

Konstruktion av utbytbara stödbalkar för skärpaletter

Dennis Hagnäs

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Maskin- och produktionsteknik

Vasa 2023

EXAMENSARBETE

Författare: Dennis Hagnäs
Utbildning och ort: Maskin- och produktionsteknik, Vasa
Inriktning: Maskinkonstruktion
Handledare: Tobias Ekfors – Yrkeshögskolan Novia
Sören Snellman – AMADA Automation Europe

Titel: Konstruktion av utbytbara stödbalkar för skärpaletter

Datum: 16.5.2023

Sidantal: 35

Bilagor: 7

Abstrakt

Detta arbete har utförts på uppdrag av AMADA Automation Europe, AAE, som tillverkar kompletterande automationsutrustning till maskintillverkaren AMADAs stans- och laserskärmaskiner. Företaget hade underrättats om ett problem där stödbalkarna i deras skärpaletter börjat utsättas för allt högre slitage under skärning av högreflektiva metaller.

Projektets syfte var att lösa problemet med de fastsvetsade stödbalkarna som inte kunde bytas ut som de övriga slitdelarna i skärområdet. Målet med projektet var att utforma nya utbytbara stödbalkar, bekräfta deras hållfasthet, framställa alla ritningar som krävs för tillverkningen av de nya skärpaletterna och införa dessa i företagets PDM- samt ERP-system. Projektet behandlade endast uppdragsgivarens nyaste skärpalettsmodeller till stationerna ASF II 3015 EU och LST 3015.

Fyra nya koncept på utbytbara stödbalkar genererades och deras hållfasthet jämfördes med den ursprungliga stödbalken genom finita element-metoden i programvaran NX Nastran. Med analyserna och en kravlista som grund valdes det tredje konceptet för vidareutveckling till den slutliga lösningen. Efter konceptvalet bekräftades även att maskinanvändarna kan tillverka stödbalkarna i koppar för en längre livslängd.

Målet uppnåddes och resultatet av projektet är två nya skärpaletter med tillhörande ritningar. Innan de nya skärpaletterna börjar tillverkas ska de äldre skärpaletterna tillverkas så långt de redan beställda delarna räcker, överliggande maskinsammanställningar revideras och förändringen meddelas till övriga berörda företag i AMADA-koncernen.

Språk: svenska

Nyckelord: laserskärning, skärpalett, växelbord, slitage, stödbalk

BACHELOR'S THESIS

Author: Dennis Hagnäs
Degree Programme: Mechanical and Production Engineering, Vaasa
Specialisation: Mechanical Construction Engineering
Supervisors: Tobias Ekfors – Novia UAS
Sören Snellman – AMADA Automation Europe

Title: Design of Replaceable Transverse Beams for Cutting Pallet

Date: 16.5.2023

Number of pages: 35

Appendices: 7

Abstract

This thesis work was commissioned by AMADA Automation Europe, AAE, which manufactures complementary automation equipment for AMADA's punching and laser cutting machines. The company had been informed of a problem where the transverse beams of their cutting pallets were becoming increasingly worn during the cutting of highly reflective metals.

The project aimed to solve the problem with the transverse beams that could not be replaced like the other wear parts in the cutting area. The goal of the project was to design new replaceable transverse beams, confirm their strength, create all the drawings required to produce the new cutting pallets and insert them into the company's PDM and ERP systems. The project dealt only with the company's latest cutting pallet models for the ASF II 3015 EU and LST 3015 stations.

Four replaceable transverse beam concepts were generated, and their strength was compared to the original beam using the finite element method in NX Nastran software. The third concept was selected for further development, based on the analysis result and a list of requirements. After the concept selection, it was also confirmed that customers can manufacture parts of the new transverse beams from copper for a longer lifespan.

The goal was achieved, and the project resulted in two new cutting pallets with drawings. Before production of the new cutting pallets starts, the older cutting pallets will be produced as far as the parts already ordered are concerned, the overhead machine assemblies will be revised, and the change will be communicated to the other affected companies in the AMADA group.

Language: Swedish

Key words: laser cutting, cutting pallet, cutting table, wear, transverse beam

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Företagsbeskrivning	1
1.2	Bakgrund	2
2	Problemformulering	3
2.1	Skärpalett	3
2.2	LST 3015	4
2.3	ASF II 3015 EU	5
2.4	Skärpalettens uppbyggnad och tillverkning	6
2.5	Syfte och målsättning	7
2.6	Avgränsning	7
3	Teori	8
3.1	Laserskärning	8
3.1.1	Koldioxid	9
3.1.2	Nd:YAG	10
3.1.3	Fiber	10
3.1.4	Skärgas	11
3.1.5	Industrins utveckling	12
3.2	AMADAs laserskärmaskiner	14
3.2.1	ENSIS-AJ	14
3.2.2	VENTIS-AJ	14
3.2.3	REGIUS-AJ	15
3.2.4	Kapacitet	15
4	Tillvägagångssätt	16
4.1	Metodval	16
4.2	Ursprungliga skärpalettens uppbyggnad	17
4.3	Kravspecificering	18
4.4	Analys av ursprungliga stödbalkens hållfasthet	19
4.5	Konceptgenerering	22
4.5.1	Koncept 1	23
4.5.2	Koncept 2	24
4.5.3	Koncept 3	25
4.5.4	Koncept 4	27

5	Resultat.....	28
5.1	Konceptval	28
5.2	Implementering	29
6	Diskussion	30
6.1	Nötningens orsak.....	30
6.2	Kritisk granskning.....	31
6.3	Förslag till vidare forskning.....	32
6.4	Avslutning	32
7	Källförteckning.....	33

Bilageförteckning

Bilaga 1	Beräkning av dimensioneringslaster
Bilaga 2	Analysrapport ursprunglig stödbalk
Bilaga 3	Analysrapport koncept 1
Bilaga 4	Analysrapport koncept 2
Bilaga 5	Analysrapport koncept 3
Bilaga 6	Analysrapport koncept 4
Bilaga 7	Analysrapport koncept 3 huvudplåt tillverkad av koppar

1 Inledning

Laserskärning har sedan millennieskiftet gått från en nischad tillverkningsmetod för tunnplåt till ett självklart val för många tillverkare. Tack vare nya tekniker och allt högre lasereffekter ökar skärhastigheterna och tjocklekarna som kan skäras för varje år. Moderna tvådimensionella laserskärmaskiner kan utrustas med kompletta automationssystem för materialhanteringen som möjliggör produktion en längre tid utan insats från operatörer. Hela maskinparker kan förses med planeringssystem som automatiskt schemalägger tillverkningen för maskinerna, ser till att de får avsedda materialet ur lagret i tid och beställer reservdelar i tid till nästa service.

Detta projekt är utfört på uppdrag av AMADA Automation Europe, AAE. Företaget är en del av AMADA-koncernen som utvecklar och tillverkar kompletterande automationsutrustning till maskintillverkaren AMADAs stans- och laserskärmaskiner.

1.1 Företagsbeskrivning

AAE grundades i Lövä, Pedersöre år 1979 av Leif Kälman under namnet LKI Kälman, LKI. I början erbjöd företaget underleverantörstjänster inom metallbearbetning, men på 90-talet började LKI utveckla automationsutrustning för plåthantering. År 1995 lanserade företaget sin första standardlösning till AMADAs stansmaskiner och samarbetet fick sin början. LKI växte och för att öka tillverkningskapaciteten byggdes en ny fabrik år 2001 i Bennäs, Pedersöre. År 2009 blev AMADA delägare i företaget och år 2020 köpte AMADA den sista delen av LKI, som i och med ägarbytet bytte namn till AMADA Automation Europe. I figur 1 visas företagets verksamhetsområde i Bennäs.



Figur 1. AAE:s verksamhetsområde i Bennäs. (AMADA Automation Europe, 2021).

1.2 Bakgrund

På grund av de snabba rörelserna är majoriteten av moderna laserskärmaskiner byggda enligt principen *flying optics*, som innebär att laserstrålen förflyttas medan arbetsstycket ligger stationärt inne i maskinen på en skärpalett. Maskinen har två skärpaletter som förflyttas på räls mellan skärområdet inuti maskinen och en palettväxel utanför. Under tiden som materialet på den ena skärpaletten skärs befinner sig den andra paletten i palettväxeln, där den skurna plåten avlägsnas och en ny plåt lastas på.

Under skärningen utsätts skärpalettens delar i skärområdet oundvikligen för slitage. Detta beror på att laserstrålen alltid skär lite djupare än plåtens tjocklek och material från snitten fäster sig på delarna. Efter en tid blir slagguppbyggnaden så stor eller delarnas bärformåga så liten att de måste bytas ut för att maskinen ska kunna fortsätta användas. Maskinanvändaren kan själv tillverka slitdelarna i laserskärmaskinen och byta ut dem gamla när de inte längre uppfyller sin funktion.

Industrins omställning från koldioxid- till fiberlaser möjliggjorde bearbetning av högreflektiva material så som aluminium och koppar med laserljus. Den kraftiga ökningen i fiberlaserskärmaskinernas maxeffekt på senare tid har i sin tur gjort det möjligt att skära allt tjockare plåtar av de svårbearbetade metallerna. Ett nytt problem som rapporterades av maskinanvändare som skär aluminium- och kopparplåtar var att skärpalettens stödbalkar som befann sig i skärområdet hade börjat utsättas för allt högre slitage och skulle behöva bytas ut.

AAE tillverkar skärpaletterna till maskiner som förses med deras automationsutrustning. Problemet med deras paletter var att stödbalkarna utgjorde en del av skärpalettens svetsade stomme och inte gick att byta ut. För att lösa problemet inleddes projektet att konstruera nya skärpaletter med utbytbara stödbalkar.

2 Problemformulering

I detta kapitel beskrivs skärpaletternas uppbyggnad och uppgift i automatiseringen av laserskrämaskiner. AAE:s automationslösningar som projektet berör presenteras. Slutligen preciseras projektets syfte, mål och avgränsningar.

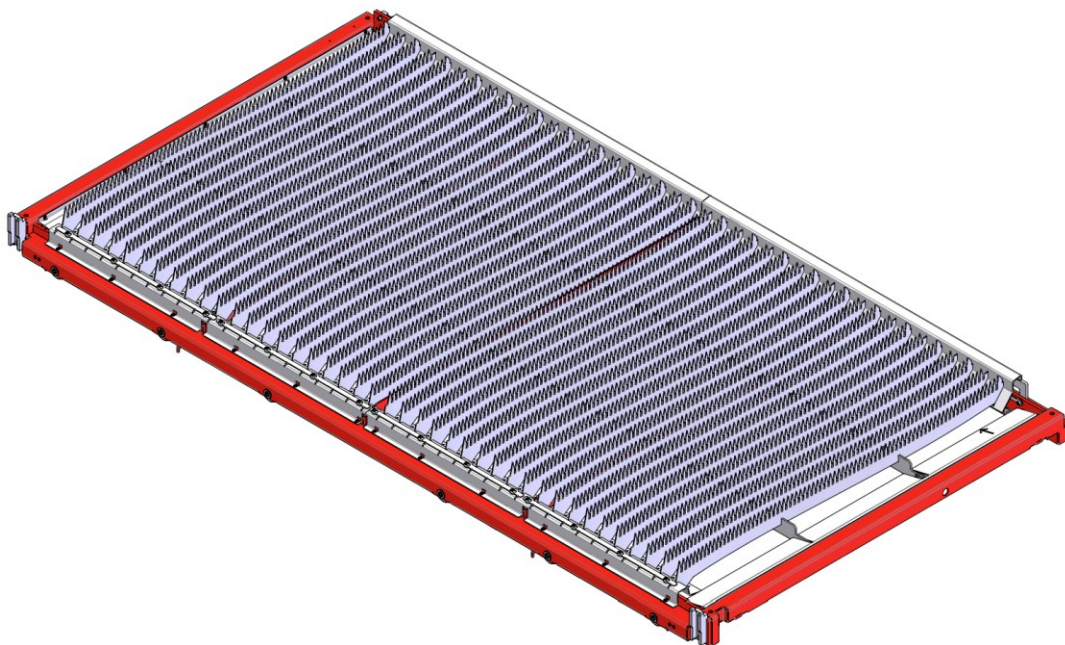
2.1 Skärpalett

Vid tvådimensionell termisk skärning av plåt avlägsnas material från snittet neråt i smält eller förångad form med hjälp av skärgaserna och gravitationen. Det avlägsnade materialet stelnar sedan i luft eller vatten i området under plåten och bildar slag som kan avlägsnas ur maskinen.

Om smältdropparna i stället träffar en maskindel innan de hinner stelna kan de fästa sig på den. Droppar som fastnar gör delens yta större och ojämn, vilket innebär att efterkommande smältdroppar har en större sannolikhet att fästa sig nästa gång laserstrålen passerar över samma område. Efter en tid blir uppbyggnaden av slag så pass tjockt att maskinens funktion lider och det måste avlägsnas, vilket är kostsamt då maskinen inte kan producera under tiden.

Av denna anledning strävar maskintillverkare till att minimera de ytor som slagget kan fästa på under skärområdet. Lösningen som i stort sett alla maskintillverkare tillämpar i dag är ett raster av uppläggningslister som plåten ligger på. Listerna har ofta ett stort antal triangulära spetsar för att ytterligare minska den yta som plåten ligger mot och ge skärgaserna med slagget en utväg neråt. Listerna utsätts fortfarande för slitage, men maskinanvändaren kan enkelt skära ut nya lister och ersätta de gamla när de är förbrukade.

I äldre maskiner låg rastret stationärt i skärområdet, vilket innebar att skärningen endast kunde utföras mellan lastningen och avlastningen av plåten. För att öka produktionskapaciteten förflyttades rastret till separata skärpaletter, liknande den som visas i figur 2. Bytet av palett sker i en så kallad palettväxel utanför skärmaskinen. Växeln är oftast en enkel hiss med två nivåer och en bana för vardera skärpalett.



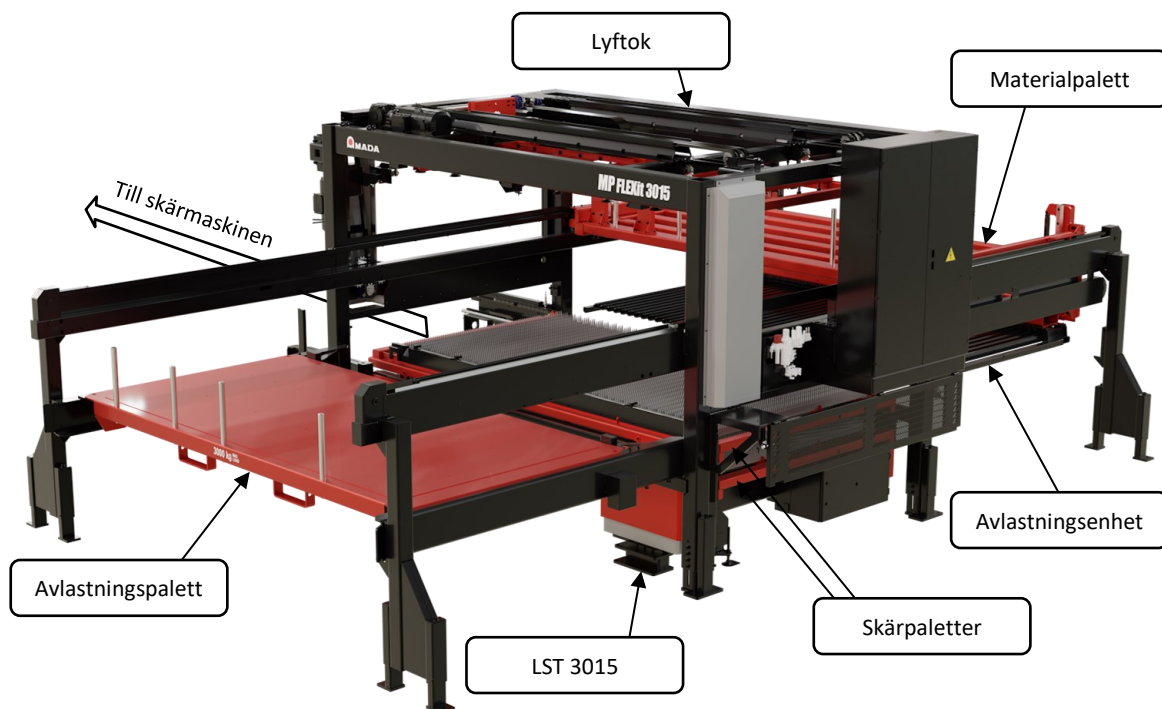
Figur 2. Skärpalett till AAE:s station ASF II 3015 EU.

Palettbytet sker när skärprogrammet är slutfört och en ny plåt ligger på paletten utanför maskinen. När den ena paletten rullas ut ur maskinen hamnar den på en av palettväxels banor. Växeln byter sedan nivå så att den andra paletten med en ny plåt kommer i höjd med skärmaskinens palettbanda. Sedan rullar den andra skärpaletten in i maskinen och processen börjar om.

2.2 LST 3015

AAE tillverkar egna skärpaletter och palettväxlar till de laserskärmaskiner som ska utrustas med deras automationssystem. Deras palettväxel LST 3015 kan användas som fristående växel för manuell lastning och avlastning eller integreras med in-ut-stationen MP-FLEXit 3015, som visas i figur 3.

MP-FLEXit 3015 är instegsmodellen för automationen av AMADAs fiberlaserskärmaskiner som säljs i Europa. Ett knippe av materialet som ska skäras placeras med gaffeltruck på materialpaletten. Materialpaletten förflyttas sedan in i stationens stomme, där ett lyftok med sugkoppar lyfter den översta plåten ur knippet och placerar den på skärpaletten i palettväxeln. När skärpaletterna bytt plats lyfter en avlastningsenhet restgittret tillsammans med de skurna delarna till en avlastningspalett på framsidan av stationen. Avlastningsenheten består av långa gafflar som körs in under plåten mellan uppläggningslisterna. Sedan läggs en ny plåt från materialpaletten på skärpaletten och processen börjar om.



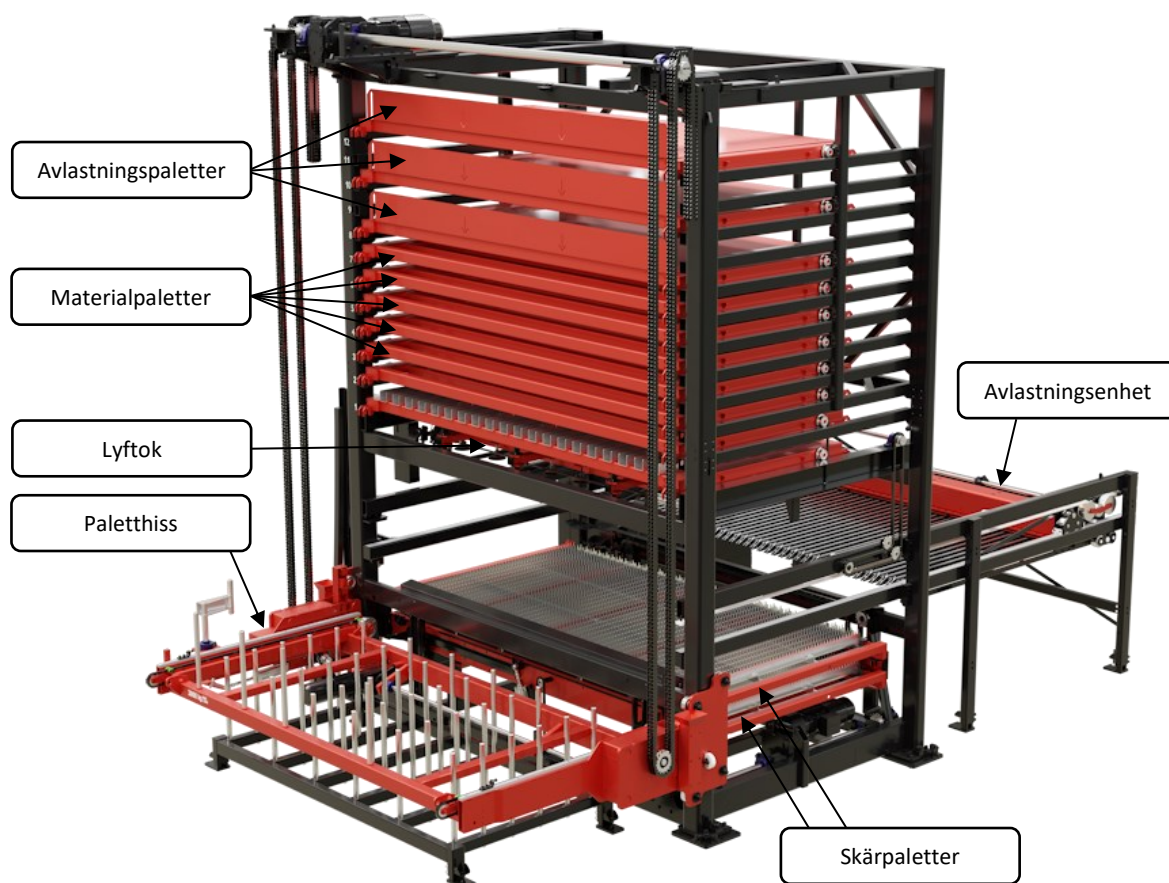
Figur 3. AAE MP-FLEXit 3015. (Ama-Prom, i.a.b).

När allt material bearbetats kan avlastningspaletten avlägsnas från stationen och delarna manuellt separeras från restgittret. Det är även möjligt att utöka automationsgraden med en *second output station*, som i praktiken är en förlängning av laserns och palettväxels bana. Den skurna plåten skickas då först via *second output station*, där delarna separeras från restgittret av en operatör eller automatiskt med AAE:s plockrobot TK 3015. Sedan åker skärpaletten med restgittret in i stationen igen där det förflyttas till avlastningspaletten.

2.3 ASF II 3015 EU

Fristående in- och utmatningsstationer som MP-FLEXit kan bearbeta den materialmängd som får plats på en materialpalett innan de kräver manuellt arbete i form av lastning och avlastning. För att öka automationsgraden krävs en station med en materialbuffert bestående av flera material- och avlastningspaletter.

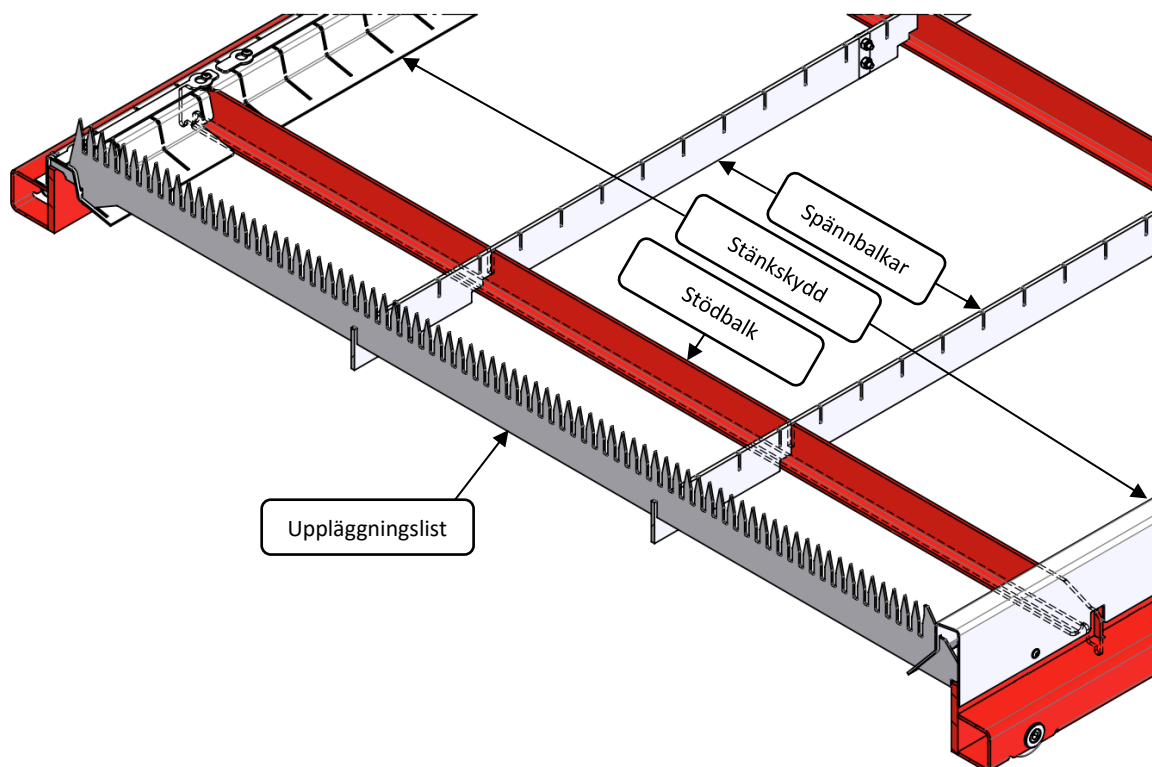
ASF II 3015 EU är den senaste modellen av in- utmatningstorn för fiberlaserskärmaskiner från AAE och visas i figur 4. Lastningen och avlastningen av plåtarna sker på samma sätt som i MP-FLEXit, men råmaterialet och de bearbetade plåtarna lagras på material- respektive avlastningspaletter i tornet och förflyttas med en paletthiss. Till skillnad från MP-FLEXit 3015 har ASF II 3015 EU en egen palettväxel och behöver därför ingen LST 3015.



Figur 4. AAE ASF II 3015 EU. (Ama-Prom, i.a.a).

2.4 Skärpalettens uppbyggnad och tillverkning

I figur 5 visas skärpaletten i genomskärning med en uppläggningslist monterad. Listerna ligger på stommens långsidor och två längsgående spännbalkar. Spännbalkarna har urtag för listerna och varsin gängad spännare i motstående kortsida. Spännbalkarnas uppgift är att dra uppläggningslisterna i en S-formad båge och minska deras nedböjning. Bågen minskar risken att arbetsstycket svetsas fast i listernas toppar om ett tvärgående snitt över paletten skulle passera rakt ovanför en av listerna. Spännbalkarna ligger i sin tur mot stommens stödbalkar. Uppläggningslisterna stöds i sidled av stänkskyddsplåtar som hindrar damm och mindre slagdroppar att hamna på palettbanorna inuti maskinen. Ena sidans stänkplåtar är lägre för att ge utrymme till avlastningsenhetens gafflar, som bör komma in under arbetsstycket mellan uppläggningslisterna. Uppläggningslisterna, spännbalkarna och stänkplåtarna är slitdelar som kan tillverkas och bytas ut av användaren själv. Slitdelarnas livslängd beror på maskinens skärparametrar samt vilka material och tjocklekar som bearbetas.



Figur 5. Genomskäring av skärpaletten.

Problemet som hade uppstått under den senaste tiden var att en del användare som skar högreflektiva material hade rapporterat om orimligt korta livslängder på slitdelarna och att de festsvetsade stödbalkarna skulle behöva bytas ut.

2.5 Syfte och målsättning

Projektets syfte var att lösa problemet med slitaget av icke-utbytbara delar i skärpaletterna. Målet med projektet var att utforma nya utbytbara stödbalkar, bekräfta den slutliga lösningens hållfasthet, framställa alla ritningar som skulle krävas för omställningen och införa dessa i företagets PDM- samt ERP-system.

2.6 Avgränsning

AAE tillverkar många olika skärpaletter med samma grundkoncept. Projektet behandlade endast skärpaletterna för AAE:s senaste stationer ASF II 3015 EU och LST 3015, eftersom både de äldre och större skärpaletterna är kraftigare byggda och tål därmed mera nötning. Vidare beaktades endast de fiberlaserskärmaskiner som AMADA tillverkade och sålde i Europa under projektets gång, ENSIS, REGIUS och VENTIS. Laserskärmaskinerna presenteras i kapitel 3.

3 Teori

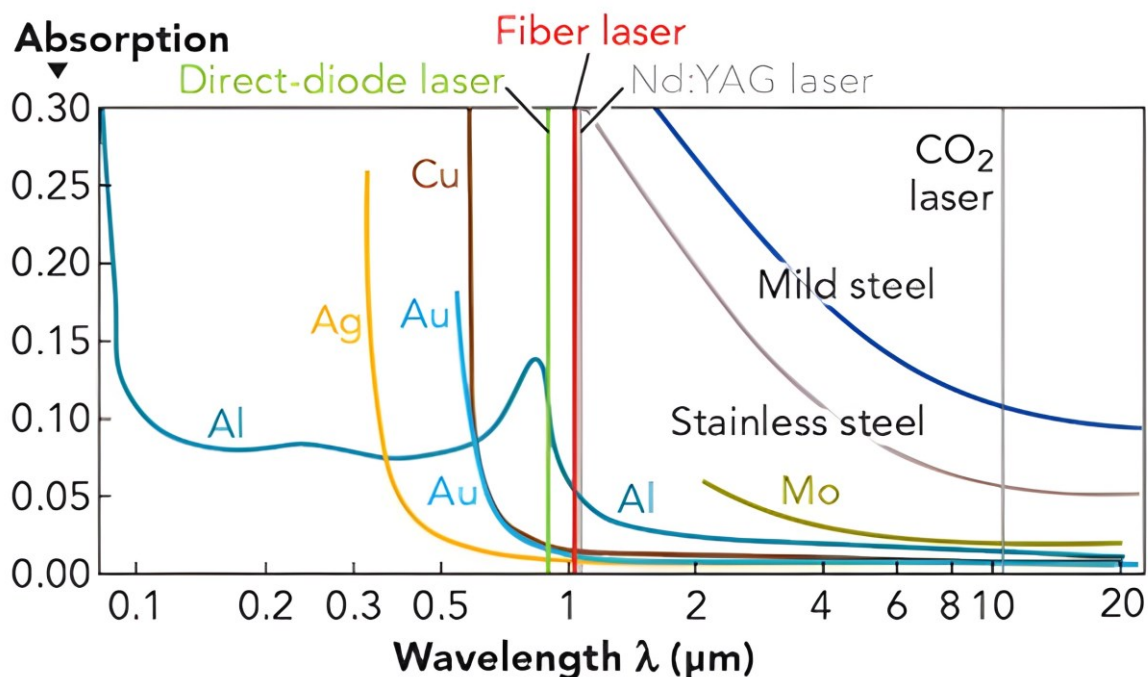
I detta kapitel ges en kort introduktion till de tre lasermetoder som använts vid skärning av metall och hur laserskärmaskinernas utveckling har sett ut. Slutligen presenteras AMADAs laserskärmaskiner som projektet berör.

3.1 Laserskärning

Det som vardagligt kallas ljus är en form av energi i den del av det elektromagnetiska spektret som människans öga kan detektera. Ögats synceller reagerar olika på dessa våglängder, vilket resulterar i olika synuppfattningar som vi kallar färger. Emissionen från en ljuskälla består i regel av en mängd olika våglängder och har en hög divergens, vilket betyder att strålningen sker i alla riktningar från källan.

Termen laser är en akronym för *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, fritt översatt ljusförstärkning genom stimulerad emission av strålning. En laserkälla är kort sagt en optisk oscillator som förstärker ljusvågor med en specifik våglängd, riktning och fas, medan all övrig strålning elimineras. Resultatet är en monokrom, koherent, kollimerad och intensiv ljusstråle. Strålens våglängd bestäms av det aktiva medium som används för genereringen av laserstrålen. Laserljus har visats vara en bra värmekälla vid termisk skärning, eftersom strålen kan fokuseras på ett mycket litet område och värmeförlusten kan enkelt regleras jämfört med andra skärmetoder (Jain, 2013, pp. 219-220).

En stor del av den effekt som lasern levererar till materialets yta reflekteras, vilket har en stor inverkan på skärmaskinens totalverkningsgrad och materialets skärbarhet. Andelen energi som olika metaller absorberar visas i figur 6 och beror bland annat på materialets reflektivitet och laserstrålens våglängd. Koppar reflekterar de våglängder som används vid laserskärning mycket bra och har dessutom en god värmeledningsförmåga. Dessa två egenskaper gör koppar till ett av de mest utmanande konstruktionsmaterialen att skära med laser. Egenskaperna kan däremot vändas till användarens fördel, och idag väljer många maskinanvändare att tillverka uppläggningslisterna av koppar. Enligt Fox, Chalmers & Jeans (2016) har kopparlister en lägre nötningsgrad och kan därmed hålla upp till åtta gånger längre än lister tillverkade av stål innan de behöver bytas ut, vilket motiverar de högre initialkostnaderna. Slagget fäster även dåligt i kopparlister, vilket innebär att listernas underhållning är mycket enklare.



Figur 6. Olika metallers absorptions som funktion av våglängd vid normal infallsvinkel och rumstemperatur. (Saucedo, Chann, Samson, & Tayebati, 2016).

För att termiskt skära metaller krävs en kraftfull laser med en våglängd som absorberas någorlunda bra i materialet som ska bearbetas. Inom metallbearbetning har tre olika lasrar använts genom tiderna: Koldioxid, Nd:YAG och Fiber.

3.1.1 Koldioxid

Koldioxidlasern uppfanns år 1964 av C.K.N. Patel. Det aktiva mediet är en blandning av koldioxid, kväve och helium. Lasern genererar en infraröd stråle med en våglängd omkring 10,6 μm (Ion, 2005, p. 75). Fördelarna med koldioxidlasern är att den kan leverera höga effekter med hög kvalitet på laserstrålen för en relativt låg kostnad.

Dess största nackdelar härstammar från laserstrålens långa våglängd. Absorbansen för de vanligaste bearbetade metallerna vid 10,6 μm är låg, vilket innebär att en större effekt krävs för att uppnå samma uppvärmning i materialen. Dessutom finns det få material som är transparenta vid denna våglängd och lämpar sig för optisk utrustning, vilket innebär att strålen från koldioxidlasern inte kan transporteras genom fiberoptiska kablar. Maskinen kräver i stället speglar tillverkade av exotiska material. (Tsukamoto, 2013, pp. 17-22).

3.1.2 Nd:YAG

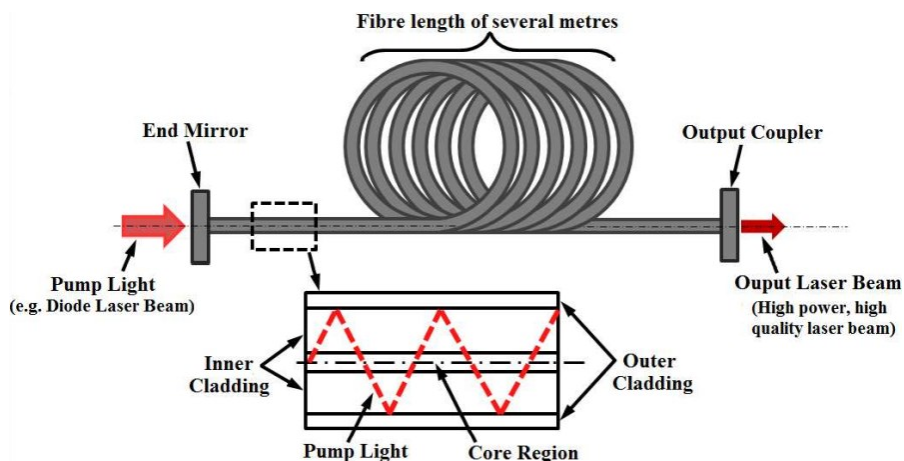
Aktiva mediet i en Nd:YAG-laser är en syntetisk kristall formad av en oxid av yttrium och aluminium med granatstruktur som dopats med neodym. Kristallen genererar en ljusstråle med våglängden $1,06 \mu\text{m}$ (Jain, 2013, pp. 181-182). Denna våglängd absorberas bättre i metaller, vilket ger Nd:YAG-lasern en fördel över koldioxidlasern. Våglängden möjliggör även att strålen kan transporteras genom fiberoptiska kablar, vilket är mer förmånligt och flexibelt än speglar (Fabbro, 2013, p. 47).

Nd:YAG-kristallens termiska egenskaper och geometri begränsar laserns maxeffekt. Verkningsgraden och strålkvaliteten är också lägre än för koldioxidlasern och därför har lasertypen främst tillämpats där det inte varit praktiskt möjligt att använda sig av en koldioxidlaser, som vid tredimensionell laserskärning. (Ion, 2005, pp. 91-92).

3.1.3 Fiber

Det som kommersiellt kallas för fiberlaser är en laser var den optiska förstärkningen sker i en fiberkabel. Namnet säger alltså inte vilket aktivt medium som använts, men vanligtvis dopas kabeln med ytterbium om lasern används för skärning (Fujikura Ltd., n.d.). Detta genererar en laserstråle med våglängden $1,06\text{--}1,08 \mu\text{m}$ som förstärks inne i den aktiva fiberns kärna enligt principen som syns i figur 7. (Wandera, 2016, p. 401).

Fiberlaserns största fördel över Nd:YAG-lasern kommer från att det aktiva mediet sprids ut över en mycket större area, vilket innebär att den skadliga värmen som byggs upp kan bortledas mycket snabbare (Müller, Kirchhof, Reichel, & Unger, 2006). Laserstrålen från flera aktiva fibrer kan också kopplas ihop för att öka effekten, samtidigt som strålens kvalitet i stort sett bibehålls (Ion, 2005, p. 96).



Figur 7. Schematisk skiss över fiberlaserns uppbyggnad. (Wandera, 2016).

3.1.4 Skärgas

Precis som andra skärmetoder kräver laserskärning en skärgas. Gasens huvuduppgift är att avlägsna smält material från snittet med en sådan hastighet att det inte rinner ner och fäster i snittets nedre kanter. Skärgasen skyddar även den känsliga optiken från stänk och kyler den skurna plåten, vilket minskar det värmepåverkade området kring snittet.

Valet av skärgas beror på vilket material som skall skäras och vilken kvalitet på snittet som önskas. Inerta gaser används vid skärning av stål, rostfritt stål och titan när en yta med hög kvalitet utan oxidskikt krävs. För stål och rostfritt stål används främst kväve eftersom det är det förmånligaste alternativet som dessutom kan genereras på plats i en kvävegenerator. Titan reagerar med kväve och kräver därför argon som är en dyrare ädelgas. (Ion, 2005, p. 358).

Om skärhastigheten är viktigare än snittets kvalitet kan syrgas användas vid skärning av stål, rostfritt stål, aluminium och koppar. Syret reagerar med den smälta metallen i en exotermisk reaktion som bidrar till uppvärmningen i snittet. Vid skärning av stål och aluminium med syre som skärgas kan upp till hälften av skärenergien komma från oxidationen. Vid skärning av koppar används syre främst för att oxidskiktet i snittet har en högre absorptions än rent koppar, vilket underlättar skärningen. (Ion, 2005, pp. 359-368).

Ren och torr tryckluft kan också användas som skärgas. Syrehalten i luften gör att snittet oxiderar och det är samtidigt inte möjligt att uppnå samma exotermiska reaktion som med rent syre. Däremot om skärresultatet anses acceptabelt kan kostnaden för skärgas kraftigt minskas. Maskintillverkaren Weni Solution (2022) rapporterade i sin undersökning att driftskostnaden vid skärning med tryckluft var åtta gånger lägre än vid skärning med syrgas och hela 16 gånger lägre än vid skärning med kvävgas.

3.1.5 Industrins utveckling

Laserskärning har sedan sin början präglats av perioder med intensiva teknologiska framsteg. På 80-talet kom koldioxidlasern att dominera marknaden för tvådimensionella laserskärmaskiner tack vare sin höga totalverkningsgrad, strålkvalitet och relativt låga kostnad (Ion, 2005, p. 101). Eftersom strålen endast kunde transporteras till skärhuvudet genom speglar konstruerades de första laserskärmaskinerna enligt principen *fixed optics*, var skärhuvudet endast förflyttas vertikalt och materialet förflyttas i relation till skärhuvudet. Principen leder till en enkel konstruktion med få rörliga optiska komponenter, men fungerar endast för tunnare plåtar då arbetsstyckets massa ger upphov till varierande dynamiska krafter som är svåra att beakta. (Ion, 2005, p. 125).

Vartefter koldioxidlasrarnas effekt ökade blev det ekonomiskt försvarbart att skära större och tjockare plåtar med laser. För att kringgå problemen med *fixed optics* började maskinerna tillverkas enligt principen *flying optics*, där skärhuvudet förflyttas i alla riktningar medan materialet ligger stationärt. Principen underlättar skärningen då massan som servomotorerna förflyttar hålls konstant och deras inställningar kan optimeras för snabbare rörelser. Men eftersom strålen från koldioxidlasern inte kan transporteras genom fiberkablar kommer strålen att divergera under färden från källan till skärhuvudet, vilket innebär olika skärresultat på olika ställen i skärområdet. För att erhålla god skärkvalitet över hela skärområdet med en koldioxidlaser måste strålens avstånd till skärhuvudet hållas konstant med hjälp av speglar som förflyttas i relation till varandra. (TWI, 2016).

Nd:YAG och fiberlasrar har inte samma problem som koldioxidlasrar och lämpar sig mycket bättre för *flying optics*. Första fiberlasrarna i kilowattklass introducerades omkring millennieskiftet. Det dröjde ändå till början av 2010-talet innan tekniken var mogen nog att konkurrera med koldioxidlasern, vars maxeffekt i skärmaskiner enligt Diehl (2018) avstannade efter 30 års utveckling och sällan översteg 6 kW.

Fiberlasrar kräver mindre underhåll än koldioxidlasrar och strålkvaliteten hålls god även vid högre effekter. Fiberlasrar har även en mycket högre totalverkningsgrad än koldioxidlasrar. Maskintillverkaren Bystronic (2022) hävdar att en modern fiberlaser endast kräver en tredjedel av den elektricitet som en koldioxidlaser med samma effekt, vilket innebär betydande inbesparingar vid höga elpriser.

Laserskärmaskinernas maxeffekt ökade från 6 kW år 2015 till 40 kW år 2022. Orsaken var enligt Sarrafi, Jia, Zhang och Mendes (2022) att kostnaden per kilowatt lasereffekt minskade samtidigt som skärhuvudens optik utvecklades för att hantera de höga effekterna. Det finns många fördelar med en högre lasereffekt, den mest väsentliga är att skärhastigheten kan ökas. Detta ökar maskinens produktivitet samtidigt som konsumtionen av skärgas minskar, då skärningen kan utföras med samma tryck och flöde som vid lägre effekter. Skärgasen utgör en stor del av driftskostnaderna vid modern laserskäring. Exempelvis kväve som är en relativt dyr gas kan enligt Farrell (2017) stå för upp till 90 % av driftskostnaderna.

Utöver minskning av gaskonsumtionen kan högre lasereffekter möjliggöra byte av skärgas helt och hållet. Vid lägre effekter har syrgas använts som skärgas i tjocka stålplåtar för att utnyttja energin som avges i den exotermiska reaktionen. Reaktionen mellan syre och järnet är relativt långsam och begränsar därför skärhastigheten oberoende lasereffekt. För att öka skärhastigheten bör lasereffekten ökas ytterligare så att syrgasen kan ersättas med tryckluft eller kväve. Sarrafi et al. hävdar att kostnaden per kilowatt minskar med ökande lasereffekt och att en två gånger högre produktionskapacitet kan erhållas för endast 30–40 % högre kapitalkostnad. Med mångdubblad produktivitet kan en högeffektlaser ersätta flera lågeffektlasrar, vilket ytterligare kan minska kostnader för operatörer samt automations- och ventilationsutrustning. (Sarrafi, Jia, Zhang, & Mendes, 2022).

En del inställer sig mer skeptiskt till trenden av ökande lasereffekter. Maskintillverkaren Kimlas verkställande direktör Przemyslaw Kimla poängterar i en artikel (2021) att en högre lasereffekt inte alltid innebär en försvarbar ökning i produktiviteten. I tunnare material begränsas skärhastigheten numera av skärhuvudets maxacceleration och kan således inte ökas med högre lasereffekter. Både Kimla (2021) och Sarrafi et al. (2022) konstaterar att en högre lasereffekt ställer större krav på maskinunderhåll och utgör en högre risk för kostsamma maskinskador. De snabbaste maskinerna tillämpar idag linjär servoteknik som möjliggör accelerationer över 6 g. Sådana accelerationer utsätter maskinens delar för stora dynamiska krafter som kan ge upphov till slitage eller utmattning. I en laserskärmaskin med låg effekt kan en komponent av optiken falla utan katastrofala följder, men vid högre effekter sker uppvärmningen så pass snabbt att en kedjereaktion kan förstöra hela skärhuvudet och fiberkabeln innan operatören hinner reagera.

3.2 AMADAs laserskärmaskiner

AMADA lanserar nya skärmaskiner i samband med nya tekniska framsteg och under tidpunkten för projektet tillverkades tre olika flying optics fiberlaserskärmaskiner för europamarknaden. Till skillnad från andra maskintillverkare utvecklar och tillverkar AMADA egna laserkällor specifikt till sina maskiner. Laserkällans effekt kan väljas enligt kundens behov.

3.2.1 ENSIS-AJ

Skärmaskinen ENSIS-AJ lanserades år 2014 med AMADAs *Variable Beam Control Technology*. Tekniken möjliggör fullt variabel styrning av laserstrålens form, vilket innebär att strålens energitäthet kan ökas för snabbare håltagning i början av snittet och sedan gradvis minskas till optimal nivå när skärningen påbörjas. Dessutom kan alla material och tjocklekar skäras med samma lins. I figur 8 visas ENSIS-AJ med en amerikansk tillverkad palettväxel. (AMADA Europe, 2021a).



Figur 8. AMADA ENSIS 3015-AJ. (AMADA America, n.d.).

3.2.2 VENTIS-AJ

År 2018 lanserades VENTIS-AJ med en laserkälla på 4 kW och AMADAs *Locus Beam Control*, en innovativ teknik som möjliggör högre skärkvalitet och skärhastigheter än motsvarande 4 kW-maskiner på marknaden.

För att erhålla högre effekter än 4-6 kW i en fiberlaserskärmaskin kombineras laserstrålar från flera aktiva fibrer till en central matarfiber genom en kombinerare. En nackdel med detta är att strålkvaliteten försämras. Locus Beam Control möjliggör snabbare skärning vid lägre effekter genom att föra en högfokuserad stråle i sicksackande mönster i snittet. På så

vis erhålls en jämnare energitäthet i snittet och en effektivare avverkning av smält material. Tekniken möjliggör liknande skärhastigheter som skärmaskiner i en högre effektklass men med en mycket lägre energiförbrukning och högre skärkvalitet. Strålens rörelsemönster kan även anpassas för minimering av slagg i snittets underkant, något som tidigare varit ett problem vid skärning av tjockare icke-ferritiska material. (AMADA Europe, 2020).

3.2.3 REGIUS-AJ

AMADAs flaggskeppsmodell REGIUS-AJ lanserades år 2020 och kompletterar de tekniker som introducerades med ENSIS-AJ med linjärdrift i alla tre axlar och det nyutvecklade *Laser Integration System*, som inbegriper funktioner och utrustning för enkel och driftsäker användning. Systemet kontrollerar bland annat optikens skyddsglas och centrerar gasdysorna till laserstrålen. Det kan även övervaka skärprocessen och optimera skärparametrarna under skärningen. (AMADA Europe, 2021b).

3.2.4 Kapacitet

I Tabell 1 visas den maximala plåttjockleken som kan skäras med AMADAs laserkällor och vilka maskiner de kunde fås till under projektets gång.

Tabell 1. Maximal plåttjocklek baserat på material och laserkälla samt vilken maskintyp källan kan fås till

Laserkälla		ENSIS3000	AJ4000S	ENSIS6000	ENSIS9000	ENSIS12000
Nominell lasereffekt [W]		3000	4000	6000	9000	12000
Maximal tjocklek [mm]	Stål	25	25	25	25	25
	Rostfritt stål	15	20	25	25	25
	Aluminium	12	16	25	25	25
	Mässing	8	10	15	18	18
	Koppar	6	8	12	12	12
Maskintyp		ENSIS-AJ	VENTIS-AJ	ENSIS-AJ REGIUS-AJ	ENSIS-AJ REGIUS-AJ	ENSIS-AJ REGIUS-AJ

Omarbetat från (AMADA Europe, 2020; 2021a; 2021b).

Stålets absorptions, värmeledningsförmåga och smältpunkt gör det till en av de lättare metallerna att skära med laser. Samtliga källor och maskiner kan hantera upp till 25 mm tjock stålplåt och AAE:s skärpaletter är dimensionerade utifrån lasten av en stålplåt med dimensionerna 3070 x 1550 x 25 mm, som väger ca 920 kg.

4 Tillvägagångssätt

I detta kapitel beskrivs metoderna som användes för att utforma de utbytbara stödbalkarna. Kapitlet inleds med en motivering av metodvalet som följs av en analys av den tidigare skärpalettens uppbyggnad och hållfasthet. Slutligen presenteras och utvärderas fyra koncept på utbytbara stödbalkar.

4.1 Metodval

Projektet inleddes med ett möte med handledare Sören Snellman. Under mötet undersöktes problemets utsträckning i rapporter från de företag som rapporterat om orimligt korta livslängder på slitdelarna. Rapporterna visade att stödbalkarna var i mycket bättre skick än de övriga slitdelarna, men att de ändå skulle behöva ersättas i något senare skede om slitaget fortsatte i samma takt.

De nya stödbalkarnas utformning baserades på en analys av de ursprungliga skärpaletternas uppbyggnad och tillverkning. Utifrån analysen samt diskussioner med konstruktörer, svetsare och produktionsansvariga på AAE uppgjordes en kravlista för de nya stödbalkarna. När kraven specificerats genererades fyra koncept på nya stödbalkar med olika utformningar och infästningar.

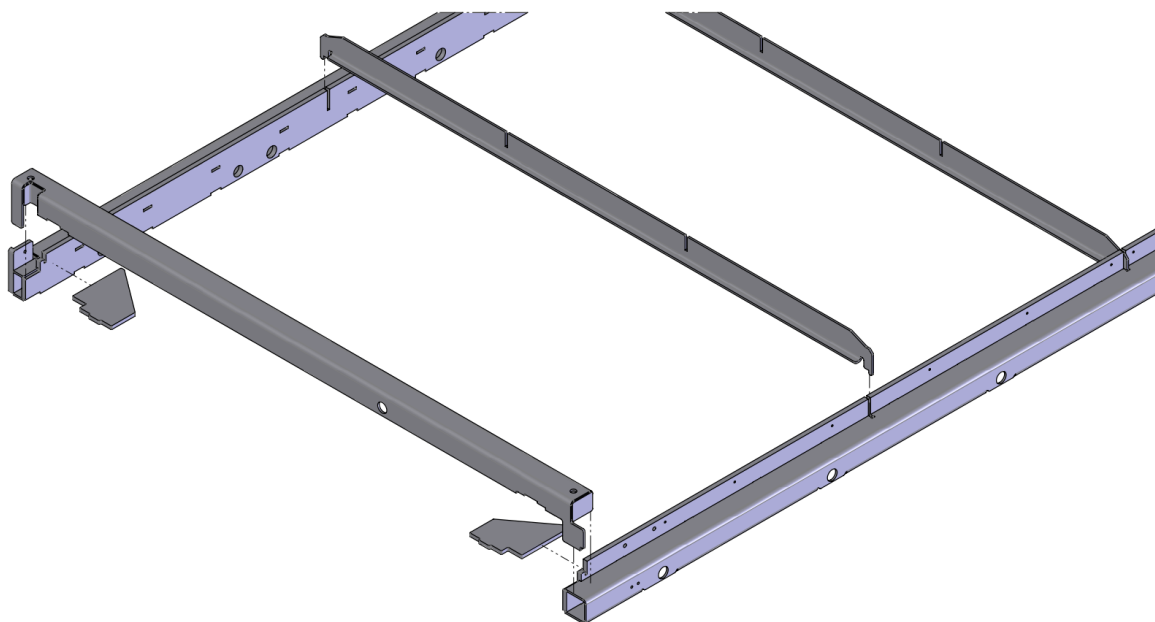
Valet av koncept baserades både på dess funktionalitet och hållfasthet. Hållfastheten kontrollerades genom linjärelastiska finita element-analyser, eller FE-analyser i programvaran NX Nastran. Ett problem som uppstod var att definiera vilken last som stödbalkarna utsätts för, då deras verkliga belastning är starkt beroende av rastrets uppbyggnad och skick samt den bearbetade plåtens egen bärförmåga. Vartefter listerna slits kommer deras effektiva höjd att minska och i vissa fall kan en del av listerna gå av, varpå största delen av de kapade listernas last går via stödbalkarna.

Men med rapporterna som grund ansågs de ursprungliga stödbalkarnas livslängd och hållfasthet vara empiriskt bekräftade. För att kringgå problemet med den obestämbara lasten och samtidigt minska FE-analysernas omfattning jämfördes endast konceptens hållfasthet med den ursprungliga stödbalkens. Det koncept som hade högre eller motsvarande hållfasthet än den ursprungliga stödbalken och samtidigt uppfyllde alla krav vidareutvecklades till den slutliga lösningen.

4.2 Ursprungliga skärpalettens uppbyggnad

AAE:s nyare skärpaletter som projektet berörde hade utvecklats för att tillverkningen skulle vara så enkel som möjligt. Långsidorna tillverkas som halvfabrikat av en underleverantör och bearbetas hos AAE innan stommen svetsas ihop. På så vis krävs ingen bearbetning efter att stommen svetsats. Långsidorna består av en 5 mm tjock bockad plåt med längsgående hullingar som lokaliserar mot en 12 mm tjock förstyrningsplåt. Delarna sammanfogas med pluggsvetsar från insidan i spåren för hullingarna i förstyrningsplåten. Efter svetsningen riktas långsidorna och skickas till fräsning, var hjultapparnas hål borras och förstyrningsplåtarnas övre kant planas för att säkerställa att uppläggningslisterna ligger i samma plan.

Efter bearbetningen skickas långsidorna till svetsningen. Där sammanfogas först långsidorna med stommens kortsidor enligt figur 9. Sedan tvingas stommens långsidor ihop på mitten med brytjärn och stödbalkarna fälls ner i spåren, var deras hullingar verkar mot långsidornas förstyrningsplåtar och tvingar långsidorna raka och parallella. Stödbalkarna fästes med kälfogar från utsidan ovanför de bockade plåtarna på långsidorna. Slutligen tillsätts vinklar i hörnen för att ge stommen styvhet mot skevning. Efter svetsningen skickas stommen på målning och montering.



Figur 9. ASF II 3015 EU Skärpalettstommens uppbyggnad.

Den ursprungliga stödbalken var monosymmetrisk och bestod av en 5 mm tjock laserskuren stålplåt. I mitten av balken fanns två urtag för spännbalkarna och en 20 mm bockad fläns. Flänsen ökade balkens böjmotstånd och skyddade skärmaskinens underliggande delar, men fungerade samtidigt som en ansamlingsplats för slagg.

Stödbalkarnas höjd var 65 mm, som var det största möjliga i det begränsade utrymmet. Deras höjd begränsas uppifrån av stationernas avlastningsenheter, som bör få in gafflarna mellan paletten och den skurna plåten. Detta innebär att stödbalkarna inte kan komma högre upp än de lägre stänkplåtarnas topp.

Under skärningen bildas rökgaser och damm som är skadliga att inandas och smutsar ner delarna som skärs. För att motverka detta sugs rökgaserna och dammet bort ur skärområdet under plåten med kraftiga utsug. Skärområdet är avdelat i fyra sektioner för att minska energin som går åt att driva ventilationen, då endast sektionen som skärhuvudet befinner sig över behöver vara aktivt. Utrymmet neråt begränsas av dessa utsug och stödbalkarna kan därför inte komma längre ner än skärpalettens kortsidor. Stödbalkarna bör även befinna sig rakt ovanför delningarna i utsugens sektioner för att underlätta upprätthållningen av undertrycket i den sektion som bearbetas.

4.3 Kravspecifisering

För att underlätta genereringen och utvärderingen av koncepten uppgjordes en kravlista som visas i tabell 2. Kraven och önskemålen formades utifrån diskussioner med sakkunniga på AAE och egna iakttagelser som gjordes under analysen av den ursprungliga skärpalettens uppbyggnad.

Tabell 2. Kravlista

Krav
Högre eller motsvarande hållfasthet än tidigare lösning
Hålla stommens långsidor parallella
Samma placering som tidigare lösning för att bibehålla undertrycket
Slitdelarna kan tillverkas med ENSIS 3 kW, REGIUS 3 kW eller VENTIS 4 kW
Utbyte i station och second output station
Endast allmänt tillgängliga fästelement
Infästning okänslig mot damm och stänk
Önskemål
Få delar
Minimal bearbetning
Samma material och tjocklekar som övriga slitdelar (3 eller 6 mm stålplåt)
Montering i samband med svetsning
Intuitiv tillverkning och montering
Kan tillverkas i koppar för ytterligare ökad livslängd

Eftersom den ursprungliga stödbalkens hållfasthet ansågs vara empiriskt bekräftad ställdes endast kravet att den slutliga lösningen skulle ha en högre eller motsvarande hållfasthet. Valet att utforma hållfasthetskravet på detta vis förenklade analyserna avsevärt.

Genom diskussioner med svetsare som tillverkat många stommar till skärpaletter framkom att de nya stödbalkarna helst skulle monteras redan i samband med svetsningen. Stödbalkarna tillför ingen styvhet till stommen, men deras grundfunktion att räta ut långsidorna underlättade svetsningen.

De nya stödbalkarna skulle tillverkas av användaren själv och därför ställdes kravet att tillverkningen ska kunna utföras med alla AMADAs fiberlaserskärmaskiner som beskrevs i kapitel 3.2 och deras lägsta lasereffekter som listades i tabell 1.

Vidare framkom önskemålet att samma material och tjocklekar som de andra slitdelarna har ska användas. Detta underlättar tillverkningen för användaren, då delarna till stödbalkarna kan skäras ut samtidigt som spännbalkarna. De fästelement som användes i koncepten skulle vara sådana som finns tillgängliga överallt i Europa och som inte kräver specialverktyg vid montering.

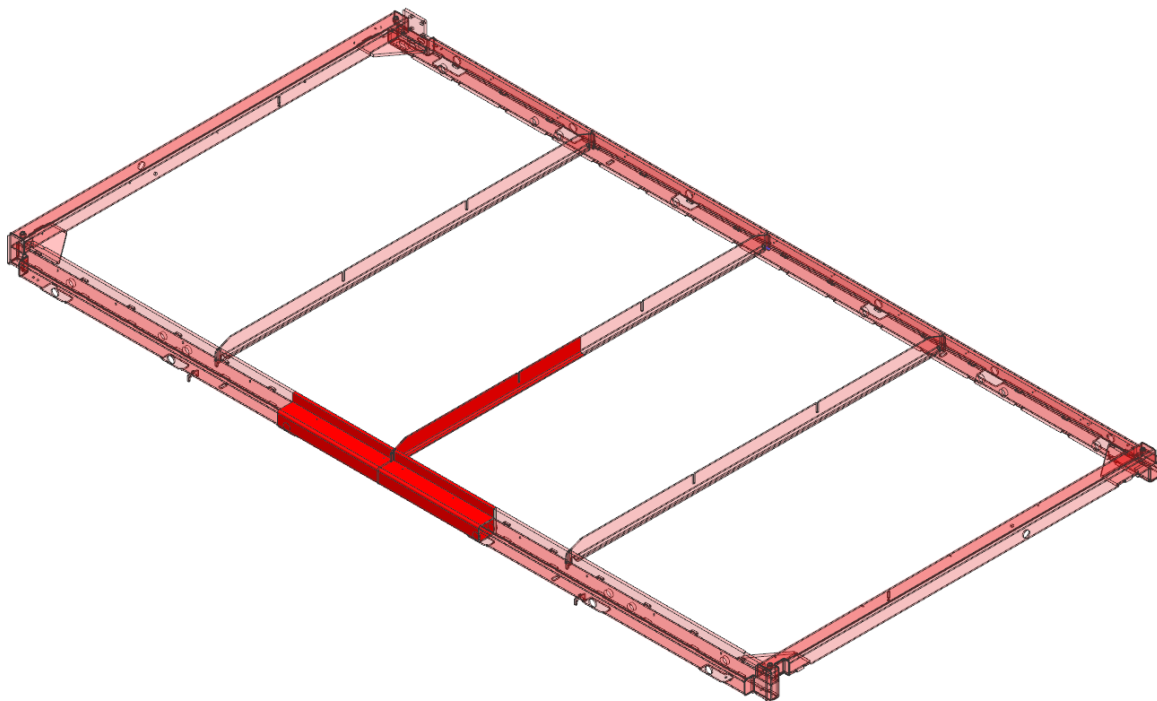
Ett önskemål var att det skulle vara möjligt att tillverka stödbalkarna av koppar om användare ville minska slitaget och öka slitdelarnas livslängd.

4.4 Analys av ursprungliga stödbalkens hållfasthet

Lasten baserades på den teoretiskt största reaktionskraften i stödpunkterna mellan spänn- och stödbalkarna för en ny skärpalett. I beräkningen gjordes antagandet att samtliga balkar var oändligt styva och lasten saknade egen bärförmåga. Beräkningen förenklades ytterligare genom att anta en utbredd last över hela skärområdet och att avstånden mellan samtliga stödpunkter var lika stora. Reaktionskrafternas storlek beräknades utifrån tabellvärden för statiskt obestämda balkar under utbredd last med stödpunkter på lika stora avstånd (Engineering ToolBox, 2017; StructX, n.d.a; StructX, n.d.b). Resultatet blev en dimensioneringslast på 1100 N per stödpunkt, vilket skulle motsvara att de tre stödbalkarna bär 60 % av skärpalettens last. Beräkningarna finns som bilaga 1.

Modellen som skapades beaktade stommens och stödbalkens symmetri, vilket ytterligare minskade tidsåtgången vid analysen då antalet beräkningar halverades. Modellen

idealiserades genom att avlägsna hullingar och hål som inte berörde själva analysen. De två svetsfogarna som fäste den ursprungliga stödbalken modellerades som ideala kälsvetsar enligt dimensionerna givna på stommens svetsritning. I figur 10 visas den analyserade modellen och varifrån på skärpaletten den var tagen. En utförligare rapport över analysen finns som bilaga 2.



Figur 10. Analyserade modellen.

Att stumt fixera stomsektionens ändor ledde till en alltför styv modell som inte överensstämde med verkligheten. Under last kommer stommens långsidor att rotera kring hjulens inre kontaktytor markerade i figur 11. För att återspegla detta i modellen skapades noder vid hjulens ungefärliga kontaktpunkter som kopplades till långsidornas tvärsnitt genom endimensionella förbindelseelement enligt figur 12.



Figur 11. Skärpalettens stödpunkter runt vilka palettens långsidor roterar när stödbalkarna belastas.

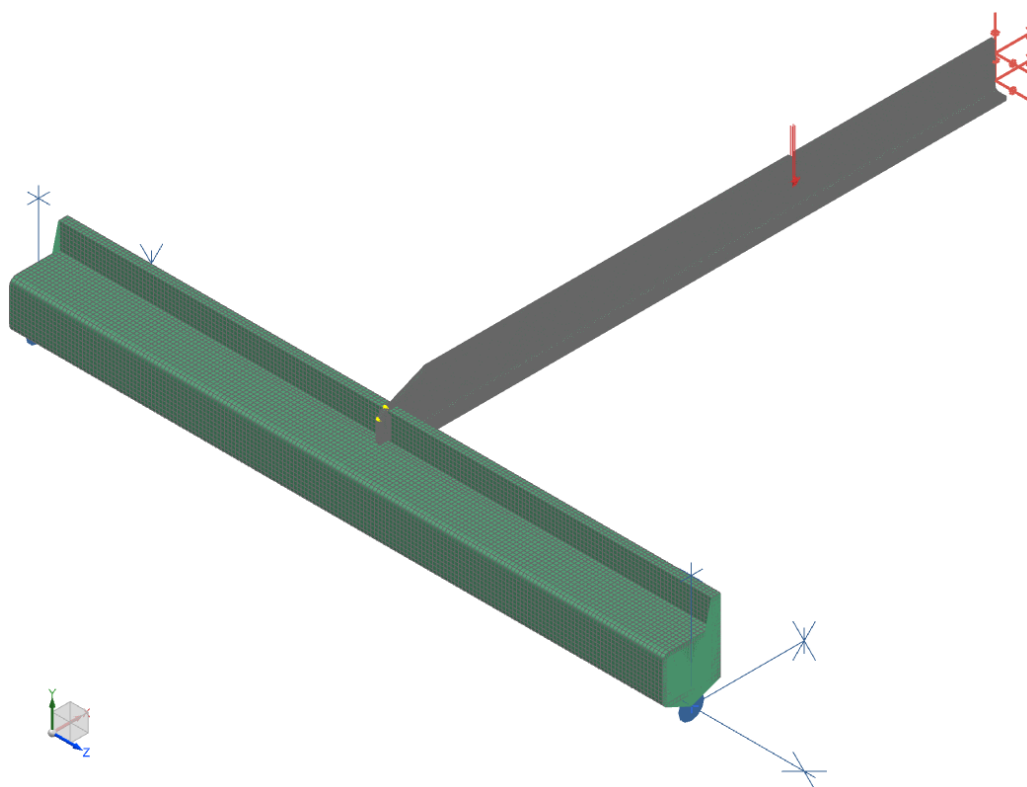


Figur 12. Skärpalettens långsida kopplad till stödpunkten genom förbindelseelement.

Svetsfogarna modellerades som en del av stödbalken, som sedan fästes till långsidans förstyrningsplåt genom limelement. Inga andra kontaktvillkor definierades, vilket innebar att analysen antog värstafalls scenariot var all last gick genom svetsfogarna.

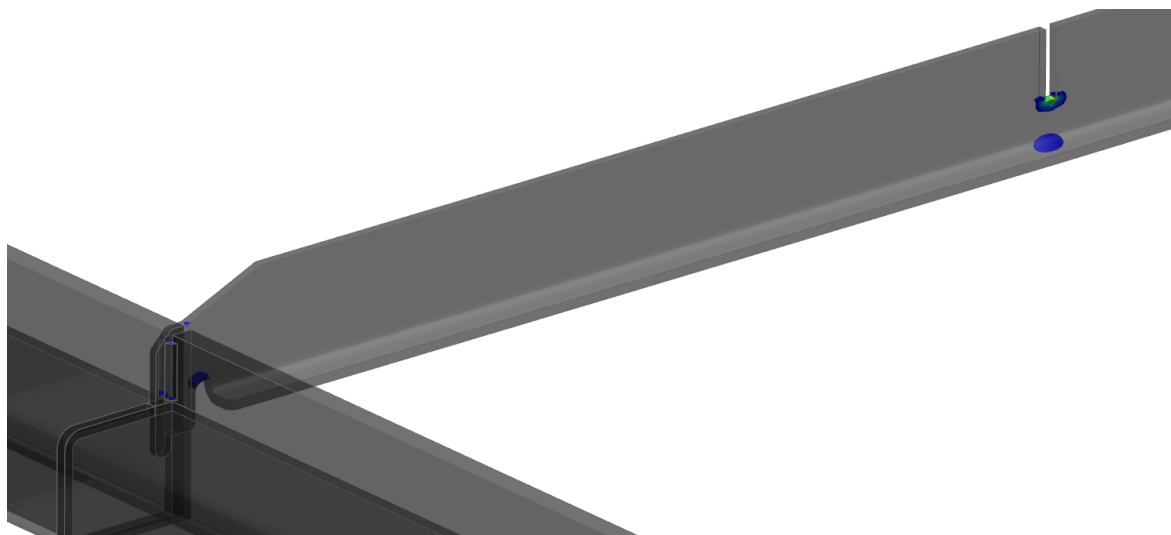
Modellens symmetriplan definierades som stödbalkens mittplan. Den tidigare beräknade dimensioneringslasten 1100 N applicerades nere i urtaget för spännbalken. Ena kontaktpunktens nod låstes i alla tre translatoriska frihetsgrader, medan den andra endast låstes i två och den tredje axeln i banans riktning förblev olåst. Den idealiserade modellen med inspänningarna, dimensioneringslasten och symmetrivillkoret visas i figur 13.

Symmetrivillkoret innebar att allting speglades kring symmetriplanet i beräkningen och medförde att modellen kunde uppta sidokrafter i båda långsidornas kontaktpunkter. I verkligheten kan endast långsidan med hjul på sexkantsräls uppta sidokrafter. En alternativ lösning skulle ha varit att inkludera hela stödbalken och båda långsidorna i modellen och definiera inspänningarna så att endast ena långsidan kan uppta sidokrafter. Lösningen testades men resulterade i en allt för vek uppställning. Förenklingen att båda sidorna antogs uppta sidokrafter visade sig vara närmast sanningen, eftersom den fritt uppställda långsidans kontaktpunkters förmåga att glida i sidled i praktiken begränsas av kortsidornas böjstyvhet.

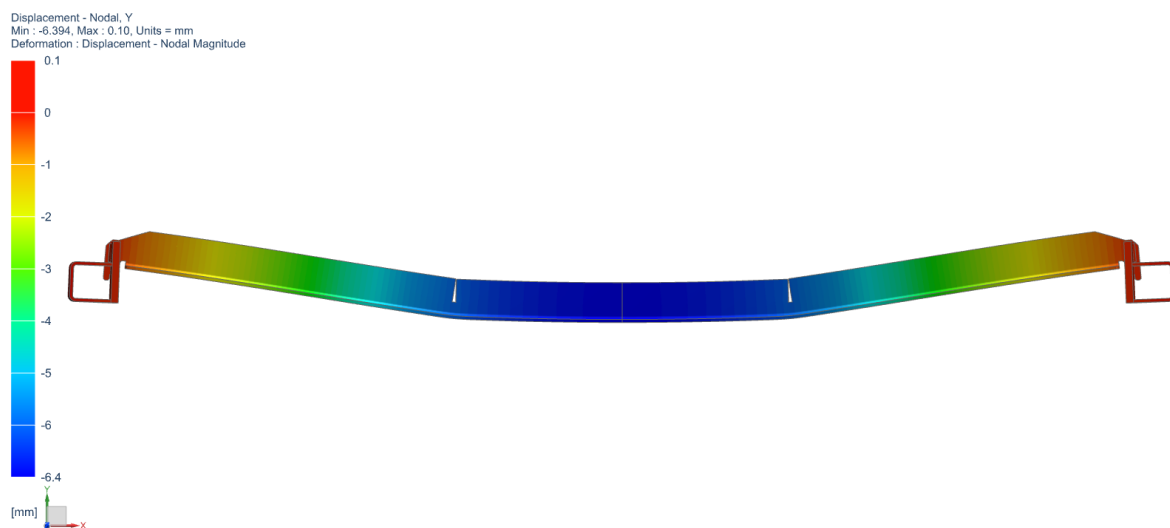


Figur 13. Idealiserade modellen med inspänningarna, dimensioneringslasten och symmetrivillkoret.

Analysen visade att spänningen i urtagen för spännbalkarna och infästningarna var på en hög nivå och en del områden överskred materialets sträckgräns, vilket syns i figur 14. Stödbalken ansågs ändå klara av att bära dimensioneringslasten eftersom spänningen i verkligheten omfördelas till de mindre belastade områdena. Böckningen resulterade i att stödbalken böjdes i både y- och z-riktningarna. Nedböjningen visas i figur 15 och uppgick till 6,4 mm. Analysen bekräftade att stödbalkarna klarade av att uppta en reaktionskraft på 1100 N från spännbalkarna.



Figur 14. Von-Mises-spänningar som översteg materialets sträckgräns 355 MPa.



Figur 15. Speglad rendering av nedböjningen, visad som 10 % av modellstorleken.

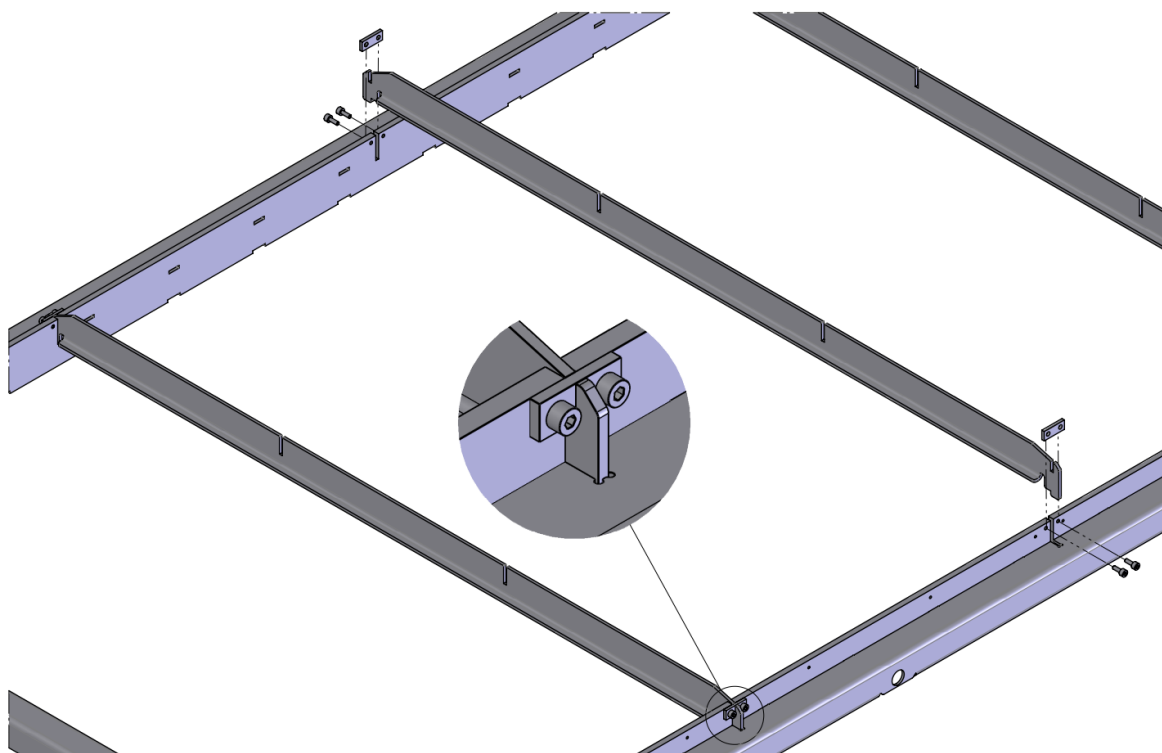
4.5 Konceptgenerering

Utifrån de krav och önskemål som ingick i kravlistan genererades fyra olika koncept på en utbytbar stödbalk. Delarna till samtliga koncept var tillverkade av 6 mm tjock stålplåt. I kapitlet ges en utförligare beskrivning av det valda konceptets bärförmåga.

4.5.1 Koncept 1

Första konceptet som visas i figur 16 bibehöll den ursprungliga stödbalkens utformning och svetsfogarna ersattes med fästplåtar på utsidan av långsidorna. Stödbalkarna i konceptet monteras som tidigare, sedan fälls fästplåtarna ner i spår i stödbalken. Fästplåtarna har frigångshål och spänns mot förstyrningsplåtarna så att långsidorna hålls parallella.

Fördelarna med konceptet var den låga vikten, antalet delar och att hullingarna verkade långt nere på långsidorna, vilket minskade risken för att långsidornas övre del vreds inåt i stället för att hela långsidan drogs inåt som tänkt. Konceptet hade dessvärre flera nackdelar, bland annat skulle långsidorna behövs klämmas ihop innan stödbalkarna kunde fällas ner i dem. Detta skulle ställa till problem vid montering. Dessutom kvarstod problemet med bockade flänsen som samlar slagg.



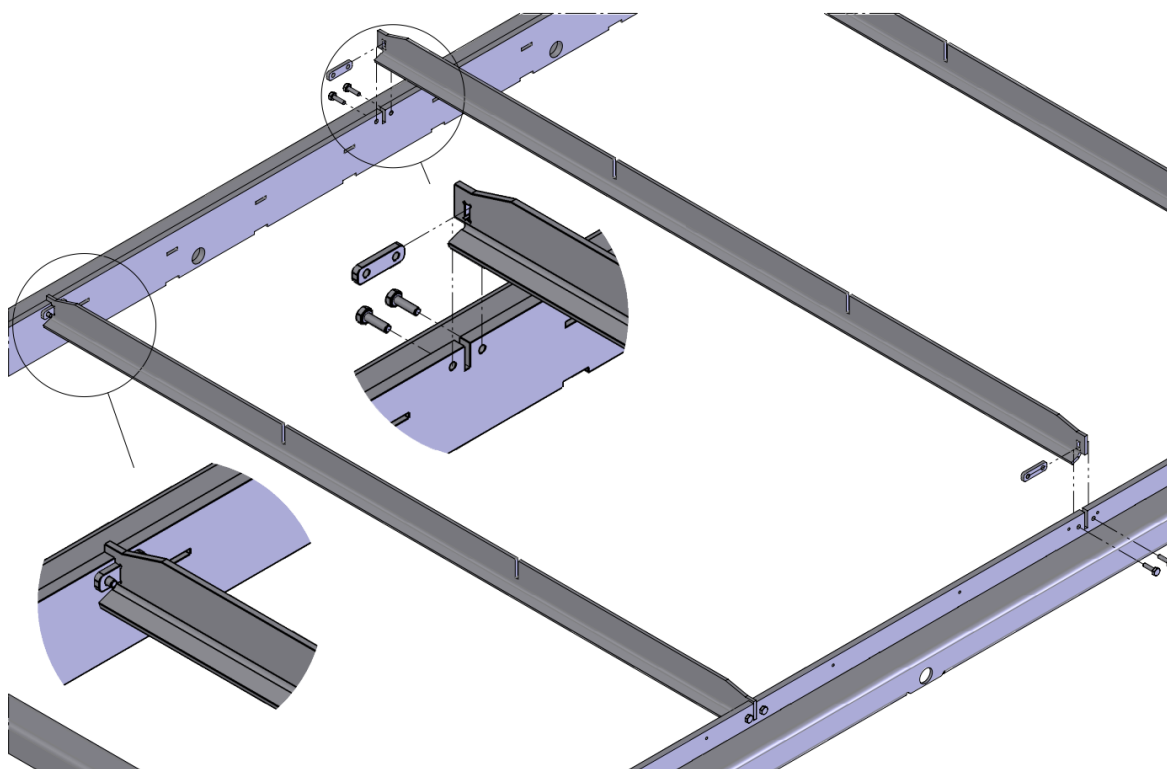
Figur 16. Koncept 1.

Analysrapporten för konceptet finns som bilaga 3. Analysen visade att det nödvändiga glappet mellan fästplåtarna och deras spår medförde att infästningarna inte kunde uppta moment. Spänningsnivåerna och nedböjningen blev därför mycket större än för den ursprungliga stödbalken. I analysen undersöktes därför även vad som skulle hända om fästplåtarna svetsades fast i stödbalkarna med kälffogar likt den ursprungliga lösningen. Resultatet visade att fästplåtarnas djup skulle behöva ökas tills motsvarande längd svetsfog skulle få plats, varpå spänningarna under spåren för fästplåtarna skulle bli allt för höga.

4.5.2 Koncept 2

Andra konceptet presenteras i figur 17. I konceptet avlägsnades de djupgående hullingarna och flänsens bockningsvinkel minskades till 70° för att motverka ansamlingen av slagg. Fästplåtarna förflyttades till insidan av långsidorna så att spännkraften från skruvförbanden spänner ihop långsidorna vid monteringen. I konceptet hade långsidorna genomgående hål och fästplåtarna var gängade. Långsidorna skulle spännas ihop tills de låg mot den bockade flänsen.

Konceptets fördelar var den låga vikten, minskade slaggansamlingen och att spännkraften från skruvförbanden samtidigt förde långsidorna mot varandra. Dessutom var monteringen enkel då skruvarna monterades från utsidan och skulle gängorna skadas kunde en ny fästplåt enkelt tillverkas och gängas. Nackdelen med konceptet var att bockningsmomentet kvarstod.



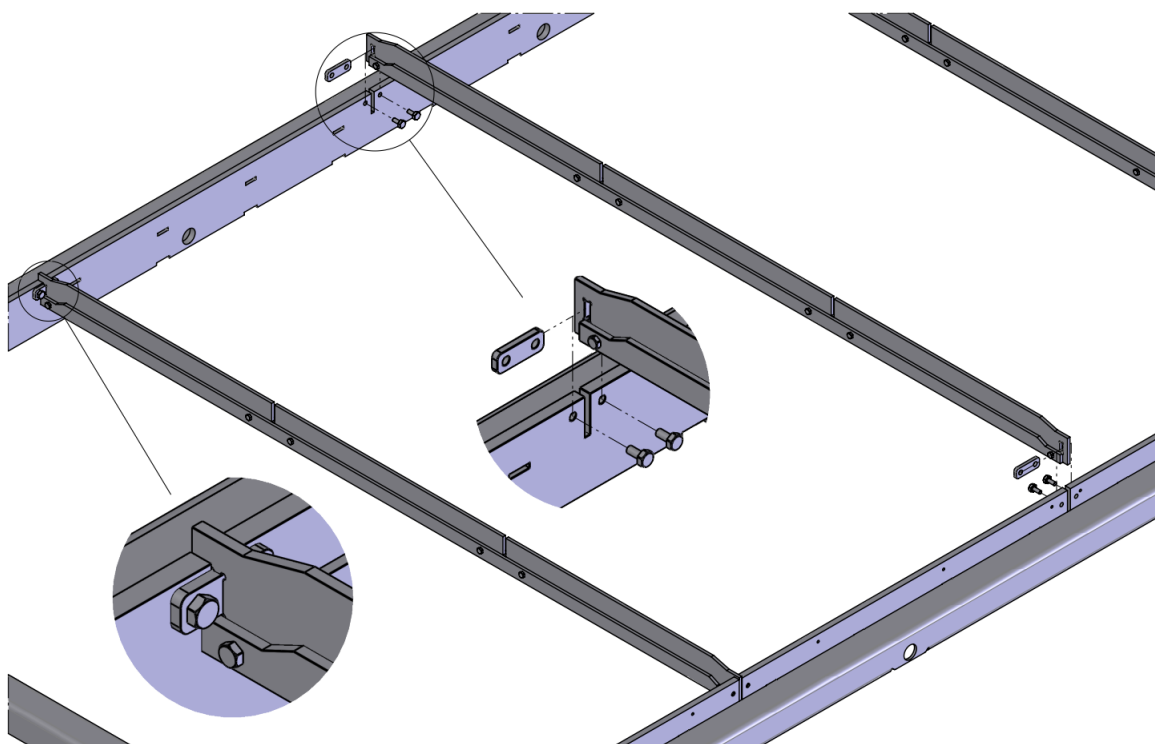
Figur 17. Koncept 2.

Analysrapporten för konceptet finns som bilaga 4. Den minskade bockningsvinkeln reducerade stödbalkens bärförmåga kraftigt och konceptet slopades eftersom det var vekare än den ursprungliga stödbalken.

4.5.3 Koncept 3

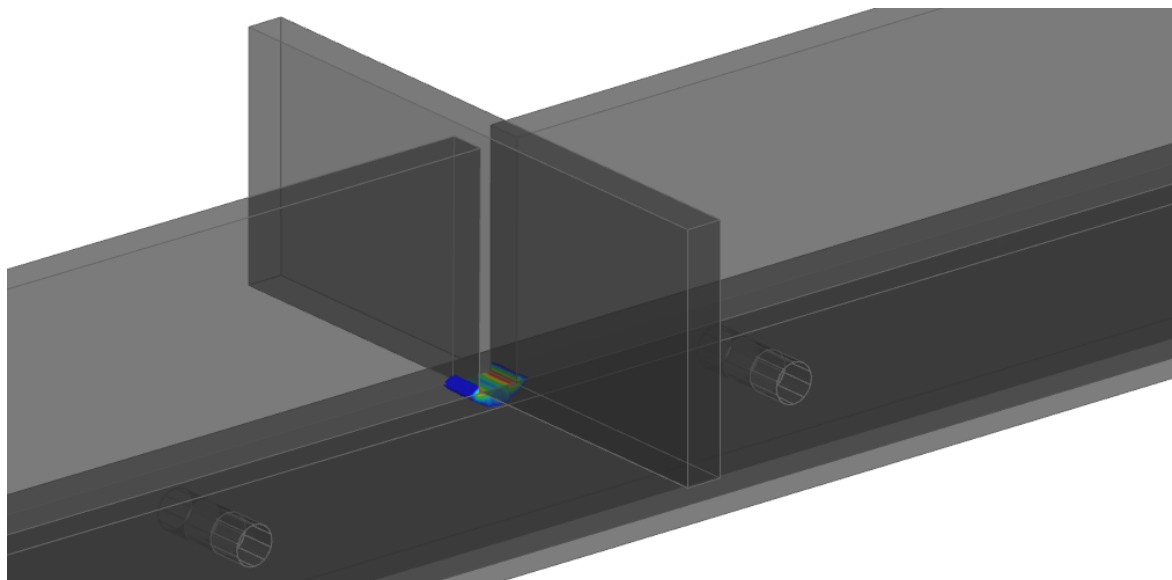
Tredje konceptet som visas i figur 18 bestod av en huvudplåt i mitten med en förstärkningsplåt på vardera sida. Förstärkningsplåtarna fästes till huvudplåten med sex genomgående skruvförband och upptog således en väsentlig del av böjspänningarna i de kritiska områdena under urtagen för spännbalkarna. Huvudplåten fästes till stommen på samma sätt som andra konceptet. Stommens långsidor skulle spännas mot varandra tills de låg mot förstärkningsplåtarnas ändor.

Konceptet krävde ingen bockning och utöver bidraget till stödbalkens totala bärförmåga förväntades förstärkningsplåtarna avsevärt minska slitaget från laserstrålen. Detta eftersom värmen från strålen skulle spridas ut till de övriga plåtarna i balken och om ett snitt i huvudplåten nådde ner till förstärkningsplåtarnas topp skulle det smälta materialet inte kunna avlägsnas till sidorna som tidigare.

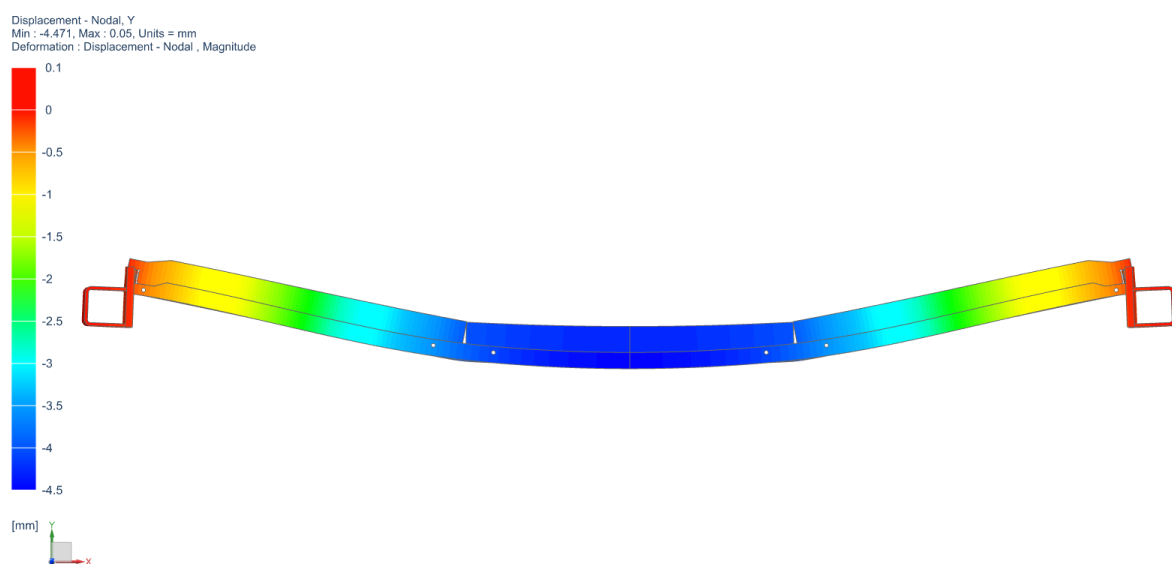


Figur 18. Koncept 3.

Analysrapporten för koncept 3 finns som bilaga 5. I analysen framkom att infästningen i konceptet fungerade bra och hur förstärkningsplåtarna effektivt avlastade de kritiska områdena under urtagen för spännbalkarna. I figur 19 visas spänningar över 355 MPa i det kritiska området under urtaget för spännbalkarna. I figur 20 visas deformationen som 10 % av modellstorleken. Stödbalkens nedböjning var 4,5 mm.



Figur 19. Von-Mises-spänningar som översteg materialets sträckgräns 355 MPa.

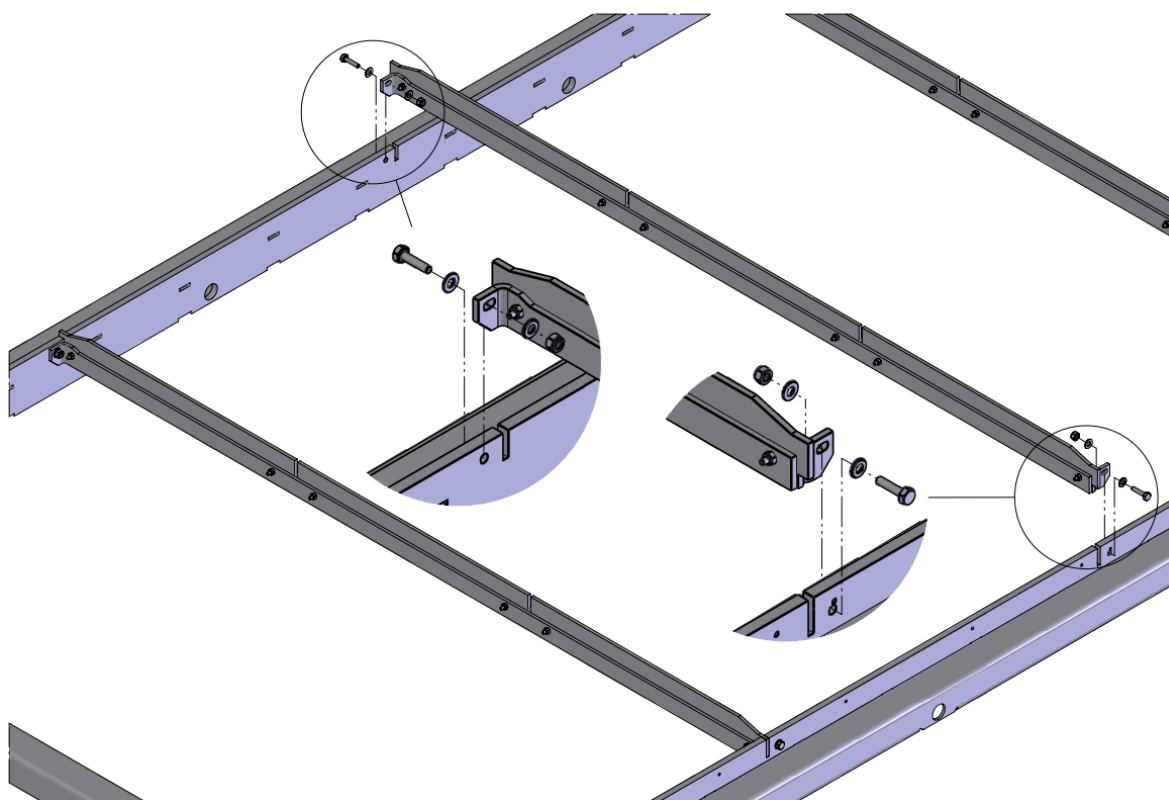


Figur 20. Speglad rendering av nedböjningen, visad som 10 % av modellstorleken.

4.5.4 Koncept 4

Fjärde konceptet byggde vidare på det tredje och fästplåtarna ersattes med bockade fästörön i förstärkningsplåtarna, vilket syns i figur 21. På grund av utrymmesbristen på LST-skärpalettens stomme kunde endast ena sidan av förstärkningsplåtarna förses med fästörön, vilket ledde till ett osymmetriskt förband. Förstärkningsplåtarna hölls därför identiska och monterades spegelvända.

Fördelarna med konceptet var att de separata fästplåtarna eliminerades och en större del av lasten skulle kunna gå genom förstärkningsplåtarna. Nackdelen med konceptet var tillverkningen. Förutom att bockningen av fästörönen var ytterligare ett tillverkningssteg så medförde bockningen en del osäkerheter i förstärkningsplåtens längd och fästörönens slutliga position. I praktiken skulle troligtvis ett nominellt glapp på ca. 1 mm krävas mellan långsidorna och fästörönen för att säkerställa att långsidorna spänns mot mittplåtens ansatser och inte själva fästörönen.



Figur 21. Koncept 4.

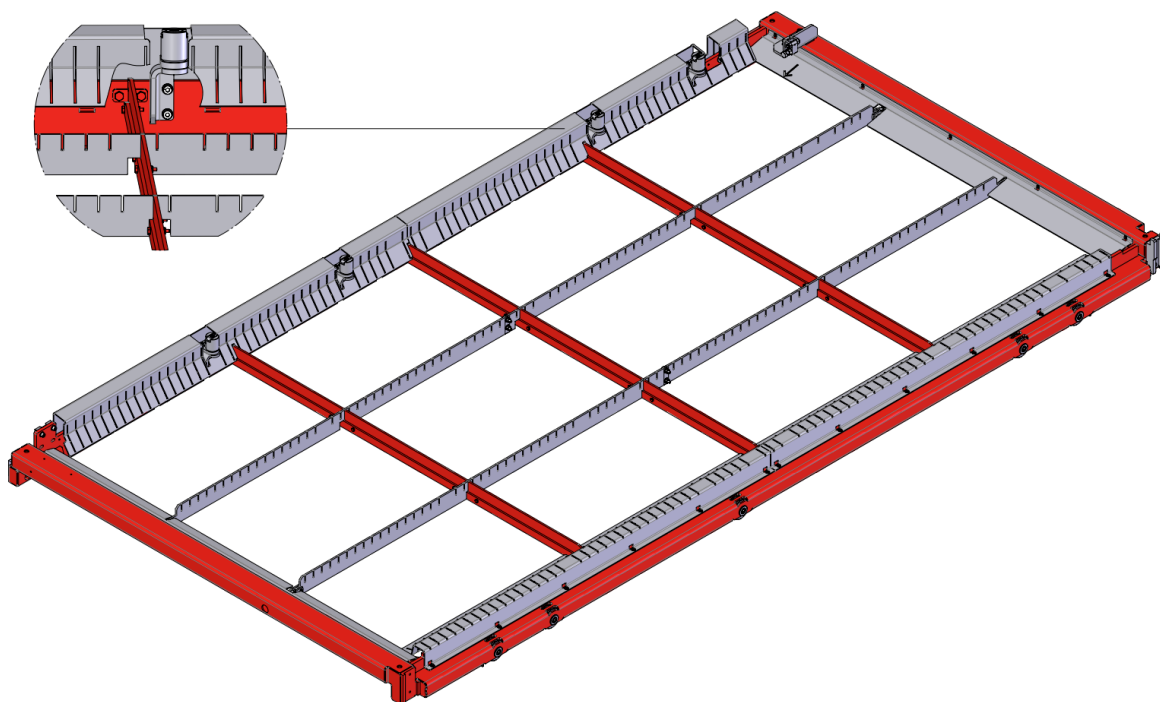
Analysrapporten finns som bilaga 6. Analysen visade att infästningen inte alls var lika styv som förväntat. Nedböjningen uppgick till 6,5 mm. Stödbalkens asymmetri medförde att den vreds på ett onaturligt sätt och konceptet slopades.

5 Resultat

I detta kapitel presenteras det valda konceptet och en sista analys om konceptet kan tillverkas av koppar som var ett av önskemålen. Slutligen beskrivs implementeringen av resultatet.

5.1 Konceptval

När de fyra koncepten hade utvärderats ansågs koncept 3 vara det mest lämpliga eftersom det uppfyllde alla krav och en stor del av de önskemål som ställdes i kravlistan. Delarna till stödbalkarna kan tillverkas i samma skede som nya spännbalkar skärs ut av 6 mm tjock stålplåt och de är redo att monteras direkt efter skärningen. Den nya stödbalken kan varken del- eller slutmonteras felaktigt, vilket är en stor fördel då användare själva ska kunna byta ut dem i sina skärpaletter. I den slutliga lösningen monteras skruvarna från stommens insida och skruvas in i gängade hål i stommen, vilket är en estetisk föredragen lösning då stänkplåtarna täcker hålen efter monteringen. En överblick på den nya skärpaletten med utbytbara stödbalkar visas i figur 22.



Figur 22. Nya skärpaletten för LST 3015. Den nya skärpaletten för ASF II 3015 EU är i stora drag identisk.

Ett av önskemålen var att de nya stödbalkarna skulle kunna tillverkas av koppar om användare ville minska slitaget. Problemet med koppar som bärande material är att dess elasticitetsmodul är mycket lägre än för stål, vilket innebär att en jämstark stödbalk av koppar skulle behöva vara mycket tjockare. I samband med det tredje konceptet framkom idén att det kanske vore möjligt att bibehålla förstärkningsplåtarna i stål och endast tillverka huvudplåten i koppar. En FE-analys av detta påvisade däremot att nedböjningen skulle bli allt för stor med den tidigare definierade dimensioneringslasten 1100 N.

Dimensioneringslasten 1100 N var många gånger högre än den last som stödbalkarna i verkligheten antogs utsättas för. Samtidigt var det endast användare som skär stora mängder högreflektiva material och som rapporterade problem med högt slitage som möjligtvis skulle vara intresserade av att tillverka slitdelarna i skärområdet av koppar. Med dessa motiveringar sänktes dimensioneringslasten för stödbalken av koppar genom att i stället anta belastningen utgörs av en fullstor kopparplåt med tjockleken 12 mm, som var skärmaskinernas maxkapacitet enligt tabell 1. Beräkningarna i bilaga 1 gav då en dimensioneringslast på 700 N för stödbalken av koppar.

En analysrapport med denna last finns som bilaga 7. I analysen antogs huvudplåten tillverkas av halvhård olegerad kopparplåt, som enligt Tibnor AB (2023) har lägsta proportionalitetsgränsen 180 MPa. Analysen visade att en stödbalk med huvudplåten tillverkad i halvhård koppar och förstärkningsplåtar av stål kan klara dimensioneringslasten 700 N.

5.2 Implementering

Efter konceptvalet påbörjades implementeringen av den nya stödbalken i skärpaletterna för LST 3015 och ASF II 3015 EU. De nya stödbalkarna krävde omändringar i skärpaletternas långsidor, stänklåtar och spännbalkar. För att underlätta omställningen i produktionen så behandlades alla delar och sammanställningar av skärpaletterna som krävde ändringar som nya artiklar. Nackdelen med att skapa nya artiklar i stället för att revidera äldre är att nya tillverkningsritningar måste göras, vilket medförde en hel del arbete vid implementeringen. Totalt infördes 42 nya artiklar och tillverkningsritningar i AAE:s ERP-system.

6 Diskussion

I detta kapitel diskuteras industrins framtida utveckling och grundorsaken till den snabba nötningen. Projektets resultat granskas kritiskt och förslag på fortsatt forskning presenteras. Avslutningsvis ges egna synpunkter på det utförda projektet och vad som ännu ska göras innan de nya stödbalkarna börjar användas.

6.1 Nötningens orsak

Den maximala lasereffekten tillgänglig på marknaden har ökat markant de senaste åren och kommer troligtvis fortsätta öka. Fördelarna med en högre lasereffekt är högre skärhastigheter och lägre driftkostnader som i stor del beror på en sänkt förbrukning av skärgas. Det är fortsättningsvis svårt att förutspå om maskinernas inköpspris och driftsäkerhet sätter en gräns för vilken lasereffekt som är praktiskt användbar.

Industrin strävar till en allt högre automationsgrad, vilket innebär att en större del av processerna kring skärningen så som sortering av delarna och fästandet av etiketter med artikelkoder ska hinna skötas under tiden som maskinen skär. Automatiseringen av skärprocessen kan därmed utgöra en flaskhals för maskiner med allt högre lasereffekter. Det är viktigt att se produktionen av detaljer i plåt som en helhet och inte enbart överväga snabbare skärmaskiner om delarna bara ligger i hög och väntar på bockning eller ytbehandling efter skärningen.

I början av projektet antogs det ökade slitaget bero på de allt högre lasereffekterna som maskinerna levereras med. Men eftersom ingen information om andra användare som lagt märke till en liknande ökning kunde hittas så antas grundproblemet numera bero på skärmaskinernas skärprogram eller andra parametrar. Skärprogrammen för de högreflektiva materialen kan exempelvis ha optimerats för hög skärkvalitet, samtidigt som de parametrar som ger hög skärkvalitet innebär en varmare stråle längre ner i snittet och därmed mer slitage. Grundproblemet antas därmed ligga i laserskärmaskinerna och inte i skärpaletternas konstruktion. Oavsett grundproblemet är det ändå fördelaktigt att stödbalkarna kan bytas ut om användaren föredrar att byta ut i stället för att rengöra slitdelarna när slaggansamlingen börjar bli för stor.

6.2 Kritisk granskning

Eftersom inga prototyper tillverkats kan det fortfarande uppstå oförsedda problem med de nya stödbalkarna. Skruvarna som används vid infästningen är relativt korta och det kan vara svårt att räta ut långsidor som är riktigt böjda. Om detta visar sig vara ett problem kan skärpaletten dock revideras så att genomgående skruvförband används i stället. En av skruvarna på skärpaletterna för LST 3015 kan bli svåråtkomlig efter att palettens fyra x-anhåll monterats, detta visas i figur 22. I värsta fall kan detta leda till att ett av anhållen måste demonteras vid utbytet av stödbalkarna. Demonteringen är dock en enkel procedur och försvårar inte utbytet av stödbalkarna särskilt mycket.

Tillämpningen av kopparslitdelar i skärområdet för laserskärmaskiner är en välkänd metod att minska slitaget, men forskning och dokumentering kring ämnet är mycket begränsat. Ingen information om vilken legering eller tillstånd som vanligtvis används hittades. Rent koppar i glödgat tillstånd är segt och mjukt, men det kan även deformationshärddas till olika grader för att kraftigt höja dess proportionalitetsgräns. Dessutom finns det många kopparlegeringar med bättre mekaniska egenskaper än ren koppar som troligtvis kunde tillämpas eftersom elledningsförmågan inte behöver vara den bästa. I analysen gjordes antagandet att slitdelarna tillverkas av halvhård olegerad kopparplåt eftersom listerna förväntas bli för mjuka annars och inte tåla den mekaniska borttagningen av slagget.

I början rådde stor ovisshet hur en lämplig dimensioneringslast skulle definieras. Första tanken var att utgå från värstafallscenariot var den bearbetade plåten mist all sin bärförmåga, alla balkar är oändligt styva och samtliga uppläggningslister kapats av precis intill en av spännbalkarna. Om listerna kapats vid denna position kommer majoriteten av den last som befinner sig ovanför den större delen av listen gå genom underliggande spännbalken till stödbalkarna, vilket skulle resultera i dubbelt så höga dimensioneringslaster i ett av stödbalkarnas urtag. Så pass höga dimensioneringslaster skulle resultera i mycket överdimensionerade stödbalkar, så i stället valdes en lägre last på 1100 N. Valet av dimensioneringslast anses ändå inte vara avgörande eftersom samtliga koncept endast jämfördes med den ursprungliga stödbalken, vars hållfasthet bekräftats empiriskt. Dessutom antas denna last vara mångdubbelt högre än den största belastningen som stödbalkarna utsätts för i praktiken, då listernas livslängd snarare begränsas av deras toppars skick än deras bärförmåga.

Analyserna visade att slutliga stödbalkens urtag smalnade ca 0,4 mm i övre ytan vid dimensioneringslasten 1100 N. Om lasten ökades ytterligare skulle stödbalkens urtag smalna så pass mycket att dess topp kniper fast spännbalken, vilket skulle öka stödbalkens böjmotstånd markant och förhindra ett katastrofalt brott.

I analyserna för koncept 3 och 4 förenklades modelleringen av skruvförbanden mellan stödbalkens delar som skjuvförband, när de i verkligheten kommer fungera som friktionsförband. Förenklingen anses ha en försumbar inverkan på analysernas resultat.

6.3 Förslag till vidare forskning

Projektet gav upphov till saker som kunde utredas efter att tillverkningen av de nya skärpaletterna påbörjats och tillverkarna hunnit vänja sig med omställningen. Bland annat borde en utredning om de utbytbara stödbalkarna fungerar som tänkt och om tillverkningen går smidigt utföras. Om utredningen visar att stödbalkarna inte behöver vara monterade under svetsningen, blästringen eller målningen kunde de fördelaktigen lämnas bort och monteras i samband med de övriga slitdelarna efter målningen.

När de nya skärpaletterna börjar levereras kunde en uppföljning över stödbalkarnas ungefärliga livslängd ge en bättre uppfattning om huruvida lösningen med tre intilliggande plåtar minskar nötningen i verkligheten. I nuläget saknas riktlinjer för när skärpaletternas slitdelar bör ersättas med nya. I samband med uppföljningen kunde instruktioner för underhållningen av skärpaletterna skapas.

6.4 Avslutning

I och med att en lämplig lösning på problemet hittades samt att alla nödvändiga tillverkningsritningar färdigställdes och infördes i ERP-systemet så uppfylldes projektets mål. Projektet har varit mycket lärorikt men stundom komplicerat då teori eller forskning att basera arbetet på var svår att hitta.

Innan de nya skärpaletterna börjar tillverkas ska de äldre skärpaletterna tillverkas så långt som ursprungliga delars lagersaldon räcker, överliggande maskinsammanställningar revideras och övriga berörda företag i AMADA-koncernen meddelas om den nya utbytbara stödbalken.

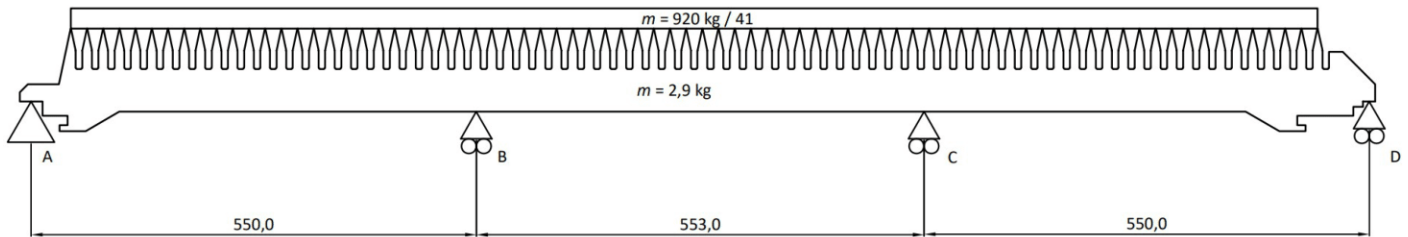
7 Källförteckning

- AMADA America. (n.d.). ENSIS 3015 – Fiber Laser Cutting Technology.
Retrieved March 6, 2023, from <https://www.amada.com/america/ensis-series>
- AMADA Automation Europe. (2021). *About us*. Retrieved May 8, 2023, from <https://amada-automation.eu/en/>
- AMADA Europe. (2020). VENTIS AJ Series. Retrieved March 6, 2023, from https://cdn.amada.eu/fileadmin/Repository/Products/Brochures/VENTIS-AJ_brochure_2021_F103-006_EN.pdf
- AMADA Europe. (2021a). ENSIS AJ Series. Retrieved March 6, 2023, from https://cdn.amada.eu/fileadmin/Repository/Products/Brochures/ENSIS-AJ_series_12_pages_2021_E060-EU11_EN.pdf
- AMADA Europe. (2021b). REGIUS AJ Series. Retrieved March 6, 2023, from https://cdn.amada.eu/fileadmin/Repository/Products/Brochures/Regius-AJ_series_12_pages_2021_E132-EU02_EN.pdf
- Ama-Prom. (i.a.a). *ASF II 3015 EU*. Haettu 8.5.2023 osoitteesta <https://www.ama-prom.fi/koneet/automaatio/asf-ii-3015-eu>
- Ama-Prom. (i.a.b). *MP FLEXit*. Haettu 8.5.2023 osoitteesta <https://www.ama-prom.fi/koneet/automaatio/mp-flexit>
- Bystronic Group. (2022). *Fiber Laser vs. CO2 Laser - Save Money With a More Energy-Efficient Machine*. Retrieved February 8, 2023, from <https://www.bystronic.com/aus/en/lp/fiber-laser-vs-co2-laser-aus>
- Diehl, D. (2018). How to Select the Right Setup for Your Fiber Laser Cutting Needs. *Industrial Laser Solutions*. Retrieved February 1, 2023, from <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14216057/how-to-select-the-right-setup-for-your-fiber-laser-cutting-needs>
- Engineering ToolBox. (2017). *Continuous Beams - Moment and Reaction Support Forces*. Retrieved April 11, 2023, from https://www.engineeringtoolbox.com/continuous-beam-moment-reaction-support-forces-distributed-point-loads-d_1988.html
- Fabbro, R. (2013). Developments in Nd:YAG Laser Welding. In S. Katayama, *Handbook of Laser Welding Technologies* (pp. 47-72). Woodhead Publishing Limited.
doi:10.1533/9780857098771.1.47

- Farrell, R. (2017). 3 Things You Should Know About Air-Assisted Laser Cutting. *The Fabricator*, January ed. Retrieved February 8, 2023, from <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/lasercutting/3-things-you-should-know-about-air-assisted-laser-cutting>
- Fox, D., Chalmers, E., & Jeans, M. (2016). Reducing headaches associated with slag on laser grating. *The Fabricator*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/lasercutting/reducing-headaches-associated-with-slag-on-laser-grating>
- Fujikura Ltd. (n.d.). *What Is Fiber Laser*. Retrieved February 9, 2023, from <https://www.fiberlaser.fujikura.jp/eng/products/about-fiber-laser.html>
- Ion, J. C. (2005). *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Jain, V. K. (2013). *Laser Systems and Applications*. Alpha Science International.
- Kimla, P. (2021). Realities of High-Power Fiber Laser Cutting. *Industrial Laser Solutions*. Retrieved February 1, 2023, from <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14222030/realities-of-highpower-fiber-laser-cutting>
- Müller, H.-R., Kirchhof, J., Reichel, V., & Unger, S. (2006). Fibers for high-power lasers and amplifiers. *Comptes Rendus Physique*, 7(2), 154-162.
doi:10.1016/j.crhy.2006.01.013
- Sarrafi, R., Jia, J., Zhang, J., & Mendes, M. (2022). Advances in Cutting With Ultrahigh-Power Fiber Lasers. *Laser Processing*. Retrieved February 1, 2023, from <https://www.laserfocusworld.com/laser-processing/article/14282662/advances-in-cutting-with-ultrahighpower-fiber-lasers>
- Saucedo, F. V., Chann, B., Samson, B., & Tayebati, P. (2016). Direct diode vs. other laser systems used in laser cutting. *Industrial Laser Solutions*, 31. Retrieved January 27, 2023, from <https://www.laserfocusworld.com/industrial-laser-solutions/article/14216486/direct-diode-vs-other-laser-systems-used-in-laser-cutting>
- StructX. (n.d.-a). *Continuous Beam - Four Span with UDL*. Retrieved April 11, 2023, from https://structx.com/Beam_Formulas_039.html
- StructX. (n.d.-b). *Continuous Beam - Three Span with UDL*. Retrieved April 11, 2023, from https://structx.com/Beam_Formulas_036.html
- Tibnor AB. (2023). *Teknisk data: Koppar*. Hämtat från Tibnor.se: <https://www.tibnor.se/inspiration/downloads> den 10 april 2023

- Tsukamoto, S. (2013). Developments in CO₂ Laser Welding. In S. Katayama, *Handbook of Laser Welding Technologies* (pp. 17-46). Woodhead Publishing Limited. doi:10.1533/9780857098771.1.17
- TWI. (2016). *Flying Optic vs Fixed Optic Machines for CO₂ Laser Cutting*. Retrieved February 14, 2023, from <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/fag-what-is-the-difference-between-flying-optic-and-fixed-optic-machines-for-co2-laser-cutting>
- Wandera, C. (2016). Fiber Laser in Material Processing. In P. Mukul, *Fiber Laser* (pp. 401-426). IntechOpen. doi:10.5772/62014
- Weni Solution. (2022). Cutting With Compressed Air - It Pays Off! Retrieved February 13, 2023, from https://weni.eu/en/bw_post/is-it-worth-buying-a-fiber-laser-for-metal-cutting-the-3-most-important-advantages-of-a-laser-cutter-2/

Uppläggningslist



$L_{slat} := 1653 \text{ mm}$ Avstånd mellan stommens långsidor

$m_{max} := 920 \text{ kg}$ Skärpalettens lastkapacitet

$m_{slat} := 2,9 \text{ kg}$ Uppläggningslistens egenvikt

$n := 41$ Antal uppläggningslister

$$Q_{slat} := \left(\frac{m_{max}}{n} + m_{slat} \right) \cdot g = 248 \text{ N} \quad \text{Last per uppläggningslist}$$

$$q_{slat} := \frac{Q_{slat}}{L_{slat}} = 0,15 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad \text{Lastintensitet}$$

$$l_{slat} := \frac{L_{slat}}{3} = 551 \text{ mm} \quad \text{Ungefärligt avstånd mellan stödpunkterna}$$

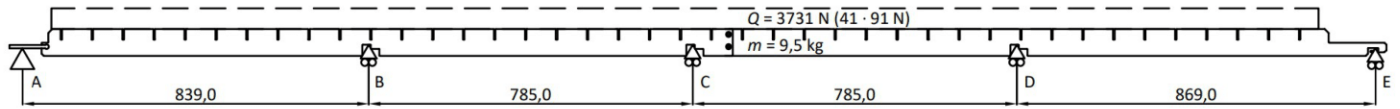
$$R_A := 0,4 \cdot q_{slat} \cdot l_{slat} = 33 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt A}$$

$$R_B := 1,1 \cdot q_{slat} \cdot l_{slat} = 91 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt B}$$

$$R_C := R_B = 91 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt C}$$

$$R_D := R_A = 33 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt D}$$

Spännbalk



$L_{beam} := 3278 \text{ mm}$ Avstånd mellan stommens kortsidor

$m_{beam} := 9.5 \text{ kg}$ Spännbalkarnas egenvikt

$$Q_{beam} := 41 \cdot R_B + (m_{beam} \cdot g) = 3829 \text{ N} \quad \text{Last per spännbalk}$$

$$q_{beam} := \frac{Q_{beam}}{L_{beam}} = 1.17 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad \text{Lastintensitet}$$

$$l_{beam} := \frac{L_{beam}}{4} = 819.5 \text{ mm} \quad \text{Ungefärligt avstånd mellan stödpunkterna}$$

$$R_A := 0.393 \cdot q_{beam} \cdot l_{beam} = 376 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt A}$$

$$R_B := 1.143 \cdot q_{beam} \cdot l_{beam} = 1094 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt B}$$

$$R_C := 0.928 \cdot q_{beam} \cdot l_{beam} = 888 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt C}$$

$$R_D := R_B = 1094 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt D}$$

$$R_E := R_A = 376 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt E}$$

$$R_{max} := \text{Ceil}(R_B, 10 \text{ N}) = 1100 \text{ N} \quad \text{Största reaktionskraften (punkt B \& D)}$$

$$\rho_{Cu} := 8.96 \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \quad \text{Koppars densitet}$$

$$s_{Cu.max} := 12 \text{ mm} \quad \text{Maximala skärkapaciteten i koppar}$$

$$l_{Cu.max} := 3070 \text{ mm} \quad \text{Plåtens maximala längd}$$

$$b_{Cu.max} := 1550 \text{ mm} \quad \text{Plåtens maximala bredd}$$

$$m_{Cu.max} := s_{Cu.max} \cdot l_{Cu.max} \cdot b_{Cu.max} \cdot \rho_{Cu} = 512 \text{ kg} \quad \text{Maximal last vid kopparskärning}$$

Uppläggningslist

$$Q_{Cu.slat} := \left(\frac{m_{Cu.max}}{n} + m_{slat} \right) \cdot g = 151 \text{ N} \quad \text{Last per uppläggningslist}$$

$$q_{Cu.slat} := \frac{Q_{Cu.slat}}{L_{slat}} = 0.09 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad \text{Lastintensitet}$$

$$R_{Cu.B} := 1.1 \cdot q_{Cu.slat} \cdot l_{slat} = 55 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt B}$$

Spännbalk

$$Q_{Cu.beam} := 41 \cdot R_{Cu.B} + (m_{beam} \cdot g) = 2360 \text{ N} \quad \text{Last per spännbalk}$$

$$q_{Cu.beam} := \frac{Q_{Cu.beam}}{L_{beam}} = 0.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad \text{Lastintensitet}$$

$$R_{Cu.B} := 1.143 \cdot q_{Cu.beam} \cdot l_{beam} = 674 \text{ N} \quad \text{Reaktionskraft i punkt B}$$

$$R_{Cu.max} := \text{Ceil}(R_{Cu.B}, 50 \text{ N}) = 700 \text{ N} \quad \text{Största reaktionskraften (punkt B & D)}$$

SOL 101 Linear Static Analysis of Transverse Beam 4326034

Description

Modern laser cutters are equipped with two or three laser shuttle tables (figure 1) so that an automated system or operator can remove the processed parts and load a new sheet while the machine is processing a sheet on another table. The sheets lie on a large number of skids in the tables that support the loose cut parts and allow the molten material to escape downward out of the kerf. The skids are supported vertically mainly by the table frame.

Under the skids run longitudinal and transverse beams (figure 2) for added support and to minimize skid deflection. The 3015 (sheet size 3 x 1,5 m) shuttle tables designed and manufactured by AMADA Automation Europe (AAE) have 41 skids, supported by 2 longitudinal beams, supported by 3 transverse beams. The transverse beams are welded to the table frame and play a crucial role in keeping the table's long sides running parallel.

AAE are designing replaceable transverse beams to ensure that all parts subject to wear from cutting can be exchanged if needed. The strength of the original design has been deemed sufficient empirically and the new replaceable concepts will therefore only be compared to the original transverse beam. The purpose of this analysis was to confirm that the dimensioning load chosen for the project was reasonable and to set a benchmark for the new concepts.

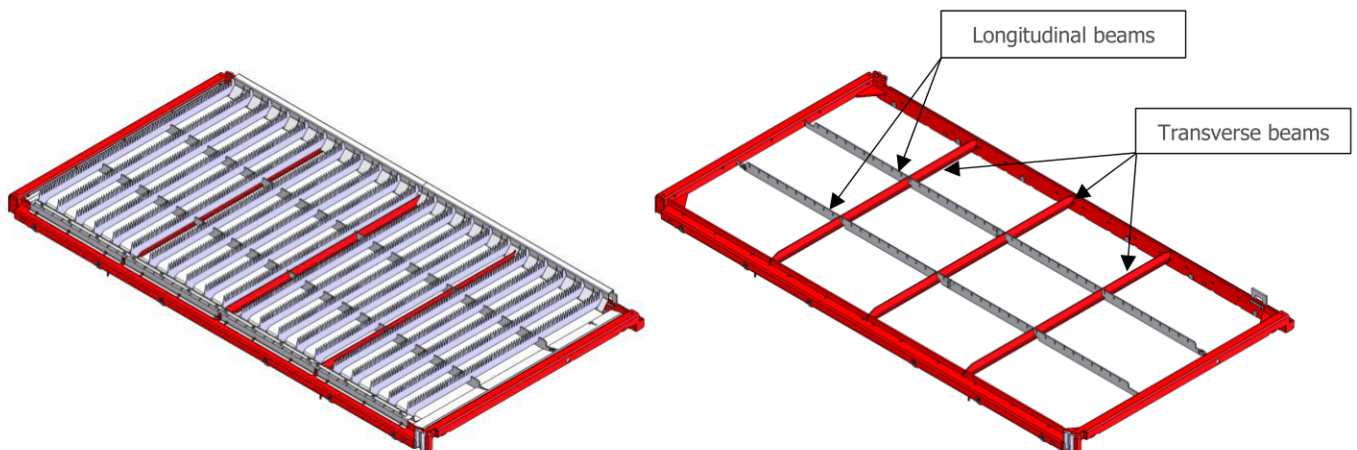


Figure 1 (Left). Laser shuttle table with every other skid removed for ease of visibility.
 Figure 2 (Right). Laser shuttle table frame with longitudinal beams installed.

Model

The analysis was done on a half model due to the symmetry of the table frame. To save computing resources even further, the model was limited to a 900 mm long section of the long side beam around the center transverse beam, see figure 3.

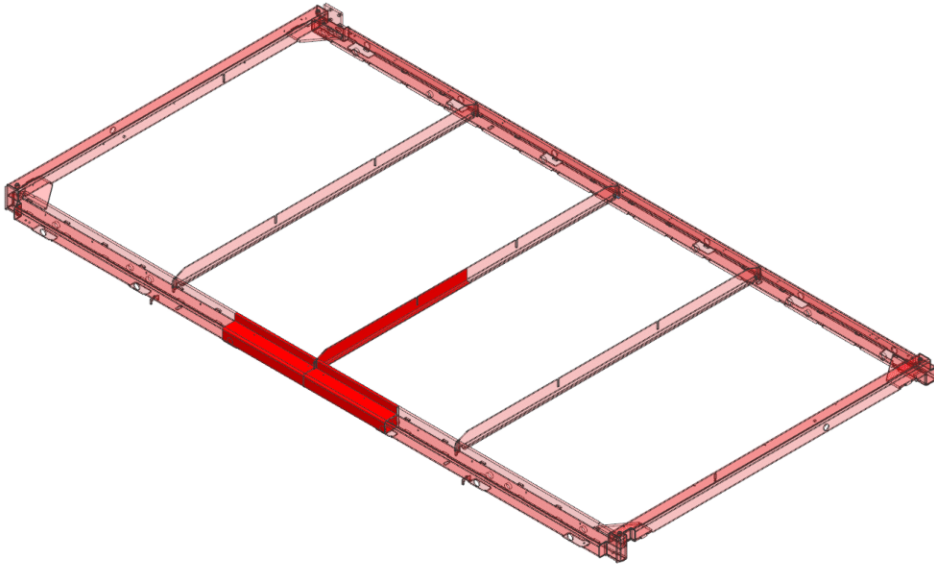


Figure 3. Analyzed model marked in opaque.

The beam section was idealized by removing tabs and holes that weren't of interest in this study. The two welds between the transverse beam and the long side were modeled onto the idealized model in accordance with the welding drawings, see figure 4.

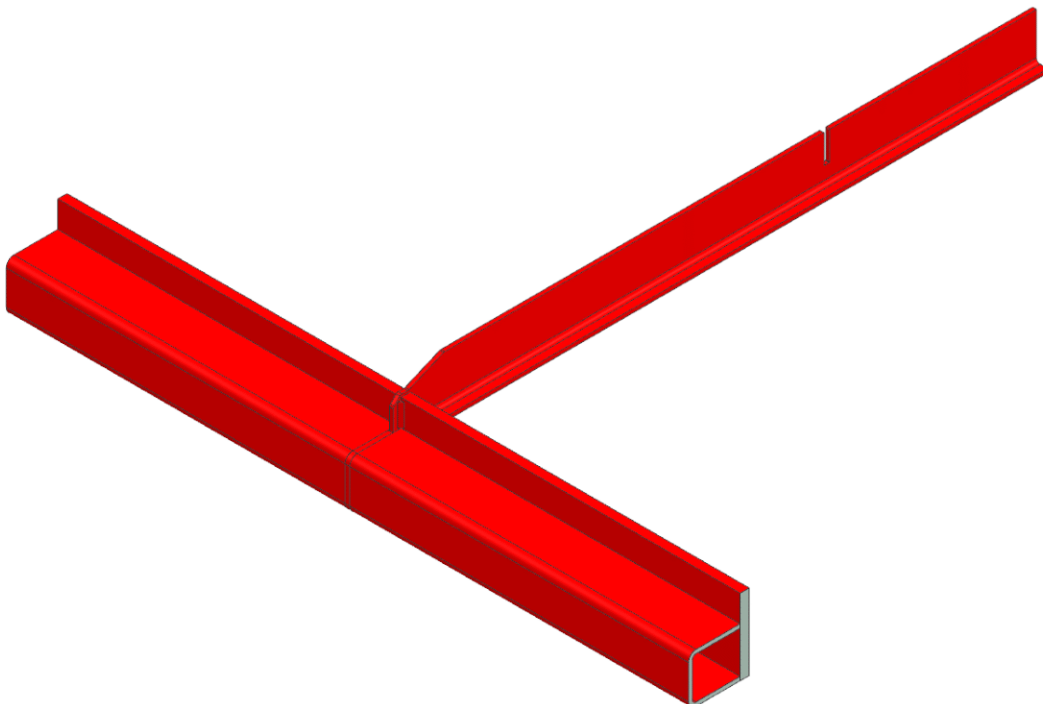


Figure 4. Idealized model used in analysis. The transverse beam is welded to the outside of the long side beam plate with two opposing fillet welds, each with a length of 35 mm and throat size of 3 mm.

Material

All parts of the table are made of structural steel with an elastic modulus of 207 GPa and a minimum guaranteed yield point of 355 MPa. Equivalent material data was used for the analysis.

Contacts

The welds were simulated by gluing the contacting surfaces to the thick plate of the beam section. Since no other contact can be guaranteed, no contact between the other parts were defined.

Constraints

The table is supported on wheels inside both long side beams. Under loading, the table frame will rotate around the inner side of the wheels on both sides, see figure 5. This was replicated by modeling the approximate contact points for the wheels and connecting them to the end of the beam sections with 1D-connection elements, presented in figure 6. The long side beam section length corresponds approximately to the maximum distance from the transverse beam to the nearest wheels (450 mm).



Figure 5. Simplified model of the shuttle table with marked contact points under load.



Figure 6. 1D beam elements connecting the side beam to the contact point.

The model was constrained by nodes in the defined contact points for the wheels. One node was constrained in all three translative degrees of freedom, while the other was left free in the rolling direction of the wheels (z-axis in the model). The symmetry of the model was defined using the Symmetric Constraint. The constraints can be seen in figure 7.

Load

The load transmitted by the transverse beams depends on the stiffness of the overlying longitudinal beams, skids, and sheet. The stiffnesses for all these parts are constantly changing due to the sheet being cut into smaller pieces and general wear from cutting decreasing the effective height of the supporting parts.

The dimensioning load used in the analysis was defined by assuming all parts are rigid, except the sheet itself which was applied as a distributed load (920 kg) over the 41 skids. Using these assumptions, the highest reaction force between the longitudinal and transverse beams was calculated to 1100 N, which would correspond to the three transverse beams bearing over 60 percent of the total load. This was considered to be a good safety margin, since the skids are thought to lose their overall functionality (skids tend to weld to the sheet and parts after slag buildup and wear) long before the transverse beams see such a high loading. The dimensioning load was applied as a geometrically distributed downward force in the bottom of the slot for the longitudinal beam, see figure 7.

Mesh

The parts of the long side beam were meshed using CHEXA (20) hexahedral elements with a size of 5 mm. The transverse beam was meshed using CTETRA (10) tetrahedral elements with a size of 2,5 mm due to its more complex shape. The model analyzed consisted of 135 341 CTETRA (10) and 17 685 CHEXA (20) elements. An element quality check found no failed elements, but 31 CTETRA (10) elements with edge point warnings. However, none of these were located in a critical area of the model and could safely be ignored. The created meshes can be seen in figure 7.

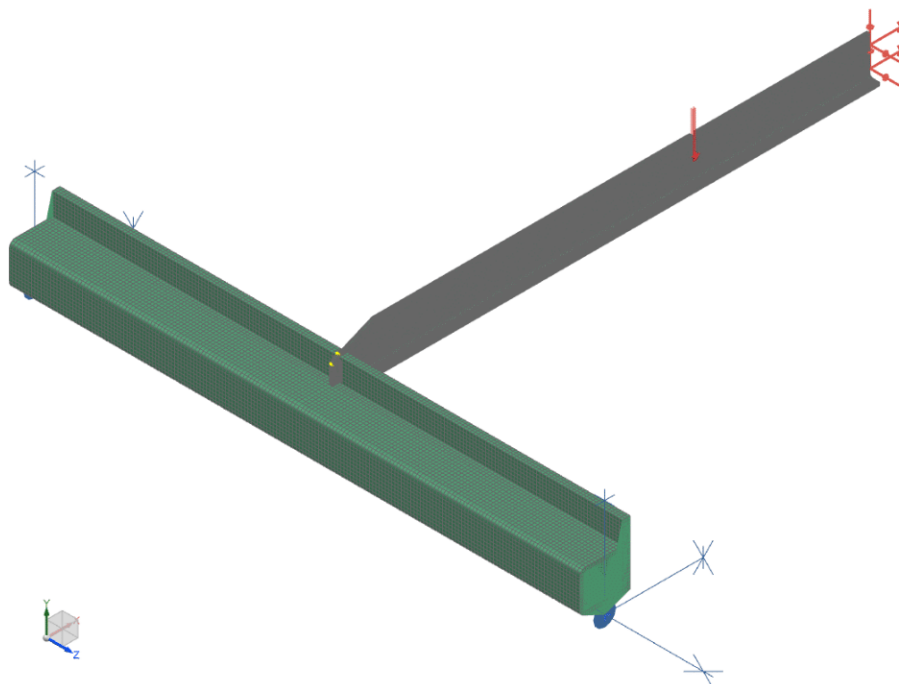


Figure 7. Meshed model with problematic elements marked in yellow.

Results

An overview of the stresses is presented in figure 8.

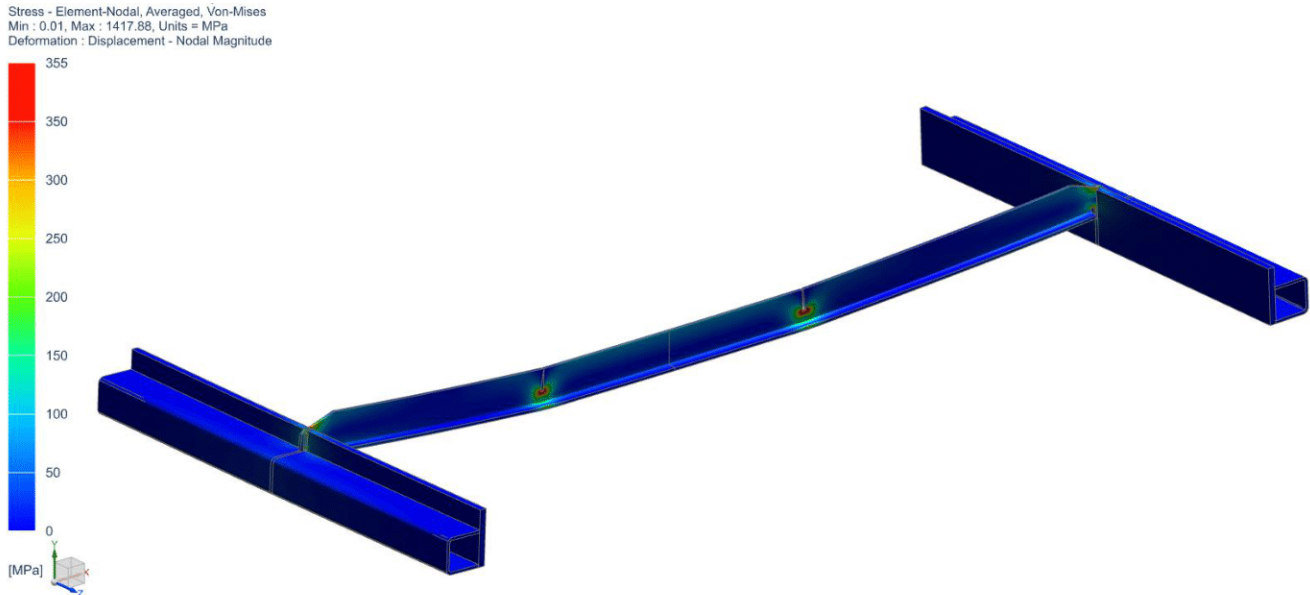


Figure 8. *Mirrored post view showing the averaged Von-Mises stresses in the elements. The maximum stress 1418 MPa is found in the slot for the longitudinal beam as expected.*

In figure 9, stresses above yield point 355 MPa are plotted while everything below is translucent.

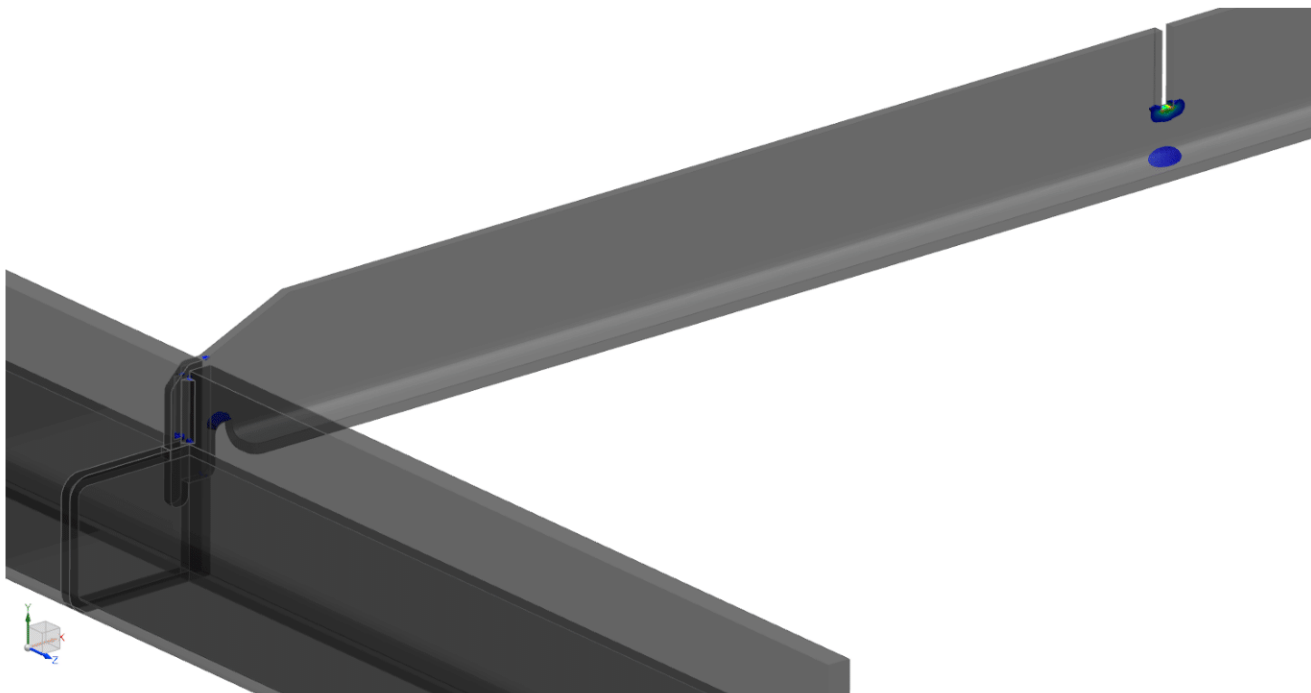


Figure 9. *Translucent post view showing only the averaged Von-Mises-stresses in the elements above the material yield point of 355 MPa.*

An overview of the displacement in the y-axis is presented in figure 10. The bent flange on the transverse beam causes an equally large deflection in the z-axis under load. The magnitude displacement is 8,9 mm.

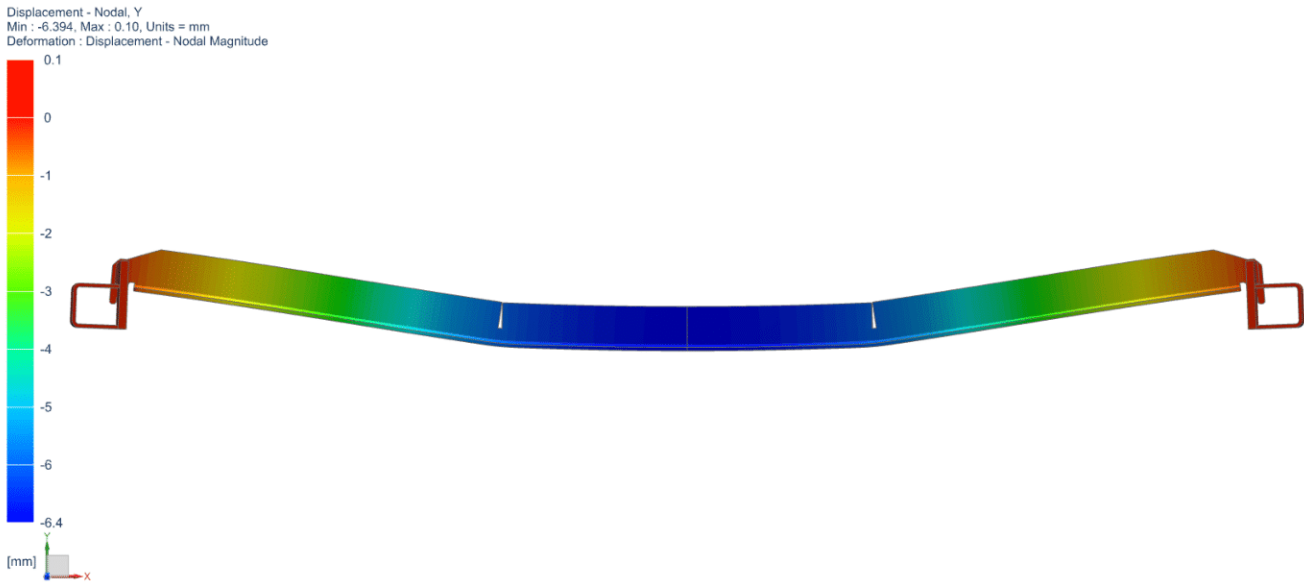


Figure 10. *Mirrored post view showing displacement as 10 % of the model size.*

Summary

The stresses in the critical areas are high. However, the areas exceeding the yield point are small. The transverse beam can still carry load even after yielding begins due to the additional stresses being shifted to the lower strained areas.

In this analysis the slots narrowed 0,4 mm at the top. The slots in the beams are 1 mm wider than the longitudinal beam thickness, meaning if the slots were to contract 1 mm in the top, the load would be transferred via the longitudinal beams, thus increasing the effective area of the transverse beam significantly and preventing failure.

This analysis will be used for comparison of the new replaceable transverse beam concepts.

Dennis Hagräs

25.3.2023

SOL 101 Linear Static Analysis of Replaceable Transverse Beam Concept 1

Description

AAE are designing replaceable transverse beams to ensure that all parts subject to wear from cutting can be exchanged if needed. The strength of the original design has been deemed sufficient and the new replaceable concepts will therefore only be compared to the original transverse beam.

The transverse beam concept presented in figure 1 has the same overall design as the original but is locked into place with locking plates on the outside of the long side beam plate instead of welds. The locking plates are tightened up against the treaded beam plate with two M8 bolts.

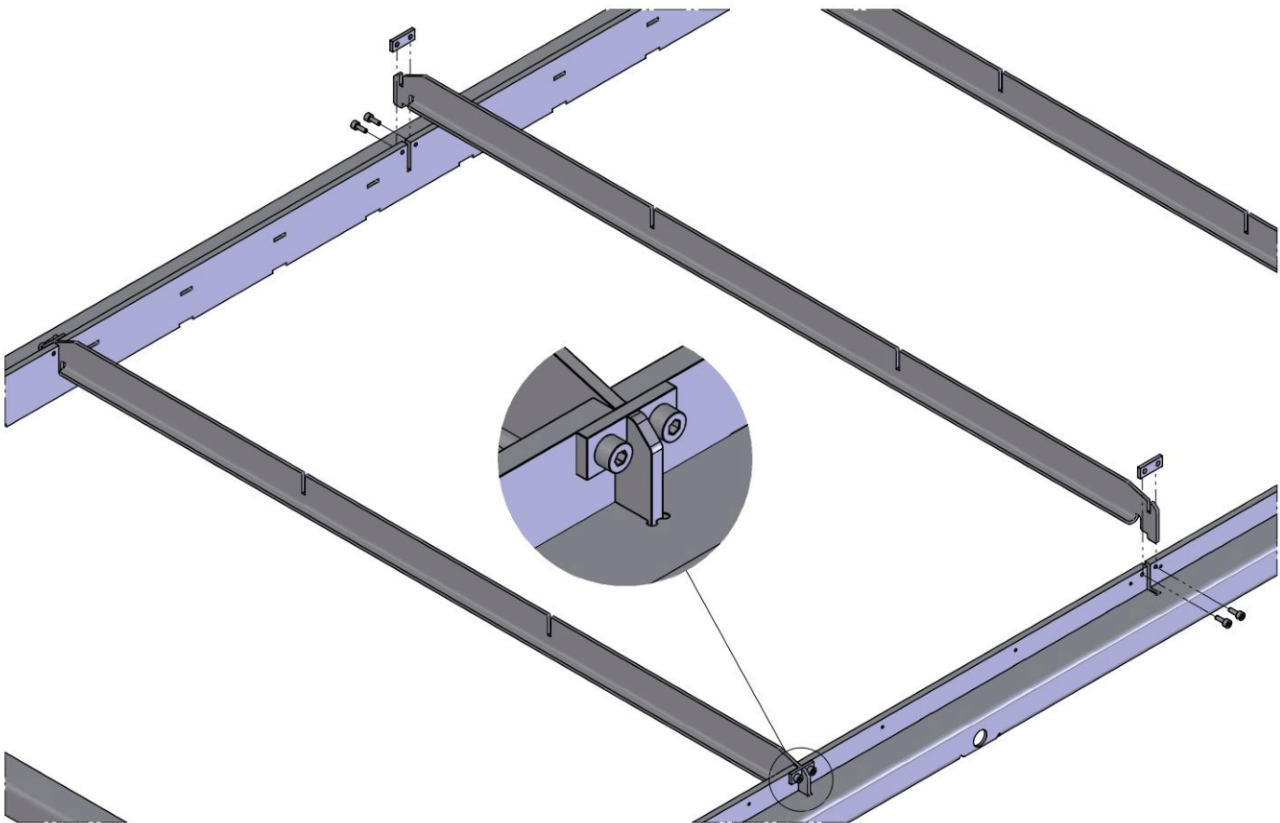


Figure 1. *Replaceable transverse beam design concept 1.*

The purpose of this analysis was to analyze the strength of the concept presented. For additional information, see the report for the original design analysis.

Model

The model was prepared in a similar fashion to the original design analysis. There was no reason to simulate the bolt connection between the locking plate and the long side beam plate, since they will be tightened against each other. The holes and bolts were therefore removed from the model. The idealized model can be seen in figure 2.

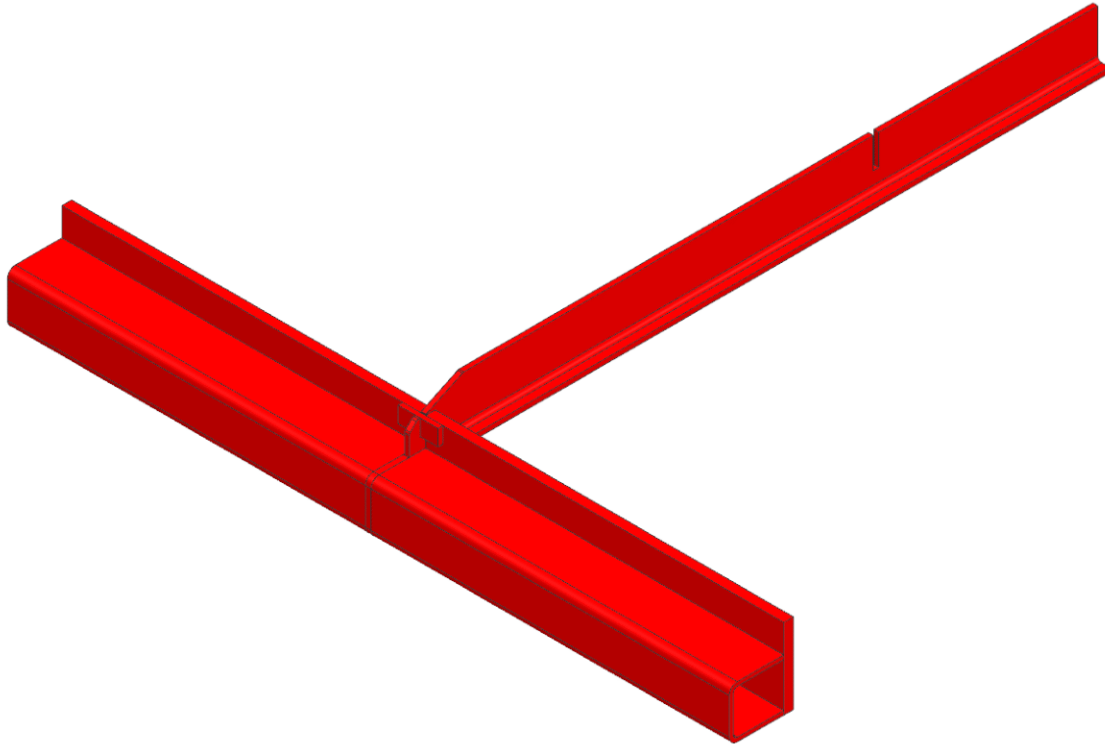


Figure 2. *Idealized model used in analysis.*

Material

All parts in the model are made of structural steel with an elastic modulus of 207 GPa and a minimum guaranteed yield point of 355 MPa. Equivalent material data was used for the analysis.

Contacts

The locking plate was glued to the long side beam plate. Surface to Surface-contact was applied between all other opposing surfaces.

Constraints

The contact points for the wheels were modeled the same way as for the original design analysis. The model was constrained in the defined contact points for the wheels. One point was constrained in all three translative degrees of freedom, while the other was left free in the wheels' rolling direction (z-axis in the model). The symmetry of the model was defined using the Symmetric Constraint.

Load

The dimensioning load 1100 N calculated for the original design analysis was applied as a geometrically distributed downward force in the bottom of the longitudinal beam slot. Figure 4 shows the applied load as well as the constraints.

Mesh

The parts of the long side and longitudinal beam were meshed using CHEXA (20) hexahedral elements with a size of 5 mm. The transverse beam was meshed using CTETRA (10) tetrahedral elements with a size of 2,5 mm due to its more complex shape. The model analyzed consisted of 131 425 CTETRA (10) and 17 982 CHEXA (20) elements. An element quality check found no failed elements, but 38 CTETRA (10) elements with edge point warnings. However, none of these were located in a critical area of the model and could safely be ignored. The created meshes can be seen in figure 4.

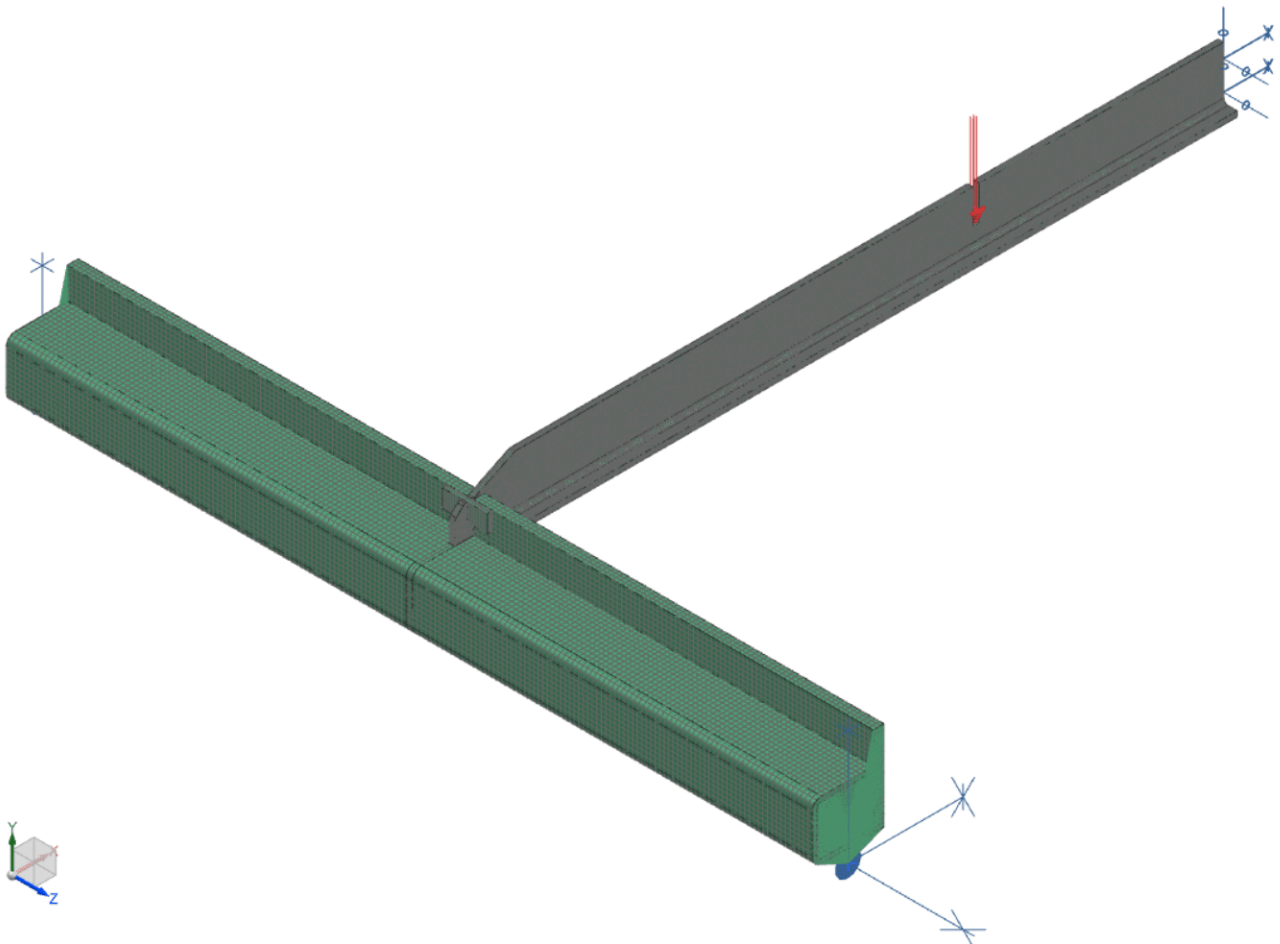


Figure 4. Meshed model with the applied load and constraints.

Results

An overview of the stresses is presented in figure 5.

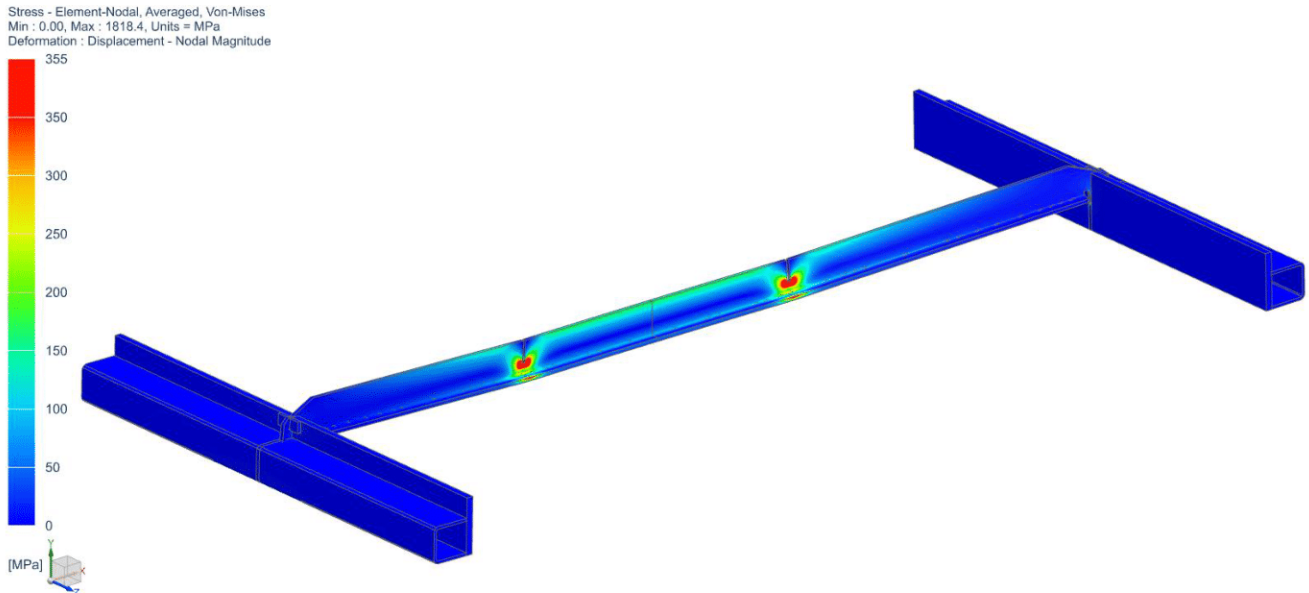


Figure 5. *Mirrored post view showing the averaged Von-Mises stresses in the elements. The maximum stress 1818 MPa is found in the slots for the longitudinal beams.*

In figure 6, stresses above 355 MPa are plotted while everything below is translucent.

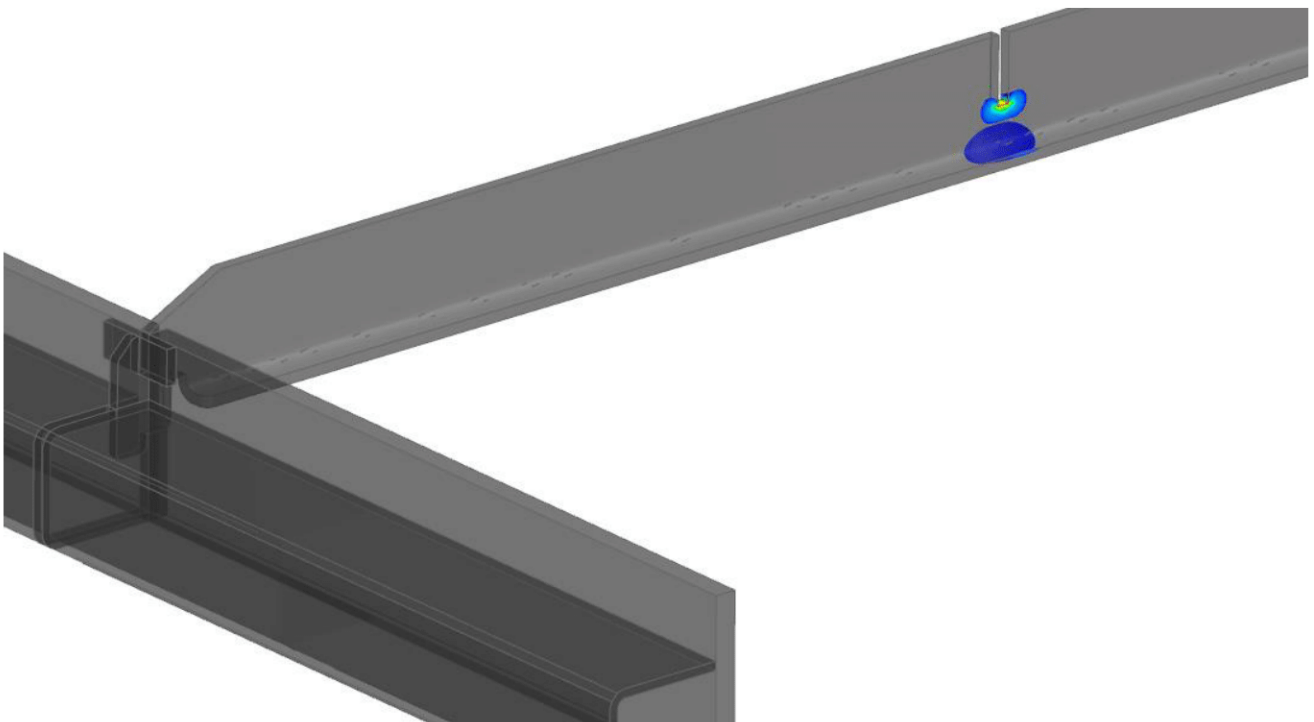


Figure 6. *Translucent post view showing only the averaged Von-Mises-stresses in the elements above the material yield point of 355 MPa.*



An overview of the displacement in the y-axis (down) is presented in figure 7. The bent flange on the transverse beam causes an even larger displacement in the z-axis under load (19,0 mm). The magnitude displacement is 22,6 mm.

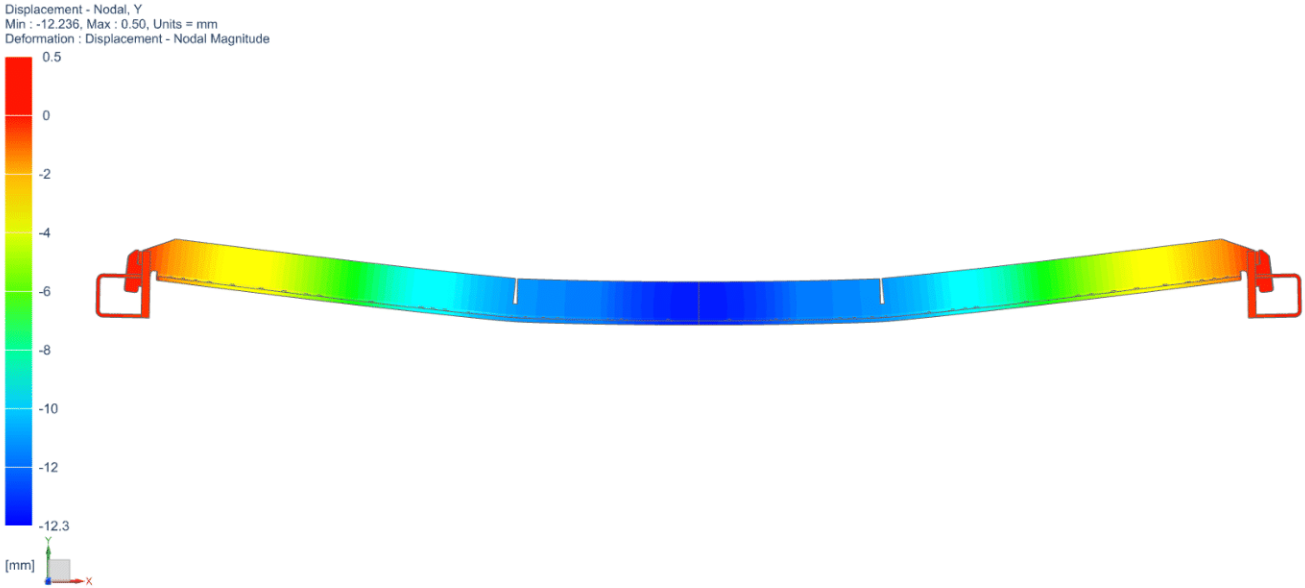


Figure 7. Mirrored post view showing displacement as 10 % of the model size.

Another analysis was performed with the outwards facing locking plate side glued to the transverse beam slot surface. In the analysis the stresses were more favorably distributed between the longitudinal beam slots and the attachment area than previously. A section presenting the stresses can be seen in figure 8.

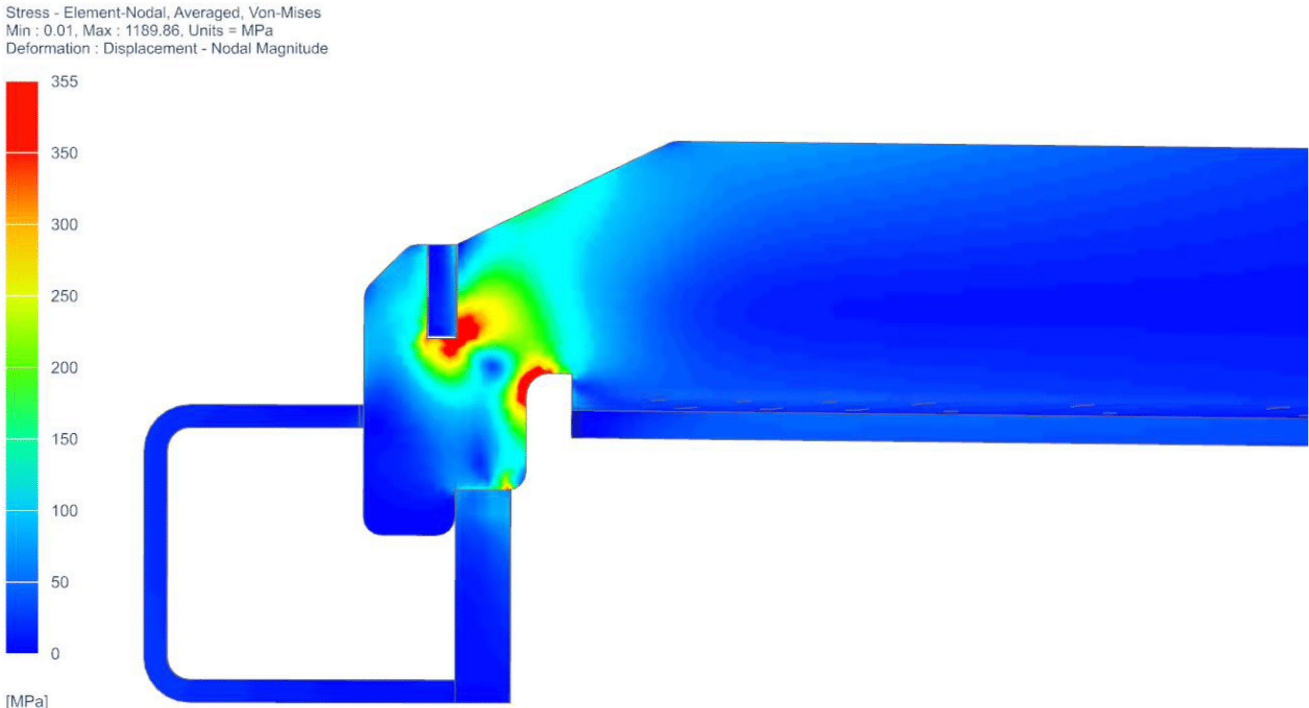


Figure 8. Sectioned post view showing stresses in the transverse beam attaching area.

Summary

Stress levels in the longitudinal beam slots are very high. This is due to the necessary gap in between the locking plates and their slots in the transverse beam. Even a gap 0,5 mm wider than the locking plate thickness (6 mm) allows for too much displacement before the joint starts to pick up any moment.

The second analysis confirmed that welding the locking plates to the transverse beam strengthens the model considerably, lowering the maximum stress from 1818 to 1190 MPa and y-axis displacement from 12,2 to 6,8 mm. To lower the displacement and maximum stresses further the locking plates would need to be wider, probably as wide as the original welds (35 mm) to get a beam as stiff as the original. At that point, the locking plate slots in the transverse beam would weaken it in the most stressed area pictured in figure 8.

This concept is weaker than the original transverse beam and will not be evaluated further.

Dennis Hagräs

25.3.2023

SOL 101 Linear Static Analysis of Replaceable Transverse Beam Concept 2

Description

AAE are designing replaceable transverse beams to ensure that all parts subject to wear from cutting can be exchanged if needed. The strength of the original design has been deemed sufficient and the new replaceable concepts will therefore only be compared to the original transverse beam.

The transverse beam concept presented in figure 1 is dropped down in the slot in long side beam, similar to the original design. The beam is locked into position with additional locking plates that run through the beam. Hexagonal M8 bolts are mounted through the long side beam plates into threaded holes the locking plates. Tightening the bolts brings the long sides into contact with the bent flange, keeping the long side beams parallel. The bend angle has been reduced from 90° to 70° in order to reduce the slag buildup rate that was an issue with the original design.

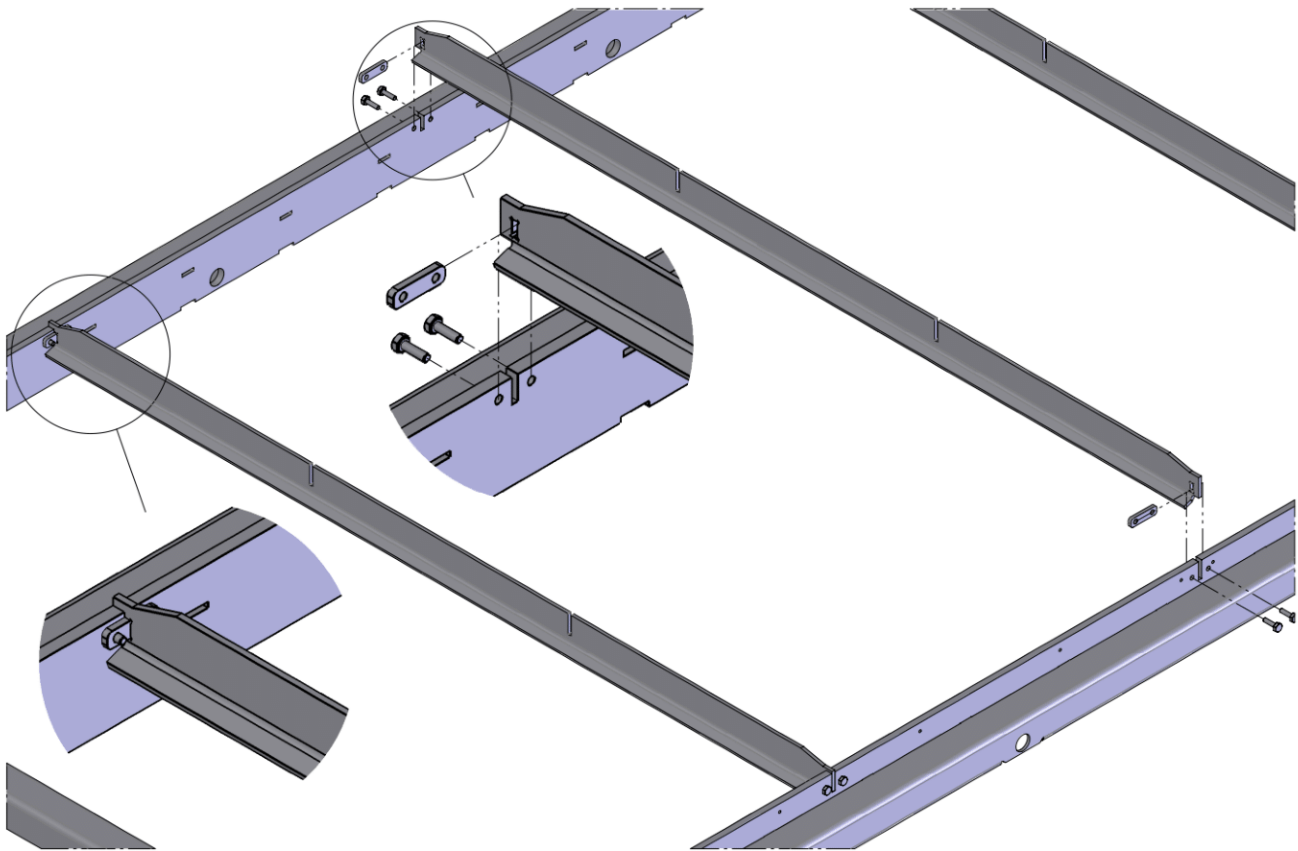


Figure 1. Replaceable transverse beam design concept 2.

The purpose of this analysis was to analyze the strength of the concept presented. For additional information, see the report for the original design analysis.

Model

The model was prepared in a similar fashion to the original design analysis. The beam section was idealized by removing tabs and holes that weren't of interest in this study. The bolts were excluded from the model. The idealized model can be seen in figure 2.

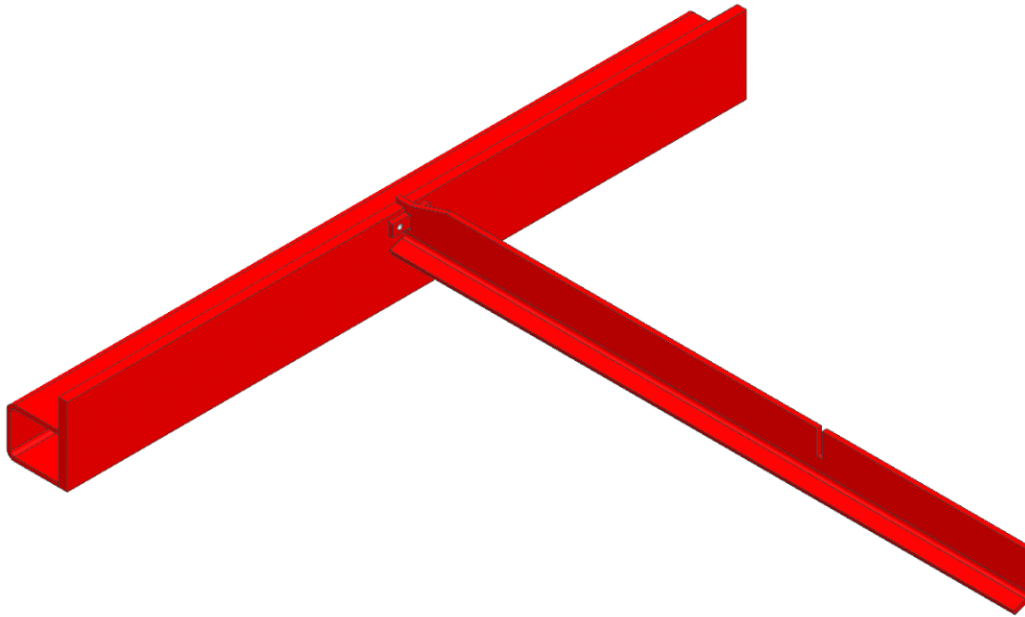


Figure 2. *Idealized model used in analysis.*

Material

All parts in the model are made of structural steel with an elastic modulus of 207 GPa and a minimum guaranteed yield point of 355 MPa. Equivalent material data was used for the analysis.

Contacts

Surface to Surface-contact was applied between all opposing surfaces.

Constraints

The contact points for the wheels were modeled the same way as for the original design analysis. The model was constrained in the defined contact points for the wheels. One point was constrained in all three translative degrees of freedom, while the other was left free in the rolling direction of the wheels (z-axis in the model). The symmetry of the model was defined using the Symmetric Constraint.

The bolts locking the transverse beam in place were modeled as 1D bar elements connected via spiders to the area under the bolt head and screwed through the locking plate. The cross-sectional areas of the bar elements were defined as the nominal stress area of a M8 bolt (36,6 mm²).

Load

The dimensioning load 1100 N calculated for the original design analysis was applied as a geometrically distributed downward force in the bottom of the longitudinal beam slot. Figure 4 shows the applied load as well as the constraints.

Mesh

The parts of the long side and longitudinal beam were meshed using CHEXA (20) hexahedral elements with a size of 5 mm. The transverse beam was meshed using CTETRA (10) tetrahedral elements with a size of 3 mm due to its more complex shape. The locking plate was meshed using CHEXA (20) elements with a size of 3 mm to get two elements over its thickness. The model analyzed consisted of 93 161 CTETRA (10) and 19 029 CHEXA (20) elements. An element quality check found no failed elements, but 35 CTETRA (10) and 54 CHEXA (20) elements with warnings. None of these were located in a critical area of the model and could safely be ignored. The created meshes can be seen in figure 4.

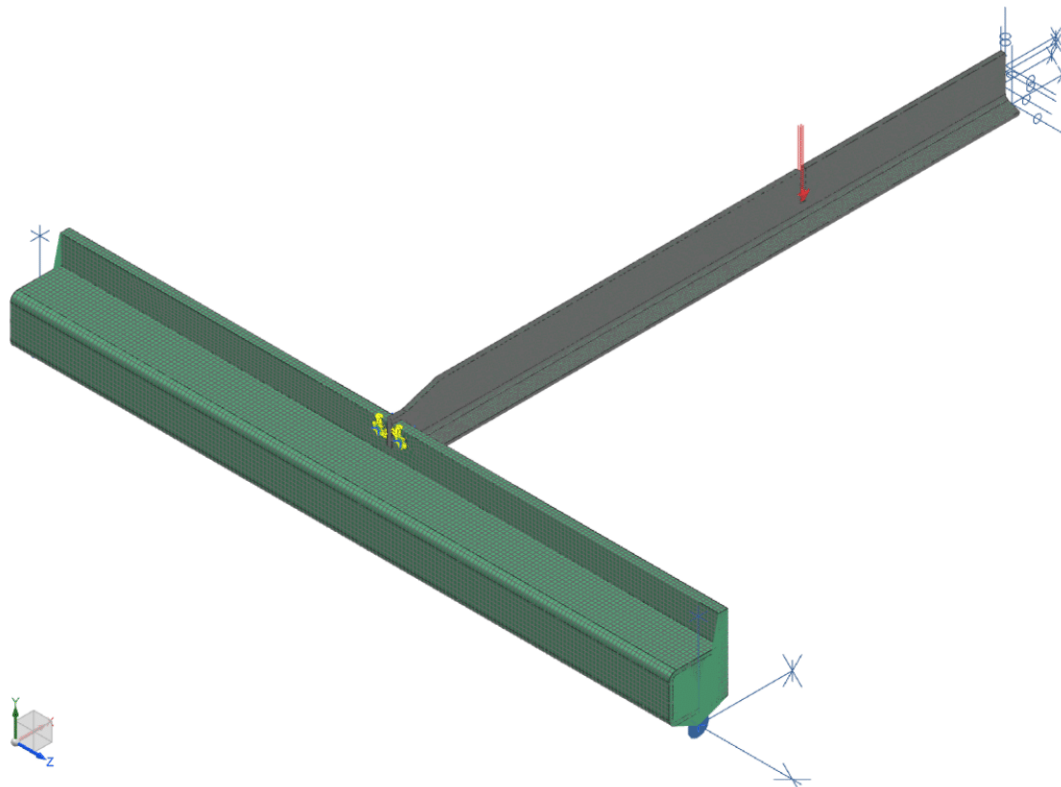


Figure 4. Meshed model with applied load and constraints. The problematic CHEXA (20) elements are located around the bolt holes, an area that won't see any considerable amount of stress during load.

Results

An overview of the stresses is presented in figure 5.

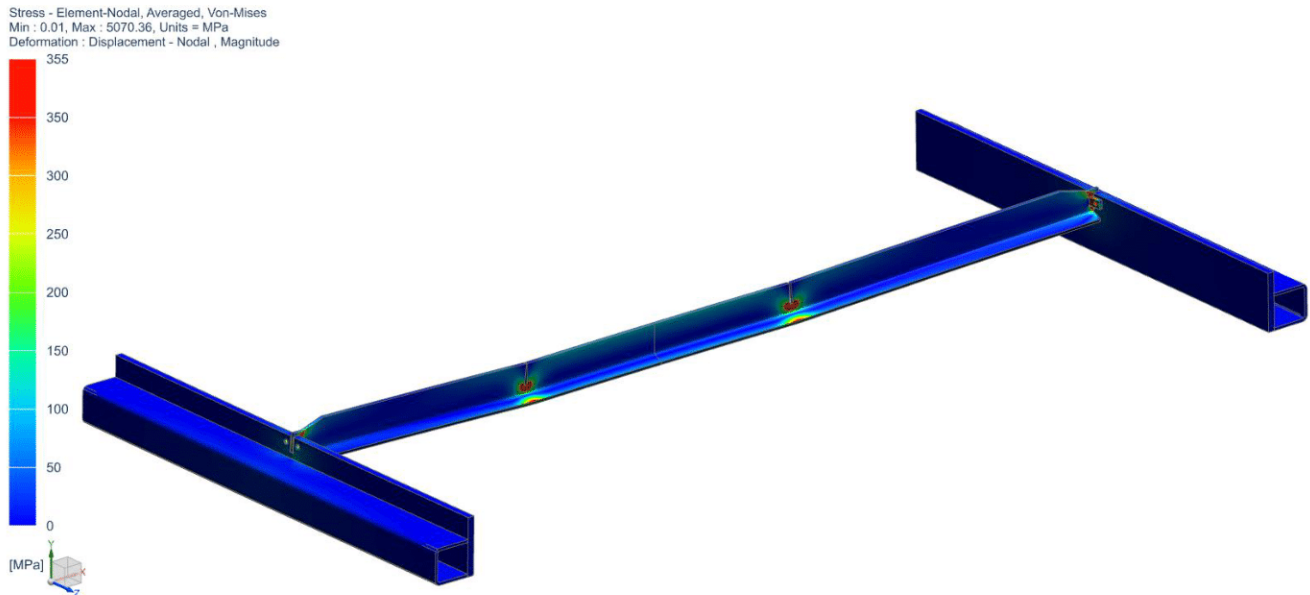


Figure 5. *Mirrored post view showing the averaged Von-Mises stresses in the elements. The maximum nodal stress 5070 MPa (elemental 2640 MPa) is found in the contact point between flange and long side beam plate.*

In figure 6, stresses above 355 MPa are plotted while everything below is translucent.

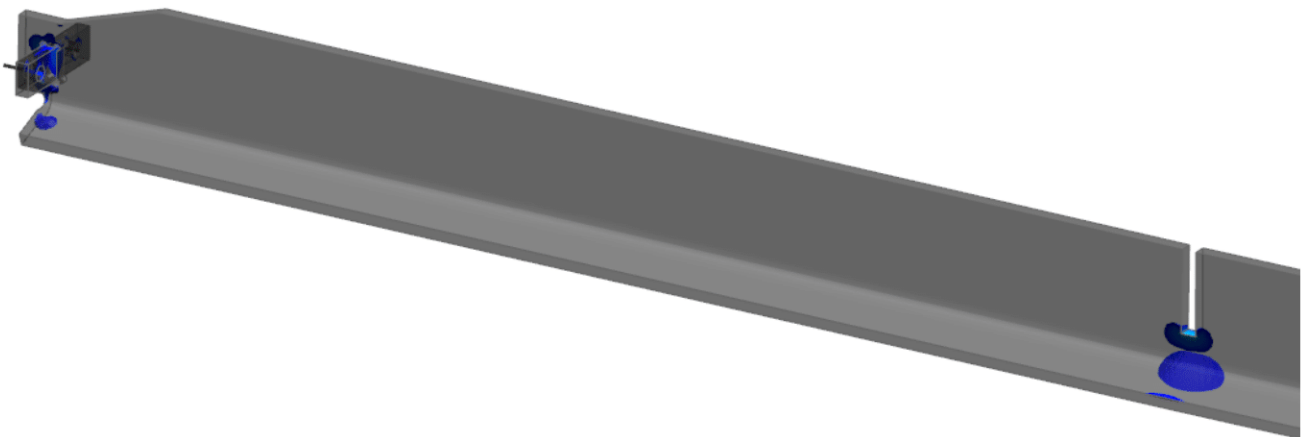


Figure 6. *Translucent post view showing only the averaged Von-Mises-stresses in the elements above the material yield point of 355 MPa. The long side beam has been removed for better visibility.*

An overview of the displacement in y-axis (down) is presented in figure 7. The bent flange on the transverse beam causes an even larger displacement in the z-axis under load, pictured in figure 8. The magnitude displacement is 17,4 mm.

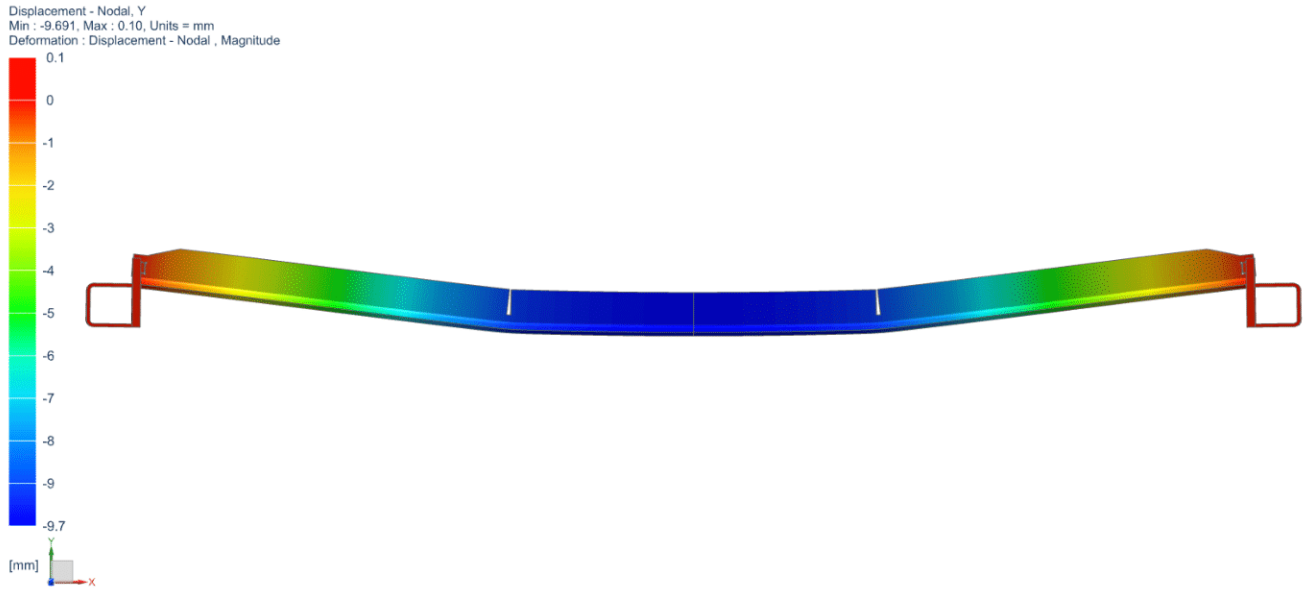


Figure 7. Mirrored post view showing y displacements as 10 % of the model size.

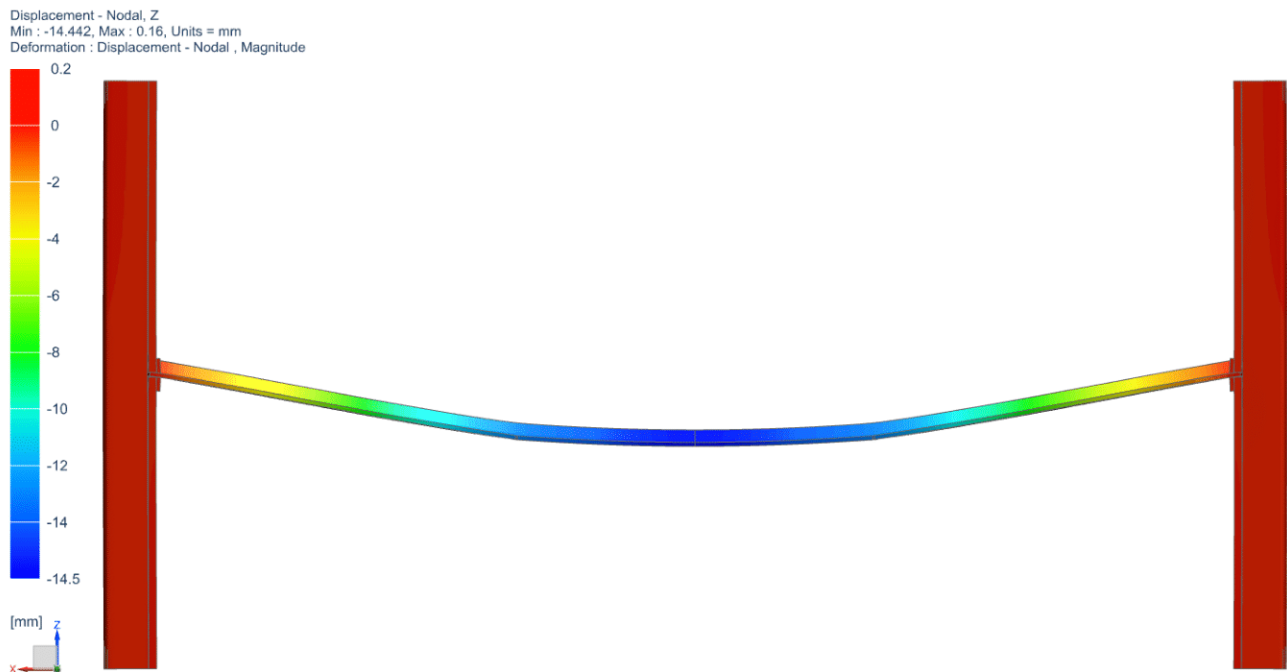


Figure 8. Mirrored post view showing z displacements as 10 % of the model size.



Summary

The stress levels in the attaching area and longitudinal beam slots are very high. The contact points between the transverse beam flange and long side beam plate are relatively small, and such a high stress would result in the contacting material deforming until a bigger area able to support the load is achieved. This could increase the displacement even further. The maximum axial stresses in the bolts were 219 MPa, which is relatively high compared to the other concepts.

The displacement in y-axis was 9,7 mm, which is greater than for the original transverse beam. The asymmetric displacement results in an uneven loading of the locking plate slot in the transverse beam, with only one edge of the slot left to bear all the load. The slot would probably deform until an equilibrium is reached, resulting in an even greater displacement.

The concept is neither stronger nor stiffer than the original design and will not be evaluated further.

Dennis Hagroås

26.3.2023

SOL 101 Linear Static Analysis of Replaceable Transverse Beam Concept 3

Description

AAE are designing replaceable transverse beams to ensure that all parts subject to wear from cutting can be exchanged if needed. The strength of the original design has been deemed sufficient and the new replaceable concepts will therefore only be compared to the original transverse beam.

The transverse beam concept presented in figure 1 aims to eliminate the stress concentration problem around the longitudinal beam slots with additional side plates mounted on both sides of the main beam plate. Furthermore, the side plates eliminate the need for a bent flange on the transverse beam, which resulted in bending around a non-horizontal principal axis.

The whole assembly is dropped down in the slot in long side beam, similar to the original design. The beam is locked into position with additional locking plates that run through the beam. Hexagonal M8 bolts are mounted through the locking plates into threaded holes the long side beam, thus keeping the long side beams parallel.

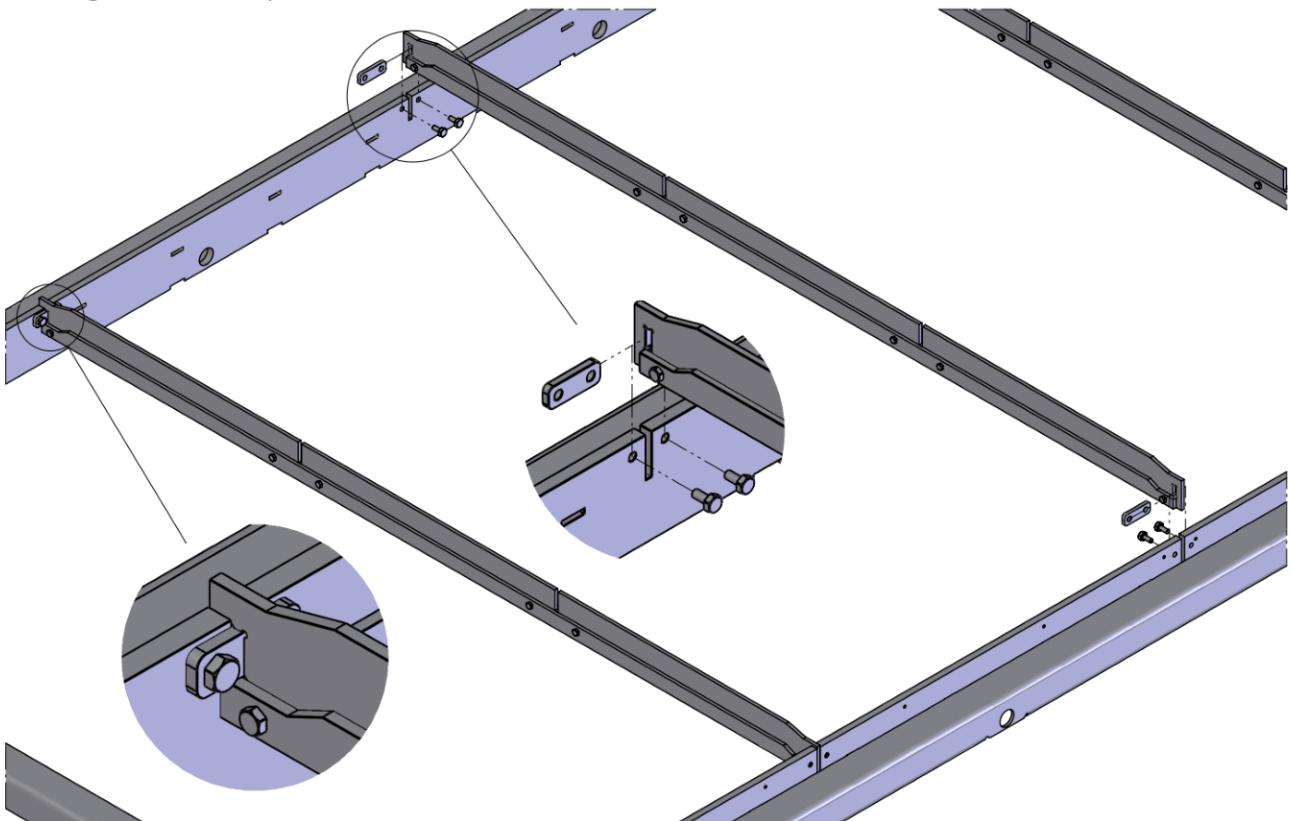


Figure 1. Replaceable transverse beam design concept 3.

The purpose of this analysis was to analyze the strength of the concept presented. For additional information, see the report for the original design analysis.

Model

The model was prepared in a similar fashion to the original design analysis. The beam section was idealized by removing tabs and holes that weren't of interest in this study. The bolts were excluded from the model. A section of the longitudinal beam was imported so that the load could be accurately distributed over the beam assembly.

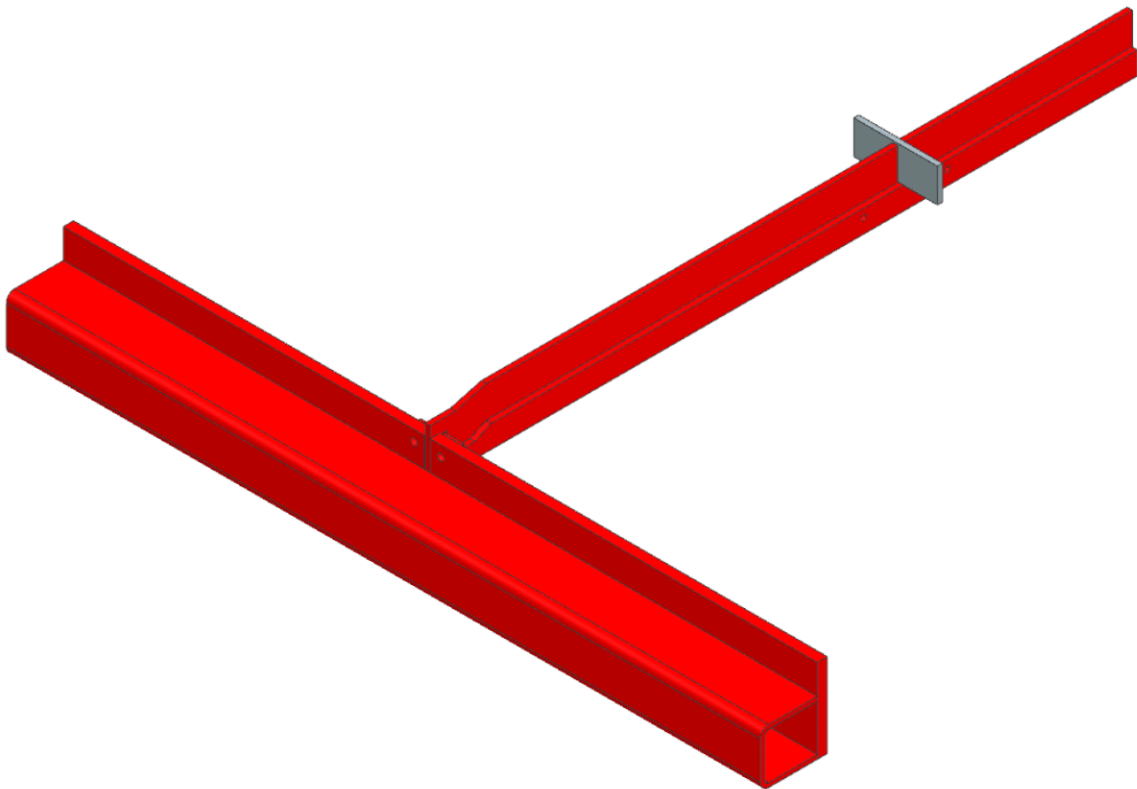


Figure 2. *Idealized model used in analysis.*

Material

All parts in the model are made of structural steel with an elastic modulus of 207 GPa and a minimum guaranteed yield point of 355 MPa. Equivalent material data was used for the analysis.

Contacts

Surface to Surface-contact was applied between all opposing surfaces, except between the beam assembly parts themselves and the slot for the longitudinal beam. The slots are 1 mm wider than the longitudinal beam, meaning that if the transverse beam were to deflect so much that the slot narrowed 1 mm at the top, the load would be transferred via the longitudinal beams, thus increasing the effective area of the transverse beam significantly and preventing failure. To make sure the worst-case scenario was analyzed, contact between the longitudinal beam and slot sides were omitted.

Constraints

The contact points for the wheels were modeled the same way as for the original design analysis. The model was constrained in nodes in the defined contact points for the wheels. One node was constrained in all three translative degrees of freedom, while the other was left free in the rolling direction of the wheels (z-axis in the model). The ends of the longitudinal beam were constrained in the x- and z-axis. The symmetry of the model was defined using the Symmetric Constraint.

The bolts locking the transverse beam in place were modeled as 1D bar elements connected via spiders to the area under the bolt head and 10 mm deep into the long side beam plate. The cross-sectional areas of the bar elements were defined as the nominal stress area of a M8 bolt (36,6 mm²).

The six (three in half-model) bolts connecting the three parts of the transverse beam were modeled as couplings to allow rotation between the parts. This was achieved by connecting the bolt hole faces to central nodes in the middle of the hole with spiders. The couplings were constrained in all degrees of freedom except rotation around the z-axis.

The 1D-elements representing the bolts can be seen in figure 3.

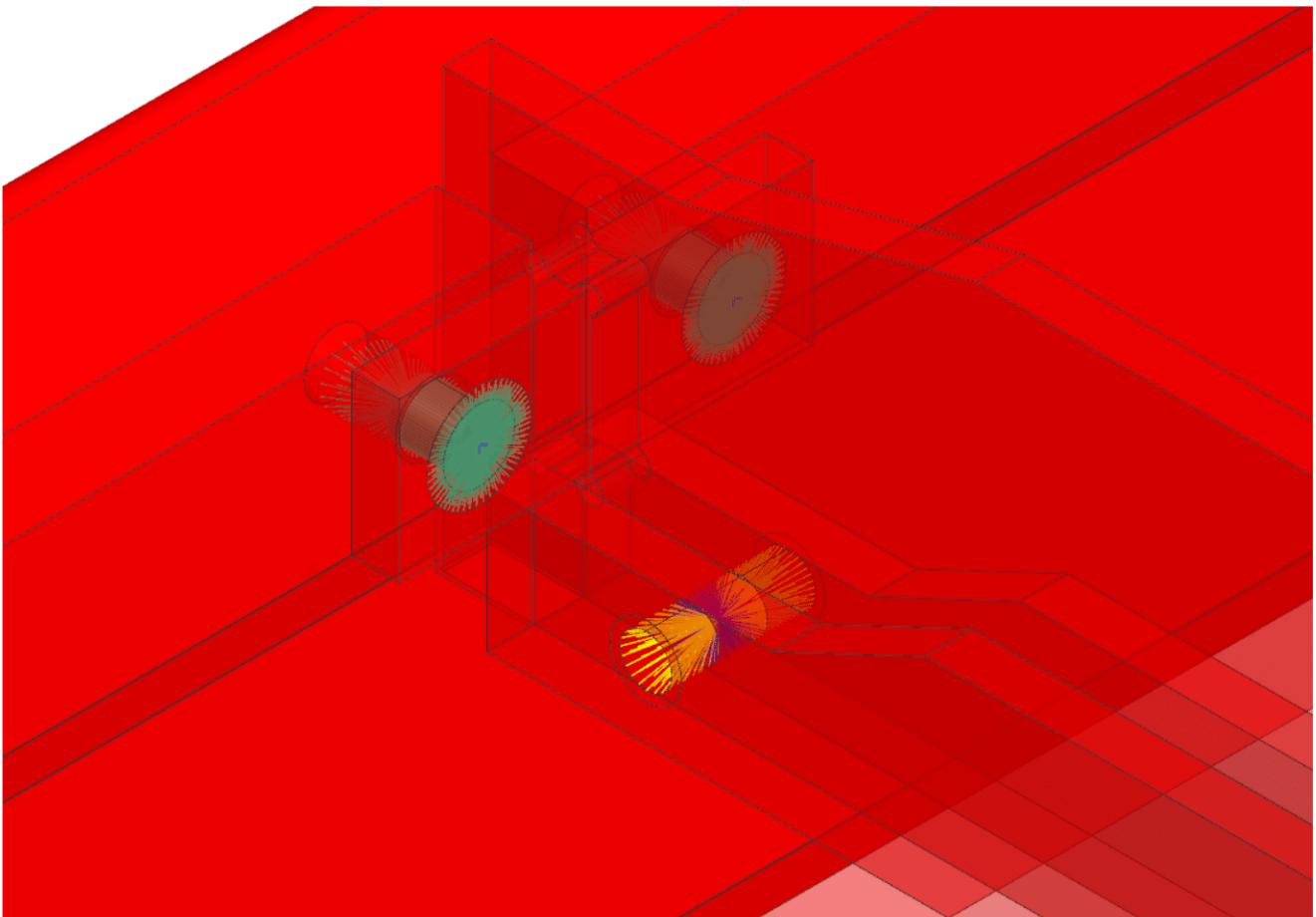


Figure 3. Overview of the 1D-elements representing the bolts in the concept.

Load

The dimensioning load 1100 N calculated for the original design analysis was applied as a geometrically distributed downward force on the top surface of the longitudinal beam. Figure 4 shows the applied load as well as the constraints.

Mesh

The parts of the long side beam were meshed using CHEXA (20) hexahedral elements with a size of 5 mm. The transverse and longitudinal beams were meshed using the same element type but with a size of 3 mm to get a more accurate solution and two elements over the part thickness. The model consisted of 96 679 elements. An element quality check found no failed elements or warnings. The created meshes can be seen in figure 4.

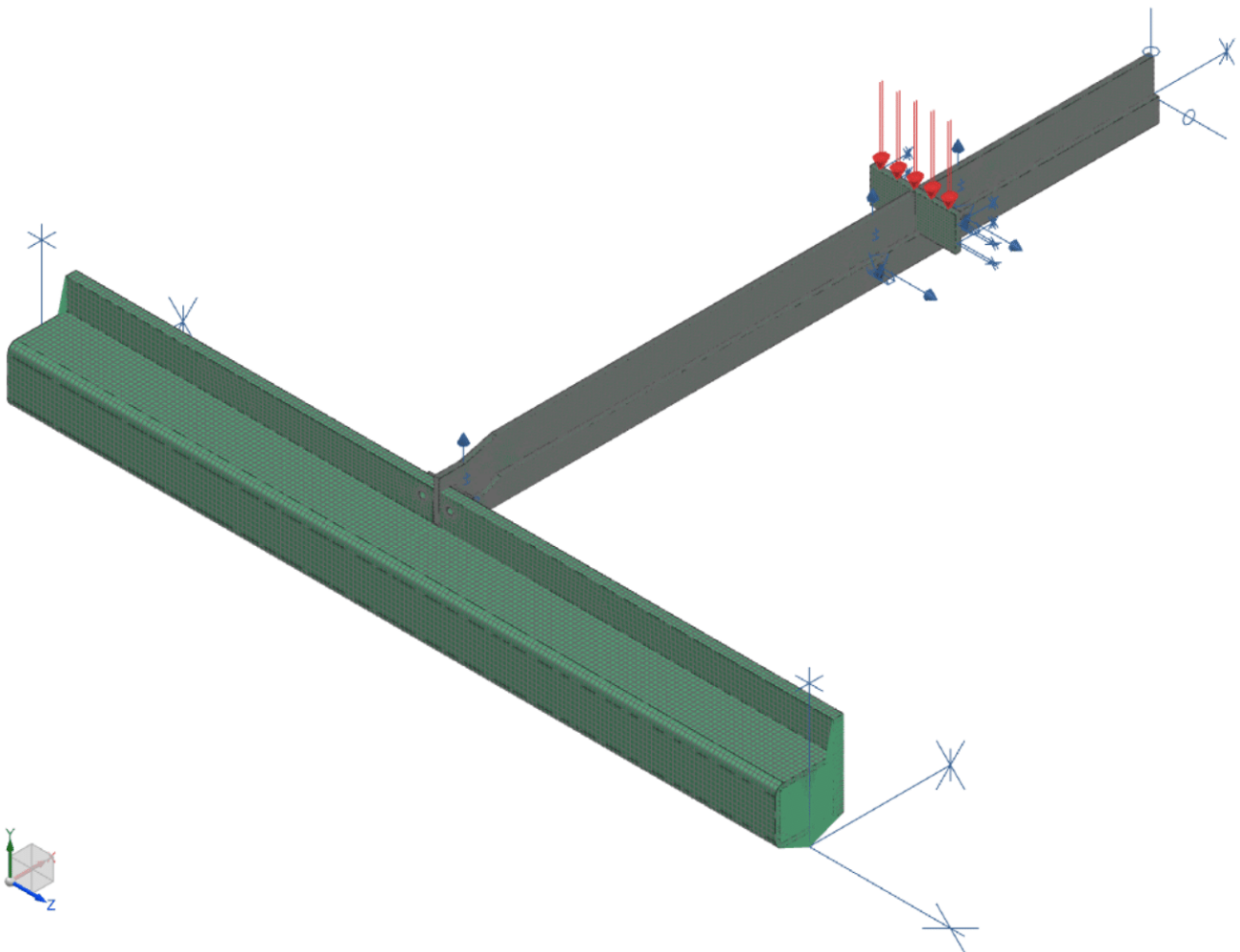


Figure 4. Meshed model with applied load and constraints.

Results

An overview of the stresses is presented in figure 5.

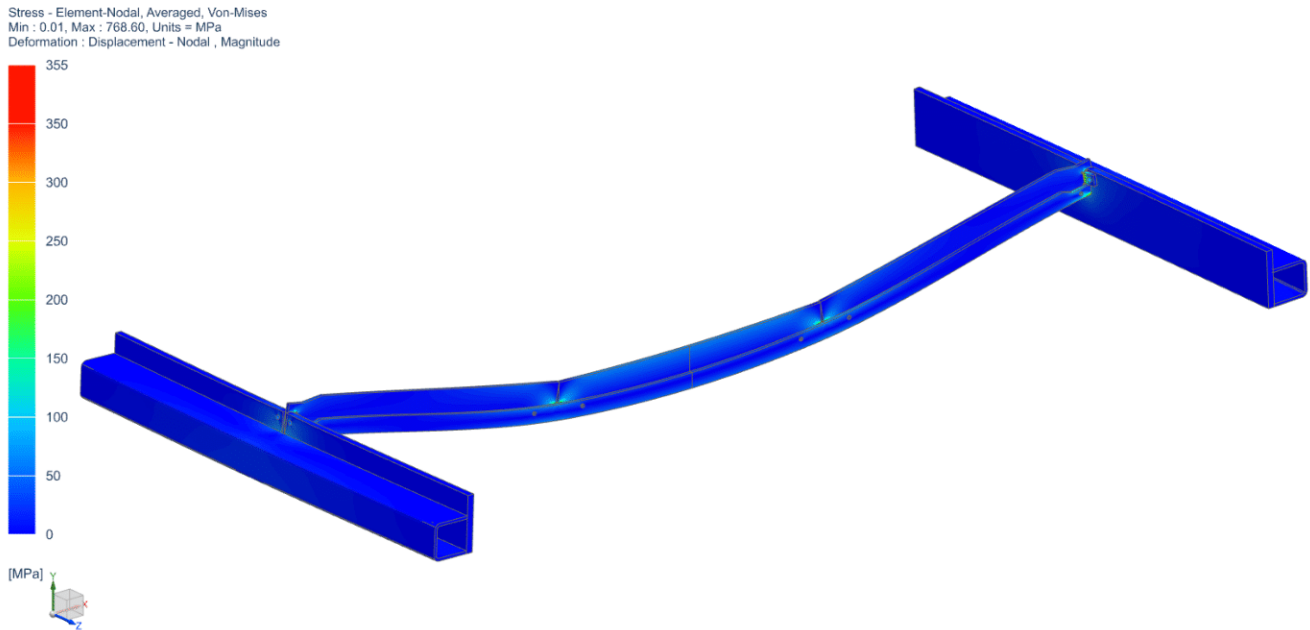


Figure 5. *Mirrored post view showing the averaged Von-Mises stresses in the elements. The maximum stress 769 MPa is found in the slot for the longitudinal beam.*

In figure 6, stresses above 355 MPa are plotted while everything below is translucent.

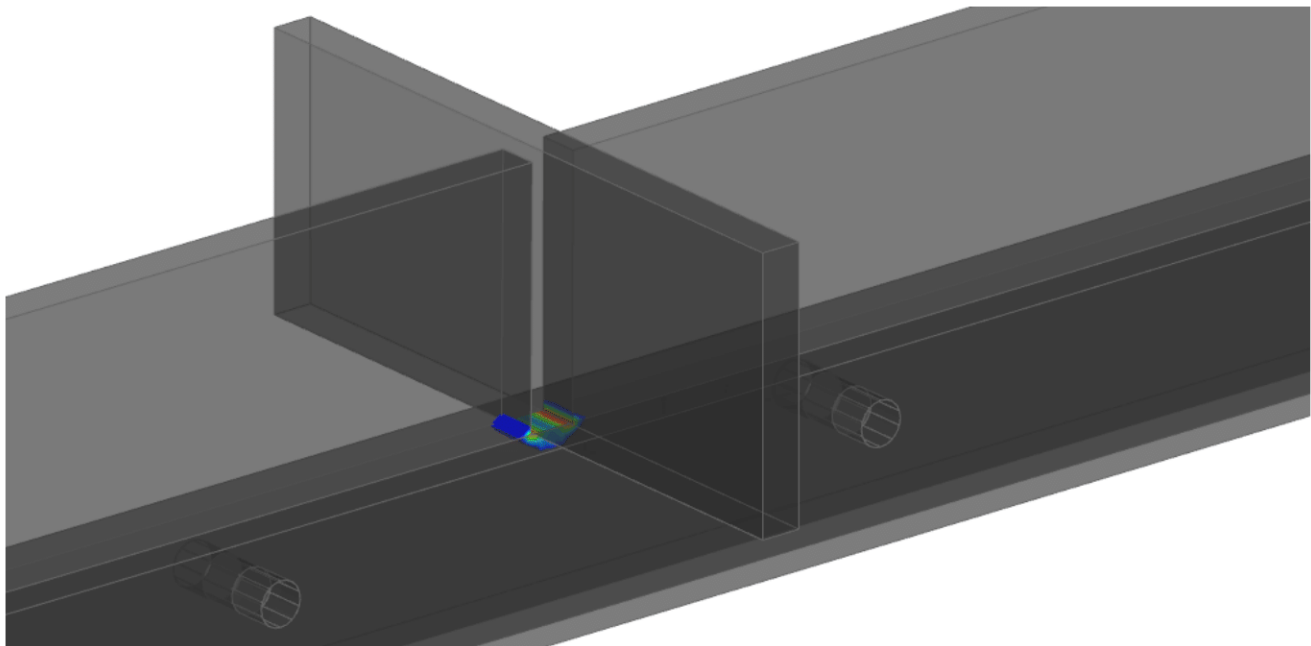


Figure 6. *Translucent post view showing only the averaged Von-Mises-stresses in the elements above the material yield point of 355 MPa.*

An overview of the deflection in y-axis (down) is presented in figure 7.

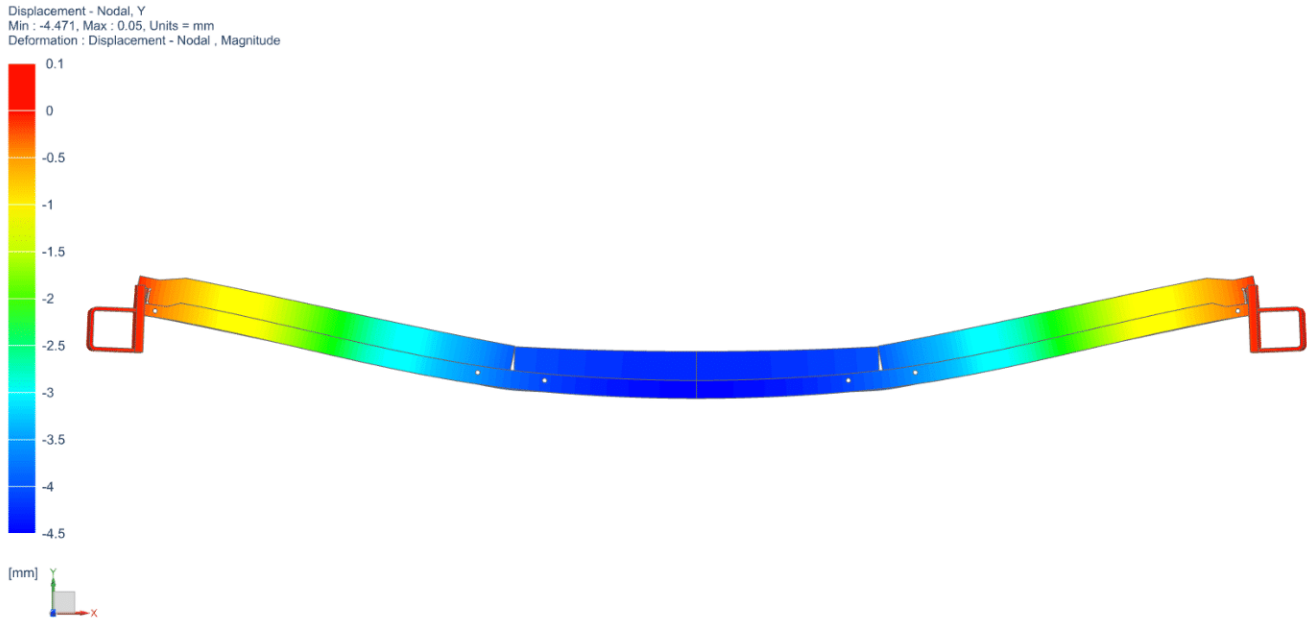


Figure 7. *Mirrored post view showing deflection as 10 % of the model size.*

Summary

The model behaves as expected. The highest stresses are found in the longitudinal beam slot. The volume exceeding the material yield point of 355 MPa is very small, which means that it won't influence the overall beam strength.

The highest axial stresses in the locking bolts are 90 MPa and the stresses in the locking region are well below the material yield point, meaning the transverse beam concept is stronger than the original design and therefore acceptable from a strength perspective.

The displacement 4,5 mm is lower than for the original design (6,4 mm), meaning the design is stiffer and stronger than the original design.

Dennis Hagroås

27.3.2023

SOL 101 Linear Static Analysis of Replaceable Transverse Beam Concept 4

Description

AAE are designing replaceable transverse beams to ensure that all parts subject to wear from cutting can be exchanged if needed. The strength of the original design has been deemed sufficient and the new replaceable concepts will therefore only be compared to the original transverse beam.

The transverse beam concept presented in figure 1 attempts to eliminate the need for separate locking plates by adding a flange at the end of the side bars introduced in concept 3. Due to space limitations (Sheet Reference Stops mounted on LST variant of shuttle tables), there can only be one flange per side. The whole assembly is dropped down in the slot in long side beam, similar to the original design. The beam is locked into position with hexagonal M8 bolts running through the long side beam plate and flange. The bolt connection is tightened using lock nuts, keeping the long side beams parallel.

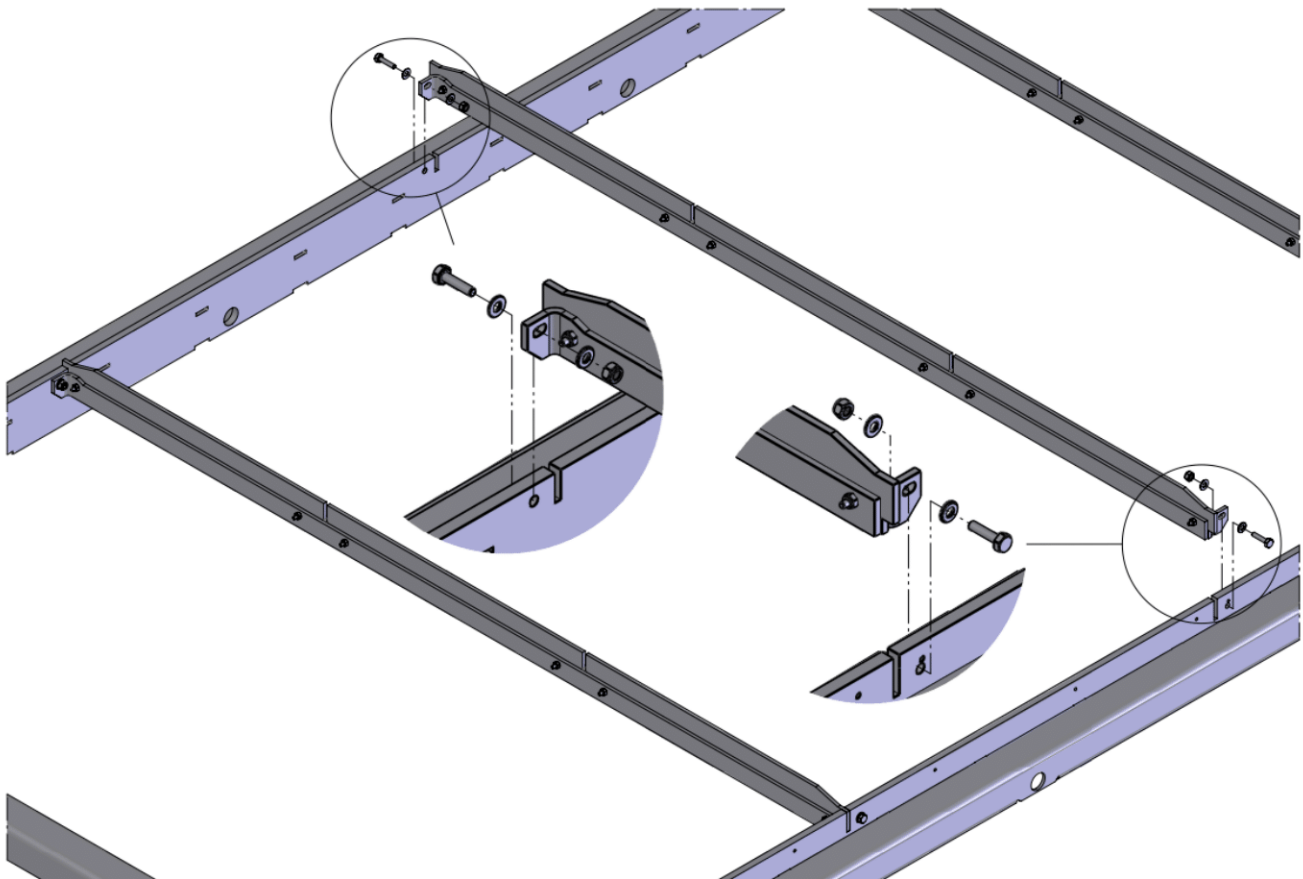


Figure 1. Replaceable transverse beam design concept 4.

The purpose of this analysis was to analyze the strength of the concept presented. For additional information, see the report for the original design analysis.

Model

The whole transverse beam was included in the model (figure 2) since the attachment points of the concept weren't symmetrical. The beam sections were idealized by removing tabs and holes that weren't of interest in this study. All bolts were excluded from the model. A section of the longitudinal beams were imported so that the load could be accurately distributed over the beam assembly. The idealized model is presented in figure 3.

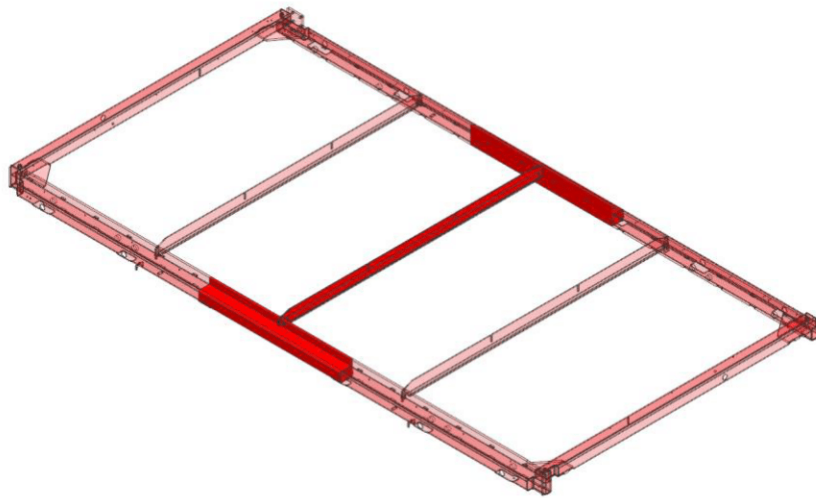


Figure 2. Analyzed model marked opaque.

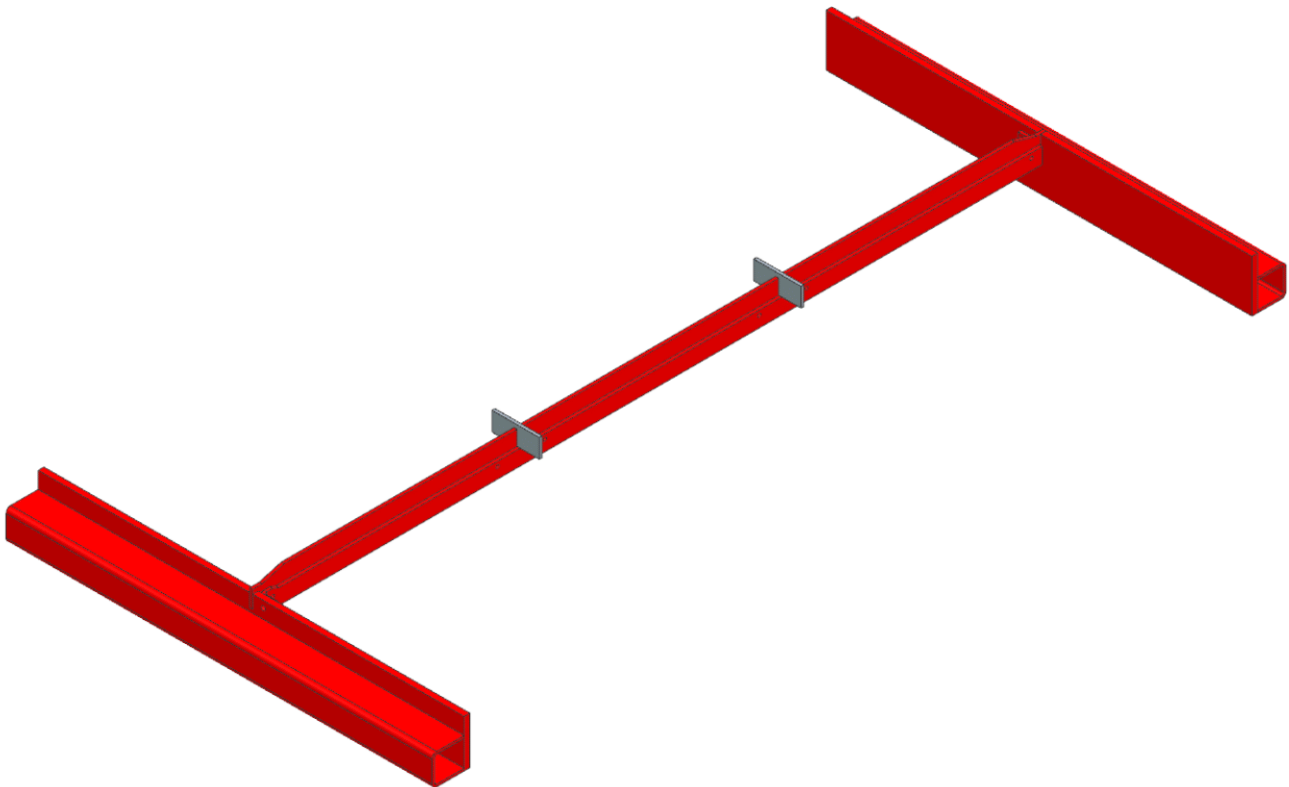


Figure 3. Idealized model used in analysis.

Material

All parts in the model are made of structural steel with an elastic modulus of 207 GPa and a minimum guaranteed yield point of 355 MPa. Equivalent material data was used for the analysis.

Contacts

Surface to Surface-contact was applied between all opposing surfaces, except between the beam assembly parts themselves and the slot sides for the longitudinal beams. The slots are 1 mm wider than the longitudinal beam, meaning that if the transverse beam were to deflect so much that the slot narrowed 1 mm at the top, the load would be transferred via the longitudinal beams, thus increasing the effective area of the transverse beam significantly and preventing failure. To make sure the worst-case scenario was analyzed, contact between the longitudinal beams and slot sides were omitted.

Contact was not defined between the long side beam plates and flanges either, since contact between these can't be guaranteed (main plate in transverse beam sets the distance between long side beams).

Constraints

The contact points for the wheels were modeled the same way as for the original design analysis. The model was constrained in the defined contact points for the wheels. One point was constrained in all three translative degrees of freedom, while the other was left free in the rolling direction of the wheels (z-axis in the model). The constraints were mirrored to the other side beam to mimic the behavior of the earlier analyses. The ends of the longitudinal beams were constrained in the x- and z-axis.

The bolts locking the transverse beam in place were modeled as 1D bar elements connected via spiders to the area under the washer heads. The cross-sectional areas of the bar elements were defined as the nominal stress area of a M8 bolt (36,6 mm²).

The six bolts connecting the three parts of the transverse beam were modeled as couplings to allow rotation between the parts. This was achieved by connecting the bolt hole faces to central nodes in the middle of the hole with spiders. The couplings were constrained in all degrees of freedom except rotation around the z-axis.

Load

The dimensioning load 1100 N calculated for the original design analysis was applied as a geometrically distributed downward force on the top surface on each of the longitudinal beams. Figure 4 shows the applied loads as well as the constraints.

Mesh

The parts of the long side were meshed using CHEXA (20) hexahedral elements with a size of 5 mm. The transverse and longitudinal beams were meshed using the same element type but with a size of 3 mm to get a more accurate solution and two elements over the part thickness. The model consisted of 87 682 elements. An element quality check found no failed elements or warnings. The created meshes can be seen in figure 4.

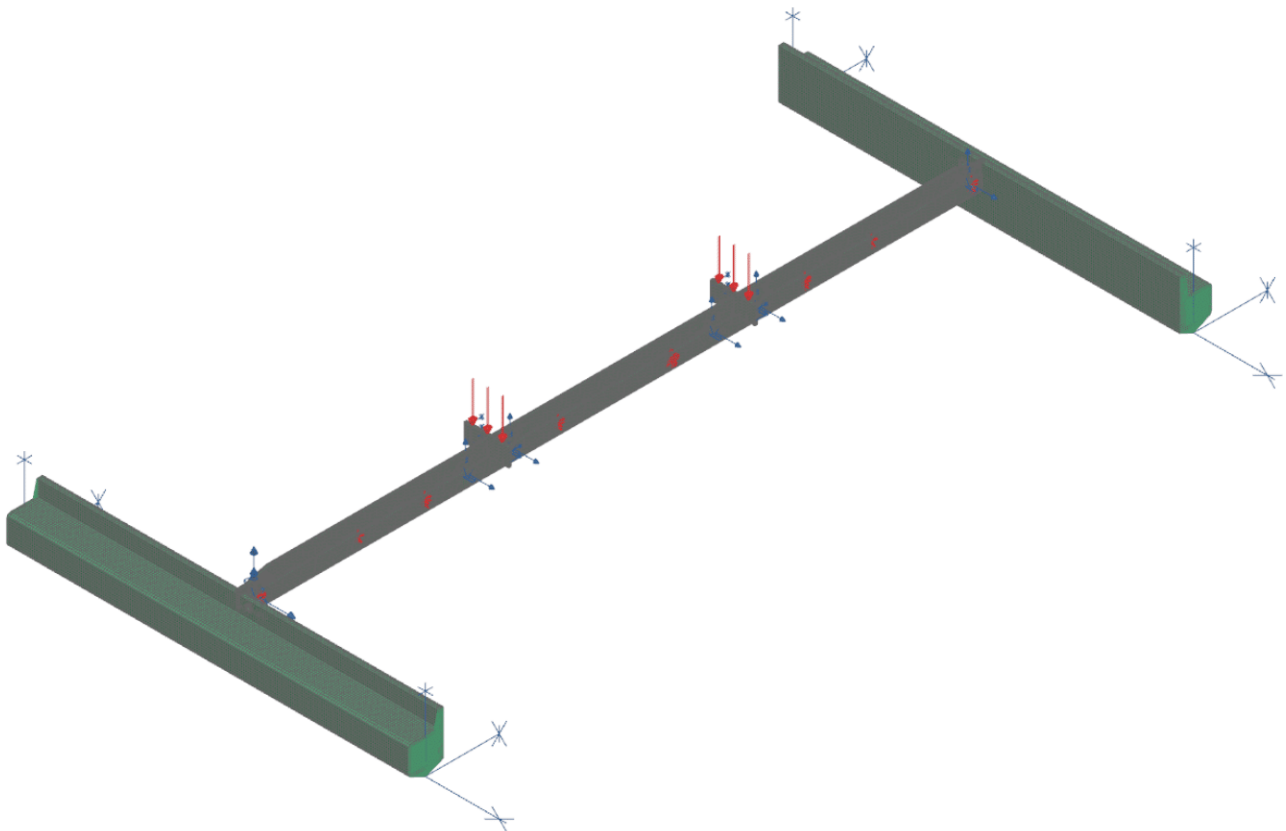


Figure 4. Meshed model with applied load and constraints.

Results

An overview of the stresses is presented in figure 5.

Stress - Element-Nodal, Averaged, Von-Mises
 Min : 0.02, Max : 1893.05, Units = MPa
 Deformation : Displacement - Nodal, Magnitude

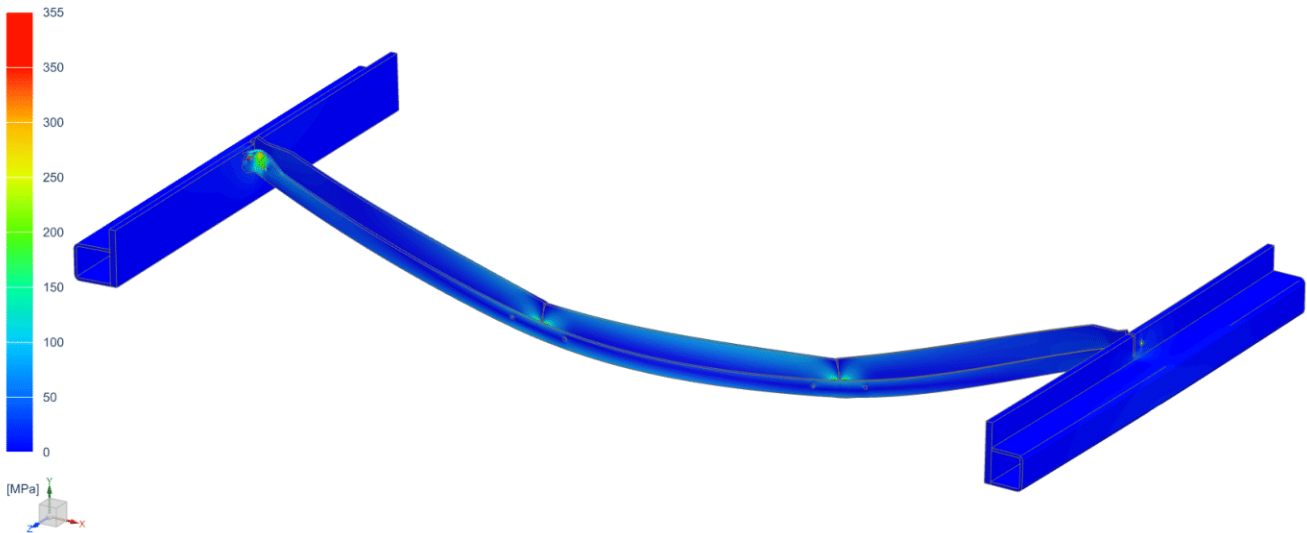


Figure 5.

Post view showing the averaged Von-Mises stresses in the elements. The maximum stress 1893 MPa is found in the contact point between the main transverse beam and long side plates.

In figure 6, stresses above 355 MPa are plotted while everything below is translucent.

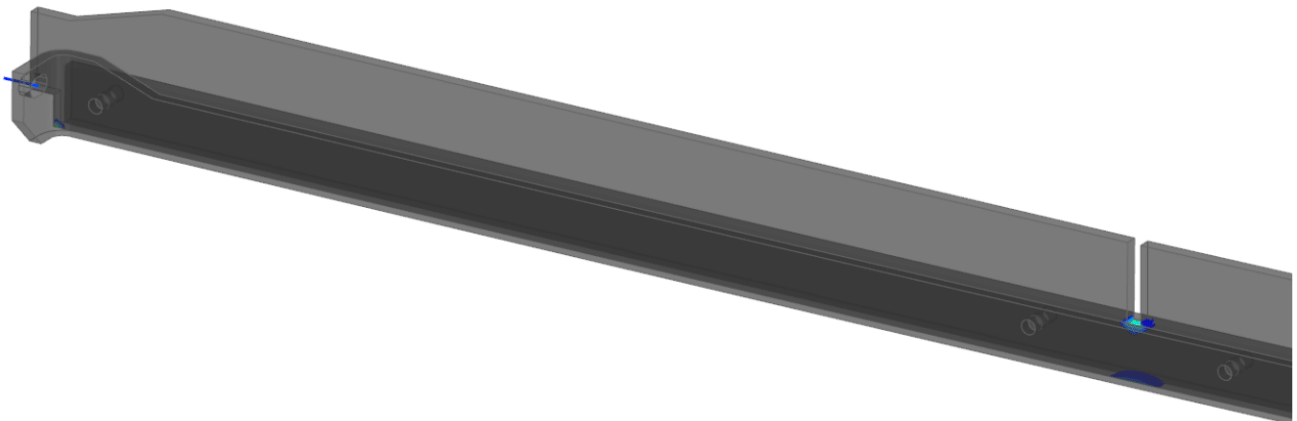


Figure 6.

Translucent post view showing only the averaged Von-Mises-stresses in the elements above the material yield point of 355 MPa.

An overview of the deflection in y-axis (vertical) is presented in figure 7. The asymmetric attachment of the transverse beam results in deflection in the z-axis (longitudinal), seen in figure 8.

Displacement - Nodal, Y
Min : -6.455, Max : 0.12, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal , Magnitude

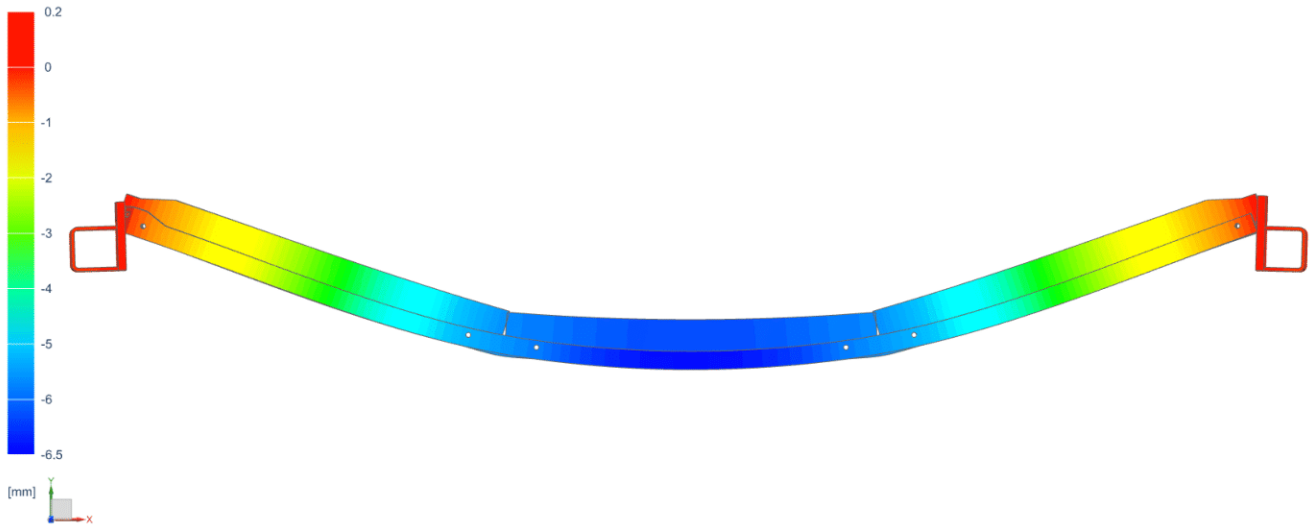


Figure 7. Post view showing y-axis deflection as 10 % of the model size.

Displacement - Nodal, Z
Min : -0.768, Max : 0.752, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal , Magnitude

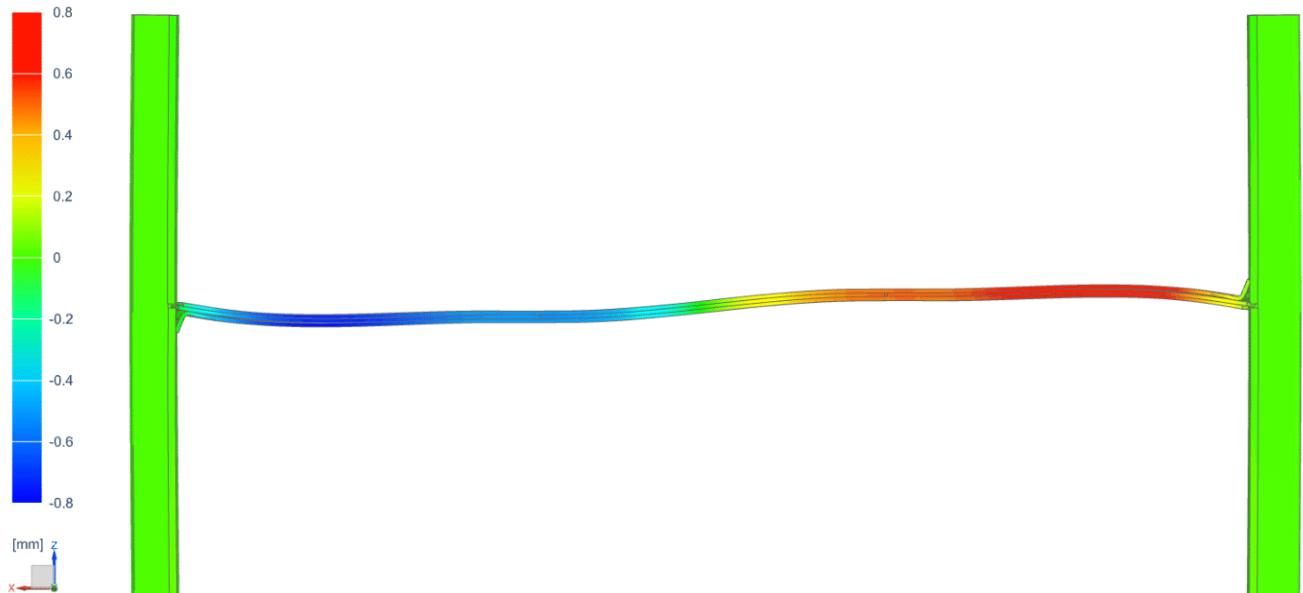


Figure 8. Post view showing z-axis deformation as 10 % of the model size.



Summary

The stress levels in the critical areas are at an acceptable level. The highest axial stress levels in the bolts were 70 MPa.

The attachment solution results in the long side beams getting pushed outwards, rather than rotating inwards like the other concepts. This can be seen in figure 7. The effect is thought to cause the buckling seen in figure 8, a phenomenon not witnessed in the other concepts. The deflection is similar to the original transverse beam, but its behavior makes one question the concept's viability.

The concept is stronger than the original transverse beam, deeming it acceptable. The viability of this concept will be evaluated further against concept 3.

Dennis Hagström

29.3.2023

SOL 101 Linear Static Analysis of Replaceable Transverse Beam Concept 3 – Copper Main Plate

Description

AAE are designing replaceable transverse beams to ensure that all parts subject to wear from cutting can be exchanged if needed. The strength of the original design has been deemed sufficient and the new replaceable concepts will therefore only be compared to the original transverse beam.

The third transverse beam concept presented in figure 1 has been selected as the best out of the four concepts analyzed. A request from AAE was that the final design could be made of copper. The reason being that copper structures in the cutting area have been shown to have a much longer lifetime than their steel counterparts, and a few customers cutting mainly reflective materials might want to change all wear parts to copper in order to increase their longevity.

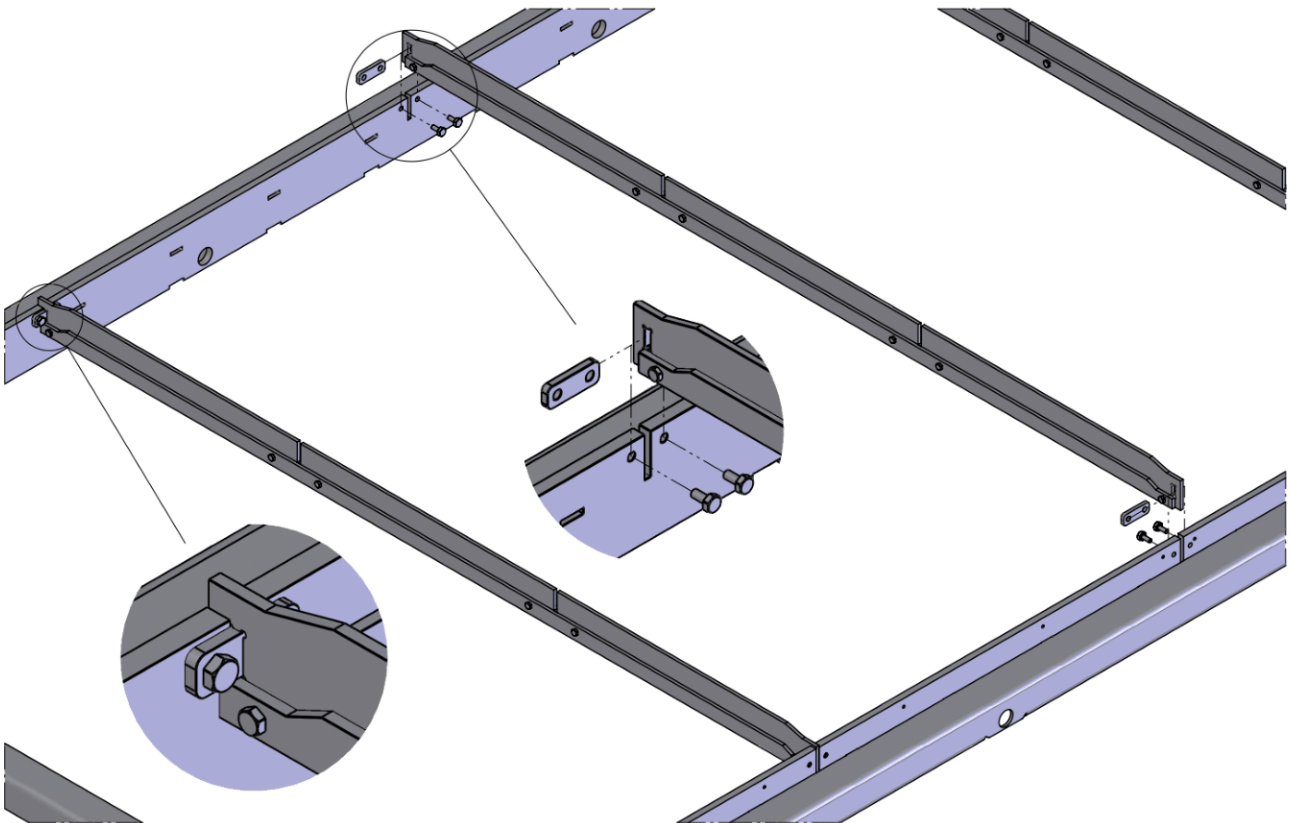


Figure 1. Replaceable transverse beam design concept 3.

The purpose of this analysis was to verify if the strength of the concept is acceptable if the main plates were to be made from copper instead of steel.

Model

The model was prepared identically as the third concept. Figure 2 shows which part of the transverse beam that would be made of copper and which would be made of steel.

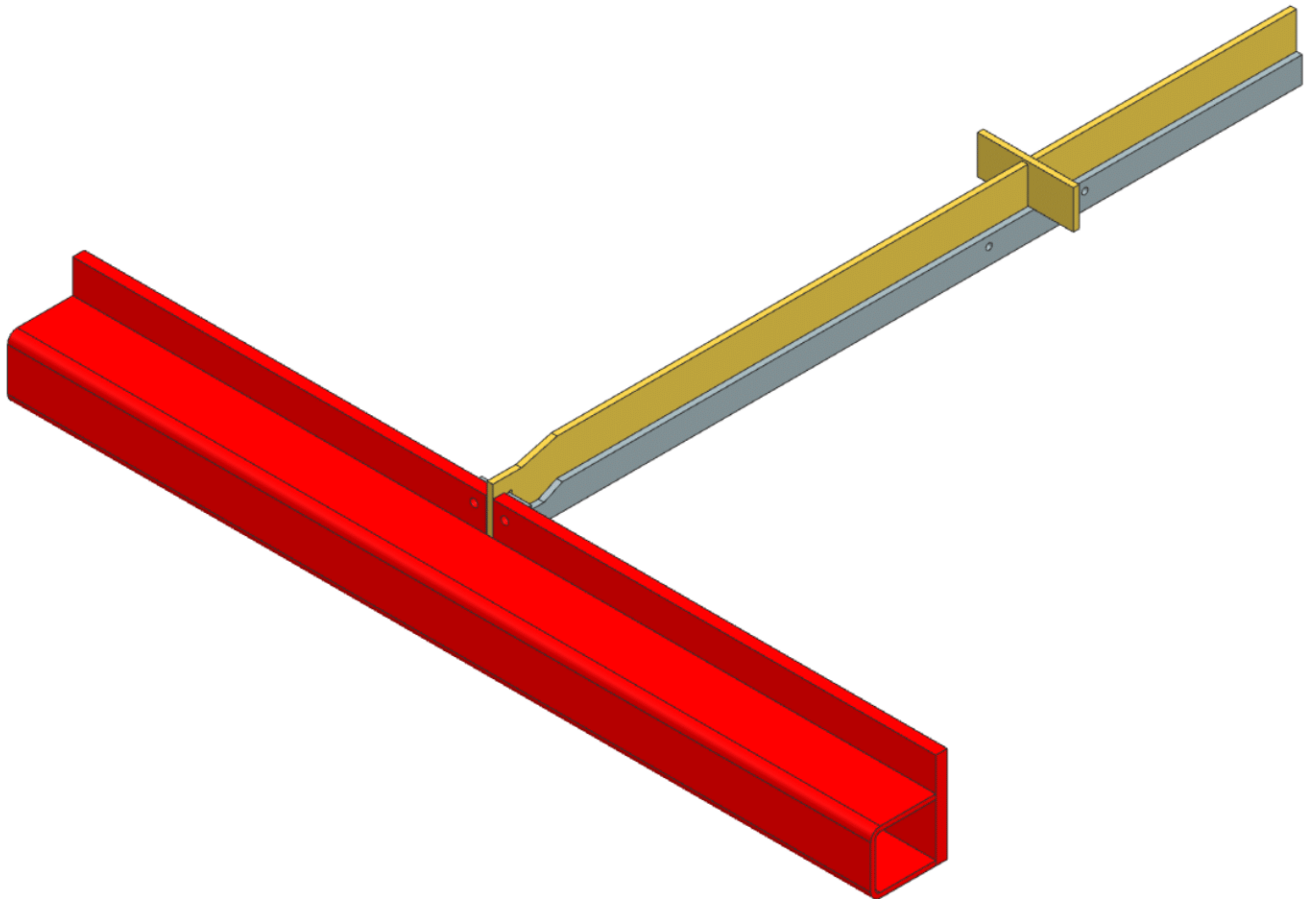


Figure 2. *Idealized model used in analysis. The dimensions are identical to those of concept 3.*

Material

All parts in the model except the main transverse beam plate and longitudinal beam are made of structural steel with an elastic modulus of 207 GPa and a minimum guaranteed yield point of 355 MPa.

The remaining parts are made of work-hardened copper with an elastic modulus of 120 GPa. Copper lacks a specific yield point like steel, instead an offset yield limit is given as the stress at which a 0,2 percent plastic deformation is obtained. It is unclear what grade and condition of copper sheets that are mainly used in shuttle table structures, but this analysis assumed a medium-strength copper grade is used. Metal supplier Tibnor delivers pure, work-hardened copper sheets with a minimum guaranteed offset yield point of 180 MPa.



Load

The dimensioning load was calculated the same way as for the previous analyses, but with the maximum load consisting of a 12 mm copper sheet instead of a 25 mm steel sheet. This resulted in a lower dimensioning load from the previously used 1100 N to 700 N.

Results

An overview of the stresses is presented in figure 3.

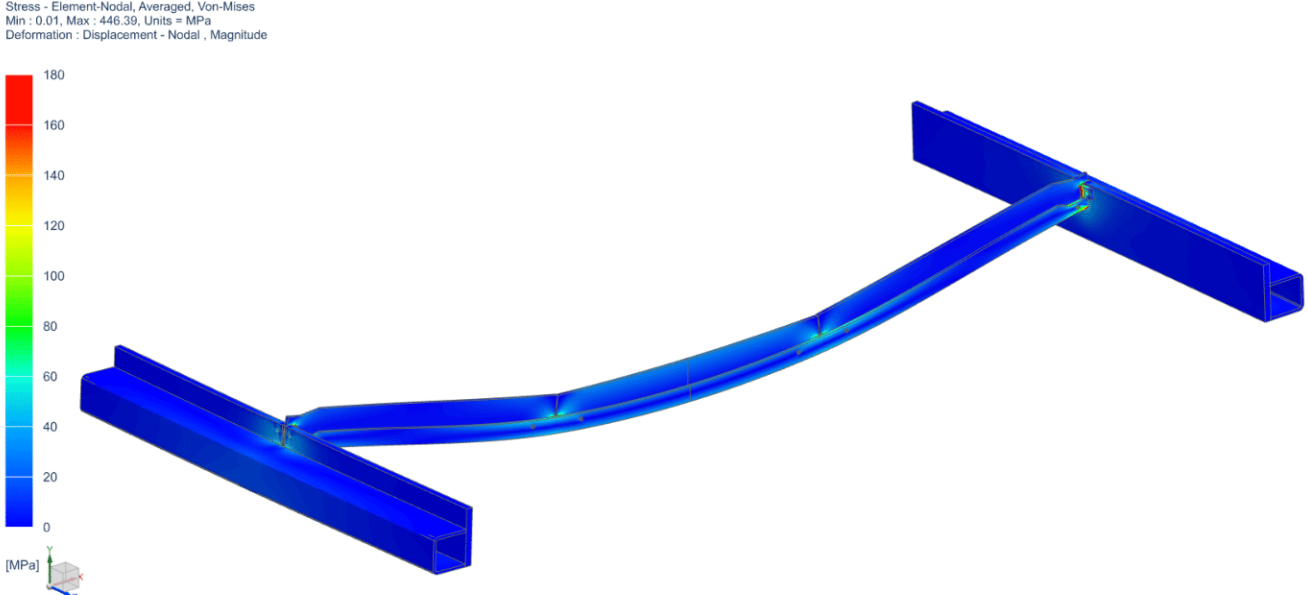


Figure 3. Mirrored post view showing the averaged Von-Mises stresses in the elements. The maximum stress 446 MPa is found in the slot for the longitudinal beam.

In figure 4, stresses above 180 MPa are plotted while everything below is translucent.

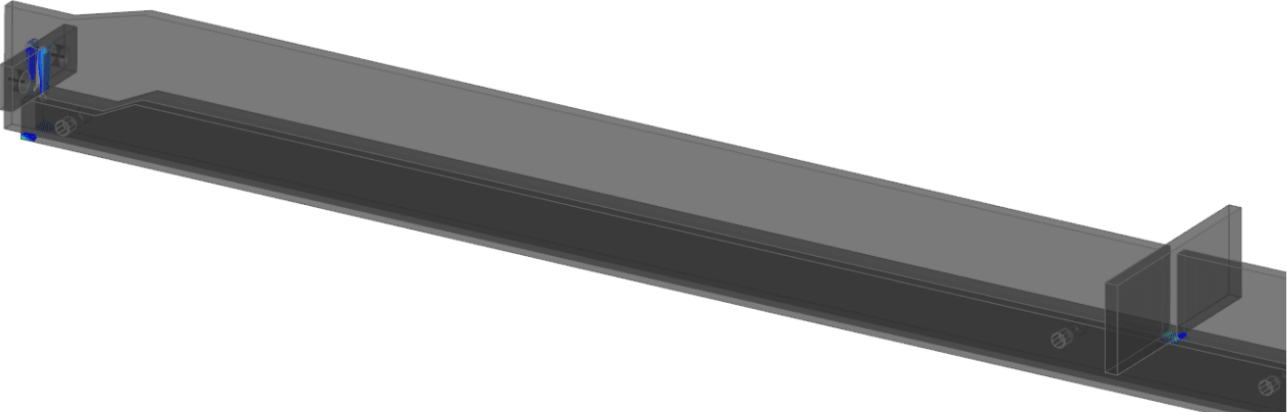


Figure 4. Translucent post view showing only the averaged Von-Mises-stresses in the elements above the material yield point of 180 MPa.

An overview of the deflection in y-axis (down) is presented in figure 5.

Displacement - Nodal, Y
Min : -3.789, Max : 0.04, Units = mm
Deformation : Displacement - Nodal , Magnitude

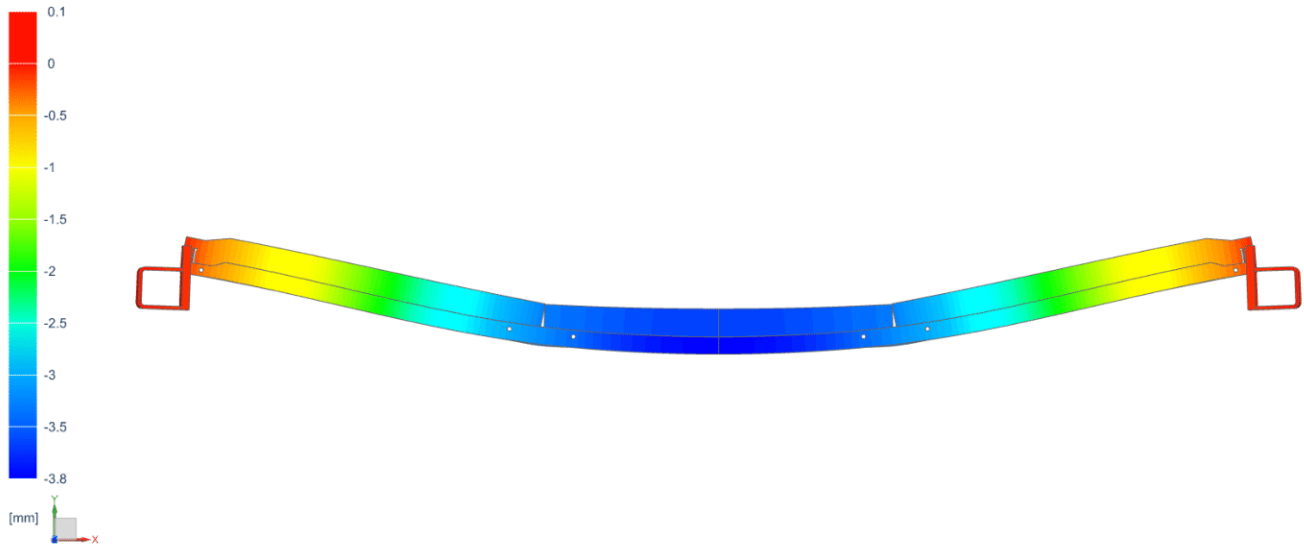


Figure 5. Mirrored post view showing deflection as 10 % of the model size.

Summary

The model behaves as expected. The highest stresses are found in the longitudinal beam slot. The volume exceeding the material yield point of 180 MPa is very small, which means that it won't influence the overall beam strength.

It is unclear if the laser light will anneal the copper beam during use. Annealed copper has a significantly lower offset yield limit (40 MPa), which would mean the main beam could deform around the slot areas if the beam was annealed. However, the beam would only deform until the top of the slots pinched the longitudinal beams, at which point the effective area of the transverse beam increases dramatically.

Furthermore, there are many copper alloys with far greater yield limits than the pure copper material assumed in the analysis. An inquiry about what type of copper that is mainly used in laser grating and supporting structures yielded no results.

The displacement under the lower dimensioning load was 3,8 mm, which is lower than for the original design (6,4 mm). The main beam in the transverse beam assembly can be made from copper.

Dennis Högrås

1.4.2023