LIGHTer

StripPro-Valsning av profilerade band

Slutrapport

Av

Jan Levén, Swerea MEFOS
Mats Karlberg, SwereaMEFOS
Johan Svensson, Swerea MEFOS
Eva-Lis Odenberger, Swerea IVF
Fredrik Niklasson, GKN
Hans Bodin, Gestamp

Innehåll

Sammanfattning ... 3
2 Projektets mål kopplat till det strategiska innovationsprogrammets mål ... 4
3 Projektets syfte kopplat till utlysningens syfte ... 5
4 Genomförande ... 5
4.1 AP1 - Pilotvalsning (AP-ledare MEFOS) ... 5
4.2 AP2 - Modellering (AP-ledare MEFOS) ... 8
4.2.1 Material ... 9
4.2.2 FE-modell ... 9
4.2.3 Gestamp ... 10
4.3 AP3 - Formning (AP-ledare GKN) ... 18
4.4 AP4 - Industrivalsning (AP-ledare Duroc) ... 18
4.5 AP5 - Projektledning (AP-ledare MEFOS) ... 19
5 Resultat ... 19
5.1 Pilotvalsning ... 19
5.2 Modellering ... 25
5.2.1 Beräkningar ... 25
5.3 Formning ... 57
5.4 AP4 – Industrivalsning ... 60
6 Diskussion ... 60
7 Implementeringsplan ... 61
8 Tack ... 61
9 Referenser ... 61

Sammanfattning

Projektets tekniska mål har varit att utveckla metoder att valsa tunna band med varierande tjocklek över bandens breddriktning. Teknikens potential hade visats i ett förstudieprojekt finansierad av Hugo Carlssons stiftelse.

Arbetet har bestått av matematiska simuleringar av valsning av önskade bandprofiler samt kopplade simuleringar av efterföljande formningsoperationer.

För verifiering av simuleringarna har pilotförsök gjorts där ett framtaget provband valsats. Prover har analyserats gällande materialstruktur och genomgått formningsoperationer.

Tekniken har visat sig fungera även om utvecklingen inte kunnat drivas så långt som förhoppningarna var vid projektstart.

Finansiella svårigheter hos en av projektparterna gjorde att de planerade försöken i produktionsmiljö inte kunnat genomföras.

Projektet har kunnat genomföras med benäget bistånd från SIP LIGHTer och dess finansiärer, i detta fall Vinnova.

1 Bakgrund

För att utveckla komponenter med minimal vikt är det önskvärt att kunna utgå från ett material där godstjockleken kan anpassas till belastningar som kan uppstå så att godset är tjockare där belastningarna är höga och vice versa.

Traditionella metoder att framställa tunt brett material genom valsning erbjuder ingen sådan möjlighet utan endast jämntjockt material erbjuds. För att åstadkomma det önskade måste separat tillverkade komponenter av olika tjocklek sammanfogas genom svetsning eller överflödigt material avverkas från ett jämntjockt material genom skärande bearbetning.

På senare tid erbjuds material med varierande tjocklek i materialets längdled som erhålls genom variation av valsspalten under valsning så kallad ”Tailor Rolled Blank”-valsning eller TRB-valsning. Reglertekniska begränsningar hos denna metod gör att övergångszonerna mellan olika tjocklekar inte kan göras så korta som vore önskvärt.

Detta förslag gäller utveckling av en metod som skulle möjliggöra tjockleksvariationer i bandets breddled. Projektet utgör vidareutveckling av en metod som provats i liten skala i ett förprojekt utfört av Swerea MEFOS och finansierat av Hugo Carlssons stiftelse.[1]

Metoden gör det möjligt att åstadkomma mycket smalare övergångar mellan olika godstjocklekar. Vidare studerar projektet genom datorsimulering inverkan i de efterföljande formningsprocesser som är nödvändiga för att åstadkomma lättviktskomponenter med rätt slutlig geometri.

2 Projektets mål kopplat till det strategiska innovationsprogrammets mål

Projektets mål var att föra en idé för närmare en industriell tillämpning genom utveckling mot bredare material som är industriellt användbart. Vidare avser projektet studera hur valsningsprocessen inverkar på utfallet vid plåtformning av en komponent med variabel plåttjocklek på ingående material genom datorsimulering. Detta sker genom att inkludera indata från datorberäkning av valsningsprocessen i efterföljande datorberäkning av formning.

Projektet har fört samman flyg- (GKN) och fordonsbranschen (Gestamp) i utvecklingen av en metod att framställa ett metalliskt material som kan användas för att tillverka lättare komponenter. Metoden har potential till ökad resurseffektivitet genom minskad materialåtgång samt minskad miljöpåverkan genom lägre bränsleförbrukning dels vid tillverkning och distribution men främst i slutanvändarledet.

Involvering av ett valsande företag (Duroc) som industriell tillämpare av metoden hade skulle foga en ny länk till värdekedjan.

Den tilltänkta tekniken befann sig på TRL-nivå 3. Projektet skulle föra tekniken minst till TRL-nivå 4 genom att visa att tekniken även kan fås att fungera för bredare material. Detta har gjorts främst

genom försök och tekniska beräkningar hos Swerea MEFOS samt Swerea IVF men planerad tillämpning i tillverkarledet kunde inte genomföras av orsaker nämnda nedan.

3 Projektets syfte kopplat till utlysningens syfte

Projektet adresserar främst LIGHTer's innovationstema nr 4 "Lättare genom förbättrade egenskaper och innovativa lösningar" men kan också beröra tema 1 "Lägre kostnader för lätta strukturer".

4 Genomförande

Projektet genomfördes med deltagande av följande projektparter:

- Swerea MEFOS AB (MEFOS), Luleå, forskningsinstitut och forskningsutförare, koordinator
- Swerea IVF AB (IVF), Olofström, forskningsinstitut och forskningsutförare
- Luleå Tekniska Universitet (LTU), Luleå, universitet och forskningsutförare
- Duroc Special Steel AB (Duroc), Luleå, industripartner och råvaruleverantör
- Gestamp HardTech AB (Gestamp), Luleå, industripartner och komponentleverantör
- GKN Aerospace Engine Systems AB (GKN), Trollhättan, , industripartner och systemleverantör

Projektarbetet har fördelats mellan fem arbetspaket enligt nedan

4.1 AP1 - Pilotvalsning (AP-ledare MEFOS)

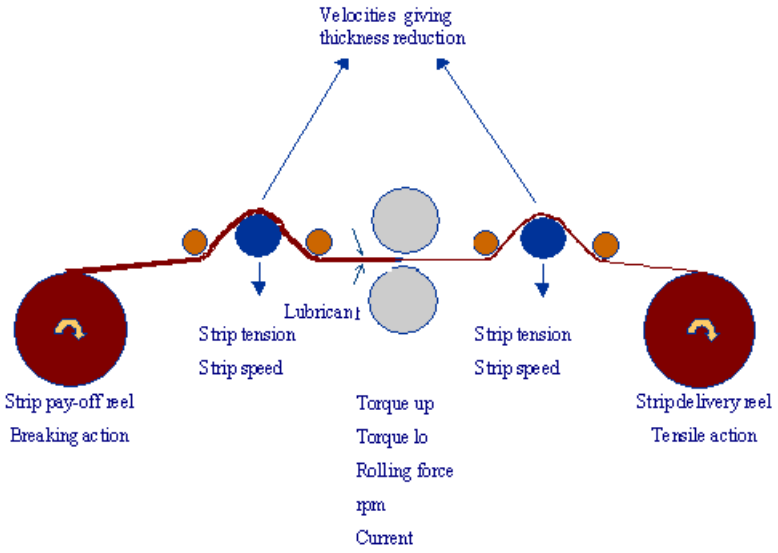
Pilotvalsningar har genomförts hos Swerea MEFOS med utgångspunkt från de bandprofiler som de industriella parterna önskat åstadkomma och vad som bedömts vara praktiskt möjligt att genomföra utgående från tekniska beräkningar som genomförts i AP2.

Pilotvalsningen genomfördes i Swerea MEFOS finvalsverk som under försöken var konfigurerat för kontinuerlig kallvalsning av smala band. Data för valsverket framgår av Tabell 1.

Tabell 1 Valsverksdata

Maximal valskraft	500	kN
Maximalt valsmoment	2 800	Nm
Valsdiameter	150-228	mm
Valsgapsbredd	125	mm
Maximal valshastighet	10	m/s
Maximalt banddrag in	10 000	N
Maximalt banddrag ut	8 000	N

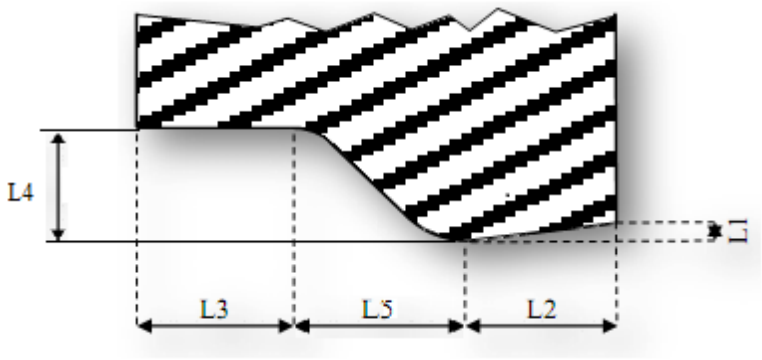
Den profil som slutligen valdes för pilotvalsning valsades från ett 100 mm brett band som svetsats samman från remsor skurna ur en plåt levererad av Gestamp. Plåten var av materialet INCONEL 718 och var 2,54 mm tjock. Genom hopsvetsning erhölls ett ca 10 m långt band. På bandet svetsades i båda ändarna dragändar så att hela provbandet skulle kunna valsas med pålagd drag- och bromsspänning från valsverkets hasplar. Försöksuppställningen illustreras av skissen i Figur 1.



Figur 1 Pilotvalsningsuppställning

Valsningen av den önskade bandprofilen skulle enligt beräkningarna ske i två stick så att förändringen i profil gjordes i två steg. Profilförändringen skulle helt åstadkommas med den övre valsen medan den undre var helt cylindrisk. Två övervalsar svarvades därför för att göra profilförändringarna i stick ett respektive två.

De simuleringsberäkningar som genomfördes enligt kapitel 4.2 med resultat enligt kapitel 5.2 nedan ledde till att pilotvalsningen gjordes enligt den beskrivna proceduren och med den form på valsarna som beskrivs i Figur 2. Figuren som visar valsens profil över halva valsens längd där valsens mitt ligger i figurens vänstra kant. Figuren är inte skalenlig utan de uppgivna måtten framgår av tabellen i figurens underkant.



	Stick 1	Stick 2	
L1	0,1	0,0	mm
L2	15,0	15,0	mm
L3	40,0	40,0	mm
L4	0,5	0,5	mm
L5	5,0	5,0	mm

Figur 2 Valsprofiler

Först monterades övervalsen för stick ett och en cylindrisk undervals i valsverket. Valsverket ställdes så att mätvärdet för valsspalten var noll då valsarna precis nuddade varandra där deras diameter var som störst.

Hela bandet som hasplats till en rulle monterades på avhaspeln till vänster i figuren. Dragänden trädes genom arrangemangen av brytrullar och valsverket och fästes i påhaspeln till höger i figuren. Med haspeln drogs bandet genom valsverket tills försöksbandet precis kommit in i valsverket. Brytrullarna på vardera sidan valsverket används för att mäta banddraget och bandets hastighet på valsverkets in- och utgångssida.

Bandets hastighet regleras med valsverket som master.

Bandet bromsas på ingångssidan med bromsar på avhaspeln och på utgångssidan bestäms banddraget genom reglering av påhaspelns motor.

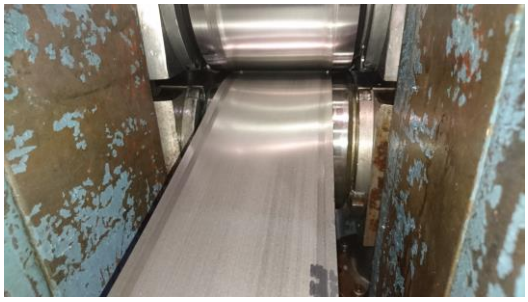
Under valsning loggades följande signaler på dator:

- Banddrag på in- och utgångssida
- Bandhastighet på in- och utgångssida
- Valskraft, operatörsida, drivsida och total
- Valsmoment övre och nedre valsen

- Valsrotationsvarvtal
- Valsmotorström

Efter trädning stannades bandet med provbandets ände precis inne mellan valsarna. Loggningen startades och med valsverket stillastående trycktes valsarna ihop tills 80 % av maximal valskraft uppnåddes.

Valsningen startades och valsningen av stick ett genomfördes med några smärre ändringar av valsningsparametrarna under valsningens gång. Bandet smordes manuellt på över- och undersida strax före inträdet i valsspalten. Figur 3 visar fotografier från valsningen.



Figur 3 Valsning av försöksband

När tillräckligt lång del av försöksbandet valsats stannades valsverket och loggningen stoppades. Därefter öppnades valsgapet och bandet rullades tillbaka på avhaspeln så att valspaketet kunde tas ur valsverket och den övre valsen bytas till den som skulle användas i stick två.

Stick två valsades enligt samma procedur som stick ett med den skillnaden att en del av försöksbandet lämnades ovalsat så att prover på bandet kunde tas för utvärdering av bandet efter både stick ett och stick två.

När båda sticken valsats skars provbitar ut från bandet för att kunna genomföra geometriska mätningar och för andra analyser av det valsade bandet.

Resultatet av pilotvalsningarna redovisas i kapitlet Resultat nedan.

4.2 AP2 - Modellering (AP-ledare MEFOS)

Finita Element-beräkningar har gjorts för ett stort antal bandprofiler som de industriella parterna önskat åstadkomma. Med de begränsningar som gällde för det tillgängliga valsverket, där valsningen skulle genomföras, var det svårt att komma fram till ett valsningsfall som bedömdes kunna genomföras framgångsrikt. Långa beräkningstider och svårigheter att komma fram till ett fall som både uppfyllde industriella behov och samtidigt föll inom pilotvalsverkets tillverkningsfönster gjorde att flera omtag fick göras med nya måltjockleksprofiler på banden.

Oförutsedd personalomsättning gjorde också att nytillträdda forskare vid två tillfällen fick överta beräkningarna och ägna tid åt att sätta sig in i problematiken vilket ledde till att projektet försenades så att förlängning av projekttiden fick söks.

Ovanstående sammantaget gjorde att kostnaderna blev oväntat höga och att ambitionerna att nå målet att genomföra pilotvalsningar för en bandprofil åt vardera industripartnern fick överges.

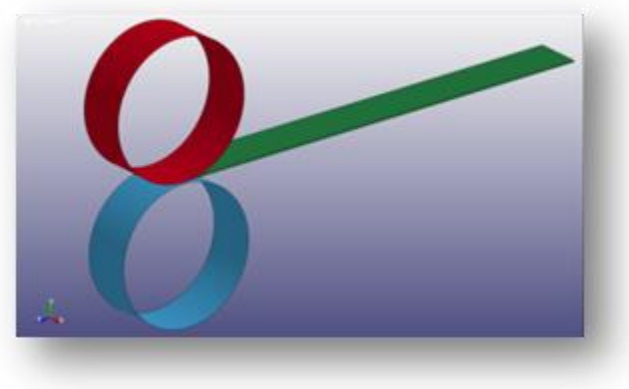
En målsättning med projektet har varit att i ett begränsat antal kallvalsningsstick reducera ett kvadratiskt tvärsnitt, till ett med varierande tjocklek för att på så sätt spara efterbearbetnings-operationer. Att kallvalsa eller kallbearbeta material har den stora nackdelen ur formningssynpunkt att materialet deformationshårdnar kraftigt, har en begränsad duktilitet och att brott snabbt uppstår vid för stora plastiska töjningar. En konsekvens av detta blir således att antalet möjliga reduktioner/stick också då begränsas. En annan svårighet som uppträder långt före ovanstående problem blir påtagliga är problem med oplanhet d.v.s. att materialet bucklar sig som en följd av den varierande längdsförändringen. För att undvika att oplanhet uppstår vill man således att valsningen gör så att den primärt resulterar i en bredning och inte en förlängning av bandet. Syftet med modelleringsarbetet har varit att hitta en valsprofil och stickserie som maximerar bredning och minimerar risken för planhetsproblem.

4.2.1 Material

Två material har använts vid valsberäkningarna. Ett Borstål, 22MnB5 i ohärdat tillstånd som vanligtvis används i pressningsoperationer av krockskyddskomponenter levererat av Gestamp Hardtech. Det andra är ett material benämnt Inconel 718 levererat av GKN.

4.2.2 FE-modell

För att förkorta beräkningstiderna har ”stela” valsar använts vid samtliga beräkningar dvs ingen diskretisering av valsarna har gjorts vilket innebär att de inte kan deformeras utan bibehåller sin cirkulära form oavsett valskraftens storlek dock med elastiska skalelement på ytan för kontaktberäkningarna, se Figur 4.



Figur 4 FEM-modell, approximation om halvsymmetri och stela valsar nyttjas

Bandet har modellerats med 8 noders linjära solidelement.

Banddrag har applicerats på bandets front resp. akteryta men för att förbättra konvergensen har en styrd relativ nodförskjutning använts vid trädningen. Trots att halvsymmetri symmetri- & approximation med stela valsar har nyttjats tar beräkningarna ca. en vecka för en parallelliserad körning på tio kärnor.

Övriga parametrar som använts summeras i Tabell 2.

Tabell 2 Modellspecifika parametrar

Parameter	
Friktionskoefficient	0.11
Dragkraft	$0.5\sigma_{ys}$ Pa
Bromskraft	$0.2\sigma_{ys}$ Pa
Perifer valshastighet	2.815 m/s

4.2.3 Gestamp

Gestamp utredde var ett profilvalsat plåtämne skulle vara lämpligt att använda. Initialt tänker man sig att i en effektiv industriell uppställning rullformar man denna typ av profil eftersom plåtämnet har konstant sektion längs med ämnet på samma sätt som en rullformad profil. Det gäller att hitta produkter där man har nytta av att det är olika tjocklekar längs tvärsnittet. Exempel på relativt raka detaljer är tröskel inre eller yttre, stötfångare främre eller bakre, eller någon annan relativt rak detalj.

Detaljerna sitter i bilens skyddsbur och hindrar inträngning vid en krock. De bidrar även till bilens styvhet för att ge goda köregenskaper.

Valet blir att studera en något mindre sektion eftersom tidigare erfarenheter av profilvalsning är sektioner med ca 40 mm bredd och därmed att titta på ett sidokrockskydd till en dörr där ämnesbredden är ca 100-200 mm. Stötfångare och trösklar är ca 300 mm breda.

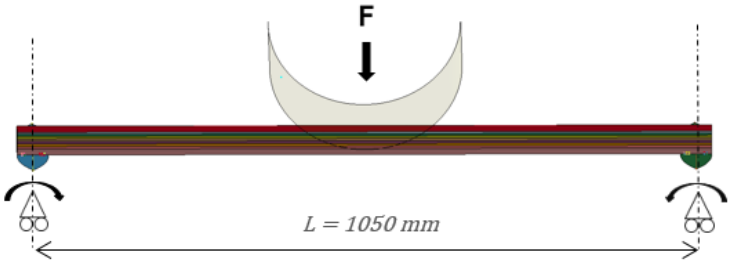
Ett sidokrockskydd som är format i plåt har normalt enkelhatt profil eller dubbelhatt profil. Dessa båda sektionstyper utreds med fokus på att reducera vikt genom att skräddarsy tjockleksfördelningen på ett sådant sätt att de blir så starka som möjligt. Begränsning görs till raka profiler dvs samma höjd och bredd på den formade balken utefter hela längden. Dessa typer av balkar skulle kunna rullformas, och eventuellt lägga in en konstant radie längs med hela balken. Så hög hållfasthet som möjligt eftersträvs på plåten. Normalt för rullformning av krock balkar är att materialets brottgräns ligger på ca 1200-1500MPa. Mjukare material medför att vikten att måste ökas för att erhålla tillräcklig styrka.

Dock är detta material inte lämpat för profilvalsning enligt studier av Swerea Mefos. Det är hårdare än materialet i valsarna och fungerar dåligt.

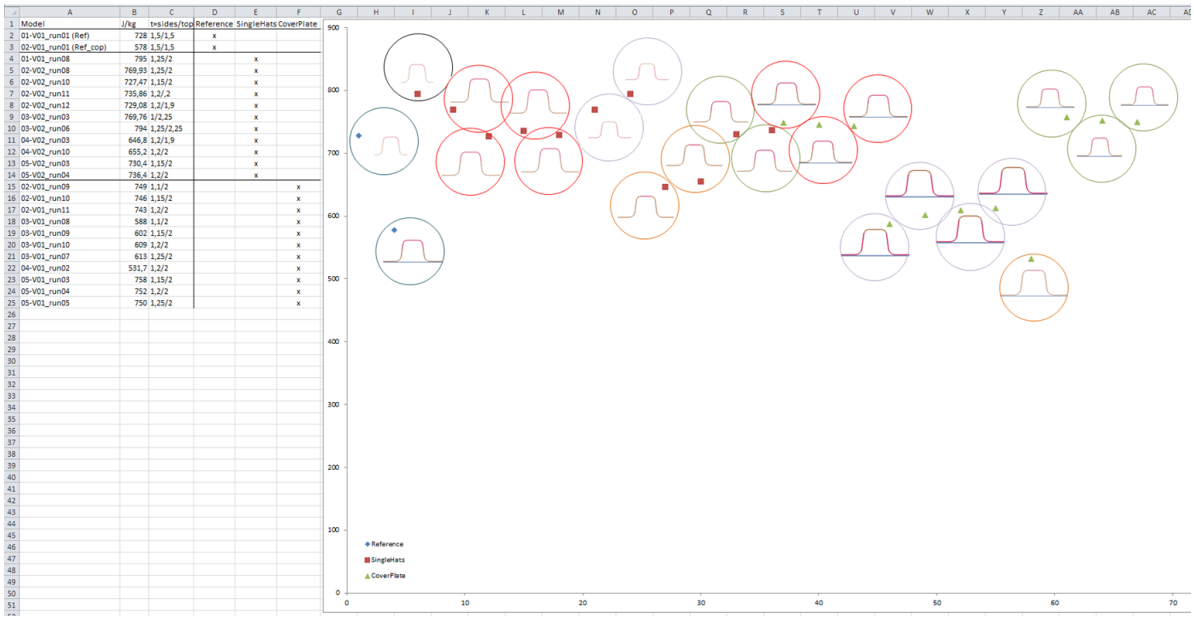
Ett omtag görs och förslagen kommer in på presshärdning. Presshärdning är en process där man skapar materialegenskaperna i pressverktyget. Materialet är värmt till ca 900 grader då det formas och kyls snabbt så att det härdas. Utgångsmaterialet 22MnB5 eller som Usibor1500P har en brottgräns på ca 600-700 MPa. Efter presshärdning är brottgränsen 1500 MPa. Eftersom profilvalsningen sker innan presshärdningen kommer det att vara möjligt att valsa ned tjockleken. En produkt skapas som kan jämföras med en rullformad i användningsområde, dock med optimerade tjocklekar i tvärsnittet. Det är lite begränsat användningsområde, normalt för sidokrockskydd är att de har varierande tvärsnitt. Dock är det ett bra studiefall för att ta fram en behovsprofil till valsförsöken. Materialdata levereras till valsningsanalyser.

4.2.3.1 Sektionsstudie sidokrockskydd

En hållfasthetsanalys genomförs med böjning av balk där man varierar tjocklekar på tvärsnittet för att se hur energiupptagning påverkas. En provuppställning definieras där man sätter upp profilen på två stöd och belastar den på mitten med en kraft. Vid 150 mm intryckning avläses energiupptagning. Ett värde på specifik styrka eller energiupptagning/vikt på balken tas fram eftersom balkarna har en något varierande vikt.



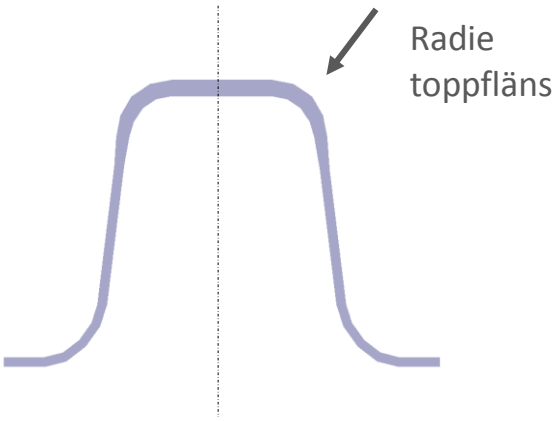
Figur 5 Testuppställning



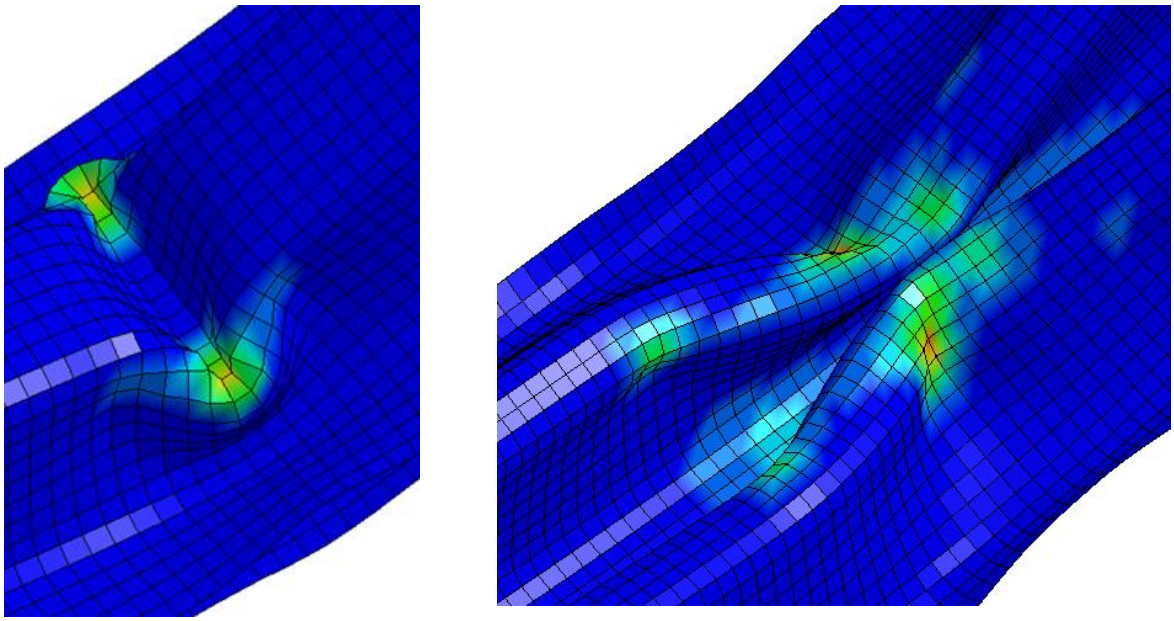
Model	J/kg	t=sides/top	Reference	SingleHats	CoverPlate
01-V01_run01 (Ref)	728	1,5/1,5	x		
02-V01_run01 (Ref_cop)	578	1,5/1,5	x		
01-V01_run08	795	1,25/2		x	
02-V02_run08	769,93	1,25/2		x	
02-V02_run10	727,47	1,15/2		x	
02-V02_run11	735,86	1,2/,2		x	
02-V02_run12	729,08	1,2/1,9		x	
03-V02_run03	769,76	1/2,25		x	
03-V02_run06	794	1,25/2,25		x	
04-V02_run03	646,8	1,2/1,9		x	
04-V02_run10	655,2	1,2/2		x	
05-V02_run03	730,4	1,15/2		x	
05-V02_run04	736,4	1,2/2		x	
02-V01_run09	749	1,1/2			x
02-V01_run10	746	1,15/2			x
02-V01_run11	743	1,2/2			x
03-V01_run08	588	1,1/2			x
03-V01_run09	602	1,15/2			x
03-V01_run10	609	1,2/2			x
03-V01_run07	613	1,25/2			x
04-V01_run02	531,7	1,2/2			x
05-V01_run03	758	1,15/2			x
05-V01_run04	752	1,2/2			x
05-V01_run05	750	1,25/2			x

Figur 6 Enkelhattar med olika tjockleksfördelningar. På Y-axeln energiupptagning per kilo

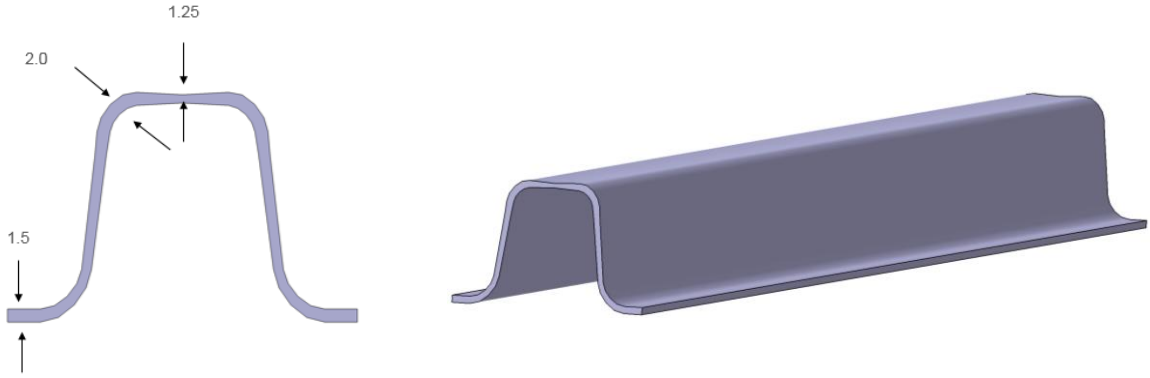
Det noteras att profilerna bucklar och kollapsar där det är höga tryckbelastningar. Tjockare material i dessa områden ökar energiupptagningen eller omvänt så reduceras tjockleken i områden som inte är utsatta för buckling. Det visar sig att radier vid toppfläns skall ha tjockare material, sidorna eller liven tunnare, ytterflänsarna tunnare. Det är dock viktigt att observera påkänning på trimkant eller eventuell svets som fungerar som brottanvisning. På mittfläns kan materialet vara lite tunnare. Dock är området litet på ett sidokrockskydd och ger ej nämnvärd viktbesparing.



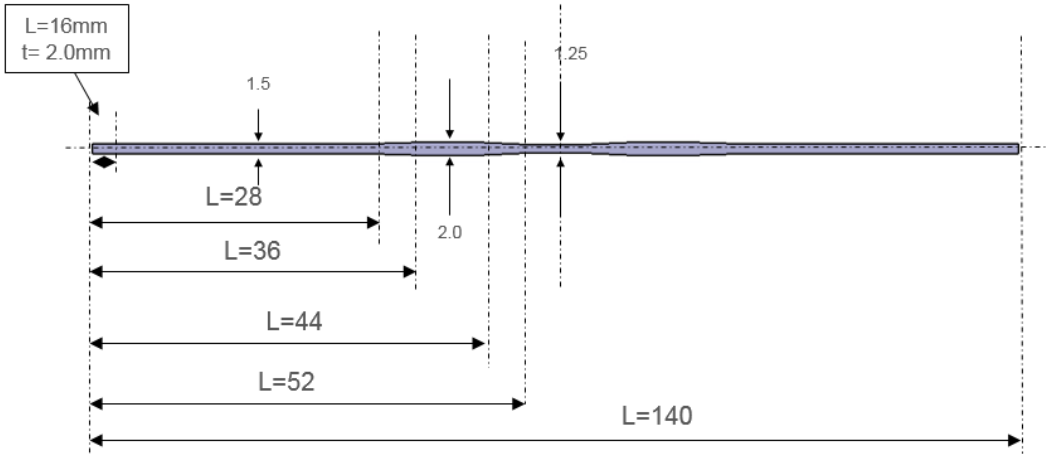
Figur 7 Exempel på optimerad sektion



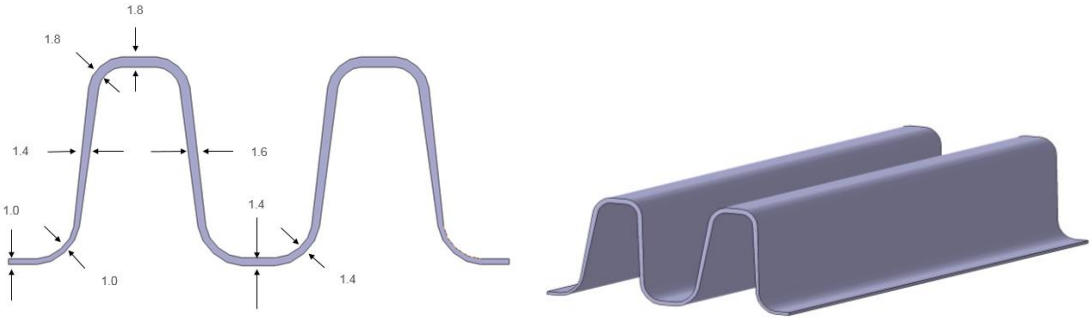
Figur 8 Buckling enkelhatt respektive dubbelhatt balk



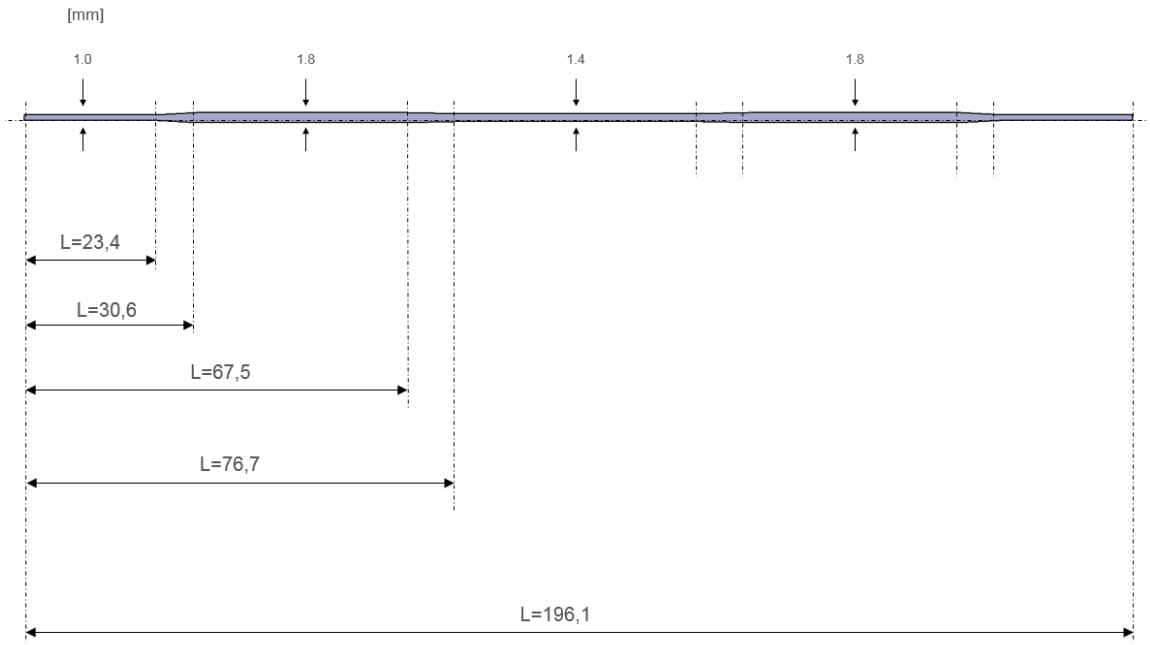
Figur 9 Optimerad enkelhatt, -16% viktreduktion, max 2.0mm / min 1.25mm



Figur 10 Ämnesprofil till optimerad enkelhatt, bredd 140mm 2.0mm/1.25mm



Figur 11 Optimerad dubbelhatt, -16% viktreduktion, max1.8mm / min1.0mm

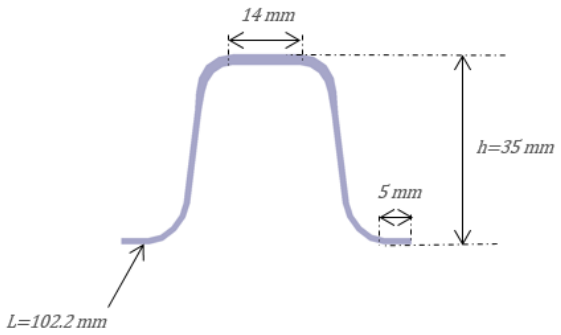


Figur 12 Ämnesprofil till optimerad dubbelhatt, bredd 196mm 1.8mm/1.0mm

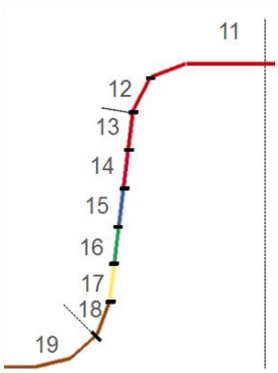
Återkoppling från valsningsanalyser av Swerea Mefos med ovanstående ämnesprofiler ger indikationer på att det är begränsat hur mycket tjockleken kan reduceras. Relativt smala områden kan reduceras i varje stick och det kan uppstå materialhårdnande vid upprepade valsningsstick**. Slutsats: Det går inte att valsa fram de två första tvärsnitten i detta material.** Efter överläggning med valsningsexperter beslutas att styra in ämnessektionen till en smalare och enklare profil.

Gestamp optimerar fram ytterligare en design som har mindre bredd. Ca 100mm ämnesbredd. Utgångstjocklek till valsningen 2.5 mm vilket ger ca 2 mm som maxtjocklek på färdig ämnesprofil. Andra begränsningar är max reduktion samt att reducera till endast en övergångszon per sida av det symmetriska tvärsnittet. Målet är att förenkla tvärsnittet så mycket det går men ändå behålla en viktfördel.

Även optimering av balk med konstant tjocklek genomförs för att använda som referens i optimeringen. Geometri enligt tvärsnittet i figur fastställs som referens. Längd tvärsnitt formad geometri något längre pga av töjning i formningen.



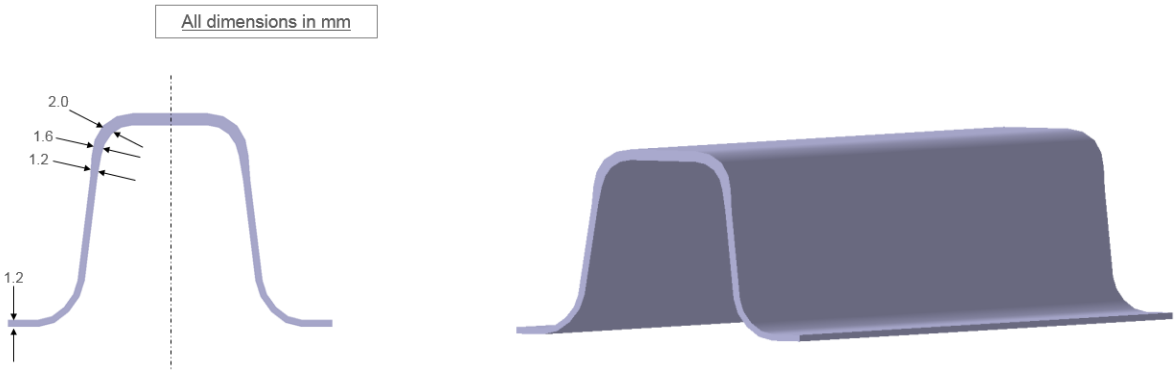
Figur 13 Optimerad grundgeometri med höjd 35mm och ämnesbredd 100mm



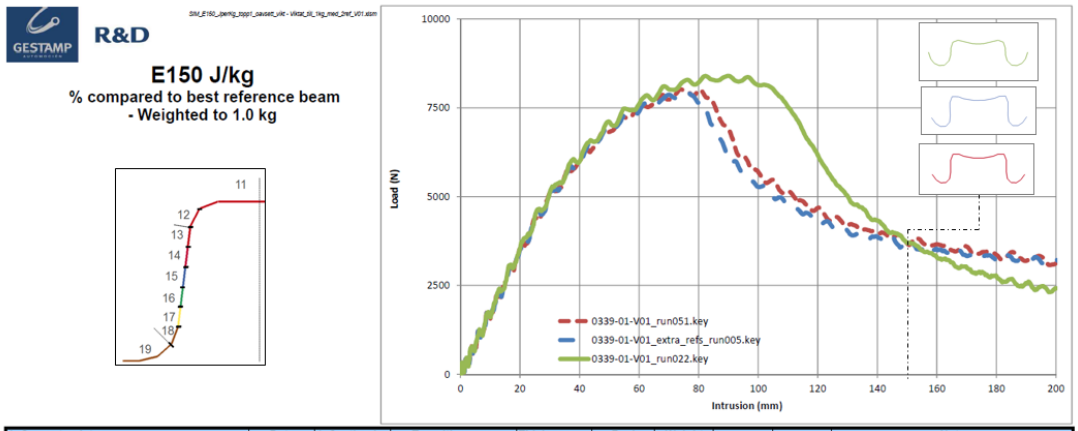
Figur 14 Indelning tjocklekszoner för optimering

Nu följer en optimering av plåttjocklekar där mål är att erhålla så hög energiupptagning som möjligt vid 3 punktsböjning. Se beskrivning av testuppställning. Kontroll görs även på sidoflänsar så att plastisk töjning hålls under en nivå som kan medföra risk för sprickor på trimkanten. Tvärsnittet delas in i zoner där tjocklekar varieras. Villkoren är att toppen på profilen ska vara tjockare och i en tjocklek, ytterflänsen tunnare och i en tjocklek samt en övergångszon mellan dessa två tjocklekar. Position på övergångszon ska fastställas i optimeringen samt de två tjocklekarna.

Resultatet i optimeringsstudien visar att övergångszonen hamnar uppe vid radien till toppflänsen. Maxtjock blir 2.0 mm och mintjocklek 1.2 mm på bästa tvärsnitt. Näst bästa kandidat är 1.9 mm/1.1 mm med övergångszon lite längre ned. Bästa referensbalk med samma vikt är på 1.45 mm.

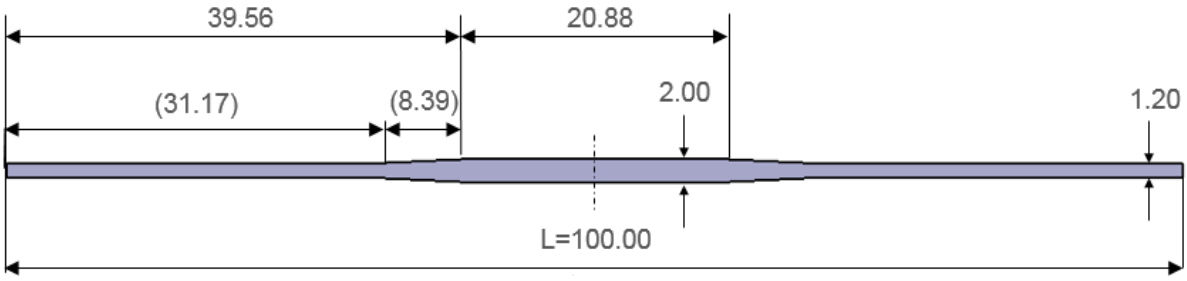


Figur 15 Vinnande tvärsnitt i optimering 17 % viktreduktion Max 2.0 mm / Min 1.2 mm



1. Geometry data: (part.nr / version / name / Dev.spec) 2. Key / Test file	Date	1. Section h 2. Support d [mm]	Transition zone	Thickness	Real Weight [kg]	Weight Curve [kg]	E150 [J]	E150 [J/kg]	Note
/ / 0339-01-V01_run051.key	2015-10-27			1.5	1.094	1.0	861	787	Best Reference Beam_051, t=1.5 mm
/ / 0339-01-V01_extra_refs_run005.key	2015-10-27			1.45	1.057	1.0	807	763	Reference Beam_401, t=1.45 mm.
/ / 0339-01-V01_run022.key	2015-10-27		12-13	2.0 - 1.2	1.055	1.0	939	890	Beam_022, E150: +13% / +17% J/kg

Figur 16 Kraft mot intryckning vid 3-punktsböjning



Figur 17 Ämnesprofil optimerad enkelhatt bredd 100mm Max 2.0mm / Min 1.2mm

Nya valsningsanalyser med den senast ämnesprofilen som mål genomförs av Swerea Mefos. Resultaten av dessa försök redovisas på annan plats.

4.3 AP3 - Formning (AP-ledare GKN)

Planen i projektet var, för Gestamps del, att göra formningsförsök med en valsad ämnesform. Gestamps geometri har relativt breda zoner som skall tjockleksreduceras vilket det kräver många valsningsstick. Bedömningen görs att det inte inom projektet kommer att vara möjligt att valsa fram denna ämnesprofil så projektgruppen beslutar att inte gå vidare och göra fysiska detaljer på Gestamps geometri. Därför begränsas försöken till valsning av den andra geometrin i projektet, GKN:s geometri.

4.4 AP4 - Industrivalsning (AP-ledare Duroc)

Resultat erhållna genom tekniska beräkningar och som verifierats genom pilotvalsning skulle leda till valsningsprov i industriell miljö. För att säkerställa genomförandet anskaffade den ansvariga parten valsar och förberedde utrustning och personal så långt det gick medan tekniska beräkningar och pilotförsök pågick. Det arbete som återstod var svarvning av valsar till den diameterprofil som skulle användas och genomförande av valsningsproven.

Ett haveri i en annan, mycket väsentlig, del av företagets produktionsutrustning ledde till leveransproblem med påföljande finansiella problem. Dessa problem blev så allvarliga att de ledde till att företaget sattes i konkurs och därmed inte kunde slutföra sitt åtagande i projektet. Företaget rekonstruerades inte utan dess produktionsutrustning avyttrades av konkursförvaltaren och flyttades från platsen.

4.5 AP5 - Projektledning (AP-ledare MEFOS)

Projektets aktiviteter har beslutats och resultat har redovisats på projektmöten. Under projekttiden har nio projektmöten, med deltagande av representanter för projektparterna, hållits. Några möten har varit fysiska men de flesta har hållits via telefon och internet. Mötena har protokollförts så att projektparterna kunnat följa arbetet.

Vid projektmötena har resultat rapporterats via utskickade underlag.

Rapportering till Vinnova och SIP LIGHTer har gjorts enligt uppställda villkor.

5 Resultat

5.1 Pilotvalsning

Proceduren för genomförandet av pilotvalsningen redovisas i kapitel 4.1 ovan. Nedan redogörs för tekniska resultat av pilotvalsningen.

De under valsningen uppmätta data framgår av Tabell 3 som visar medelvärden.

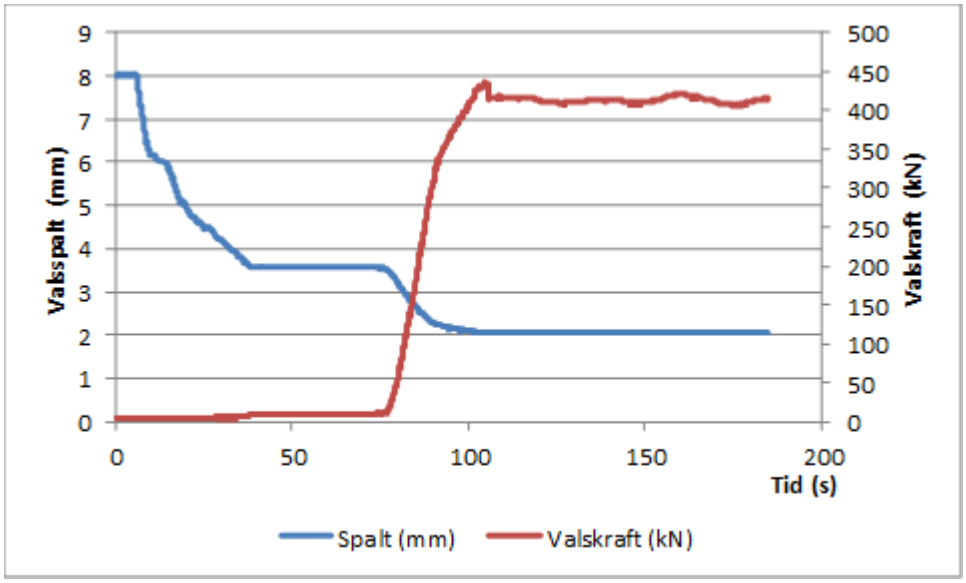
Tabell 3 Medelvärden av uppmätta data

	Spalt	Kraft	Moment övre	Moment nedre	Hastighet in	Hastighet ut	Broms in	Drag ut	Valsad längd in	Valsad längd ut
	mm	kN	Nm	Nm	m/s	m/s	kp	kp	m	m
Stick 1										
Del 1	2,047	413	1042	92	0,0198	0,0225	299	365	1,57	1,78
Del 2	2,048	420	1015	155	0,0202	0,0224	321	377	3,31	3,67
Del 3	2,048	417	959	207	0,0201	0,0224	314	403	0,99	1,10
Del 4	2,049	419	1055	175	0,0201	0,0225	377	392	2,04	2,29
Del 5	2,049	417	1034	171	0,0201	0,0225	371	397	1,11	1,24
Del 6	2,048	418	1044	99	0,0209	0,0227	382	505	0,78	0,85
Del 7	2,048	416	1041	58	0,0209	0,0227	367	527	1,11	1,20

Stick 2										
Del 1	2,049	414	1360	-813	0,0203	0,0224	335	404	1,23	1,36
Del 2	2,049	410	1490	-827	0,0202	0,0227	541	419	3,45	3,88
Del 3	2,049	450	1403	50	0,0201	0,0227	573	411	1,52	1,72

De valsade längderna som redovisas i tabellens två sista kolumner har integrerats från mätta bandhastigheter. Noggrannheten hos dessa är beroende av kalibreringen av hastighetssignalerna.

Figur X4 visar sambandet mellan valsspalt och valskraft då valsarna spelas ihop med försöksbandet mellan valsarna och när valsningen sedan startar.



Figur 18 Valsspalten och dess inverkan på valskraften

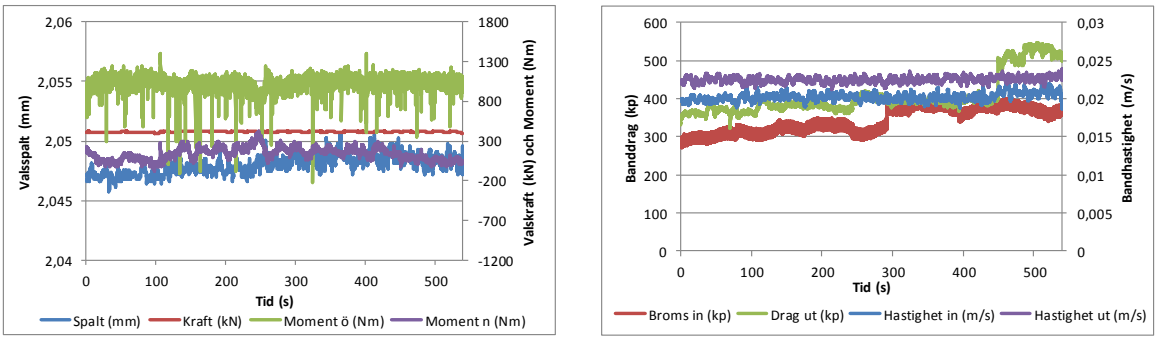
Figuren visar att valskraften börjar ge utslag när valsspalten spelats ihop till 3,75 mm. Därefter stiger valskraften brant till 440 kN när valsspalten minskas till drygt 2 mm. När sedan valsningen startar så sjunker valskraften något vid bibehållen valsspalt.

Noteras kan att från det att valsarna får kontakt med bandet så minskas valsspalten med ca 1,7 mm trots att övervalsen bara tränger in 0,5 mm i bandet vid dess kanter. Skillnaden på 1,2 mm utgörs av

lagerglapp och elastiska deformationer av valsar och valsstol som uppstår när valskraften ökar vilket kompenseras med hopspelning av valsarna.

Relevanta valsparametrar loggades under valsningarna. Storheterna Spalt, Hastighet, Broms och Drag är inställningsparametrar medan Kraft och Moment är resulterande parametrar.

Figur 19 visar de mätta parametrarna under stick 1.



Figur 19 Mätta valsningsparametrar under stick 1

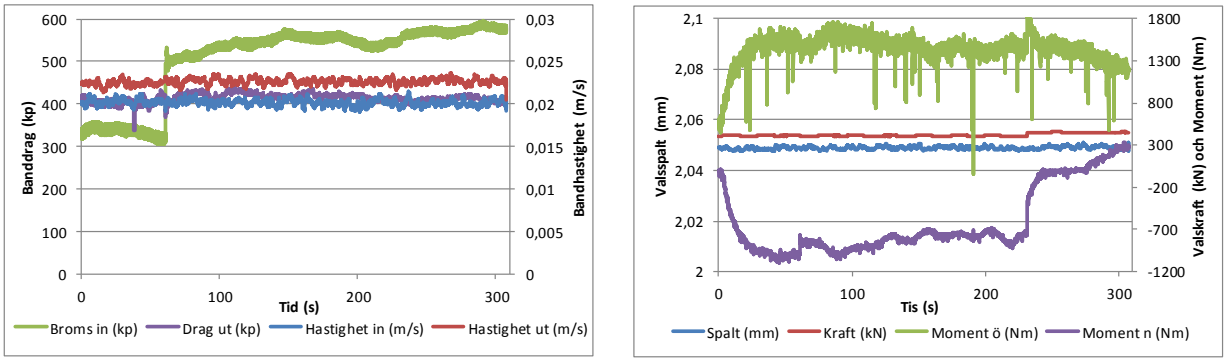
Total valsningstid är ca nio minuter vilket motsvarar valsning av ca 11 meter på försöksbandet. Valsspalten och bandhastigheten har hållits konstanta genom hela valsningen. Några förändringar i banddrag har gjorts både på in- och utgångssidan men dessa har inte på märkbart sätt påverkat valskraften och mycket liten utsträckning valsmomenten.

Valsningen upplevdes som mycket stabil och endast mycket små antydningar till oplanhet förekom.

Bandet förlängdes knappt 10 % under valsningen så den ingående valsade längden på 11 meter blev till 12 meter valsat band.

Av dessa 12 meter valsades ungefär hälften ett andra stickför att göra en slutjustering av bandets tjockleksprofil. Under valsningen av stick 2 förlängdes bandet ytterligare ca 12 %.

De mätta valsningsparametrarna från stick 2 visas i Figur 20.



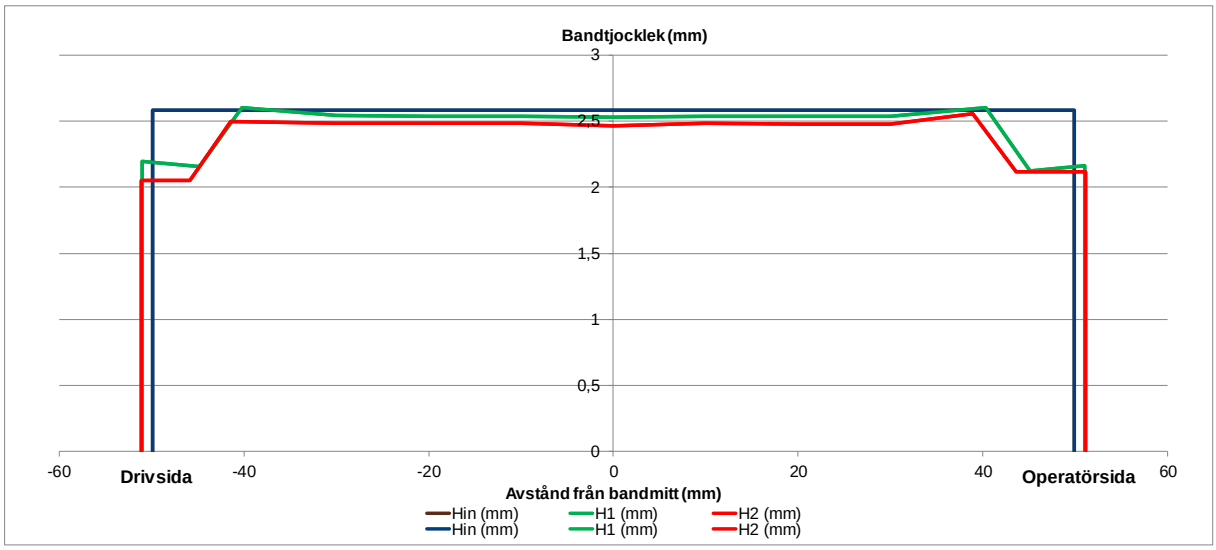
Figur 20 Mätta valsningsparametrar under stick 2

Även i detta stick hölls valsspalt och bandhastighet konstanta genom hela sticket. Vid ett tillfälle gjordes en rejäl höjning av bromsspänningen utan att detta gav tydlig förändring av övriga valsningsparametrar. Möjligen kan en smärre momentan förändring av valsmomenten märkas när ändringen gjordes men momenten återgick efter en stund till samma nivå som före ändringen.

Noterbart är att i början av valsningen lägger sig valsmomentet på den övre valsen på en hög nivå medan undervalsens moment är negativt. Valsningen drivs helt av övervalsen medan den undre ligger och bromsar. Vid slutet av valsningen sker spontant en omfördelning av momenten så att både till slut är positiva men att övervalsen fortfarande utför den största delen av arbetet. Det finns inget i övriga valsparametrar som uppenbart orsakar detta fenomen. En förklaring skulle kunna vara förändringar i smörjningen av bandet men ingen medveten sådan förändring har gjorts.

Provbitar av bandet skars ut och togs undan för analys, några för geometriska dimensionsmätningar, några för mikrostruktur- och hårdhetsmätningar och ytterligare några för formningsprov.

Figur 21 visar uppmätta tjockleksprofiler på det valsade bandet före valsning samt efter stick 1 och stick 2.



Figur 21 Bandprofiler före och efter valsning

Figuren visar en tydlig tjockleksreduktion vid bandets kanter och en lika tydlig ökning av bandets bredd. Nästan hela breddförändringen sker i stick 1 då den huvudsakliga tjockleksreduktionen sker. En viss förtunning av bandet på mittpartiet som inte valsats har också skett.

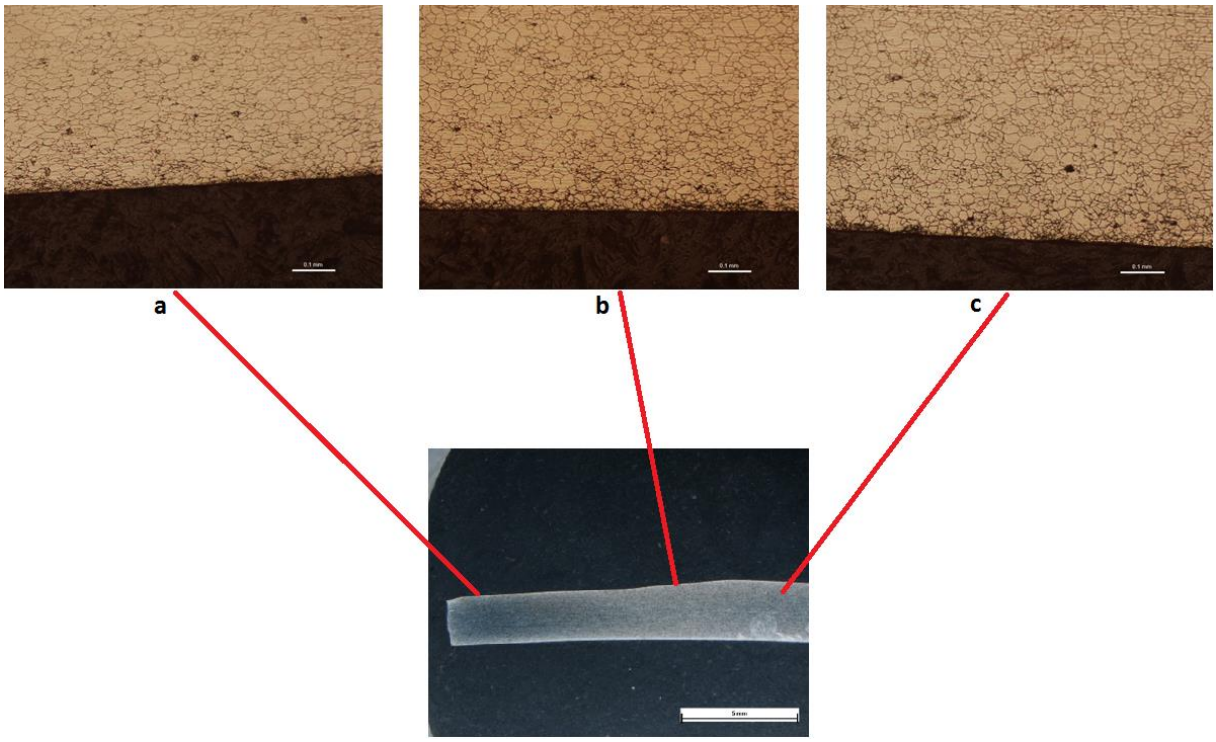
I stick 2 har bandet gått in snett i valsgapet så att det tunna partiet på drivsidan är tunnare och smalare än motsvarande parti på operatörsidan.

De dimensionsmässiga förändringarna av bandets tvärprofil kan sammanfattas enligt Tabell 4.

Tabell 4 Tvärsnittsdimensioner

	Drivsida				Operatörsida			
	Tvärsnittsarea		Tjockleks-reducerad area	Bred-nings-area	Tvärsnitts-area		Tjockleks-reducerad area	Bred-nings-area
	mm^2	%	mm^2	mm^2	mm^2	%	mm^2	mm^2
Ursprungsband	128,8	100,0			128,8	100,0		
Efter stick 1	126,8	98,5	2,77	2,47	126,7	98,3	3,37	2,43
Efter stick 2	123,7	96,0	2,78	2,47	123,6	96,0	3,71	2,55

	Hela bandet					
	Tvärsnittsarea		Tjockleks-reducerad area	Bred-nings-area	Medeltjocklek ej reducerat parti	
	mm^2	%	mm^2	mm^2	mm	%
Ursprungsband	257,7	100,0			2,58	100,0
Efter stick 1	253,5	98,4	6,14	4,90	2,55	98,9
Efter stick 2	247,3	96,0	6,49	5,02	2,49	96,5



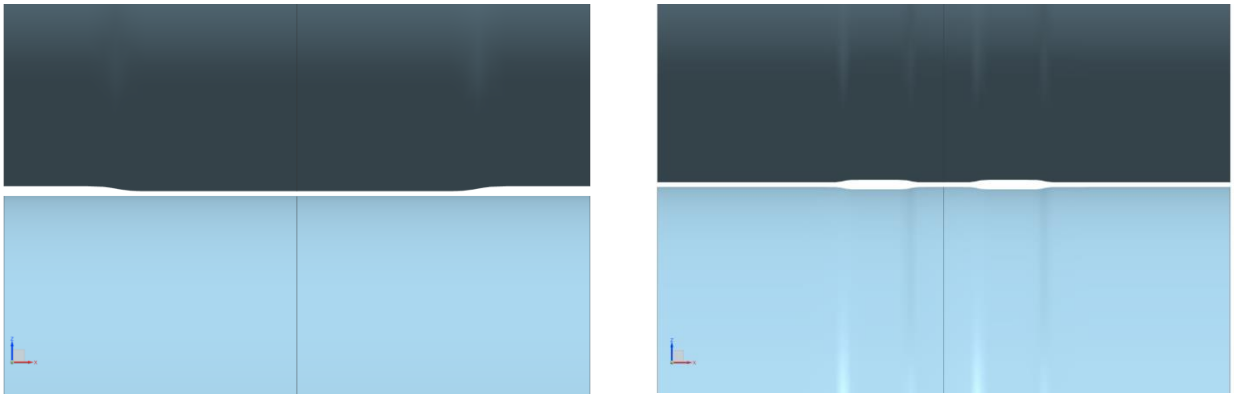
Figur 22 Mikrostruktur hos valsad profil.

Ett prov från det valsade materialet har tagits ut och undersökts i mikroskop enligt Figur 22. Kompressionen av mikrostrukturen är väldigt liten vilket kan förklaras av att dragkraften hjälper till att sträcka samtidigt som valsarna komprimerar materialet. Hårdheten i den tunna mer reducerade delen av bandet vid a är 31HRC medan den i den tjockare nästan oreducerade delen är 19HRC. Deformationen har alltså höjt hårdheten med ca 50 %. Vad detta betyder för användningen av materialet är i skrivande stund okänt.

5.2 Modellering

5.2.1 Beräkningar

Två olika slutprofiler har simulerats där slutmålet är att valsa ner tjockleken på vissa partier av tunta band för att på så sätt reducera slutproduktens vikt. GKN har en profil med ett parti som har halverad tjocklek längs bandet utmed centrum men är plant på ena sidan, se valsgap i **Fel! Hittar inte referenskälla.** a. Gestamp HardTech har en profil där tjockleken varierar tvärs bandet i flera omgångar. I centrum är bandet tunnast för att sedan, symmetriskt från centrum, bli fulltjockt och sedan tunt igen på kanterna, se valsarnas profil i **Fel! Hittar inte referenskälla.**3 b. De två geometrierna har

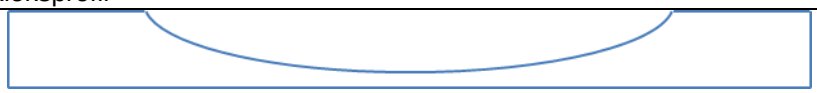


behandlats separat.

a GKNs profil b Gestamp HardTechs profil

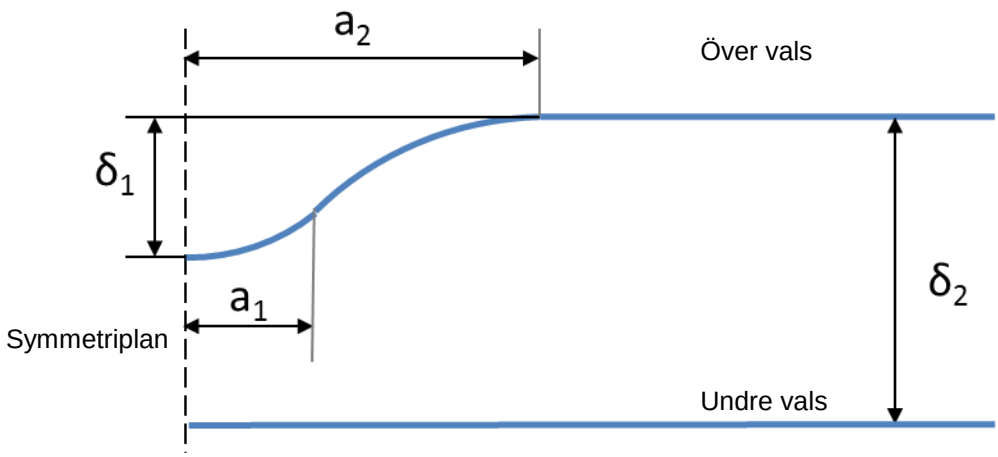
Figur 23 Bandprofiler

Tabell 5. Profiler som beräkningar är gjorda på.

Benämning	Tjockleksprofil
GKN-P1	
GKN-P2	
GH-P1	
GH-P2	

GKN Profil GKN-P1

Eftersom geometrin innehåller symmetri i ett plan är endast halva profilen modellerad. Profilen kan, för att underlätta kommande utvärdering, parameteriseras enligt följande figur:



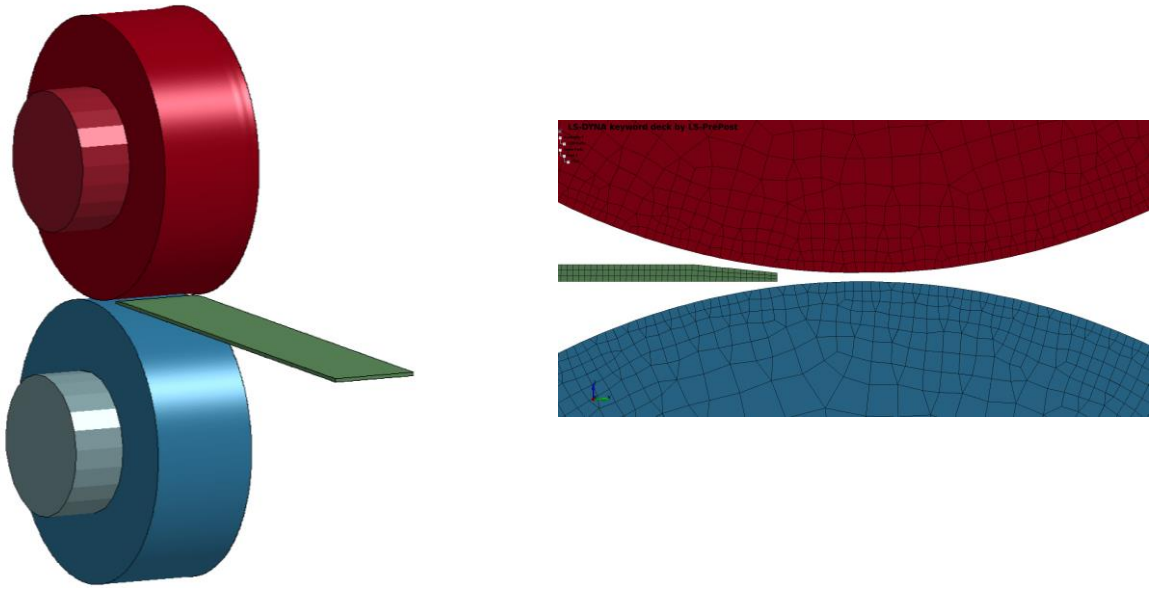
Figur 24 Parameterisering av valsprofil, GKN

Där a_1 och a_2 är halva bredden på bulan, a_1 är avståndet från centrumplanet till positionen där de två cirkelbågarna möts med gemensam tangent. Därefter sker en övergång från bulan till valsens plana parti med en radie som bestäms indirekt av a_2. Höjden på bulan bestäms av δ_1 och valsarnas avstånd (vid kanten) av δ_2.

FE-modell

Den övre och undre valsen är modellerad med elastiska solidelement med små element vid ytan för att ge en jämn representation av kontaktytorna. Storleken på elementet är valda så att det största felet vid kontakten blir 1,5 µm. Valsarna är lagrade i stela axlar som är låsta i höjdled samt i valsriktningen samt givna en rotationshastighet som motsvarar en valshastighet på 2 m/s.

Bandet är modellerat med solidelement och har en kilformad front för att lätt komma i ingrepp samtidigt som viss instabillitet reduceras vid första kontaktögonblicket. Längden på bandet är 0,25 meter, tillräckligt för att effekterna av de fria ändarna inte påverkar resultaten.



Figur 25 FE-modell GKN

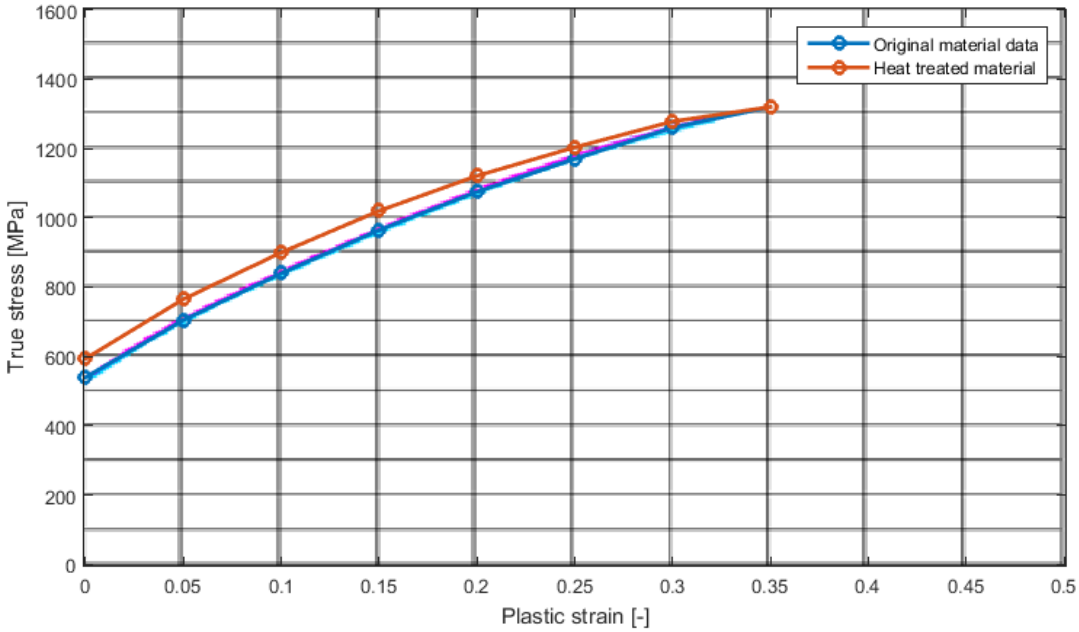
Dragkraften (F_f) har bestämts av materialets halva sträckgräns före deformation och är 27500 N (50 % av σ_s) och bromskraften (F_b) har varit något lägre 22000 N (40 % av σ_s). Kraften appliceras på ändarna av bandet i tvärsnitt med normalen i dragriktningen.

För att skapa en bra kontakt mellan bandet och valsarna har valsarna klätts med skalelement som har en minimal tjocklek som inte tas med i beräkningarna. Kontaktvillkor har bestämts mellan

skalelementen hos valsarna och bandets yta, friktionstalen har bestämts till 0,118 efter optimering i ett tidigare projekt med liknande förhållanden.

Material

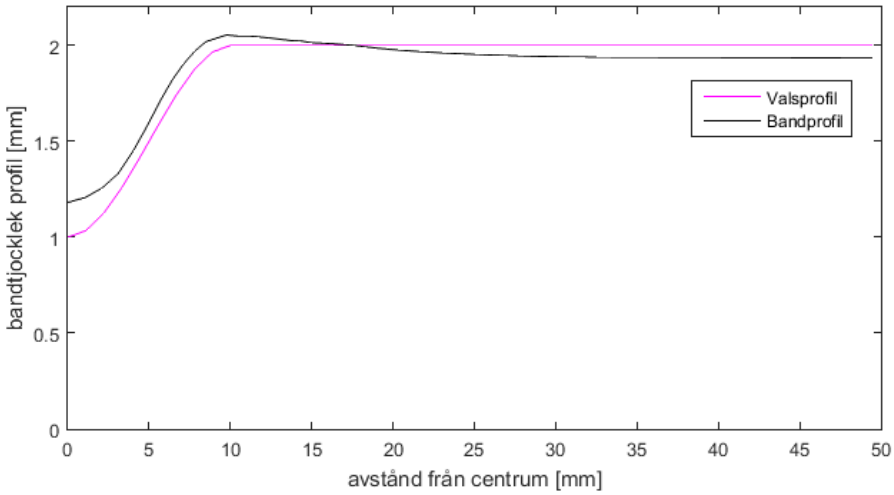
Materialdata för AMS5596 i rumstemperatur gavs av GKN och materialkort för LS-Dyna bestämdes genom att anpassa datapunkter till materialkurvan. För de försök när bandet har värmebehandlats mellan två stick har sträckgränsen justerats så att den ökar med 10 % för att sedan, stegvis återgå till ursprunglig brottgräns.



Figur 26 Materialkurvor vid rumstemperatur för ursprungligt samt värmebehandlat AMS5596

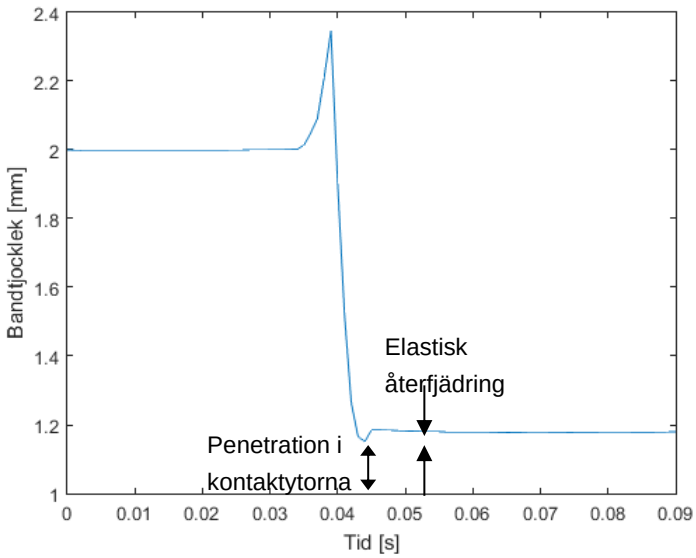
Inledande beräkningar med stela valsar

Eftersom materialet hårdnar kraftigt och MEFOS valsverk har begränsningar i tillåtna valskrafter valdes en profil med en relativt smal bula. Bulan gjordes med två cirkelbågar av samma radie ($2a_1=a_2$) och en bredd där a_2=10,0 mm. Den önskade reduktionen av tjockleken i mitten av spåret är 50 % vilket ger $2\delta_1=\delta_2$, i modellerna är ingående bandtjocklek, δ_2=2,0 mm. Till en början valdes stela valsar för att undersöka storleken på valskraften för önskad profil samt hur stor åsbildningen blir vid sidan om spåret. De skalelement som utgör kontaktytan på valsarna gavs då de materialegenskaperna för ett stelt material och kan inte deformeras.



Figur 27 Utgående bandprofil efter valsning. Kurvorna visar profilen i ett tvärsnitt tvärs bandets valsriktning. Symmetri råder i där avståndet från centrum har sitt nollställe

Valskraften beräknades till 560 kN (57 ton) och bandet bredning blev 0,47 mm. Dragkraften var 50 % av hållfastheten före deformation framåt och 40 % bakåt. En viss återfjädring och penetration kan ses eftersom bandprofilen skiljer sig från valsgapet. Storleken av dessa effekter visas i för ett segment mitt på bandet (i centrum av spåret) där kontaktkraften är som störst.

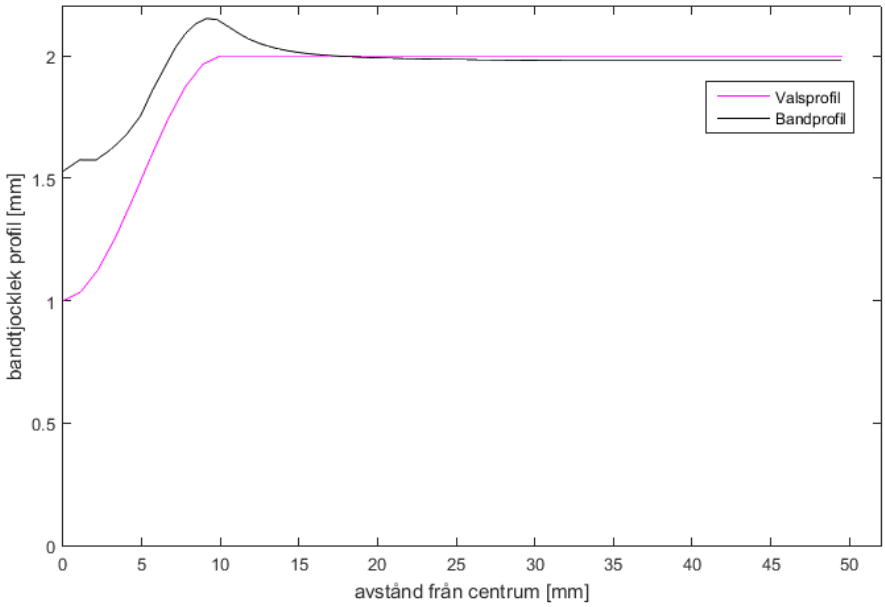


Figur 28 Elastisk återfjädring samt penetration i kontaktytorna (i botten på spåret) vid simulering med stela valsar

Den totala penetrationen i kontakten (summan av penetrationen av den övre och undre valsen) var 0,151 mm i simuleringen och är därmed ca 13% och är en bidragande faktor till att inte önskad tjocklek uppnås. Detta kan jämföras med avplattning av valsarna som sker med elastiska valsar men är något mindre. Den totala återfjädringen var 0,034 mm och bidrar ytterligare till att önskad tjocklek inte uppnås. I det här försöket erhålls ett band som är 1,185 mm mitt i spåret men med ökad tjocklek vid sidorna och en relativt stor reduktion av övriga delar av bandet.

Fortsatta beräkningar med elastiska valsar

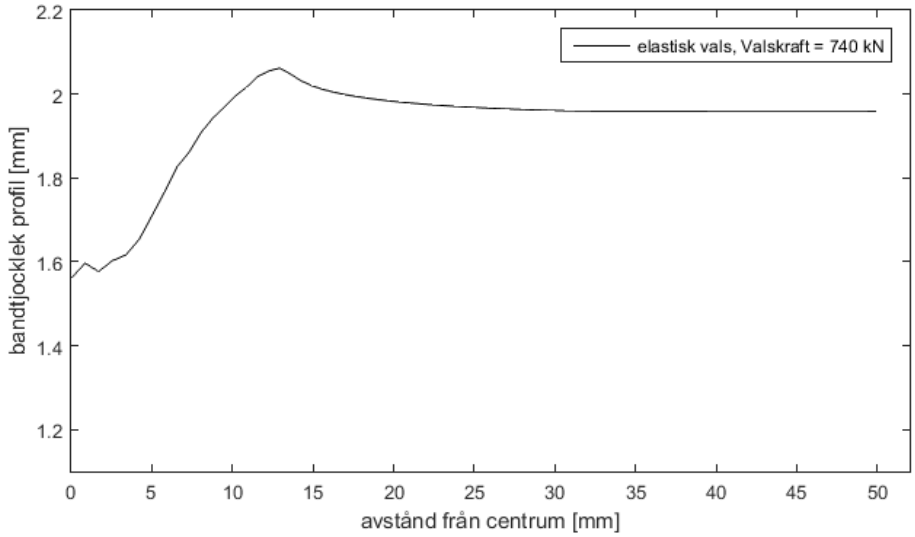
Följande beräkningar utfördes med elastiska valsar enligt samma geometri som tidigare. Resultatet visar en mycket lägre reduktion i mitten på spåret på grund av valsarnas avplattning. Den slutgiltiga reduktionen blir nära hälften av önskad profil samtidigt som en hög ås bilas vid sidan av spåret. Valskraften beräknades till 450 kN (46 ton) och är i storleksordningen av vad MEFOS valsverk klarar av.



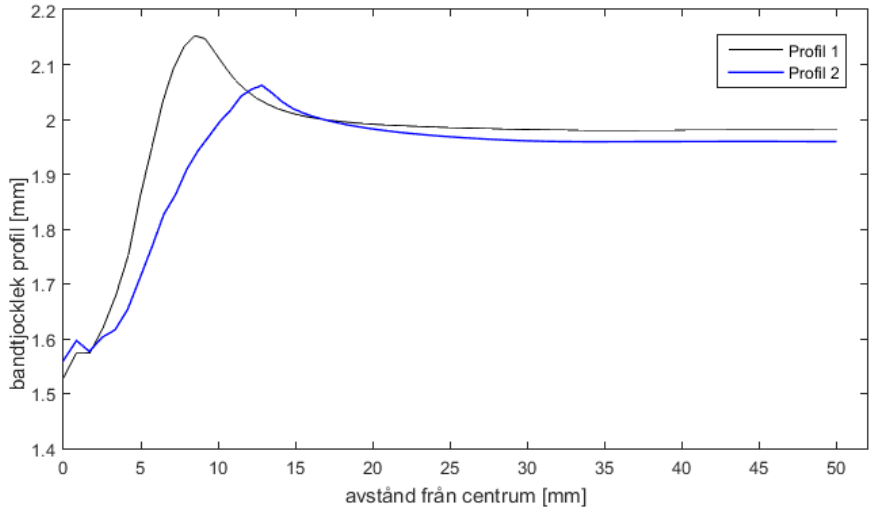
Figur 29 Bandprofil efter valsning med elastiska valsar enligt tidigare profil

För att kompensera för den stora ås som bildas vid sidan om spåret kördes ytterligare en beräkning med en bredare och något högre bula. Bulans bredd (a_1) var densamma som tidigare (5 mm) men övergången (a_2) ökades från 10,0 till 20,0 mm. Bulans höjd (δ_1) ökades till 1,2 mm för att kompensera för ökad avplattning av valsarna.

Resultaten visar att det fortfarande bildas en ås vid sidan om spåret som ger en ökad tjocklek jämfört med ingående band. På grund av den nya valsprofilen ökade valskraften till ca 740 kN (75 ton) i det andra sticket.



Figur 30 Bandprofil efter valsning med elastiska valsar med bredare ås



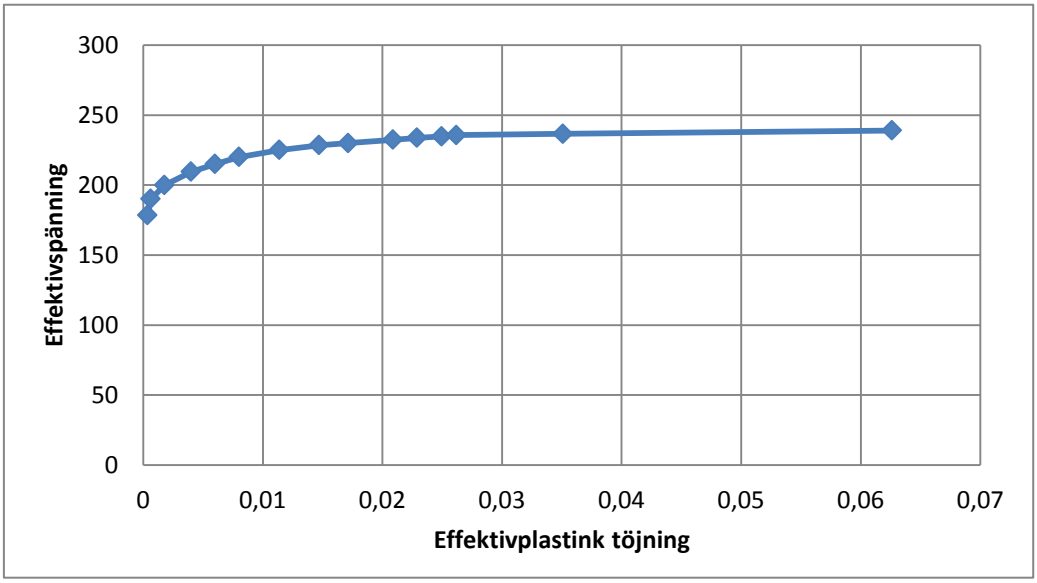
Figur 31 Sammanställning av inledande beräkningar.

I Figur 31 visas profilerna för de två valsgeometrierna i samma figur. Det är tydligt att åsen reduceras med bredare bula men det ökar även valskraften samt påverkar tjockleken av bandet vid sidorna om den förhöjda åsen.

För att åstadkomma önskad profil krävs ett kraftigare valsverk alternativt väldigt många stick med små reduktioner. Ett problem som uppstår när spåret reduceras en andra gång är att hela bandet måste sträckas för att undvika tryckspänningar på någon del av ett tvärsnitt. Detta leder till att bandet måste förlängas och skillnaden mellan tunt och tjockt parti minskar och bandet blir smalare. Slutsatsen är att det är väldigt svårt att få materialet att flytta sig i sidled.

Varmvalsning

Eftersom materialet hårdnar kraftigt blir valskrafterna väldigt höga och avplattningen av valsarna stora. Det visade sig även svårt att flytta materialet åt sidorna vilket resulterar i att bulan bildas. När profilen på valsarna anpassas för att minimera bulan kommer bandet att sträckas i kanterna vilket gör att skillnaden mellan det tjocka och det tunna partiet minskar samtidigt som valskrafterna ökar kraftigt. Fortsatta studier kommer att göras där bandet har materialegenskaper som motsvarar 718 vid 900°C. Ingen termisk lösare är tillkopplad, endast materialets mekaniska egenskaper är justerade enligt Figur 32. Ingen värmledning kommer därför att inkluderas.

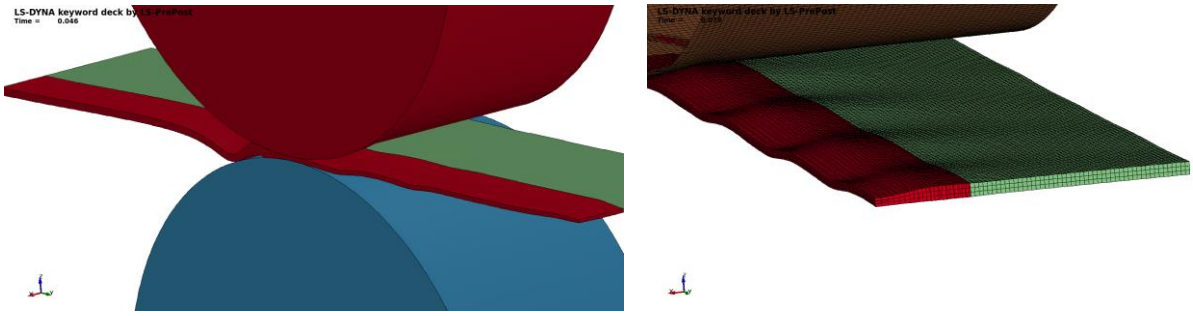


Figur 32 Materialkurva vid 900°C.

Selektiv värmning av kallt band/kylning av varmt band

En simulering gjordes med där bandet har två egenskaper enligt Figur 33. Eftersom ingen värmeledning existerar i modellen blir det en plötslig skillnad i hårdhet mellan varm och kall del. Detta är troligtvis ett tillstånd som inte går att återskapa i verkliga förhållanden då värmeledning kommer att göra bandet jämnvarmt relativt snabbt samtidigt som skillnaden mellan varmt och kallt inte kan vara speciellt hög utan att sprickbildning sker.

Eftersom bandet sträcks ut i mitten kommer det bli vågigt i centrum. Om detta ska motverkas krävs ett högt drag som sträcker bandets kalla delar, samtidigt blir det även tunnare överallt.

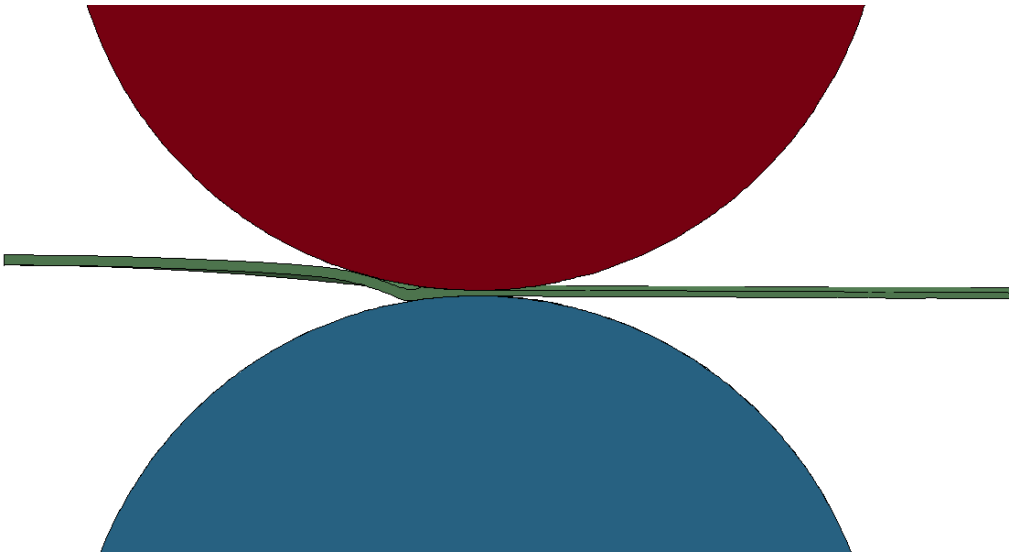


Figur 33 Valsning av delvis uppvärmt band.

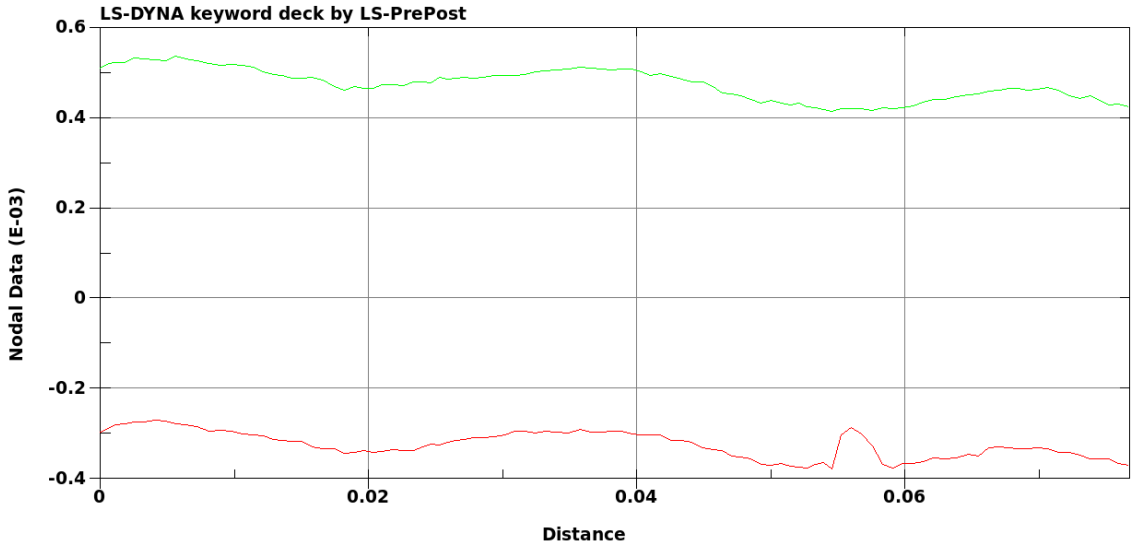
För att materialet ska kunna bli bredare krävs det att kanterna (allt material utanför åsen) gör en förflyttning över sträckan då bandet är i kontakt med valsarna.

Värmning av hela bandet

Som en första test gavs hela bandet egenskaperna av ett varmt material och drag/bromskraft reducerades till 50- respektive 40% av sträckgränsen (150 MPa) före deformation. När materialet är så mjukt kan stödvalsar behövas för att styra in bandet i valsgapet. Det uppstår en stående våg som sträcker bandet på ingångssidan och skapar ojämnheter på slutformen.

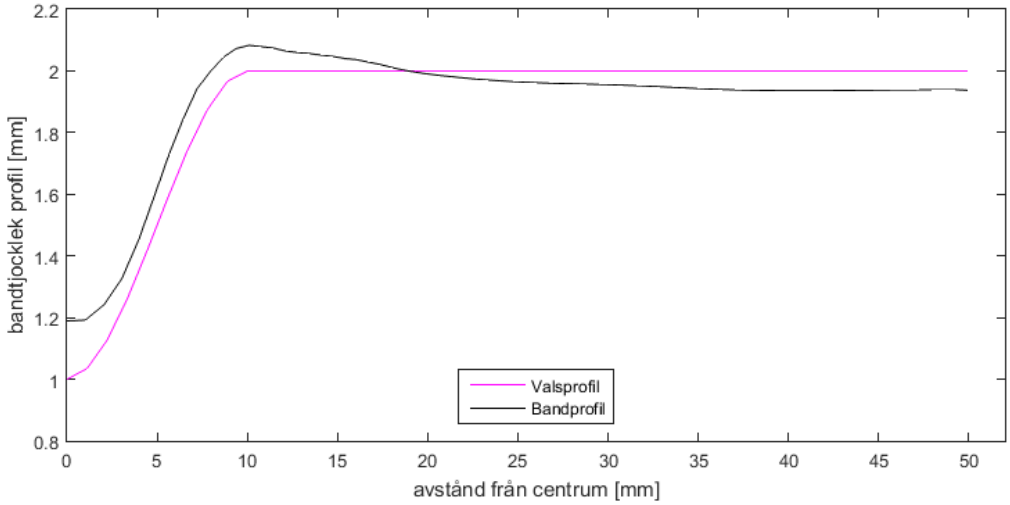


Figur 34 Bandets profil i symmetriplanet vid ingrepp



Figur 35 Bandets profil i centrum (mitt i spåret) sett från sidan, enheter i meter

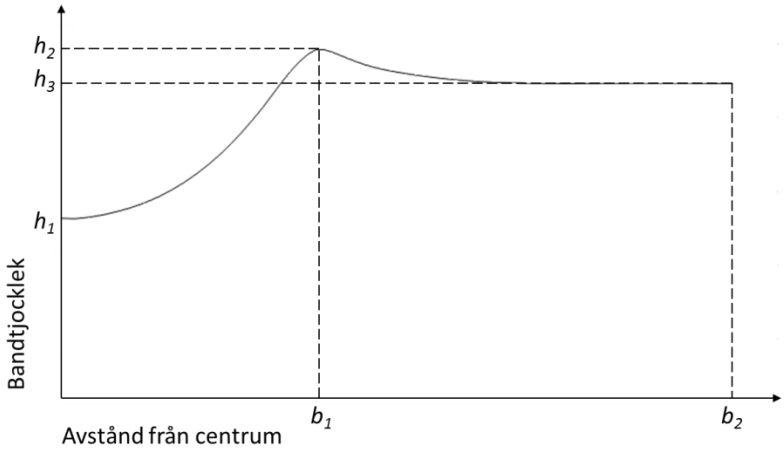
Valskraften pendlar mellan 180 och 190 kN och är en bra bit under maximal tillåten kraft i MEFOS valsverk. Bredningen var totalt ca 1 mm. Slutprofilen visas i Figur 36.



Figur 36 Bandprofil samt odeformerad valsprofil

Varmvalsning i två stick

Ett försök gjordes att valsa profilen i två stick. Resultatet av simuleringarna kan beskrivas med ett antal parametrar enligt Figur 37. Från och med nu kommer alla beräkningar göras på ett band som har tjockleken 2,54 mm (tidigare har den varit 2,0 mm).



Figur 37 Utvärderingsaparametrar av valsat band: b1- avstånd från symmetriplan till åsens högsta punkt, b2- avstånd till kanten, h1- tjocklek i spåret, h2- tjocklek vid åsen och h3- tjockleken vid kanterna

Första sticket

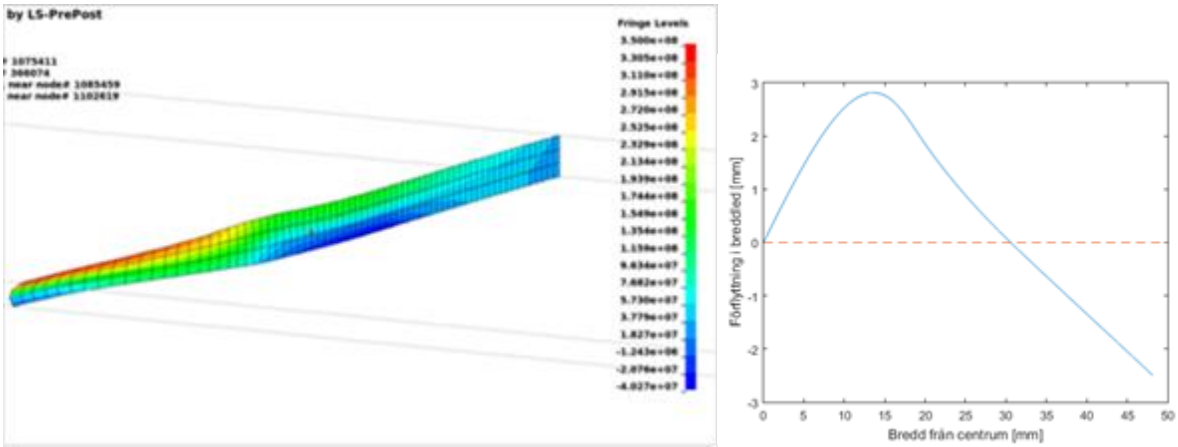
Valsarnas olastade profil samt resultatet av beräkningen kan beskrivas enligt tabell 6. Positionen på åsen (b_1) samt bandbredden (b_2) innehåller ett fel som gör att värdena alltid är större än de verkliga resultaten. Avståndet mäts inte i ett tvärsnitt som har normalen i valsriktningen utan följer en den deformerade meshen efter valsningen.

Spänningarna i längsriktningen över ett tvärsnitt tvärs bandet varierar mellan drag och tryck och skulle kunna ge upphov till oplanhet, se Figur 38a. Detta kan tillåtas om dragkraften är tillräckligt stor i nästkommande stick så att alla tryckspänningar elimineras.

Materialet gör en sidoförflyttning mot sidorna fram till åsen men på kanterna krymper bredden. Förflyttningen av materialet kan ses i Figur 38b där positiva värden på förflyttningen av breddled (y) ger en lokal bredning. Vid ca 30 mm från centrum övergår bredningen till att bandet blir smalare.

Tabell 6 Stickdata

stick 1										
a_1 [mm]	a_2 [mm]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]	F_{drag} [% av σ_s]	valskraft [kN]	b_1^* [mm]	b_2^* [mm]	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]
15	20	1,5	2,5	50	328	18,3	48,2	1,14	2,55	2,23



a b

Figur 38 Profil efter första sticket med spänningar i valsriktningen (a) samt förflyttningen av material på toppytan i tvärriktningen (b).

Andra sticket

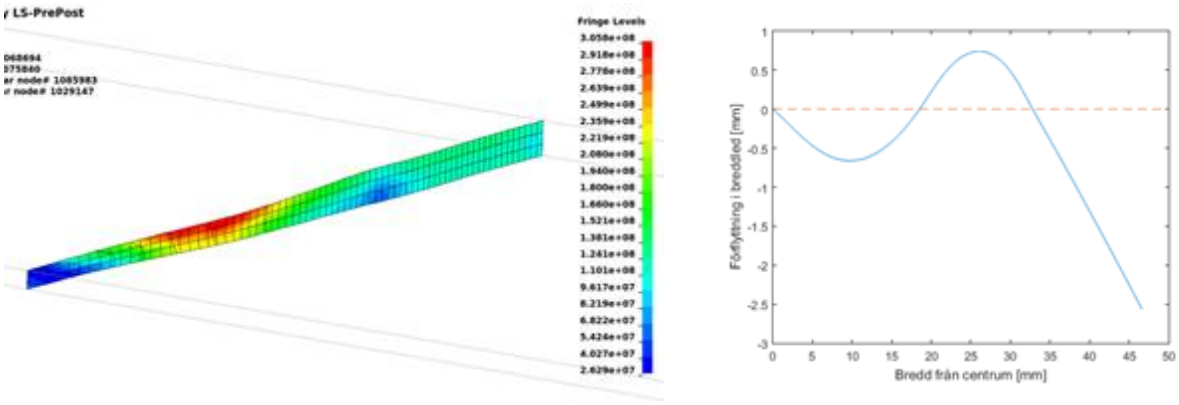
Det deformerade bandet från föregående stick användes som ingångsmaterial till det andra sticket. Spänningarna och de plastiska töjningarna från föregående stick behölls så att valsningen kan betraktas som kontinuerlig.

Tabell 7 Stickdata

stick 2										
a_1 [mm]	a_2 [mm]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]	F [% av σ_s]	valskraft [kN]	b_1^* [mm]	b_2 [mm]	h_1 [mm]	h_2^{**} [mm]	h_3 [mm]
37	42	1,5	2,5	50	255	31,31	44,86	0,983	1,872	1,846
37	42	1,5	2,5	30	316	32,50	45,30	1,032	1,917	1,874

* överestimerat värde på åsens position i breddled (avstånd från centrum är inte vinkelrät mot valsriktningen).
** höjdprofil är beräknad genom att subtrahera tjockleksreduktion från profil i föregående stick. Detta innebär att den verkliga tjockleken inte mäts utan tjockleksändringen läggs till föregående profil.

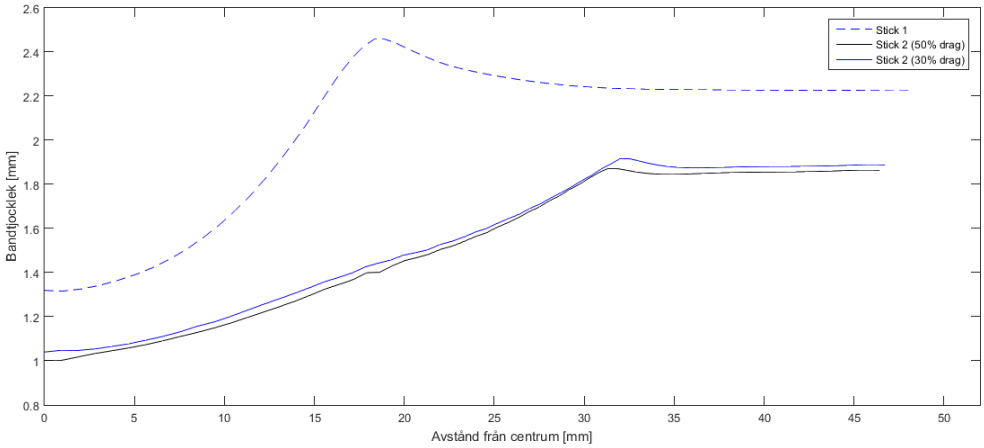
I Figur 39a visas spänningarna i valsriktningen tvärs bandet efter andra sticket med en dragkraft på 50 %. Det framgår i skalan att alla spänningar är positiva (dragspänningar) men att de är en bra bit över flytspännigen. Hela bandet har sträckts så att den totala bredden minskat med ca 10 % och tjockleken i kanterna är lägre än önskad sluttjocklek (2,0 mm). Materialet som tidigare utgjorde åsen har delvis fördelat sig mot centrum men med mycket mindre sidledsförflyttning än tidigare.



a b

Figur 39 Profil efter andra sticket (med en dragkraft på 50 %) med spänningar i valsriktningen (a) samt förflyttningen av material på toppytan i tvärriktningen (b).

Figur 40 visar bandets tjockleksprofil efter de olika redovisade stickalternativen.



Figur 40 Beräknade bandtjockleksprofiler.

Resultat

FE-beräkningar är utförda på halvmodeller med ett symmetriplan längs bandet med normalriktning i bandets breddled. Samtliga resultat som visar bandets profil har därför sitt nollställe i mitten på bandet och visar bara halva bandet. Beräknade valskrafter (*F*) är dubblerade för att representera det verkliga tillståndet.

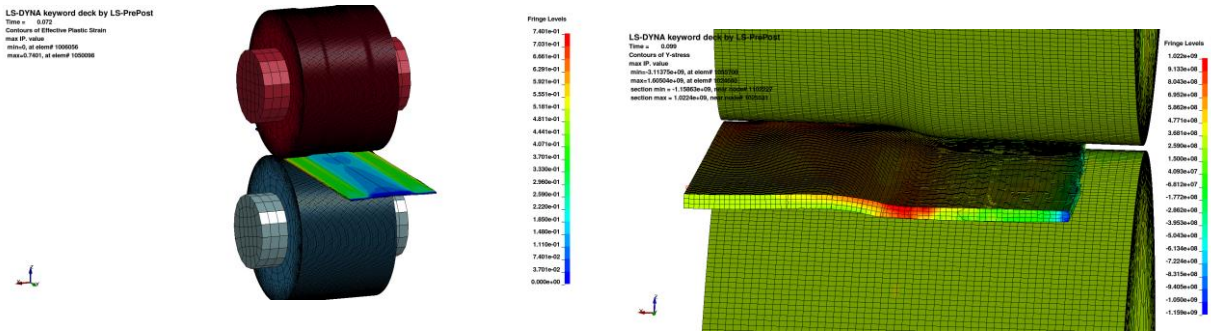
Tabell 8 Stickdata

a_1 [mm]	a_2 [mm]	δ_1 [mm]	δ_2 [mm]	F_{drag} [% av σ_s]	F [kN]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]
Kallvalsning, T=25°C										
5	10	1	2	50	450	8,4863	50,0494	1,5286	2,1524	1,9804
5	20	1,2	2	50	740	12,8380	49,9710	1,5606	2,0619	1,9596
5	10	1	2	50	330	9,4827	50,1944	1,4029	2,1631	1,9736
Varmvalsning, T=900°C										
15	20	1,5	2,5	50	328	18,3273	48,2396	1,1394	2,5482	2,2271

igen

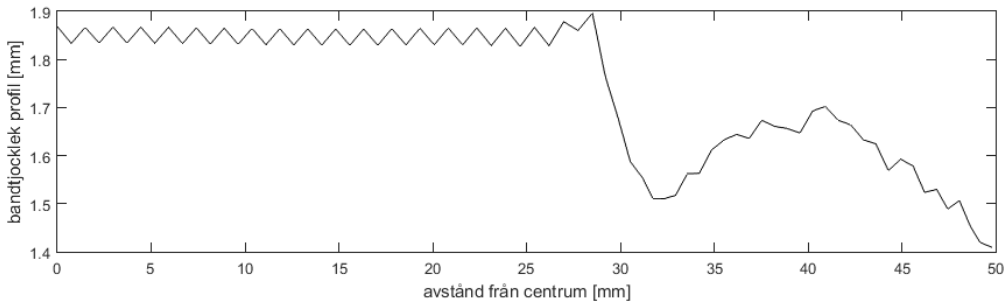
GKN Profil GKN-P2

Den alternativa profilen kördes i kallt tillstånd med ett stick. Övergången från tjockare till tunt material valdes till 10 mm, 20 mm från bandets centrum. Med ett band som är 2x100 mm brett ska 20 mm på vardera kanten reduceras i tjocklek. Valsningsfallet modellerades med antagande av symmetri med avseende på ett plan vid bandets mitt i breddled enligt Figur 41.



Figur 41 Beräkningsmodell för GKN-profil.

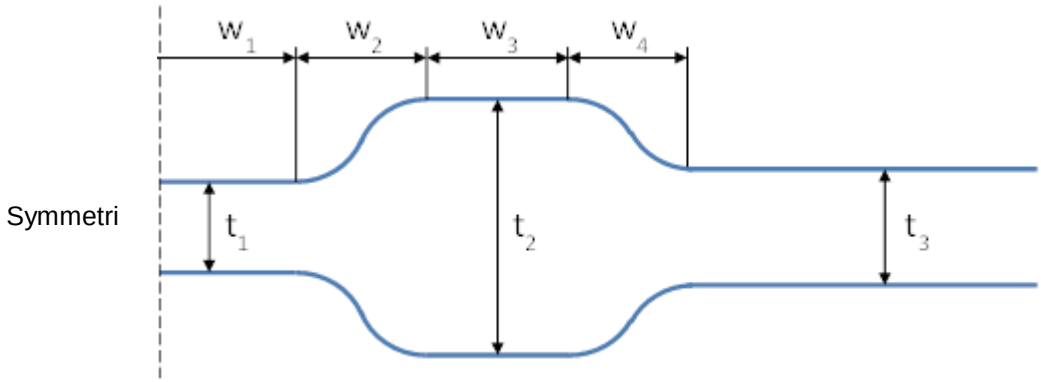
Den totala valskraften beräknades till ca 1400 kN och den slutgiltiga tjockleksprofilen på halva bandbredden beräknades till den som visas i Figur 42.



Figur 42 Beräknad tjockleksprofil för GKN-band.

Gestamp HardTech Profil GH-P1

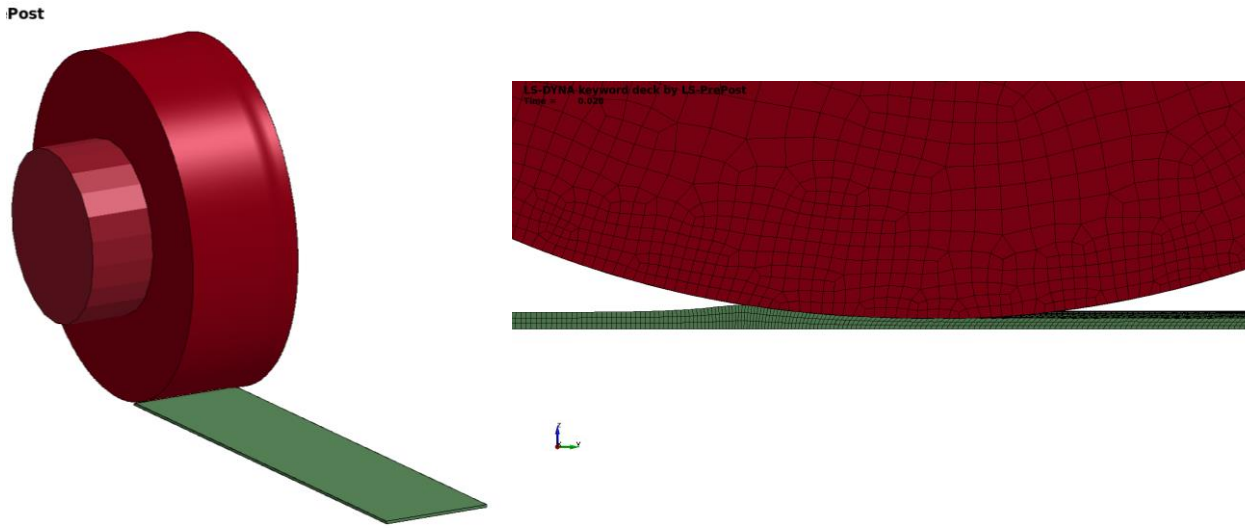
Enkelhatt-profilen har flera reducerade områden tvärs bandet. Den tänkta slutprofilen kan beskrivas av $w_{1\text{-}4}$ samt $t_{1\text{-}3}$ enligt Figur 43. Symmetri råder längs bandets mitt genom bredden samt tjockleken varvid endast en fjärdedel har modellerats.



Figur 43 Profil GH-P1 tillhörande Gestamp HardTech.

FE-modell

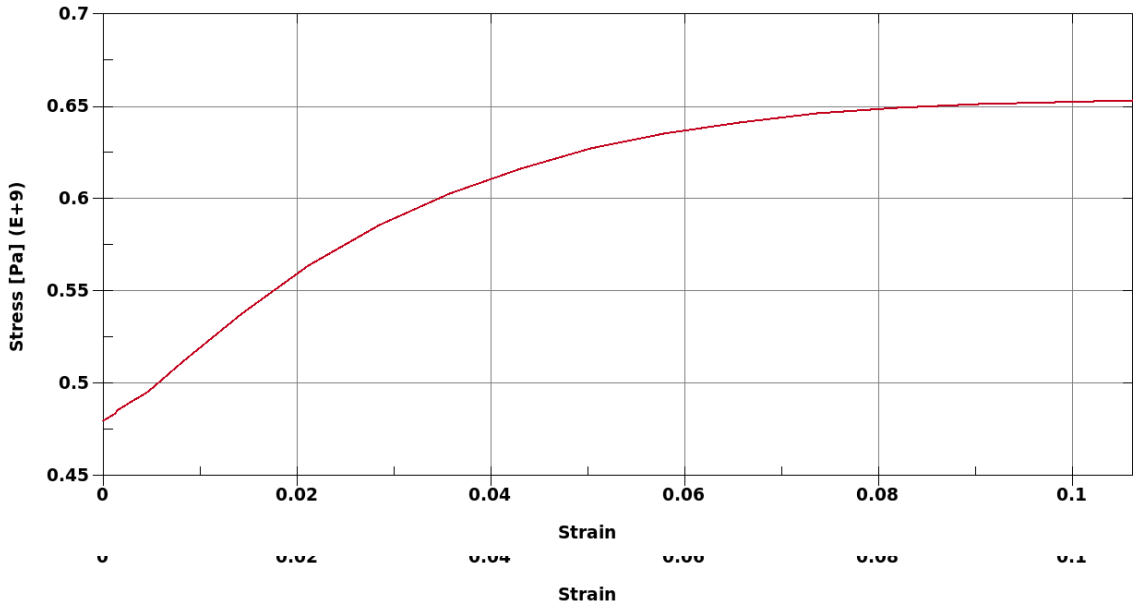
FE-modellen innehåller en elastisk vals med symmetri i centrum samt bandet med halva tjockleken och bredden så att endast en fjärdedel är modellerad, modellen visas i Figur 44.



Figur 44 FE-modell Gestamp HardTech med endast ett spår i mitten av bandet (t_2=t_3).

Material

Bandet består av borstålet Domex 22MnB5 med spännings- töjningsrelation enligt Figur 45.

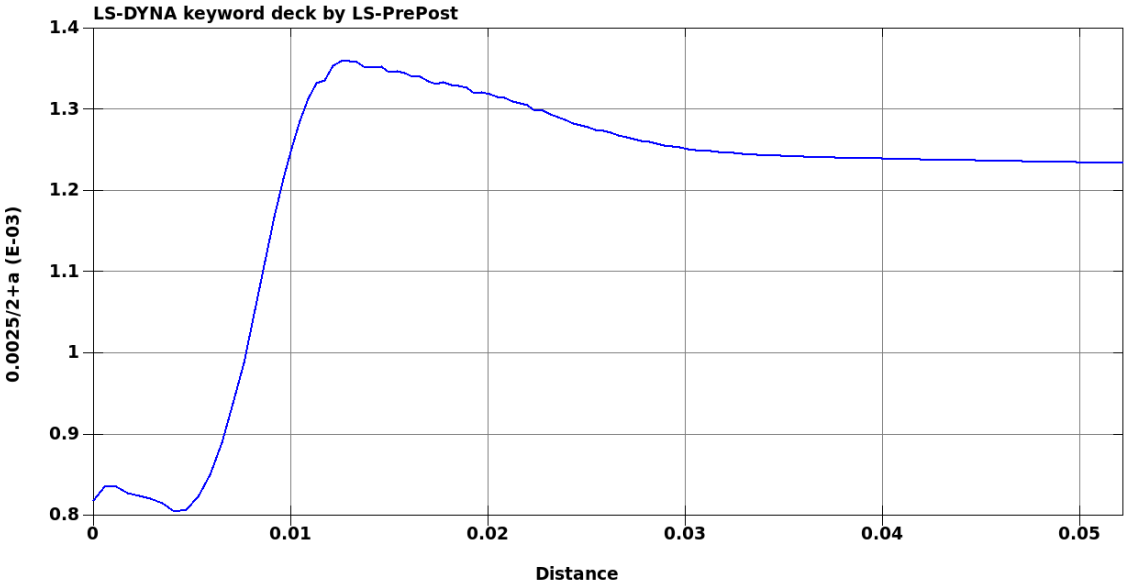


Figur 45 Spännings-töjnings-kurva material Domex 22MnB5.

Inledande beräkningar med centrerat spår

För att åstadkomma en bredning av bandet istället för förlängning har valsningen av profilen delats upp i flera steg. Till en början simulerades valsning av ett spår i mitten på bandet där önskad tjocklek är t_1=1,25 mm. Sträckan (w_1) som utgör halva bredden på bulan var 4,0 mm med en övergång (w_2) på 8,0 mm. Ingående bandtjocklek var 2,5 mm.

För att inte skapa förlängning och vågigheter i det reducerade partiet krävs det att materialet flyttar sig i breddled, samtidigt måste en dragkraft läggas på så att tryckspänningar elimineras. Genom att variera dragkraften på bandet påverkas bredningen, tjockleken vid kanterna samt spänningsbilden i ett tvärsnitt.

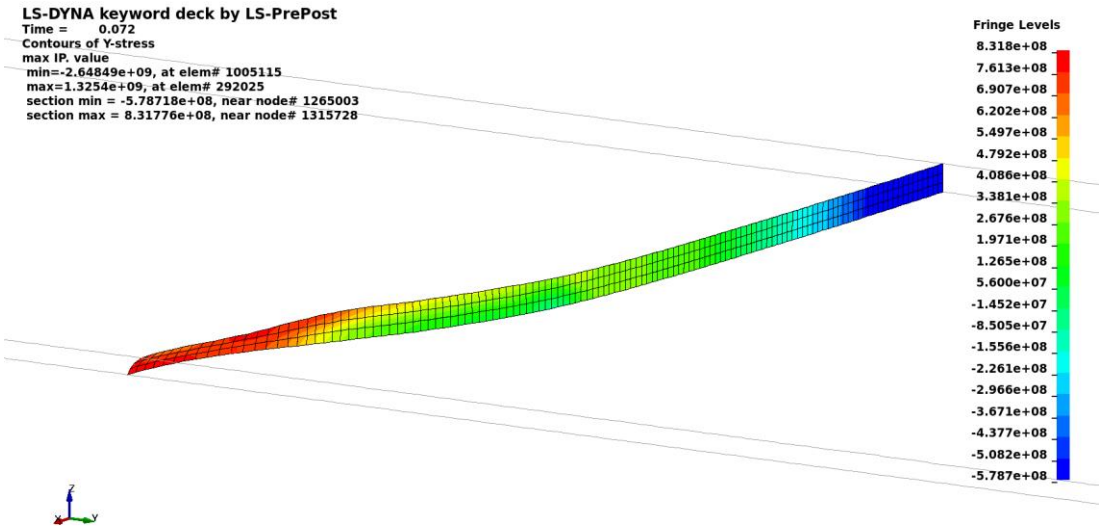


Figur 46 Typisk bandprofil efter valsning av mittspår.

Tre varianter av dragkraften beräknades enligt tabell 9.

Tabell 9 Stickdata

dragkraft [kN] (% av σ_s)	valskraft (total) [kN]	bredning (totalt) [mm]	min tjocklek spår (total) [mm]	tjocklek kant (total) [mm] ± 0,02	max tryckspänning i kanterna [MPa]
15 (50%)	580	-1,17	1,61	2,40	85
12 (40%)	630	-0,514	1,65	2,42	230
8 (26%)	690	-0,076	1,68	2,45	430



Figur 47 Typisk bandprofil efter valsning av mittspår.

Resultat

Tryckspänningen i kanterna är för hög för att hela centrumspåret ska kunna valsas i ett stick. Tjockleksreduktionen i kanterna är liten relativt reduktionen i centrum. Det bör vara möjligt att flytta materialet i breddled genom valsning i flera steg.

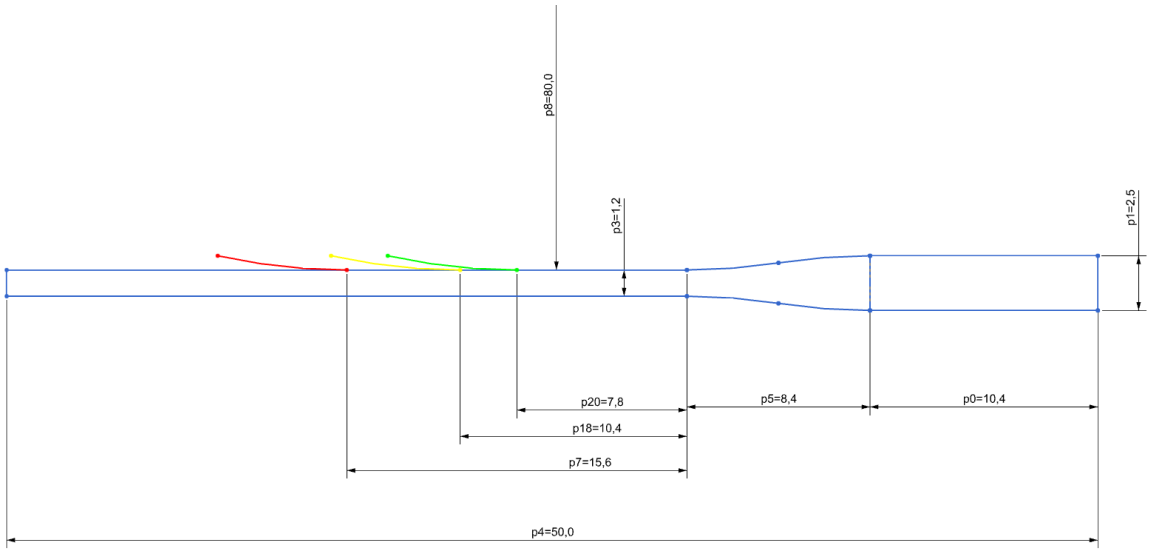
Beräkningen är dock oegentlig eftersom symmetriantaganden tvingar bandet att förbli plant. Risken för oplanhet måste därför uppskattas ur de uppkomna tryckspänningarna i bandets längsriktning. Någon närmare analys av detta har inte gjorts.

Valsningsfallet bedömdes vara svårt att realisera dels på grund av materialets hårdnande dels för att det skulle kräva för många valsningsstick för att målprofilen skulle uppnås.

Gestamp HardTech Profil GH-P2

Denna profil håller en jämn tjocklek på 2,00 mm i vid bandets mitt och är tunnare på kanterna (1,20 mm). I en FE-modell för att simulera valsning har ett ursprungsmaterial om 2,5x100 mm använts. Tre olika valsprofiler har testats där bredden av det tjockleksreducerade partiet varieras i första sticket enligt Figur 48 och Tabell .

De blå kurvorna i Figur 48 beskriver det önskade profilen på bandet efter valsning (här symmetri planet yz vid bandets mitt i breddled).



Figur 48 Profiler för simulering första sticket på GH-P2 där

Profil 1 (röd kurva) ger valsning av halva tjockleksreducerade partiet

Profil 2 (gul kurva) ger valsning av 1/3 av tjockleksreducerade partiet

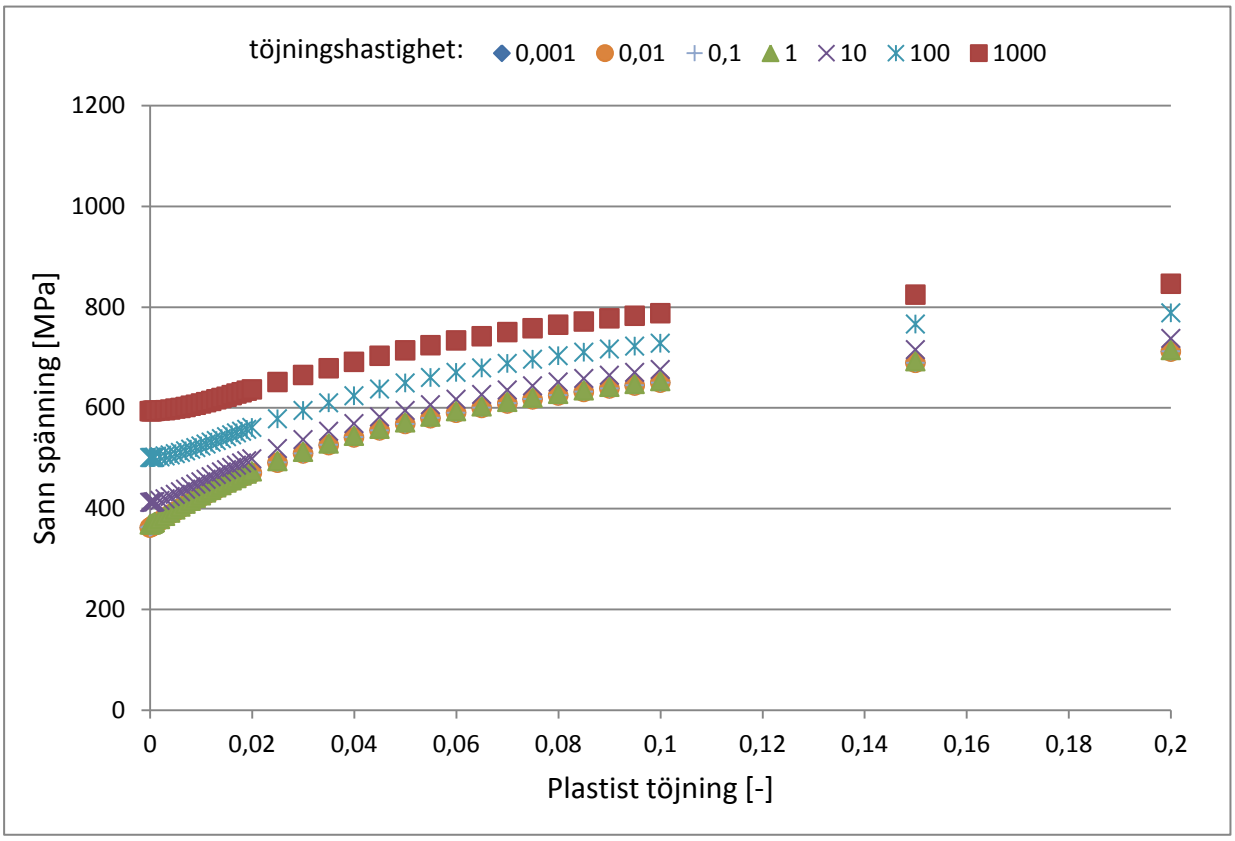
Profil 3 (grön kurva) ger valsning av 1/4 av tjockleksreducerade partiet

Tabell 10 Beskrivning av profiler.

Profil	Del av önskad reduktion i breddled	Färg i
1	1/2	röd
2	1/3	gul
3	1/4	grön

Material Usibor1500 DP

Materialdata för Usibor1500 användes i följande beräkningar. I Figur 49 är spännigar givna vid varierande töjningshastigheter där 1.0, 0.1, 0.01, 0.001 s^{-1} sammanfaller till samma kurva. Det är denna töjningshastighet som valts för beräkningarna. Valsförsök kommer att ske vid relativt låga hastigheter.

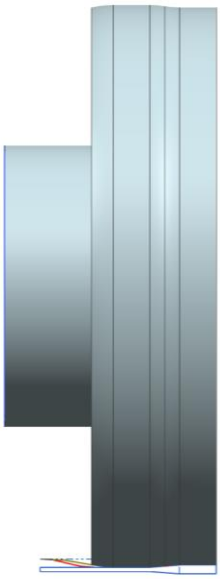


Figur 49 Materialdata för Usibor1500.

Stick 1 (Profil 1) med dubbelt symmetriantagande

Först testades en valsprofil där halva bredden av det parti som ska valsas ned reduceras ett stick. Detta motsvaras av den röda kurvan i Figur 48. Eftersom symmetri råder med avseende på bandets mitt både i tjockleks- och breddriktningen modellerades vid första försöket endast en fjärdedel för att korta ner beräkningstiden. Det bör dock beaktas att det dubbla symmetriantagandet låser materialet så att oplanhet inte kan uppstå i modellen. Detta begränsar resultatets värde enligt ett resonemang ovan.

Under valsningen sker stora okontrollerade deformationer av bandet i längsled vid mitten enligt Figur 50. Fenomenet var svårt att förklara men beräkningsfallet bedömdes ge orimligt resultat.

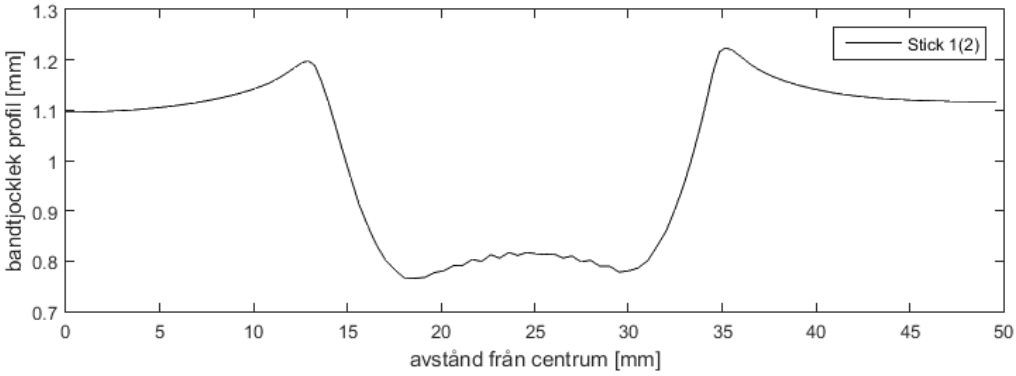


Figur 50 Beräkningsgeometri med instabilt deformationsbeteende.

Stick 1 (Profil 2) med dubbelt symmetriantagande

Bredden av det tjockleksreducerade området minskades till 1/3 av den önskade profilen i första sticket (den gula kurvan i Figur 48).

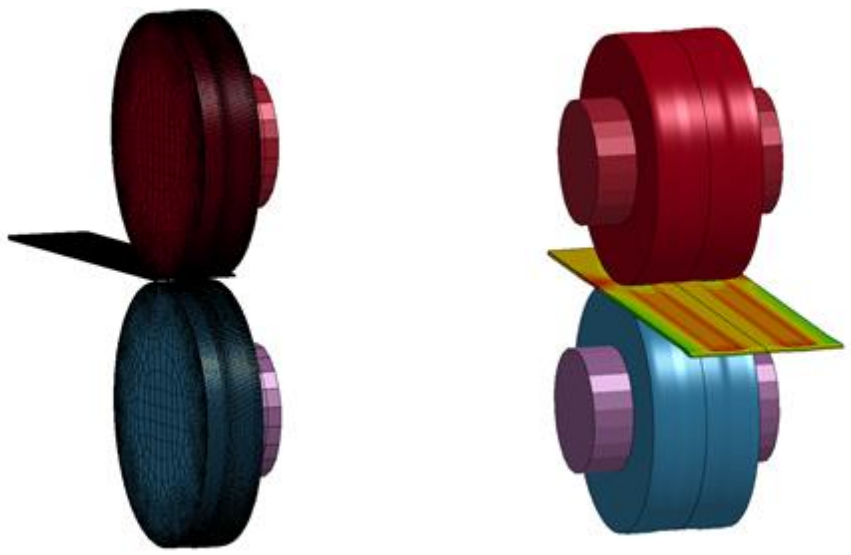
Valskraft beräknades till 770 kN. Inga tryckspänningar uppstod vid bandets mitt efter valsningen men vid kanterna uppgår tryckspänningarna till 460 MPa (124 % av σ_y). Bandet har blivit upp till 3 mm smalare.



Figur 51 Tjockleksprofil efter stick 1(profil 2). Halva bandtjockleken.

Det dubbla symmetriantagandet bedömdes ändå ge svårtolkade beräkningsresultat så metoden övergavs

Stick1 (Profil 2) med enkelt symmetriantagande utan symmetrivillkor i tjockleksriktningen

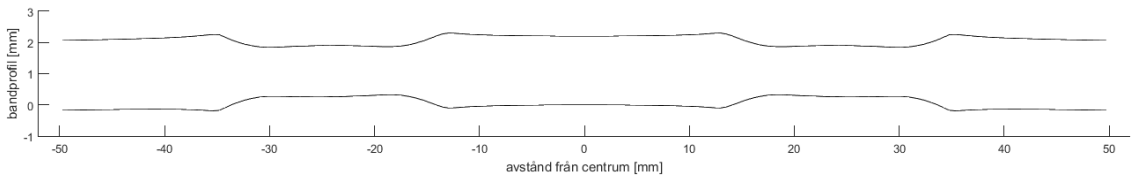


Figur 52 Beräkningsmodell utan symmetriantagande i tjockleksriktningen.

Symmetrivillkoret i bandets tjockleksriktning användes inte vilket innebar att bandets totala slutform utvärderades och utslag i form av oplanhet kunde få genomslag.

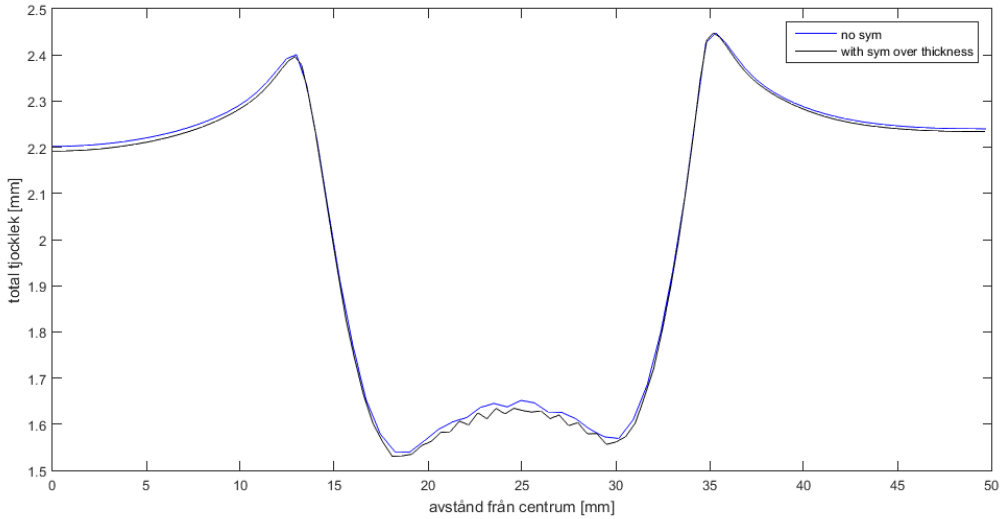
Valskraften beräknades till 770 kN sett över hela bandets bredd.

Bandets tjocklek i centrum är 2,202 mm, som tunnast är det 1,54 mm och som tjockast 2,45 mm vilket åskådliggörs i Figur 53. Bredden har minskat med ca 1,5 mm.



Figur 53 Beräknad bandtjockleksprofil utan symmetriantagande i tjockleksriktningen.

Skillnad i bandprofil efter simulering med och utan dubbelt symmetrivillkor visas i Figur 54.

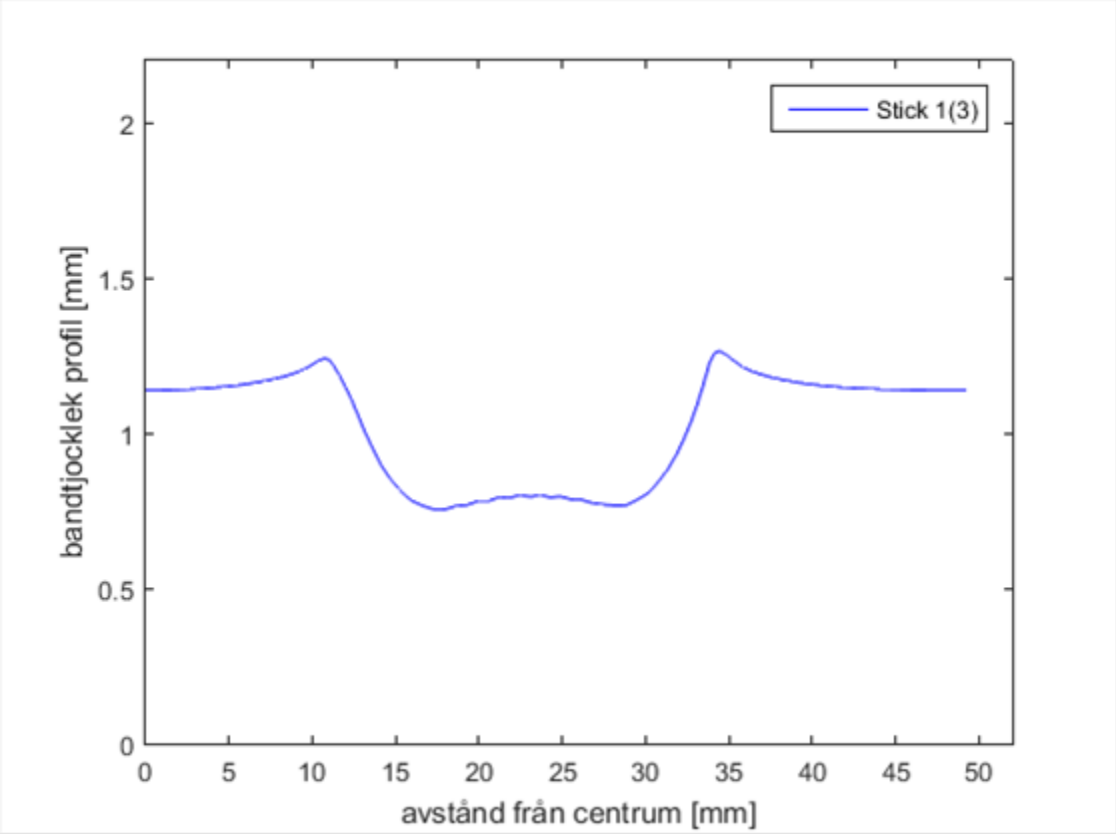


Figur 54 Skillnad i bandtjockleksprofil efter simulering med och utan symmetrivillkor på tjockleken

Som framgår av figuren är skillnaden mellan de två beräkningsfallen liten när det gäller beräknad tjockleksprofil. Dock avviker fallet med dubbelt symmetriantagande väsentligt från verkliga förhållanden. Fortsatta beräkningar gjordes därför med enkelt symmetriantagande.

Stick 1 (Profil 3) med enkelt symmetriantagande

Beräkningen ovan upprepades men med valsprofil 3. Beräknad bandprofil redovisas i Figur 55.

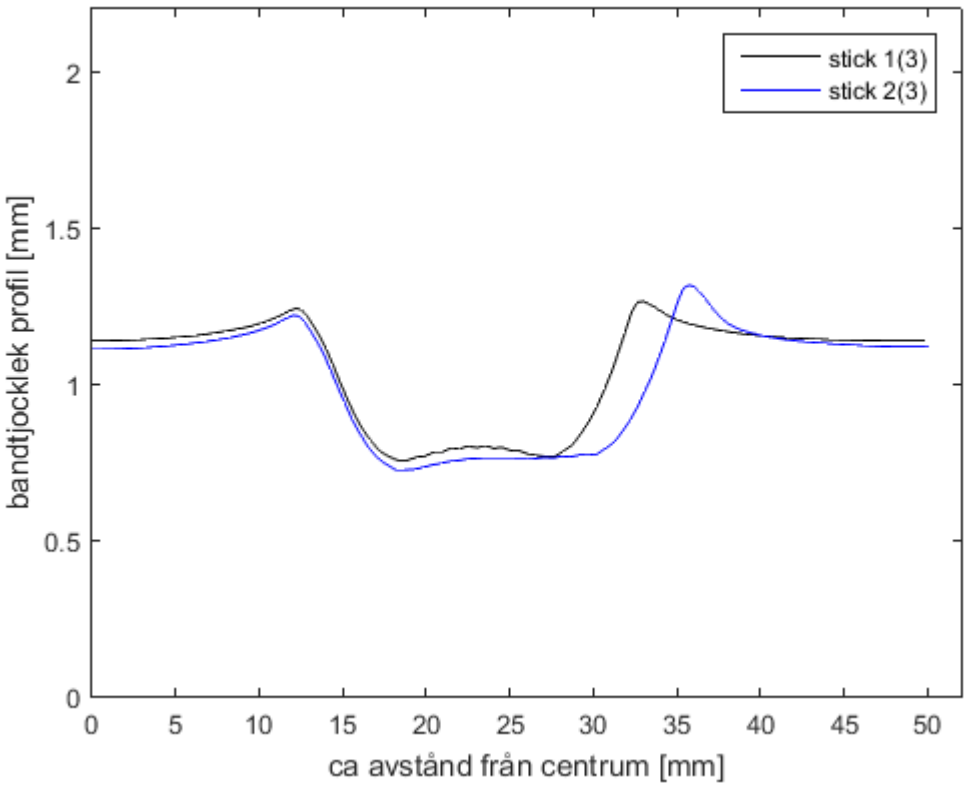


Figur 55 Tjockleksprofil efter stick 1(profil 3). Halva bandtjockleken.

Valskraften beräknades till 730 kN och bandets tjockleksprofill var som synes närmast identisk med profilen beräknad med valsprofil 2.

Stick 2, Profil 2 efter Profil 3

I ett försök att bredda det valsade spåret som erhållits vid valsning av stick 1 med valsprofil 3 gjordes en beräkning för stick 2 med valsprofil 2. Beräknade bandtjockleksprofiler efter stick 1 och det följande stick 2 visas i Figur 56. Som framgår av figuren breddas det valsade spåret samtidigt som bandet överlag blir aningen tunnare. Den tjockare åsen utanför spåret mot bandets kant blir något högre än efter stick 1.

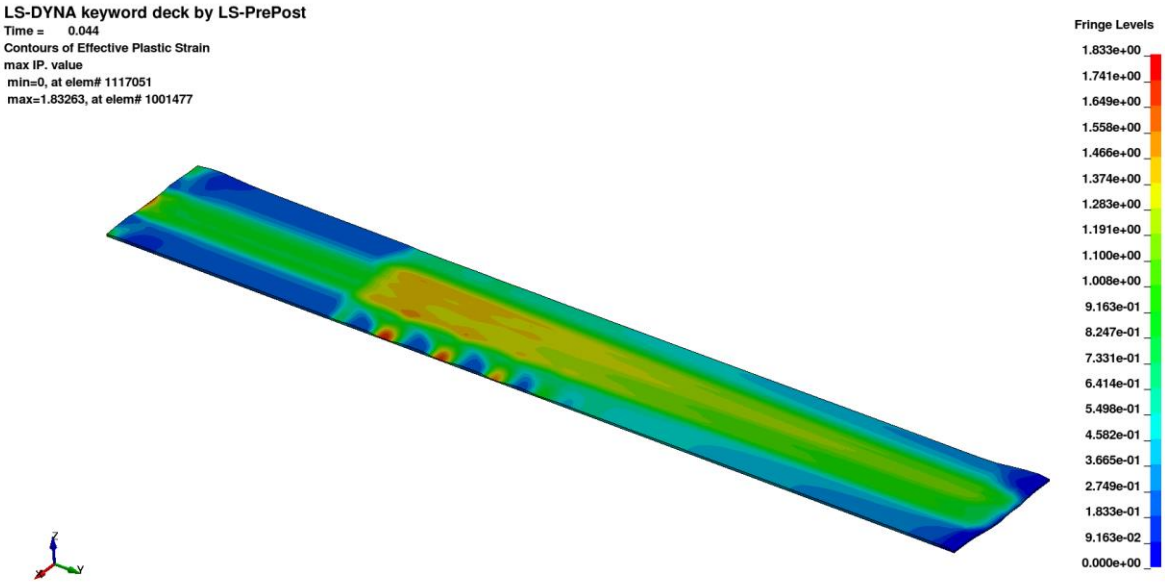


Figur 56 Tjockleksprofil efter stick 2(profil 2). Halva bandtjockleken.

Stick 3, Profil 1 efter Profil 2 och 3

Ytterligar beräkningar gjordes för ett tredje stick på bandet där valsprofil 1 användes. I detta tredje stick uppstår plastiska töjningar vid bandets centrum. Detta uppstår då sidorna förlängs och sträcker mittpartiet. Bandets beräknade bredd minskade i stick ett och två men i tredje sticket ökar bredden något men förblir smalare än ursprunglig bandbredd.

Beräkningarna visar också på någon typ av instabilitet så att ofysikaliska oscillationer i plastiska töjningar uppträder en bit in i beräkningen Vilket framgår av Figur 57.



Figur 57 Beräknade plastiska töjningar i stick 3(profil 1).

Slutsatserför Gestamp-profiler

Beräkningarna visade att det är möjligt att pariellt valsa ned tjockleken på delar av ett bandtvärsnitt så att det blir väsentligt tunnare än delar av tvärsnittet som inte valsas.

Materialet som valsas omfördelas på två sätt. Dels kan det under rätta förhållanden flyta ut i breddriktningen så att bandet so helhet blir bredare, dels flyter det ut vid sidan av det valsade spåret så att bandet där lokalt blir tjockare än den ovalsade delen av bandet. Resultaten tyder på att ju smalare spår som valsas desto större blir den bredande komponenten. Ett bredare spår gör att det valsade partiet i stället förlängs och ”drar med sig ” de ovalsade partierna så att de också förlängs och blir tunnare samtidigt som bandet som helhet blir smalare.

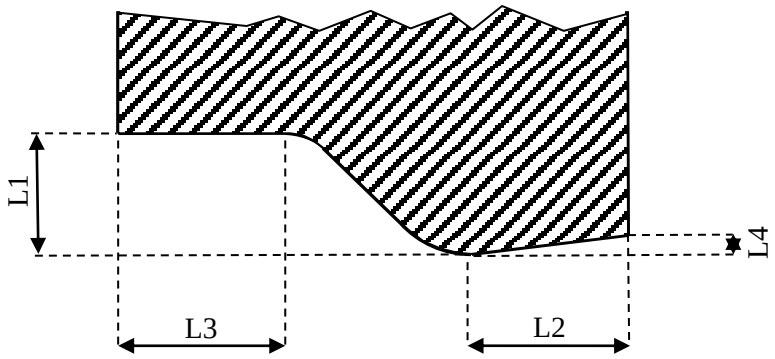
Resultaten av de genomförda beräkningarna ledde till slutsatsen att det inte skulle gå att med ett rimligt antal stick nå den av Gestamp önskade bandtjockleksprofilen. Det skulle krävas så många par valsar att valsningsförsöken inte skulle kunna genomföras inom det befintliga projektets ramar.

GKN Profil

Materialet som används i den av GKN önskade profilen är ett väsentligt dyrare material och tillämpningen i flygmotorer gör att möjliga viktbesparingar har större potential. Därför beslöts att

fortsätta arbetet med beräkningar för en ny profil åt GKN. Avsikten var att komma fram till ett valsningsfall som skulle gå att verifiera i Swerea MEFOS pilotvalsverk.

Målet med beräkningarna har varit att hitta en profil på valsarna som maximerar bredningen av bandet vid reduktion av tvärsnittet. För att modellera valsarnas profil har valsgapets geometri parametriserats, se Figur 58**.**



Figur 58 valsgapets parametrisering

Geometrimåtten L1-L4 har sedan varierats för att maximera töjningskvoten $\sigma_{tvärs}$/ $\sigma_{längs}$.

Ett stort antal variationer av valsprofilen har testats men det som visat sig fungera bäst är en profilerad vals med taperat avslut dvs med ett positivt värde på parametern L4, i Figur 58.

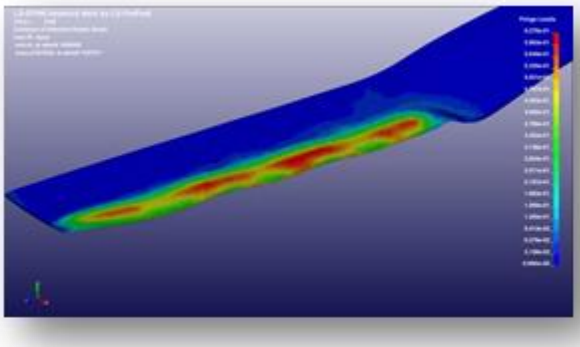
I Figur 59-62 ses resultatet från beräkningar av en valsning i två stick. Värden på parametrarna som använts är:

L1=25%(reduktion)

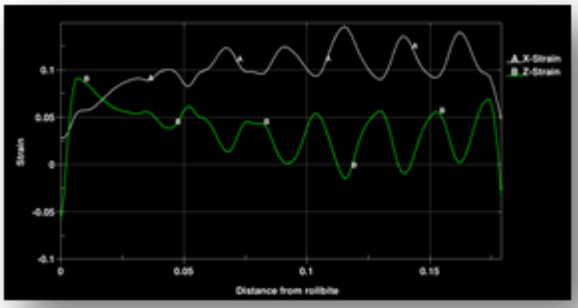
L2=15mm

L3=40mm

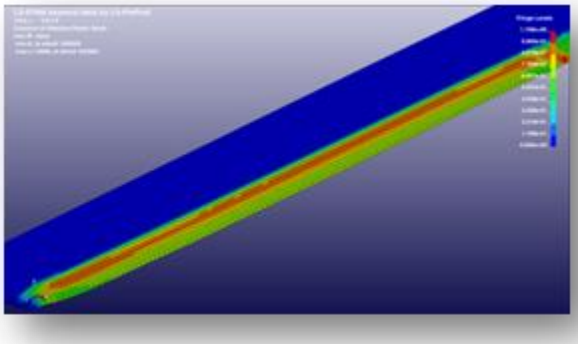
L4=0.15mm



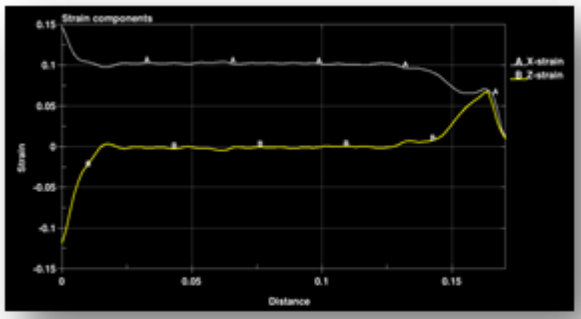
Figur 59 Stick 1 med dubbeltaperad vals



Figur 60 Töjningskomponenter, X & Z avser tvärs resp. längs bandriktningen.



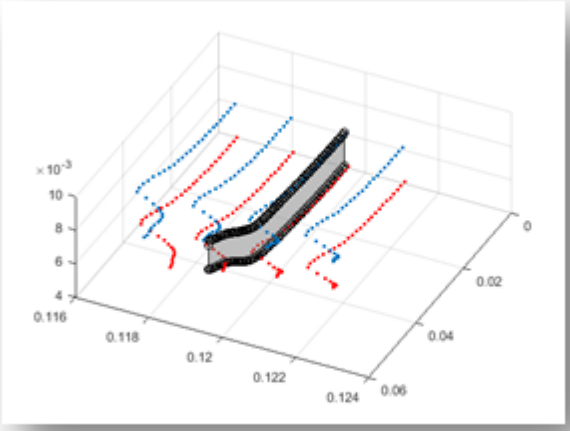
Figur 61 Stick 2 med dubbeltaperad vals



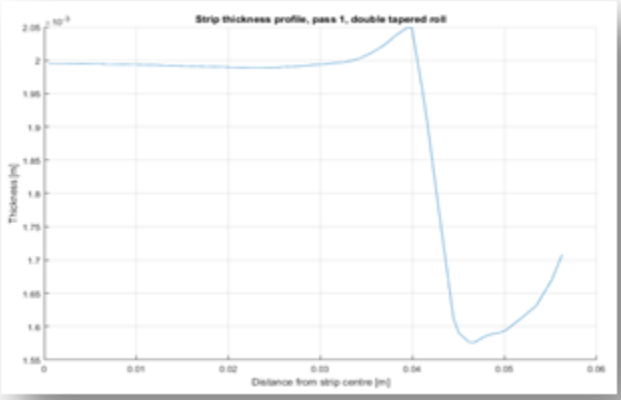
Figur 62 Töjningskomponenter, X & Z avser tvärs resp. längs bandriktningen

Som synes i Figur 60 0ch 61 ger den taperade släppningen en gynnsam profil för en maximerad bredning dvs kvoten mellan $\sigma_{tvärs}/\sigma_{längs}$.

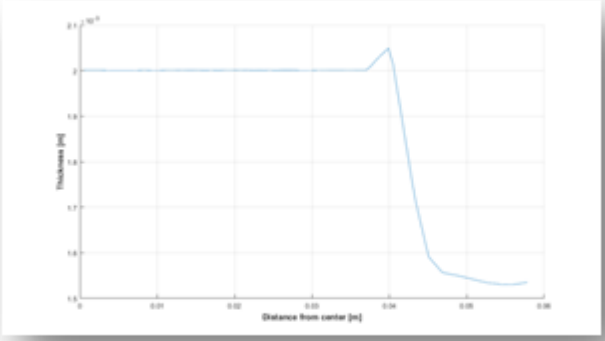
För att extrahera bandets tvärsnittsprofil från nodpositionerna måste dessa projiceras på ett plan, i detta fall med normal i Z-riktning enligt det koordinatsystem som används. Se Figur 63-65.



Figur 63 Projicerad bandprofil från nodkoordinater



Figur 64 Projicerad bandprofil som xy-plot, efter stick 1



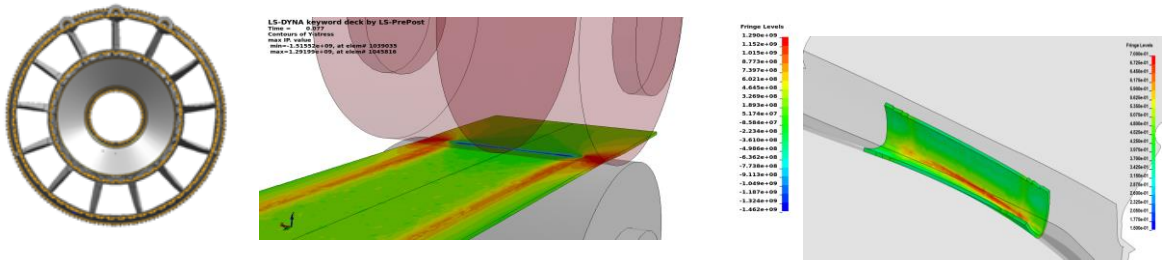
Figur 65 Projicerad bandprofil som xy-plot, efter stick 2

Resultaten från dessa beräkningar var så lovande att pilotvalsningar planerades och genomfördes med beräkningsgeometrierna som underlag. Resultaten från pilotvalsningarna redovisas ovan i kapitel 5.1

5.3 Formning

Den nickelbaserade superlegeringen 718 används ofta till komponenter i flygmotorer där driftstemperaturen är hög. Vissa motorkomponenter tillverkas från plåtmaterial genom en serie av tillverkningsmetoder som involverar t.ex. valsning, efterföljande formning, svetsning och värmebehandling. Plåt i legering 718 uppvisar riktningsberoende sk. snisotropa egenskaper. Detta innebär att de mekaniska egenskaperna varierar i olika riktningar i förhållande till plåtens valsriktning.

I detta projekt studeras profilvalsning och efterföljande formning både experimentellt och genom datorsimuleringar s.k. finita element analyser (FEA). Valsningsprocessen syftar till att skapa en variabel tjockleksfördelning över tvärsnittet i syfte att kunna tillverka detaljer med låg vikt på ett effektivt sätt. Se exempel på tvärsnitt och detaljer i Figur 66.

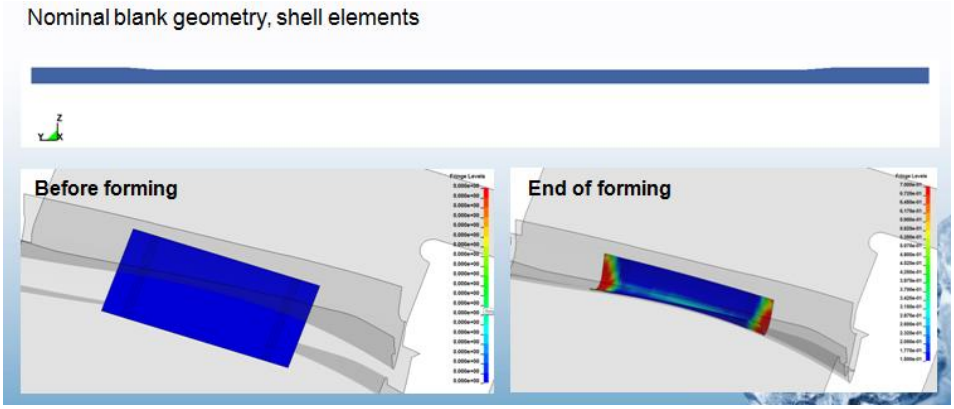


Figur 66 Flygmotorkomponent, valsning med tunnare sektioner i plåtens ytterkanter (Swerea MEFOS) samt efterföljande formning av lättviktsdetalj (Luleå tekniska universitet).

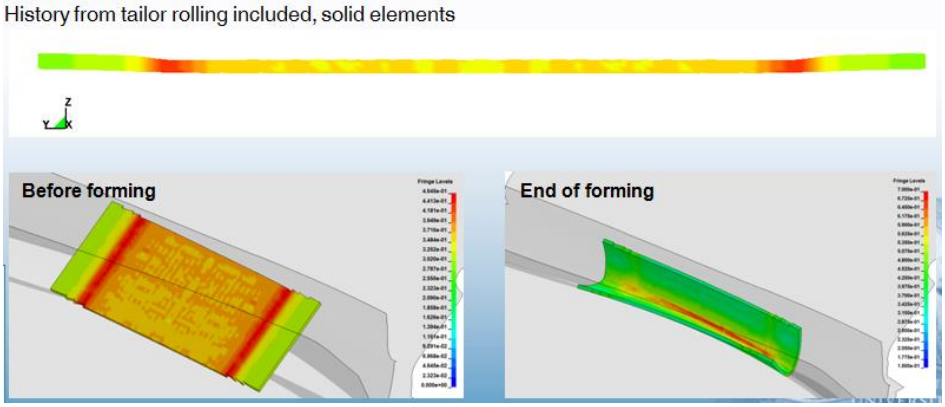
Denna del av projektet studerar efterföljande plåtformning. FE-analyser av en bockningsprocess har studerats där historiken från valsningsprocessen inkluderats. Den valsade plåten innehar i detta fall en tunnare mittsektion. Med denna metod importeras sluttillståndet efter valsning såsom geometri, restspänningstillstånd och historievariabler och används som starttillstånd vid formningsprocessen. Valsningsberäkningen görs med solidelement och en isotrop materialmodell. En möjlig nackdel är att materialets riktningsberoende då inte tas hänsyn till.

En alternativ metod är att utesluta viss historik från valsningen genom att använda skalelement där en anisotrop materialmodell tillämpas. I detta fall kan den nominella profilvalsade geometrin användas genom att tilldela skalelementet olika tjocklek. Nackdelen är att restspänningstillståndet och historievariabler inte förs vidare in i den efterföljande formningsprocessen. Se exempel i Figur 67 och 68 från konferenspresentationen [2]. Beräkningarna visar på viss skillnad i predikterad återfjädring. Dock inkluderar denna studie ingen experimentell validering.

I projektet studeras också en formningsprocess sk. sträck-pressning. I detta fall använda profilvalsad plåt från MEFOS där plåtremsorna har en tunnare sektion i plåtens ytterkant.

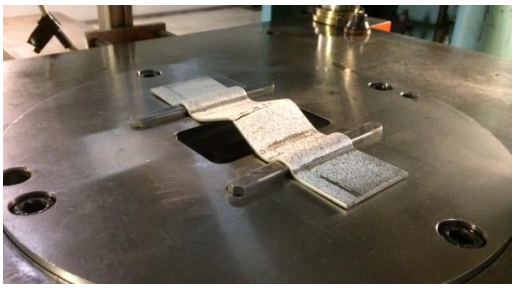


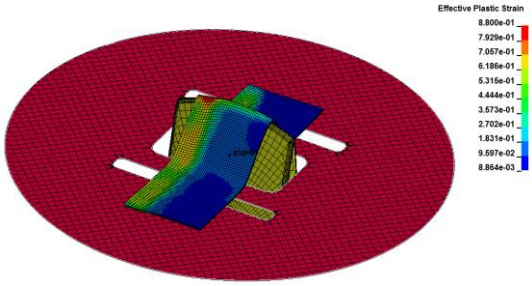
Figur 67 FE-modell av bockningen med skalelement, vid start och slut av formningsprocessen. Effektiv plastisk töjning.



Figur 68 FE-modell av bockningen med solidelement, vid start och slut av formningsprocessen. Effektiv plastisk töjning.

Tester visar att plåten vill brista i övergången mellan tjock och tunnare plåt. Detta är väntat då materialet deformationshårdnat och i ytan tillåtits uppnå höga töjningsnivåer. En värmebehandling skulle kunna återhämta materialet. Även FE-analyser, där historiken förts över från valsningsberäkningen, visar att störst töjning uppstår i övergången mellan tjockare och tunnare material. Se Figur 69. Framtagning av vetenskaplig publikation planeras för publicering i skickas in till internationell vetenskaplig tidskrift.





Figur 69 Sträck-pressningstest utfört vid Swerea IVF I Olofström och FE-analys av formningsprocessen utförd vid Luleå tekniska universitet.

Arbetet i detta arbetspaket beskrivs utförligare i [3].

5.4 AP4 – Industrivalsning

Duroc innehade ett valsverk med förhållandevis låg nyttjandegrad där det hade varit möjligt att genomföra industriell valsning av produkter som utvecklats under projektets gång. För att vara redo att genomföra valsningsförsöken när underlag fanns till hands gjordes nödvändigt förberedelsearbete samt att nödvändigt försöksmaterial i form av valsar införskaffades.

Omständigheter som redovisats i kapitel 4.4 gjorde att valsningarna inte kunde genomföras. Ingen alternativ industripart som kunde genomföra försöken hittades med det korta varslet så projektgruppen beslutade att genomföra försök hos MEFOS och låta dem ligga till grund för projektets slutsatser och resultat.

6 Diskussion

I projektet har det varit ovärderligt att kunna kombinera tekniska beräkningar med praktiska försök. Om samma undersökningar skulle ha genomförts med enbart praktiska försök skulle det ha blivit oerhört kostsamt både i arbets- och maskinbeläggningskostnader såväl som materialkostnader. Samtidigt är det nödvändigt att genomföra praktiska försök för att verifiera att beräkningsmetoderna räknar med rätt förutsättningar. Projektet illustrerar väll hur utveckling kan drivas genom att varva beräkningar och praktiska försök.

Tekniska beräkningar visar att det är möjligt att, utgående från jämntjocka metallband, valsa banden så att banden erhåller en varierande tjocklek över bredden. Resultaten visar dock att detta inte går att åstadkomma i ett enda bearbetningssteg utan måste ske i små steg så att materialet flyter i den riktning som önskas.

De tekniska beräkningarna har i viss omfattning verifierats med pilotvalsningsförsök där ett jämntjockt band valsats så att det fått tunnare partier nära bandkanterna samtidigt som bandet blivit bredare.

Försök med formning av prover från det pilotvalsade bandet visar också att de på så sätt valsade banden går att processa vidare mot den önskade produkten.

Arbetet visar dock att konceptet inte är färdigt för industriell tillämpning utan att vidare teknisk utveckling är nödvändig. Dels måste valsningskonceptet vidareutvecklas mot en rationell produktion, dels måste metoder för att bibehålla eller återställa materialegenskaper till påföljande formning utvecklas.

7 Implementeringsplan

Tillverkningskonceptet är i befintligt utvecklingsskede inte möjligt att tillämpa i industriell skala. Som nämnts måste konceptet utvecklas vidare. I och med att detta projekt avslutas ställs åstadkommen ”know-how” till projektparternas förfogande för vidare utveckling i egen regi eller i ett konsortium med egen eller offentlig finansiering. Villkoren för detta regleras i befintligt projektavtal.

Efter överenskommelse med parterna kommer delar av resultaten att publiceras i vetenskapliga tidskrifter eller på konferenser.

Projektet kommer också att redovisas enligt Vinnova’s och SIP LIGHTer’s villkor.

8 Tack

Projektet har kunnat genomföras med benäget bistånd från SIP LIGHTer och dess finansiärer, i detta fall Vinnova. Tack även till deltagande parter för engagemang och givande tekniska råd och synpunkter.

9 Referenser

[1] Valsning av band med olika tjocklek I breddled, Levén J., Svensson J., *Swerea MEFOS rapport MEF15019K, 25 Mars, 2015.*

[2] Modeling and simulation of a manufacturing process chain including tailor rolling, forming and welding in alloy 718, Odenberger E-L, Svensson J, *22nd International Symposium on Plasticity and Its Current Applications, Keauhou Bay, Hawaii, USA, 3-9 January, 2016, pages 217-219.*

[3] Forming of profile-rolled blanks of alloy 718, Odenberger E-L., *Swerea IVF Project report 403272, 26 January, 2018.*