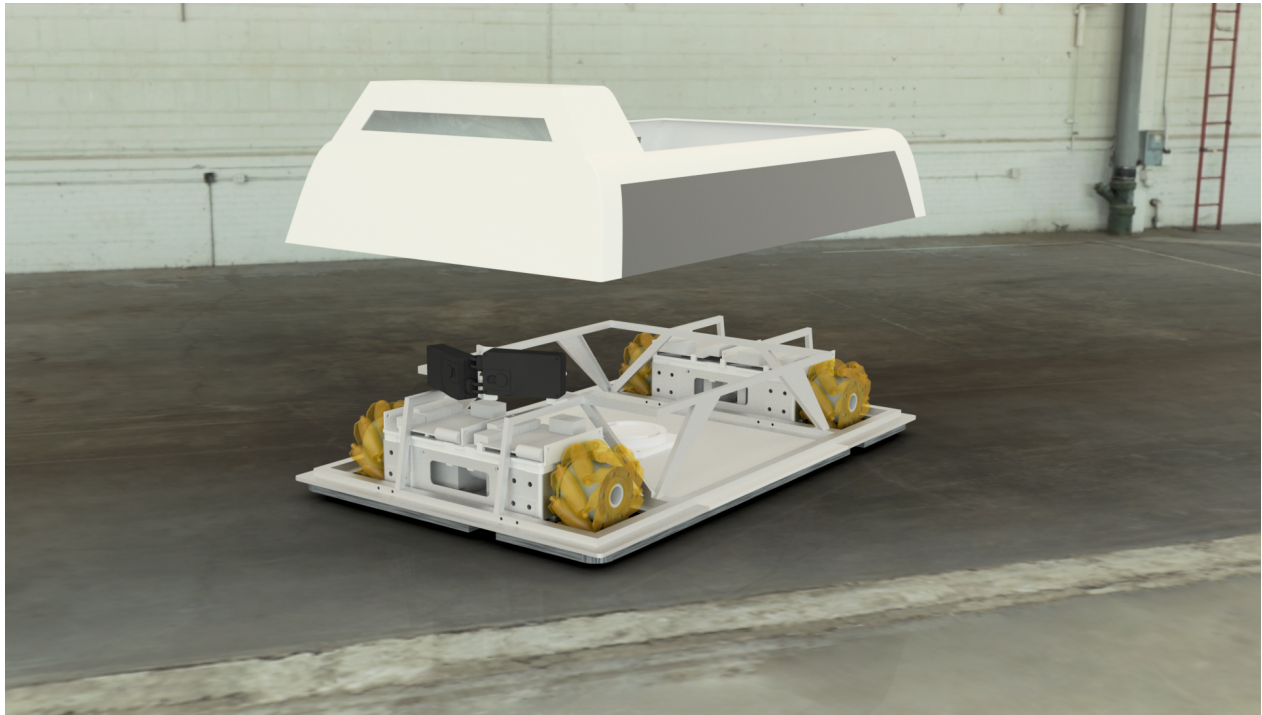




CHALMERS



Produktutveckling av bärande struktur till en AGC

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

Jonathan Bengtsson

Niklas Hellgren

Felix Söderlind Englund

EXAMENSARBETE IMSX20

Produktutveckling av bärande struktur till en AGC

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

Jonathan Bengtsson

Niklas Hellgren

Felix Söderlind Englund

Institutionen för Industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2018

Produktutveckling av bärande struktur till en AGC

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

Jonathan Bengtsson
Niklas Hellgren
Felix Söderlind Englund

© Jonathan Bengtsson, Niklas Hellgren & Felix Söderlind Englund

Institutionen för Industri- och materialvetenskap
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag: Rendering av den slutgiltiga produkten

Institutionen för Industri- och materialvetenskap
Göteborg, 2018

Product development of a load-bearing structure of an AGC

Bachelor's thesis in Mechanical Engineering

Jonathan Bengtsson

Niklas Hellgren

Felix Söderlind Englund

Department of Industry and Material science
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden 2018

Förord

Rapporten skrivs som ett examensarbete på Chalmers Tekniska Högskola av studenter i pågående högskoleutbildning (Maskinteknik 180 HP). Examensarbetet utförs under vårterminen 2018 med start 22 januari och avslutas med redovisning 5 juni.

Vi skulle vilja tacka våra handledare Hans Sjöberg, Forskningsingenjör på avdelningen för Produktionssystem, Institutionen för industri- och materialvetenskap vid Chalmers tekniska högskola samt Anders Ek, Research Engineer Research & Product Development - PSD vid FlexLink AB för den hjälp, rådgivning och engagemang ni givit oss genom arbetets gång. Vi skulle även vilja tacka Dick Andersson, Produktägare på FlexLink AB, för teknisk rådgivning och Mattias Folestad samt Ramin Moshfegh på Lamera. Ett tack riktas även till Åsa Fasth Berglund, Docent på avdelningen för Produktionssystem, Institutionen för industri- och materialvetenskap, Programansvarig för programmet Maskinteknik 180 HP vid Chalmers tekniska högskola för engagemanget som examinator.

Sammanfattning

Företaget FlexLink utvecklar och producerar lösningar inom industriautomation, i synnerhet conveyor-system. Conveyor-system är en sorts transportband och används i industrin för att förflytta varor som är i produktion. För att ytterligare öka flexibiliteten hos conveyor-systemen vill FlexLink ta fram en produkt som både kan färdas på ett transportband men även åka av bandet och autonomt förflytta varor på fabriksgolvet. Produkten som är tänkt att utvecklas påminner om en AGC (Automated Guided Cart). AGC:er används redan idag för internlogistik hos tillverkande företag. Skillnaden mellan de redan etablerade AGC:erna som finns på marknaden och den som projektet avser ta fram är att samtidigt som den ska fungera som en AGC ska den också kunna färdas på FlexLinks befintliga conveyor-system.

En begränsning på conveyor-systemet som AGC:n ska färdas på är att varje individuell AGC får maximalt ha en vikt på 30 kg (inklusive godsvikt). Detta gör att fokus i projektet hamnar på att ta fram en produkt som är lätt men ändå klarar givna belastningar. Detta för att maximera kunders möjlighet att frakta material på AGC:n. Ju lägre vikt på AGC:n desto högre godsvikt. För att sänka vikten på slutprodukten har en utvecklingsmetod som heter "generativ design" används.

En AGC innehåller ett antal olika komponenter för att möjliggöra autonom drift. En av de huvudsakliga avgränsningarna är att detta arbete fokuserar på den mekaniska konstruktionen snarare än diverse elektriska komponenter. Den mekaniska konstruktionen måste däremot självklart ta hänsyn till de förvalda interna komponenterna vid utformningen av t.ex. strukturella detaljer.

Arbetet har utmynnat i en bärande konstruktion (inkl. kaross) på en massa av ca 1,5 kg. Detta motsvarar en viktreduktion på 87% av den bärande strukturen. Däremot behövs ett antal fler komponenter för att AGC:n ska fungera som tänkt. Inklusive alla andra nödvändiga specificerade komponenter hamnar totalvikten på ca 15 kg. Den största delen av totalvikten utgörs av andra komponenter än chassi och kaross. Om ytterligare viktreduktioner önskas rekommenderas att vikten på komponenterna sänks, detta eftersom att de står för 90% av vikten efter projektets utvecklingsarbete.

Summary

The company FlexLink develops and produces solutions in the area of industry automation, especially conveyer belt systems. These systems are used in manufacturing to transport units in production flows. To further increase the flexibility of their offering, FlexLink has ambitions to develop a product which can transport payloads on both the conveyor belts and the manufacturing floor. The product is intended to work like an AGC (Automated Guided Cart), which are already widely used in the logistic systems of manufacturing companies. The difference between this product and the AGC:s on the market is that this product will also be able to travel on FlexLink's existing conveyer systems.

A limitation of the conveyer systems in question is that each individual AGC is allowed to have a maximum weight of 30 kg (including payload weight). This places the focus of the project on developing a product which has a low weight while still withstanding the specified forces. The lower the weight, the higher the allowed payload. To achieve weight reduction, a product development method called "generative design" has been used extensively.

An AGC contains a number of different components to allow autonomous operation. One of the major project limitations is that this project places the design focus on the mechanical aspects rather than choosing or developing electrical components. But of-course the mechanical design must take these internal components into account during the development process.

This project has resulted in a structural design (including a body) with the mass of approximately 1,5 kg. This is the result of a weight reduction of 87% of the load-bearing structure. When additional components are added to the design, the total weight adds up to about 15 kg. As is evident, the vast majority of the mass is accounted for by the components rather than the structural design (including the body). If further weight reduction is desired, this project recommends lowering the weight of components as these account for about 90% of total weight as measured after this projects design developments.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	2
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Precisering av frågeställningen	3
1.5	Problemformulering	3
1.5.1	Konstanter och fria variabler	4
1.5.2	Lastfall	5
1.5.3	Referensmodell	6
2	Teoretisk referensram	7
2.1	Definition av AGC och AGV	7
2.2	Exempel på AGC:er	7
2.3	Lättviktskonstruktion	8
2.3.1	Grundläggande ideér vid optimering av konstruktioner	8
2.3.2	Generativ Design	9
2.4	Material	10
2.4.1	Sandwichmaterial	11
2.5	Värde modellen	11
3	Metod	14
3.1	Planeringsrapport	14
3.2	Marknadsanalys	15
3.3	Teorisökning	15
3.4	Kravspecifikation	15
3.5	Konceptgenerering	16
3.6	Koncepturval	16
3.7	Materialanalys- och val	18
3.8	Tillverkningsanalys	18
3.9	Miljöanalys	18
3.10	Kostnadsanalys	19
3.11	Modell/Prototyp	19
4	Utförande och resultat	20
4.1	Kravspecifikation	20
4.2	Konceptgenerering	22
4.2.1	Generativ design	24
4.3	Koncepturval	27
4.4	Slutgiltigt koncept	33
4.5	Design	38
4.6	Materialanalys	39
4.7	Miljöanalys	40
4.8	Tillverkningsanalys	41

4.9	FE-analyser av lastfall	42
4.10	Kostnadsanalys	45
4.11	Modell/prototyp	47
5	Diskussion	49
5.1	Lärdomar av projektet	49
5.2	Tveksamheter i slutkonstruktion	49
5.3	Vidareutveckling	50
6	Slutsats	51
	Referenser	52

Beteckningar

CAD - Computer Aided Design

FEM - Finita element metoden

Autodesk Inventor - CAD-program från Autodesk

Shape Generator - Generativ design i Autodesk Inventor

CES Edupack - Programvara med databas om material/produktion

1 Inledning

I detta kapitel beskrivs projektets bakgrund, syfte samt avgränsningar och frågeställning. En mer utförlig beskrivning av problemet redovisas också.

1.1 Bakgrund

Företaget FlexLink utvecklar lösningar inom industriautomation, i synnerhet conveyor-system. De vill ytterligare öka flexibiliteten för sina transportsystem och skapa en produkt som både kan färdas på ett conveyor-band men som även kan åka av bandet och fritt kunna transportera gods på fabriks-golvet. Produkten som är under utveckling av FlexLink kan beskrivas som typ av AGC. AGC står för "automated guided cart" och är en autonom transportlösning som idag används vid internlogistik för tillverkande företag. Skillnaden för AGC:n som projektet avser är att den delvis ska kunna förflytta material autonomt men samtidigt även kunna användas på ett av FlexLinks befintliga transportsystem.

Conveyor-systemet som avses kallas av FlexLink för XT, se fig. 1. Det används idag bland annat i fabriker som producerar bilar eller elektronikprodukter. XT-systemet fungerar som en produktion-slina och förflyttar palletter med varor som är under produktion. Conveyor-systemet kan anpassas till palletter i en rad olika storlekar, detta projekt kommer dock enbart att ta fram en lösning för dimensionen 640x400 mm. XT-systemet består av två band där antingen bägge kort- eller långsidorna av palletten ligger på varsitt band som driver palletten framåt. Banden drivs av motorer utspridda längs med conveyor-systemet. En begränsning som systemet har för att undvika överbelastning är en maxvikt på 30kg hos varje enskild pallett, d.v.s. totalvikten för palletten och godset som är lastat på palletten. Tanken är att använda det befintliga XT-systemet för den nya produkten som då således kommer att ha samma viktkrav. Detta medför att fokus i projektet kommer att ligga på att ta fram en produkt med så låg vikt som möjligt. Detta eftersom ju mindre vikt varje AGC har desto mer gods kommer användare av produkten kunna frakta på en och samma AGC. Detta leder i sin tur till uppenbara produktivitetvinster.



Fig. 1: Bild på XT-systemet

1.2 Syfte och mål

Syftet är att utveckla en produkt som kan möjliggöra transport både på FlexLinks transportband och på fabriksgolvet. Projektet fokuserar på den mekaniska konstruktionen av denna produkt. Fokuseringsområdena i produktutvecklingen är primärt att minimera vikt men även sekundärt att minimera tillverkningskostnad. För att försäkra att produkten uppfyller de valda krav och kriterier skall en verifieringsmetod väljas och utföras.

Målet är att ta fram en produkt som tillfredsställer samtliga krav, denna lösning presenteras dels i form av en digital modell (i t.ex. CAD) och dels i form av en fysisk modell.

1.3 Avgränsningar

Projektet innefattar inte utveckling eller användning av mjukvara som sköter styrning och navigering av AGC:n. Färdiga komponenter som möjliggör rörelse av AGC:n kommer att användas såsom t.ex. motorer, styrkort och laddningsanordning för batteriet. Utveckling eller val av dessa ingår ej i projektet. Mecanumhjul ingår även i AGC:n men eventuell förbättring av dessa kommer ej att studeras. Även om alla färdiga komponenter inte kommer studeras i detalj så kommer konstruktionen av AGC:n att påverkas av dessa. Beaktning till dessa måste därför tas för att bibehålla funktionen hos de komponenter som är tänkta att användas.

Den logistiska applikationen av produkten faller utanför projektets fokusområde. Viss hänsyn måste såklart tas till hur den produkten kommer användas men exempel på logistiska användningsområden utesluts ur detta arbete. Likaså kommer heller inte någon beaktning ges till teknisk dokumentation i form av t.ex. manualer och andra användardokument.

FlexLink är en samarbetande organisation i projektet AKTA (Automatisering av Kitting, Transport och Montering) (Chalmers, 2017). De har förklarat att de inte har haft ISO- och CE-märkning i fokus som del av detta projekt. Av detta skäl kommer studier av dessa standarder exkluderas. Detta är också för att projektets omfattning berör den mekaniska konstruktionen, snarare än kopplingen mellan elektriska komponenter.

FlexLink har olika storlekar på sina paletter men detta projektet avgränsas till en palett med bottenstorleken 640x400 mm. Avseende detaljnivån på CAD-modellen så kommer denna inte inkludera specifikationer av exakt vilka skruvar eller svets tekniker som används (eller något annat av liknande detaljnivå). När det gäller materialvalet kommer detaljnivån generellt vara inriktad på materialfamiljer som t.ex. stål eller aluminium, snarare än specifika legeringar.

1.4 Precisering av frågeställningen

Fokus ligger på konstruktionen av AGC:n, främst hur viktminskning med bibehållen funktion uppnås på bästa sätt. Projektet besvarar en övergripande frågeställning:

- *Hur kan en AGC utvecklas för att möta kravprofilen där fokus ligger på viktreduktion och kostnadseffektivitet?*

I den huvudsakliga frågeställningen ovan inkluderas flera faktorer, varav de mest betydelsefulla sannolikt är materialval och design eftersom att de har störst påverkan på hur väl produkten matchar kravprofilen.

1.5 Problemformulering

Utöver att enbart transportera gods på conveyer-bandet har vissa kunder ett behov av att utföra pressoperationer på topplattan. Detta sker med hjälp av ett pneumatiskt lyftdon som lyfter produkten en kort sträcka så att presskraften går genom produkten och lyftdonet snarare än genom conveyer bandet som inte är dimensionerad för sådana laster (storleksordningen 1000 N). På så sätt kan även bandet fortsätta rulla medan AGC:n hålls stilla och pressoperationen utförs.

En annan relevant aspekt i XT-systemet är blockklossarna som stannar upp AGC:n för operation. Deras funktion illustreras schematiskt i figur 2 nedan. Designen av AGC:ns undersida måste ta hänsyn till blockklossarnas dimensioner och placering för att fungera som tänkt.

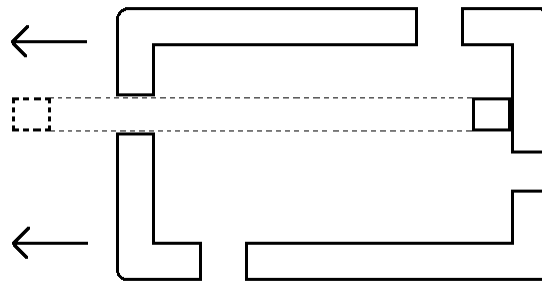


Fig. 2: Stopplister på AGC:ns undersida

1.5.1 Konstanter och fria variabler

Problemformuleringen kan delas in i konstanter och fria variabler för att få en överblick av vilka begränsningar respektive möjligheter som finns. Några nämnvärda konstanter är följande:

- Dimensioner för stopplister (640x400 mm).
- Komponenter (hjul, batteri, motorer etc.).
- Konstruktionens maxdimensioner (650x410 mm).
- Vinkling av 3D-kameror för maximal total betraktelsevinkel.
- Positionering av utskärningar för blockklossar på AGC:ns undersida, se figur 2 (även konstanta dimensioner för blockklossar).

Några fria variabler är:

- Materialval.
- Geometri av bärande struktur.
- Toppenplattans dimensioner.
- Profil på eventuell kaross/skal.
- Hjulens placering.
- Positionering och dimensioner på kontaktpunkterna mellan bottenplattan och lyftdonet.

Konstanterna dikterar inom vilka ramar konstruktionen sker. De fria variablerna anger vilka aspekter som kan designas. Tillsammans bestämmer de designfriheten i projektet.

1.5.2 Lastfall

Konstruktionen av AGC:n har tre lastfall som den måste klara av. Två av lastfallen innefattar egenvikten på 30 kg och det tredje en punktkraft i mitten av topplattan på 1000 N.

I lastfall 1 är egenvikten 30 kg och när AGC:n färdas på conveyor-systemet. Kraftflöde: gods + egenvikt → ram → banden på conveyor-systemet

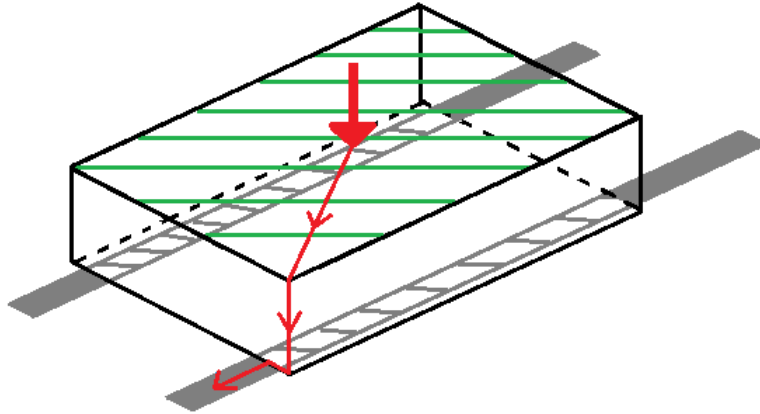


Fig. 3: Lastfall 1

Lastfall 2 är egenvikten på 30 kg och när AGC:n färdas på fabriksgolvet med hjälp av hjulen. Kraftflöde: gods + egenvikt → motorfästen → motorhölje → hjulaxlar → hjul → golv

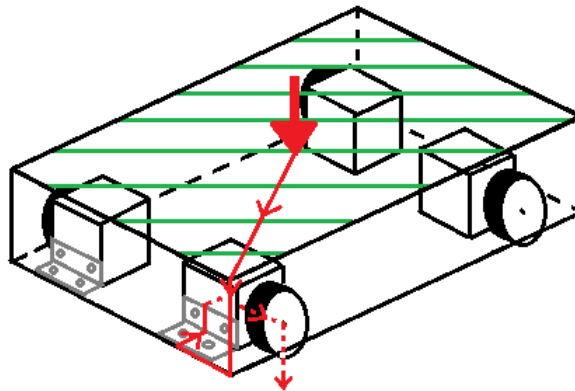


Fig. 4: Lastfall 2

Lastfall 3 är en punktkraft i mitten av topplattan på 1000N, maximalt tillåten utböjning vid denna belastning är 1 mm. Detta lastfall uppkommer vid ovan nämnda pressoperation. Kraftflöde: pressoperation → topplatta → ram → domkraft

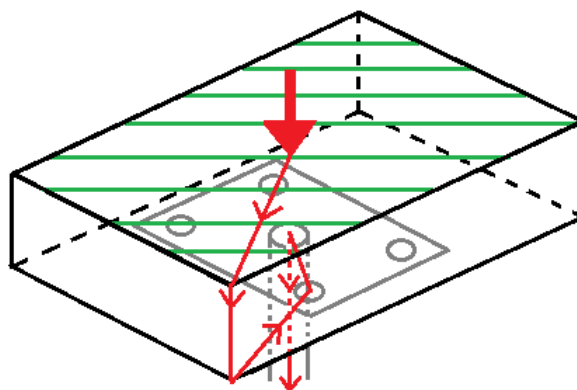


Fig. 5: Lastfall 3

1.5.3 Referensmodell

En prototyp har byggts upp föregående år för att testa funktion hos styrsystem, motorer, elförsörjning etc. Denna kan skådas nedan i figur 6.

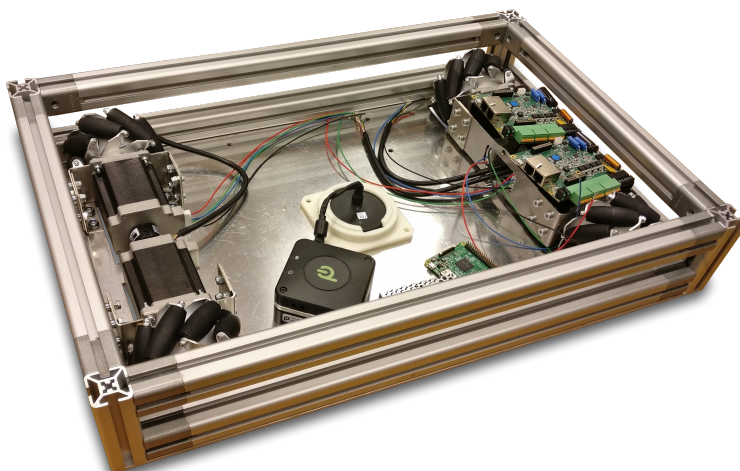


Fig. 6: AGC:n idag

Ramen i prototypen är uppbyggd av extruderade stål- och aluminiumprofiler. Dessa är väl tilltagna och prototypen är rejält överdimensionerad mot vilka krafter som den ska motstå. Hörnen i konstruktionen är gjorda i stål och övrig struktur är i aluminium. Vikten av den bärande strukturen är ca 6,8 kg. Denna modell kommer att ses som en referensmodell genom arbetets gång vid jämförelser och när olika betyg sätts.

2 Teoretisk referensram

Följande kapitel förklarar begrepp som kommer användas i rapporten samt presenterar teori för att stödja påståenden som görs.

2.1 Definition av AGC och AGV

Det finns ett antal närbesläktade termer och förkortningar inom autonoma transportlösningar, exempelvis AGV och AGC. Skillnader och överlapp kommer att förklaras i syfte att erbjuda bakgrund till projektet samt för att förtydliga terminologin. Det gemensamma för samtliga autonoma transportlösningar som nämns i denna del är att målet till stor del är detsamma, d.v.s. att öka flödet genom ökad flexibilitet till en lägre kostnad än om manuell transport används. Enligt Åkerman et. al. (2017) består internlogistiken av 10-30% av ett företags omsättning vilket innebär att det finns en stor potential att spara kapital vid ökad automationsnivå. De hävdar även att det finns möjligheter att reducera ergonomiska problem, tidsvariation i internlogistiken samt säkerhetsrisker genom automatisering av transporter. Nedan följer en förklaring av de två huvudsakliga kategorierna på detta område:

AGV

AGV står för "automated guided vehicle" vilket enligt Vis (2004) kan beskrivas som ett förarlöst transportsystem som används för horisontell förflyttning av material. Deras användningsområde är brett och täcker exempelvis transport av material inom fabriker, lager och distributionscentraler av olika slag. De finns också vårdsektorn där de sedan 2000-talet till stor del har tagit över efter äldre logistiklösningar (Ullrich, 2015, s.68). Enligt Åkerman et. al. (2017) används AGV:er ofta som monteringsfixtur och följer monteringslinan i produktionsprocessen.

AGC

AGC står för "automated guided cart" och är den enklaste och billigaste av nämnda lösningar (Åkerman et al., 2017). Den ämnar sig väl för lätta transporter (<500 kg) till skillnad från vissa "heavy load" AGV:er med en kapacitet på 40 ton som t.ex. "Morello heavy duty AGV transfer cart" (Giovani, 2016). Det är vanligt att AGC:er använder magnettejp som målar ut en bana på golvet. Denna teknik är däremot mindre relevant idag än tidigare på grund av vidare teknikutveckling.

2.2 Exempel på AGC:er

I denna del analyseras två AGC-producerande företag på marknaden i en fallstudie för att få mer kunskap om dagens AGC-marknad.

Omron

Omron har idag fyra olika modeller som de kallar mobila robotar och som har samma användsområden som en AGC, (Omron Corporation, 2018). Omron väljer dock att kalla dessa för Autonomous Intelligent Vehicles (AIVs). De fyra olika modellerna kan delas in i två kategorier med två modeller vardera. Den ena är enbart en AIV som kan modifieras utifrån kundens behov. Den andra är en AIV

med tillhörande vagn som lasten körs på. Vagnen har bland annat en LED-skärm som operatören kan använda för att integrera med roboten. Skärmen kan även ge information om logistik och säga till när någon speciell vara måste fyllas på. Omrons robotor använder laser och andra sensorer för att kunna navigera och inte krocka med något. De ska även kunna hitta alternativa rutter när vägen som först var tänkt att användas är blockerad. När robotarna åker runt i fabriken skapar robotarna en egen karta över fabriken som den sedan navigerar utifrån. Om roboten används på en plats där miljön längs golvet hela tiden ändras kan Omrons AIV istället navigera utifrån taket, då utseendet av taket ej ändras.

Toyota TAE050

Toyota TAE050 är Toyotas AGC robot för materialhantering. TAE050 är byggd för att klara köra 140 kg när godset är placerat på lastytan men klarar också att dra 500 kg bogserandes (Toyota Material Handling, 2018). Roboten är även byggd för att klara maxhastigheten på 3 km/h. Robotens storlek mäter 1167 x 551 mm vilket gör att den klarar av att köra på mycket begränsade områden. Den kan därför ta över många jobb där människor behövt transportera gods, där de nu kan fokusera på mer komplexa uppdrag. En av de mest viktiga fördelarna med TAE050 är dess enkla installation, AGC:n styrs genom att den följer en magnetremsa monterad på golvet. Detta kan utföras efter att materialflöde och laddningsstationen har definierats. TAE050 går att programmera i Microsofts kalkylarks program Excel med enkla kommandon som att svänga eller öka hastighet, vilket gör det blir både enkelt och flexibelt (Toyota Forklifts, 2018).

2.3 Lättviktskonstruktion

Optimering mot lättvikt kan närmast med ett antal olika metoder. I detta kapitel undersöks några av dessa metoder och lite om den bakomliggande teorin.

2.3.1 Grundläggande ideér vid optimering av konstruktioner

En konstruktion definieras enligt Gordon (1978) som “any assemblage of materials which is intended to sustain loads”. Alltså någon form av ihopsättning av material skapad för att utstå laster. Att optimera en konstruktion innebär således att hopsättningen av material kan utstå lasterna den utsätts för på bästa möjliga sätt. Detta leder till att det sätt som innefattas som bäst måste definieras. Detta skiljer sig självklart mellan olika konstruktioner och kan till exempel vara att göra en konstruktion så lätt, stark eller så styv som möjligt. Detta kräver i sin tur att vissa begränsningar på konstruktionen måste specificeras. Finns det till exempel ingen gräns på hur mycket material som får användas till att göra en konstruktion så styv som möjligt skulle konstruktionen kunna göras ändlös styv och lösningen får inget väldefinierat svar. Vanliga begränsningar inom mekaniska konstruktioner kan vara maximal spänning, förskjutning och/eller utbredning. När alla begränsningar är satta kan målet för konstruktionen som ska optimeras bestämmas.

Enligt Christensen och Klarbring (2009) kan strukturell optimering av konstruktioner delas upp i tre olika tillvägagångssätt.

1. Storleksoptimering innebär att geometrin för en struktur redan är känd och kan till exempel innefatta tvärsnitten för balkar i ett fackverk. Då ett fackverk belastas kan de balkar som tar upp den största belastningen ges ett större tvärsnitt och lasten tas då bättre upp av fackverket.

2. Formoptimering innebär att elementen som den geometriska strukturen kommer bestå av redan är kända och optimeringen sker genom att formen anpassas så att målet med konstruktionen uppnås maximalt.
3. Topologioptimering är det vidaste begreppet inom strukturell optimering och innebär att det enda som känt är designdomänen som strukturen måste finna sig inom. Form och storleken på elementen som kommer ingå i den slutgiltiga strukturen är obekanta.

2.3.2 Generativ Design

Generativ design är en designutforskningsmetod som tar inspiration från naturligt urval. Målen med konstruktionen definieras varpå ett stort antal permutationer genereras och testas för att hitta flera möjliga, semi-optimerade konstruktioner. Målet är att finna okonventionella lösningar som en mänsklig konstruktör eller formgivare skulle ha svårt att komma fram till utan hjälpen av generativ design (Autodesk, 2018). Forskning på området inleddes i början av 1970-talet av Frazer och har sedan dess kommit att definieras som en designer-centrerad, parametriskt bunden utforskningsprocess. Utforskningen gäller designmöjligheter som byggs upp i ett historik-baserat parametriskt CAD-system enligt Krish (2011).

Ett populärt verktyg inom området generativ design är genetiska algoritmer. Metodiken inleds med att definiera Lösningsrymden, det område som begränsas av produktspecifika krav, och målfunktionen, ett sammanställt värde som representerar hur väl koncepten uppfyller satta krav och önskemål. Därefter väljs en population av punkter i Lösningsrymden som start och målfunktionens värde för dessa punkter beräknas t.ex. med hjälp av en simuleringsmodell (Johannesson, Persson, & Pettersson, 2013). Den valda populationen utvecklas med inspiration från naturen, d.v.s. genom parning och slumpmässig mutation. På detta vis skapas nya punkter i Lösningsrymden. Målfunktionen beräknas för samtliga ”barn” och de med sämst målfunktion sorteras bort i stil med naturligt urval. Därefter upprepas parningen och detta sker iterativt i ett förbestämt antal generationer. Mutationstyrka och -frekvens styrs med olika parametrar i mjukvaran. Metoden tenderar att konvergera mot ett optimum men det är inte garanterat att detta är ett absolut optimum. Att genetiska algoritmer fastnar i lokala optimum är ett känt problem (Johannesson et al., 2013).

Krish föreslår en metod inom generativ design som han kallar ”Generative Design Method” eller GDM. Denna metod genomförs rent praktiskt med följande övergripande steg:

1. Skapa den generiska modellen i CAD som ska optimeras. Denna måste ha en viss grundläggande struktur vars dimensioner kommer justeras.
2. Fastställ initialt sökområde. Området definieras av ett antal min- och max-värden på de dimensioner som algoritmen ska söka mellan.
3. Generera designer. Detta sker per automatik med algoritmen och det parametriska CAD-systemet.
4. Etablera prestandafiltrar som utesluter opassande s.k. fenotyper, d.v.s. genererade CAD-modeller som inte uppfyller de givna kraven.

5. Urval och finjustering. I slutet av processen återstår ett hanterbart antal designer som konstruktören/designern utvärderar och finjusterar vid behov.

Implementationen av GDM som metod görs förslagsvis med hjälp av antingen en spreadsheet (vari min- och max-värden m.m. sparas) eller en CAD-plugin. Detta är bara ett exempel bland många men det illustrerar hur generativ design kan användas i praktiken.

Generativ design är i praktiken en bred och något flexibel kategori av diverse olika CAD-verktyg som används för att skapa nya produkter och för att optimera existerande produkter mot mål som ökad tillverkningsbarhet, sänkt vikt (ofta genom att ta bort material på lättbelastade områden) m.fl. (Keane, 2017).

2.4 Material

Material kategoriseras enligt CES Edupack (2017) i nio olika familjer:

- Metaller
- Kompositer
- Tekniska keramer
- Icke tekniska keramer
- Polymerer
- Naturmaterial
- Elastomerer
- Glas
- Skum

Egenskaperna och tillämpningarna för dessa har en vid spridning. Det beror självklart på vad tillämpningen av materialet ska åstadkomma. Vilket kan vara allt ifrån minimal värmekonduktion till maximal styvhet. Det dominerande materialet för mekaniska konstruktioner idag är stål, detta på grund av dess goda mekaniska egenskaper, formings- och fogningsmöjligheter och lågt pris (Johannesson et al., 2013, s.369). Ökningstakten för aluminium och polymera material är dock stor och produceras i allt större takt (Johannesson et al., 2013, s.364).

Valet av material för att göra en lättviktskonstruktion kommer till stor del att påverkas av designförutsättningarna samt de sammanlagda lastfallen för produkten. För att en konstruktion ska bli så lätt som möjlig ter det sig självklart att minimalt med material behöver användas. Genom att enbart minska sektionsarean för en del av konstruktionen kommer vikten att minskas proportionellt mot materialets densitet. För att spara så mycket vikt som möjligt är målet alltså att hitta den optimala geometrin för att uppnå den maximala lastningskapaciteten per använt material (Seyfried, Taiss, Calijorne, Li, & Song, 2015, kap.3).

Analyseras simpla belastningsfall (t.ex. enbart dragning, böjning eller vridning) kan en markant viktminskning göras med aluminium jämfört med stål. För ett ihåligt cirkulärt rör kan aluminium jämfört med stål i vridning samt böjning åstadkomma en viktminskning på 50% med samma prestanda. Aluminiumprofilen kommer dock ta 1.4 gånger så stort utrymme. Vid vridning av ett solitt rör kräver aluminium ett tre gånger så stort utrymme för att uppnå samma hållfasthet som stål och kommer då ha samma massa som ett stålrör. Vid dragprov och 3 punktsböjning kan en 80% viktminskning med aluminium uppnås. Samma minskning kan dock också göras med ett martensitiskt höghållfasthetsstål som då även minskar utrymmet som används med 80%, aluminium minskar utrymmet med 40% (Wohlecker & Henn, 2008).

En lättviktsstudie av ThyssenKrupp Steel Europe visar på att avancerade hög hållfaststål kan åstadkomma samma viktreduktion som en avancerad aluminium design (Seyfried et al., 2015, s.20-23), detta vid halva kostnaden. Det finns alltså inget entydigt svar om vilken metall som kan uppnå den lättaste konstruktionen sett till likvärdig hållfasthet utan avgörs i vilken applikation materialet används.

2.4.1 Sandwichmaterial

Sandwichmaterial är en materialkonstruktion som består av minst två olika material. En inre kärna med låg densitet fästs mellan två ytskikt av ett annat material. Ytskikten kan utgöras av komposit eller metalliska material. Kärnan kan bestå av polymerskum eller fibrer, metall i bikakastruktur eller exempelvis balsaträ (Grenestedt, 2005). Kombinationen av olika material är ändlös och vilket material som bör användas avgörs av applikationen.

Användningen av sandwichmaterial har på senare tid ökat i snabb takt. I applikationer där hög prestanda och låg vikt är två viktiga faktorer är användningen utbredd. Konstruktioner där dessa faktorer är centrala fortsätter att öka, likaså utvecklingen av sandwichmaterial. Användningsområden idag är bland annat satelliter, flygplan, skepp, bilar, tågagnar, vindkraftverk och till och med broar för att nämna några applikationer (Vinson, 2005).

Resultatet av att kombinera material på detta sätt ger lätta men samtidigt styva konstruktioner. Paneler utav sandwichmaterial kan uppvisa en stor böjstyvhet. Detta då den inre kärnan fungerar som ett balkliv och ökar panelens yttre böjstyvhet. Det mellanliggande materialet gör även materialet skjuvstyvt (Johannesson et al., 2013, s.396).

2.5 Värde modellen

Värde modellen är en industriellt verifierad arbetsmetod som används i utvecklingsprojekt. Metoden har för avsikt att ge en tydlig processtruktur på projekt avseende t.ex. produktutveckling. Ett antal sedan tidigare kända produktutvecklingsmetoder (som t.ex. funktionell modellering, Pughs matris etc.) sätts ihop i en holistisk process med utgångspunkt i det centrala begreppet *kundvärde* (Chalmers, 2016). De övergripande stegen i Värde modellen kan sammanfattas som följande:

Steg 1: Etablera projektet

Inledningsvis fastställs de interna spelreglerna som gäller i gruppen, tilldelande av roller och ansvarsområden. En projektdefinition formuleras innehållande en verbal målformulering, en leveranslista och avgränsningar för projektet. En projektplan skapas bestående av en milstolpeplan.

Steg 2: Beskriv produkten

Följdaktligen identifieras var möjligheterna att skapa kundvärde finns. För att få en bättre översikt av funktionerna delas de in i huvud-, tilläggs-, stöd-, och oönskade funktioner. Därefter sker en analys av produktens position på den s.k. *S-kurvan* (Sood, 2010).

Steg 3: Kartlägg kundens röst

I detta steg analyseras kundens önskemål och krav på produkten. Deras inbördes ordning fastställs i den mån detta är möjligt. Intervjuer förespråkas i detta ändamål.

Steg 4: Analysera alternativa lösningar

Utbudet av existerande lösningar dokumenteras, här används internet och patentdatabaser med fördel. Därefter fastställs en referens genom att kombinera de bästa elementen ur de identifierade koncepten. Därefter tas en funktionsbaserad kravspecifikation fram.

Steg 5: Skapa ett vinnande koncept

I detta skede genereras ett antal koncept med potential till högre kundvärde än referensen. Detta görs med hjälp av brainstorming och följande funktionella strategier:

- Re-use, återanvändning av existerande delsystem.
- Re-fine, förfining av existerande delsystem. Karaktäriseras av en gradvis optimering av produkten.
- Re-duce, eliminering av svaga delsystem som inte väsentligt påverkar funktionen. Här rekommenderas Triz (Savransky, 2000) eller DFMA (Bayoumi, 2000).
- Re-inforce, förstärkning av produkten i form av nya komponenter som ger tydligt mervärde för kunden.
- Re-form, nyskapande av produkten som radikalt förbättrar kundvärdet.
- Re-place, ersättning av gamla delsystem och s.k. *quick-fixes* d.v.s. temporära lösningar.

De mest lovande koncepten vidareutvecklas med rudimentära skisser och vid behov enklare beräkningar. Sedan sällas koncepten ned till de mest lovande genom förslagsvis en konceptvalsmatris (t.ex. Pugh, Kesselring). Slutligen korsbefruktas koncepten och det mest lovande konceptet väljs ut.

Steg 6: Skriv den slutgiltiga kravspecifikationen

I detta steg fastställs en kravspecifikation på klassiskt vis (Johannesson et al., 2013, s.150). Här betonas i synnerhet vikten av mätbarhet och en tydlig koppling till kundvärdet som tidigare definierats. Om kundvärdet inte överstiger referensens kundvärde bör processen eventuellt återgå till steg 3.

Steg 7: Konstruera konceptet

I detta steg görs en övergripande systemarkitektur och gränssnitten mellan delsystem beskrivs. Kritiska delsystem konstrueras först. En analys av hur olika delsystem på bästa sätt tillverkas görs. Detta steg inkluderar även grova kostnadsuppskattningar av respektive delsystem och även konceptets totalkostnad.

Steg 8: Verifiera och utvärdera konceptet

En fysisk modell tas fram för att skapa förståelse av dess funktionalitet. Modellen kan också användas för att verifiera kravuppfyllelse genom praktiska experiment. Denna verifiering sker lämpligen också med hjälp av FE-modellering

Steg 9: Presentera och dokumentera

Slutligen presenteras projektets resultat för de relevanta intressenterna. Dokumentation sker, ofta i form av en rapport. Värde modellen förespråkar även reflektion över vad arbetsgruppen har lärt sig och vilka förbättringar som kan göras till nästa projekt.

3 Metod

Metodkapitlet redogör för hur arbetet är upplagt, utfört och vilka metoder som används. En processkarta med den övergripande metodiken som har använts i arbetet kan ses i figur 7 nedan.

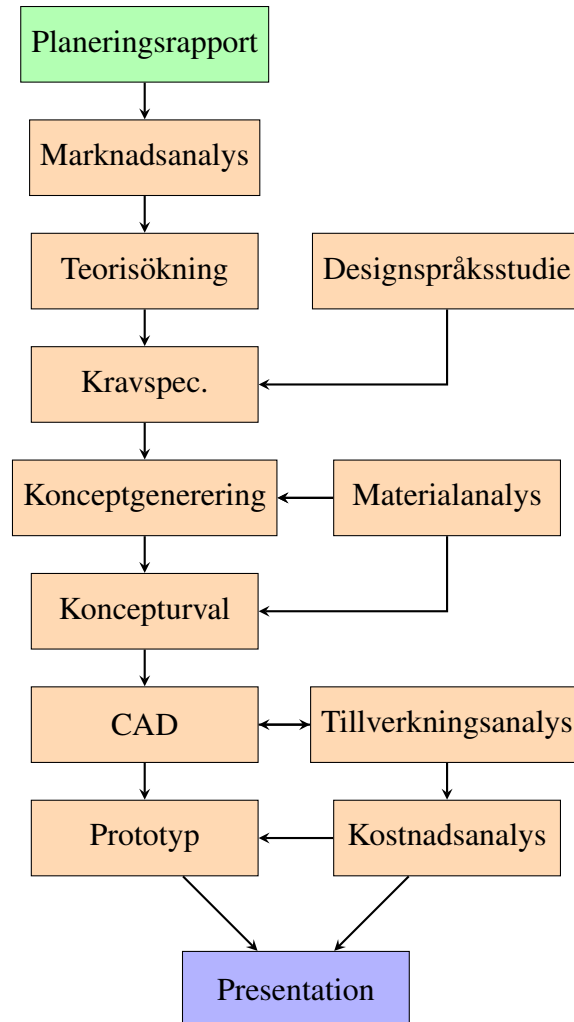


Fig. 7: Processkarta

3.1 Planeringsrapport

Planeringsrapportens funktion är att beskriva vad som ska göras och hur det ska utföras. Syftet och frågeställningen preciseras och en övergripande tidsplan bestäms (Chalmers, 2015). I det här fallet används ett Gantt-schema (Johannesson et al., 2013, s.659) för detta ändamål.

3.2 Marknadsanalys

Marknadsanalys är ett viktigt initialt steg i produktutvecklingsarbetet. Målet är att få en överblick av marknaden för liknande produkter och de sökta data kan generellt delas in i följande kategorier (Johannesson et al., 2013, s.100):

- Kundkategorier/marknadssegment, indelning av marknaden i olika delar eller segment. Exempelvis på geografisk region eller premium- respektive budgetsegment.
- Marknadspotential, hur stor potentialen är för produkten i en viss marknad, ofta uttryckt i värde. Kan variera kraftigt beroende på vilka antaganden som görs.
- Marknadspenetrering, till vilken del potentialen förväntas resultera i faktiskt försäljning.
- Marknadsandel, fördelningen av marknaden mellan de olika aktörerna.

Uppdraget i det aktuella projektet var inte huvudsakligen att bestämma huruvida (eller till vilken grad) en marknad finns för produkten. Uppdraget var snarare konstruktionen och förbättringen av en existerande lösning som en dag eventuellt introduceras på marknaden (se kap 1.4). Därav består marknadsanalysen inte av en kvantitativ indelning av data i ovanstående kategorier utan snarare av en kortfattad fallstudie av några utvalda produkter från tänkbara konkurrenter. Dessa produkter skiljer sig dock avsevärt då de inte åker på ett conveyer band utan snarare klassificeras som del av den bredare produktkategorin "AGC". Syftet var således att få en överblick av AGC-marknaden och studien gör därför inte anspråk på att vara någon komplett marknadsanalys. Informationen som sammanställdes i analysen är till stor del hämtad från producenternas hemsida eller hemsidor av återförsäljare. Fokus ligger på funktionella aspekter snarare än pris eftersom en sådan jämförelse ligger utanför projektets omfattning.

3.3 Teorisökning

Teorisökningen har syftet att finna relevant litteratur för att finna akademiskt stöd i slutsatser och resonemang. Den används också för att med akademisk hederlighet hänvisa till andras idéer. Rent praktiskt har teorisökningen utförts i databaser som innehåller akademisk litteratur. Ofta används relevant nomenklatur som sökord för att finna passande material.

3.4 Kravspecifikation

Att upprätta en kravspecifikation är ett måste vid utveckling av en ny produkt. Kravspecifikationen innebär att sätta sig in i produkten som är under utveckling och samla in erforderlig kompletterande information som saknas i uppdragsbeskrivningen. I kravspecifikationen ska alla krav och önskemål för produkten som utvecklas bestämmas för att enkelt kunna få en överblick av vad det är som ska uppnås. Alla krav och önskemål ska ha ett målvärde och en metod som kan verifiera att målvärdet uppnås. Enligt (Johannesson et al., 2013, s.150) är syftet med en kravspecifikation:

- Konkretisera problemformuleringen.
- Säkerställa att hänsyn tas till alla intressenter, livscyklifaser och aspekter.

- Ge alla engagerade i projektet en enhetlig syn på projektets mål.
- Underlätta styrning av utvecklingsarbetet.
- Stödja sökning av lösningsalternativ och styra val av lösning.
- Ge beslutsunderlag för modifiering av kriterier.

3.5 Konceptgenerering

Med hjälp av tidigare studier från marknadsanalys, teorisökning och skapandet av kravspecifikationen kan olika typer av koncept skapas. Koncepten skapas med kreativa samt systematiska metoder för att skapa en stor mängd med koncept som senare kan bedömas i koncepturvalet. Vid konceptgenereringen användes följande metoder.

Brainstorming används som metod för att bilda en uppfattning om eller skapa en lösning på ett problem. Metoden kan användas både muntligt och skriftligt för att generera idéer. Viktigt är att alla förslag som skapas inte bedöms eller censureras för att skapa en stor mängd lösningar (Nationalencyklopedin, 2018).

En morfologisk matris används som en systematisk metod för att generera fler koncept (Johannesson et al., 2013, s.174). Arbetslaget delar in och skapar delfunktioner, där varje delfunktion har sina dellösningar. På detta sätt kan nya koncept skapas genom att dra polygoner (linjer) genom matrisen eller redovisas i en separat matris under. Nu kan nya genererade totallösningar sorteras för att se så att de uppfyller kravspecifikation och att de är geometriskt och fysikaliskt genomförbara. Alla totallösningar som inte har en rimlig lösning borde elimineras direkt.

Lättare skisser av koncepten skapas för visa det tänkta utseendet (Nationalencyklopedin, 2018). Detta görs för att förstå och kunna värdesätta de olika koncepten som skapas.

3.6 Koncepturval

Utvärderingsprocessen av koncepten har skett i enlighet med (Johannesson et al., 2013, s.181) i tre övergripande steg:

1. Sällning av de koncept som inte uppfyller kraven (eller som är för lika andra koncept. Detta görs med hjälp av en elimineringsmatris, se nedan.
2. *Concept screening* enligt Pugh där koncept som har gått vidare från förra steget jämförs med referensen på ett antal kriterier. I andra omgången av Pugh används "vinnaren" i Pugh 1 som referensen.
3. *Concept scoring* enligt Kesselring där koncepten jämförs mot varandra med viktade kriterier.

Sällning av koncepten görs med hjälp av en elimineringsmatris. Elimineringsmatrisen klargör om de framtagna koncepten uppfyller följande:

- Löser huvudproblemet

- Uppfyller kravspecifikationen
- Realistisk
- Inom kostnadsram

Endast de koncept som uppfyller alla krav ovan går vidare. Finns inte all information för att kunna avgöra uppfyllnaden av kravet markeras detta och tilläggsinformation måste inhämtas innan konceptet kan gå vidare från elimineringsmatrisen. Elimineringsmatrisen tar även hänsyn till om ett koncept är för likt ett annat. Om olika dellösningar kan appliceras på samma huvudlösning går endast ett koncept med unik huvudlösning vidare, de resterande koncepten med samma huvudlösning anses som överflödiga och tas bort.

Vidare fortsätter utvärderingen av koncepten med en relativ beslutsmatris. I detta fallet i form av en Pugh matris. Denna metod reducerar antalet koncept genom att de sämsta alternativen sorteras bort. Det finns dock en möjlighet att nya goda alternativ tar form vid utvärderingen. Detta genom kombinationer av koncepten som utvärderas. De nya koncepten adderas då till den möjliga lösningsmängden.

I en relativ beslutsmatris sker urvalet av koncepten genom en jämförelse relativt en referenslösning. Referenslösningen kan utgöras av vilket av lösningsalternativen som helst men lämpligt är att välja en lösning som känns till väl. Möjligtvis en konkurrents lösning eller en egen redan existerande lösning. Kriterierna som urvalet grundar sig på tas från kravspecifikationen. Kriterierna ska täcka alla relevanta aspekter men fokus bör läggas på det kritiska problemet som produkten ska lösa, en tumregel är att maximalt formulera 15-20 st urvalskriterier. Vid behov kan närbesläktade detaljkriterier slås ihop till kriteriegrupper.

Utvärderingen görs sedan genom att urvalskriterierna och koncepten läggs in i matrisen. Varje koncept jämförs nu mot referenslösningen där konceptet anses ha en bättre, likvärdig eller sämre lösning på just det urvalskriteriet. Konceptet får +1 om det är bättre, 0 om det är likvärdigt och -1 om det är sämre. Ett nettovärde kan då räknas ut för varje koncept och koncepten kan rangordnas. Ytterligare en matris kan då ställas upp men denna gången med det högst rankade konceptet som referenslösning. Om det verkligen är det mest lämpade alternativet bör alla andra koncept denna gången hamna på ett nettovärde mindre än 0. Om inte bör en reflektion göras om varför detta inte var utfallet.

Ett problem med Pughs matris är hur uppfyllnaden av urvalskriterierna ska kunna uppskattas utan en fullständig design. Egenskaperna hos produkten kommer istället att baseras på en mänsklig uppskattning och inte enbart bygga på fakta.

I steget *concept scoring* används en Kesselring matris med viktning av kriterierna där en vikt av 5 antyder att ett kriterie är mycket viktigt och vikt av 1 betyder att något är mindre viktigt relativt de övriga kriterierna. I detta läge har arbetsgruppen tilldelat vikter baserat gruppens tolkning av intressenters uttalade prioriteringar och förväntningar. Samtliga koncept som har "överlevt" tidigare sällning finns listade i matrisen såväl som referenslösningen. Dessa koncept betygsätts på en skala 1-5 på varje kriterie där 5 är högsta betyg (Kesselring, 1951). En hypotetisk ideallösning

som får högsta betyg på varje kriterie finns i matrisen och agerar som ett tänkbart optimum. Varje enskild lösning tilldelas ett betyg som multipliceras med viktning på det aktuella kriteriet och dessa summeras därefter ihop för att ge en totalpoäng som framgår i matrisens lägsta rad. Om ett koncept får ett hög totalpoäng relativt de övriga koncepten antyder det att detta koncept är mest lovande. Matrisen bör ses vägledande, som en basis för diskussion snarare än starkt bevis för ett koncepts överlägsenhet. Detta är eftersom Kesselring-matrisen, likt Pughs matris, baseras på mänskliga bedömningar till skillnad från enbart fakta (Raudberget, 2010).

3.7 Materialanalys- och val

En materialvalsprocess presenteras i Ashby, Shercliff, Cebon (2014, kap.3). Första steget i processen utgörs av en översättning av produkten där funktion, lastfall, krav, målfunktion och fria variabler klargörs. Funktionen innebär vad produkten ska kunna utföra och på vilket sätt. Vilka lastfall produkten utsätts för måste förtydligas för att vidare kunna analysera påfrestningarna som materialet ställs inför vid användning av produkten. Utifrån detta kan icke-förhandlingsbara, numeriska krav på materialets mekaniska egenskaper tas fram för att påbörja en selektion av lämpliga material där olämpliga material slås ut. Mekaniska krav kan till exempel vara minimum för elasticitetsmodul, sträckgräns och/eller brottseghet. Andra krav på materialet utöver mekaniska egenskaper kan även ställas som miljöpåverkan, elektrisk konduktivitet och så vidare. Målfunktionen för materialet innebär vad som ska optimeras vid materialvalet. Det kan till exempel vara att produkten ska vara så lätt och styv som möjligt eller så stark som möjligt till det minsta möjliga priset. Målfunktionerna är ofta i konflikt med varandra vilket kräver en avvägning. Denna avvägning stöds av vad som är viktigast i projektet.

3.8 Tillverkningsanalys

Hur slutproduktens komponenter är tänkta att tillverkas kommer längs projektets gång att genomsyra produktutvecklingsarbetet. Så att när slutkonceptet är färdigt ska minimalt med ändringar behöva göras för att slutprodukten ska kunna tillverkas. Val av tillverkningsmetod kommer att starkt påverkas av pris där investeringar för t.ex. verktyg får vägas mot det slutgiltiga priset för komponenten. Vissa komponenter kan även tänkas behöva förändras för att möjliggöra en specifik tillverkningsmetod. Val av material kommer också påverka vilken metod som kan vara lämplig.

3.9 Miljöanalys

En översiktlig miljöanalys görs i syfte att verifiera de miljörelaterade kraven i kravspecifikationen. I denna analys berörs de relevanta kriterierna som framgår av kravspecifikationen varpå data hämtas om material och en uppskattad materialåtgång av den färdiga CAD-modellen. Eftersom vikten på den färdiga produkten och materialåtgång inte är detsamma, material förloras i tillverkning, så bör siffrorna tas som en uppskattning snarare än absolut sanning.

3.10 Kostnadsanalys

Vid kostnadsanalys studeras produktens kostnader från idé till färdig produkt. Kostnadsanalysen beräknar kostnader på: material, bearbetningskostnader, investeringar i verktyg och monteringskostnader. Kostnadsanalysen bortser från utvecklingskostnader och inkluderar bara kostnader på sådant som har att göra med tillverkningen. Kostnadsanalysen studerar 500 enheter och verifierar sedan om större volymer skulle vara möjligt med rimliga kostnader.

3.11 Modell/Prototyp

Att en prototyp konstrueras kan ha olika ändamål beroende på vad som skall studeras. Enligt (Johannesson et al., 2013, s.124) finns följande syften till skapande av en prototyp.

- Virtuellt prototyputförande: Använder sig av en dator där prototypen modelleras och simuleras för att skapa en virtuell modell som kan studeras i olika vinklar eller hur olika komponenter samverkar till varandra. Detta görs i ett CAD-program (Computer Aided Design). För att studera prototypens prestanda kan man använda CAE-program (Computer Aided Engineering). Bra med CAD- och CAE-program är att modeller skapas parametrisk vilket möjliggör att prototypen snabbt kan testas med olika varianter till geometri eller påfrestningar.
- Mock-up: är en fysisk modell som visar utseende, ytegenskaper och färg.
- Funktionsprototyp: är en prototyp där en ny lösning testas i ett laboratorium för att säkerställa att prototypen löser problemet.
- Nollserie: är fullständiga prototyper som är lämpade att testas för serieproduktion och fältprov.
- Prototyp för ”slaktprov”: här testas prototypen till överbelastning så att en förstörelse sker.

4 Utförande och resultat

I detta kapitel behandlas utförandet av projektet i kronologisk ordning och redogör för centrala moment i arbetets gång. Ett antal analyser presenteras vilka ligger till grund för projektets slutsatser.

4.1 Kravspecifikation

Vid projektets uppstart skapades en kravspecifikation för att klargöra vilka krav samt önskemål som slutprodukten ska uppnå, den kan ses nedan i tabell 1. Kravspecifikationen har under tiden projektet varat fyllts på med fler kriterier för att fullständigt innefatta alla aspekter som måste tas i åtanke vid verifiering av slutprodukten.

Kriterier	Målvärde	K/Ö	Viktning	Verifieringsmetod	Referens (kravställare)
Funktioner			(1-5)		
Fixering av komponenter		K	5	CAD-modell	Intern
Skydd för komponenter (omsluter komponenter)		K	4	CAD-modell	Intern
Tillåta monteringsoperationer och laster		K	5	FEM, spec. ritning och tillverkningsmetod	FlexLink
Erbjuda modularitet (flexibel för olika produktstorlekar)		Ö	3	CAD-modell	FlexLink
Möjliggöra transport på XT-system samt fabriksgolv		K	5	CAD-modell	FlexLink
Prestanda					
1.1 Punktlast i mitten av paletten, 1000 N	Ej plasticering	K	5	FEM	FlexLink
	Max 1 mm utböjning	K	5	FEM	FlexLink
Miljö					
2.1 Ej miljöfarliga material	Ej giftigt	K	3	CES Edupack	Intern
	Ej ekotoxiskt	K	3	Naturvårdsverket	Intern
2.2 Återvinningsbart material	80% av vikt för ram och skal	Ö	2	CES Edupack	Intern
2.3 Uppskattad CO2-utsläpp för ram och skal (produktion av material)	<150 kg CO2 per enhet	K	3	CES Edupack	Intern
2.4 Uppskattad energikonsumption för ram och skal (produktions av material)	<1500 MJ per enhet	Ö	3	CES Edupack	Intern
Livslängd					
3.1 Livslängd	10 år	Ö	3	Analys av felanmälda produkter	Intern
Underhåll					
4.1 Tillåta underhåll utan omfattande demontering	Åtkomst till alla komponenter <10 min	K	4	CAD-modell	Intern
4.2 Inte kräva specialverktyg för (de)montering		Ö	3	CAD-modell	Intern
Tillverkningskostnad					
5.1.1 Liten produktion	<5000kr/enhet	Ö	4	Kostnadsuppskattning	Intern
5.1.2 Mellanstor produktion	<3500kr/enhet	Ö	4	Kostnadsuppskattning	Intern
5.1.3 Stor produktion	<2500kr/enhet	Ö	4	Kostnadsuppskattning	Intern
Tillverkningsanläggning					
6.1.1 Liten produktion	100 st/år				
6.1.2 Mellanstor produktion	500 st/år				
6.1.3 Stor produktion	2500 st/år				
Storlek					
7.1 Underrede dimensionerat mot conveyerband	640x400 mm	K	5	CAD-modell	FlexLink
7.2 Parallellitetstolerans underrede	0.8 mm	K	5	Spec. i ritning och tillverkningsmetod	FlexLink
7.3 Hjulbredd (distans mellan hjulens yttersidor)	320 mm	K	5	CAD-modell/ritning	FlexLink
Vikt					
8.1 Totalvikt (för hela AGC:n + last)	Max 30 kg	K	5	CAD-modell exkl. last	FlexLink
8.2 Målvikt ram	<1.5 kg	Ö	5	CAD-modell exkl. last och komp.	Intern
Estetik					
9.1 Ha basis i designstudie		Ö	3	Se rapport	FlexLink & Intern
Material och ytbehandling					
10.1 Korrosions-motståndigt		K	3	CES Edupack	Intern
10.2 Alla delar elektriskt konduktiva	>5 S/m	K	5	CES Edupack	FlexLink
Säkerhet					
11.1 Inga vassa kanter	Yttre radier >5 mm	K	3	CAD-modell	Intern

Tab. 1: Kravspecifikation

4.2 Konceptgenerering

Med stöd från produktbeskrivning och skapad kravspecifikation skapades koncept. Till en början användes brainstorming som metod för att generera koncept. Här skapades en mängd olika koncept utan att ta hänsyn till om de är realistiska eller ej. De genererade koncepten från brainstormingen beskrevs sedan i skisser, vilket gav en förtydligande bild för dess funktion och utseende så att alla i arbetsgruppen kan värdera de olika koncepten. För att sedan generera fler koncept användes en morfologisk matris (se kap 3.5). Matrisen delades in i delfunktioner och olika dellösningar för hur delfunktioner kan lösas. Genom att kombinera de olika dellösningarna togs till sist 13 st unika koncept fram.

Delfunktioner	Dellösningar					
	A	B	C	D	E	F
1. Bära last	Fackverk	Centrerade pelare	Hörn-triangular	Skivor	Bockade balkar	Rundade hörnpelare
2. Fixering av ram	Svets	Skruv-förband	Lim	Nit		
3. Tillåta pressoperation	Last tas upp av ram	Interna pelare				
4. Fixera inre komponenter	Bottenplatta	Ram	Pallett			
5. Skydda komponenter	Kaross	Utförs av chassi				

Tab. 2: Morfologisk matris

Koncept	Valda lösningar				
K1. Gendes	1C	2B	3A	4A	5A
K2. Gendes 2	1C	2B	3B	4A	5A
K3. Interna pelare	1E	2B	3B	4A/B/C	5A
K4. Flat circle	1F	2B	3B	4A	5A
K5. Interna pelare 2	1A	2B	3B	4A	5A
K6. Hybrix skivor	1D	2B/C	3A	4A	5A
K7. X-nator	1B	2A	3A	4A	5A
K8. Hybrix bockad	1E	2C/D	3A	4B	5A
K9. Hybrixlåda	1E	2D	3B	4A	5B
K10. 2x centrerade pelare	1B	2A	3A	4C	5A
K11. Wireframe	1A	2A/B	3A	4C	5A
K12. Styv kaross a/b	1D	2A/B	3A	4B/C	5A
K13. Cat a/b/c	1E	2A/B	3A	4A/C	5B

Tab. 3: Valda lösningar från morfologisk matris

Nedan visas några bilder av de genererade koncepten. Koncepten som visas nedan beskrivs för att

visa en del av tankegången vid konceptframtagningen, alla kan inte tas med p.g.a. längdbegränsningar.

Interna pelare (se figur 8) är ett koncept på hur kraften från pressoperationen undviker att gå igenom ramen av AGC:n.

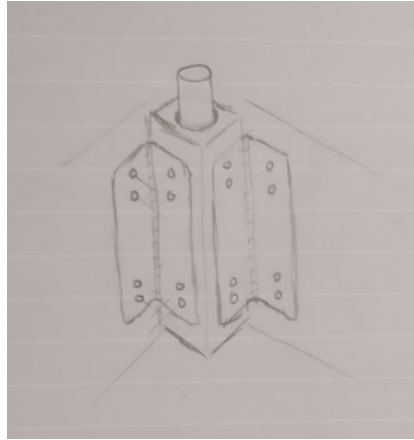


Fig. 8: Skiss Interna Pelare

Konceptet bygger på att under pressoperationen (lastfall 3 i kapitel 1.5) skall domkraftens tryckpunkter trycka på pelare som löper genom AGC:n. Pelarna lyfter i sin tur upp topplattan. Kraften tas upp av de interna pelarna och ramen behöver inte dimensioneras utefter lastfall 3, vilket innebär att en lättare ram skulle kunna konstrueras. Eftersom AGC:n innehåller många elektriska komponenter byggs ramen runt dessa komponenter istället. En annan lösning är att pelarna istället finns på lyftdonet och går igenom AGC:n vid pressoperationen. AGC:n skulle då bara behöva optimeras för lastfall 1 och 2 vilket är två mindre kritiska lastfall. Interna pelare möjliggör också att topplattan lätt kan bytas om ett företag har olika fixturer monterade på topplattan.

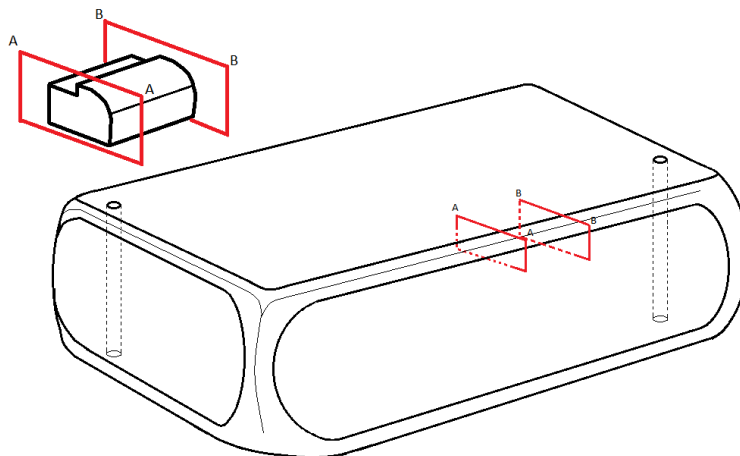


Fig. 9: Skiss Flat Circle

Flat circle är ett koncept som är designad efter att vara estetiskt tilltalande. Konceptet använder sig av tekniken från interna pelare som presenteras ovan. Ramen till konceptet kan dimensioneras efter

att bara klara lastfall 1 och 2 (se kap 1.5) och öppnar möjligheten till att använda andra material än metall.

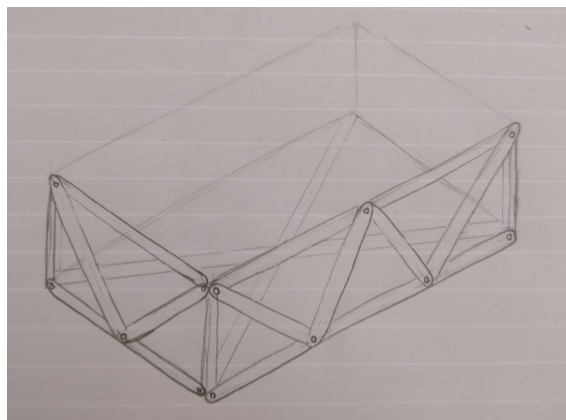


Fig. 10: Skiss Lyftkranskonceptet

Lyftkranskonceptet (se fig.10) är ett koncept som använder sig av en fackverkskonstruktion som ram. Konceptet har fått inspiration från lyftkranar som kan tydas från konceptets skiss. Konceptet är tänkt att vara bra mot tryckkrafter men också skjuvkrafter genom att placera 45° stöttor mellan de horisontella pelarna.

4.2.1 Generativ design

I konceptgenereringsfasen användes generativ design som ett komplement, dels för att generera ideér till koncept samt för att förbättra framtagna koncept. Programvaran som användes var Autodesk Inventor och verktyget "Shape generator". Processen börjar med att i Shape generator sätta ut lastfall och restriktioner för en rudimentär modell. Shape generator kan då, genom att iterera beräkningar för modellen, ta bort material som den anser inte bidrar till att göra modellen styv. Ett exempel på arbetsgången av detta kan ses i följande figurer, 11 - 16.

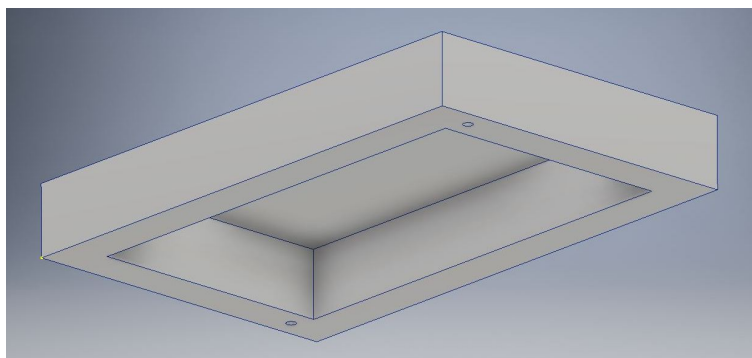


Fig. 11: Steg 1, ursprunglig CAD-modell för K1 Gendes

Figur 11 visar den ursprungliga modellens geometri som kördes i Shape generator. En punktkraft placerades i mitten av topplattan och i de två hålen på undersidan som syns i figuren lades en

restriktion mot rörelse i x,y och z riktning. Över hela toppplattan lades en så kallat "Preserved region" vilket gör att materialet innanför detta område inte kan tas bort vid körningen. Denna modell gjordes innan projektgruppen fick informationen om att lyftet vid pressoperationerna skulle utföras av en pneumatisk domkraft. Tanken var att AGC:n istället skulle lyftas upp av två cylindrar där hålen på undersidan är placerade. Då shape generator var klar gav den geometrin som visas i figur 12 nedan.

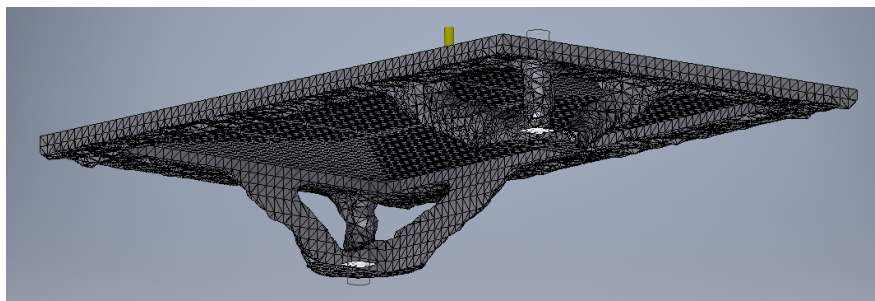


Fig. 12: Steg 2, utfallet av verktyget Shape Generator i Autodesk Inventor

Modellen i figur 12 visar hur material på bästa sätt ska disponeras utifrån den givna kraften och modellens restriktioner för att uppnå en så hög styvhet som möjligt. Detta med en total viktminskning på 70%. Då modellen i figur 12 är aningen abstrakt användes den som stöd för att konstruera ett koncept. Modellen från figur 11 sammanslogs med modellen från figur 12 så att material enkelt kunde skäras bort. Resultatet av detta kan ses i figur 13.

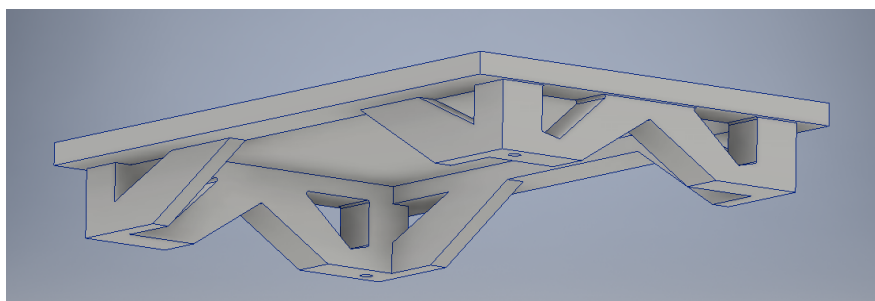


Fig. 13: Steg 3, koncept 1 Gendes

Modellen gjordes symmetrisk så att de tänkta lyftcylindrar skulle kunna användas på både kort- och långsidorna. Shape generator användes även för att optimera lite mer arbetade koncept. Ett av koncepten (K12b) som är uppbyggt av skivor kördes i shape generator och resultatet kan ses nedan i figur 14.

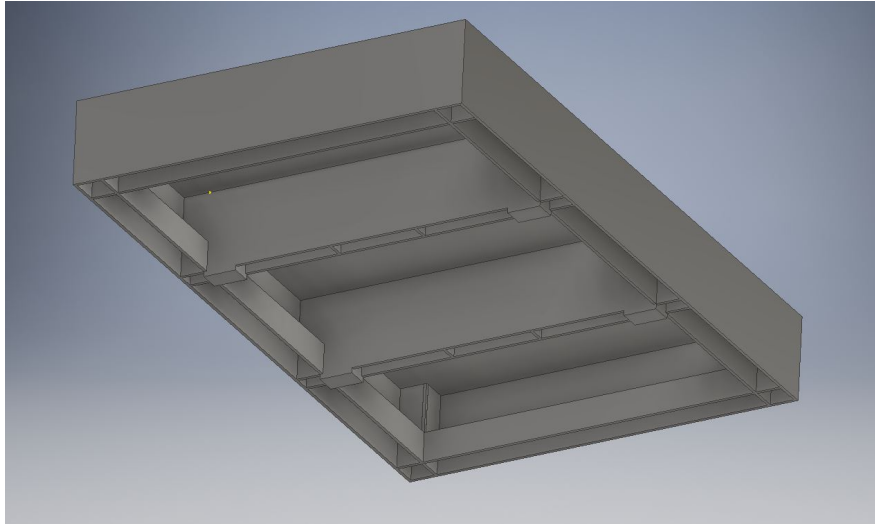


Fig. 14: Steg 1, CAD-modell av ursprungsgeometri, K12b.

I figur 14 syns den ursprungliga geometrin som kördes i shape generator. Samma lastfall som innan användes, här låstes dock modellen fast i de fyra solida rektanglarna på undersidan. Figur 15 ovan visar resultatet av körningen, här är även stödpunkterna för domkraften utmarkerade. De mörkgrå partierna är från ursprungsgeometrin och de ljusgrå det som shape generator har tagit bort. Från figuren kan ses att mittpartiet av de mittplacerade skivorna samt de inre skivorna längs undersidan ej bidrar så mycket till att göra modellen styv.

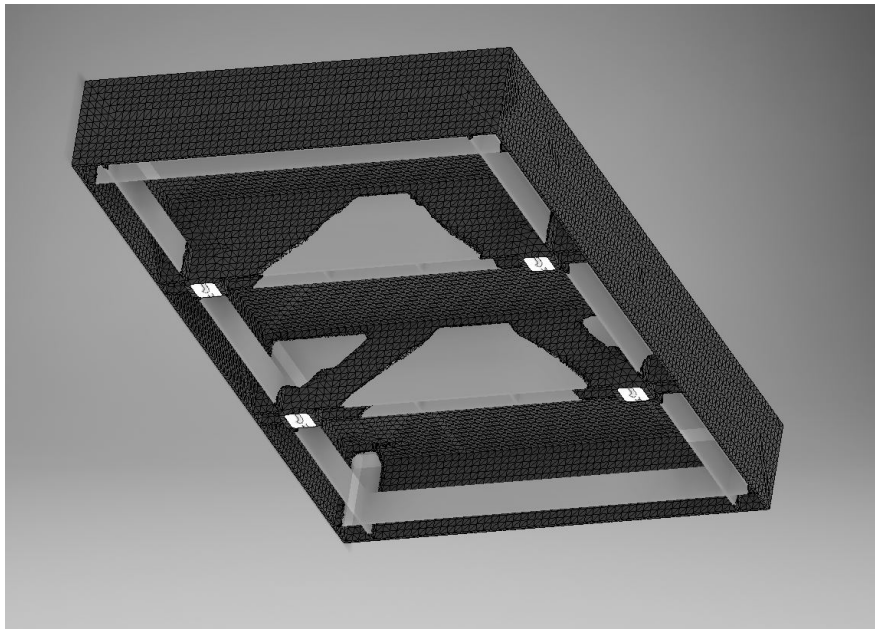


Fig. 15: Steg 2, resultatet av shape generator.

Då tanken med de inre skivorna längs undersidan var att kunna fästa plastlisterna som ska ha kontakt med conveyor-bandet vid transport behölls dessa. En viktminskning kunde dock åstadkommas genom att minska skivorna i mitten. Slutkonceptet ses i figur 16 nedan.

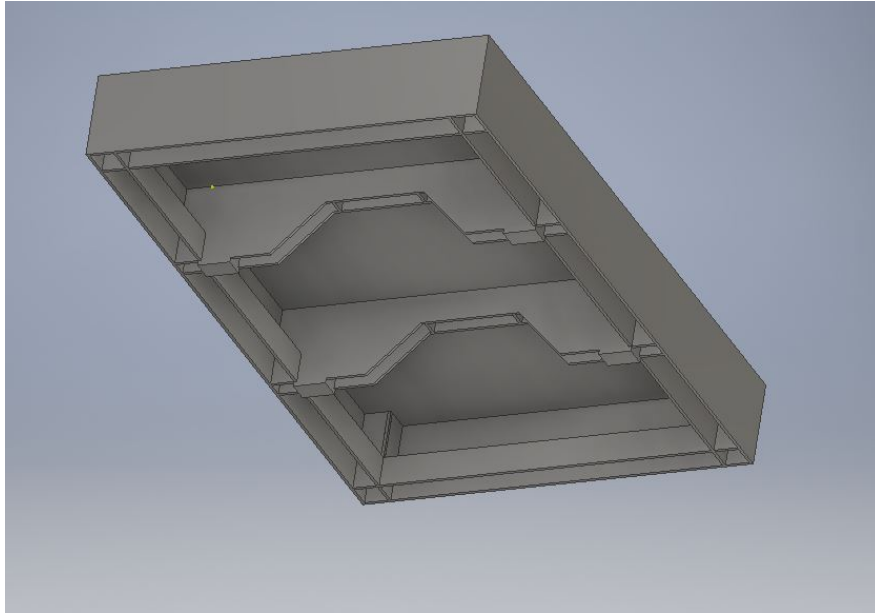


Fig. 16: Steg 3, slutkoncept efter shape generator.

4.3 Koncepturval

Då samtliga koncept hade genererats nådde projektet nästa skede, d.v.s. urval och sållning av dessa koncept. Som beskrivet i kapitel 3.6 var det övergripande arbetsflödet att först föra in koncepten i en elimineringsmatris där redundanta och orealistiska koncept sållades ut, se tab. 4 nedan.

Lösning:	Löser huvudproblem:	Uppfyller krav:	Realistisk:	Inom kostnadsram:	Kommentar:	Beslut:
K1						
K2					Redundant	
K3					Redundant	
K4					Osäkerhet - intern pelare	
K5					Osäkerhet - intern pelare	
K6					Strukturell svaghet	
K7					Strukturell svaghet	
K8					Kostnad hybrix	
K9					Strukturell svaghet	
K10						
K11						
K12a						
K12b					Redundant	
K13a						
K13b					Redundant	
K13c					Redundant	

Tab. 4: Elimineringssmatris

Som det framgår av tabell 4 stryks ett antal koncept (de som har röd färg under kolumnen ”beslut”). Den gula fälten betyder att det finns vissa osäkerheter och de gröna innebär att koncepten går vidare. Därefter skapades en Pugh matris med den existerande lösningen som referens, denna kallas Pugh 1, se tabell 5. Kriterierna som används genomgående i kapitel 4.3 är följande:

- **Vikt** (struktur ceteris paribus).
- **Antal komponenter** (strukturella komponenter, ej elektriska då dessa betraktas som konstanta, se kapitel 1.5).
- **Tillverkningskomplexitet**, definierat som hur avancerat teknik som krävs för att tillverka de olika komponenterna.
- **Monteringstid**, uppskattad tid för att montera ihop de individuella komponenterna till en färdig produkt.
- **Demonteringstid**, definieras här som den uppskattade tiden för att demontera produkten för att komma åt elektriska/drivande komponenter vid underhåll.

- **Tillverkningskostnad**, uppskattad kostnad för att framställa strukturella komponenter samt kostnad för montering (exkl. kostnad för inköp av material). Antar en produktionsvolym på <1000 enheter/år
- **Materialkostnad**, uppskattad kostnad för material.

Kriterium	Referens (AGC idag)	Koncept							
		K1	K4	K5	K8	K10	K11	K12a	K13c
Vikt	0	+	+	+	+	0	+	+	+
Antal Komponenter	0	+	+	-	0	+	-	+	0
Tillverknings- komplexitet	0	-	-	0	0	-	0	0	0
Monteringstid	0	+	+	-	+	-	-	-	-
Demonteringstid för underhåll	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tillverkningskostnad	0	-	0	0	-	0	-	-	-
Materialkostnad	0	0	+	+	-	0	+	+	+
Livslängd	0	0	-	0	0	0	0	0	0
Summa +		3	4	2	2	1	2	3	2
Summa 0		3	2	4	4	5	3	3	4
Summa -		2	2	2	2	2	3	2	2
Nettovärde		1	2	0	0	-1	-1	1	0
Rangordning		2	1	3	3	4	4	2	3
Vidareutveckling		ja	ja	ja	ja	nej	ja	ja	ja

Tab. 5: Pugh matris 1

Som det framgår i figuren ovan exkluderas koncept K10 från vidareutveckling, detta är på grund av att dess vikt inte är lägre än referensen. Detta är ett krav och därför accepteras detta koncept ej. Eftersom att koncept K4 fick högst poäng på Pugh 1 används den som referens i Pugh 2, se tab. 6 nedan.

Kriterium	Referens K4	Koncept							
		K1	K4	K5	K8	K10	K11	K12a	K13c
Vikt	0	0		-	0		0	0	0
Antal komponenter	0	+		-	0		-	0	0
Tillverkningskomplexitet	0	-		+	+		+	+	+
Monteringstid	0	+		-	-		+	+	+
Demonteringstid för underhåll	0	0		0	0		0	0	0
Tillverkningskostnad	0	-		-	-		-	-	-
Materialkostnad	0	-		-	-		-	-	-
Livslängd	0	+		+	+		+	+	+
Summa +		3		2	2		2	2	2
Summa 0		2		1	3		2	3	3
Summa -		3		5	3		4	3	3
Nettovärde		0		-3	-1		-2	-1	-2
Rangordning		1		4	2		3	2	2
Vidareutveckling	ja	ja		nej	ja		ja	ja	ja

Tab. 6: Pugh matris 2

Utfallet av Pugh 2 är att koncept K5 anses ha så låg poäng att den utesluts till nästa steg i urvalprocessen. Det sista steget är att föra in de återstående koncepten i en Kesselring-matris (se kap. 3.6), se matris i tabell 7 nedan.

		Ideal:	Koncept:						
Kriterier:	Vikt (1-5)	Betyg:	Referens:	K1	K4	K8	K11	K12	K13c
Vikt	5	5	2	3	4	3	5	4	4
Antal komponenter	2	5	2	4	2	2	2	3	4
Tillverkningskomplexitet	2	5	3	2	3	3	4	4	4
Monteringstid	2	5	3	4	2	2	2	3	3
Demonterings-tid	1	5	4	4	4	4	4	4	4
Tillverkningskostnad	4	5	3	3	4	3	2	3	3
Materialkostnad	3	5	3	3	3	2	3	3	3
Livslängd	2	5	4	4	2	4	4	4	4
Summa:	-	105	59	68	67	59	70	73	75

Tab. 7: Kesselringmatris

De tre koncept som fått den högsta utvärderingen i Kesselringmatrisen kan ses nedan i figur 17, med en kort efterföljande beskrivning.

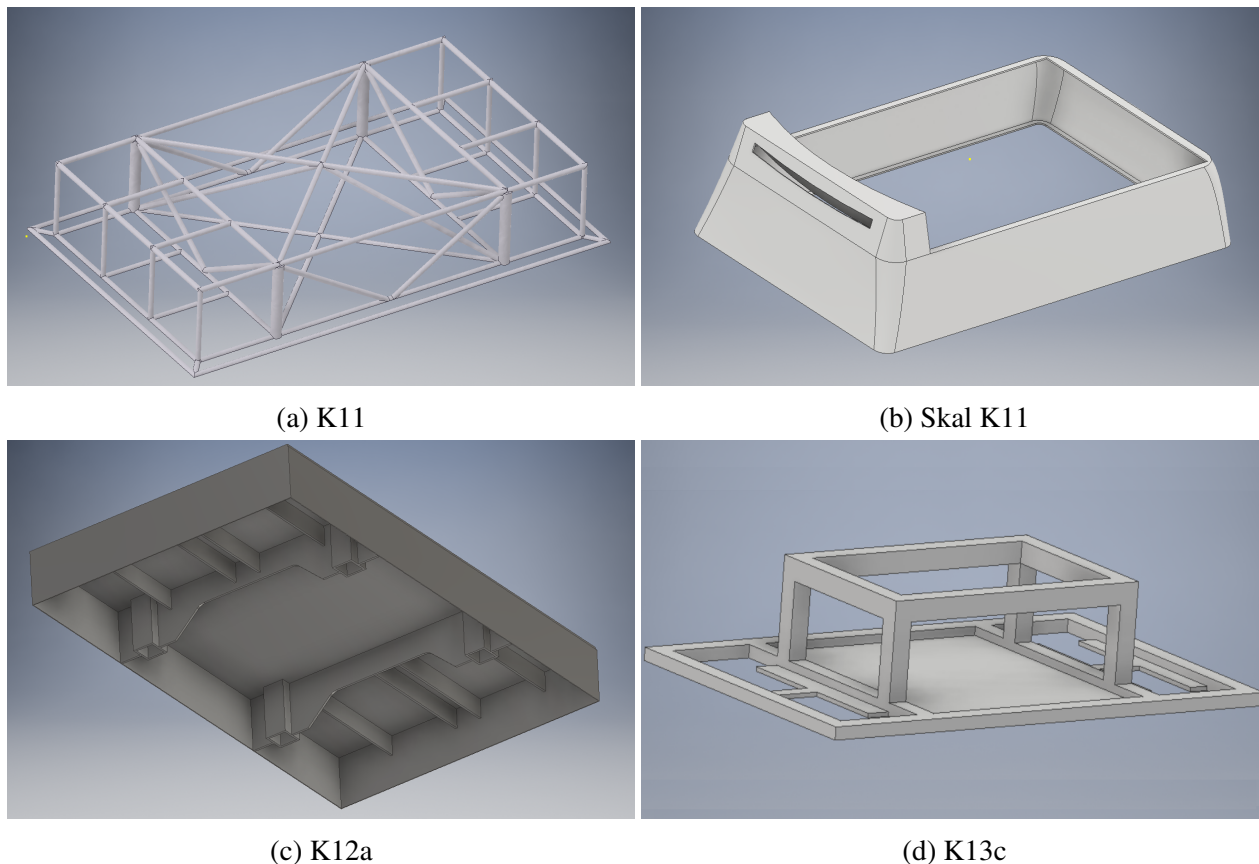


Fig. 17: De tre koncept med högst summa i Kesselringmatrisen

K11 består av ett fackverk, större pelare finns vid tryckpunkterna för domkraften och allt sammankopplas med smalare stänger för att sprida ut belastningen.

I K12a är tanken att karossen även ska användas som lastbärande struktur. De två längsta sidorna är sammansvetsade med två skivor som även har två fyrkantiga profiler där tryckpunkterna för domkraften är tänkta att vara. Ytterligare förstärkning finns mellan kortsidorna och skivorna i mitten för att styva upp konstruktionen samt är tänkt att kunna användas vid fixering av motorer. K12a skulle kunna vara en intressant applikation av ett sandwichmaterial som finns beskrivet kap. 2.4.

K13c består av fyrkantiga ihåliga profiler som svetsas samman. En inre ”bur” är tänkt att ta upp kraften vid pressoperationen och ramen i form av en rektangel längst ner ska möjliggöra transport på conveyor-bandet.

Enligt Kesselring-matrisen är det vinnande konceptet K13c men då utvärderingen som tidigare nämnt beror på uppskattningar av ej färdiga koncept väljs inte det vinnande konceptet som en direkt följd av resultatet i Kesselring-matrisen. Fokuset i projektet har hela tiden varit att ta fram en så lätt konstruktion som möjligt och projektgruppen anser då att koncept 11 är det mest lämpliga alternativet. Ett annat önskemål från FlexLink var att göra en estetiskt tilltalande produkt vilket K11 också uppskattas ha bäst möjlighet till. Koncept 11 har jämförts med de andra fler antal kompo-

nenter, en uppskattad högre tillverkningskostnad och monterings-tid. Trots dessa förmodade nackdelar väljs K11. Koncept 11 har även vid utvärderingen bestått av ett fackverk men en onödig mångfald av komponenter och har bedömts kunna bantas samt förenklas väsentligt. Kundvärde för ramkonstruktionen kan främst uppnås genom att minimera vikt, som alltså K11 bedöms kunna uppfylla bäst. Andra aspekter som kan öka kundvärdet är enkelhet vid underhåll, livslängd samt självklart pris. Underhåll är tänkt att utföras på samma sätt vid alla koncept och bedöms likvärdigt. Livslängden för de olika koncepten är svår att uppskatta men förutom K4 så anses de andra ha en likvärdig livslängd. Beslutet kommer då ner till att vikta en eventuell prisökning mot minskning i massa hos ramen och projektgruppen anser att K11 är den bästa kandidaten till en god slutprodukt.

4.4 Slutgiltigt koncept

Utveckling av det vinnande konceptet påbörjades genom att en simpel modell med endast nödvändiga stänger först modellerades i CAD. Tanken var att sedan addera stänger där det skulle visa sig behövas för att ytterligare styva upp konstruktionen. När den första modellen var klar visade det sig dock att den inte hade några problem med att klara det mest kritiska lastfallet. En förfining gjordes då istället där tjocklek och tvärsnitt på profilerna minskades så att endast så mycket material som är nödvändigt används. Efter varje förfining gjordes en utvärdering med hjälp av FEM för att se om konstruktionen fortfarande klarade belastningen, slutresultatet av modellen kan ses i figur 18.

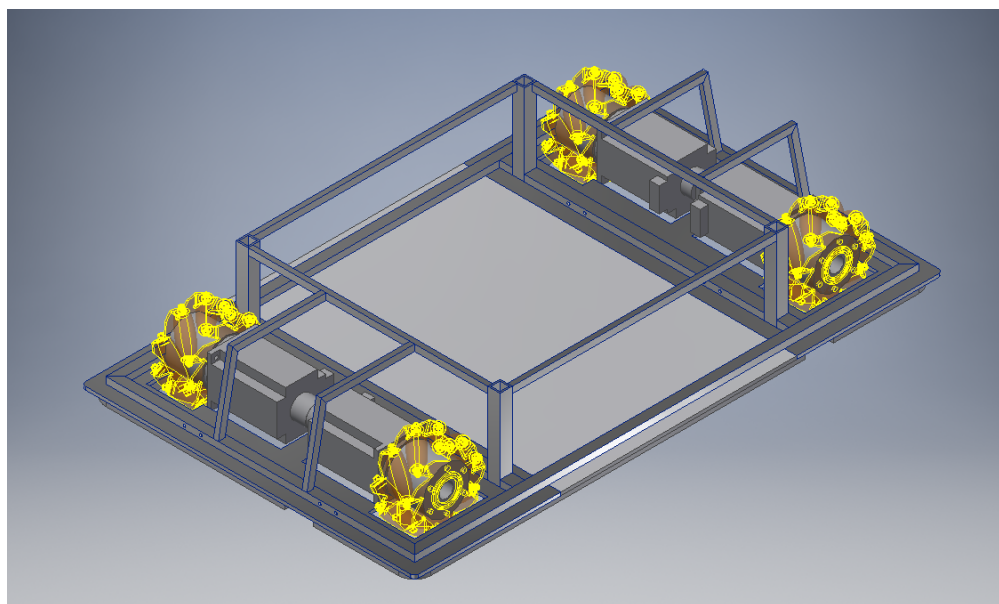


Fig. 18: Första modellen av slutkoncept

Som kan ses i figur 18 finns fyra kraftigare hörnpelare där domkraften är tänkt att trycka på undersidan. Dessa är sedan ihopkopplade med stänger längst upp och ner som tillsammans bildar en inre "bur". Runt om går en rektangel av ihåliga profiler som behövs för att dels ta upp belastning när AGC:n går på conveyor-bandet men även för att fästa bottenplattor samt stopplister i. Notera att dessa profiler ligger ovanför plastlisternas mitten för optimal stabilitet. Vid kortsidorna finns även två ihopsvetsade stänger som går mellan den yttre rektangeln och den inre buren, detta för att

ta upp belastning som går genom topplattan och även när AGC:ns kortsidor har kontakt med bandet.

De faktorerna som har störst påverkan på utböjningen av topplattan (vid en punktkraft i dess mitt) är topplattans tjocklek och deformationen av den ”inre buren”. Med den inre buren menas alltså de fyra pelare och ihopkopplingen av dessa, detta kan ses tydligt i K13c i figur 17. Tjockleken för topplattan kan ändras vid behov så fokus låg på att ta fram en optimal struktur för den inre buren. Återigen användes Shape Generator och resultatet från detta kan ses nedan i figur 19 till 21.

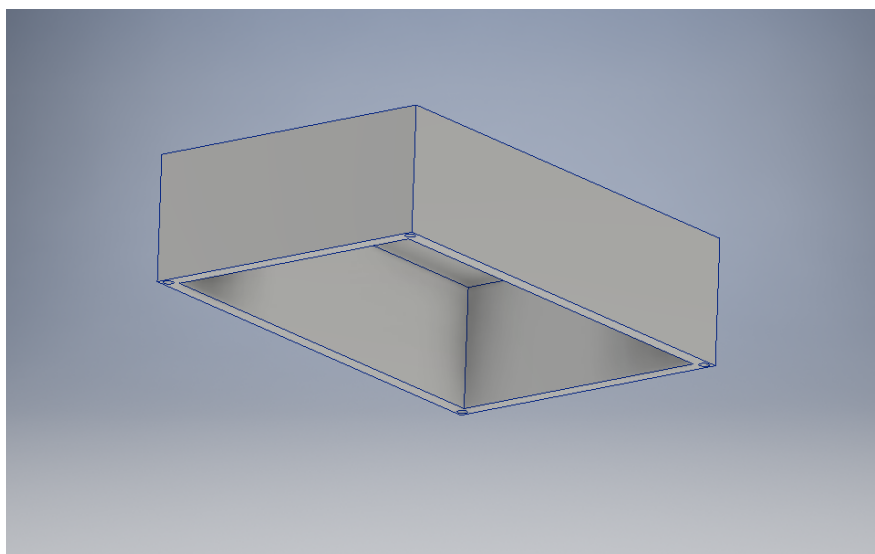


Fig. 19: Geometri innan Shape Generator

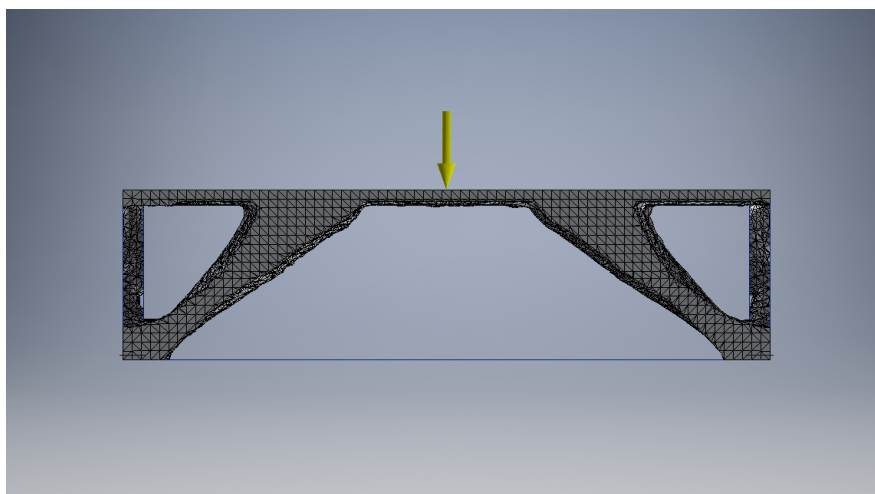


Fig. 20: Långsidan för den inre buren efter Shape Generator

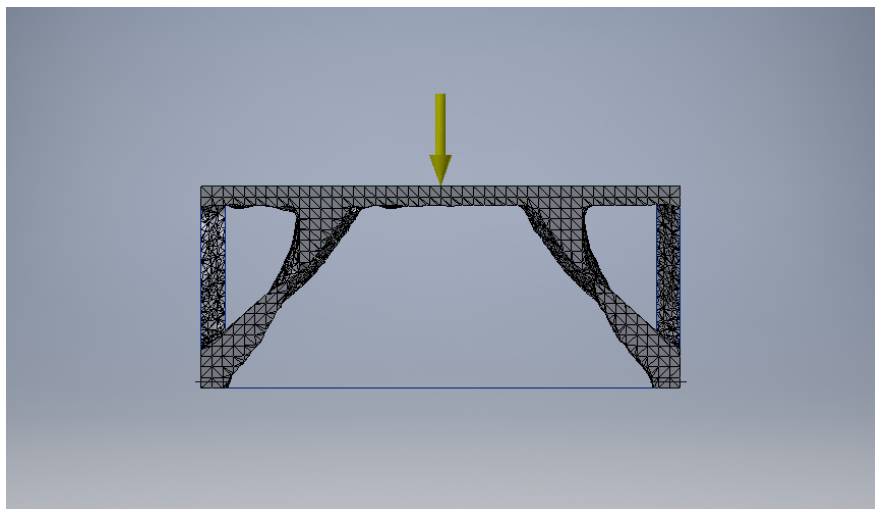


Fig. 21: Kortsidan för den inre buren efter Shape Generator

Ursprungstanken vid konstruktionen av det vinnande konceptet var att göra den inre buren av fyra hörnpelare med en grövre dimension som i sin tur är ihopkopplade med ett fackverk av stänger med mindre profiler. Den genererade designen visar dock att maximal styvhet vid givet lastfall uppnås genom att använda sneda "stänger" in mot mitten av lång- och kortsidorna av topplattan, se figur 20 och 21. Detta bekräftas även när en modell med raka hörnpelare jämförs mot en modell som är inspirerad av resultatet i figur 20 och 21, hörnen i den modellen kan ses nedan i figur 22.

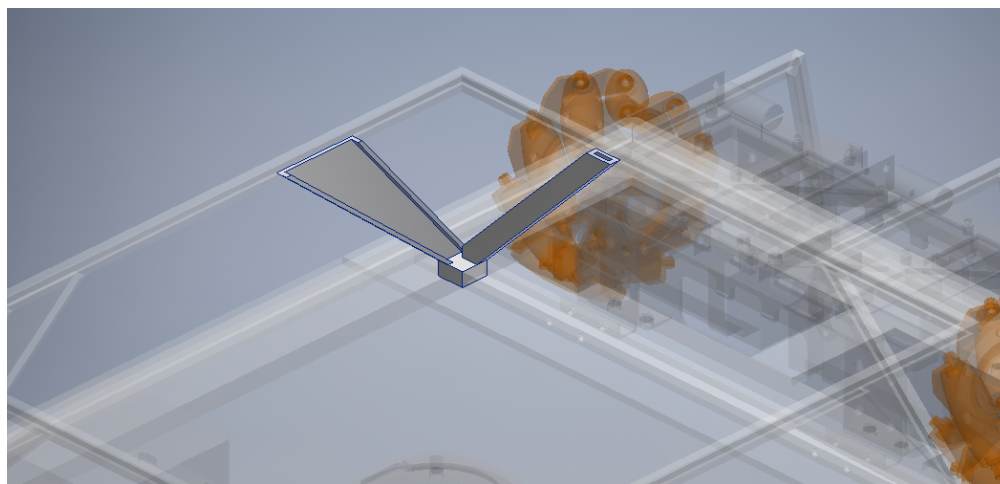
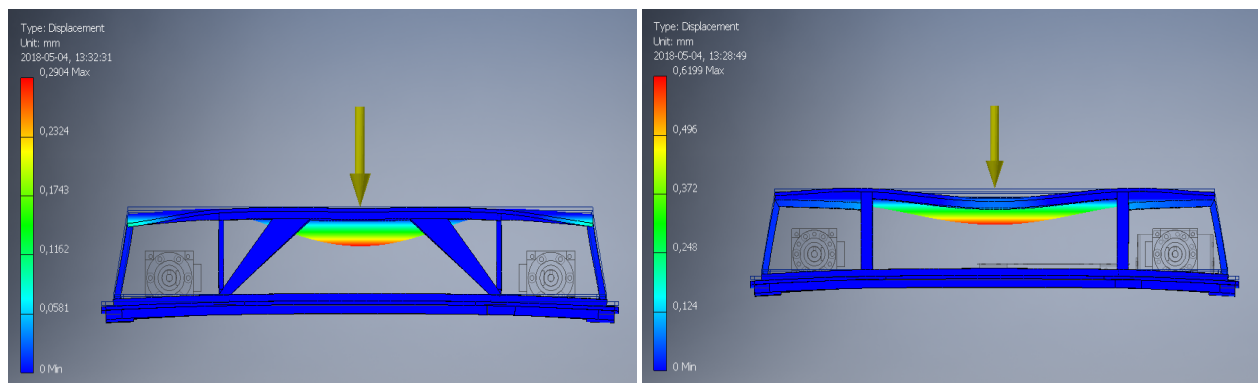


Fig. 22: Hörnstruktur med utgångspunkt i Shape Generators resultat

Jämförelsen kan ses i figur 23, här framgår det att den maximala utböjningen skiljer med en faktor av ca 2. Raka hörnpelare är alltså underlägsen den andra designen i detta avseende. Självklart används samma tjocklek (4 mm) på topplattan och det enda som skiljer är den bärande strukturens geometri. Vid jämförelsen valdes aluminium som material för topplattan och övriga komponenter. Notera att deformationen som visas på bilderna inte är skalenlig, de faktiskt deformationerna är 0,29 (a) respektive 0,62 mm (b).



(a) Design inspirerad av Shape Generator

(b) Raka hörnpelare

Fig. 23: Jämförelse i utböjning

Utformningen av balken som används till långsidan är en känd form för att maximera materialutnyttjandegraden för en balk i böjning. Böjspänningen i balken i figur 24 är som högst vid infästningen i väggen och minskar till obefintlig längst ut på balken. Materialet placeras alltså där det gör som mest nytta.

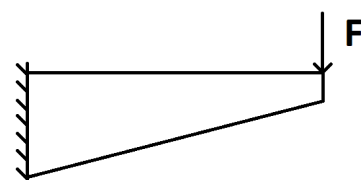


Fig. 24: Balk i böjning

Övrig anmärkningsvärd geometri är pelarna över motorerna, se figur 25 nedan. Dessa fyller syftet att ytterligare stödja topplattan och även kamerapartiet (mer om detta nedan).

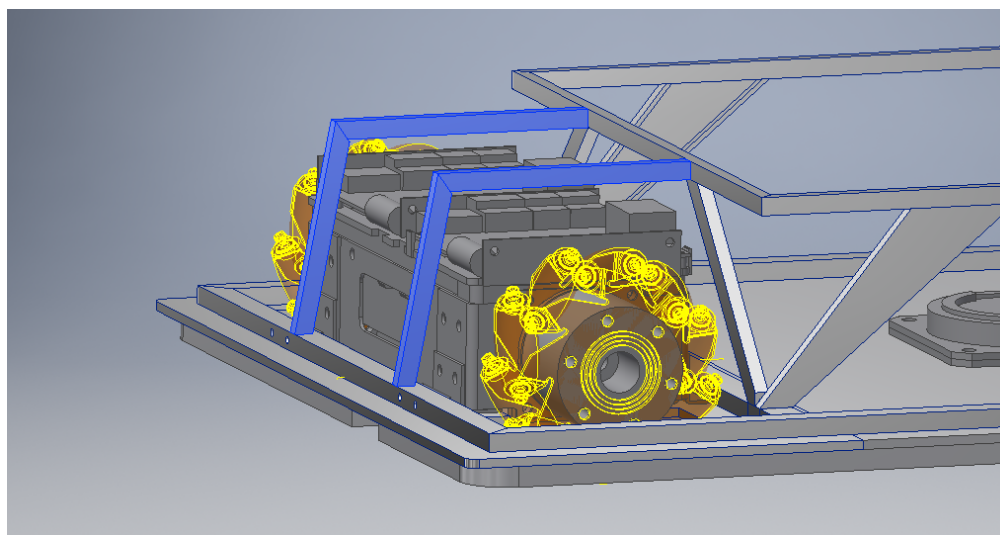


Fig. 25: Vinklade pelare över motorparti

Som det framgår av figur 25 är den (nästan) vertikala pelaren vinklad inåt med ca 10° , denna vinkel möjliggör en vinkel av liknande storleksgrad på det yttre skalet.

Skalet har som funktion att skydda känsliga komponenter (dock inget krav på IP-klassning) och medge ett mer estetiskt tilltalande utseende än om skal skulle saknas. En annan viktig funktion

som skalet uppfyller är husering av de två 3D-kameror som är monterade i AGC:n. Detta framgår av figur 26 nedan.

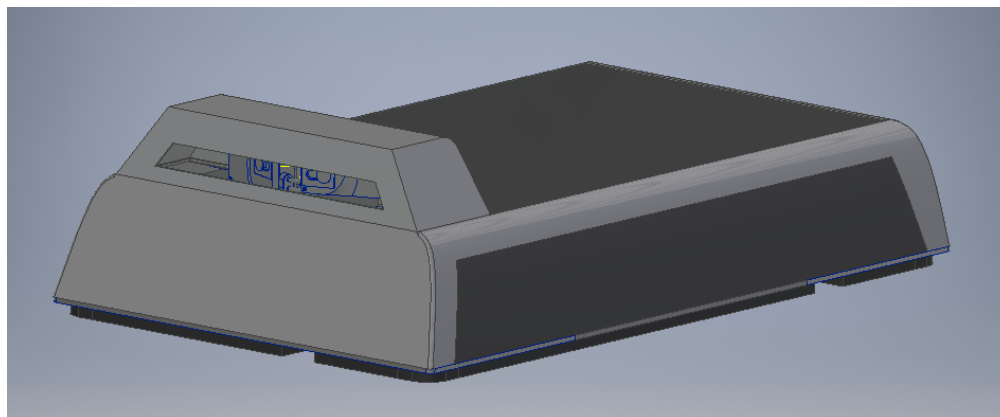


Fig. 26: Skalet monterat på AGC:ns bärande struktur

Utskärningen på skalets framsida (t.v. i figur 26) är dimensionerat för att tillåta 3D-kamerornas 45° synvinkel vertikalt och 60° horisontellt (per kamera). En s.k. "sprängbild" nedan visar hur detaljerna sitter ihop (exkl. skal) se figur 27 nedan. Kamerafästen demonstreras i figur 28 (kameror och fästen markerade i blått).

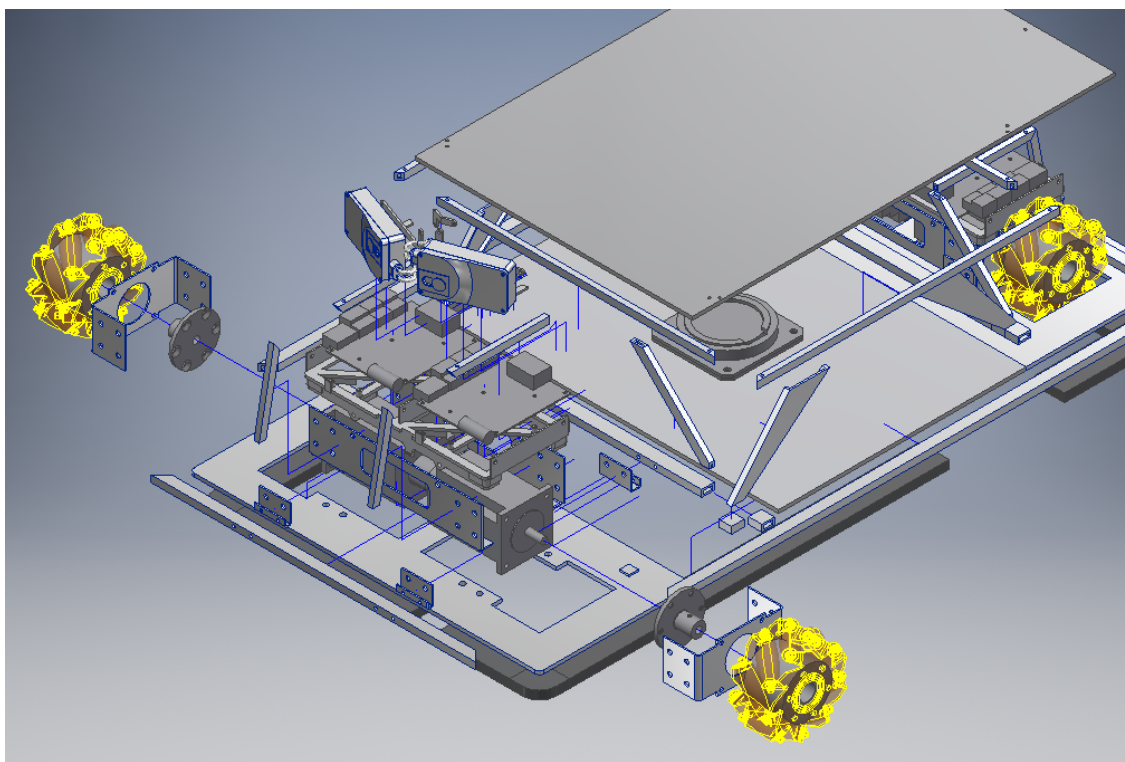


Fig. 27: Sprängbild på detaljer exkl. skal

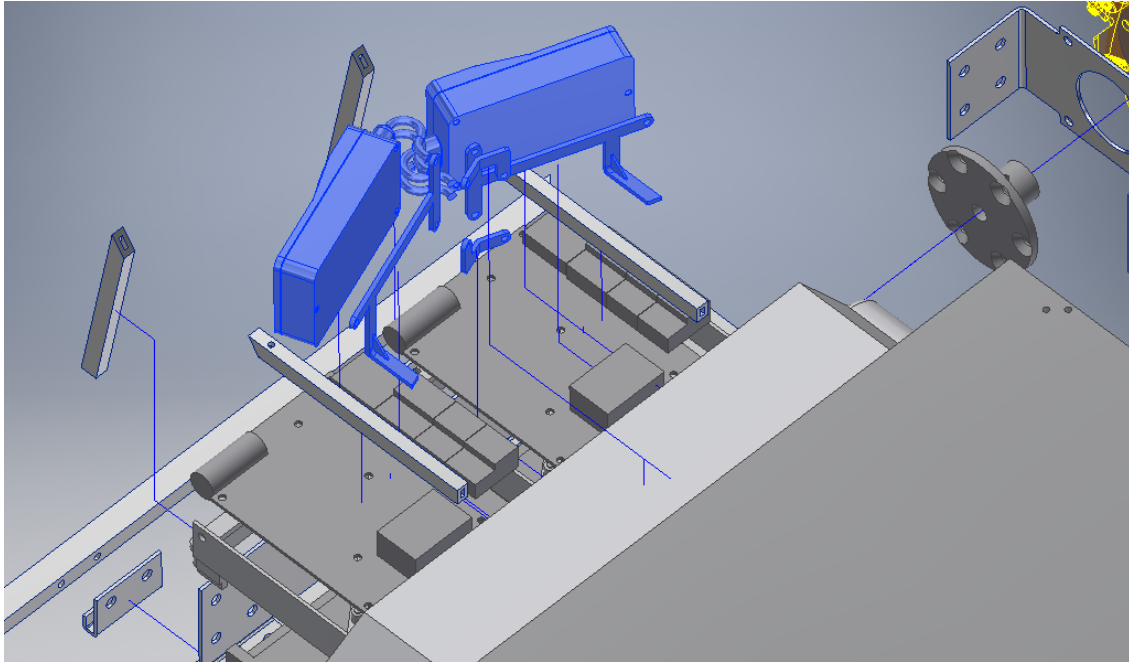


Fig. 28: Sprängbild - kamerafästen

Som det framgår av figur 28 ovan är fästena designade för att minimera vikt med kravet att säkert hålla upp 3D-kamerorna. En FEM-körning indikerar att de klarar detta utan avsevärd spänningskoncentration eller deformation, detta trots kamerornas vikt på sammanlagt ca 500 gram.

4.5 Design

Ett av FlexLinks önskemål var att slutprodukten ska vara estetiskt tilltalande. Utefter den kunskap och estetiska förmåga arbetsgruppen besitter har en snygg design skapats, se figur 29 nedan. Efter-som att skalet är den komponent kunden/användaren kommer att se när AGC:n används är det här energi läggs för att skapa en estetisk design medan andra komponenter designats mer för funktion.

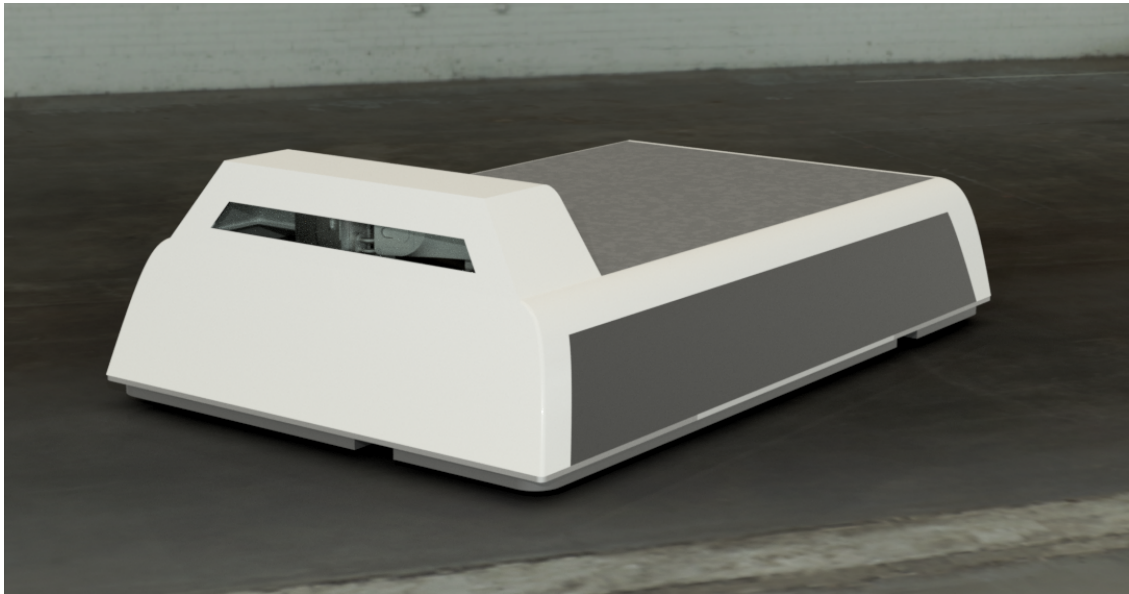


Fig. 29: Rendering av AGC:n med skalet monterat

4.6 Materialanalys

De överlägset mest använda materialen idag i mekaniska konstruktioner är stål och aluminium, se kap. 2.4. Stål har mycket bra hållfasthet i förhållande till pris samt goda formnings- och fogningsmöjligheter. Då kraven på lätta konstruktioner, framförallt inom transportsektorn, har ökat har användningen av aluminium således också ökat. Inom investeringstung industri (t.ex. rymdfart) där extremt höga krav ställs på lätt vikt används betydligt dyrare material i form av avancerade kompositer. En parameter som är viktig, inte minst för skapa ett högt kundvärde, är priset för slutprodukten. Projektgruppen väljer därför att satsa på att utvärdera erkända billiga material där hållfasthet, formnings- och fogningsmöjligheter är väl etablerade. De material som bestäms möjliga att användas och som kommer utvärderas är legeringar av aluminium, stål samt olika polymerer.

Som kan ses i kap. 2.4 kan en viktminskning göras genom att använda aluminium gentemot stål, detta mot en ökning av utrymmet som används. Studier har dock även visat på att avancerade hög hållfastsstål kan åstadkomma en likvärdig viktreduktion som aluminium, detta vid halva kostnaden. Materialvalet kan inte göras direkt utifrån materialdata utan kräver stöd av CAD- och FE-analyser. Vid 2 mm tjocklek på profilerna och med aluminium som valt material klarar konstruktionen av den kritiska belastningen, med en säkerhetsfaktor 3 mot utböjning och 5 mot effektivspänning. Stål har cirka tre gånger så hög densitet som aluminium vilket skulle medföra att profilerna endast skulle kunna ha en tjocklek på cirka 0,67 mm för att konstruktionen ska ha samma massa som vid aluminium. För att då göra en vinst i vikt om stål ska användas måste profilerna ha en tjocklek $< 0,67$ mm vilket gör de väldigt tunna. Projektgruppen väljer därför att använda aluminium med 2 mm tjocklek som enligt FE-modellering klarar av den kritiska belastningen, detta redovisas i kap. 4.9.

På figur 30 nedan visas en sprängbild som ger en överblick över vilka material som används till specifika detaljer.

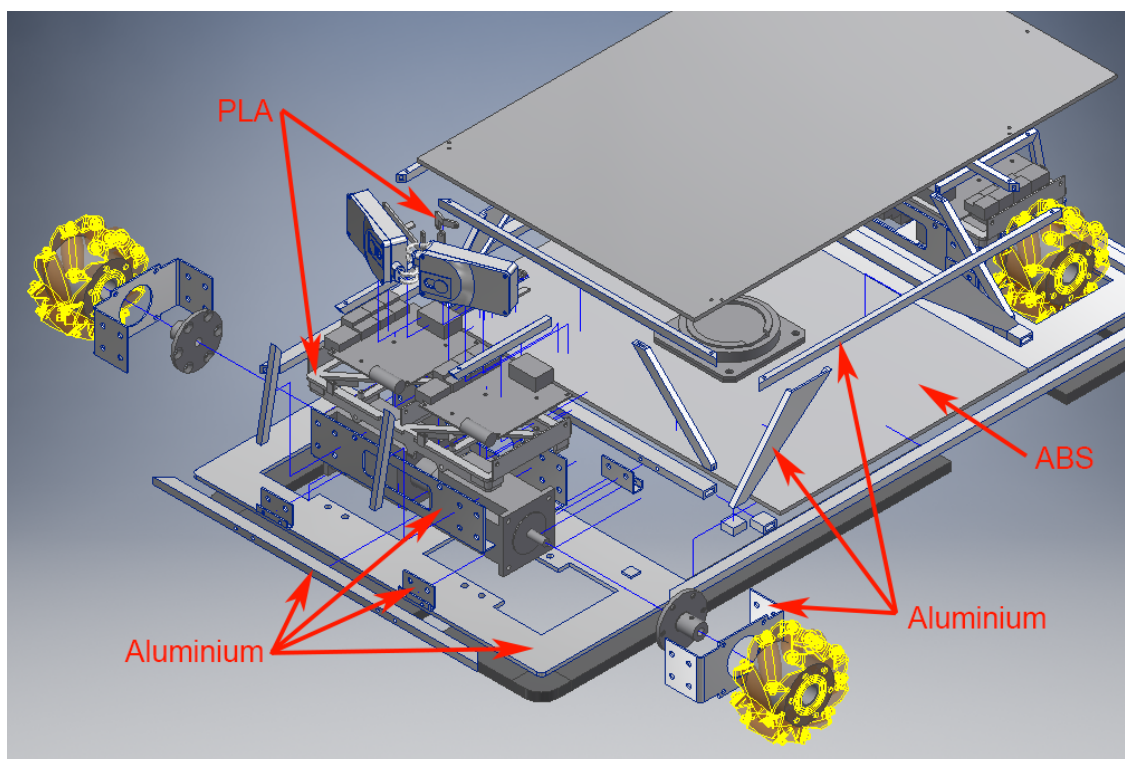


Fig. 30: Sprängbild - materialöversikt

Det yttre skalet (ej med i figuren ovan) och mittenplattan på undersidan är tänkt att tillverkas av en polymer för att spara vikt. ABS (Akrylnitril-Butadien-Styren) har en hög slagtlåghet, enkel att färglägga, god ytfinish samt går utmärkt att återvinna. ABS används idag bland annat som material för LEGO™, säkerhetshjälmor och som yttre skydd för diverse vitvaror. ABS anses som ett fullgott material som yttre skal och mittenplatta i botten. Mindre detaljer, som exempelvis kamerafästen (se figur 28 och fästen för styrkort), 3D-printas i den populära plasten PLA. Denna plast har vissa fördelar över ABS, exempelvis att den är naturligt nedbrytbar.

4.7 Miljöanalys

För att verifiera de miljörelaterade kraven i kravspecifikationen (se tabell 1) görs en översiktlig miljöanalys. Produkten delas in i två delar med två tillhörande tabeller: ram och fästen (se tabell 8) samt skal och topp- och bottenplattor (se tabell 9). CES EduPack (2017) ger följande sammanställd data. Observera att uppskattade CO₂-utsläpp och energikonsumtion endast berör framställningen av materialet och inte utsläpp och energikonsumtion som är kopplade till t.ex. formning av material.

Material	Giftigt (Ja/Nej)	Ekotoxiskt (Ja/Nej)	Massa (kg)	Återvinningsbar (Ja/Nej)	Uppskattade CO ₂ - utsläpp (kg)	Uppskattad energikonsumtion (MJ)
Aluminium	Nej	Nej	1,1542	Ja	13,85	230,85
ABS	Nej	Nej	0,0635	Ja	0,24	6,03
PLA	Nej	Nej	0,004	Ja	0,01	0,02
Summa:					14,11	236,90

Tab. 8: Miljö-översikt: Ram (bärande struktur) och diverse fästen

Material	Giftigt (Ja/Nej)	Ekotoxiskt (Ja/Nej)	Massa (kg)	Återvinningsbar (Ja/Nej)	Uppskattade CO2- utsläpp (kg)	Uppskattad energikonsumtion (MJ)
Aluminium	Nej	Nej	2,843	Ja	34,12	568,6
ABS	Nej	Nej	1,741	Ja	6,62	165,40
PMMA	Nej	Nej	0,022	Ja	0,14	2,49
Summa:					40,87	736,48

Tab. 9: Miljö-översikt: Skal, topp- och bottenplattor

Sammanlagd ger detta en uppskattade CO2-utsläpp och energikonsumtion på 55 kg respektive 973 MJ per produkt. Notera att dessa är ca 63% respektive 35% lägre än målvärdena i kravspecifikationen, se tabell 1. Notera dock att massan som redovisas i tabellerna ovan kommer från mängden material som finns i det färdiga konceptet, inte hur stor massa som behövs för att konstruera produkten. I tillverkningen av detaljer försvinner ofta material, t.ex. vid stansning, denna beräknas inte med i tabellerna ovan. Därför bör uppskattningarna ovan inte betraktas som absolut sanning. Uppskattningar är däremot så pass långt under målvärdena att kraven anses vara tillfredsställda.

4.8 Tillverkningsanalys

Val av huvudsaklig monteringsmetod gjordes redan i konceptgenereringsfasen, se tabell 2. Som det framgår där används i huvudsak svetsning för sammanfogning av de diverse bärande aluminiumstrukturerna. Den specifika svetstekniken specificeras inte då detta faller utanför projektets avgränsningar, se 1.3. Skruvförband används också i monteringen, exempelvis vid fixering av motorerna.

Tillverkningsmetoden av individuella detaljer varierar beroende på material och geometri med kostnads- och viktreduktion i åtanke. Aluminium-profiler med konstant tvärsnitt kan med fördel extruderas. Bärande struktur av aluminium som inte har konstant tvärsnitt, t.ex. hörnbalken (t.h.) i figur 31, kan konstrueras av bockad plåt eller alternativt fräsas. De diverse motorfästena är designade med bockning som tänkt tillverkningsmetod. Samtliga detaljer som är tänkta att tillverkas med bockning kan ses i figur 31.

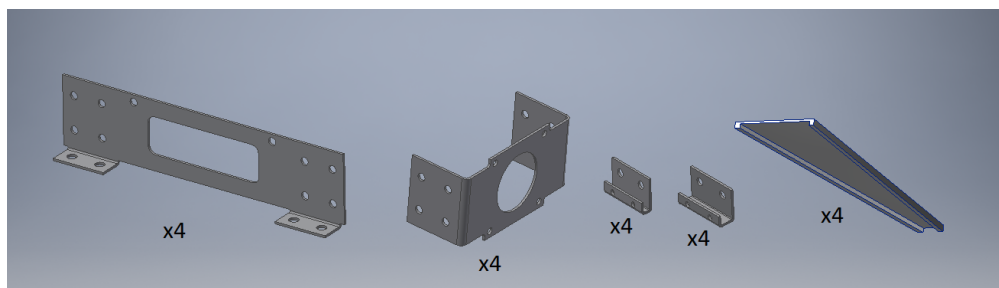


Fig. 31: Detaljer som bockas

Detaljen längst till höger i figur 31 är den enda balken i konstruktionen som ej är en fyrkantig profil. Då tvärsnittet i detaljen inte är konstant kan den ej extruderas, eventuellt skulle den kunna svetsas ihop med en spegelvänd detalj av samma form. Detta är dock onödigt komplicerat och att använda formen ovan som enkelt kan bockas förenklar tillverkningen.

De två bottenplattorna i aluminium som sitter på AGC:ns kortsidor är 4 mm tjock plåt vars hål kan stansas och utskärningar (för motorer och hjul) kan vattenskäras. Stansning används också för hålet i mitten av bottenplattan i plast.

Mittenplattan i botten gjord av ABS kan köpas direkt av återförsäljare och skäras till rätt dimensioner. Att välja tillverkningsmetod för det yttre skalet påverkas starkt av produktionsmängden som ska tillverkas. ABS går utmärkt att formspruta men det kräver en stor investering då en form för det yttre skalet måste skapas. Lämplig produktionsnivå för formsprutning är $>10\,000$ st enheter. Vilket anses vara en rimlig produktionsmängd om produkten lanseras och får genomslag på marknaden.

4.9 FE-analyser av lastfall

I denna del analyseras de bärande strukturerna i de tre olika lastfallen som produkten utsätts för.

Lastfall 1

Lastfall 1 är när AGC:n färdas på conveyor-bandet. Lastfallet kan delas upp i två fall, beroende på ifall det är kort- eller långsidorna på AGC:n som är i kontakt med bandet.

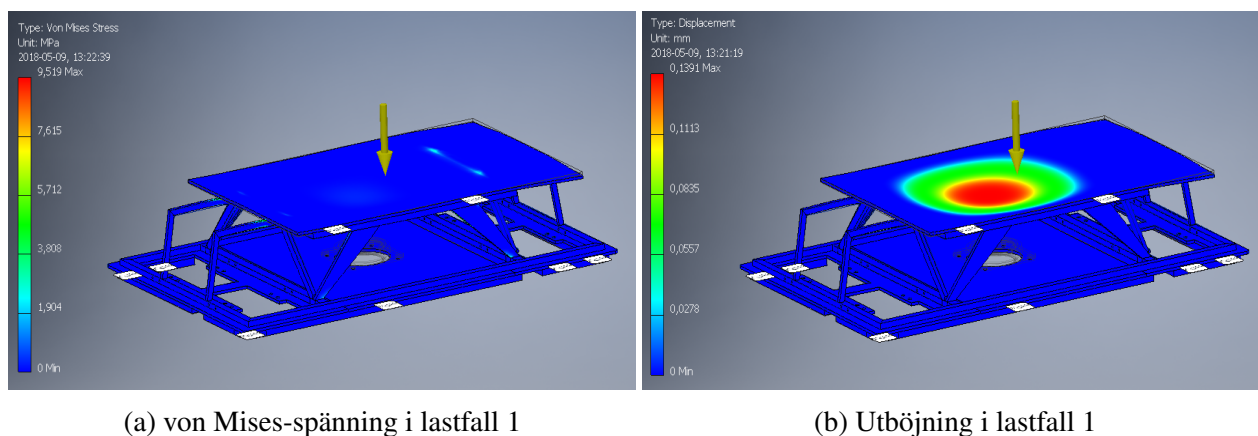


Fig. 32: Spänning och utböjning när AGC:n färdas med långsidorna mot bandet.

Maxvikten är som bekant 30 kg för hela AGC:n. För att simulera detta applicerades en kraft på 300 N på toppplattan. I verkligheten kommer belastningen att spridas ut mer men FE-analysen visar att konstruktionen av de bärande delarna inte har några problem att klara av denna belastning, trots att den är överdriven. Plastlisterna på undersidan som har kontakt med conveyor-bandet får en modell-restriktion som gör de jordade. Max Von Mises-spänning (~ 9.5 MPa, fig. 32a) är en bråkdel av sträckgränsen för aluminium och maximal utböjning (~ 0.14 mm) uppstår i toppplattan, se figur 32b. När dimensionering sker mot utböjning blir spänningen ofta väldigt låg (det har i sin tur självklart betydelse av vilken storlek på utböjningen som det dimensioneras mot). I lastfallen som analyseras för denna produkt är utböjningen det kritiska (och relativt liten) vilket är kopplat till en väldigt liten spänning. Vidare redovisas endast utböjningen då spänningen i materialet i alla analyser har en säkerhetsfaktor >5 mot sträckgränsen.

I figur 33 visas utböjningen då AGC:n åker med kortsidorna i kontakt med bandet. Samma belastning läggs på men här låses istället plastlisterna längs kortsidorna fast i sin position.

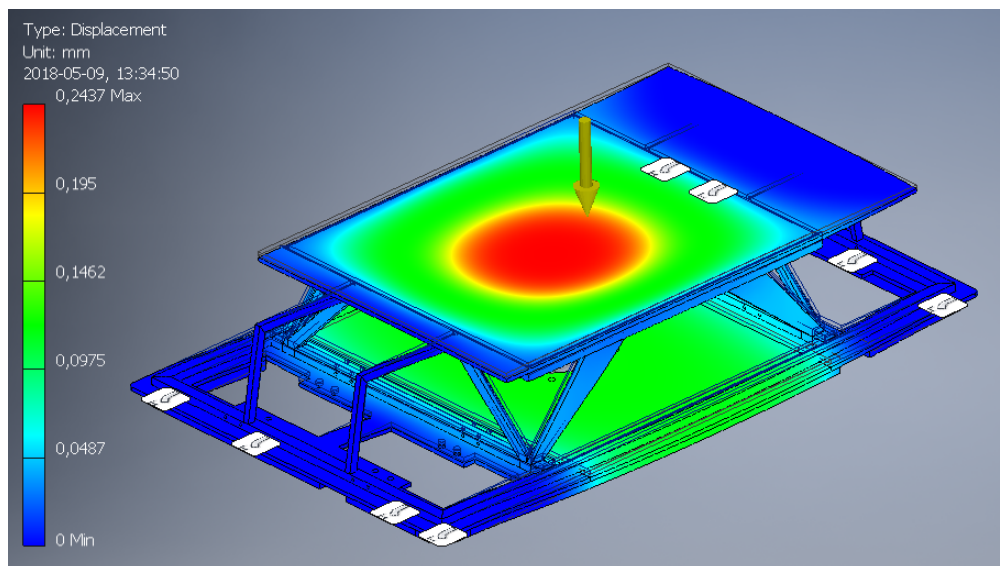


Fig. 33: Utböjning när AGC:n färdas med kortsidorna i kontakt med bandet.

Som kan ses i figur 33 sker den maximala utböjningen likt tidigare i topplattan, denna gången till en storlek på ~ 0.24 mm.

Lastfall 2

Lastfall 2 är när AGC:n färdas på golvet. AGC:n har alltså kontakt med underlagen via de fyra hjulen. Detta approximeras genom att låsa hjulen och applicera en kraft på 300N på topplattan (som i lastfall 1). Som det framgår i figur 34 nedan uppstår en maximal von Mises-spänning på ca 40 MPa. Denna spänning uppstår i hjulet vilket betraktas vara utanför projektgruppens kontroll. Det kommer dock inte vara några problem ty denna spänning är långt under sträckgränsen.

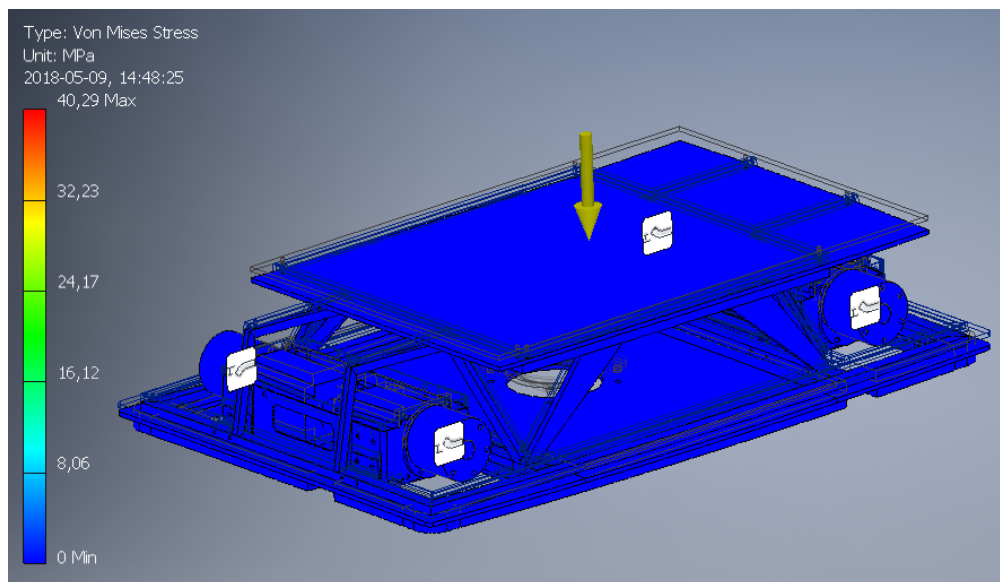


Fig. 34: von Mises-spänning i lastfall 2

När det kommer till utböjningen, se figur 35, är denna även att betrakta som låg. Som det framgår på figuren är maximal utböjning ca 0,5 mm vilket uppstår i topplattan i mitten av den inre buren (se röd markering).

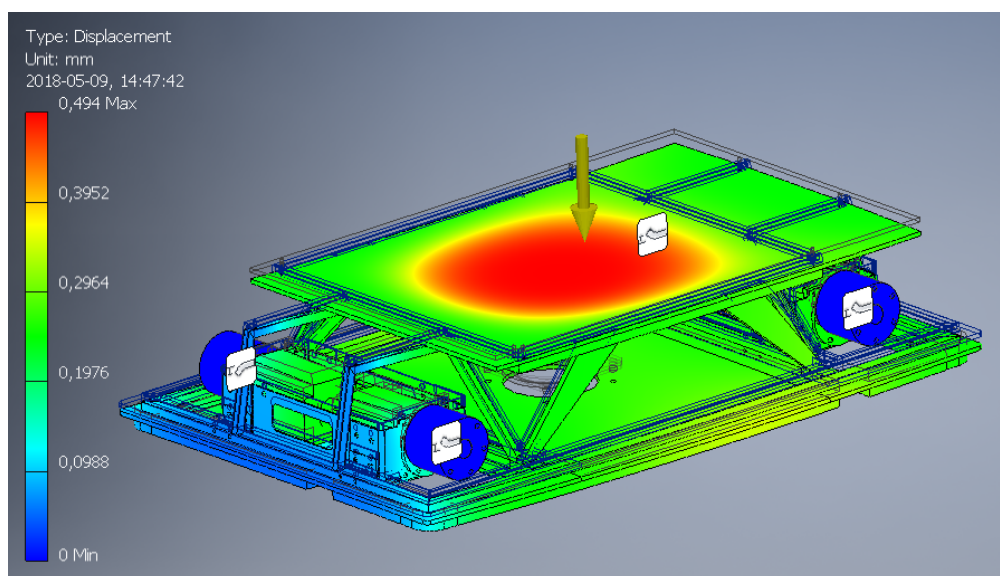


Fig. 35: Utböjning i lastfall 2

Lastfall 3

Lastfall 3 är en punktkraft på 1000 N i mitten av topplattan på AGC:n när den är upplyft av en domkraft med fyra tryckpunkter på undersidan av AGC:n. Plasticering får absolut inte ske och en maximal utböjning som är acceptabel är 1 mm enligt kravspecifikationen i tabell 1. Som det

framgår av figur 36 är den maximala utböjningen $\sim 0,52$ mm vilket uppstår i topplattan i den inre burens mitt (se röd markering).

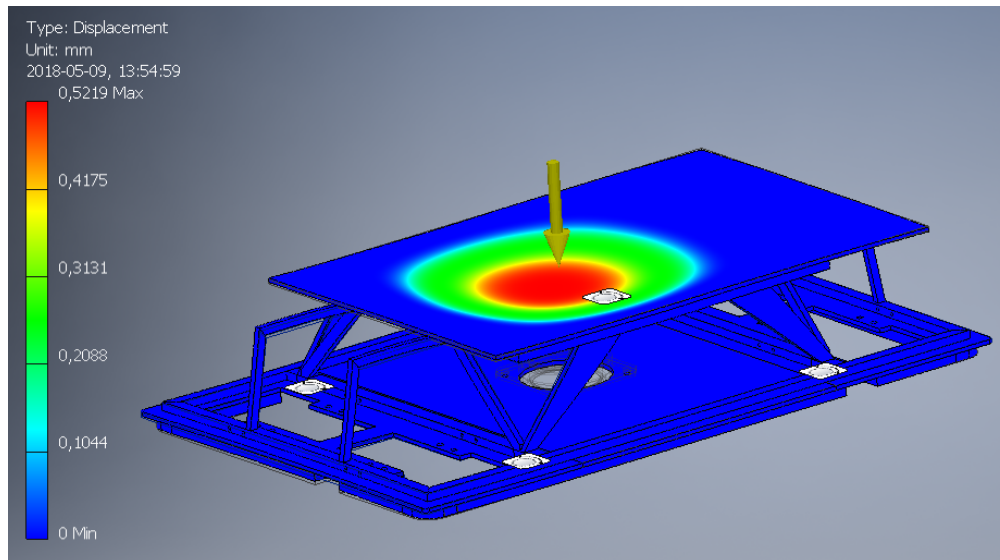


Fig. 36: Utböjning i lastfall 3

4.10 Kostnadsanalys

Som nämnt i kapitel 3.10 exkluderas kostnaden för utveckling från kostnadsanalysen. Hänsyn tas till följande faktorer:

- Inköp av färdiga aluminiumprofiler, plattor av plast/aluminium och annan material.
- Maskin och operatörkostnader.
- Framtagning av form för formsprutning av det yttre skalet.
- Svetsning av ram.
- Montering av alla komponenter.

Vid framtagning av kostnadsanalysen användes leverantörer med deras angivna kr/kg priser. Vissa komponenter köps in med färdig geometri t.ex. extruderade aluminiumprofiler. Materialet bearbetas sedan till dess rätta struktur genom t.ex. kapning, gradning, stansning, laserutskärning, gängning av hål och så vidare. Eftersom att kostnadsanalysen beräknades på ett antal av 500 stycken AGC:er beräknas priset för kostnaden av leverantörens kr/kg pris som ej påverkas av hur mycket material som beställts. Det vore mer realistiskt att priset påverkas av volymen material som köps, som kanske även kan inkluderas i en större beställning av material till andra produkter som företaget har.

Vid beräkning av pris på drift av maskin och operatör så har en rimlig kostnad tagits utefter tillverkningsmetod och ställkostnader. Om delen som skall bearbetas har en avancerad geometri eller om många olika moment behövs göras för att färdigställa delen ökar detta priset. För t.ex.

några av de extruderade aluminiumprofilerna måste de först kapas i rätt längd, snitten måste sedan gradas för att få ett finare snitt som underlättar i kommande moment där ramen svetsas. Aluminiumprofilerna behöver också hål så att toppplattan kan monteras på ramen. Alla delar som finns med i kostnadsanalysen har genomgått denna analys och ett rimligt pris har givits.

För mer avancerade geometrier som för t.ex. AGC:ns skal används formsprutning som tillverkningsmetod. Detta kräver att ett verktyg som har skalets form tillverkas. Vid kostnadsanalysen har arbetsgruppen räknat med att detta verktyg kostar 500 000 kr, med pris från CES Edupack (2017). Formen kan användas under lång tid och skrivs av på 10 000 enheter. Verktygskostnaden för skalet blir då 50 kr per enhet.

När komponenterna till ramen är tillverkade monteras ramen via svetsning. Detta uppskattas ta två timmar och kostar då totalt 2000 kr per AGC. Montering av alla komponenter som skall sitta i AGC:n uppskattas ta en timma med ett pris på 500 kr. Skillnaden i pris beräknas beror på faktorer som mer avancerade maskiner och kompetens hos den operatör som svetsar.

Kostnadsanalysen är en uppskattning av kostnaden och är inte exakt då pris på material och tillverkning varierar. Kostnadsanalysen är dock en uppskattning som ger information om vilka investeringar som kommer behövas tas.

I tabell 10 nedan visas kostnadsanalysen för 500 st AGC:er. Den totala kostnaden för att tillverka alla detaljer och montera allt hamnar på 3110 kr. Enligt tabell 1 i kravspecifikationen så beskrivs tillverkningskostnaden i tre olika tillverkningsvolym. Där finns önskemål om att vid en mellanstor produktion skall kostnaden underskrida 3500kr/enhet, vilket gör att önskemålet uppfylls med en marginal på 390 kr och här mäts 500 enheter som en liten produktion. När volymen ökar kommer materialpris och monteringspris att minska vilket gör att även önskemål på stor produktionsvolym bör uppfyllas kostnadsmässigt enligt denna kostnadsanalysen.

Detaljer	Pris för form/verktyg	Pris drift maskin /operatör	Pris för inköp materialprofil /material	Tot. pris
Plastdetaljer				
Plastskiva botten		35 kr	7 kr	42 kr
Fäste 3D-kameror		20 kr	3 kr	23 kr
Plastskal kaross	50 kr	20 kr	11 kr	81 kr
Plexiglas vid kamerahus		15 kr	2 kr	17 kr
Plastlister på undersidan		15 kr	17 kr	32 kr
Extrudering av aluminium (2mm tjock)				
Aluminiumprofil 1		40 kr	35 kr	75 kr
Aluminiumprofil 2		40 kr	25 kr	65
Aluminiumprofil 3		25 kr	15 kr	40 kr
Aluminiumplåt 2mm tjock				
Successivt ökande tvärsnittspelare		20 kr	7 kr	27 kr
Motorfaste_mini		10 kr	3 kr	13 kr
Motorfaste_mini_longer		25 kr	7 kr	32 kr
Motorfäste		25 kr	7 kr	32 kr
Aluminiumplåt 4mm tjock				
Topplatta		15 kr	136 kr	151 kr
Bottenplatta		20 kr	125 kr	145 kr
Detaljer för montering	Pris för förband			
Skruvförband		15 kr		15 kr
Montering av komp.	Pris svetsare/timme	Antal timmar per ram		
Svetsning av aluminiumprofiler	1000 kr/timme	2 timmar		2000 kr
	Pris montör/timme	Antal timmar per AGC		
Montering av komponenter	500 kr/timme	1 timme		500 kr
Totala priset per AGC				3110 kr

Tab. 10: Kostnadsanalys för 500 enheter

4.11 Modell/prototyp

Vid skapandet av modell/prototyp användes ”virtual prototyping” och ”mock-up” (se kap 3.11) för att skapa prototyperna.

- Virtuellt prototyputförande: användes som verktyg för att skapa vår AGC. Den virtuella modellen modellerades för att kunna köra beräkningar och skapa en rendering så att önskad design uppnås. En virtuell modell är ett mycket effektivt och bra verktyg för att skapa prototypen eftersom en modell med valt material kan utvärderas innan den byggs.
- Mock-up: Arbetsgruppen valde att skapa en mock-up för att kunna studera en fysisk modell. Modellen skapades för att få en bild om hur AGC:n ser ut i riktig skala. Bilden nedan (se figur 37) visar resultatet av den skapta modellen. Modellen skapades i cellpannåer och kommer inte visa ytegenskaper eller färg utan enbart ramens proportioner.

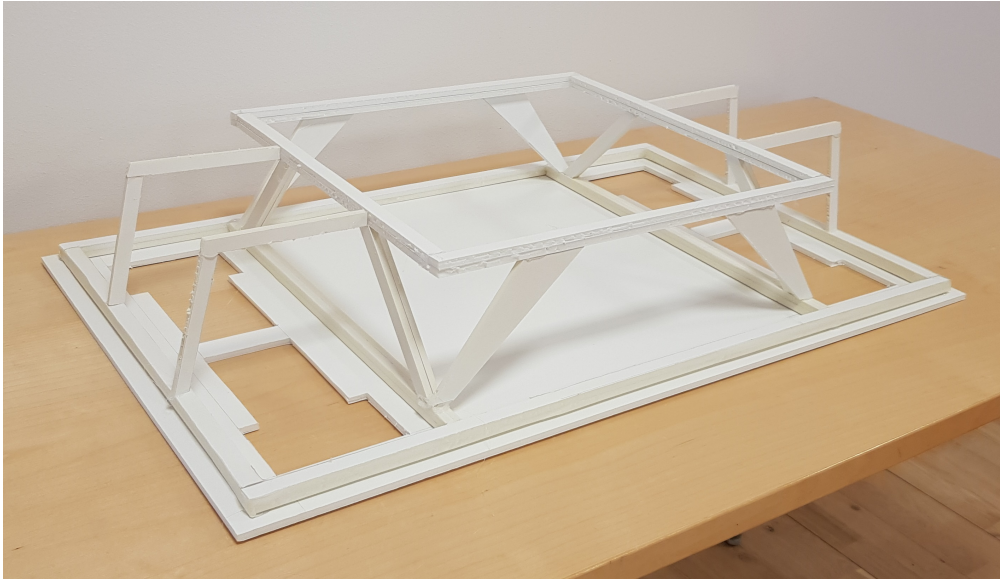


Fig. 37: Mock-up av AGC

5 Diskussion

5.1 Lärdomar av projektet

Informationssamling och definiering av problemet som behandlas i uppstarten av projektet har stor påverkan på hela arbetet. För att meningsfullt spendera tillgänglig tid måste det som ska åstadkommas vara glasklart. Viktigt är även att lägga ner mycket tid i början av projekt då det minimerar arbete, kostnad och möjligheter att göra ändringar senare. Detta har upprepats i kurser angående produktutveckling under utbildningens gång. Det har visats vara en lärdom som tål att upprepas. I projektets inledande fas var informationinsamlingen och kommunikationen bristfällig angående hur pressoperationen egentligen var tänkt att fungera. Detta ledde till att lösningar för en annan typ av pressoperation togs fram, som sedan blev oanvändbara. Det är dock viktigt att komma ihåg att premisserna för ett projekt hela tiden kan ändras. På så sätt gav det kanske en erfarenhet av att man måste kunna anpassa sig. Men just i detta fallet hade det kunnat undvikits genom en fullgod problemdefiniering tidigt i projektet.

En produktutvecklingsmetod som var tänkt att användas var Värde modellen. Värde modellens grundstomme är att skapa värde för kund i produkten som utvecklas, se kapitel 2.5. Om projektet istället handlat om t.ex. att ta fram mjukvara för styrningen av AGC:n hade det varit viktigare att ta reda på kunders behov och hur dessa skulle kunna uppfyllas på bästa sätt. Då projektet var avgränsat till att enbart ta fram den bärande konstruktionen (och inte t.ex. styrning m.m.) så har kundvärde kunnat skapas genom ett lågt pris och en hållbar konstruktion med lång livslängd. Med tanke på att denna uppgift är smal relativt att designa en produkt från början har Värde modellen haft begränsad nytta, då denna metod är bäst lämpad för produktutveckling av en hel produkt. Alla olika steg från värde modellen har därför inte kunnat användas och andra hjälpmedel för produktutveckling har kompletterat utvecklingsprocessen.

Något som projektgruppen tyckt är en intressant utveckling inom produktutveckling för att optimera bärande konstruktioner är generativ design, se kapitel 2.3.2. Vilket har implementerats som en inspirationskälla för den slutgiltiga designen. I framtiden kommer troligtvis dessa algoritmer bli både bättre och mer lättanvända och således bli en naturlig del i produktutveckling. I projektet har generativ design starkt påverkat slutresultatet och tillämpningen har varit till nytta. Se figur 23 där utböjningen av plattan kunde minskas med hjälp av strukturen från den genererade designen.

5.2 Tveksamheter i slutkonstruktion

Det återstår vissa frågetecken kring infästningen vid tryckpunkterna för sneda balkar. I nuläget är de sneda balkarna tänkta att vara svetsade till en solid box, se bild 22. Den solida boxen är i sin tur ihopsvetsad med två fyrkantsprofiler. Utformningen av denna lösning kan möjligtvis visa sig inte vara genomförbar eller prestera som tänkt och behöva designas om. Exakt hur utformningen av tryckpunkterna på domkraften ska se ut har fallit utanför projektets fokusområde. Hur de fyra kontaktpunkterna från lyftdonet ska "guidas" in att trycka på rätt punkt och utformningen av dessa tryckpunkter har inte klargjorts.

5.3 Vidareutveckling

En tryckplatta som passar ihop med underredet på AGC:n måste utformas som nästa steg i produktutvecklingen. Som nämnt i kapitel 1.3 har specifika svetsmetoder inte studerats då detta anses vara utanför projektets avgränsning. Detta vore ett intressant område för vidare studier.

Ett önskemål från FlexLinks sida var att göra produkten snygg. Projektgruppen har ingen utbildning eller erfarenhet inom denna typ av design men har skapat ett yttre skal som anses vara tillräckligt estetiskt tilltalande (trots att detta är högst subjektivt). Vidareutveckling skulle kunna fokuseras på det estetiska området, företrädesvis av någon med kompetens inom industridesign.

6 Slutsats

Sett till kravspecifikationen kan nästan alla krav anses vara uppfyllda, det råder dock osäkerhet om verifiering av några få krav. T.ex. kan livslängd på minst 10 år inte verifieras då resurser för ett sådant test inte är tillgängliga. Vidare kommer kravet parallellitetstolerans 0.8 mm på underrede att bero på produktionen av komponenter och monteringen av dessa. Då projektet ej går så djupt och tar fram komplett ritningsunderlag eller monteringsinstruktioner kan detta ej verifieras. Projektets centrala krav såsom vikt på ram (se nedan), ingen plasticering och max 1 mm utböjning vid pressoperation bedöms däremot som uppfyllda, se kapitel 4.9. Även miljökraven är uppfyllda, se kapitel 4.7. Detta gäller även kostnadskraven, se kapitel 4.10. Projektet ledde fram till en total viktnedskning med 44% som det framgår i tabell 11 nedan.

	Initial vikt	Nuvarande vikt	Vikt-reduktion	Andel av nuvarande totalvikt
Bärande struktur	6,79 kg	0,86 kg	87%	6%
Bärande struktur och skal	6,79 kg	1,5 kg	78%	10%
Totalvikt	26,88 kg	15,05 kg	44%	100%

Tab. 11: Översikt av viktreduktion

Tabell 11 redovisar viktreduceringen i tre jämförelser. Den bärande strukturen uppvisar den mest drastiska viktreduktionen på närmare 90%, detta är inte förvånansvärt då arbetet har fokuserats på detta område. Därefter följer en jämförelse när skalet räknas in. Då den initiala designen, d.v.s. referensen som konstruerades innan starten av detta projekt, saknar ett skal redovisas samma vikt (6,79 kg), se figur 6. Totalvikten berör samtliga detaljer inklusive elektroniska detaljer, men exklusive batterier eftersom dessa ej har specificerats. Den initiala totalvikten hade alltså en tillåten godsvikt på ca 3 kg (men som troligen närmar sig 0 då batterier väljs). Den nuvarande tillåtna godsvikten är ca 15 kg (något lägre p.g.a. framtida batterier), alltså en avsevärd förbättring. Något som bör kommenteras är att den bärande strukturen inklusive skalet enbart står för 10% av den nuvarande totalvikten. Ytterligare viktreduktioner på denna del av AGC:n skulle därmed utgöra en proportionellt sätt liten ytterligare vinst. De återstående 90% av totalvikten består av komponenter som motorer, hjul, topp- och bottenplatta och så vidare. Önskas ännu lägre totalvikt (d.v.s. under 15 kg) rekommenderas därför att viktreducering söks i form av lättare komponenter snarare än en ännu lättare ram.

Referenser

- Ashby, M., Shercliff, H., & Cebon, D. (2014). *Strategic thinking: matching material to design. materials: Engineering, science, processing and design*. Elsevier.
- Autodesk. (2018). *Generative design at airbus*. Hämtad 22.04.2018 från: <https://www.autodesk.com/customer-stories/airbus>
- Bayoumi, A. (2000). Design for manufacture and assembly (dfma): Concepts, benefits and applications. In (p. 501-509). Elsevier. doi: 10.1016/B978-008043711-8/50051-9
- Chalmers. (2015). *Planeringsrapport*. Hämtad 03.05.2018 från: <https://student.portal.chalmers.se/sv/chalmersstudier/programinformation/maskiningenjor/examensarbete/Sidor/Planeringsrapport.aspx>
- Chalmers. (2016). *Kursplan för tme041 - integrerad konstruktion tillverkning*. Hämtad 22.04.2018 från: https://student.portal.chalmers.se/sv/chalmersstudier/minkursinformation/Sidor/SokKurs.aspx?course_id=15731&parsergrp=3
- Chalmers. (2017). *Akta - automatisering av kitting, transport och montering*. Hämtad 17.05.2018 från: <https://www.chalmers.se/sv/projekt/Sidor/AKTA--Automatisering-av-KittingQ-Transport-och-Montering.aspx>
- Christensen, P. W., & Klarbring, A. (2009). Introduction. In *An introduction to structural optimization* (pp. 1–7). Dordrecht: Springer Netherlands. Hämtad från: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-8666-3_1 doi: 10.1007/978-1-4020-8666-3{_}1
- Giovani, M. (2016). *Heavy duty agv transfer cart*. Hämtad 22.04.2018 från: <http://www.morellogiovanni.it/en/2016/11/21/heavy-duty-agv-transfer-cart-capacity-20-ton/>
- Gordon, J. E. (1978). *Structures or Why things don't fall down*. Boston, MA: Springer US. Hämtad från: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-9074-3> doi: 10.1007/978-1-4615-9074-3
- Granta Design Limited. (2017). *CES Edupack Version: 17.1.0*. (Mjukvara för PC)
- Grenestedt, J. (2005). New concepts for sandwich structures. *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, 835-844. Hämtad från: https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3848-8_84 doi: 10.1007/1-4020-3848-8.84
- Johannesson, H., Persson, J.-G., & Pettersson, D. (2013). *Produktutveckling: Effektiva metoder för konstruktion och design*. Liber.
- Keane, P. (2017). *The new age of highly efficient products made with generative design*. Hämtad 22.04.2018 från: <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/15136/The-New-Age-of-Highly-Efficient-Products-Made-with-Generative-Design.aspx>
- Kesselring, F. (1951). *Bewertung von konstruktionen : Ein mittel zur steuerung der konstruktionsarbeit*. Dusseldorf: Deutscher Ingenieur-Verl. Hämtad från: <https://www.worldcat.org/title/bewertung-von-konstruktionen-ein-mittel-zur-steuerung-der-konstruktionsarbeit/oclc/73495110> (på Tyska)

- Krish, S. (2011, 1). A practical generative design method. *Computer-Aided Design*, 43(1), 88–100. Hämtad från: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448510001764> doi: 10.1016/J.CAD.2010.09.009
- Nationalencyklopedin. (2018). *brainstorming*. Hämtad 22.04.2018 från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l/unhbox/voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{a\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\accent23a\egroup\spacefactor\accent@spacefactorng/brainstorming>
- Nationalencyklopedin. (2018). *skiss*. Hämtad 22.04.2018 från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/enkel/skiss>
- Omron Corporation. (2018). *LD Series*. Hämtad 17.05.2018 från: <https://industrial.omron.us/en/products/ld-series#features>
- Raudberget, D. (2010). The decision process in set-based concurrent engineering - an industrial case study.
- Savransky, S. (2000). *Engineering of creativity : introduction to triz methodology of inventive problem solving*. CRC Press.
- Seyfried, P., Taiss, E., Calijorne, A., Li, F., & Song, Q. (2015). Light weighting opportunities and material choice for commercial vehicle frame structures from a design point of view. *Advances in Manufacturing*, 3, 19-26. Hämtad från: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40436-015-0103-8> doi: 10.1007/s40436-015-0103-8
- Sood, A. (2010). Technology s-curve. *Wiley International Encyclopedia of Marketing*. Hämtad från: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781444316568.wiem05046> doi: 10.1002/9781444316568.wiem05046
- Toyota Forklifts. (2018). *Lean transportation with the new automated guided cart from toyota material handling*. Hämtad 22.02.2018 från: <https://toyota-forklifts.eu/why-toyota/about-us/news-and-editorials/new-automated-guided-cart/>
- Toyota Material Handling. (2018). *Toyota tae050 – autocart / agc tow truck*. Hämtad 22.02.2018 från: <http://www.toyotamaterialhandling.com.au/products/product-search/automatic-guided-vehicles/toyota-tae050-autocart-agc-tow-truck/#prettyPhoto>
- Ullrich, G. (2015). *Automated guided vehicle systems: A primer with practical applications*. Voerde, Tyskland: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-662-44814-4
- Vinson, J. (2005). Sandwich structures: Past, present, and future. *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, 3-12. Hämtad från: https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-3848-8_1 doi: 10.1007/1-4020-3848-8_1
- Wohlecker, R., & Henn, R. (2008). Mass reduction potential of steel and aluminium in automotive applications. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 480-484.
- Åkerman, M., Hansson, O., Åsa Fast-Berglund, Ek, A., & Bergman, J. (2017). Utveckling av smarta AGC:er.