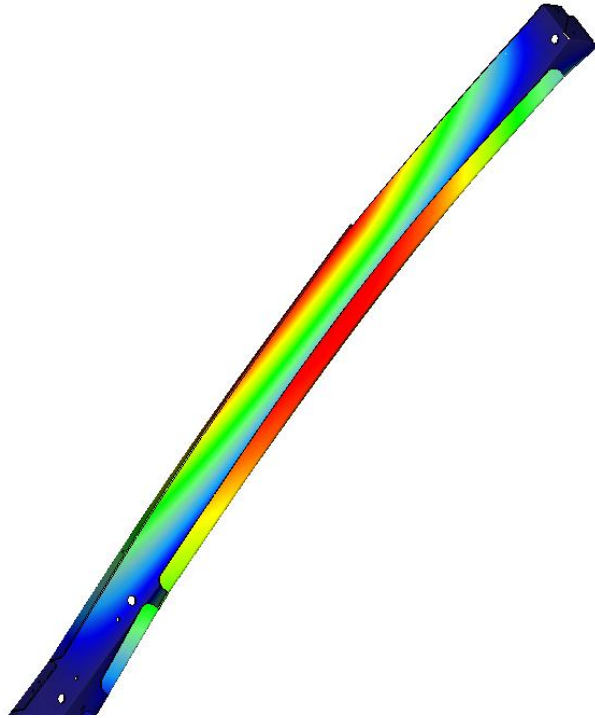




FE-analys av gångjärnsstolpe för GOLD 40 FE-analysis of hinges pillar for GOLD 40

*Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom
Maskiningenjörsprogrammet*

Simon Andregård
Peter Båstedt

Institutionen för Material- och tillverkningsteknik
Avdelningen för Avancerad oförstörande provning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sweden, 2011
Examinator: Gert Persson
Examensarbete No. 54/2011

Förord

Projektet som redovisas med denna rapport har genomförts som ett examensarbete vid högskoleingenjörsprogrammet för maskinteknik vid Chalmers tekniska högskola. Programmet omfattar 180 högskolepoäng, varav 15 högskolepoäng utgörs av detta examensarbete. Arbetet genomfördes under vårterminen 2011 på institutionen för material- och tillverkningsteknik på Campus Lindholmen. Uppdragsgivare för projektet var Swegon AB i Kvänum genom i3tex AB i Göteborg.

Vi vill tacka vår handledare Marko Koivumäki på i3tex för all hjälp med handledning av projektet och goda råd inför framtiden. Vi vill även tacka Martin Torstensson och Mikael Algotsson på Swegon för den tid de lagt ner för att hjälpa oss under projektets gång.

Vid Chalmers vill vi främst rikta vår tacksamhet till vår handledare Gert Persson som varit till stor hjälp och givit nyttig respons under hela projektet. Vi vill även tacka Sven Ekered som gav oss tillgång till verkstadslabbet.

Examensarbetet har fördjupat våra kunskaper inom FE-analyser och gett oss viktig erfarenhet kring arbete i projektform. Projektet har varit en passande avslutning på utbildningen och har gett oss många goda lärdomar att ta med ut i arbetslivet.

Simon Andregård
Peter Båstedt

Göteborg 2011-06-14

Sammanfattning

Swegon är ett företag i Kvänum som utvecklar och producerar ventilationslösningar. Ett av företagets viktigaste marknadsområde är så kallade kompaktaggregat, där fläktar, filter, styrsystem och värmeväxlare är integrerat i samma aggregat. GOLD-serien är mest populär och innefattar kompakt aggregat i ett flertal storlekar. Då aggregaten i denna serie för en tid sedan omkonstruerades uppstod problem med infästningen av inspektionsluckorna. Framförallt vid de större modellerna uppkommer en förskjutning av inspektionsluckorna till följd av att de stolpar där gångjärnen monteras är för veka. Förskjutningen försvårar stängning av luckorna, och sänker därmed kvalitetsintrycket.

Ett projekt i samarbete med i3tex och Swegon har genomförts för att söka en lösning till ovanstående beskrivna problem. Syftet med projektet har varit att konstruera en stolpe som omgående kan implementeras i produktionen, samt att sammanställa förbättringsidéer inför nästa större omkonstruktion. Det fanns också ett intresse från Swegons sida att få en utvärdering av hur FE-modellering skulle kunna användas vid deras utvecklingsavdelning. Arbetet har i huvudsak bedrivits på Chalmers, och till viss del vid provningsavdelningen på Swegons anläggning i Kvänum.

Inledningsvis studerades den konstruktion som används idag. Här användes en testfixtur för fysiska prover, samt FE beräkningar i Pro/Mechanica. Då bristerna kartlagts övergick arbetet i att skapa koncept för en ny och stabilare infästningsstolpe. Koncepten utvärderades med hjälp av FE-modellering, och därefter valdes det bästa konceptet ut för tillverkning och fysisk provning i fixtur.

Det vridande momentet som uppstår då tätningslisten mellan inspektionslucka och aggregat komprimeras är största anledningen till stolpens deformation. Resultatet av arbetet har visat att stolpen bör täckas för att bilda en sluten profil, vilket leder till att vridstyvheten ökas. Det har även visat sig effektivt att öka stolpens plåttjocklek. Inför nästa omkonstruktion av GOLD serien borde utformningen av tätningslisten ses över, då det nuvarande utförandet har visat sig vara en av anledningarna till problemet med luckorna. Att använda sig av FE-modellering har underlättat arbetet vid jämförandet av koncepten. Det har däremot visat sig vara tidskrävande att konstruera en modell som i hög grad efterliknar det verkliga belastningsfallet eftersom konstruktionen består av flera detaljer.

Ett krav från Swegon var att stolpen skall kunna tillverkas med den befintliga maskinparken, vilket innebär bockning, pressning och stansning av plåt. Under projektets gång har ingen större hänsyn tagits till hur förändringarna påverkar produktionskostnaden. Enbart GOLD 40, vilket är aggregatet med störst inspektionslucka och därmed längst stolpe, har studerats.

Abstract

Swegon is a company in Kvänum, Sweden, that develops and produces complete solutions for indoor air handling. One of their most important business areas is one-piece units, where fans, filters, control system and heat exchangers are integrated. The GOLD series are their bestselling compact units. Unfortunately a problem with displacement of the inspection hatches occurred after the last redesign of the GOLD series. The problem appears during closing of the hatches and is particularly present in the larger models. This displacement complicates the closing of the hatches and lowers the quality impression of the product.

To find a solution to this problem, a project was initiated in cooperation with I3tex and Swegon. The main purpose was to design a new attachment pillar to the inspection hatches that easily can be established in the production line, and also to compile useful ideas that can be used in future design work. Another aim of the project was to evaluate the use of FE-modeling for design work. The project has mainly been performed at Chalmers and at some points at the test department at Swegon.

Initially studies of the origin pillar design were performed by physical testing and FE-modeling. When the deficiencies of the pillar were detected, the process of generating new concepts was initiated. The generated concepts were analyzed and evaluated by FE-modeling. The best concept were manufactured at Swegon's factory and thereafter tested in their test department.

During the closing procedure of an inspection hatch a torsion torque appears on the pillar due to the compression of the sealing strip between the hatch and the pillar. This torsion torque is the main reason for the displacement of the hatches. Analyzes made have shown that there is a great advantage to cover the pillar with a lid, to produce a sealed cross section. Another way to strengthen the pillar is to use thicker steel sheets during manufacturing. To reduce the problem with the torsion torque, further development of the sealing strips and their contact surfaces is advised. We have found FE-modeling very useful during the comparison and evaluation of the different concepts, on the other hand it can cost a lot of time to create a model that corresponds well to the reality.

Some of the requirements that Swegon had in the beginning of the project was that the pillar must be producible in their existing machinery, and that the construction should include as few parts as possible. During the project, no consideration of the production cost changes according to the changes made in the pillar design has been taken.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Precisering av frågeställning.....	2
2. Metod	2
2.1 Analys av den befintliga stolpen.....	3
2.1.1 Inspänningsvillkor för analys i Pro/Mechanica.....	4
2.1.2 Belastningsfall för analys i Pro/Mechanica	5
2.2 Testning i fixtur	8
2.3 Kravspecifikation	10
2.4 Konceptgenerering	10
2.5 Analys av utvalda koncept.....	10
3. Resultat.....	12
3.1 Resultat av analys för befintlig stolpe	12
3.2 Framtagning och analys av koncept	16
3.2.1 Summering av konceptens maximala utböjning samt utböjning i mätpunkterna	20
3.3 Utökade analyser av förbättrade koncept	21
3.3.1 Koncept X - täcklock och modifierad stolpe	22
3.3.2 Koncept Y - stolpe med stöttor och ökad plåttjocklek	24
3.4 Val av slutgiltigt koncept	25
3.4 Provning av tillverkat koncept.....	27
4. Fortsatt arbete.....	28
4.1 Problem relaterade till koncept X	28
4.2 Idéer för framtida konstruktioner	29
4.2.1 Förbättringar på gångjärnen	29
4.2.2 Gångjärnsinfästningen.....	30
4.2.3Tättningslist	30
5. FEM – Hur kan det användas i utvecklingsarbete?	32
5.1 Tillvägagångssätt	32
5.1.1 Förstudie.....	32
5.1.2 Datormodell.....	32

5.1.3 Analys	33
6. Slutsatser	34
6.1 Slutsatser om stolpen	34
6.2 Slutsatser om FE	34
Referenslista	35
Appendix	

1. Inledning

I detta avsnitt beskrivs bakgrund, syfte och avgränsningar för projektet. Syfte och avgränsningar för projektet bestämdes vid ett inledande möte på Swegon där samtliga inblandade parter medverkade.

1.1 Bakgrund

Swegon AB är ett företag som ingår i Latour-koncernen. Företaget tillverkar produkter och lösningar för ventilations- och inneklimatsystem. Swegon är ett av Nordens tre största företag inom området och arbetar nu hårt med att öka sin marknadsandel internationellt. Swegon har fem anläggningar för utveckling och produktion, varav den största ligger i Kvänum. I över 50 år har det under olika företagsnamn tillverkats ventilationsutrustning på orten. En av företagets viktigaste ventilationslösningar är kompaktaggregaten som ingår i GOLD-serien. GOLD aggregaten har funnits i över 15 år och är helhetslösningar, där värmeväxlare, filter och fläktar samt styr- och reglersystem är integrerat. Dessa aggregat finns i en rad olika storlekar och modeller för att möta enskilda kunders krav på funktionalitet.

För en tid sedan omkonstruerades GOLD-aggregaten för att enklare kunna bygga ihop fler moduler utan att i onödan öka installationsytan eller försämra luftflödet. Vid denna omkonstruktion försämrades dessvärre infästningen för inspektionsluckorna. Luckorna fästs vid en stolpe tillverkad av bockad plåt. Då de monteras och används uppstår i vissa fall elastiska deformationer i stolpen. Deformationen ger en förskjutning av inspektionsluckan, vilket i sin tur medför problem vid stängning av densamma. Swegon har tidigare inte i någon större utsträckning använt sig av FE-modellering i sitt utvecklingsarbete. Därför finns ett intresse från deras sida av att få information om hur detta hjälpmedel kan användas vid deras produktutveckling.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att förbättra gångjärnsstolpens egenskaper för att minimera risken att stolpen deformeras till den grad att det påverkar stängningen av inspektionsluckorna. Arbetet skall resultera i en lösning som fungerar ihop med övrig konstruktion och därmed relativt enkelt kan implementeras i produktionen. Om lösningar som förbättrar gångjärnsstolpens egenskaper, men kräver större omkonstruktion av övriga geometrier, påträffas under arbetets gång skall dessa sammanställas. Sammanställningen skall kunna användas som idékälla då aggregatet i framtiden genomgår en större omkonstruktion. Projektet skall även resultera i en presentation om hur FE-modellering kan användas vid utvecklingsarbete och vad man bör tänka på vid ett framtida införande av detsamma.

1.3 Avgränsningar

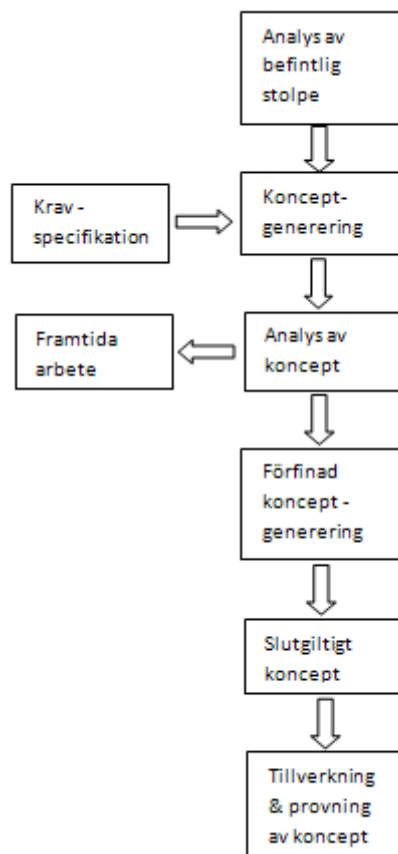
Ekonomiska kalkyler över hur olika förändringar påverkar produktionskostnaden ingår inte i detta projekt. Arbetet skall fokusera på att ta fram en ny design för gångjärnsstolpen, och i möjligaste mån behålla övriga delar av konstruktionen (t.ex. luckor, ramverk och mellanplan) intakt. Att ta fram produktionsutrustning för en eventuellt ny typ av stolpe ingår inte. Arbetet kommer att ske i Pro/Engineer och Pro/Mechanica.

1.4 Precisering av frågeställning

- Var finns svagheter i dagens konstruktion?
- Hur bör en stolpe som skall passa i ett befintligt aggregat konstrueras för att minska deformationen i densamma då inspektionslucka monteras och används?
- Vilka förändringar bör göras på stolpen vid en framtida större omkonstruktion?
- Är FE-modellering ett meningsfullt verktyg vid denna typ av arbete?

2. Metod

Konstruktion av olika förbättringar och framtagning av nya koncept har gjorts på klassiskt vis med skisser som sedan förts in i CAD-programmet Pro/Engineer. Utvärdering av de olika konceptens för- och nackdelar angående hållfasthet har utförts i programmet Pro/Mechanica, som är ett tillägg till Pro/Engineer. Vid arbetet i Pro/Mechanica har flera inbyggda verktyg och metoder använts. För den intresserade läsaren finns ett avsnitt i appendix där grundläggande funktioner för programmet i samband med mekanikkonstruktion beskrivs. Projektet har följt en modell enligt figur 1.

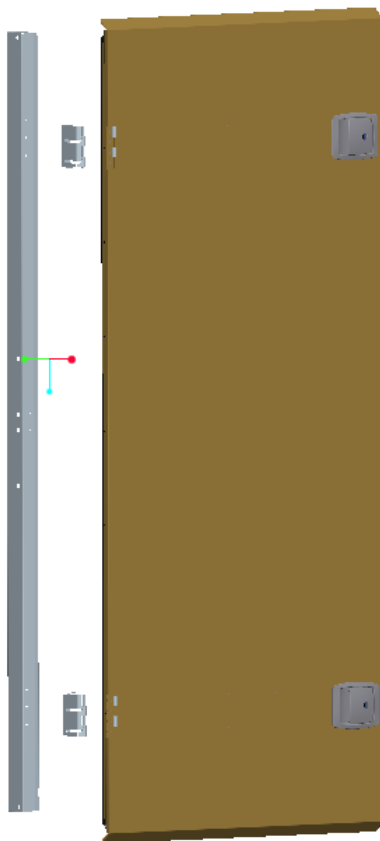


Figur 1 Projektets arbetsgång

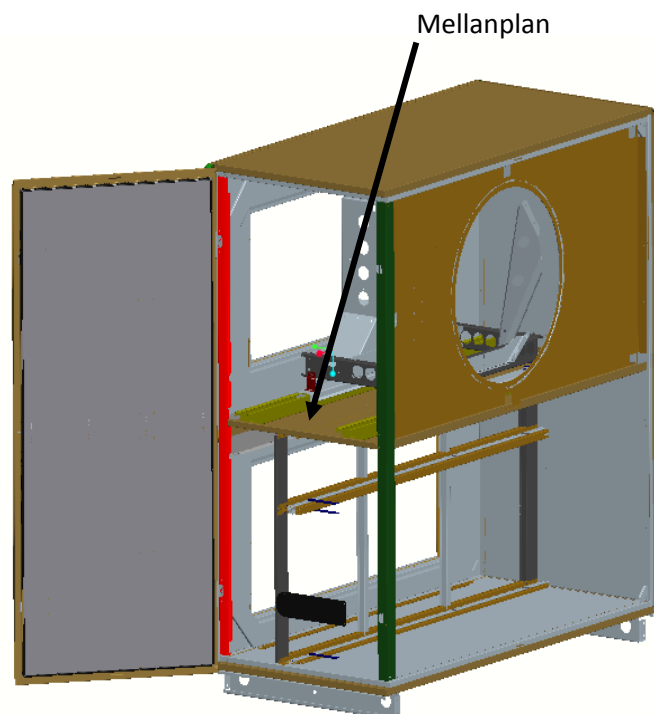
Det kan vara svårt och tidskrävande att konstruera en datormodell som helt återspeglar hur en konstruktion beter sig i verkligheten. För att komma runt detta problem konstrueras istället ett ungefärligt belastningsfall som sedan används för att jämföra de olika koncepten med varandra. I projektet används den befintliga stolpen som jämförelsereferens för de nya koncepten. Förbättringsmöjligheter som kräver större omkonstruktioner sammanställs i slutet av arbetet för att användas som utgångsmaterial vid framtida utvecklingsarbete.

2.1 Analys av den befintliga stolpen

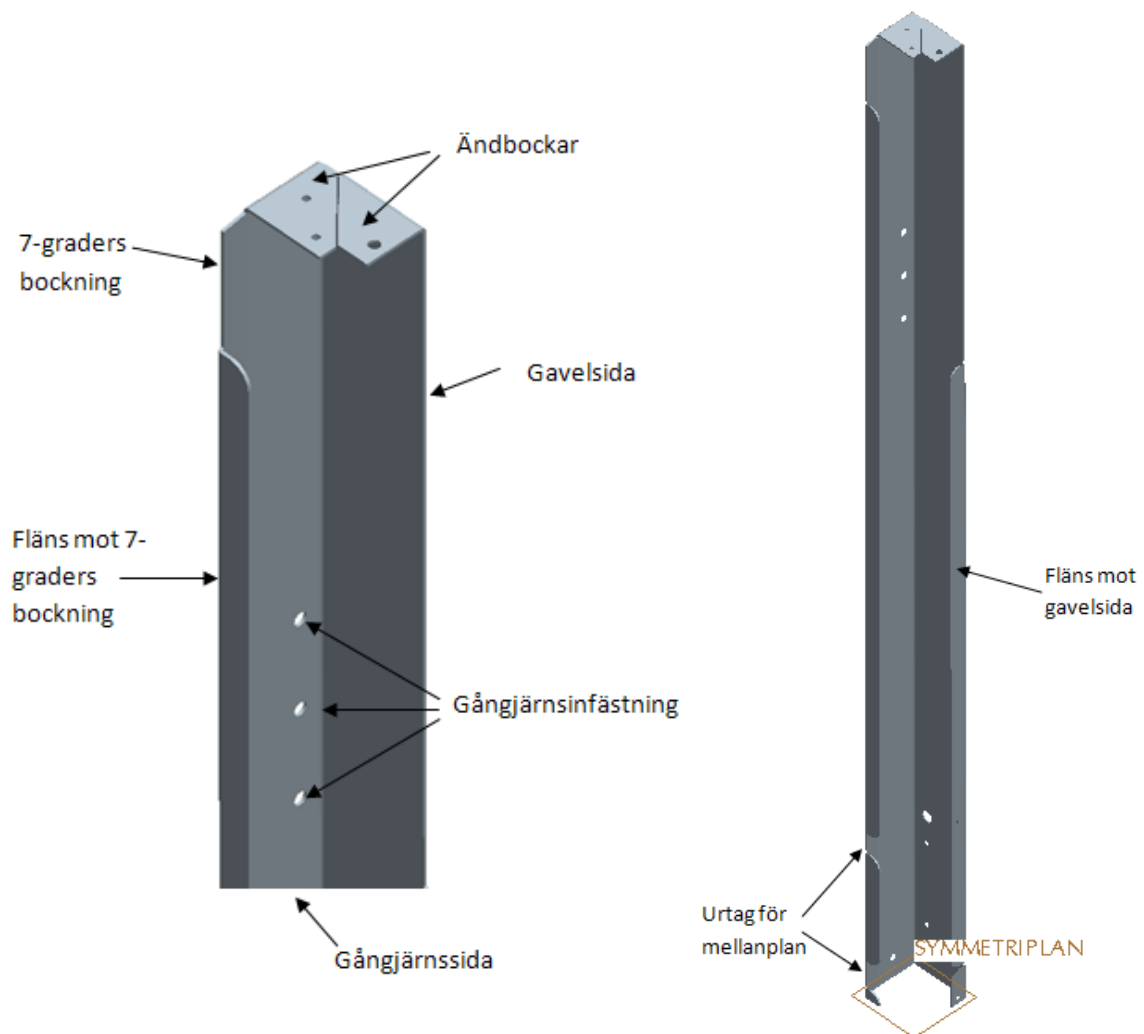
För att på ett tidigt stadium få idéer till hur en ny stolpe bör utformas för att stå emot de befintliga belastningarna är det viktigt att undersöka vilka brister som finns i den nuvarande designen. Stolpen sitter inspänd i tak och golv, samt i mellanplanet. En inspektionslucka är monterad i stolpen via två gångjärn. En bild av detta ses i figur 2. I figur 3 visas hur stolpen med inspektionslucka är monterad i aggregatet, där stolpen är rödmarkerad. Stolpens egenskaper har undersökts dels vid olika belastningsfall i Pro/Mechanica och dels vid belastning i provfixtur. Vid fastställning av gällande belastnings- och inspänningsvillkor hämtades information ur Dahlberg [1], Grahn och Jansson [2] samt ifrån Gert Persson [3]. Det virtuella belastningsfall som gav de mest relevanta resultaten var det som senare användes vid jämförelse av de olika koncepten. Analyser har genomförts både på enbart stolpen och på stolpen i kombination med de stöttor som idag används i produktionen. Figur 4 på nästkommande sida visar hur stolpens olika delar benämns i rapporten.



Figur 2 Stolpe, gångjärn och inspektionslucka



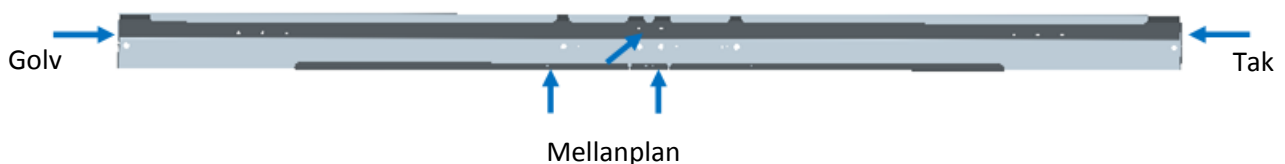
Figur 3 Del av GOLD 40-aggregat



Figur 4 Benämning av stolpens olika delar

2.1.1 Inspänningsvillkor för analys i Pro/Mechanica

När stolpen är monterad i aggregatet är den skruvad i tak och golv, samt på tre ställen i anslutning till mellanplanet. I förhållande till stolpens vekt kan dessa inspänningar anses vara helt fixerade. I Pro/Mechanica har stolpen därför tilldelats randvillkor för att simulera fast inspänning i båda ändplanen. För att efterlikna mellanplanets inverkan skapades fasta inspänningar kring de hål där mellanplanet skruvas fast. En åskådliggöring av stolpens inspänning ges av figur 5.



Figur 5 Stolpens inspänningar

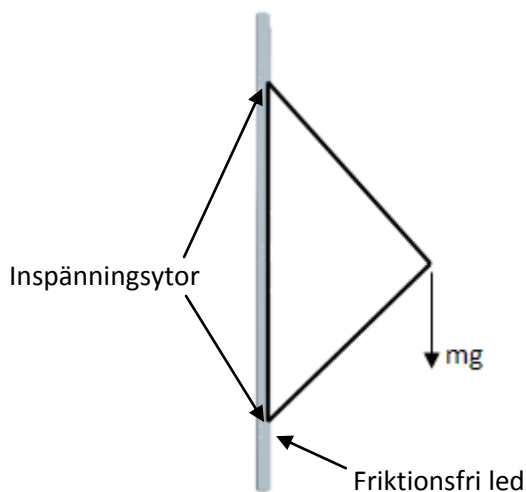
2.1.2 Belastningsfall för analys i Pro/Mechanica

På grund av att stolpe-gångjärn-lucka-konstruktionen innehåller flera delar var det till en början svårt att fastställa vilka belastningar som verkar på stolpen. Därför har belastningsfallet reviderats under projektets gång. Vid framtagandet av belastningsfall för FE-analyserna har information hämtats ur Persson [4] och Toogood [5].

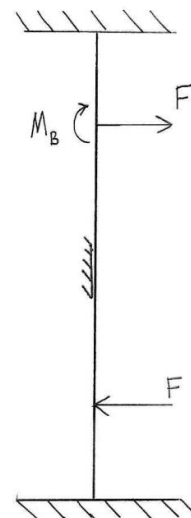
Belastningsfall A

Inledningsvis användes en belastning som skapades genom att koppla samman stolpen med en förenklad inspektionslucka. Luckan skapades av stela balkar som sammankopplades och belastades med dess egentyngd i den punkt som motsvarar den verkliga luckans tyngdpunkt.

Sammankopplingen av belastningsmodellen och stolpen gjordes genom att på stolpen definiera ytor av samma storlek som gångjärnen och därefter fixera luckan i dessa. Arrangemanget visas i figur 6. Då studie av gångjärnen som används i produktionen visat att dessa har ett stort inbyggt spel definierades den ena inspänningen i stolpen som en led. En skiss av belastningsfallet visas i figur 7. Resultaten som erhöles vid detta belastningsfall stämde dåligt med konstruktionens verkliga beteende och därför valdes detta bort.



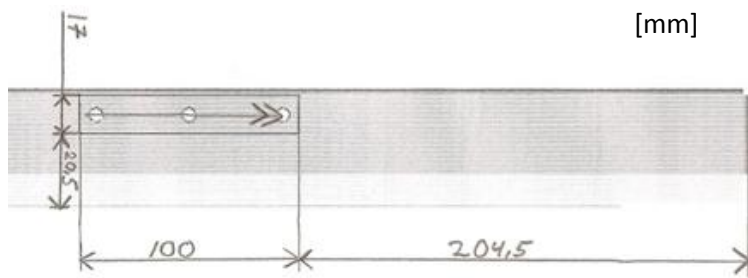
Figur 6 Belastningsfall A



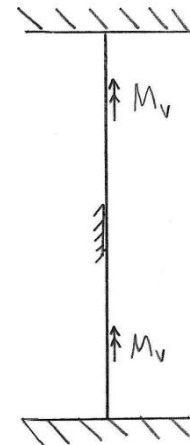
Figur 7 Skiss av belastningsfall A

Belastningsfall B

Belastningsfallet består av en momentlast kring stolpens vertikalaxel. Storleken av lasten valdes utifrån resultat av provning i fixtur till 28,35 Nm. Lasten lades på i ytor kring gångjärnsinfästningarna, se figur 8. Det var lämpligt att lägga på lasten i dessa ytor eftersom gångjärnets utformning kräver att dessa ytor finns på samtliga koncept. Figur 9 visar en enkel skiss använda inspänningar och hur det vridande momentet applicerats.



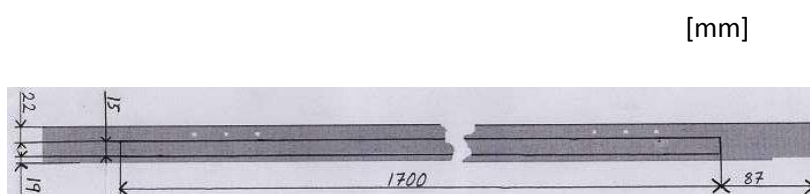
Figur 8 Momentets angreppsytta för belastningsfall B



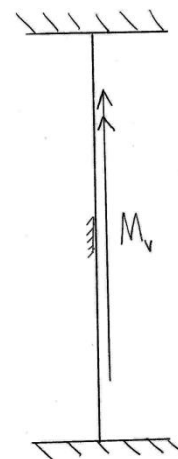
Figur 9 Skiss av belastningsfall B

Belastningsfall C

I lastfall C belastas stolpen av ett vridande moment som verkar över en utbredd yta längs stolpen, se figur 10. Storleken på momentet är 28,35 Nm. Belastningen är en vidareutveckling av lastfall B, som gjorts för att öka överensstämmandet med verkligheten. I figur 11 visas en enkel skiss av belastningen.



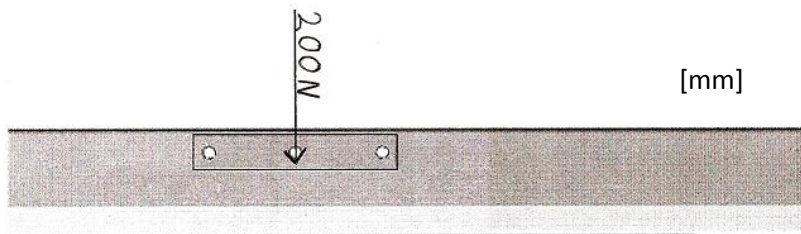
Figur 10 Momentets angreppsytta för belastningsfall C



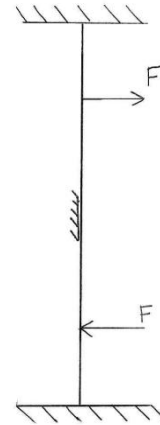
Figur 11 Skiss av belastningsfall C

Belastningsfall D

Lastfall D, används för att kontrollera vilket av koncepten som tar upp horisontella krafter bäst. Här har kraften 200 N applicerats i horisontalled vid respektive gångjärnsyta, se figur 12. Figur 13 visar en skiss av belastningen.



Figur 6 Kraftens angreppsyta för belastningsfall D



Figur 13 Skiss av belastningsfall D

I tabell 1 finns en sammanställning av de olika lastfallen.

Tabell 1 Sammanställning av lastfall

Lastfall	Kraft [N]	Moment [Nm]	Figur
A	345 (vertikalled)	-	6
B	-	28,35	9
C	-	28,35	11
D	200 (horisontalled)		12

2.2 Testning i fixtur

Genom att konstruera en testfixtur kunde praktiska försök göras för att fastställa belastningsfallet för stolpen. Syftet med provning i fixturen var att öka förståelsen för hur stolpen belastas och därmed förbättra möjligheterna till en bra modell till FE-analyserna. Provrighgen konstruerades av fyrkantströr som svetsades samman. En ritning av testfixturen samt en bild av den färdiga konstruktionen finns i Appendix.

Stänger och vikter

Stolpen monterades i fixturen genom fastskruvning i ändbockarna. Vid detta testtillfälle fanns ingen möjlighet att fixera stolpen vid mellanplansinfästningarna och det fanns inte heller någon inspektionslucka tillgänglig. För att ersätta den belastning inspektionsluckan skulle utgjort användes två rör som fästes vid gångjärnen vinkelrätt mot stolpen och därefter belastades med vikter. Rören hade samma längd som luckans bredd och belastningen skedde på halva rörets längd för att simulera luckans tyngdpunkt. Uppspänning och belastning av stolpens övre del kan ses i figur 14.

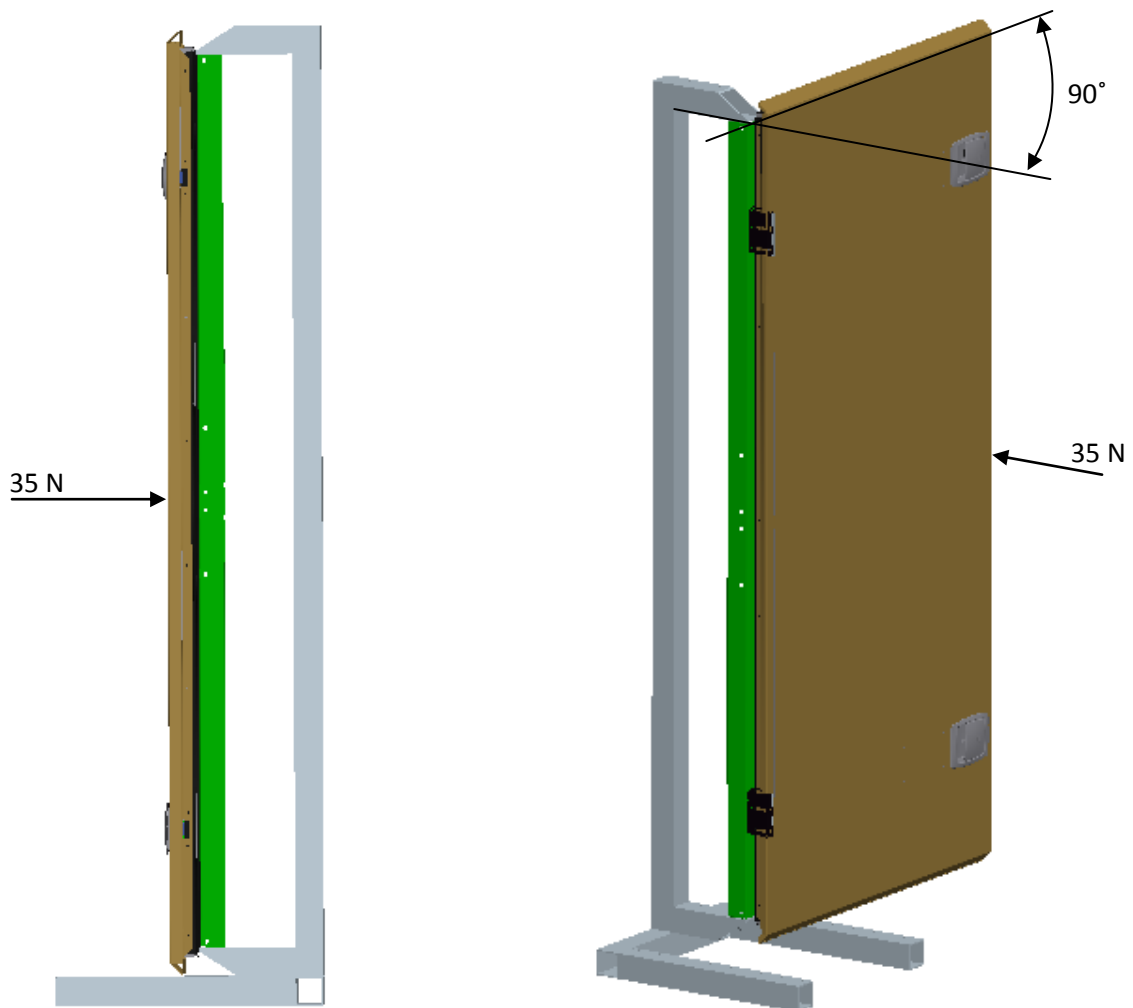
Nedbøjningen vid det övre rörets ytterkant uppmättes med linjal. Resultaten av provningen överensstämde dåligt med det problem Swegon beskrivit. För att finna ett belastningsfall som stämde bättre med verkligheten utfördes nya tester med en inspektionslucka monterad på stolpen.



Figur 14 Stolpen belastas i provriggen

Belastning med inspektionslucka

Stolpen monterades i fixturen och på stolpen monterades gångjärn samt en komplett inspektionslucka av samma typ som används i produktionen. I samma position som låset är monterat på luckan anslöts en dynamometer. Därefter belastades luckan tills den stod i 90 graders vinkel med stolpen. Detta belastningsfall visade att det är under stängningsförloppet som den i särklass största förskjutningen uppstår, i form av en vridning av stolpen. Figur 15 visar hur stolpen belastades.



Figur 15 Inspektionsluckan belastas med hjälp av en dynamometer

Genom att multiplicera den uppmätta kraften med hävarmen, som utgjordes av avståndet mellan dynamometern och gångjärnen, bestämdes momentet kring stolpen. För att kunna jämföra den ursprungliga stolpen med den förbättrade bestämdes åtta mätpunkter. En optisk givare [6] med användes för att mäta hur mycket de olika punkterna förflyttades då luckan stängdes. Till givaren kopplades samplingsenhet [7] som möjliggjorde kommunikation med en PC där mätdata lagrades i en excel-fil. Användningsförehavandet för utrustningen beskrevs av Dan Windroth [8]. Mätpunkternas placering visas i Appendix. Resultaten från testerna ansågs relevanta för att kunna lösa problemet med stolpen, därför användes ett liknande belastningsfall i datorsimuleringen.

2.3 Kravspecifikation

Vid utformningen av gångjärnsstolpen är det i första hand funktionskrav, snarare än estetiska krav som bör beaktas. I samråd med inblandade parter på Swegon sammanställdes en kravspecifikation för den nya stolpen. Följande krav och önskemål fanns som underlag för stolpen.

Krav:

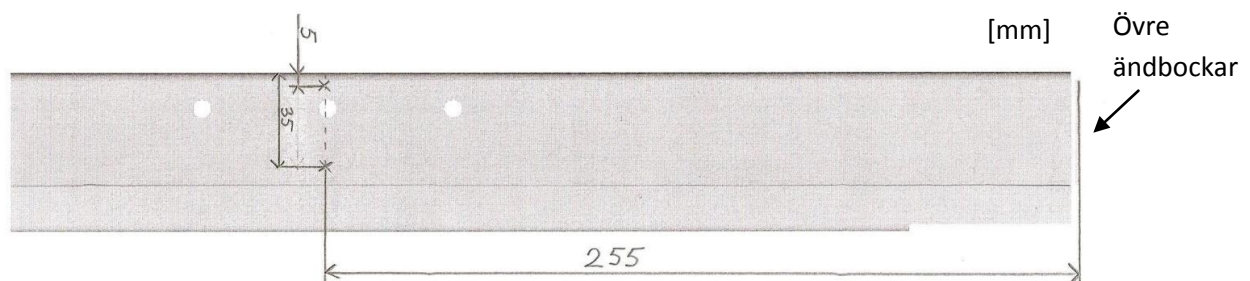
- Skall kunna tillverkas av Swegon i befintlig maskinpark.
- Skall vara vändbar för att endast en modell skall behövas till varje aggregatstorlek.
- Stolpen skall passa i det befintliga aggregatet.
- Fläktmotorns monteringsförfarande får ej förändras.
- Plåtskruv eller popnit får användas för fixering.
- Plåttjocklekar som kan användas är följande: 1,25; 1,5; 2,0; 2,5 och 3 mm.
- Materialet är stål DX51D AZ185 (motsvarar SS 11 51-20).

2.4 Konceptgenerering

Då kravspecifikationen fastställts användes brainstorming för att generera koncept på hur stolpen skulle kunna utformas. Information om den plåtformning som var aktuell i detta fall hämtades ur Institutet för verkstadsteknisk forskning [8] och SSAB Tunnpå AB [9]. De framtagna koncepten studerades och deras egenskaper jämfördes med kravspecifikationen. De koncept som antogs uppfylla kravspecifikationen tillräckligt bra valdes sedan ut för grundligare studier.

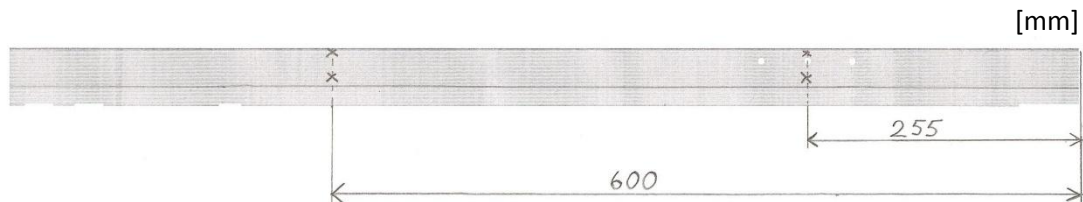
2.5 Analys av utvalda koncept

De koncept som uppfyllde kravspecifikationen modellerades på samma sätt som tidigare i Pro/Engineer. Därefter användes de inspänningsvillkor som tagits fram vid analysen av den ursprungliga stolpen ihop med belastningsfall B. För att möjliggöra exaktare jämförelser definierades mätpunkter på stolpen. Då det är inspektionssluckans förflyttning som är intressant lades mätpunkterna i det plan där gångjärnen är monterade. En figur på de övre mätpunkternas placering kan ses i figur 16. De undre mätpunkterna är placerade på samma sätt, men med måttsättning från de nedre ändbockarna.



Figur 16 Placering mätpunkter på övre delen av stolpen.

Resultaten från analyserna av de olika koncepten jämfördes med varandra och med resultaten för den befintliga stolpen. Vid denna jämförelse var det förskjutningen i mätpunkterna samt maximala förskjutningen som studerades. I samråd med de inblandade på Swegon kombinerades de olika koncepten till två nya koncept. För dessa koncept gjordes ytterligare analyser med lastfall C och lastfall D. För att få en mer noggrann jämförelse användes här fyra ytterligare mätpunkter där förskjutningen studerades. Placeringen av dessa ses i figur 17. Placeringen av punkterna är symmetriskt kring stolpen mitt. Avståndet mellan punkterna och kanten är samma som i figur 9



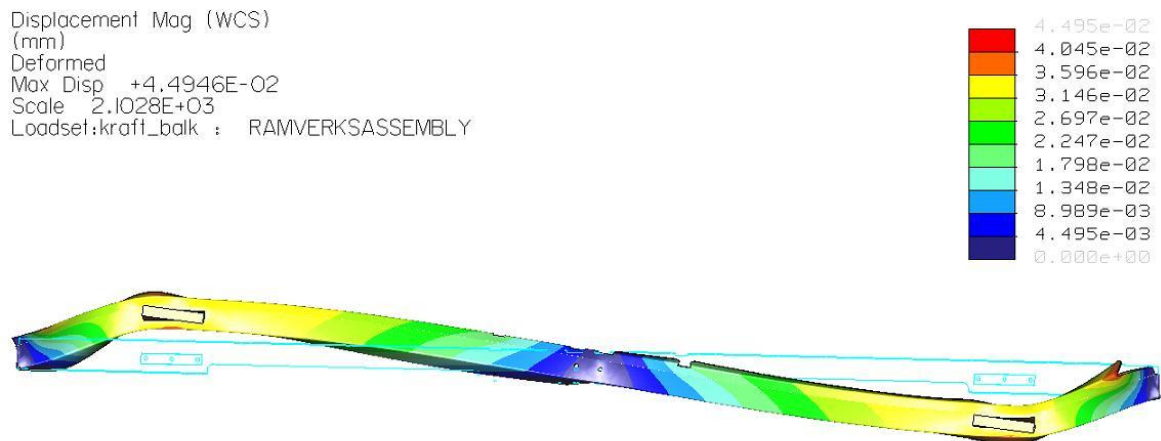
Figur 17 Mätpunkterna placering vid de sista analyserna.

3. Resultat

I detta kapitel redovisas de resultat som erhållits under projektets gång. Först presenteras de analyser som gjorts för den befintliga stolpen. Därefter visas de framtagna koncepten och analysresultaten för dessa. Kapitlet avslutas med ett avsnitt om fysisk provning av det slutliga konceptet.

3.1 Resultat av analys för befintlig stolpe

Genom att belasta den befintliga stolpen enligt belastningsfall A som beskrivits i metodkapitlet, det vill säga det med en simulerad inspektionslucka, erhöles resultat enligt figur 18.



Figur 18 Ursprungliga stolpen belastad enligt belastningsfall A

Utböjningen på stolpen är mycket liten då luckmodellen belastas med en vertikal kraft. Storleken av utböjningen kan räknas i hundradelar och kan därmed i praktiken anses vara obefintlig vid denna belastning. Mätpunkternas förskjutning redovisas i tabell 2. Praktiska försök med komplett aggregat har visat att det finns en märkbar deformation i stolpen med luckan monterad, alltså är inte lastfallet användbart vid utvärdering av kommande koncept. För att kunna identifiera vid vilken typ av belastning de största deformationerna uppkommer konstruerades en testfixtur där flera olika lastfall kunde testas och utvärderas.

Tabell 2 Mätvärden för ursprungliga stolpen belastad enligt lastfall A

	Övre mätpunkt [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från gavelsida	0.036	0.036
35 mm från gavelsida	0.036	0.036

Provning i fixtur

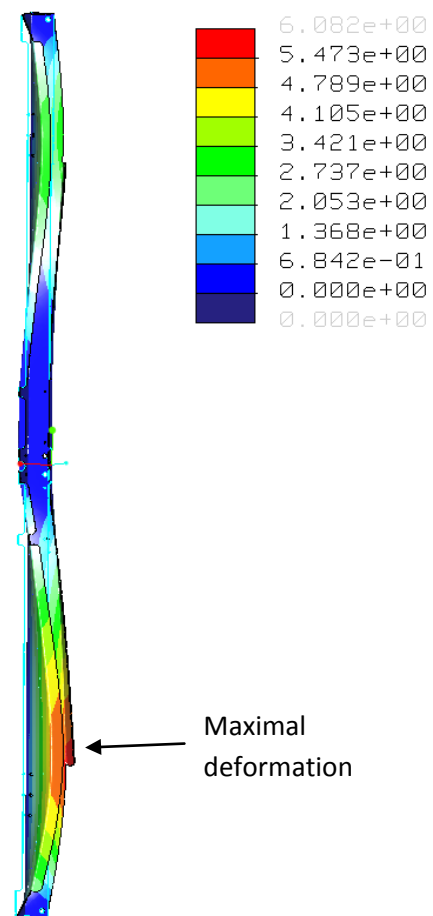
Det inledande försöket då stolpen belastades med vikter på hävarmar fastsatta i gångjärnen visade precis som den utförda FE-analysen att deformationen i stolpen är nästintill obefintlig med detta belastningsfall. Däremot visade sig gångjärnen vara mycket känsliga för denna belastning. Det fanns ett stort glapp mellan gångjärnens 2 delar. Glappet gav upphov till en förskjutning på ca 20 mm av den 820 mm långa hävarmens ytterända. Redan vid relativt små laster uppstod en stor bestående deformation av gångjärnen. Slutsatsen från detta testtillfälle var att gångjärnens glapp och vekhet inverkar mer på luckans förflyttning än stolpen. För att bekräfta resultaten bestämdes att försök skulle göras med en riktig inspektionslucka monterad på stolpen.

Mätningarna vid det andra testtillfället då stolpe, gångjärn och inspektionslucka monterades i fixturen gav helt andra resultat än vid det tidigare mättillfället. Luckan belastades med hjälp av en dynamometer med 35 N, enligt den metod som tidigare beskrivits. Mätvärdena för punkternas förflyttning kan ses i Appendix. Det visade sig att luckan stabiliserade gångjärnen och omfördelade belastningen. Inga kritiska deformationer uppkom i gångjärnen, och det glapp som fanns i dem försvann vid monteringen. Stolpen uppvisade ingen märkbar deformation på grund av inspektionsluckans egentyngd. Under stängningsförloppet uppkom däremot en vridning av stolpen. Vridningen uppkommer då tätningslisten mellan inspektionslucka och stolpe komprimeras vid stängning. Listen är monterad på luckan och tätar mot det plan på stolpen där gångjärnen är monterade. Stolpens utformning leder till att den inte kan ta upp det vridande moment som uppstår vid stängningen, och därför vrids den.

Problemet har minskats genom att gångjärnen shimsats ut för att minska trycket från listen vid stängning. Tyvärr minskas då aggregatets täthet. Då alla prover hittills visat att stolpen inte uppvisar någon betydande deformation på grund av inspektionsluckans tyngd, beslutades här att vridningen istället skulle studeras. Mellanplanets infästningsytor visade sig ha stor betydelse och därför bestämdes att fasta inspänningar i dessa ytor skulle användas vid FE-analyserna.

FE-analys i Pro/Mechanica

Då lastfall B definierats inleddes en ny analys av den befintliga stolpen. Som figur 19 visar är stolpens styvhet låg då den belastas med det vridande momentet. Den maximala deformationen uppgår till ca 6 mm och uppkommer vid urtagen vid gångjärnsinfästningen. Vridningen av stolpen varierar över dess längd, främst beroende på de fasta inspänningarna. Det medför att avståndet mellan listen och stolpen inte är lika stort överallt och det är en nackdel för möjligheten att uppnå en korrekt tätning. I tabell 3 redovisas mätvärden från analysen av stolpen. Slutsatsen inför kommande konceptgenerering blev att det krävs en ökning av stolpens vridstyvhet.



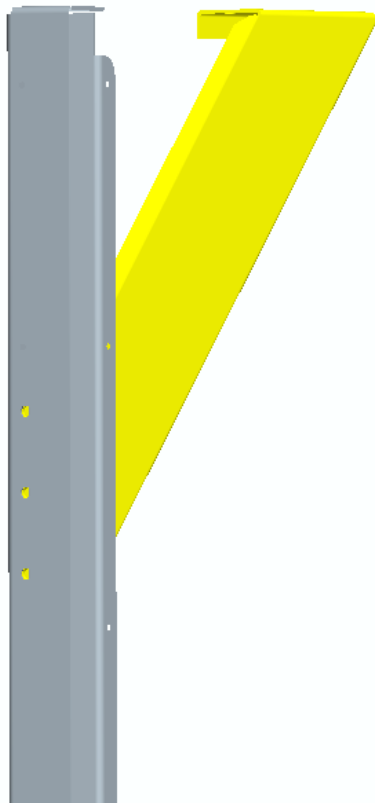
Figur 19 Ursprunglig stolpe belastad med lastfall B

Tabell 3 Mätpunkternas förskjutning för ursprungliga stolpen belastad med lastfall B

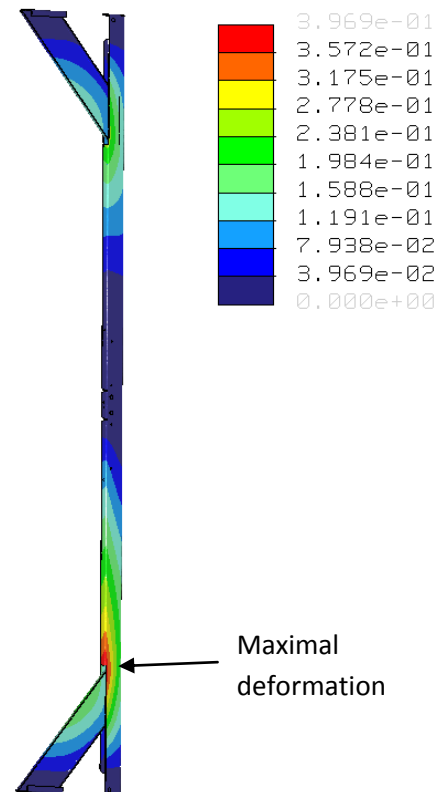
	Övre mätpunkt [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från gavelsida	0,273	0,384
35 mm från gavelsida	2,093	3,213

Stolpe med stöttor

För att minska problemet med att stolpen deformeras vid stängning har Swegon på de större modellerna monterat stöttor. Stöttorna sitter fastskruvade i gångjärnsinfästningarna på stolpen och i aggregatets tak respektive golv. De är liksom stolpen böckade plåtkonstruktioner med plåttjockleken 1,5 mm. I figur 20 visas hur stöttan sitter monterad i stolpens övre del. Resultatet av stolpens deformation vid lastfall B visas i figur 21.



Figur 20 Stolpe och stötta



Figur 21 Deformationsbild för stolpe med stötta belastad med lastfall B

Maximala deformationen blir ca 1,12 mm och uppkommer i urtaget vid gångjärnsinfästningarna, se pil i figur 20. I tabell 4 visas mätpunkternas förskjutning vid den givna belastningen.

Tabell 4 Mätpunkternas förskjutning för stolpe med stötta belastad med lastfall B

	Övre mätpunkt [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från gavelsida	0,110	0,148
35 mm från gavelsida	0,085	0,065

Stöttorna tar upp en stor del av momentet som läggs på i gångjärnsytorna och deformationen i mätpunkterna ligger därför på en relativt låg nivå. Stöttorna underlättar vid monteringen av stolpen, då de vid korrekt montering ser till att stolpen hamnar vinkelrätt mot taket och golvet. Detta är särskilt viktigt för att säkerställa aggregatens kryssmått.

3.2 Framtagning och analys av koncept

I detta avsnitt presenteras de koncept som tagits fram och analyser av hur de deformeras på grund av den pålagda belastningen.

Koncept 1 - Öka plåttjocklek i stolpen till 2 mm:

I detta koncept har den ursprungliga stolpen tilldelats en plåttjocklek på 2 mm, i övrigt är inga förändringar gjorda. Maximala utböjningen är ca 3,37 mm och uppkommer i gavelsidan, i höjd med den nedre gångjärnsinfästningen. I tabell 5 redovisas mätpunkternas förskjutning.

Tabell 5 Mätpunkternas förskjutning för koncept 1 belastad med lastfall B

	Övre mätpunkt [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från gavelsida	0,152	0,209
35 mm från gavelsida	1,237	1,770

En ökning av plåttjockleken till 2 mm ger en förbättring med ca 40 % gentemot ursprunglig plåttjocklek på 1,5 mm. I Swegons standardsortiment av plåttjocklekar ingår 2 mm och maskinparken klarar av att hantera det utan större omställningar. Nackdelar med konceptet är större materialåtgång än tidigare genom den ökade massan. Deformationen uppkommer enligt samma mönster som med den ursprungliga plåttjockleken.

Koncept 2 - Öka plåttjocklek i stolpen till 3 mm:

Plåttjockleken har i detta koncept ökats till 3 mm, men övrig geometri är orörd. Maximala utböjningen blir ca 1,30 mm och uppkommer i gavelsidan, i höjd med den nedre gångjärnsinfästningen. I tabell 6 visas mätpunkternas förskjutning för koncept 2.

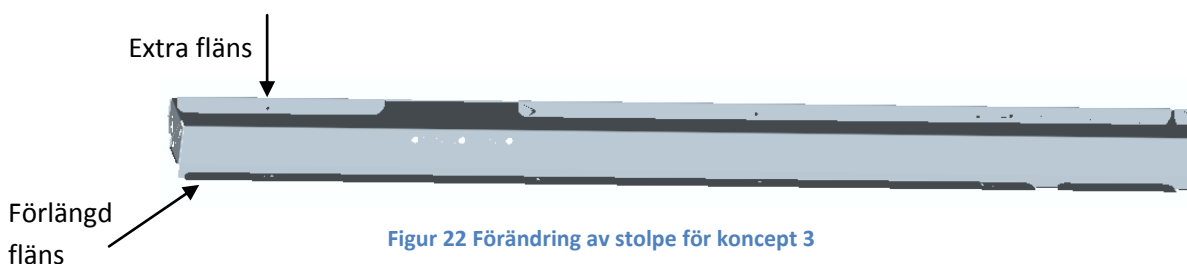
Tabell 6 Mätpunkternas förskjutning för koncept 2 belastad med lastfall B

	Övre mätpunkt [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från gavelsida	0,000	0,000
35 mm från gavelsida	0,534	0,684

En plåttjocklek på 3 mm ger stor förbättring. I mätpunkten 5 mm från kanten är utböjningen obefintlig. Nackdelen med konceptet är att materialåtgången blir dubbelt så stor som med den ursprungliga tjockleken. Den ökade vikten gör även stolpen mer svårhanterlig vid montering.

Koncept 3 - Täckplåt med infästning enbart i tak/golv:

På den ursprungliga stolpen har en extra fläns lagts till på gavelsidan vid gångjärnsinfästningen mot respektive ändplan. Flänsen på 7-gradersbockningen har förlängts mot ändplanen, se figur 22. En täckplåt monteras i stolpens flänsar samt i aggregatets tak respektive golv. Plåten sträcker sig från ändplanen till den yttersta infästningen för mellanplanet, vilket gör att den utan modifieringar kan användas både ovanför och under mellanplanet. Stolpe med täcklock visas i figur 23. Stolpen har sin ursprungliga plåttjocklek 1,5 mm medan täckplåtarna har plåttjockleken 1,25 mm. I FE-modellen har täckplåtens fläns i höjd med stolpens ändbockar försetts med en fast inspänning (se pil figur 23). Plåtens montering mot stolpen har modellerats som ett skruvförband i Pro/Mechanica. Maximala utböjningen blir ca 0,32 mm och uppkommer på gavelsidan vid nedre urtaget för gångjärnsinfästningen. I tabell 7 visas mätpunkternas förskjutning för koncept 3.



Figur 23 Koncept 3, stolpe med delvis täckande lock

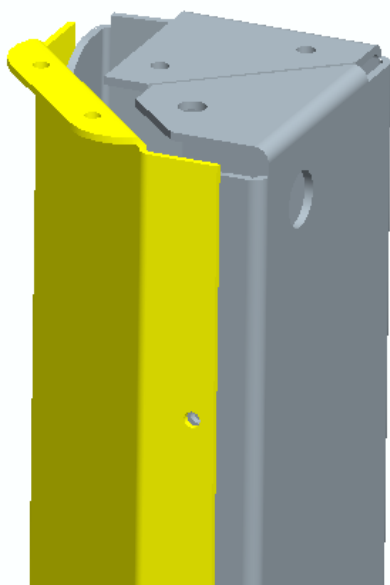
Tabell 7 Mätpunkternas förskjutning för koncept 3 belastad med lastfall B

	Övre mätpunkt [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från gavelsida	0,031	0,025
35 mm från gavelsida	0,285	0,302

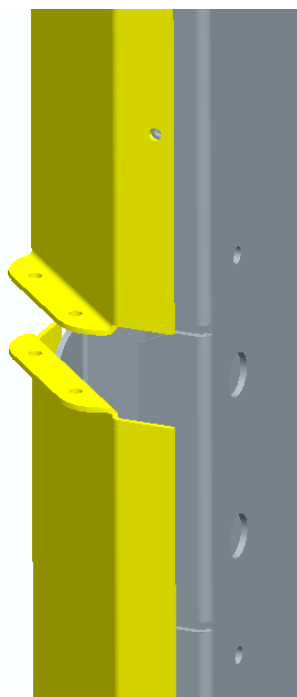
Detta koncept visar en stor förbättring av vridstyvheten. Förflyttningen är i samtliga mätpunkter mindre än för den ursprungliga stolpen. Den största utböjningen uppkommer i gavelsidan vid urtagen för gångjärnsinfästningen där det inte finns någon fläns på kanten. På gångjärnssidan är förskjutningen under 0,2 mm och det är positivt med avseende på gångjärnsytornas förflyttning. En stor minskning av förskjutningen i denna yta medför också att tätningslisten tätar på ett bättre sätt eftersom avståndet mellan inspektionslucka och stolpe inte varierar som tidigare. Det simulerade skruvförband som används i modellen drar ingen nytta av de friktionskrafter som uppstår mellan täckplåt och stolpe, därmed är vridstyvheten förmodligen bättre i verkligheten.

Koncept 4 Täckplåt med infästning i mellanplan och tak/golv:

Konceptet baseras den ursprungliga stolpen. Båda flänsarna har förlängts till tak och golv. Infästningarna för mellanplanet har lämnats orörda. Två plåtar har monterats på stolpen samt i taket och golvet. Plåtarna sitter på var sin sida om mellanplansinfästningen och täcker hela stolpen från tak till mellanplan respektive golv till mellanplan. På grund av mellanplanets olika monteringshöjder är över och underplåten olika långa. Utformningen av konceptet visas i figur 24 och figur 25. I tabell 8 visas mätpunkternas förskjutning för koncept 4



Figur 24 Tak- och botteninfästningen för koncept 4



Figur 25 Mellanplansinfästningen för koncept 4

Tabell 8 Mätpunkternas förskjutning för koncept 4 belastad med lastfall B

	Övre mätpunkt [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från gavelsida	0,025	0,025
35 mm från gavelsida	0,256	0,258

Detta koncept ger väldigt bra motstånd mot vridning, men infästningen i mellanplanet kan bli ett problem. Förlängningen av flänsarna gör montering av gångjärn och gavel svårare. Maximala utböjningen blir ca 0,26 mm och uppkommer i lastens angreppsyta .

Koncept 5 Stolpe med kort täcklock enbart över gångjärn:

En plåt med längden 250 mm har monterats i höjd med respektive gångjärn. En extra fläns har lagts till på stolpen. Figur 26 visar utseendet av koncept 5. Maximala utböjningen blir ca 1 mm och uppkommer vid urtaget vid gångjärnsinfästningen. I tabell 9 visas hur mätpunkterna förskjuts vid belastningen.



Figur 26 visar koncept 5

Tabell 9 Mätpunkternas förskjutning för koncept 5 belastad med lastfall B.

	Övre mätpunkt [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från gavelsida	0,110	0,117
35 mm från gavelsida	0,750	0,705

Detta koncept ökar vridstyvheten jämfört med den ursprungliga stolpen, dock inte lika mycket som de koncept som också är fastskruvade i tak respektive golv. Liksom i de tidigare beskrivna koncepten med täckplåtar bör vridstyvheten vara bättre än FE-modellen visar, då friktionen mellan plåtarna inte utnyttjas i modellen.

3.2.1 Summering av konceptens maximala utböjning samt utböjning i mätpunkterna

I tabell 10 visas en sammanställning av mätpunkternas förskjutning samt den maximala deformationen i respektive koncept. Koncept 3 och 4 uppvisar båda en jämn och låg deformation i samtliga mätpunkter. Detta visar att det finns stora fördelar med att täcka en så stor del av stolpen som möjligt. Även den lösning som idag används, stolpe med stöttor, står emot belastningen bra.

Tabell 10 Förskjutningar i mätpunkter, samt maximal förskjutning hos de olika koncepten

	Övre mätpunkt 5 mm från gavelsida [mm]	Övre mätpunkt 35 mm från gavelsida [mm]	Nedre mätpunkt 5 mm från gavelsida [mm]	Nedre mätpunkt 35 mm från gavelsida [mm]	Max förskjutning [mm]
Befintlig stolpe	0,273	2,093	0,384	3,213	5,47
Befintlig stolpe med stöttor	0,110	0,085	0,148	0,065	0,40
Koncept 1	0,152	1,237	0,209	1,770	3,37
Koncept 2	0,000	0,534	0,000	0,684	1,30
Koncept 3	0,031	0,285	0,025	0,302	0,32
Koncept 4	0,025	0,256	0,025	0,258	0,26
Koncept 5	0,110	0,750	0,117	0,705	1,00

Bortvalda koncept

Under konceptgenereringen fanns ytterligare idéer på förändringar, men de sållades bort på ett tidigt stadium. Gemensamt för alla dessa var att de inte uppfyllde kravspecifikationen. Koncepten redovisas kortfattat nedan.

Delad stolpe – Två stolpar som monteras på varsin sida av mellanplanet. Detta koncept hade inneburit stora problem vid montering, då stolen inledningsvis är bärande. Problem hade även uppstått med att få gångjärnen på exakt avstånd och i linje.

Stolpe av trekants- eller fyrkantsrör – Kan ej tillverkas av Swegon med befintlig maskinpark. Detta var ett uttalat krav.

Förändra listens infästning och anliggningsytor – Genom denna förändring minskar påfrestningen på stolpen när luckan stängs. Detta kräver en större omkonstruktion och kan därmed bli aktuellt vid framtida arbete.

3.3 Utökade analyser av förbättrade koncept

Den åtgärd som ger den största förbättringen av vridstyvheten är att täcka stolpen så att profilen blir sluten. En stor fördel med att täcka stolpen med ett lock är att det relativt enkelt går att implementera i produktionen eftersom exempelvis mellanplan kan behållas oförändrade. Om stöttorna kan tas bort och ersättas med lock över stolpen medför det en förminskad turbulens i luftflödet kring stolpen. Då tätningslistens utformning är en del i problemet med att stolpen vrids vid stängning kan en lyckad förstärkning av stolpen göra att det blir svårt att stänga luckan om inte avståndet mellan lucka och stolpe är korrekt. Om avståndet är för litet kan det också leda till att slitaget på listan ökar. Om avståndet mellan inspektionslucka och stolpe kan säkerställas kommer tätningen fungera bättre än tidigare eftersom listan komprimeras likvärdigt över hela stolpens längd.

Konceptet med stöttor som används idag motverkar väl de förskjutningar som uppkommer i stolpens gångjärnsinfästningar. Med lastfall B motverkas momentlasten väl av stöttorna, däremot finns en risk att stolpen deformeras mer om momentet istället verkar över en större yta på stolpen. Detta koncept skapar en större turbulens i luftflödet kring stolpen än om stolpen täcks med ett lock.

Då resultaten av konceptanalyserna presenterats för inblandade på Swegon kom följande önskemål och krav:

- Det är bra om turbulensen i luftflödet kring stolpen kan minskas, till exempel med ett täcklock.
- Om lock skall användas på stolpen skall det inte finnas fler än en modell per aggregatstorlek.
- Om lock används skall dessa ej skruvas fast i mellanplanet.
- Inspänning av lock i tak och golv skall helst undvikas.

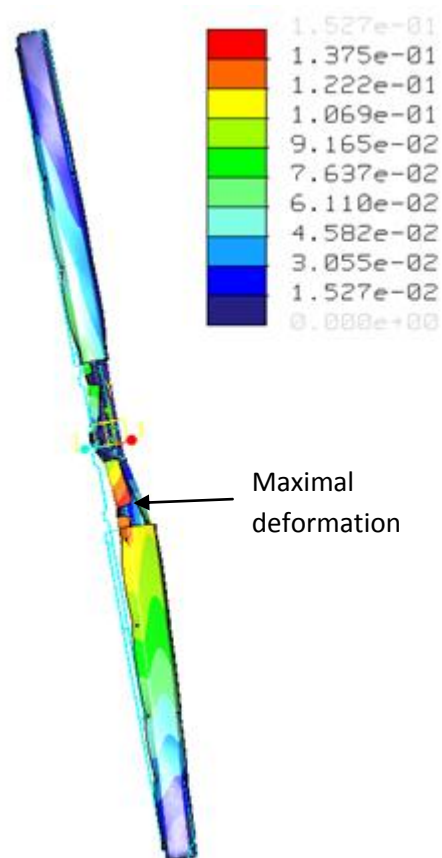
Utifrån de önskemål som fanns från Swegon och de resultat som framkommit i analyserna bestämdes två förfinade koncept; koncept X och koncept Y.

3.3.1 Koncept X - täcklock och modifierad stolpe

Koncept X har två täckplåtar som skruvas fast i stolpen samt i tak och golv. Locken avslutas en bit innan mellanplansinfästningarna för att de skall vara vändbara. Plåttjockleken på den nya stolpen är 2 mm. Utformningen av stolpe och lock påminner i hög grad om koncept 3, se tidigare figur 17 och 18. Nedan presenteras de resultat som erhållits då koncept X belastas med lastfall C och D.

Lastfall C (Utbredd momentbelastning)

Stolpen med täckplåtar visar sig ta upp det utbredda momentet bättre än då det koncentrerats i gångjärnsytan. Den maximala deformationen blir 0,138 mm och uppkommer vid det nedersta mellanplansurtaget. Figur 27 visar deformationsbilden då det utbredda momentet läggs på. De är tydligt att det hade varit en fördel att kunna täcka en större del av stolpen, då den största utböjningen uppkommer där täcklocket slutar. Trots detta visar mätpunkterna i gångjärnssidan att denna är näst intill helt stel, vilket minimerar inspektionssluckans förflyttning. Tabell 11 visar mätpunkternas förskjutning vid denna belastning.



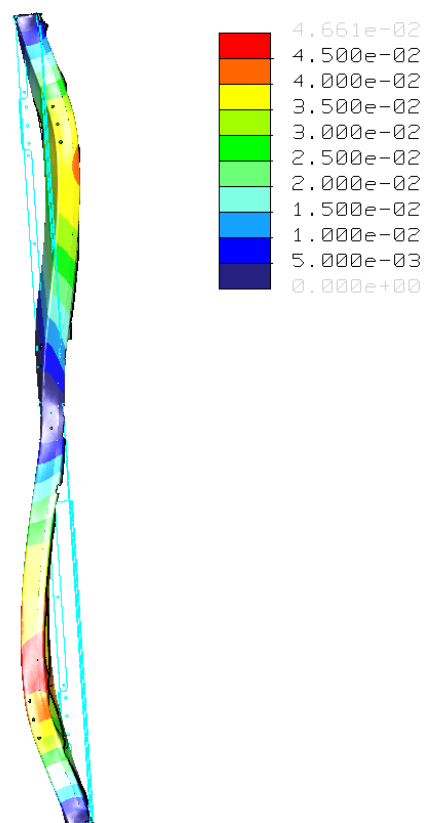
Figur 27 Deformation av koncept X vid lastfall C

Tabell 11 Mätpunkternas förskjutning för koncept X vid lastfall C

	Övre mätpunkt [mm]	Över mellanplan [mm]	Under mellanplan [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från kant	0,008	0,016	0,007	0,007
35 mm från kant	0,023	0,042	0,070	0,032

Lastfall D (Horisontell kraftbelastning)

Figur 28 visar hur stolpen deformeras då den utsätts för horisontella krafter enligt lastfall D. Deformationen är som störst ca 0,046 mm, vilket visar att stolpen på ett mycket bra sätt motstår denna typ av belastning. I tabell 12 visas mätpunkternas förflyttning för denna analys.



Figur 28 Deformationen av koncept X vid lastfall D

Tabell 12 Mätpunkternas förskjutning för koncept X vid lastfall D

	Övre mätpunkt [mm]	Över mellanplan [mm]	Under mellanplan [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från kant	0,040	0,026	0,036	0,050
35 mm från kant	0,039	0,028	0,036	0,043

Mätvärdena i tabell 11 och tabell 12 visar att deformationen är mycket låg i samtliga mätpunkter för både lastfall C och D.

3.3.2 Koncept Y - stolpe med stöttor och ökad plåttjocklek

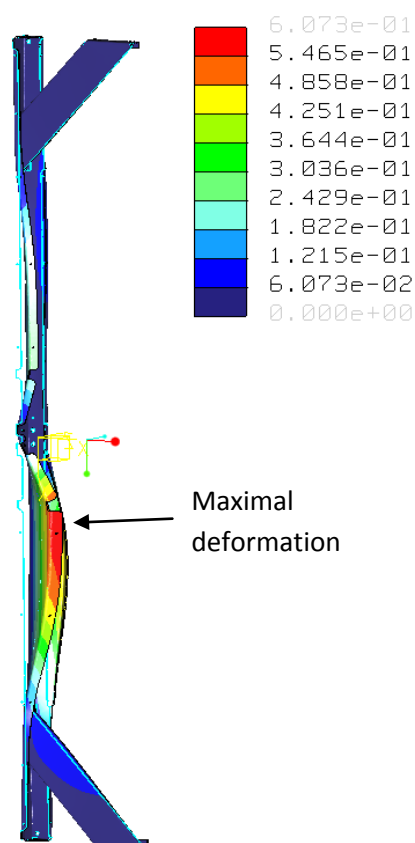
Koncept Y bygger på samma lösning som används idag, alltså stolpe med stöttor. Plåttjockleken på stolpen har ökat till 2 mm, medan stöttorna har behållits oförändrade. Nedan presenteras resultatet för koncept Y då det utsätts dels för en utbredd momentlast och dels för en horisontell kraftlast.

Lastfall C (Utbredd momentbelastning)

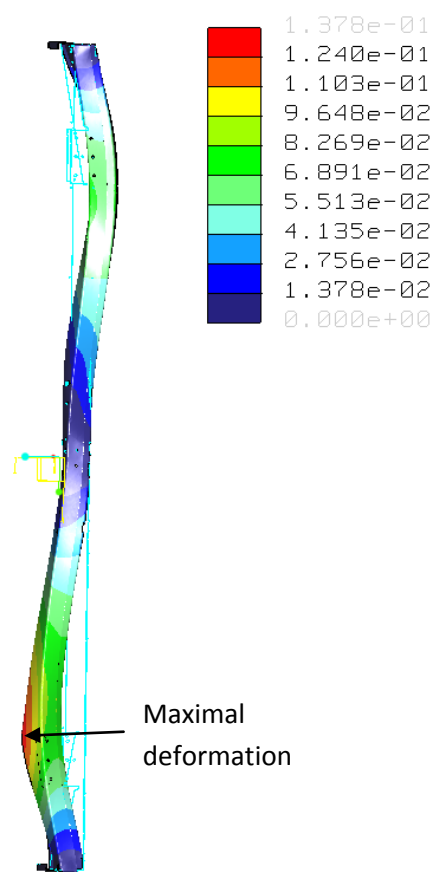
Då stolpen belastas enligt lastfall C blir största deformationen ca 0,547 mm och den uppkommer i det undre urtaget för mellanplanet. Deformationsbilden vid belastningen visas i figur 29 och tillhörande mätvärden presenteras i tabell 13 på nästkommande sida.

Lastfall D (Kraftbelastning)

Stöttorna motverkar denna typ av belastning väl i gångjärnsytorna. Maximal deformation uppkommer i gavelsidan och uppgår till ca 0,140 mm. Figur 30 visar deformationen vid lastfall D. I tabell 14 på nästkommande sida presenteras värden för mätpunkternas förskjutning.



Figur 29 Deformation av koncept Y vid lastfall C



Figur 30 Deformation av koncept Y vid lastfall D

Tabell 13 Mätpunkternas förskjutning för koncept Y vid lastfall C

	Övre mätpunkt [mm]	Över mellanplan [mm]	Under mellanplan [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från kant	0,031	0,005	0,044	0,073
35 mm från kant	0,007	0,141	0,311	0,030

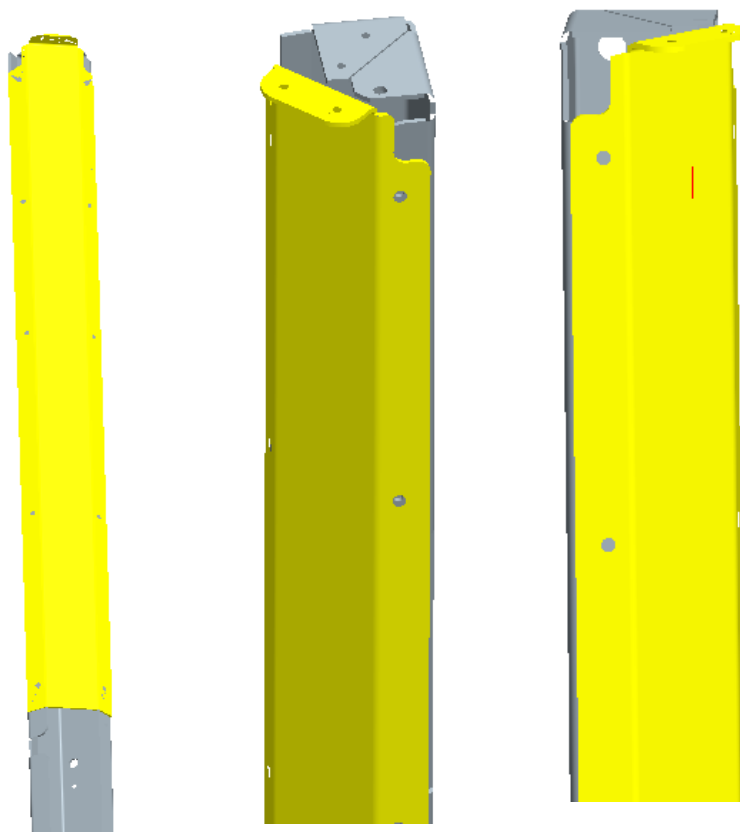
Tabell 14 Mätpunkternas förskjutning för koncept Y vid lastfall D

	Övre mätpunkt [mm]	Över mellanplan [mm]	Under mellanplan [mm]	Nedre mätpunkt [mm]
5 mm från kant	0,064	0,044	0,064	0,075
35 mm från kant	0,060	0,046	0,060	0,069

3.4 Val av slutgiltigt koncept

För båda koncepten rör det sig om mycket små deformationer. Lastfallen som använts är förenklingar, och deformationerna blir antagligen större vid ett verkligt belastningsfall. Trots detta kan resultaten användas för att bedöma vilket av koncepten som på bästa sätt står emot deformation. Då koncept X belastas enligt lastfall C uppkommer största deformationen vid ena urtaget för mellanplanet och är som mest 0,138 mm. Bortsett från detta område är deformationen mycket liten. Även för koncept Y uppkommer största deformationen vid det ena urtaget för mellanplanet vid belastningsfall C. Detta koncept uppvisar däremot en större variation i deformationen. I några av mätpunkterna hos koncept Y uppgår deformationen till tiondelar av en millimeter, vilket är klart större än deformationerna i koncept X. De mer konsekvent små deformationerna för koncept X visar att denna stolpe sett över hela sin längd är mer vridstyv än koncept Y.

Att stolpen uppvisar en vridstyvhet som är nära konstant över hela sin längd är en stor fördel om tätningslisten skall kunna komprimeras på ett korrekt sätt. Då resultaten för lastfall D betraktas inses att koncept X hanterar kraftbelastningen bättre än koncept Y. Deformationerna i mätpunkterna är ca 1,5 gånger större för koncept Y. I den kompletterande kravspecifikationen från Swegon framkom önskemål om att i möjligaste mån minska turbulensen kring stolpen. Turbulensen i luftflödet bör rimligen vara mindre för koncept X än för koncept Y eftersom det i koncept X inte finns några utstickande detaljer, samt att locket minskar turbulensen kring stolpen. För att få en uppfattning kring spänningsnivåerna i stolpen analyserades koncept X även med avseende på huvudspänningar. Den maximala spänningen som inte berodde av beräkningsmodellen uppgick till ca 30 MPa. En spänningsplot för koncept X finns i appendix. Utifrån detta resonemang valdes koncept X som vårt slutgiltiga koncept. CAD modellerna för konceptet undersöktes noggrant för att fastställa att geometrin tillät montering i ett befintligt aggregat. Därefter skickades en modell till Swegon för tillverkning. Figur 31 visar hur det valda konceptet ser ut.

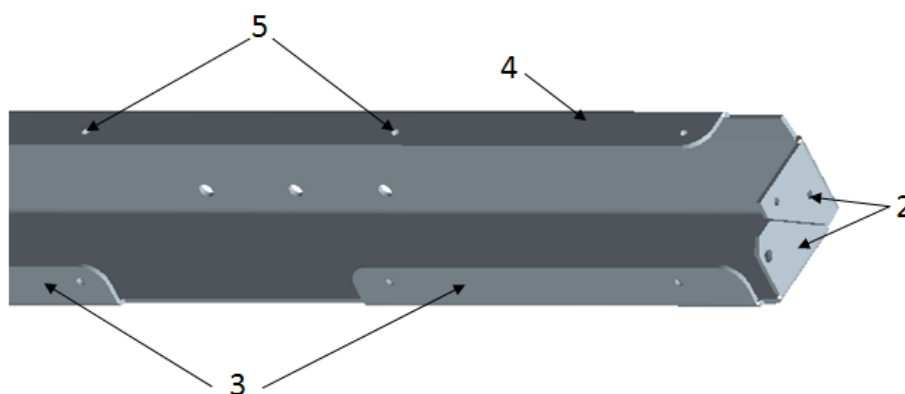


Figur 31 Utformningen av det slutgiltiga konceptet

Följande förändringar har gjorts på den ursprungliga stolpen:

1. Ny plåttjocklek 2 mm, inre bockningsradie 2 mm [9].
2. Ändbockar, nya mått samt avklippt hörn i ändbock med ett hål. Hålens positioner oförändrade.
3. En extra fläns fäst mot gavelsidan med riktning in i aggregatet, samt måttändring av befintlig fläns
4. Nya mått på fläns fäst vid 7-gradersbockningen
5. Hål i flänsar för att fästa täcklock

Ritning av stolpe och täcklock finns i Appendix. I figur 32 visas var ovanstående förändringar gjorts.



Figur 32 Förändringar på den ursprungliga stolpen

3.4 Provning av tillverkat koncept

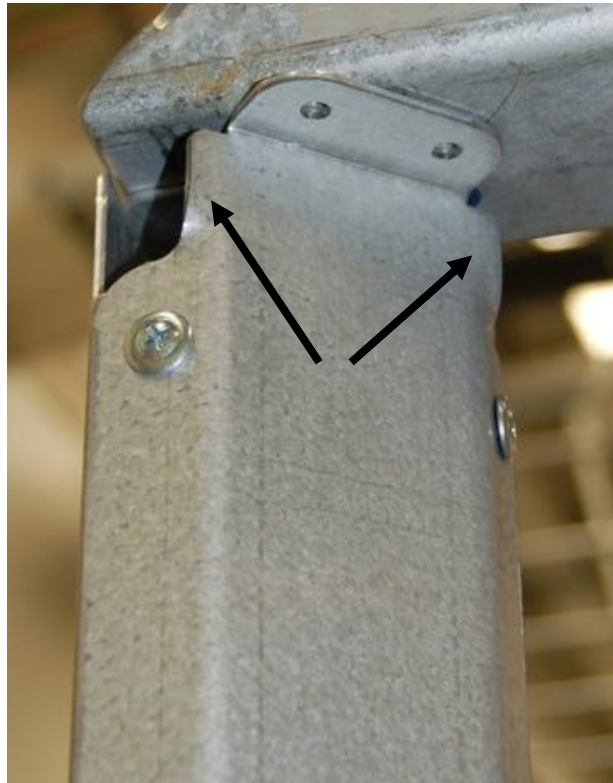
Ett antal exemplar av koncept X tillverkades av Swegon för provning i fixturen. Provningen utfördes enligt samma procedur som använts då den ursprungliga stolpen belastades med en inspektionslucka. Stolpe och täcklock monterades i fixturen tillsammans med gångjärn och Inspektionslucka, därefter belastades stolpen som tidigare med 35 N. Redan innan inspektionsluckan monterades och stolpen med handkraft belastades med ett vridande moment märktes stor skillnad i styvhet. Efter provningen stod det klart att deformationen var betydligt lägre i samtliga mätpunkter jämfört med den ursprungliga stolpen. I den punkt där skillnaden var som störst var utböjningen av den nya stolpen endast 5 % av utböjningen för den ursprungliga stolpen. För punkten med lägst skillnad var motsvarande värde 42 %. För en jämförelse av samtliga mätpunkter se Appendix.

4. Fortsatt arbete

Under arbetets gång har flera områden påträffats där ytterligare arbete kan göras för att förbättra konstruktionen kring den berörda stolpen. Några av dessa områden presenteras nedan.

4.1 Problem relaterade till koncept X

Ett problem som visade sig vid tillverkningen av täckplåtarna var att bockflänsarna i ena ändan var för korta för att kunna bockas på ett korrekt sätt, se figur 33. Lösningen på problemet är att antingen förlänga bockflänsarna, eller helt ta bort dem. Funktionsmässigt har denna defekt ingen betydelse, och inga vassa kanter eller dylikt uppstår och därför kan problemet även ignoreras.



Figur 33 Ofullständig bockning av täcklock

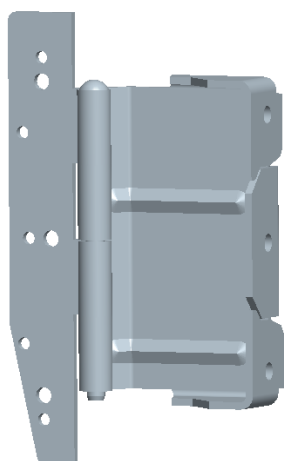
Om koncept X skall användas i produktionen kommer det att behövas hjälpmedel vid monteringen för att säkerställa aggregatets kryssmått. Tidigare har de stöttor som varit monterade på stolpen löst detta problem. Att kontrollera vinkelrätheten innan fastdragnings av stolpen med vinkelhakar, eller någon enkel fixtur bör räcka för att lösa detta problem.

4.2 Idéer för framtida konstruktioner

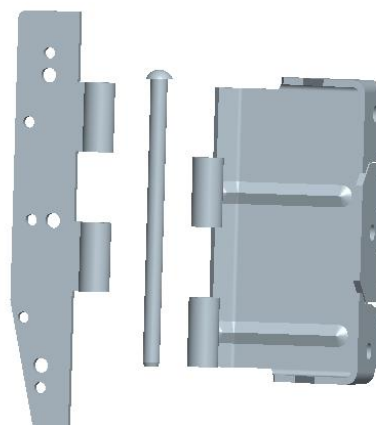
Nedan presenteras idéer som kan användas då en större omkonstruktion av GOLD aggregaten skall göras.

4.2.1 Förbättringar på gångjärnen

Vid de första proverna i testfixturen, då rör och vikter användes för att belasta stolpen visade sig gångjärnen vara relativt veka. Då gångjärnen belastades individuellt, det vill säga utan den sammankoppling som dörren innebär, plasticerade de och fick ett kvarstående fel redan vid en mycket låg belastning. Risken för bestående deformation var inte något problem då en inspektionslucka användes som belastning. Anledningen till detta är att gångjärnen då tillåts samverka och det vridande momentet som ger den största påfrestningen därmed blir betydligt lägre. Trots detta kan gångjärnens vekhet ändå ge upphov till problem. Om monteringen av inspektionsluckor inte sker varsamt kan en kortvarig felbelastning vid montering ge ett kvarstående fel. Det är därför viktigt att rätt monteringshjälpmedel, till exempel travers med sugklocka, används i produktionen. Figur 34 och figur 35 visar konstruktionen på de gångjärn som idag används i produktionen.



Figur 34 Kompletterat monterat gångjärn



Figur 35 Sprängskiss av gångjärn

Ett annat problem med gångjärnen var att de uppvisade ett stort glapp mellan gångjärnshalvorna och sprinten. Glappet medför att inspektionsluckans position kan variera beroende på storleken av glappet i gångjärnen.

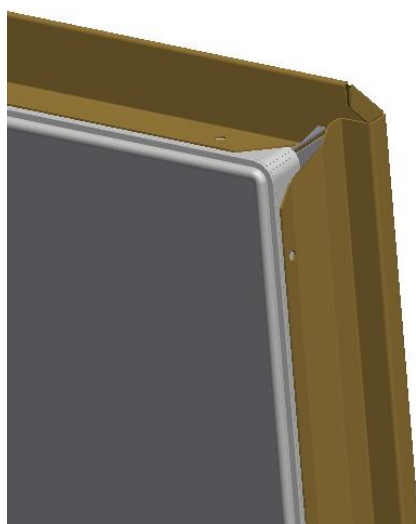
Gångjärnens nuvarande utformning medför att glappet blir olika stort beroende på om de används för en höger- eller vänsterhängd dörr. Vid en eventuell omkonstruktion bör gångjärnen göras symmetriska för att fungera lika bra åt båda hållen. För att ytterligare öka stabiliteten i gångjärnen bör det övervägas att förmontera gångjärnen innan de monteras på aggregat och inspektionslucka. Då skulle problemet med glapp kunna åtgärdas genom att använda någon form av bussning mellan gångjärnshalvor och sprint. Detta kan däremot försvåra montering och eventuell demontering av inspektionsluckan.

4.2.2 Gångjärnsinfästningen

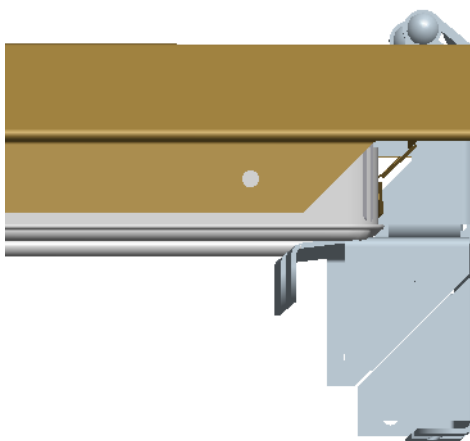
För att förenkla monteringen och öka frihetsgraden för stolpens utformning vore det fördelaktigt om gångjärns konstruktion tillåter att de dras fast från utsidan. Genom att använda sig av någon typ av popnut, det vill säga en sorts popnit med invändig gänga, kan muttrarna utgå. Ett annat alternativt som ger ett liknande resultat är att kraga hålen och använda självgängande skruv. Fördelen med detta är att inga urtag för ökad åtkomlighet krävs på stolpen, och även att en heltäckt stolpe skulle kunna användas.

4.2.3 Tättningslist

En stor del i problemet med deformationer av gångjärnsstolpen härstammar ur den vridning som uppstår då inspektionsluckans tättningslist komprimeras. För att minska deformationen i stolpen vore det därför fördelaktigt att förändra listens anliggningsytor. Det är främst den del av listen som är i kontakt med gångjärnsstolpen som behöver ändras. Listan är idag monterad på inspektionsluckorna och monteras genom att klämmas mellan två plåtar då luckorna monteras. Figur 36 visar listens placering på en inspektionslucka och i figur 37 visas hur tätningen mot gångjärnsstolpen ser ut idag.



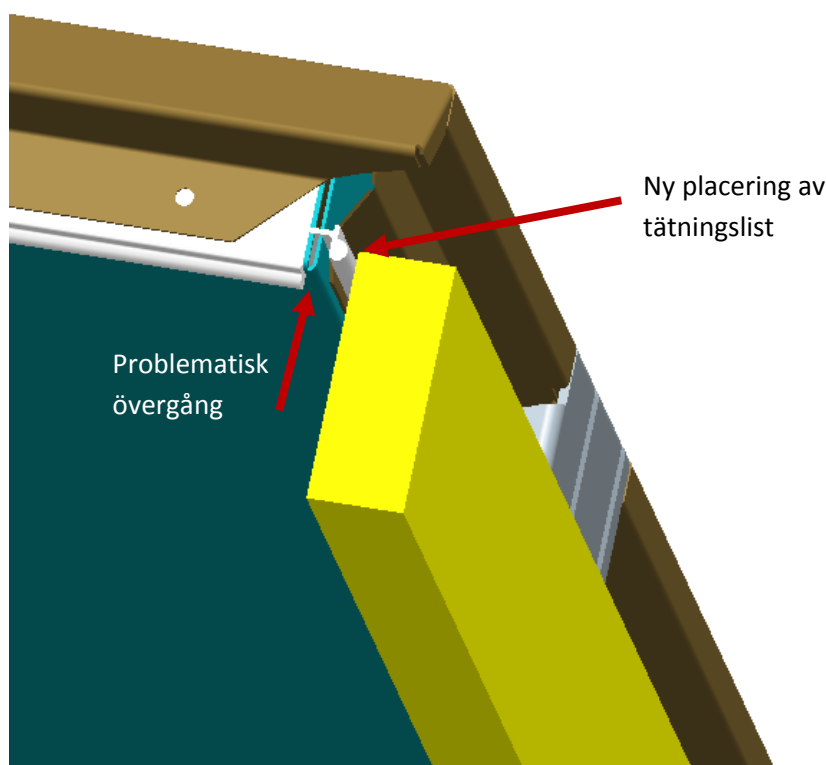
Figur 36 Tättningslistens infästning i luckan



Figur 37 Tättningslistens anliggningsyta mot stolpen

Då tätningen mellan stolpe och lucka sker på detta sätt komprimeras inte listan som den är konstruerad att göra. Istället för att komprimeras i en riktning, så som sker vid luckans övriga tättningsytor, skjuvas den innan komprimering. Detta ökar slitaget på listan, försämrar tätningsegenskaperna och ger upphov till ett vridande moment kring stolpen.

En mer korrekt utformning av listen vore att tätningen mellan stolpe och inspektionslucka sker i en yta parallell med stolpens gavelsida, vilket visas i figur 38. Om tätningen sker på detta sätt uppstår inte samma vridning av stolpen och kompressionen av listen sker på det sätt den är tänkt att göra. Svårigheterna med att använda denna metod är att lösa övergången vid hörnen, där listen tvingas byta riktning, utan att försämra de tätande egenskaperna. För att hitta en lösning till problemet har liknande konstruktioner studerats, till exempel tätning av fönster, ytterdörrar, bildörrar och ett antal andra luckor. Det har visat sig vanligt att listen monteras på karmen istället för på dörren så som är fallet på dagens aggregat. Att flytta listen från inspektionsluckorna till aggregaten skulle kunna vara ytterligare ett sätt att förbättra konstruktionen.



Figur 38 Ny placering av tätningslist

5. FEM – Hur kan det användas i utvecklingsarbete?

Många av CAD-programmen på marknaden har stöd för någon form av beräkningstillägg. Med dagens i allmänhet höga datorkapacitet blir det därför allt vanligare att även konstruktörer gör enklare beräkningar på sina konstruktioner. Detta kan vara mycket värdefullt, då det redan på ett tidigt konceptstadium kan göras bedömningar på hur väl en konstruktion uppfyller de krav som ställts. För att arbete med FEM skall bli effektivt är det viktigt att ha god kunskap om vilka förenklingar som bör göras och hur lastfall definieras. Då verkligheten ofta är mycket komplex blir det mycket tidskrävande att simulera exakt hur en konstruktion kommer att bete sig. För att effektivisera arbetet kan beräkningarna istället användas på det sätt som tillämpats i detta projekt, det vill säga för att jämföra olika koncept. Även om lastfall och randvillkor inte är exakt som i det verkliga fallet är det möjligt att få en uppfattning om hur de olika koncepten står sig mot varandra.

5.1 Tillvägagångssätt

För att arbete med FE-analyser skall bli effektivt bör arbetet delas in i flera steg. Exempel på hur indelningen kan vara presenteras nedan.

5.1.1 Förstudie

Under förstudien studeras hur konstruktionen kommer fixeras och belastas i den miljö den är tänkt att användas. I detta skede måste beslut fattas om vilka förenklingar som skall användas, utgående från de tidsramar som finns för projektet. Som tidigare beskrivits är det svårt att exakt återskapa hur det verkligen ser ut, därför måste förenklingar göras. För att detta skall kunna ske utan att resultatet kvalitet äventyras är det viktigt att konstruktören/beräkningsingenjören är väl insatt i konstruktionens funktion. Det gäller att få med de belastningar, exempelvis krafter, moment, egenvikter, och termiska laster som är av stor vikt. Då både modellerings- och beräkningstid ökar med ökad komplexitet krävs att enbart de viktigaste belastningarna tas med. Även för inspänningsvillkor gäller att förenklingar måste göras, och precis som för laster bör en noggrann studie göra på vilka som ger betydande resultat för analysen.

5.1.2 Datormodell

Om en befintlig CAD-modell finns kan denna användas. För att förenkla elementgenereringen och minska beräkningstiden bör onödiga detaljer tas bort. I en part bör till exempel rundningar, fasar och mindre hål ignoreras, då dessa inte ger någon större inverkan på hållfastheten. Det finns olika sätt för programmet att hantera en modell i beräkningsmodulen. Ursprungsinställningen för en solid är att programmet genererar solidelement. Det går i vissa fall att förenkla elementgenereringen genom att definiera ytpar och därmed betrakta problemet i en form av 2D, genom att tjockleken försummas. En förenkling av detta slag gör att beräkningarna går fortare och kräver mindre datorkapacitet. Ett annat sätt att avsevärt effektivisera modellen är att använda idealiseringar så som balkar, fjädrar, massor och stela länkar istället för att modellera dessa med solider. För konstruktioner som uppvisar symmetrier i utseende och belastningsfall kan detta utnyttjas vid beräkningar. Genom att tilldela konstruktionen symmetrirandvillkor räcker det att utföra beräkningar för en av de symmetriska delarna. Det finns även möjligheter att arbeta helt i 2D. Detta kan spara mycket tid om problemformuleringen är sådan att plant spännings- eller töjningstillstånd kan anses råda.

5.1.3 Analys

Innan beräkningar kan påbörjas måste modellen delas upp i finita element. Detta görs automatiskt i Pro/Mechanica, men för den erfarna användaren finns vissa möjligheter att påverka elementgenereringen. Beroende på hur väl resultaten skall kunna utvärderas och vilka tidsramar som finns väljer användaren om analysen skall genomföras i Single Pass Adaptive eller Multi Pass Adaptive. Då beräkningarna är genomförda måste resultatet utvärderas. Genom att studera en deformationsbild går det snabbt att skaffa en uppfattning om det givna lastfallet är rimligt. Därefter skapas de grafer och plottar som är av intresse. Eftersom programmet enbart arbetar efter den information som matats in är det viktigt att komma ihåg att resultatens giltighet helt beror av hur noggrant förarbetet varit. Ofta uppkommer mycket höga maxspänningar vid singulärpunkter, så som skarpa radieövergångar och vassa kanter, men dessa kan förbises då de beror av elementgenereringen. Här krävs ingenjörsmässig erfarenhet för att avgöra huruvida spänningarna är verkliga eller inte. Maxspänningarna gör ofta att färgskalan får ett för långt spann för att vara användbar, denna bör då ändras. Genom att justera spänningsnivåerna i färgskalan är det då lättare att få en bild av var de verkliga höga spänningarna finns. Det är viktigt att tänka på att programmet enbart ger korrekta resultat så länge deformationen är elastisk, det vill säga vid linjära problem. Därför bör spänning alltid kontrolleras för att förvissa sig om att sträckgränsen ej överskridits (bortsett från singulära punkter).

Då varje steg bygger på det tidigare är det viktigt att de olika stegen utvärderas noggrant innan nästa steg inleds. Om ett fel från förstudien påträffas under analysfasen medför detta att allt arbete däremellan måste göras om.

6. Slutsatser

I detta kapitel sammanställs de slutsatser projektet lett fram till.

6.1 Slutsatser om stolpen

Den nuvarande stolpen deformeras främst på grund av vridning, och största svagheten som måste åtgärdas är därmed stolpens låga vridstyvhet. För att öka vridstyvheten hos stolpen, och därmed minska problemen som uppstår då inspektionsluckorna stängs, har ett täcklock konstruerats. Försök i Pro/Mechanica samt fysisk provning har visat att detta är ett effektivt sätt att öka vridstyvheten. Täcklocket bör även ge minskad turbulens i luftströmmen runt stolpen. Stolpens och täcklockets utformning gör att tillverkning och montering inte kompliceras nämnvärt gentemot den tidigare använda konstruktionen. De utförda fysiska testerna visar att det framtagna konceptet motstår den givna belastningen mycket väl.

6.2 Slutsatser om FE

Vi anser att användandet av FE-analyser i utvecklingsarbete kan vara en stor fördel. För att detta skall vara fallet rekommenderas att de som arbetar med beräkningarna har möjlighet att ägna stor del av arbetstiden till detta. Det krävs erfarenhet för att arbetet skall vara effektivt och därför är det svårt att se någon fördel med att alla lär sig lite. Istället är det bättre att ha en mindre avdelning med högre kompetens. För att en CAD-modell utan större problem skall kunna användas för FE-modellering krävs att det förs en dialog mellan den som utför modelleringen och den som senare skall utföra en analys. Att använda sig av FEM är ingen genväg till resultat. Trots att det kan verka enkelt att modellera och belasta en konstruktion krävs det god förståelse för mekanik och hållfasthet för att resultaten skall vara användbara. Robert D. Cook, professor i tillämpad mekanik [11] har gjort följande uttalande angående FE-analyser;

“Finite Element Analysis makes a good engineer great, and a bad engineer dangerous!”

I den mån det är möjligt bör handberäkningar eller någon form av provning utföras parallellt för att verifiera att datormodellerna uppvisar rimliga resultat. I Appendix finns en checklista som kan användas för att komma igång med arbetet.

Referenslista

Litteraturkällor

- [1] Dahlberg, T. (2001) *Teknisk Hållfasthetslära*. Malmö: Holmbergs, ISBN 978-91-44-01920-8
- [2] Grahn, R. och Jansson, P-Å. (2002) *Mekanik*. Danmark: Narayana, ISBN 978-91-44-01909-3
- [4] Persson, G. (2009) *Pro/Mechanica Wildfire V4.0*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- [5] Toogood, R (2004) *MECHANICA Tutorial*. Kanada: Schroff Development Corporation, ISBN 1-58503-190-9
- [9] Institutet för verkstadsteknisk forskning, (1978), *Bockning av tunnplåt*, Stockholm: Sveriges Mekanförbund, ISBN 91-524-0426-9
- [11] Robert D. Cook, Professor of Mechanical Engineering, University of Wisconsin, Madison

Elektroniska källor

- [12] PTC helpcenter

URL gäller från sökväg för installation av programvara

//proeWildfire4.0/html/usascii/proe/default.htm/promec/start.htm

- [10] SSAB Tunnplåt AB (2010) *Prelaq Teknisk specifikation*
http://www.ssab.com/Global/PRELAQ/Datasheets/sv/616_Teknisk%20specifikation.pdf
(17 mars 2011)

Muntliga källor

- [3] Gert Persson (Universitetslektor, Chalmers) 2011-01-20 – 2011-06-08
- [8] Dan Windroth (Provningsingenjör, Swegon) 2011-03-10

Figurreferens

- [13] PTC Help center för Pro/Mechanica.

URL gäller från sökväg för installation av programvara

//proeWildfire4.0/html/usascii/proe/default.htm/promec/start.htm

Följ informationsträdet till exempel för fastener.

Pro/Engineer Mechanica → *Modeling structure and thermal problems* → *Connections* → *Fasteners* → *Creating fasteners* → *Bolt for edges of holes*

Utrustningsreferens

[6] Givare:

Sick sensick DT20-P214B

[7] Sampler:

Agilent 34980A

<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-1437EN.pdf>

Appendix

Appendix I.....	<i>Arbetsgång för FE-analys</i>
Appendix II.....	<i>Teori för Pro/Engineer – Sheet metal</i>
Appendix III.....	<i>Teori för Pro/Mechanica</i>
Appendix IV	<i>Provfixtur</i>
Appendix V	<i>Ritningar framtaget koncept</i>
Appendix VI	<i>Spänningsplot koncept X</i>
Appendix VII	<i>Mätresultat fysisk provning</i>
Appendix VIII	<i>Mätpunkternas placering vid fysisk provning</i>

Appendix I

Arbetsgång för FE-analys

Förstudie

- *Studera och bestäm inspänningsvillkor*
- *Studera och bestäm belastningsvillkor (kraft, moment, tryck, temperatur)*
- *Studera symmetrier i konstruktion och belastningsfall*

Modellering

- *Utnyttja symmetrier*
- *Använd idealiseringar där det är möjligt*
- *Uteslut onödiga detaljer i modellen (om en befintlig modell används, rensa bort onödiga detaljer)*

Analys

- *Generera beräknings element*
- *Bestäm om analysen skall genomföras i SPA eller MPA*
- *Studera resultatet med lämpliga plottar och gör därefter en rimlighetsbedömning*
- *Jämför med eventuella handberäkningar*
- *Utvärdera om det uppkommer höga spänningar i singulärpunkter som kan förbises*

Appendix II

Teori för arbete i Pro/Engineer

Nedan beskrivs grundläggande funktioner och verktyg för arbete i Pro/Mechanica. Informationen är hämtad från PTC:s hjälpfunktion [12], ur Perssons kompendium om FE-modellering [4], samt ur Mechanica Tutorial [5].

Teori för CAD-arbete i Pro/Engineer – Sheet metal

Vid arbete med konstruktioner som skall tillverkas genom stansning och bockning av plåtar är det fördelaktigt att i CAD-programmet använda sig av ett plåtbockningsverktyg. Fördelen med detta är att tillverkningsunderlag för bockning enkelt tas fram via modellen. Plåtbockningsverktyget i Pro/Engineer heter Sheet Metal. I detta tillägg utgår arbetet ifrån en plåt med en viss tjocklek som bestäms av användaren. Det finns olika sätt för att ta sig fram till den slutliga formen, beroende på vilka förutsättningar som råder.

Ett vanligt sätt att arbeta är att definiera en basplåt i CAD-modellen. Utifrån denna byggs sedan den geometri som eftersträvas. För att lägga till en bockad kant på denna plåt används verktyget "new wall". Formen på den nya plåten samt önskad bockningsradie och bockningsvinkel bestäms via skissverktyget och verktygets dialogruta. Fastsättningen av den nya plåten mot basplåten definieras av användaren, som bestämmer vilken kant den nya plåten skall fästas mot. När en ny plåt fästs vid basplåten finns sedan möjlighet att skapa ytterligare bockar mot alla tillgängliga kanter. Då modelleringen är färdig finns ett verktyg för att veckla ut konstruktionen för att kunna göra en ritning. Verktyget anpassar automatiskt måtten på klipp- och bockkanter så att måtten på den slutliga produkten blir rätt beroende på vilka bockradier som använts.

Appendix III

Teori för arbete i Pro/Mechanica

För att få en användbar analys av en konstruktion är det viktigt att noggrant gå igenom och definiera de lastfall och inspänningsvillkor som gäller. Detta kan till exempel röra sig om att bestämma vilka krafter och moment som verkar på en kropp, eller hur den är fixerad i rummet.

Inspänningsvillkor

För att en analys skall vara möjlig finns i Pro/Mechanica ett krav på att konstruktionen någonstans måste vara fixerad i rummet. Om detta inte uppfylls stoppar programmet en påbörjad analys omedelbart. I programmet simuleras fasta inspänningar med hjälp av verktyget "displacement constraint". Efter att verktyget aktiverats väljs den yta, punkt eller kant som skall låsas och inställningar för hur denna skall fixeras görs med hjälp av dialogrutan som visas. Om ett kartesiskt koordinatsystem används kan frihetsgrader begränsas för translation och rotation i x-, y- och z-led. Då det finns behov av att simulera andra typer av inspänningar, till exempel ett kullager eller en skruv, kan ett lokalt cylindriskt koordinatsystem definieras och användas som referens. Detta ger ytterligare möjligheter att bestämma i vilka riktningar en detalj kan rotera eller translatera.

Belastningsvillkor

Att ha en korrekt belastning på konstruktionen är lika viktigt som att ha rätt inspänningsvillkor. Innan arbetet med att definiera belastningarna i Pro/Mechanica påbörjas bör det därför vara känt vilka typer av laster, och storleken av dessa, konstruktionen kan komma att utsättas för. Det finns flera möjliga belastningsmodeller i programmet. Funktionen av de vanligaste i mekanikkonstruktion presenteras nedan:

Force/moment load

Med detta verktyg kan konstruktionen belastas med kraft och/eller moment i valfri riktning. Krafter angriper en yta, kant eller punkt som användaren väljer. Storleken i respektive riktning ställs in i verktygets dialogruta. För momentbelastningar krävs i vissa riktningar att rotationscentrum definieras med till exempel en datumpunkt.

Gravity load

Om det finns ett intresse av att studera vilken inverkan konstruktionens egentyngd har på studerade storheter kan detta göras genom att införa en gravitationslast. Denna last kommer verka på hela konstruktionen med den gravitation som användaren definierat.

Pressure load

Vid arbete med konstruktioner utsatta för trycklaster kan detta simuleras med hjälp av verktyget Pressure load. Användaren väljer den yta som skall utsättas för tryck, och storleken på trycklasten angiven i MPa. Det är även möjligt att definiera lasten som en funktion av koordinaterna.

Idealiseringar

Då komplexa konstruktioner kan ta mycket lång beräkningstid i anspråk är det viktigt att i största möjliga mån använda idealiseringar. Följande idealiseringar är vanliga i konstruktionssammanhang:

Beam (Balk)

Genom att använda sig av balkverktyget istället för att skapa en solid av en balk kan beräkningstiden förkortas avsevärt. Programmet behöver då inte utföra beräkningar på balken med finita elementmetoden, utan använder istället Euler-Bernoullis balkteori.

Spring (Fjäder)

I Pro/Mechanica är det möjligt att skapa fjädrar genom att använda detta verktyg. Fjädern kan verka mellan exempelvis två punkter eller två ytor. Fjädrarnas rörelsefrihet och styvhet bestäms av användaren. Verktyget tillåter både rotation och translation i fjädrarna. Genom att använda sig av fjädrar kan moment och krafter överföras mellan delar som förskjuts under analysen.

Mass (Massa)

Genom att använda detta verktyg kan t.ex. punkter eller kanter i modellen belastas med en massa utan att några geometriska definitioner behöver göras. Beräkningstiden förkortas på detta sätt då programmet inte behöver generera element för den detalj som utgör belastningen.

Rigid links (Stela länkar)

Verktyget används för att skapa stela sammanbindningar i modellen. Den ena ändpunkten är beroende och den andra är oberoende. Detta innebär att en rörelse i den oberoende punkten överförs direkt till den beroende punkten. Den oberoende ändpunkten har sex frihetsgrader som bestäms av användaren. Detta kan vara användbart om detaljer av olika typer skall sammankopplas, t.ex. sammankoppling av en solidmodell med en skalmodell. Detta förfarande sparar beräkningstid och datorkraft jämfört med att behöva beräkna alla detaljer som solidmodeller.

Materialtilldelning

Eftersom olika material kan ha väldigt skilda egenskaper är det nödvändigt att tilldela alla ingående detaljer med materialegenskaper. Detta kan göras genom att använda förinställda material eller genom att skapa ett eget. Då ett material skapas krävs att vissa parametrar är kända. De nödvändiga parametrarna i mekaniksammanhang är densitet, elasticitetsmodul och tvärkontraktionstal. Om analysen inbegriper termisk belastning krävs även att värmeutvidgningskoefficienten, värmekapacitiveteten och värmeledningstalet definieras. Om materialet inte är isotropt krävs även att egenskaperna i respektive riktningar är kända.

Mätpunkter

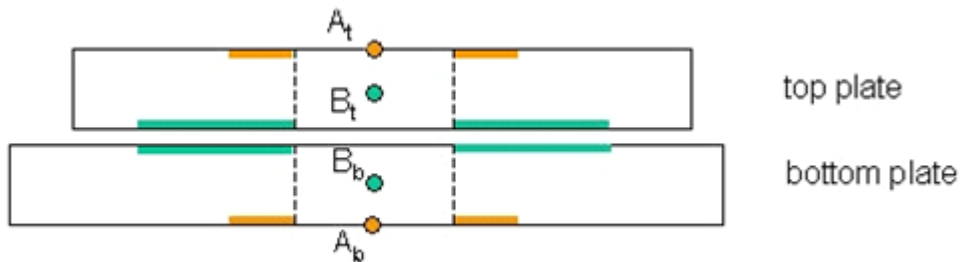
I FE-modellen kan mätpunkter, även kallade measures, definieras i punkter där det finns ett särskilt intresse av att studera olika storheter. Detta görs genom att i modellen sätta ut datapunkter och sedan definiera dem som mätpunkter. De storheter som användaren valt för respektive mätpunkt redovisas i analysens resultatfil.

Surface areas

Surface areas är ett simuleringsverktyg som används om en del av en yta skall tilldelas ett annorlunda randvillkor än den omkringliggande ytan. En surface area skapas genom att välja i vilken yta denna skall finnas och därefter definieras dess utseende med hjälp av skissverktyget.

Skruvsimulering

För att simulera ett skruvförband mellan två ytor finns en funktion i Pro/Mechanica kallad Fastener. För att kunna använda denna funktion krävs att det finns två hål där centrumaxlarna är parallella och sammanfallande med varandra med en felmarginal på max 5 %. Fastener fungerar endast för sammansättning av olika parter i en assembly. Logiken för fastener visas i figur 1



Figur 1 Förklaring av fastener-verktyget. (Källa PTC helpcenter [13])

De gröna ytorna, som har en dubbelt så stor diameter som hålet är hopkopplade med B_b respektive B_t via länkar vars styrka beror av skruvens material och diameter. Punkterna B_b och B_t är hopkopplade med varandra genom en mycket styv fjäder. Det går att förändra styvheten på denna fjäder, men i ursprungsläget baseras den på skruvens material och diameter. De yttre ytorna (gula i figuren) har diametern $1,7 \times$ skruvdiametern. För dessa ytor sker hopkopplingen analogt med de gröna ytornas hopkoppling. Det är möjligt att ställa in rotationsfrihet kring skruvens centrumaxel, men i ursprungsläget är ytorna rotationsfixa. Det är viktigt att inse att hopkopplingen endast sker enligt ovanstående, friktionskrafter och liknande som uppstår mellan de sammankopplade ytorna i skruvsimuleringen ignoreras av Pro/Mechanica.

Beräkningsmetodik

Pro/Mechanica beräknar resultaten från analyserna med finita elementmetoden. Detta innebär att modellen delas upp i ett ändligt antal element, beräkningarna sker sedan i varje element för sig. Det finns två beräkningsmetoder vid arbete med FEM-beräkningar, h- och p-metoden. Pro/Mechanica arbetar enligt p-metoden, vilket innebär att samma elementgenerering används under hela analysen. För att uppnå den eftersträfvade konvergensen ökas polynomgraden för använda ekvationer. Resultaten sammanställs när alla beräkningar är genomförda. I Pro/Mechanica är det mesta som rör beräkningarna förinställt i programmet. Detta har fördelen att användaren inte nödvändigtvis behöver behärska matematiken bakom beräkningarna. I mer avancerade program kan användaren påverka fler inställningar, framförallt angående hur elementen skall delas in. Detta kräver dock mycket goda kunskaper inom finita elementmetoden och lämpar sig därför endast för den vana användaren. De enklaste möjligheterna att påverka analysen beskrivs nedan.

AutoGEM

Pro/Mechanica har en inbyggd elementgenerator som kan användas för att generera beräkningselement för modellen. Elementgeneratoren heter AutoGEM och kan generera två typer av element; solider och skalelement. Med standardinställningarna genereras solider för 3D-modeller och för modeller bestående av ytpar genereras skalelement. Det finns vissa inställningsmöjligheter för hur elementgenereringen skall gå till, exempelvis vilken största respektive minsta storlek hos vinklar och sidolängder som är tillåten. För den erfarna användaren finns även möjlighet att välja vilken typ av element som skall genereras. Pro/Mechanica har stöd för tre olika element typer, tetraedrar, kilar och rätblock. Standardinställningarna för de ovan beskriva justeringsmöjligheterna är oftast tillräckliga, och förändringar bör inte göras om de inte är ordentligt genomtänkta. Största anledningen till att förändra dessa parametrar är att förändra antalet genererade element, vilket kan ge en bättre lösning för komplexa geometrier. Ibland är det också av stort intresse att förkorta beräkningstiden, då kan det i vissa fall löna sig att minska antalet element. Då sådana förändringar utförs är det viktigt att inse att lösningens kvalitet kan påverkas.

Konvergens

Då en beräkning konvergerar mot ett värde innebär det att lösningen går mot den asymptot som är den matematiskt rätta lösningen. Konvergensen är ett därmed ett mått på hur tillförlitliga resultaten från analysen är. Då konvergensen enbart ger information hur väl det matematiska problemet är löst, kan det inte användas för att bedöma hur väl detta stämmer överens med det verkliga lastfallet. Det som styr hur bra en beräkning konvergerar är komplexiteten i modellen och antalet tillåtna iterationer, där fler iterationer ger en bättre konvergens. Beräkningstiden och behovet av datorkapacitet ökar med antalet itereringar. Då tidsfaktorn ofta är av intresse eftersträvas att ett minimalt antal iterationer används. I Pro/Mechanica finns två konvergenslägen vid körning av analyser, Single Pass Adaptive eller Multi Pass Adaptive.

Single Pass Adaptive

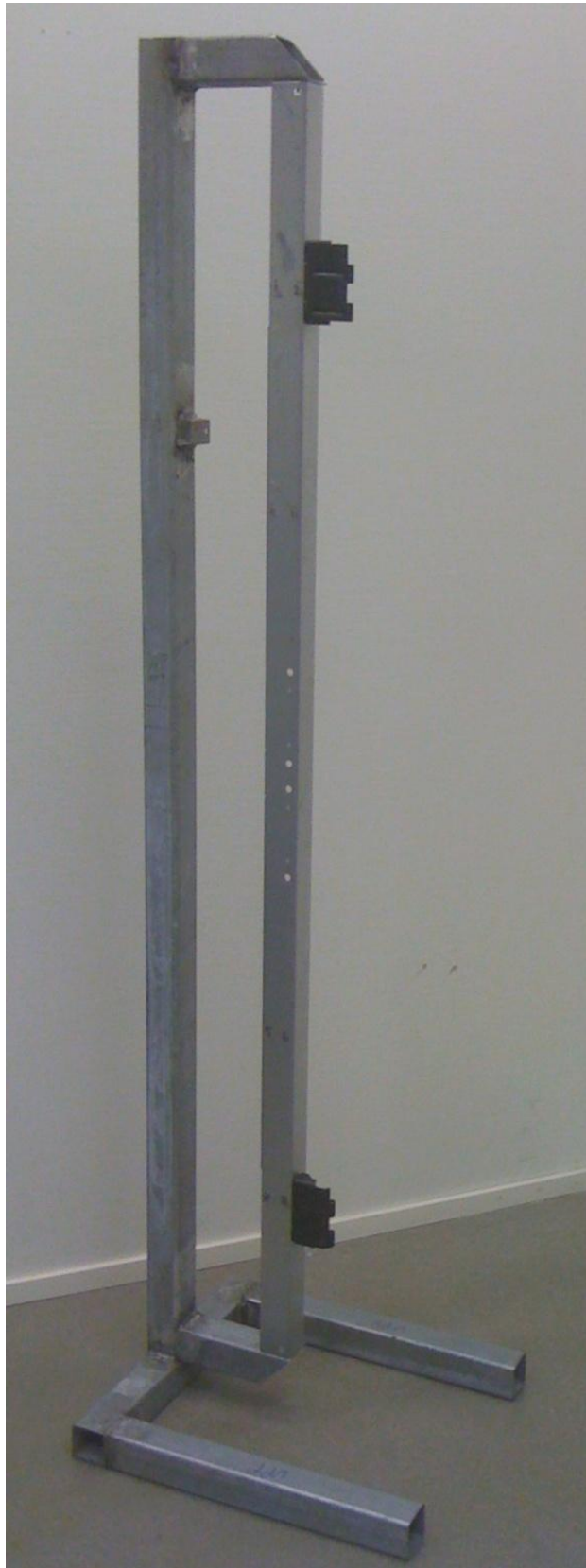
I detta läge gör programmet först beräkningar med termer upp till polynomgrad tre och bestämmer därefter hur stor felaktigheten (Stress Error) är i beräkningen. Därefter beräknas ett nytt pass där högsta polynomgraden för varje enskilt element bestäms av hur stor felaktigheten var i den första beräkningen. Storleken av felet på den första beräkningen bestäms genom att programmet gör ett antal uppskattningar av beräkningsfelet längs modellens ytterkanter. Med Single pass adaptive fås inget mått på hur väl resultaten har konvergerat, men feluppskattningen kan användas för att avgöra om resultaten är användbara eller ej. Metoden ger oftast tillräckligt goda resultat, och är mer tidseffektiv än Multi Pass Adaptive. Den största nackdelen är att det inte ges något mått på hur väl lösningen konvergerat.

Multi Pass Adaptive

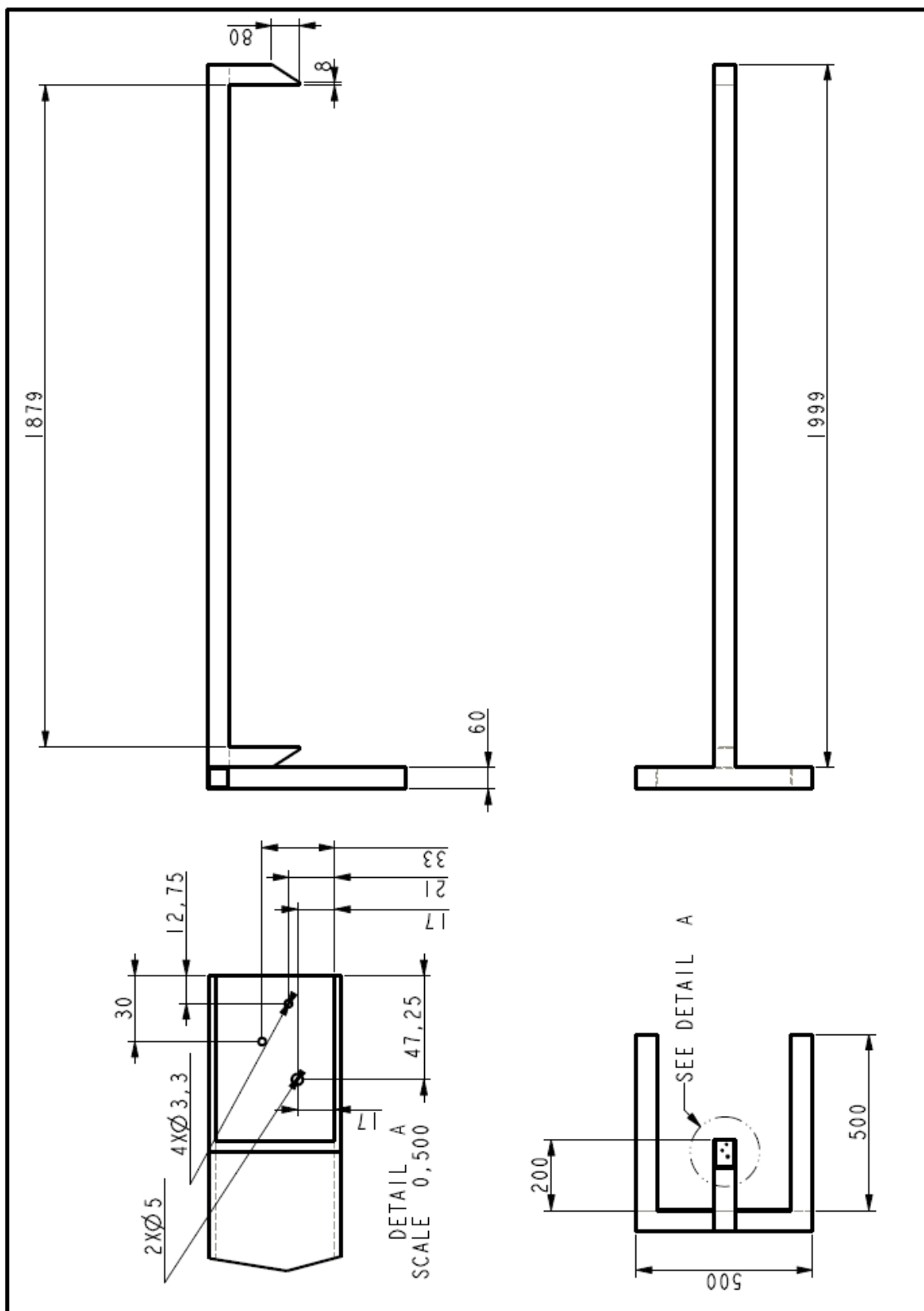
Då en analys körs i Multi Pass Adaptive ställer användaren in den lägsta och högsta polynomgraden som skall gälla för elementen vid beräkningarna. Lägsta polynomgraden är ett och det högsta är nio. Ursprungsvärden för dessa är ett och sex. Även konvergenskravet definieras av användaren på en skala 1 – 25 procent. Programmet utför sedan beräkningarna och avbryter då konvergenskravet är uppnått för alla ingående element, alternativt då maximalt tillåtna polynomgrad är uppfyllt. Det är viktigt att balansera konvergenskraven mot hur mycket tid det finns tillgängligt för analysen. Ett lågt värde kräver ofta mycket längre beräkningstid, men betyder inte att det automatiskt blir ett mycket bättre resultat.

Appendix IV

Testfixtur

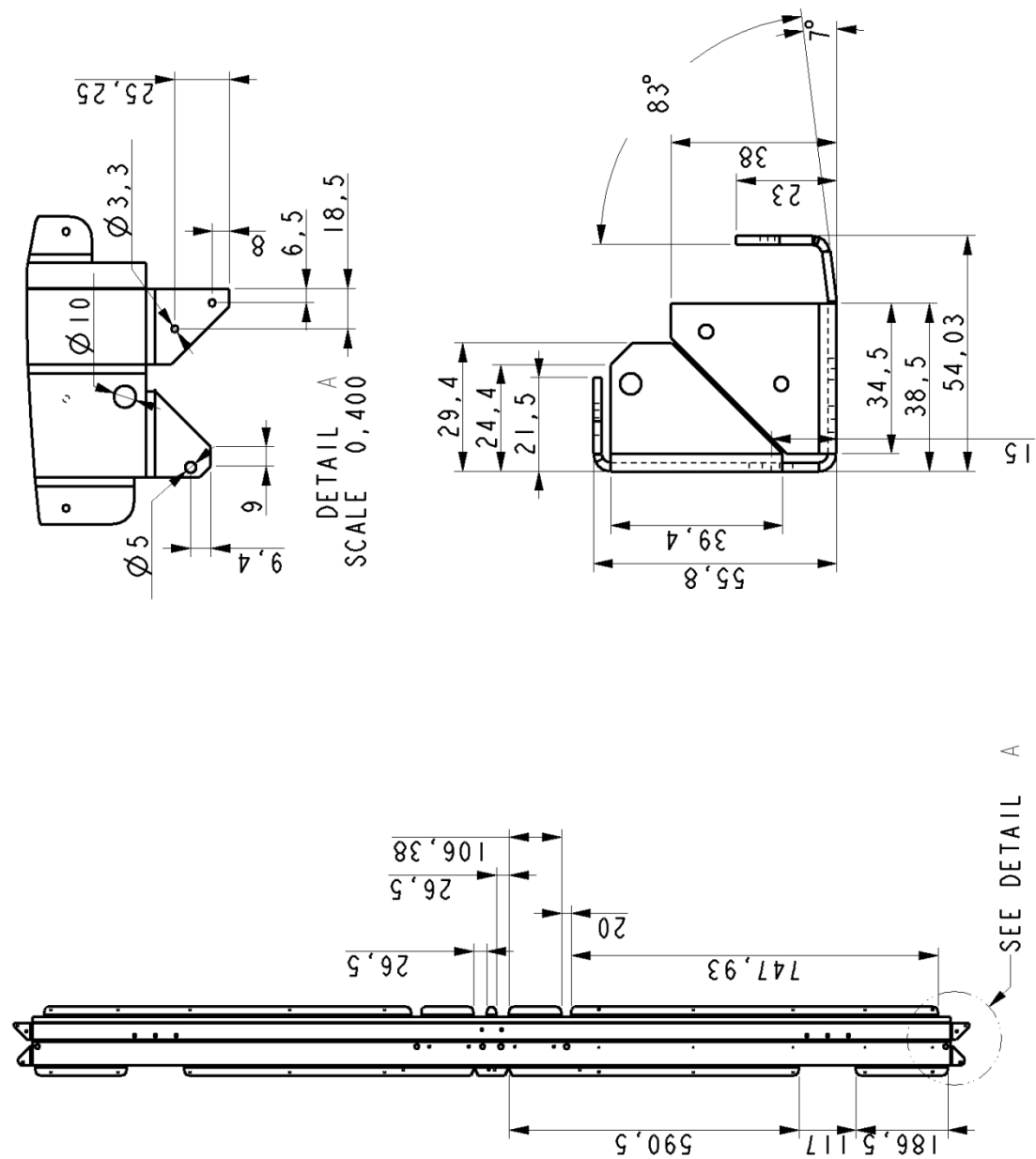


Ritning av testfixtur

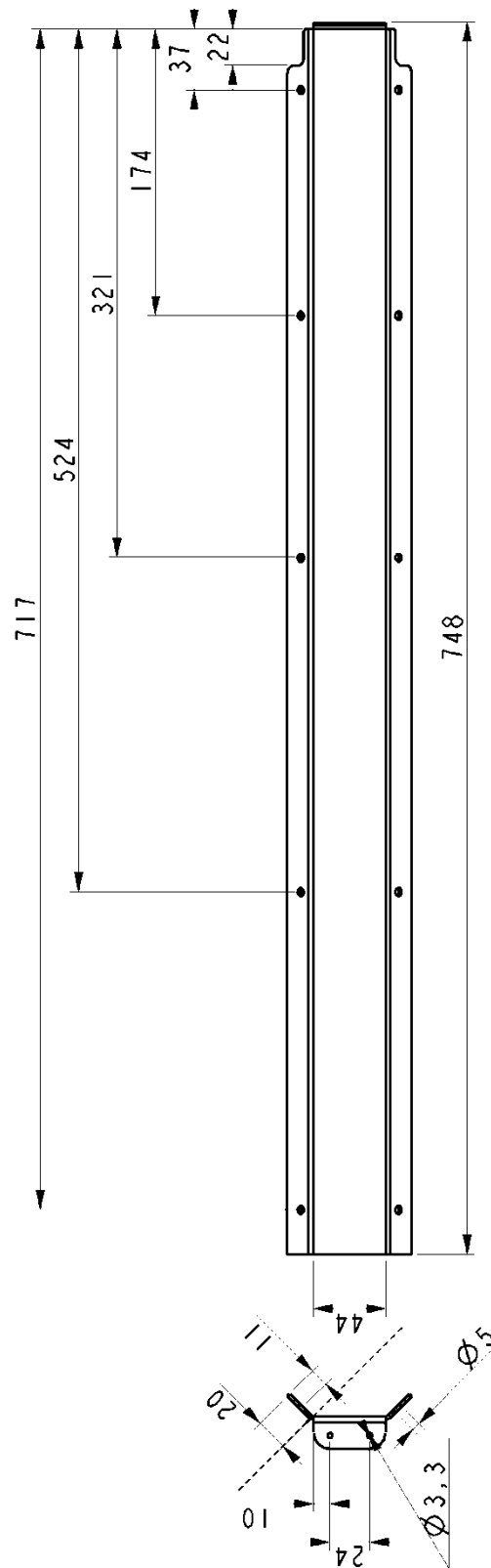


Appendix V

Ritning av stolpe

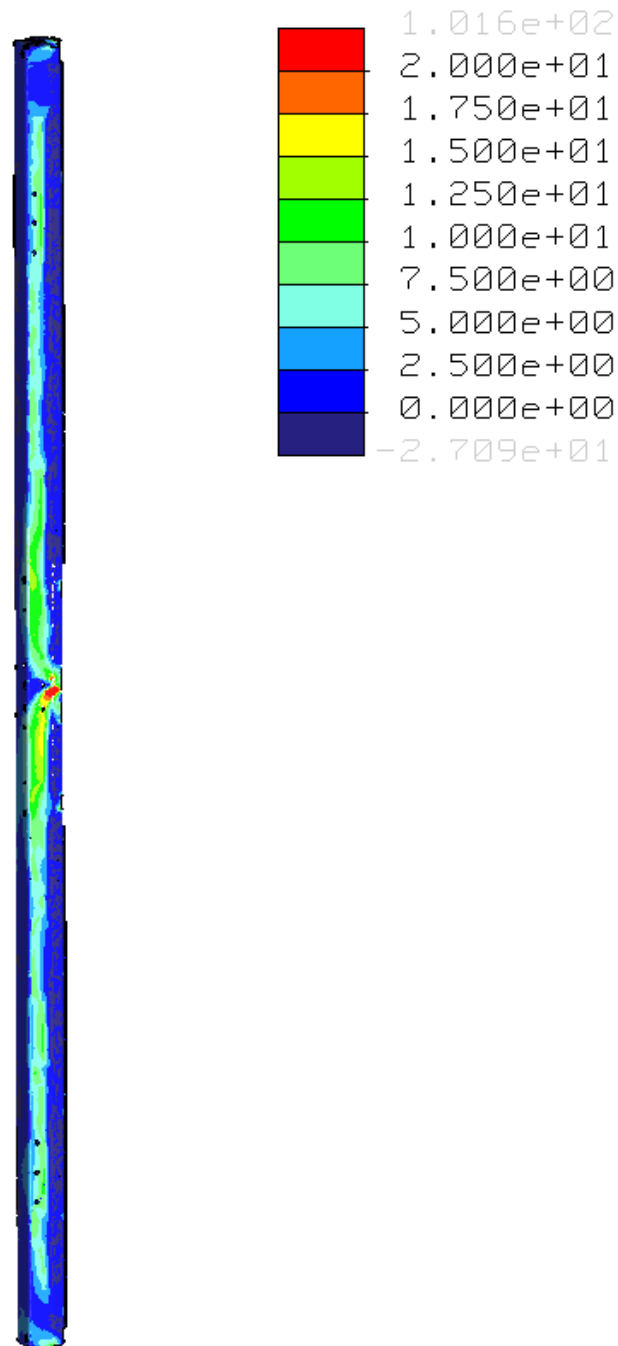


Ritning av täcklock



Appendix VI

Huvudspänningsplot för koncept X. Enhet MPa.



Bilden visar en spänningsplot av koncept X då konstruktionen belastas med det vridande momentet. De högsta spänningarna uppkommer i anslutning till mellan planet och kan till viss del bero på modelleringssättet för de fasta inspänningarna i detta område. De verkliga maxspänningarna uppgår till ca 30 MPa.

Appendix VII

Mätresultat fysisk provning

	Maximal förskjutning ursprunglig stolpe [mm]	Maximal förskjutning ny stolpe [mm]	Utböjning på ny stolpe jämfört med ursprunglig stolpe
Mätpunkt 1	2,11	-	-
Mätpunkt 2	0,35	0,15	42 %
Mätpunkt 3	1,81	0,15	8 %
Mätpunkt 4	0,67	0,17	25 %
Mätpunkt 5	3,21	-	-
Mätpunkt 6	1,46	0,17	12 %
Mätpunkt 7	2,95	0,16	5 %
Mätpunkt 8	0,99	0,14	14 %

Tabellen ovan visar de resultat som erhöll vid de båda fysiska testtillfällena.

Appendix VIII

Mätpunkternas placering på stolpen

