fotografi]. <https://se.rs-online.com/web/p/relasocklar/4009130?gb=a>

Shuaeib, F.M., Benyounis, K.Y., Hashmi, M.S.J., (2017), Material Behavior and Performance in Environments of Extreme Pressure and Temperatures, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04170-9>



**CHALMERS**