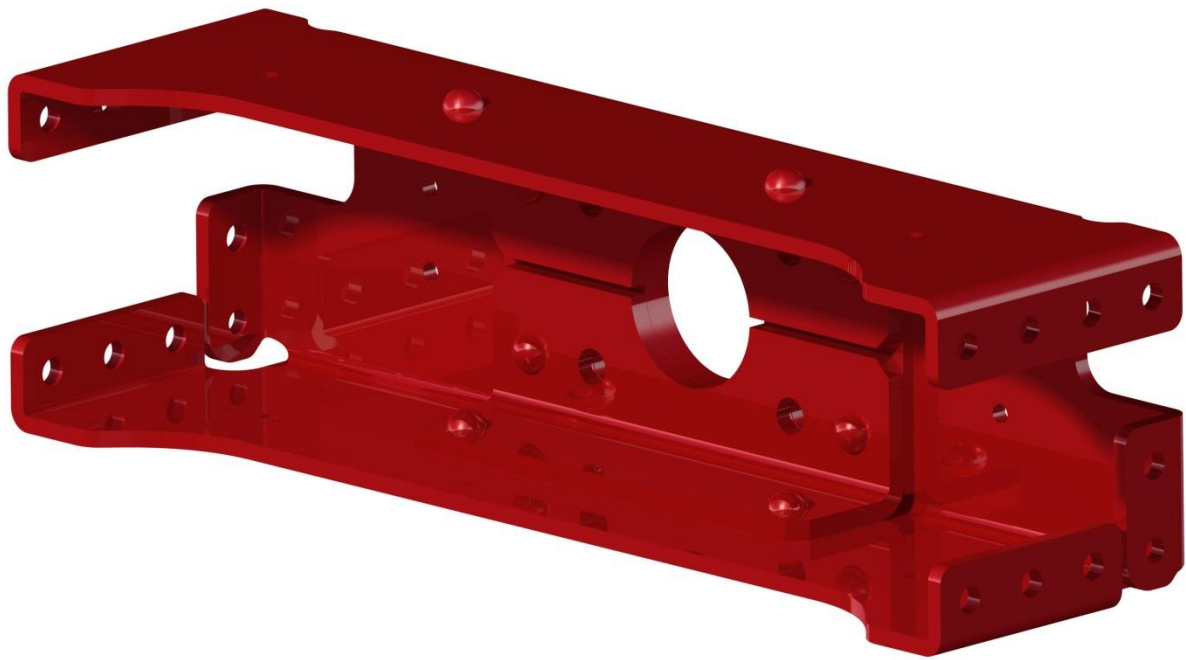


CHALMERS



Utredning av utmattningspåverkande faktorer i en dragbalkskonstruktion

Investigation of fatigue factors in a draw beam construction

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom Maskiningenjörsprogrammet

Linus Haglund
Simon Folgerö

Institutionen för Material- och tillverkningsteknik
Avdelningen för Avancerad oförstörande provning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sweden, 2015

Examinator: Gert Persson. Examensarbete No. 134/2015

FÖRORD

Denna rapport behandlar ett examensarbete, vilket är en avslutande del av studierna på maskiningenjörsprogrammet på Chalmers tekniska högskola i Göteborg. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och är utfört vid institutionen för Material- och tillverkningsteknik. Arbetet har genomförts på uppdrag av VBG Group i Vänersborg.

Vi vill rikta ett stort tack till Miso Kalliokorpi, vår handledare på VBG Group, vars stöd och support gjort arbetet möjligt. Vi vill också tacka Stefan Johansson, Jörgen Nilsson och Bolennarth Svensson på VBG Group, som bidragit med kunskap och engagemang under arbetets gång.

Till sist vill vi tacka vår handledare Gert Persson, Docent och Viceprefekt vid Material- och tillverkningsteknik, för stort engagemang och god vägledning, samt Kennet Hamberg, universitetslektor vid Material- och tillverkningsteknik, för hjälp och rådgivning i laboratoriet.

Göteborg, maj 2015

Linus Haglund | Simon Folgerö

SAMMANFATTNING

VBG Group i Vänersborg är ett tillverkande företag inom industrisektorn automotive som utvecklar, tillverkar och säljer kopplingsanordningar mellan lastbil och släp, inklusive lastbilens dragbalk, vilken är gränssnittet mellan lastbil och koppling. VBG:s produkter är i stor utsträckning styrda av lagstiftning som sätter krav på bland annat utmattningsprovning. I avsikt att effektivisera den dyra och tidskrävande provningsprocessen är VBG nyfikna på möjliga åtgärder för att bättre kunna förutsäga en produkts provresultat. Detta arbete fokuserar främst på att undersöka hur faktorer från tillverkningsprocessen påverkar dragbalkens utmattningshållfasthet.

Inledningsvis sammanställdes och kategoriserades resultatet från en mängd tidigare genomförda utmattningsprov. Detta gjordes för att upptäcka eventuella mönster i provresultaten samt för att precisera och konkretisera problemställningen. FEM-modeller av extra intressanta utmattningsprover analyserades för att undersöka samband mellan nominella spänningar och provresultat. Undersökningen visade att samband i viss mån existerar, dock att det krävs vidare studier av faktorer som påverkar framgången i analysarbetet.

De tillverkningsprocesser som ansetts ha störst inverkan på utmattningshållfastheten var laserskärning och plåtbockning. För att utreda hur dessa processer påverkat dragbalkens utmattningshållfasthet kontrollerades intressanta områden av balken, bland annat på mikrostrukturell nivå. Den extrema värmeutvecklingen i samband med laserskärningen resulterade i en martensitbildning vilken påtagligt påverkar materialets hårdhet och styrka. I kombination med den relativt grova ytjämnheten kan detta mycket väl reducera utmattningshållfastheten. Den plastiska deformationen orsakad av plåtbockningen utgör en deformationshårdning som tillika påverkar materialets egenskaper. Bearbetningen orsakar även en sprickbildning, vilket bör ses som en kritisk defekt ur utmattningssynpunkt.

ABSTRACT

VBG Group in Vänersborg is a manufacturing company in the industrial sector automotive which develops, manufactures and sells coupling devices between truck and trailer, including the truck's draw beam, which is the interface between the truck and the coupling. VBG's products are widely controlled by legislation that sets requirements including fatigue testing. In order to rationalize the costly and time-consuming testing process, VBG is curious about possible measures to better predict a product's test results. This work focuses on examining how factors from the production process affect the draw beams fatigue strength.

Initially, the results from a variety of previously conducted fatigue tests were compiled and categorized. This was done to detect any patterns in the test results as well as to clarify and concretize the problem. FEM-models of particularly interesting fatigue samples were analyzed to examine the relationship between nominal stress and test results. The investigation revealed that this relationship to some extent exists, however, that it requires further studies of factors affecting the success of the analysis.

The manufacturing processes considered to have the greatest impact on the fatigue strength were laser cutting and sheet metal bending. To investigate how these processes impact the draw beam's fatigue strength, interesting areas of the beam were investigated on a micro-structural level. The extreme heat development by the laser cutting process resulted in a martensitic area, which significantly affects the material's hardness and strength. In combination with the relatively rough surface, the fatigue strength may very well be reduced. The plastic deformation due to the sheet metal bending induces a work hardening which also affects the material properties. The severe deformation of the bending zone also causes a distinct cracking, which should be considered as a critical defect in a fatigue point of view. This thesis is written in Swedish.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING	1
1.1. Om VBG Group.....	1
1.2. Bakgrund	1
1.3. Syfte.....	1
1.4. Avgränsningar	1
1.5. Precisering av frågeställningen.....	1
2. TEORETISK REFERENSRAM	2
2.1. Dragbalken.....	2
2.1.1. Material och tillverkning.....	2
2.2. Fas och kristallstruktur	3
2.3. Laserskärning.....	4
2.4. Plåtbockning	5
2.5. Utmattning	5
2.6. Utmattningsprovet	8
3. METOD.....	11
4. DATAINSAMLING	12
5. FEM-ANALYS	13
5.1. Dragbalk A	15
5.2. Dragbalk B.....	17
6. UNDERSÖKNING TILLVERKNINGSPROCESSENS MATERIALPÅVERKAN.....	19
6.1. Påverkan från bockning	20
6.1.1. Mikrostrukturell påverkan från bockning	20
6.1.2. Avvikande geometri på grund av bockning	25
6.2. Påverkan från laserskärning.....	26
6.2.1. Mikrostrukturell påverkan från laserskärning.....	26
6.2.2. Ytjämnhet.....	27
7. SLUTSATS OCH REKOMENDATIONER	29
7.1. Förslag på fortsatt arbete	29
REFERENSER.....	31
BILAGA 1	
BILAGA 2	
BILAGA 3	

BILAGA 4

BILAGA 5

BILAGA 6

1. INLEDNING

I detta kapitel ges en förklaring till projektets bakgrund och syfte. Projektets avgränsningar samt en precisering av frågeställningen klargörs också här.

1.1. Om VBG Group

År 1951 grundas företaget Vänersborgskopplingen och börjar samma år tillverka en nyutvecklad och patenterad lastbilskoppling. Idag består VBG Group av tre divisioner - *VBG Truck Equipment*, *Edscha Trailer Systems* och *Ringfeder Power Transmission*. *VBG Truck Equipment* utvecklar, tillverkar och säljer kopplingsutrustning till en global marknad, däribland samtliga europeiska lastbilstillverkare. Med sina två varumärken, *VBG* och *Ringfeder*, står *VBG Truck Equipment* för mer än 50 % av världsmarknaden.

1.2. Bakgrund

VBG:s produkter är i stor utsträckning styrda av lagstiftning som sätter krav på bland annat utmattningsprovning. Den provning som lagstiftningen kräver är lastcykling med konstant amplitud. Idag typprovar VBG alla produkter med denna typ av lastcykling, med varierande resultat. För att öka effektiviteten vid provning och lättare förutse brister i konstruktionen är det av stor vikt att kunna utföra hållfasthetsberäkningar som med stor pålitlighet beskriver verkligheten.

Inom branschen syns även trender till att beräkningsbaserade provgodkännanden kan komma att bli mer accepterat, vilket ger ett ännu större behov av tillförlitliga beräkningsmetoder.

1.3. Syfte

Som ett steg i en strävan mot en effektivare utvecklingsprocess är uppdragets syfte att identifiera och undersöka viktiga faktorer från tillverkningsprocessen som påverkar framgången av analysarbete och hållfasthetsberäkningar. VBG är speciellt nyfikna på hur geometriavvikelse, plastisk bearbetning i form av bockning, samt laserskärning påverkar dragbalkens utmattningshållfasthet och därigenom tillförlitligheten av beräkningsarbetet. Resultatet av detta arbete skulle kunna bidra VBG med kunskap och förståelse kring hur de kan anpassa deras utmattningsberäkningar för att på ett effektivare sätt förutsäga det fysiska utmattningsprovets utfall. Arbetet skulle även kunna ligga till grund till en motivering av ändringar i produktionsprocessen.

1.4. Avgränsningar

Projektet avgränsas till att undersöka en befintlig komponent i kopplingssystemet, dragbalken. Arbetet avser att hitta mönster och genomgående trender i olika modeller och versioner av nämnd komponent, inte att i detalj studera en viss balkkonfiguration.

1.5. Precisering av frågeställningen

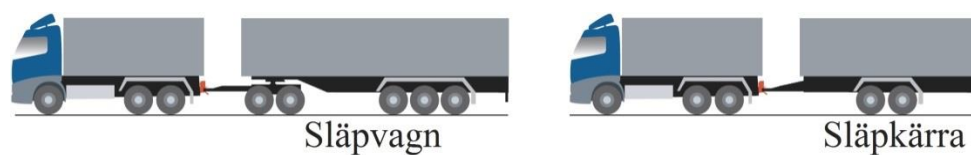
- Hur påverkar avvikelser från nominell geometri dragbalkens utmattningshållfasthet?
- Hur påverkar plastisk bearbetning i samband med bockning utmattningshållfastheten?
- Hur påverkar laserskärningsprocessen utmattningshållfastheten?
- Om aktuellt, hur påverkar andra betydelsefulla faktorer utmattningshållfastheten?

2. TEORETISK REFERENSRAM

I detta kapitel beskrivs den teori som används i projektet.

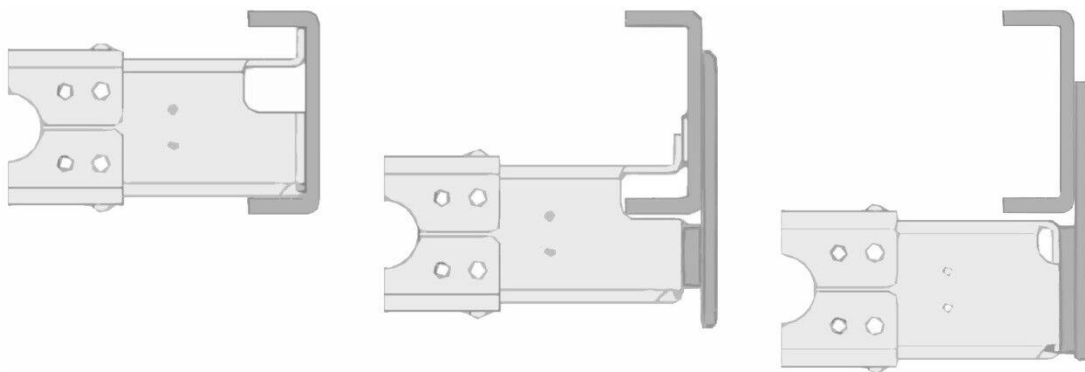
2.1. Dragbalken

Dragbalken är en tvärgående balk placerad längst bak i lastbilsramen i vilken kopplingen monteras. Dragbalken är alltså gränssnittet mellan lastbil och koppling. Det finns en mängd olika varianter och klassificeringar av dragbalkar för att passa olika lastbilsmodeller och olika typer av släp. Dras en släpvagn kommer koppling och dragbalk enbart utsättas för horisontella krafter vid till exempel en inbromsning. Dras istället en släpkärra uppkommer både horisontella och vertikala krafter, se fig. 2.1.



Figur 2.1 Släpvagn och släpkärra

Beroende på önskad kopplingshöjd kan dragbalken monteras på tre olika sätt i förhållande till lastbilsramen: centralt monterad, halvt underliggande och underliggande. I de två senare montage är balken helt eller delvis monterad i en gavelsats som i sin tur monteras i lastbilsramen, se figur 2.2. De mörkare delarna är mellanlägg, gavelsats och lastbilsram, och tillhör följaktligen inte själva dragbalken.



Figur 2.2 Från vänster: centralt, halvt underliggande samt underliggande montage

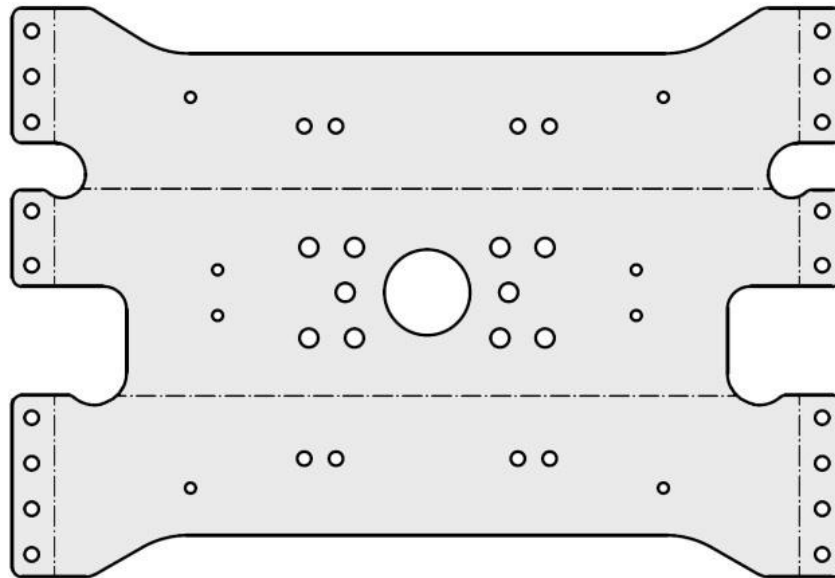
2.1.1. Material och tillverkning

Dragbalken är tillverkad i 10 mm tjock Domex 355, ett varmvalsat stål från SSAB, främst avsett för kallbearbetning [1]. Minsta sträckgränsen är 355 MPa och brottgränsen ligger mellan 430-550 MPa. Stålets kemiska sammansättning redogörs i tabell 2.1.

Tabell 2.1 Kemisk sammansättning, Domex 355

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Nb%	V%	Ti%
max	max	max	max	max	max	max	max	max
0,10	0,03	0,50	0,025	0,010	0,015	0,09	0,20	0,15

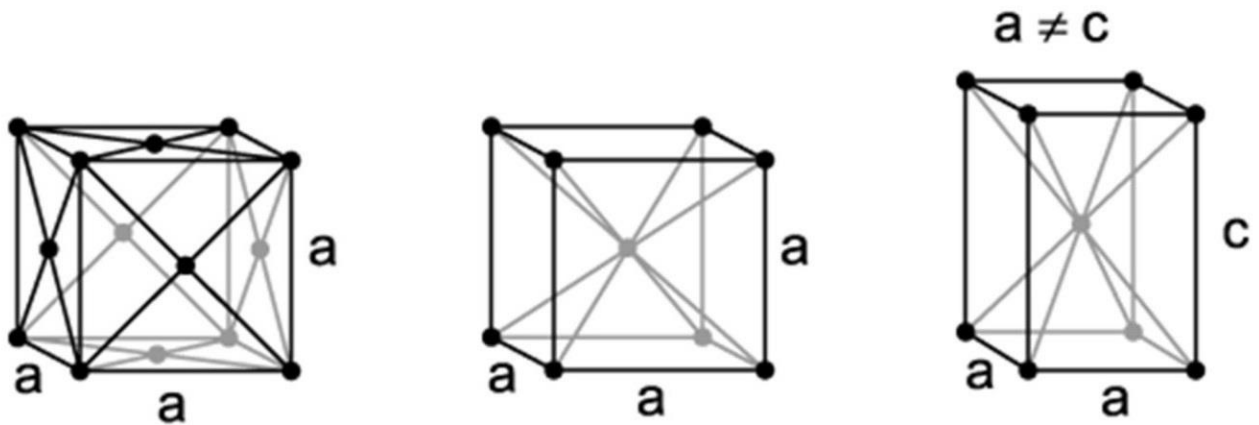
Tillverkningsprocessen inleds med att balkens kontur och hål skärs ut i en laserskärare, enligt exemplet i figur 2.3. Balkens kontur skärs ut från plåten med avsikt att minimera spill, hänsyn tas alltså inte till plåtens valsriktning. Den utskurna plåten bockas sedan vinkelrätt enligt de streckade linjerna i figuren till balkens slutgiltiga form. På grund av utrymmesbrist bockas de skarpaste bockarna med en radie av 3 mm, vilket anses som kraftigt för aktuell plåttjocklek. I bilaga 1 redovisas SSAB:s datablad med bland annat rekommendationer på minsta bockradie. Balken efterbehandlas sedan med stålkuleblästring, zink-mangan-fosfatering, ED-behandling och pulverlackering för att öka korrosions- och nötningsmotståndet.



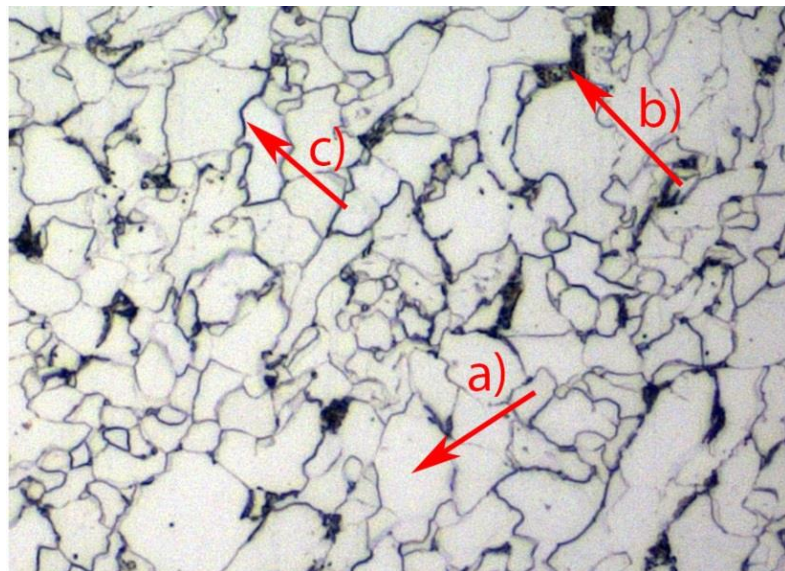
Figur 2.3 Dragbalkens kontur efter laserskärning

2.2. Fas och kristallstruktur

I rumstemperatur innehåller stål med aktuell kolhalt, 0,10 %, en blandning av mestadels ferrit och en liten mängd perlit [2], se figur 2.5. Perlit är en mikrostruktur bestående av ferrit och cementit. Då ferrit praktiskt taget inte kan lösa något kol, är allt kol löst i perliten. Hettas stålet upp till ca 900 °C övergår all ferrit och cementit till austenit, vilket är en fas uppbyggd av en ytcentrerad kubisk kristallstruktur (FCC), se figur 2.4. Vid långsam nedkyllning återgår stålet till den ursprungliga fördelningen av ferrit och perlit. Kyls stålet däremot hastigt ned från austenitfasen hinner kolatomerna inte diffundera och bilda perlit i tillräckligt hög grad, utan blir tvångslösta i ferriten och bildar då strukturen martensit. De tvångslösta kolatomerna resulterar i att ferritens annars rymdcentrerade kubiska kristallstruktur (BCC) deformeras till en rymdcentrerad tetragonal kristallstruktur (BCT). Då denna kristalldeformation medför en relativ volymändring av kristallen uppstår kraftiga inre spänningar. Dessa inre spänningar utgör ett stort hinder för dislokationer vilket gör martensiten stark, hård och spröd.



Figur 2.4 Kristallstruktur. Från vänster: FCC, BCC, BCT



- a) Ferrit
- b) Perlit
- c) Korngräns

Figur 2.5 Domex 355 mikrostruktur

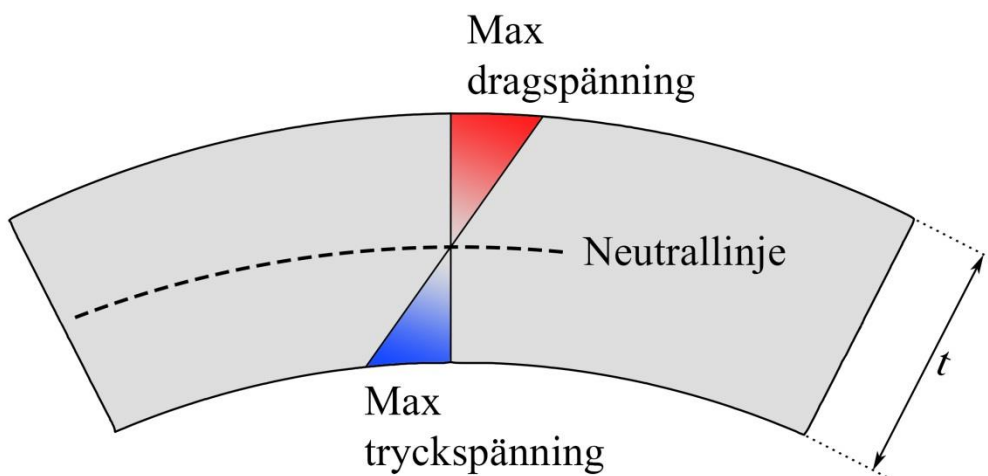
2.3. Laserskärning

Laserskärning går ut på att låta laserljus fokuseras på en mycket liten yta, ned till 0,1 mm i diameter, och därigenom hetta upp arbetsstycket till så höga temperaturer att materialet smälter och förångas [3]. Den höga effekttätheten uppnås då laserljusets strålar är i det närmaste parallella och i fas med varandra. Effekten på en typisk laserskärare i industrin ligger på ca 5 kW, vilket ger möjlighet att skära låglegerade stål med en tjocklek upp till 15mm. Kvalitén i form av ytjämnhet, vinkelräthet och mängd värmepåverkat material vid skärnittet beror på flertalet faktorer där material, skärdjup, effekt och energifördelning är bland de viktigaste [4].

2.4. Plåtbockning

Bockning är en vanlig bearbetningsprocess för att förändra en plåts geometri. Under bockningsförloppet utsätts materialet för både drag- och tryckspänningar över dess sträckgräns, vilket medför en plastisk deformation i bockzonen. Detta gör att kornen som utsätts för dragspänning dras ut och elongeras, medan kornen som utsätts för tryckspänning pressas samman och krossas [3]. Enligt Hall-Petch ökar styrkan i ett material omvänt proportionellt mot kornstorleken, vilket betyder att en mer deformerad mikrostruktur innebär ett starkare och hårdare material [5].

Den linje i materialet där ingen spänning uppstår och ingen deformation sker kallas neutrallinjen. Neutrallinjens placering beror på olika material- och tillverkningsfaktorer men ligger vanligtvis $0,4 \cdot t$ mätt från bockens innerkant, se figur 2.6.



Figur 2.6 Generell spänningsbild vid rent böjande moment

Flera faktorer påverkar resultatet av en genomförd bockning [6]. Förutom materialets egenskaper är bockradien i förhållande till plåttjockleken den viktigaste. En alltför liten bockradie kan innebära spänningar över brottgränsen, vilket medför skador i materialet. Bockning vinkelrätt mot plåtens valsriktning tillåter ofta en snävare bockradie utan att skada materialet. Ytkvalitén på plåten och dess skurna ytor samt verktygets och maskinens tillstånd är också viktiga faktorer som påverkar slutresultatet.

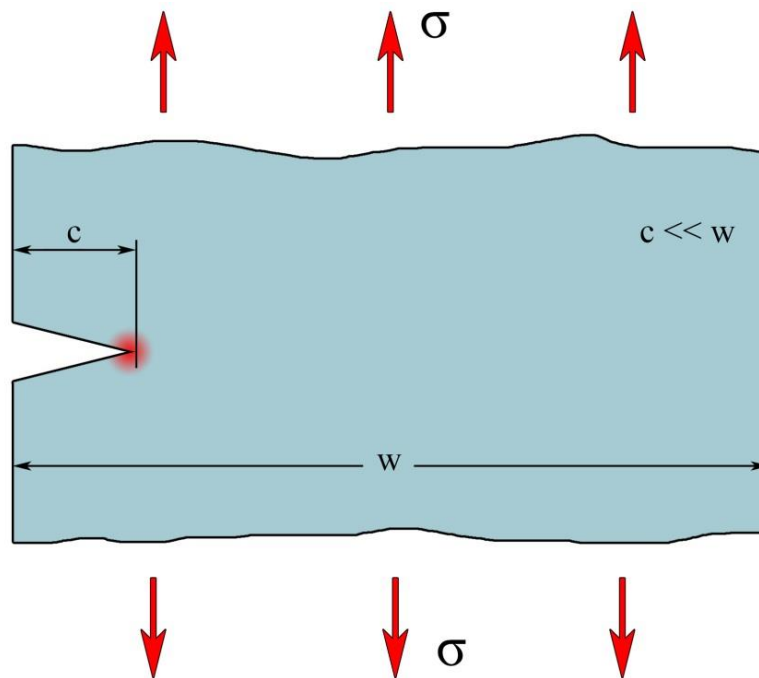
2.5. Utmattning

Fenomenet utmattning uppstår då en komponent utsätts för dynamisk belastning som ger upphov till alternerande spänningar i materialet. Dragspänningar betydligt lägre än materialets sträckgräns kan i slutändan leda till sprickor och brott [7]. En vanlig tumregel är att utmattningsgränsen, maximal tillåten spänning för att undvika utmattning, är ungefär halva brottgränsen. Utmattningsförloppet brukar delas in i tre stadier: sprickinitiering, spricktillväxt och brott. Huvuddelen av förloppet består av sprickinitiering. Tillväxt till brott sker snabbt och uppkommer i slutstadiet av konstruktionens livstid, vilket åskådliggörs av *Paris lag* i diagram 2.1.

Alla typer av diskontinuiteter i en konstruktion eller i ett material, t.ex. skarpa hörn, sprickor eller inneslutna partiklar ger upphov till lokala spänningskoncentrationer och är därigenom möjliga källor till sprickinitiering. Spänningsintensitetsfaktorn, K , används för att uppskatta storleken på uppkommen spänningskoncentration. K kan approximeras med elementarfall beroende av defektgeometri och belastning. Spänningsintensiteten för en liten spricka utsatt för dragande belastning enligt figur 2.7 approximeras med:

$$K = 1,1 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot c} \quad (1)$$

där c är sprickans längd. Detta betyder att spänningsintensiteten växer med ökad belastning och ökad spricklängd.



Figur 2.7 Illustration av spricka med längden c , belastad med spänningen σ

Spänningskoncentrationen ger upphov till en plastisk zon i sprickans spets. Materialets duktilitet avgör hur stor plastisk deformation materialet tillåter innan fortsatt spricktillväxt. Då spänningskoncentrationsintervallet $\Delta K (= K_{\max} - K_{\min})$ ökar med sprickans längd är sambandet mellan spricklängd och sprickans tillväxthastighet tydligt, enligt diagram 2.1 [5].

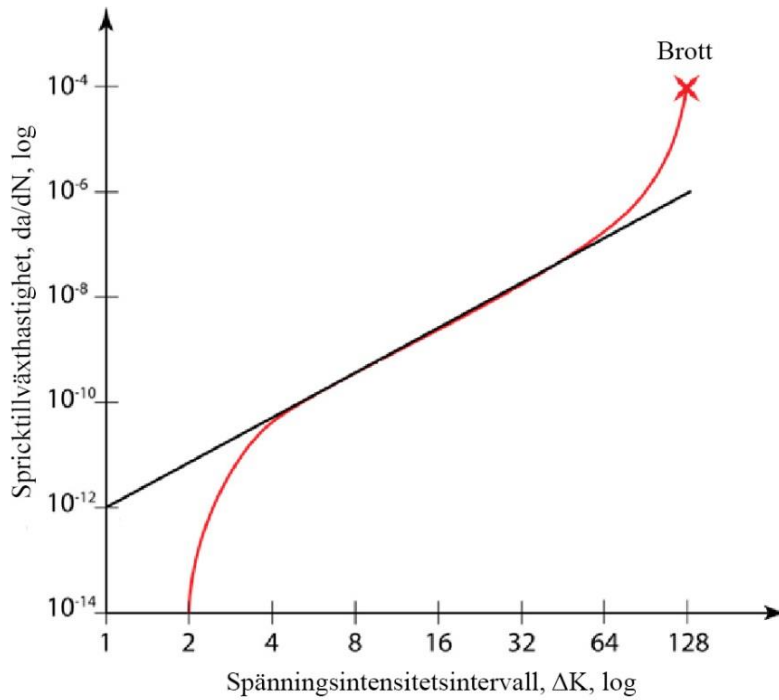
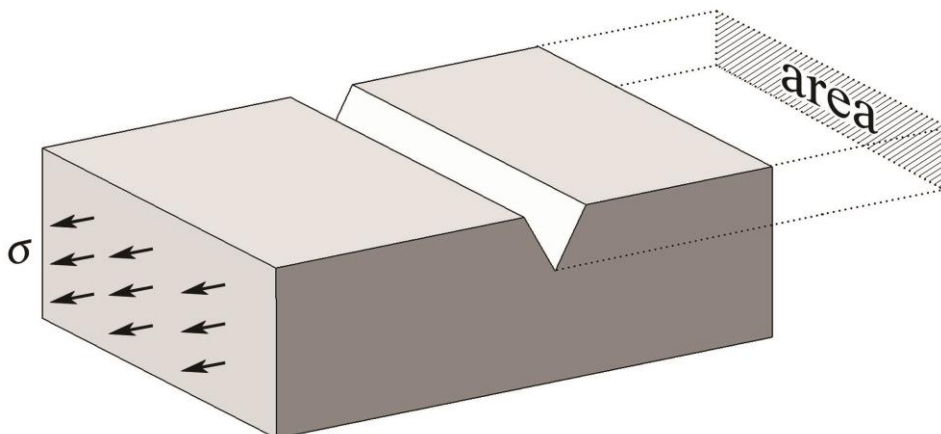


Diagram 2.1 Paris lag för spricktillväxt

Med Murakamis modell fås en lokal approximativ utmattningsgräns som funktion av en ytdefekts storlek:

$$\sigma_w = \frac{1,43 \cdot (HV + 120)}{(\sqrt{\text{area}})^{1/6}} \cdot \left(\frac{1-R}{2}\right)^{0,226 + HV \cdot 10^{-4}} \quad (2)$$

där σ_w är utmattningsgränsen, HV är materialets vickers-hårdhet, R är späningskvoten $\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$ och area är projektionen av defekten vinkelrätt mot huvudspänningens riktning angiven i μm^2 , se figur 2.8.



Figur 2.8 Illustration av ytdefekt och projektionen av dess area vinkelrätt mot huvudspänningen

Ekvationen gör det tydligt att utmattningsgränsen minskar med ökad defektstorlek. [8] Murakamis modell är empiriskt framtagen och har visat sig gälla då \sqrt{area} är mindre än 1000 μm och hårdheten ligger mellan 70 och 720 HV [9]. Modellens felmarginal är $\pm 10\%$.

2.6. Utmattningsprovet

Beroende på typ och klassificering av dragbalk utmattningsprovas varje kombination av balk och gavelnsats för att simulera en lång tids påfrestande bruk. VBG:s provrigg visas i bilaga 6. Efter avslutat prov syns varje balk efter defekter. För att upptäcka sprickor som inte syns med blotta ögat, kontrolleras balken med penetrantprovning. Penetrantprovning är en oförstörande provning och innebär att en lågviskös starkt färgad vätska sprayas över provstycket för att sedan sköljas av. Penetrantvätskan som trängt ned i alla ojämnheter, till exempel porer och sprickor, sköljs inte bort utan lyser igenom och blottlägger defekten. Figur 2.9 visar ett exempel på en spricka synliggjord av penetrantvätskan.



Figur 2.9 Fotografi av spricka efter utmattningsprov, synliggjord med penetrantvätska

För att ett prov ska godkännas ska provet vara helt fritt från dessa, nu synliga, defekter efter två miljoner lastcykler.

En lastcykel ser olika ut beroende på vilken typ av släp balken är avsedd att dra; är balken klassificerad att dra en släpvagn appliceras den rent växlande kraften horisontellt med en konstant amplitud kring 0 N ($R=-1$). Är balken även klassificerad att dra en släpkärra provas balken med ett så kallat tvåledsprov, med både rent växlande horisontell kraft ($R=-1$), samt växlande vertikal kraft kring -10 kN ($-1 < R < 0$). En lastcykel i ett tvåledsprov visas i diagram 2.2. Detta medför en resulterande kraft som definieras enligt:

$$F_{\text{resultant}} = \sqrt{F_{\text{vertikal}}^2 + F_{\text{horisontell}}^2} \quad (3)$$

För att utsätta balken för ett stort antal belastningsfall anbringas de vertikala och horisontella kraftsvängningarna med 2 % frekvensskillnad [10].

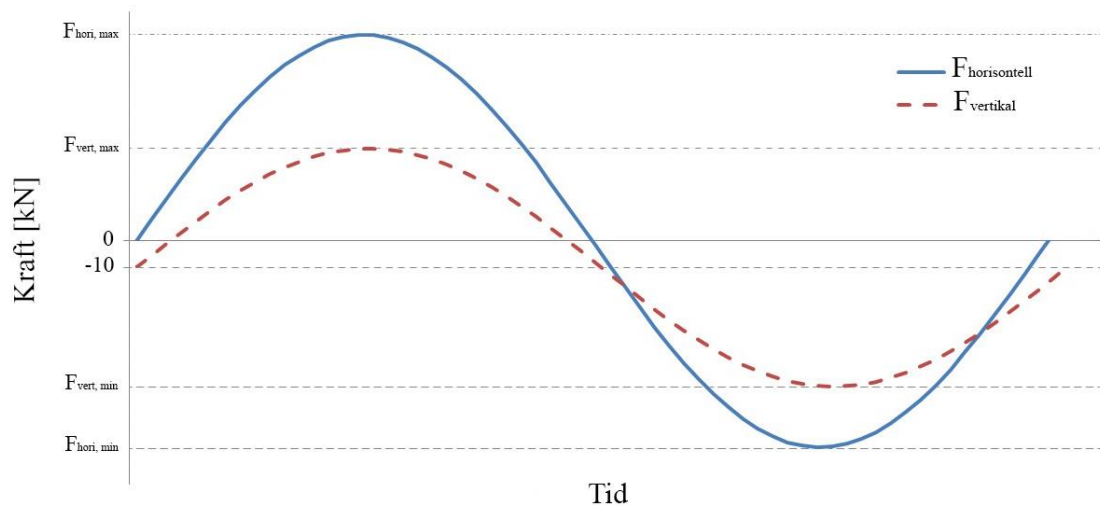


Diagram 2.2 En lastcykel av ett tvåledsprov

Frekvensskillnaden mellan horisontell och vertikal kraft gör att balken utsätts för ett stort antal belastningsfall. Diagram 2.3 demonstrerar samtliga belastningsfall efter 100 lastcykler. Varje punkt på linjen i diagrammet motsvarar ett kommande belastningsfall. Den svarta linjen i diagrammet uppvisar en första lastcykel, med start i (0,-10).

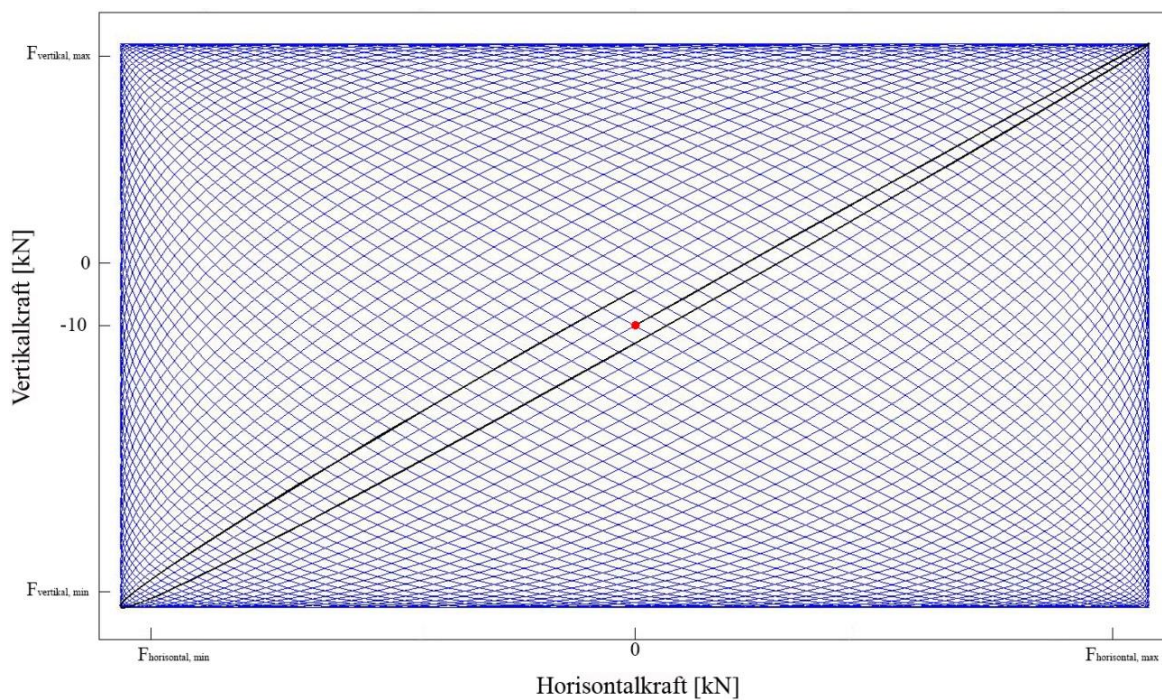
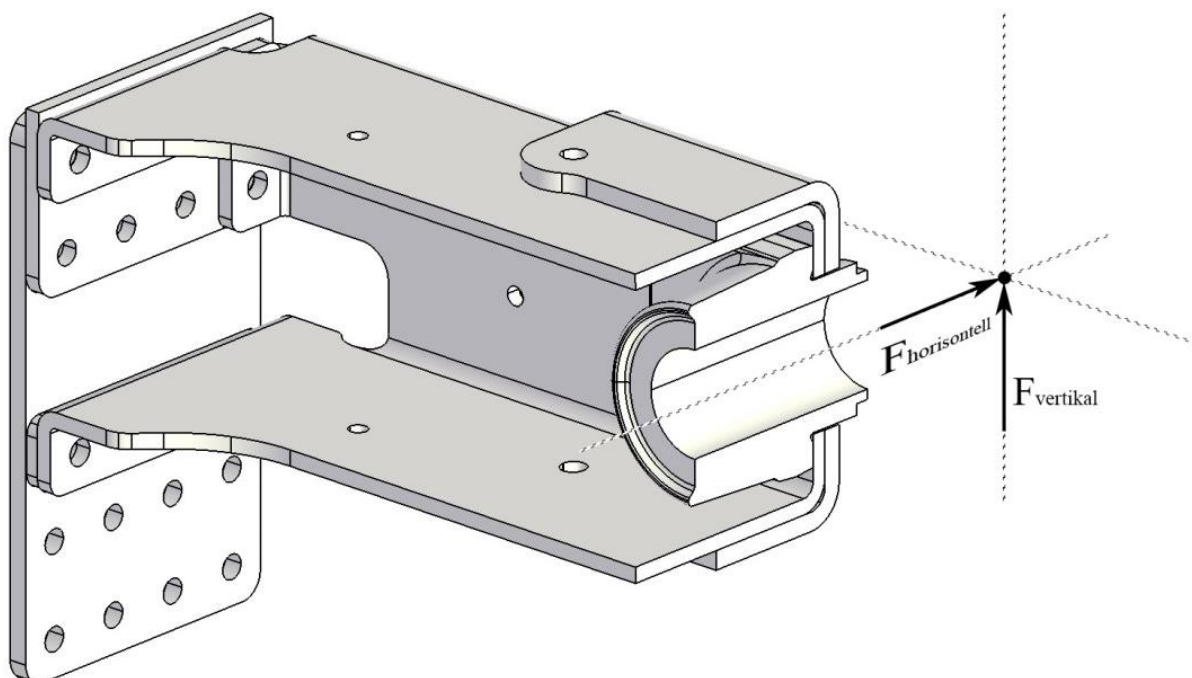


Diagram 2.3 Samtliga belatsningsfall efter 100 lastcykler i ett tvåledsprov med 2 % frekvensskillnad

Den vertikala kraften ansätts 200 mm vinkelrätt bakom balken för att efterlikna verkliga förhållanden, enligt figur 2.10. Detta resulterar i att balken även utsätts för ett vridande moment, enligt:

$$M_v = F_{\text{vertikal}} * 0,2 \quad (4)$$



Figur 2.10 De pålagda krafternas angreppspunkt

3. METOD

I detta kapitel beskrivs kortfattat de metoder som använts vid genomförandet av projektet. En djupare beskrivning av projektets genomförande redogörs för i senare huvudkapitel.

Arbetet inleddes på plats på VBG och genom bland annat diskussioner med ansvariga och under medverkan vid utmattningsprov erhöles en första kontakt med problemställningen beträffande dragbalken.

För att erhålla en ökad kännedom om produkten i fråga samt få en större förståelse kring problematiken främst rörande utmattningsprovet, fortsatte arbetet med en ingående utredning av provrapporter tilldelade av VBG:s provavdelning. I avsikt att organisera och kategorisera proven och dess resultat togs en mall till en provsammanställning fram. Resultaten importerades till programvaran JMP i ett försök att finna statistiska samband mellan defekt och konstruktion. Ett grundmål med rapportstudien var att hitta utmärkande defektorsaker att fokusera kommande studier på.

Arbetet fortlöpte med en FEM-analys av dragbalken i CATIA V5 för att få en utökad förståelse av vilka påfrestningar balken utsätts för under ett utmattningsprov. Det främsta syftet med FEM-analysen var att undersöka samband mellan den teoretiska spänningsbilden och utmattningsprovets resultat.

Då det visat sig svårt att se samband mellan provresultat och FEM-analys, fortsatte arbetet med att lokalisera olikheter mellan nominell konstruktion och FEM-modellen.

För att undersöka hur tillverkningsprocessen påverkat utmattningshållfastheten hos dragbalken spenderades en stor del av arbetstiden i laboratoriet för materialteknik på Chalmers. Där undersöktes de faktorer som utifrån provrapportstudien och FEM-analysen ansetts ha störst inverkan på hållfastheten. Dragbalken undersöktes i mikroskop, och mätningar av hårdhet samt ytjämnhet utfördes i intressanta områden.

4. DATAINSAMLING

Arbetet inleddes med en genomgång av tidigare gjorda utmattningsprov. Sju provrapporter, med totalt 65 stycken utförda utmattningsprov, undersöktes noggrant. Detta gjordes för att kartlägga och lokalisera de vanligast förekommande defekterna, samt för att upptäcka eventuella samband mellan balkkonfiguration och typ av defekt. Provsammanställningen i bilaga 2 visar vilken kraft varje balk utsatts för, aktuell balkförstärkning och montage, antalet utförda kraftcykler samt provens resultat i form av typ och placering av eventuell spricka. Tabell 4.1 visar ett utdrag från provsammanställningen.

Tabell 4.1 Utdrag ur provsammanställningen

Rapport: 2764 (10-10-15)											
Prov.nr	Hor.kraft [kN]	Vert.kraft [kN]	Cyklar ($\times 10^6$)	Gavelmontage	Förstärkning	Hål	Yta	Bockning	Förstärkningspricka	Skrubbrott	Godkänd
2764A	± 114	0	2	centrerad	yttre		X				
2764B	$\pm 84,6$	$-10 \pm 37,8$	2	hel	yttre		X				
2764C	± 114	0	2	centrerad	yttre					X	X
2764D	$\pm 84,6$	$-10 \pm 37,8$	2	hel	yttre						X
2764E	± 78	-10 ± 45	2	hel	yttre			X		X	

I ett försöka att finna statistiska samband mellan olika defekter och balkkonfigurationer användes programvaran JMP, tyvärr utan relevant resultat, se bilaga 3.

Diagram 4.1 åskådliggör fördelningen av uppkomna sprickor under utmattningsproven. Av sekretesskäl anonymiseras de olika defektbenämningarna. Det är tydligt att den mest frekventa defektorsaken är feltyp D. Andra ofta förekommande defekter är feltyp H och feltyp B. En förklaring av defektkategoriseringen hittas i bilaga 2.

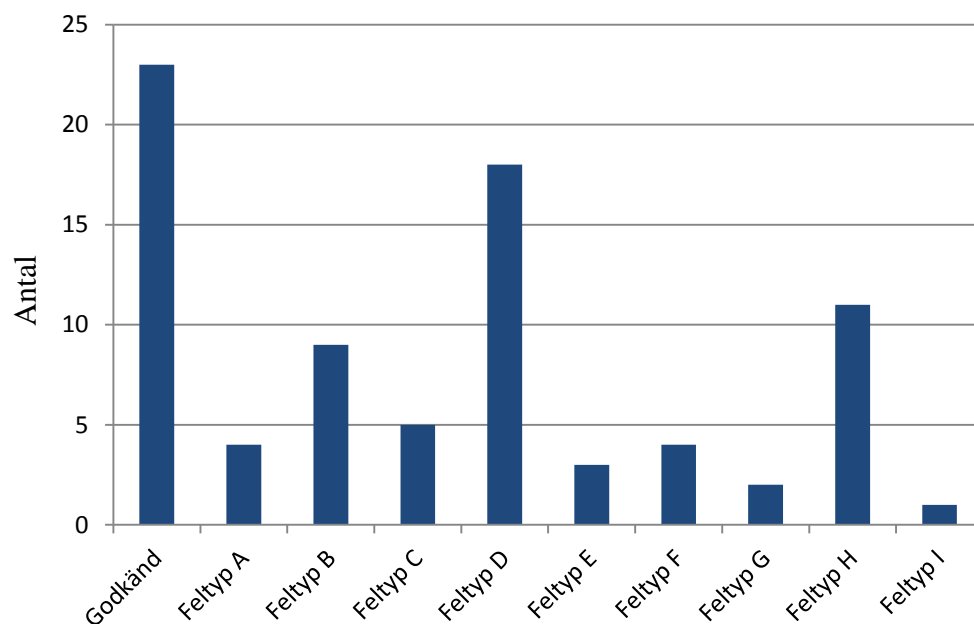


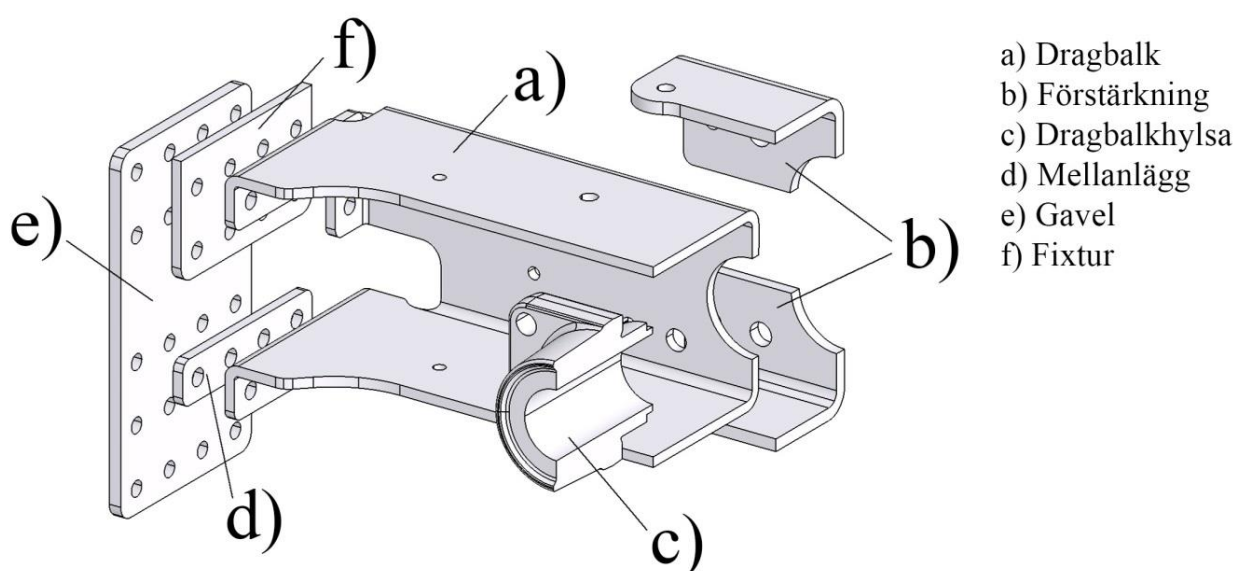
Diagram 4.1 Fördelningen av uppkomna sprickor under utmattningsproven

5. FEM-ANALYS

Med avsikt att analysera spänningsbilden i dragbalken vid olika belastningar gjordes en finita elementmetod-analys i CATIA V5. För att minimera modellerings- och beräkningstid gjordes vissa förenklingar i FEM-modellen. Dessa förenklingar rör framförallt randvillkoren, med vilka balkkomponenterna monterats med, samt hur krafterna applicerats på balken. I följande analyser monteras balken uteslutande med kontaktrandvillkor, som undantagslöst tvingar ihop balkens kontaktytor, vilket kan liknas vid att delarna limmas ihop. Detta innebär att spänningar i nära anslutning till dessa randvillkor förlorar tillförlitlighet och blir därför mer eller mindre ointressanta. Däremot anses spänningsbilden i övrig balk vara så pass tillförlitlig att relevanta slutsatser kan dras. I bilaga 3 förklaras använda randvillkor närmare. Syftet med analysen är främst att hitta förekomsten av, alternativt bristen på, samband mellan spänningsbilden i FEM-modellen och defekter efter utmattningsprov.

Figur 5.1 visar balken och dess komponenter som den studerats i CATIA V5. För att minimera beräkningstiden är konstruktionen halverad. Detta är möjligt då balken är symmetrisk och modellen kompletteras med symmetrirandvillkor. För att kompensera för att den vertikala kraften appliceras 200 mm utanför balkens geometri anbringas, förutom den horisontella och vertikala kraften, även ett vridande moment på dragbalkshylsan.

Fixturen som ska motsvara lastbilsramen är låst i rummet. Dragbalkshylsan är en del av kopplingen som överför krafter mellan koppling och dragbalk. Kommande FEM-analyser visar enbart dragbalken och dess förstärkning. Resterande komponenter behandlas inte i detta arbete och anses därför ointressanta.



Figur 5.1 Sprängskiss av dragbalkens komponenter

För att ta hänsyn till modellens delning i symmetriplanet halverades även de krafter och moment som applicerats på dragbalkhylsans innerytor. De fyra största resulterande belastningsfallen analyserades enligt tabell 5.1. Positiv kraftriktning beskrivs i figur 2.10.

Tabell 5.1 FEM-analysens belastningsfall

	<u>Hela balken</u>			<u>Halva balken</u>		
	Horisontell kraft [kN]	Vertikal kraft [kN]	Moment [kNm]	Horisontell kraft [kN]	Vertikal kraft [kN]	Moment [kNm]
Belastningsfall 1	-78	35	-7	-39	17,5	-3,5
2	-78	-55	11	-39	-27,5	5,5
3	78	35	-7	39	17,5	-3,5
4	78	-55	11	39	-27,5	5,5

Två olika balkkonfigurationer analyserades och jämfördes med resultatet från det fysiska utmattningsprovet. De balkkonfigurationer som undersöktes ansågs extra intressanta då vardera konfiguration är utmattningsprovad vid tre tillfällen, vilket ger provresultaten en viss redundans. Av sekretesskäl benämns balkarna dragbalk A och dragbalk B. Båda balkarna är halvt nedmonterade i fixturen och utsätts för krafter enligt tillhörande tabeller.

Storleken på effektivspänningarna i samtliga FEM-analyser beskrivs av färgskalan i diagram 5.1. Röd färg innebär att spänningsnivåerna uppgått till 355 MPa, materialets angivna sträckgräns.

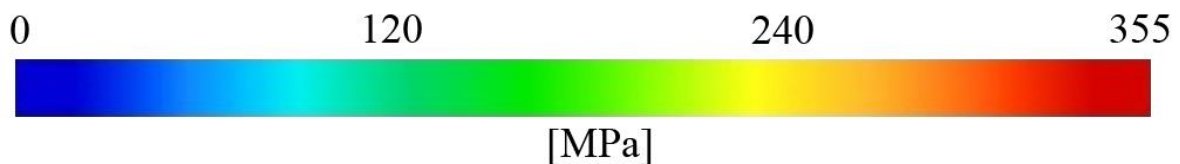


Diagram 5.1 Färgskala av effektivspänningar för kommande FEM-analyser

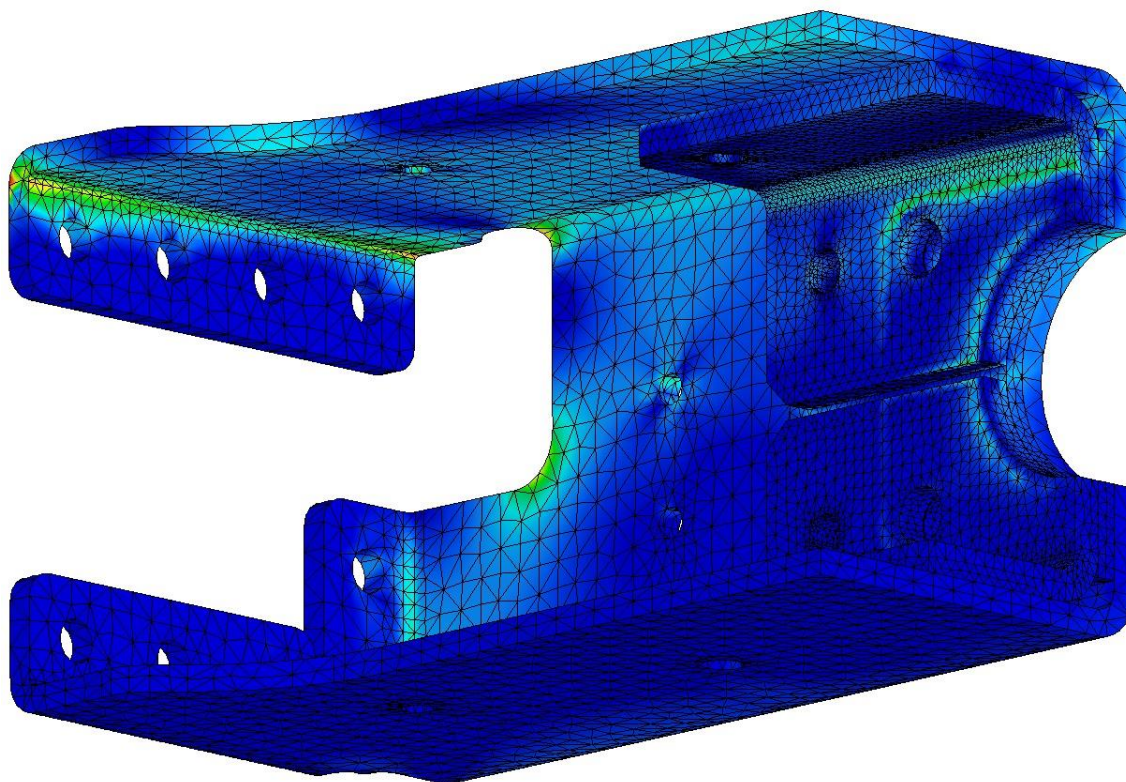
5.1. Dragbalk A

Tabell 5.2 visar vilka krafter balken utsatts för under utmattningsproven, antal kraftcykler till upptäckt brott, samt position av uppkommen spricka.

Tabell 5.2 Resultat av dragbalk A:s tre utmattningsprov

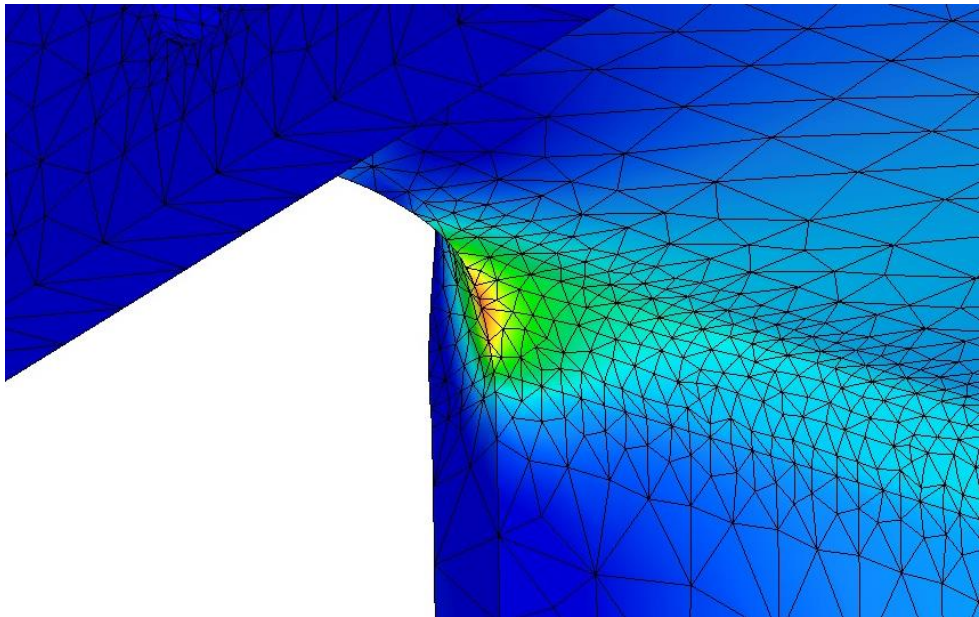
Prov-nr	Horisontalkraft	Vertikalkraft	Cykler till brott	Defekt
2849H	± 78 kN	-10 ± 45 kN	$1 \cdot 10^6$	Feltyp H
2849I	± 78 kN	-10 ± 45 kN	$0,53 \cdot 10^6$	Feltyp H
2849K	± 78 kN	-10 ± 45 kN	$0,62 \cdot 10^6$	Feltyp H

Balkens spänningsbild, då den belastas med belastningsfall 4 enligt tabell 5.1 visas i figur 5.2. Två områden påvisar extra höga spänningar; ett område precis i kontaktvillkoret mellan balk och fixtur, och ett område vid feltyp H. Spänningarna vid kontaktvillkoret anses ointressanta, vilket tidigare nämnts.



Figur 5.2 Spänningsbild i dragbalk A vid belastningsfall 4, sedd snett framifrån underifrån

Vid inzoomning av modellen syns en tydlig spänningskoncentration vid feltyp H, se figur 5.3. Spänningen uppgår i detta område till strax över 300 MPa. Spänningskoncentrationen uppstår precis i det område där alla tre balkar spruckit, se figur 5.4.



Figur 5.3 Inzoomning av spänningskoncentration vid feltyp H



Figur 5.4 Fotografi av spricka vid feltyp H

Att samtliga prov resulterat i samma typ av spricka, och dessutom efter maximalt en miljon cykler, tyder på att defekten inte beror på tillfälligheter som till exempel materialdefekter. Att FEM-analysen därtill ger en spänningsbild som till synes stämmer bra överens med provresultaten tyder på att analysen, trots dess förenklingar, går att koppla till verkligheten.

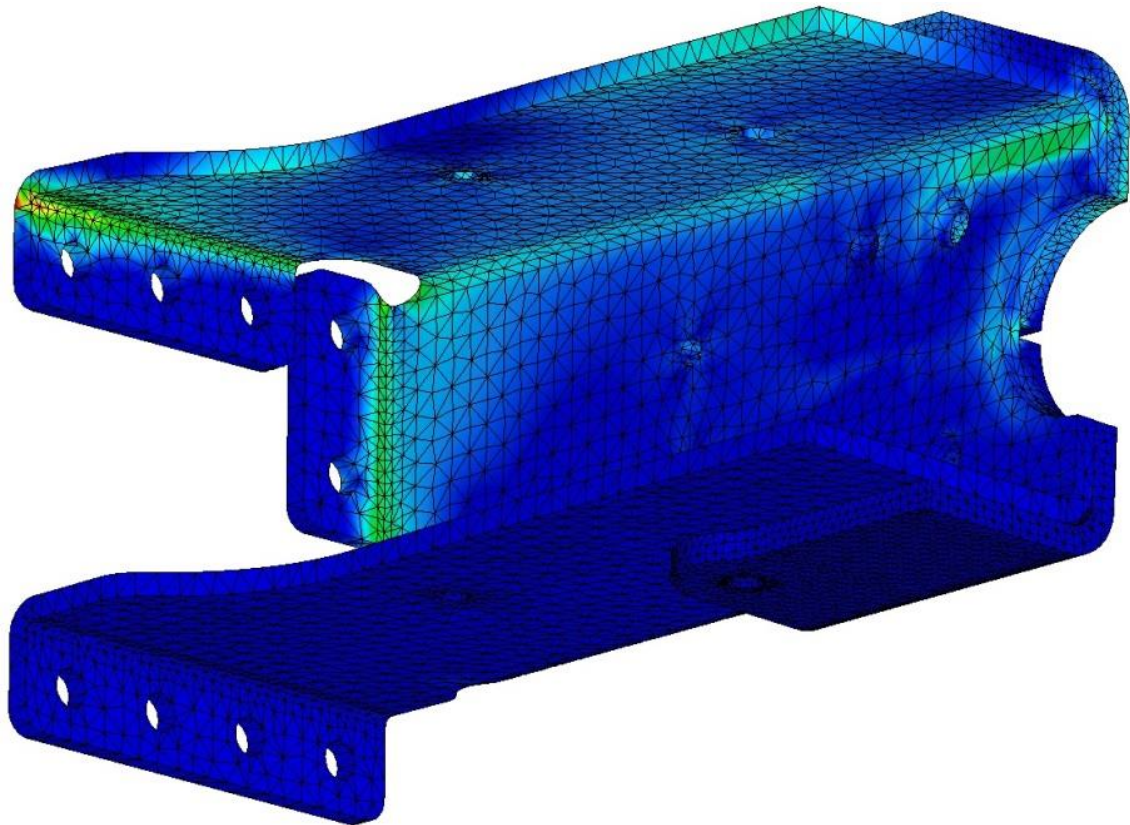
5.2. Dragbalk B

Tabell 5.3 visar vilka krafter balken utsatts för under utmattningsproven, antal kraftcykler till upptäckt brott samt position av uppkommen spricka.

Tabell 5.3 Resultat av dragbalk B:s tre utmattningsprov

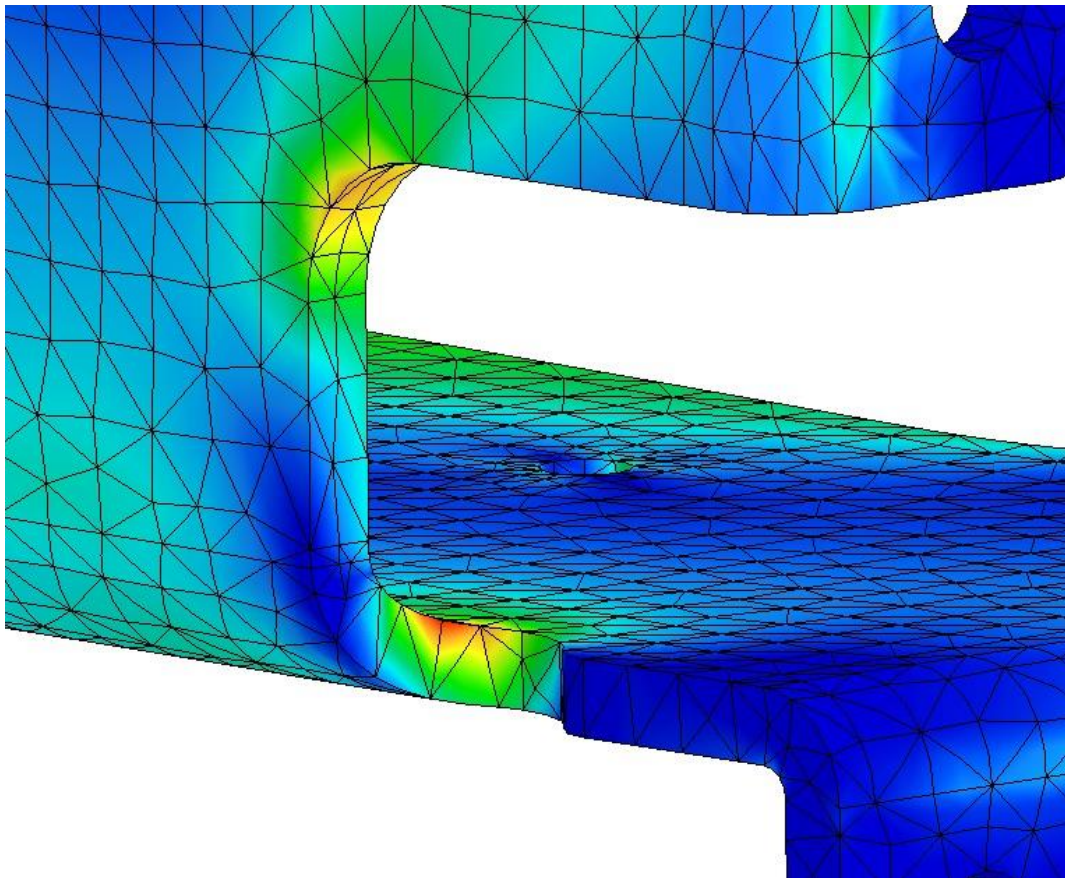
Prov-nr	Horisontalkraft	Vertikalkraft	Cykler till brott	Defekt
2764O	± 78 kN	-10 ± 45 kN	$2 \cdot 10^6$	Feltyp A
2764P	± 78 kN	-10 ± 45 kN	$2 \cdot 10^6$	Feltyp C
2764R	± 78 kN	-10 ± 45 kN	$1,56 \cdot 10^6$	Feltyp D

Spänningsbilden i balken belastad med belastningsfall 4 enligt tabell 5.1 åskådliggörs i figur 5.5.



Figur 5.5 Spänningsbild i dragbalk B vid belastningsfall 4, sedd snett framifrån underifrån

En något förhöjd spänning uppkommer även i denna balk, se figur 5.6. Spänningsnivån ligger även i detta fall på strax över 300 MPa.



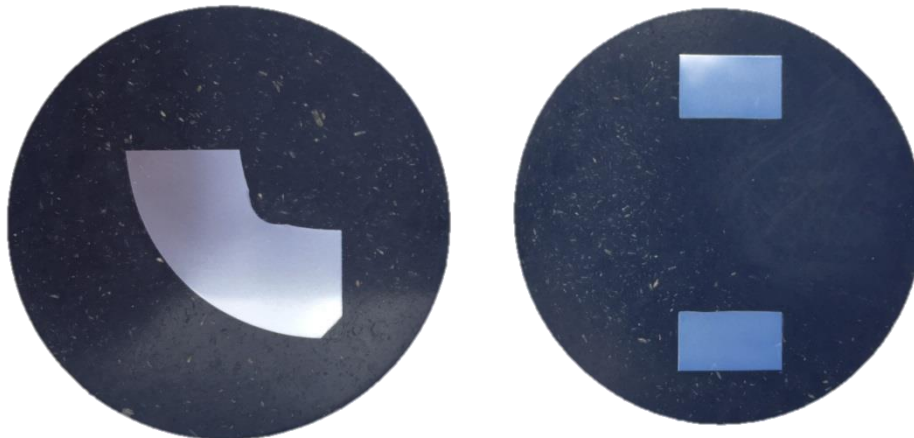
Figur 5.6 Inzoomning av spänningskoncentration

I detta fall varierar provresultatet från de tre utmattningsproven och ger upphov till sprickor i tre helt skilda områden. Sprickorna upptäcktes heller inte förrän vid avslutat prov efter 2 miljoner kraftcykler i två av fallen. Att sprickorna är så pass utspridda och uppkommer så pass sent kan tyda på att spänningsnivåerna i konstruktionen är mer jämnt fördelade, och att flera områden utsätts för betydande, men lägre, spänningar i jämförelse med dragbalk A. I övrigt uppkommer inga andra intressanta spänningar i FEM-modellen. Detta visar på svårigheterna med att förutse sprickbildning enbart utifrån en förenklad FEM-analys. För att förlita sig på en FEM-analys som beräkningsmetod krävs det att analysen alltid ger ett tillförlitligt resultat.

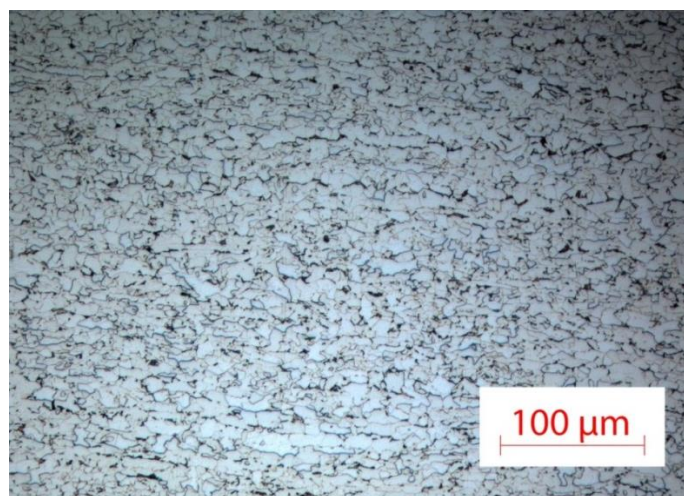
6. UNDERSÖKNING AV TILLVERKNINGSPROCESSENS MATERIALPÅVERKAN

De faktorer som ansetts mest intressanta ur utmattningssynpunkt är förändringar i geometri och materialegenskaper på grund av laserskärning och bockning. För att undersöka hur mycket stålet i dragbalken påverkats av tillverkningsprocessen gjordes en omfattande studie av bock- och laserskärningsprover. Provplåten är, liksom dragbalken, laserskuren och bockad med 3 mm bockradie. Dessa prover är tillverkade i samma stål som dragbalken och med samma maskiner, så de beskriver i hög grad verkligheten och slutsatser från proven kan direkt appliceras på dragbalken.

För att studera mikrostrukturen kapades provbitarna i mindre delar, vilka sedan gjöts in i plastkutsar, se fig. 6.1. Plastkutsarna slipades och polerades i fem steg till en ytfinhet finare än $0,05 \mu\text{m}$. De spegelblanka ytorna etsades därefter med en blandning av salpetersyra och alkohol för att få mikrostrukturen att träda fram. I 20x förstoring syns stålets mikrostruktur tydligt se fig. 6.2.



Figur 6.1 Materialprover ingjutna i plastkutsar. Bockprov till vänster och tvärsnitt av laserskuret hål till höger



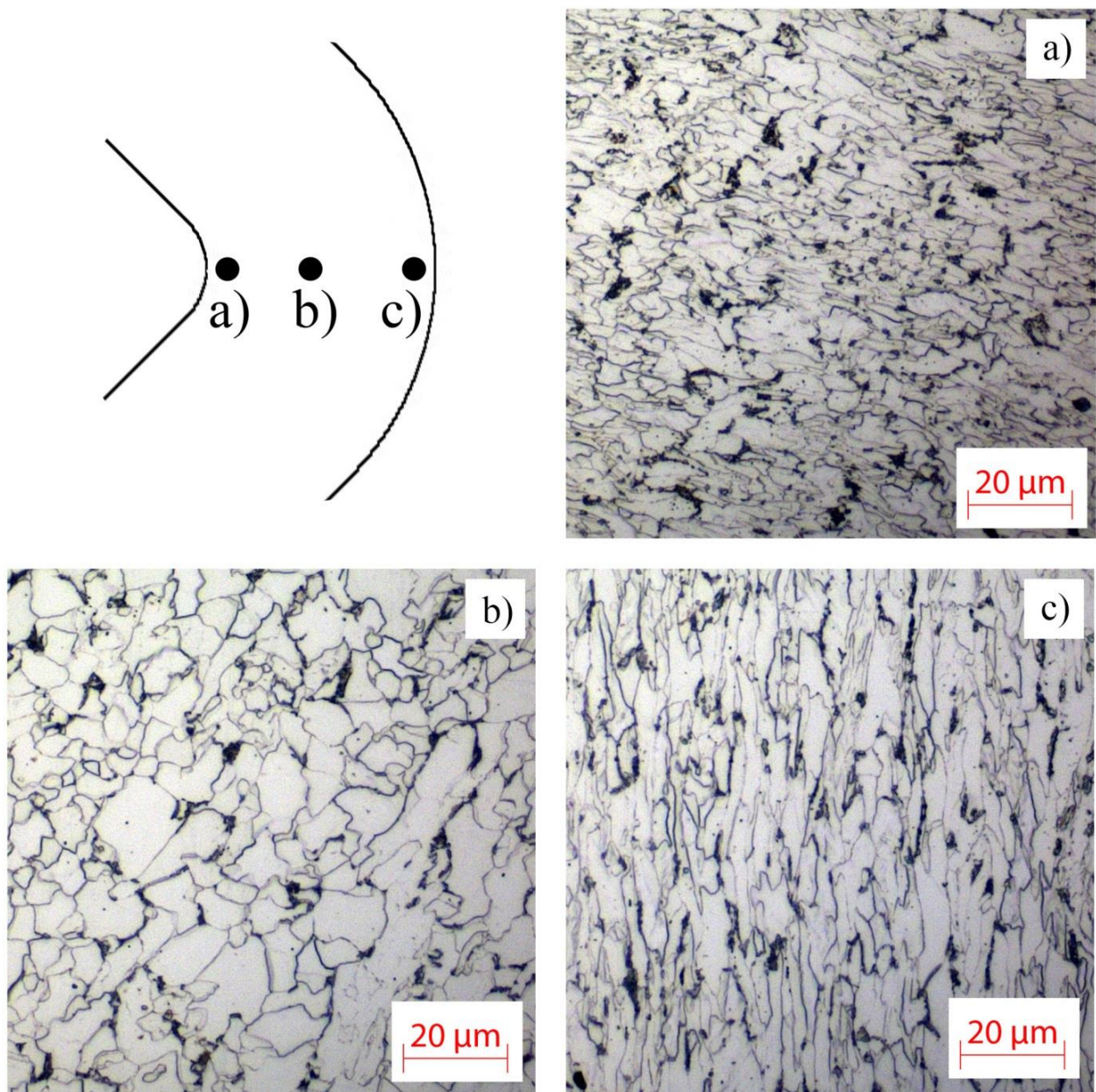
Figur 6.2 Mikrostruktur i opåverkad Domex 355 i 20x förstoring

6.1. Påverkan från bockning

För att ta reda på hur bockningsprocessen påverkat materialet undersöktes förändringar i geometri och mikrostruktur orsakade av den plastiska bearbetningen.

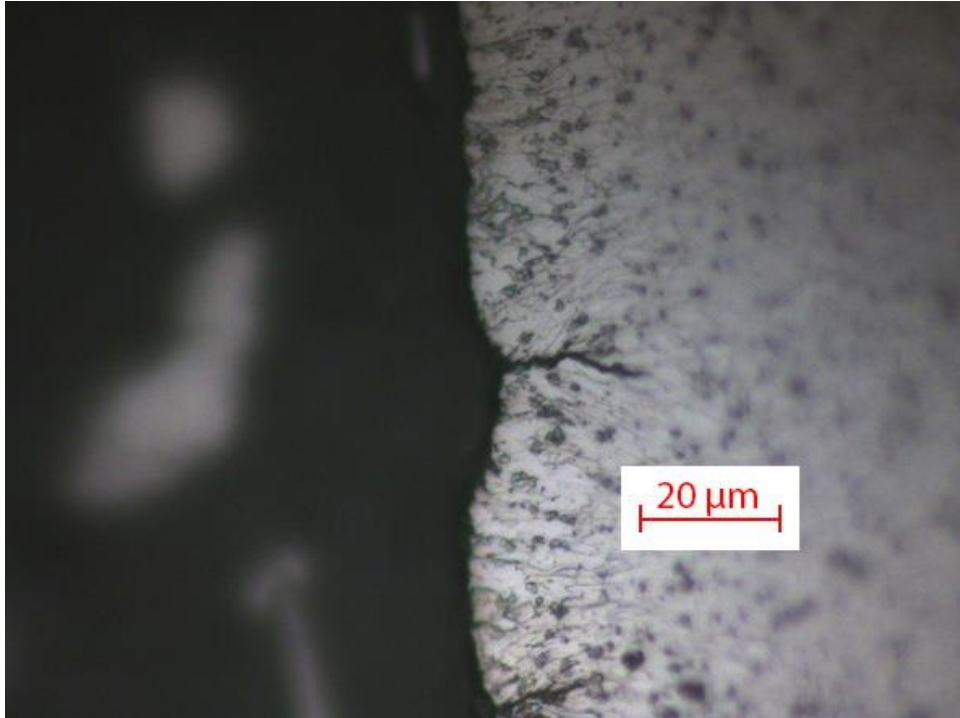
6.1.1. Mikrostrukturell påverkan från bockning

Enligt teorin om plåtbockning går det att dra slutsatser om hur mycket materialets hållfasthetsegenskaper påverkas genom att analysera dess mikrostruktur. Precis som väntat syns tydliga tecken på en deformerad mikrostruktur i tvärsnittet genom bocken. Vid bokens innerradie, där materialet utsatts för en kraftig tryckspänning, har kornen krossats och pressats samman, se figur 6.3. Vid bokens ytterradie däremot, där det uppkommit dragspänningar, har kornen dragits ut och elongerats. Kring bokens neutrallinje är mikrostrukturen till synes opåverkad.



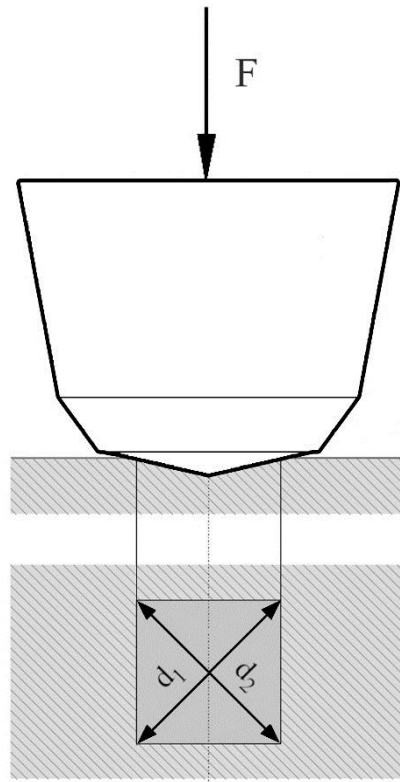
Figur 6.3 Mikrostruktur i punkt a), b) och c) längs bocktvärsnitt i 50x förstoring

Enligt figur 6.4 är det uppenbart att bockningsprocessen medfört lokala spänningar över brottgränsen. I samtliga provbitar har ett flertal mikrosprickor, ca 20 µm långa, uppstått till följd av den kraftiga plastiska bearbetningen. Enligt ekv. 1 och diagram 2.1 är sambandet mellan en sprickas längd och dess tillväxthastighet tydligt.



Figur 6.4 Mikrospricka i innerradie av bock i 100x förstoring

Därtill utfördes ett hårdhetsprov för att få ytterligare kännedom om hur mycket materialegenskaperna påverkats. Hårdhetsprovet utfördes med en durometer av modell *Wolpert testor 7021* enligt vickersmetoden, där man låter en diamantpyramid pressas ned i materialet med en förutbestämd kraft, i detta fall 5 kilopond (49,02 N), vilket lämnar ett avtryck i materialet. Avtryckets diagonaler, d_1 och d_2 i figur 6.5, kan sedan mätas och med hjälp av tabellvärden omvandlas till hårdhet och brottgräns. Mätprocessens totala felmarginal brukar uppskattas till 5 HV. Tabellvärdena för hårdhet är framtagna med förhållandet $HV = \frac{F}{A}$, där F anger tryckkraften i kilopond, och A är den totala kontaktytan mellan diamant och arbetsstycke i mm^2 . Databladet med tabellvärdena återfinns i bilaga 4.



Figur 6.5 Illustration av hårdhetsprov

Figur 6.6 visar de numrerade mätavtrycken från hårdhetsprovningen längs bocktvärsnittet.



Figur 6.6 Numrerade avtryck efter hårdhetsprov

Tabell 6.1 redovisar de uppmätta diagonalerna samt värdet på hårdheten i samtliga mätavtryck i figur 6.6. Ytterligare hårdhetsprov har utförts med samma resultat.

Tabell 6.1 Mätvärdenvärden och resultat av hårdhetsprov

Mät punkt	d1 [mm]	d2 [mm]	Medel [mm]	Hårdhet [HV]
1	0,190	0,185	0,188	262
2	0,190	0,185	0,188	262
3	0,195	0,190	0,193	249
4	0,195	0,195	0,195	244
5	0,200	0,200	0,200	232
6	0,205	0,205	0,205	221
7	0,220	0,215	0,218	195
8	0,215	0,215	0,215	201
9	0,220	0,215	0,218	195
10	0,210	0,210	0,210	210
11	0,205	0,205	0,205	221
12	0,205	0,200	0,203	225
13	0,200	0,200	0,200	232
14	0,195	0,200	0,198	236
15	0,195	0,200	0,198	236
16	0,200	0,205	0,203	225
17	0,195	0,195	0,195	244
18	0,190	0,195	0,193	249
19	0,190	0,195	0,193	249
20	0,190	0,190	0,190	257

Hårdhetsprovningen bekräftar att materialet utsatts för en kraftig deformationshärdning. Diagram 6.1 visar hur hårdheten varierar längs bocktvärsnittet. Hårdheten har ökat markant i både inner- och ytterkant av bocken, där materialet plasticerats som mest. Hårdheten i det opåverkade materialet är uppmätt i ett obearbetat referensprov.

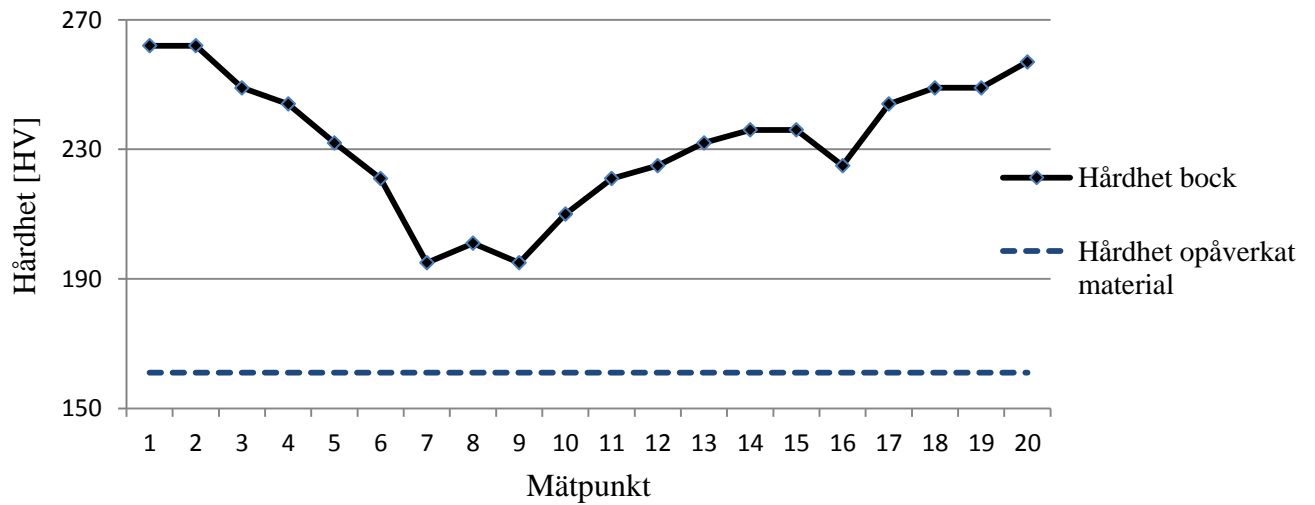


Diagram 6.1 Hårdhet längs bocktvärsnitt

Då brottgränsen i ett material är direkt proportionell mot hårdheten, enligt $\sigma_y \approx 3 \cdot HV$, kan man utifrån detta även dra slutsatser om hur styrkan i materialet förändrats. Diagram 6.2 stödjer teorin om att ökad korndeformation medför ett starkare material.

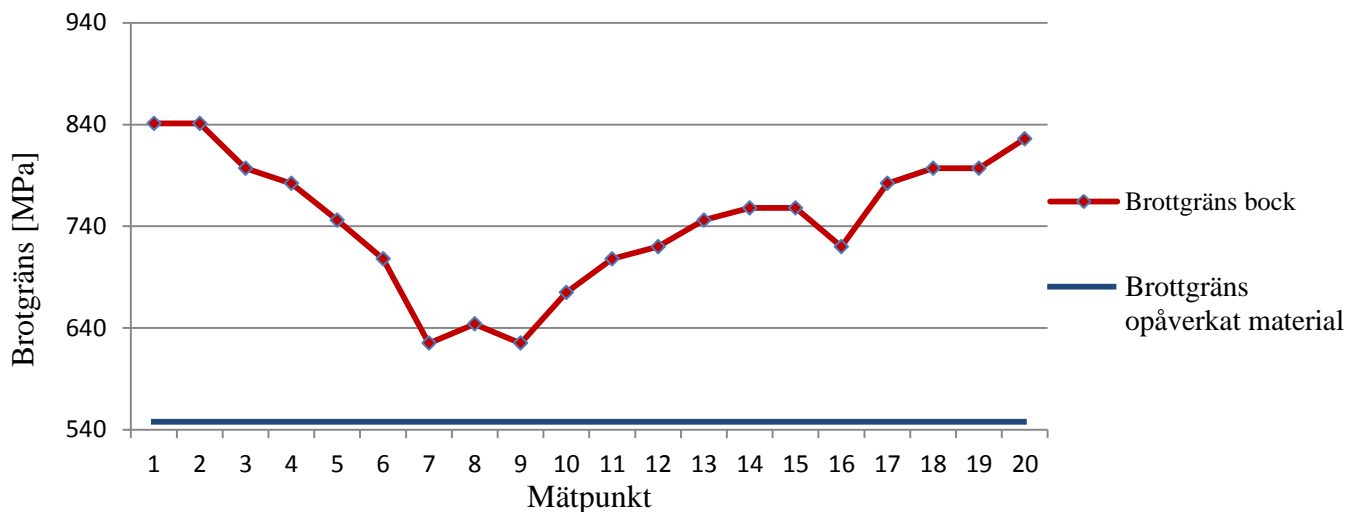


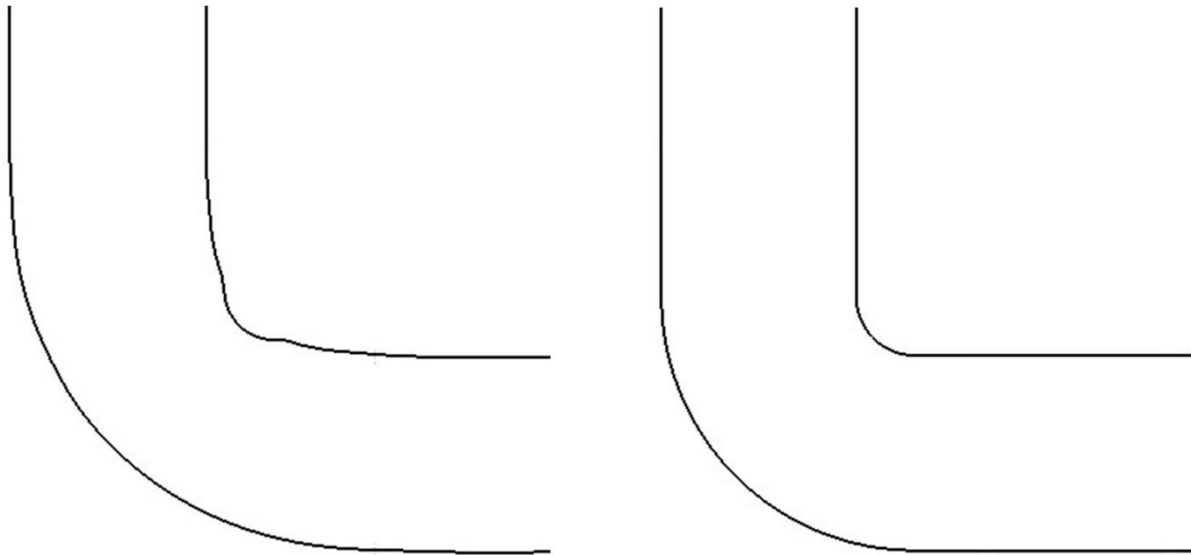
Diagram 6.2 Brottgräns längs bocktvärsnitt

Att varken hårdheten eller brottgränsen antar värdet av det opåverkade materialet, 171 HV respektive 548 MPa, kan bero på att:

- Bockningen orsakar en så pass kraftig plastisk deformation att även neutrallinjen deformeras och förlorar sin betydelse.
- Bearbetningen av provbitarna, främst poleringen, kan ha en viss påverkan på materialets hårdhet.

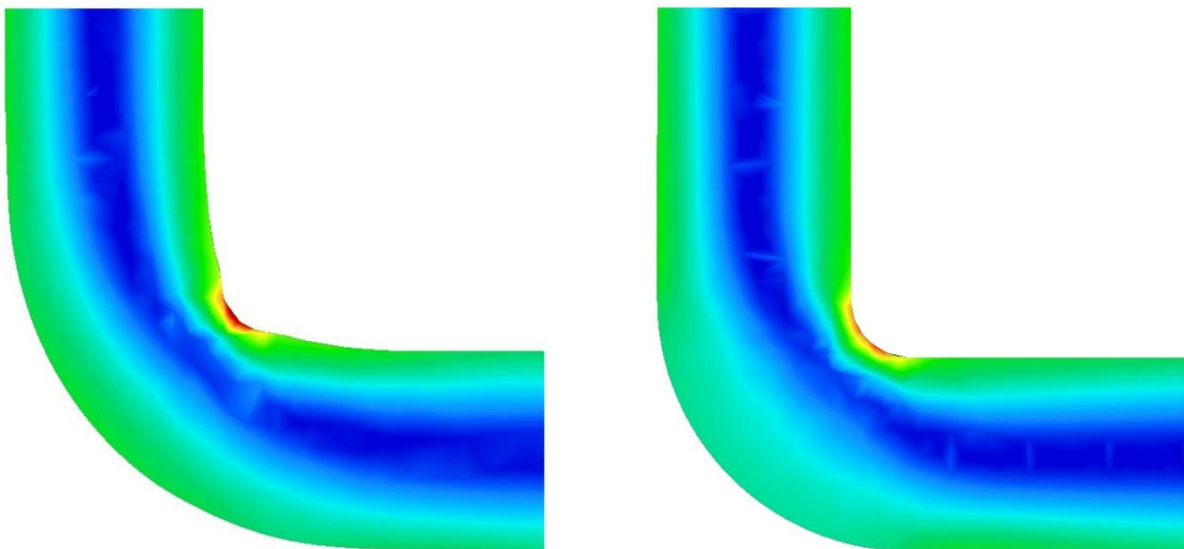
6.1.2. Avvikande geometri på grund av bockning

Dessutom gjordes en jämförelse mellan bockprovets faktiska tvärsnittskontur gentemot nominell kontur, vilken används i FEM-beräkningar. Detta gjordes för att se om, och i så fall till vilken grad, den rent geometriska förändringen som plåtbockningen medför påverkar spänningsbilden i bocken. Ett tvärsnitt av ett bockprov scannades och överfördes till en 3D-modell för att sedan FEM-analyseras. Figur 6.7 visar skillnaden mellan verklig respektive nominell bockkontur.



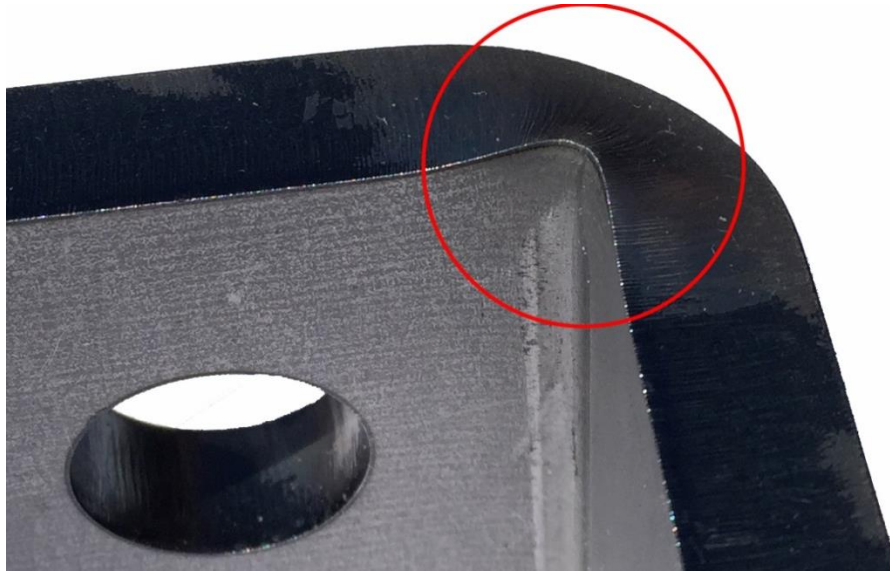
Figur 6.7 Från vänster: faktiskt respektive nominellt bocktvärsnitt

Den jämförande FEM-analysen mellan verklig och nominell bockgeometri visar tydligt att den plastiska påverkan på bockzonen, orsakad av bockverktyget, medför en betydande spänningskoncentration. Vid en given belastning uppkommer en lokal spänningsökning på ca 30 %, se figur 6.8.



Figur 6.8 Spänningsbild i faktiskt respektive nominellt bocktvärsnitt

Dessutom uppstår en avvikande geometri i änden av bocken, enligt figur 6.9. Tryck- respektive dragspänningar på vardera sidan av neutrallinjen deformerar plåten så att material på insidan av neutrallinjen pressas ut, medan material på utsidan av neutrallinjen dras in och rundar av hörnet. Geometrin antas ha en viss inverkan på hållfastheten, men har på grund av tidsbrist inte undersökts närmare.



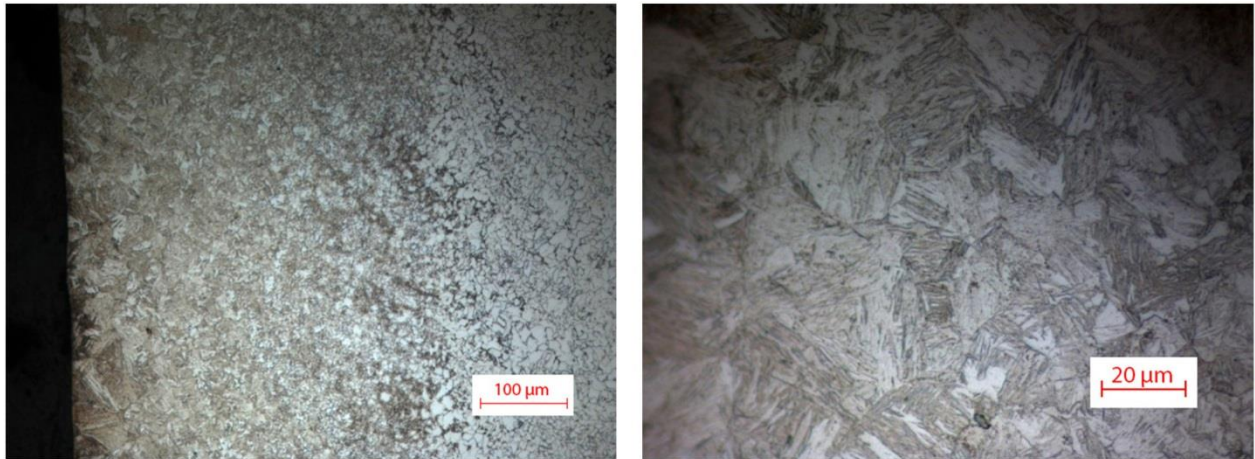
Figur 6.9 Avvikande geometri i änden av bock

6.2. Påverkan från laserskärning

Från laserskärningsprocessen är det framför allt två parametrar som påverkar en konstruktions utmattningshållfasthet; härdningen till följd av den höga temperaturen samt den skurna ytans ytjämnhet.

6.2.1. Mikrostrukturell påverkan från laserskärning

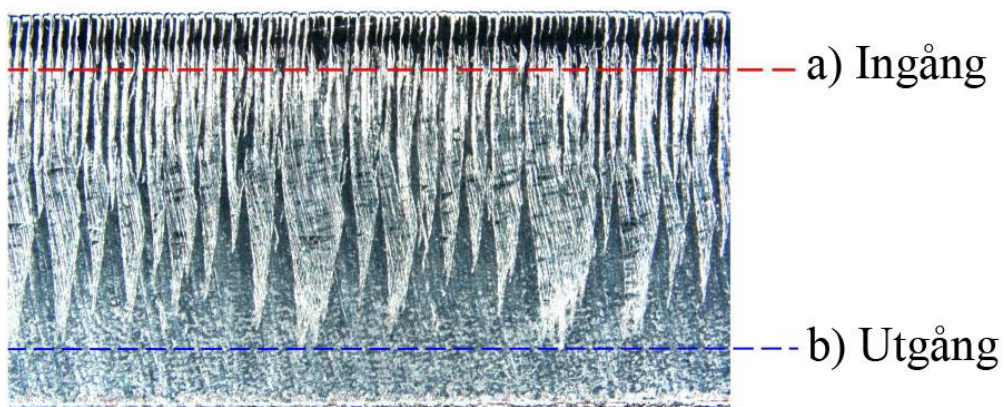
Den mikrostrukturella undersökningen av plåtens laserskurna kanter visar på en tydlig martensitbildning orsakad av den kraftigt förhöjda temperaturen från laserstrålen, se figur 6.10. Härdningsdjupet uppgår till ca 0,2 mm där laserstrålen först träffar arbetsstycket, och ökar därefter linjärt längs plåttjockleken till ca 0,5 mm. Det rimliga antagandet att mer martensit bildas vid plåtens ovansida där laserstålen ligger an en längre tid är således felaktigt. Detta förklaras med att laserljuset förlorar parallellitet och sprids ut längs med plåttjockleken, och fokuserar därigenom energin på ett större område. Ett hårdhetsprov visar att hårdheten uppgår till 260 HV närmast snittet, en ökning med ca 50 % från det opåverkade materialet.



Figur 6.10 Martensitbildning på grund av laserskärning. Från vänster: i 20x respektive 100x förstoring

6.2.2. Ytjämnhet

Ytjämnheten i snittet kontrollerades med en ytprofilsmätare. Då ytjämnheten påtagligt varierar med skär djupet mättes jämnheten längs två parallella linjer längs med snittet enligt figur 6.11. De tydliga ”ränderna” vid laserns ingångssida, vid linje a, beror på laserljusets pulser. Den finare ytan vid laserns utgång, vid linje b, kan antas komma av att det utspridda och ofokuserade laserljuset smälter en större mängd material som jämnar ut ytan.



Figur 6.11 Laserskuren kant.

Medelytavvikelsen, eller R_a -värdet defineras enligt:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

där n är antalet mätpunkter, och $|y_i|$ är absolutbeloppet av avvikelsen från nollnivån. [4] R_a -värdet av ca 4000 mätpunkter på en 16 mm sträcka uppmättes vid linje b till ca 2 μm , medan det vid linje a uppgår till ca 6 μm . Flertalet mätningar utfördes med likartade resultat.

Diagram 6.3 visar den uppmätta ytjämnheten längs linje a.

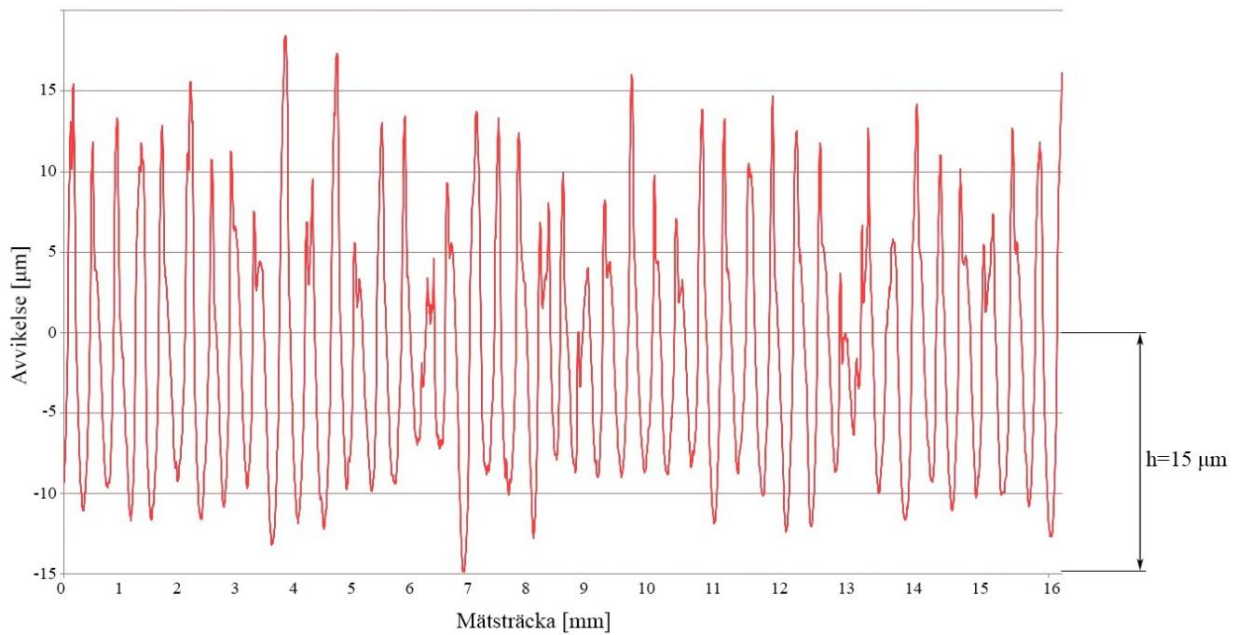


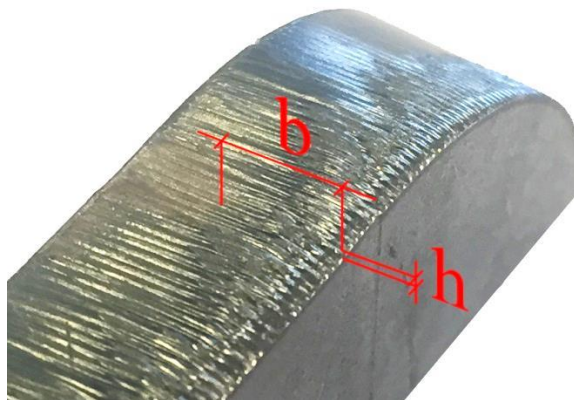
Diagram 6.3 Uppmätt ytjämnhet utmed linje a i figur 6.11

Med hjälp av Murakamis modell (ekv. 2) approximerades en teoretisk utmattningsgräns i de laserskurna kanterna. Defektarean beräknades med det uppmätta värdet av ytans maximala negativa avvikelse från nollnivån, $h=15\ \mu\text{m}$, och det uppskattade värdet av defektens bredd, $b=5\text{mm}$, se figur 6.12. Med förenklingen att spänningsförhållandet $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 1$

approximerades utmattningsgränsen till:

$$\sigma_w = \frac{1,43 \cdot (260 + 120)}{(\sqrt{75000})^{1/6}} \approx 213\ \text{MPa}$$

Jämförs detta värde med den tidigare uppskattade utmattningsgränsen, det vill säga halva brottgränsen, har utmattningsgränsen reducerats med ca 20 %.



Figur 6.12 Illustration av höjd och bredd av ytdefekt enligt Murakamis modell (ekv. 2)

7. SLUTSATS OCH REKOMENDATIONER

Efter avslutat arbete är det tydligt att tillverkningsprocessen påverkar dragbalkens utmattningshållfasthet.

Den absolut mest betydelsefulla upptäckten är förekomsten av flertalet mikrosprickor, orsakade av de höga spänningarna under plåtbockningsförloppet. Att sprickor förekommer redan efter tillverkningsprocessen kan innebära en drastisk reduktion av dragbalkens livslängd, då sprickor medför betydande spänningskoncentrationer vilka ökar risken för vidare spricktillväxt. Förutom denna sprickbildning deformationhårdas även materialet i bockzonen vilket ökar styrkan och hårdheten betydligt. I teorin ger ett starkare och hårdare material ökad resistans mot sprickinitiering och då ökad utmattningshållfasthet. Däremot skyndar det hårdare och sprödare materialet på spricktillväxten av de redan befintliga mikrosprickorna. Att minimera förekomsten av dessa mikrosprickor kan alltså vara ett avgörande steg mot att förbättra utmattningshållfastheten. Som ett första steg i den riktningen råder vi VBG att se över möjligheterna att öka bockradien i de skarpaste bockningarna. Andra påverkande parametrar under bockprocessen, som till exempel plåtens valsriktning, bockhastighet, smörjning och verktygskvalitet bör också ses över.

En annan tillverkningsprocess som påverkar konstruktionens utmattningshållfasthet är laserskärningen. Den extrema värmen som utvecklas under skärförloppen hårdar materialet vilket ökar styrkan och hårdheten kring snittet. Likt vid deformationshårdning betyder ett hårdare och starkare material ett ökat motstånd mot sprickinitiering. Dock kan den ojämna ytan i lasersnittet ses som redan befintliga defekter, utifrån vilka sprickor lätt kan växa. Återigen råder vi VBG att kontrollera de parametrar som påverkar resultatet av laserskärningen, exempelvis skärhastighet och skäreffekt.

Kan dessa påverkande faktorer optimeras tror vi att det finns möjligheter att både öka konstruktionens hållfasthet samt att på ett effektivare sätt utnyttja de befintliga beräkningsmetoderna för att bättre kunna förutsäga en dragbalks utmattningshållfasthet.

7.1. Förslag på fortsatt arbete

Problematiken i att med FEM-analyser förutse utmattning vid det fysiska utmattningsprovet kan angripas från två håll; En kortsiktig åtgärd är att modifiera FEM-analysen med hänsyn till begränsande faktorer, exempelvis sprickor, deformationshårdnande och ytjämnhet, för att närmare beskriva verkligheten. En mer långsiktig lösning är att vid tillverkningen minimera de avvikelser som begränsar utmattningshållfastheten och därigenom närma sig nominell konstruktion.

Detta arbete har främst fokuserats på att lokalisera och identifiera faktorer som har betydelse för konstruktionens utmattningshållfasthet. Vidare arbete med att sätta värde på de olika faktorerna kan vara nödvändigt för att bedöma hur mycket hållfastheten faktiskt påverkas, och för att i framtiden bättre kunna förutsäga en viss konstruktions utmattningshållfasthet.

Vidare utveckling och fortsatt användande av provsammanställningen bedöms även vara av stor vikt, då en tydlig och lättöverskådlig historik över utförda utmattningsprov kan underlätta vid framtida förbättringsarbete.

Under arbetets gång har flera intressanta frågeställningar uppstått, vilka vi anser är viktiga att undersöka vidare:

- Är Domex 355 det bäst lämpade materialet för dragbalken?
- Hur påverkar plåtens valsriktning kvaliteten i av en genomförd bock? Kan det löna sig att tillåta mer spillmaterial från laserskärningen för att under bockprocessen ta större hänsyn till plåtens valsriktning?
- Kan den redan existerande blästringsprocessen styras så att särskilt utmattningskänsliga områden i konstruktionen bombarderas extra hårt och därigenom genomgå en kraftigare ytlig deformationshärdning? Kan denna ytterligare deformationshärdning då förhöja utmattningsgränsen och då öka konstruktionens livslängd?
- Finns det lämpliga alternativ till laserskärning som inte påverkar material och ytkvalité i samma grad?
- Hur påverkas utmattningshållfastheten av balkförstärkningens monteringsmetod? Kan svetsning, limning eller bultning vara lämpliga alternativ till nitning?

REFERENSER

1. Data Sheet 8413sv Domex. SSAB, Stockholm 2014,
http://www.ssab.com/Global/DOMEX/Datasheets/sv/413_Domex%20355%20MC.pdf
(Acc 2015-05-21)
2. Reardon, Arthur C. (2011). Metallurgy for the Non-Metallurgist, 2nd Edition.
Cleveland: ASM International.
3. Hågeryd, L. Björklund, S. Lenner, M. Modern Produktionsteknik. Del 1. Stockholm:
Liber AB.
4. Karlebo, S. (1992). Karlebo handbook. Utgåva 14. Stockholm: Liber Utbildning.
5. Ashby, M. Shercliff, H. Cebon, D. (2012). Materials engineering, science, processing
and design. 2nd Edition. Oxford: Elsevier.
6. Bending of High Strength Steel. SSAB, Stockholm 2014,
http://www.ssab.com/Global/DOMEXDOCOL/Brochures/en/912en%20Dc_Dx_Hx_Wx-%20Bending%20of%20high%20strength%20steel-V2-2014_web.pdf (Acc 2015-05-21)
7. Mägi, M. Melkersson, K. (2014). Lärobok i maskinelement. Göteborg: Kompendiet
8. McKelvey, S. Fatemi, A. (2011). Influence of Surface Finish on Fatigue Behavior of
Forged Steel Including Heating Method, Hardness, and Shot Cleaning Effects. Toledo:
The University of Toledo.
9. Ravichandran, K.S. Murakami, Y. Ritchie, R.O. (1999) Small Fatigue Cracks:
Mechanics, Mechanisms and Applications. Amsterdam: Elsevier.
10. Agreement Concerning the Adoption of Uniform Conditions of Approval and
Reciprocal Recognition of Approval for Motor Vehicle Equipment and Parts, done at
Geneva on 20 March 1958, United nations, 2001,
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r055r1e.pdf> (Acc
2015-05-19)

BILAGA 1



1(2)
Data Sheet 8413en Domex 2014-06-13

Domex 355 MC

High Strength Cold Forming Steel

General Product Description

Domex 355 MC is a hot-rolled structural steel with a minimum yield strength of 355 MPa. Domex 355 MC meet and exceed the requirements of S355 MC in EN 10149-2.

Applications

Typical applications are components subjected to demanding forming operations.

Available dimensions

Domex 355 MC is available in thicknesses of 1.80-15.00 mm and widths up to 1600 mm as coils, slit coils and as cut to length in lengths up to 16 meters.

Mechanical Properties

Steel grade	Yield strength R_{m} (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)		Elongation A_{50} % $t < 3$ mm	Elongation A_5 % $t \geq 3$ mm
	min	min	max	min	min
Domex 355 MC	355	430	550	19	23

The mechanical properties are valid in the longitudinal direction.

Impact toughness

	Designation	Test temperature (°C)	Impact energy (J)
Min. impact energy for longitudinal Charpy V-notch test	B		Not tested
	D	- 20	40
	E	- 40	27

Impact testing according to ISO 148-1 is performed on thicknesses ≥ 6 mm. The specified minimum value corresponds to a full-size specimen.

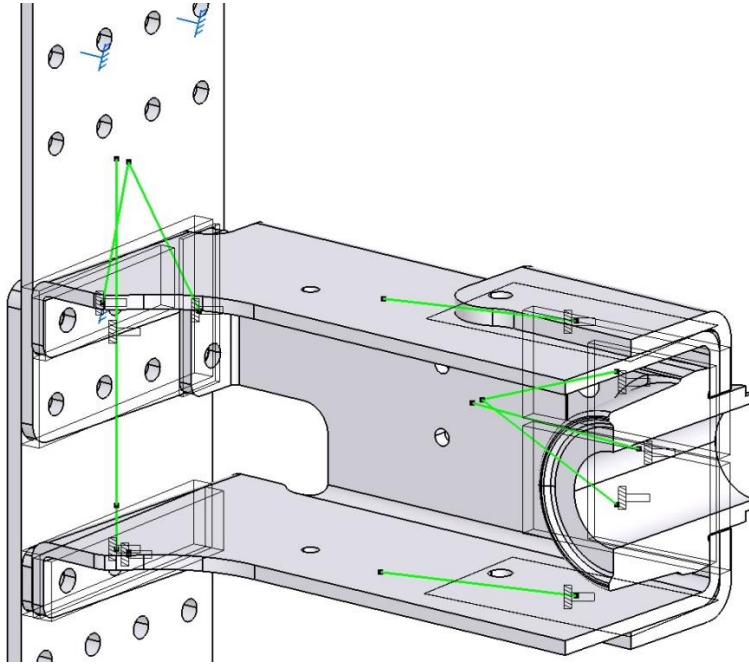
Bending properties

	Sheet thickness, t		
	$t \leq 3$ mm	3 mm $< t \leq 6$ mm	$t > 6$ mm
Min. inner bending radius for a 90° bend	0.2 xt	0.3 xt	0.5xt

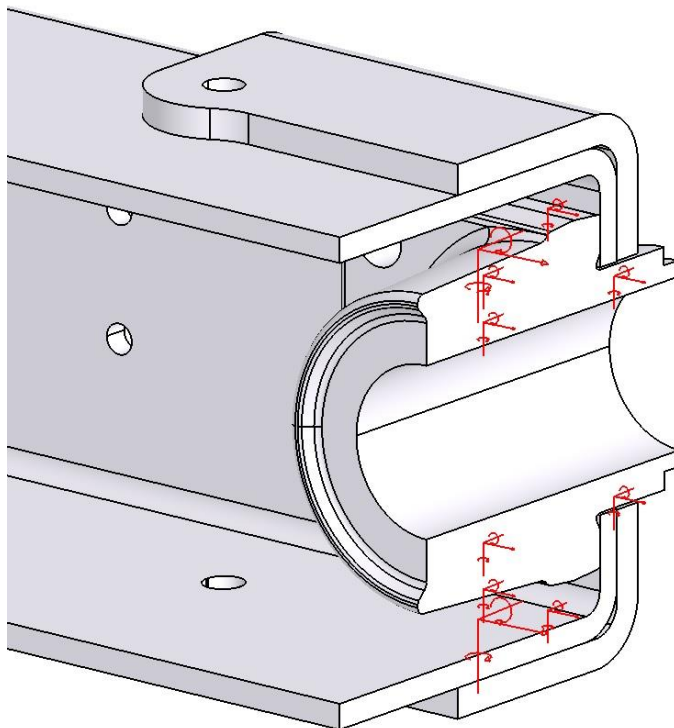
For both longitudinal and transversal directions.

BILAGA 2

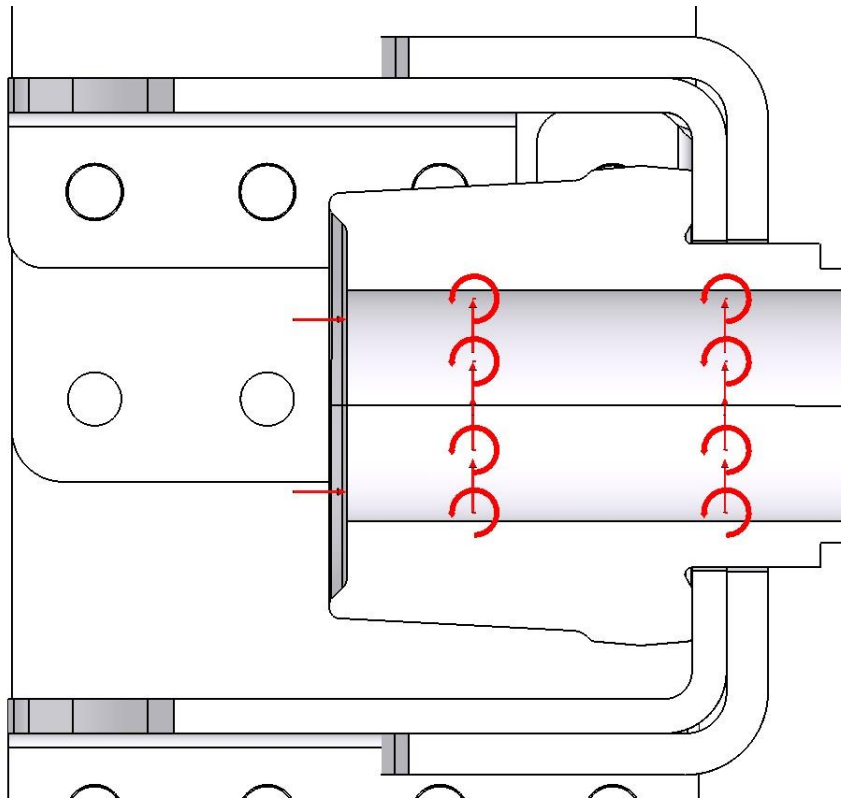
På grund av sekretess är provsammanställningen borttagen ur denna utgåva.

BILAGA 3

Ovan syns de randvillkor balken satts upp med. De gröna strecken visar vilka ytor som sitter ihop med kontaktrandvillkoret *fastened connection property*.



De röda symbolerna i bilden ovan visar symmetrirandvillkoren som möjliggör delningen i balkens symmetriplan.



De röda symbolerna i bilden ovan visar hur krafter och moment har applicerats på dragbalkshylsar i FEM-analysen.

BILAGA 4

Vickers HV 5

F = 49,02 N \pm 5 kp

Diagonale mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,06						2194	2128	2065	2006	1848
0,07	1892	1839	1789	1740	1693	1648	1605	1564	1524	1486
0,08	1449	1413	1379	1346	1314	1283	1253	1225	1197	1171
0,09	1145	1120	1095	1072	1049	1027	1006	986	966	946
0,10	927	908	891	874	857	841	825	810	795	781
0,11	766	752	739	726	713	701	689	677	666	655
0,12	644	633	623	613	603	593	584	575	566	558
0,13	549	540	532	524	516	509	502	494	487	480
0,14	473	466	460	454	447	441	435	429	423	418
0,15	412	407	401	396	391	386	381	376	371	367
0,16	362	358	353	349	345	341	336	332	329	325
0,17	321	317	313	310	306	303	299	296	293	289
0,18	286	283	280	277	274	271	268	265	262	260
0,19	257	254	251	249	246	244	241	239	236	234
0,20	232	229	227	225	223	221	219	216	214	212
0,21	210	208	206	204	203	201	199	197	195	193
0,22	192	190	188	187	185	183	182	180	178	177
0,23	175	174	172	171	169	168	167	165	164	162
0,24	161,0	159,6	158,3	157,0	155,7	154,5	153,2	152,0	150,8	149,5
0,25	148,3	147,1	146,0	144,9	143,7	142,6	141,5	140,4	139,3	138,2
0,26	137,2	136,1	135,1	134,0	133,0	132,0	131,0	130,1	129,1	128,1
0,27	127,2	126,3	125,4	124,4	123,5	122,6	121,7	120,8	120,0	119,1
0,28	118,3	117,4	116,6	115,8	115,0	114,2	113,4	112,6	111,8	111,0
0,29	110,3	109,5	108,8	108,0	107,3	106,6	105,8	105,1	104,4	103,7
0,30	103,0	102,3	101,6	101,0	100,3	99,7	99,0	98,4	97,8	97,1
0,31	96,5	95,9	95,3	94,6	94,0	93,4	92,9	92,3	91,7	91,1
0,32	90,6	90,0	89,4	88,9	88,3	87,8	87,2	86,7	86,2	85,7
0,33	85,2	84,6	84,1	83,6	83,1	82,6	82,1	81,6	81,2	80,7
0,34	80,2	79,7	79,3	78,8	78,4	77,9	77,5	77,0	76,6	76,1
0,35	75,7	75,3	74,9	74,4	74,0	73,6	73,2	72,8	72,4	72,0
0,36	71,6	71,2	70,8	70,4	70,0	69,6	69,2	68,8	68,5	68,1
0,37	67,4	67,4	67,0	66,6	66,3	66,0	65,6	65,2	64,9	64,6
0,38	64,2	63,9	63,6	63,2	62,9	62,6	62,3	61,9	61,6	61,3
0,39	61,0	60,7	60,3	60,0	59,7	59,4	59,1	58,8	58,5	58,3
0,40	58,0	57,7	57,4	57,1	56,8	56,5	56,3	56,0	55,7	55,4
0,41	55,2	54,9	54,6	54,4	54,1	53,9	53,6	53,3	53,1	52,8
0,42	52,6	52,3	52,1	51,8	51,6	51,3	51,1	50,9	50,6	50,4
0,43	50,2	49,9	49,7	49,5	49,2	49,0	48,8	48,6	48,3	48,1
0,44	47,9	47,7	47,5	47,3	47,0	46,8	46,6	46,4	46,2	46,0
0,45	45,8	45,6	45,4	45,2	45,0	44,8	44,6	44,4	44,2	44,0
0,46	43,8	43,6	43,4	43,3	43,1	42,9	42,7	42,5	42,3	42,2
0,47	42,0	41,8	41,6	41,4	41,3	41,1	40,9	40,8	40,6	40,4
0,48	40,2	39,9	39,7	39,7	39,6	39,4	39,3	39,1	38,9	38,8
0,49	38,6	38,5	38,3	38,2	38,0	37,8	37,7	37,5	37,4	37,3
0,50	37,1	37,0	36,8	36,7	36,5	36,4	36,2	36,1	35,9	35,8
0,51	35,6	35,5	35,3	35,2	35,1	35,0	34,8	34,7	34,6	34,4
0,52	34,3	34,2	34,0	33,9	33,8	33,6	33,5	33,4	33,3	33,1
0,53	33,0	32,9	32,8	32,6	32,5	32,4	32,3	32,2	32,0	31,9
0,54	31,8	31,7	31,6	31,5	31,3	31,2	31,1	31,0	30,9	30,8
0,55	30,7	30,5	30,4	30,3	30,2	30,1	30,0	29,9	29,8	29,7
0,56	29,6	29,5	29,4	29,3	29,2	29,1	28,9	28,8	28,7	28,6
0,57	28,5	28,4	28,3	28,2	28,1	28,0	28,0	27,9	27,8	27,7
0,58	27,6	27,5	27,4	27,3	27,2	27,1	27,0	26,9	26,8	26,7
0,59	26,6	26,6	26,5	26,4	26,3	26,2	26,1	26,0	25,9	25,8
0,60	25,8	25,7	25,6	25,5	25,4	25,3	25,3	25,2	25,1	25,0
0,61	24,9	24,8	24,8	24,7	24,6	24,5	24,4	24,4	24,3	24,2
0,62	24,1	24,0	24,0	23,9	23,8	23,8	23,7	23,6	23,5	23,4
0,63	23,4	23,3	23,2	23,1	23,1	23,0	22,9	22,9	22,8	22,7
0,64	22,6	22,6	22,5	22,4	22,4	22,3	22,2	22,2	22,1	22,0
0,65	22,0	21,9	21,8	21,7	21,7	21,6	21,6	21,5	21,4	21,4
0,66	21,3	21,2	21,1	21,1	21,0	21,0	20,9	20,8	20,8	20,7
0,67	20,7	20,6	20,5	20,5	20,4	20,3	20,3	20,2	20,2	20,1
0,68	20,1	20,0	19,9	19,9	19,8	19,8	19,7	19,7	19,6	19,5
0,69	19,5	19,4	19,4	19,3	19,3	19,2	19,1	19,1	19,0	19,0
0,70	18,9	18,9	18,8	18,8	18,7	18,7	18,6	18,6	18,5	18,4
0,71	18,4	18,3	18,3	18,2	18,2	18,1	18,1	18,0	18,0	17,9
0,72	17,9	17,8	17,8	17,7	17,7	17,6	17,6	17,5	17,5	17,5
0,73	17,4	17,4	17,3	17,3	17,2	17,2	17,1	17,1	17,0	17,0

Umwertungstabelle / Conversion table / Tableau de conversion

Für unlegierte und niedriglegierte Stähle und Stahlguß im warmgewalzten oder wärmebehandelten Zustand. Bei hochlegierten und/oder kaltverfestigten Stählen sind erhebliche Abweichungen bei der Umwertung zu erwarten.

For plain and low-alloy steels and steel castings in hot-rolled or heat-treated state. In case of high-alloy and/or cold work-hardened steels considerable deviations during conversion are to be expected.

Pour acier non-allié et faiblement allié ainsi que pour acier coulé dans l'état laminé à chaud ou traité à chaud. Pour acier fortement allié et/ou écroui des déviations considérables peuvent apparaître à la conversion.

Vickers (F ≥ 98 N) HV	Brinell ¹⁾ (0,102 · F/D ² =30) HB	Zugfestigkeit Tensile strength Résistance à la traction N/mm ²	Rockwell						
			HRB	HRC	HRA	HRD ²⁾	HR 15 N	HR 30 N	HR 45 N
80	76,0	255							
85	80,7	270	41,0						
90	85,5	285	48,0						
95	90,2	305	52,0						
100	95,0	320	56,2						
105	99,8	335							
110	105	350	62,3						
115	109	370							
120	114	385	66,7						
125	119	400							
130	124	415	71,2						
135	128	430							
140	133	450	75,0						
145	138	465							
150	143	480	78,7						
155	147	495							
160	152	510	81,7						
165	156	530							
170	162	545	85,0						
175	166	560							
180	171	575	87,1						
185	176	595							
190	181	610	89,5						
195	185	625							
200	190	640	91,5						
205	195	660	92,5						
210	199	675	93,5						
215	204	690	94,0						
220	209	705	95,0						
225	214	720	96,0						
230	219	740	96,7						
235	223	755							
240	228	770	98,1	20,3	60,7	40,3	69,6	41,7	19,9
245	233	785		21,3	61,2	41,1	70,1	42,5	21,1
250	238	800	99,5	22,2	61,6	41,7	70,6	43,4	22,2
255	242	820		23,1	62,0	42,2	71,1	44,2	23,2
260	247	835	(101)	24,0	62,4	43,1	71,6	45,0	24,3
265	252	850		24,8	62,7	43,7	72,1	45,7	25,2
270	257	865	(102)	25,6	63,1	44,3	72,6	46,4	26,2
275	261	880		26,4	63,5	44,9	73,0	47,2	27,1
280	266	900	(104)	27,1	63,8	45,3	73,4	47,8	27,9
285	271	915		27,8	64,2	46,0	73,8	48,4	28,7
290	276	930	(105)	28,5	64,5	46,5	74,2	49,0	29,5
295	280	950		29,2	64,8	47,1	74,6	49,7	30,4
300	285	965		29,8	65,2	47,5	74,9	50,2	31,1
310	295	985		31,0	65,8	48,4	75,6	51,3	32,5
320	304	1030		32,2	66,4	49,4	76,2	52,3	33,9
330	314	1080		33,3	67,0	50,2	76,8	53,6	35,2
340	323	1095		34,4	67,6	51,1	77,4	54,4	36,5
350	333	1125		35,5	68,1	51,9	78,0	55,4	37,8
360	342	1155		36,6	68,7	52,8	78,6	56,4	39,1
370	352	1190		37,7	69,2	53,6	79,2	57,4	40,4
380	361	1220		38,8	69,8	54,4	79,8	58,4	41,7
390	371	1255		39,8	70,3	55,3	80,3	59,3	42,9
400	380	1290		40,8	70,8	56,0	80,8	60,2	44,1
410	390	1320		41,8	71,4	56,8	81,4	61,1	45,3
420	399	1350		42,7	71,8	57,5	81,8	61,9	46,4
430	409	1385		43,6	72,3	58,2	82,3	62,7	47,4
440	418	1420		44,5	72,0	58,8	82,8	63,5	48,4
450	428	1455		45,3	73,3	59,4	83,2	64,3	49,4
460	437	1485		46,1	73,6	60,1	83,6	64,9	50,4
470	447	1520		46,9	74,1	60,7	83,9	65,7	51,3
480	(456)	1555		47,7	74,5	61,3	84,3	66,4	52,2
490	(466)	1595		48,4	74,9	61,6	84,7	67,1	53,1

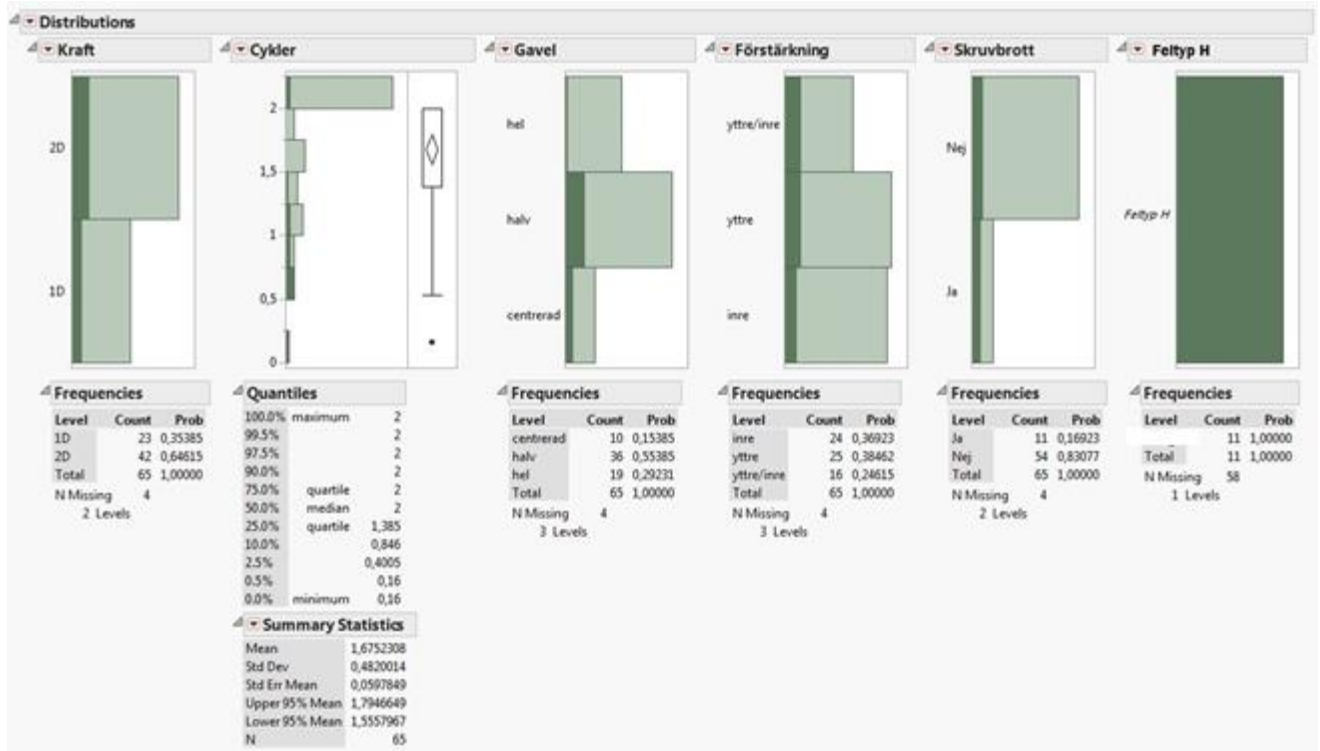
Umwertungs-
tabelle 1



BILAGA 5

I ett försöka att finna statistiska samband mellan olika defekter och balkkonfigurationer användes programvaran JMP. JMP kopplar ihop statistik och grafik och låter användaren att på ett enkelt och interaktivt sätt förstå och utforska data.

I bilden nedan görs ett försök att hitta samband mellan typ av dragbalk och uppkommen defekt, feltyp H. De mörkgröna delarna av diagrammen nedan visar kopplingen till feltyp H.



Med mer kunskap om programvaran och mer indata i form av en vidareutvecklad provsammanställning tror vi att JMP skulle kunna vara ett kraftfullt verktyg för att hitta samband mellan defekt och balkkonfiguration.

BILAGA 6

