

# **Laser- och abrasiv vattenskärning av fiberarmerad plast**

Petter Kristian Selenius

EXAMENSARBETE	
Arcada	
Utbildningsprogram	Plastteknik 2008 / Plastics Technology 2008
Identifikationsnummer	3812
Författare:	Petter Selenius
Arbetets namn:	Laser- och abrasiv vattenskarving av fiberarmerad plast
Handledare (Arcada):	Rene Herrmann
Uppdragsgivare:	Arcada
<p>Sammandrag:</p> <p>Det här arbetet handlar om att finna parametrar för laser- och abrasiv vattenskarving av fiberarmerad plast som ger en tillräckligt bra skäryta. Materialena som undersöktes begränsades till glasfiber-, kolfiber- och kevlarplattor. Mätning av skärkvalitet undersöktes såväl som teori om de olika fibrerna samt lasern och den abrasiva vattenskarvingen. Den experimentella delen delades in i två skilda delar. Den första delen handlade om att testa de olika skärmetoderna och välja antingen laser eller abrasiv vattenskarving till den andra delen som handlade om att undersöka ifall delamination av de komposita plattorna beror på skärhastigheten eller avståndet till en färdigt skuren sida. Då lasern uppvisade ett mycket sämre resultat gjordes det andra skedet med abrasiv vattenskarving. Skärytan fotograferades och bilden manipulerades sedan så att delaminationen kunde räknas ut. Som resultat fanns att delaminationen inte verkar bero på skärhastigheten eller avståndet till en färdigt skuren sida. Delamination är ändå ett problem vid penetrering av materialet vid början av klippningen men detta går att kringgå genom att börja skära från ett färdiggjort hål eller genom att börja skärningen utanför materialet. Skärhastigheterna uppmättes till 3000 mm/min, 2900 mm/min och 2000 mm/min för glasfiber-, kolfiber- och kevlarplattorna respektive. Hastigheterna var betydligt högre än de som källorna angivit; 150 mm/min, 168 mm/min och 762 mm/min respektive.</p>	
Nyckelord:	Laser, laserskarving, abrasiv, vattenskarving, AWJ, kolfiber, glasfiber, aramid, kevlar, komposit, fiber, Laserle
Sidantal:	39
Språk:	Svenska
Datum för godkännande:	28.5.2012

DEGREE THESIS	
Arcada	
Degree Programme:	Plastteknik 2008 / Plastics Technology 2008
Identification number:	3812
Author:	Petter Selenius
Title:	Laser- and abrasive waterjet cutting of fiber reinforced plastic
Supervisor (Arcada):	Rene Herrmann
Commissioned by:	Arcada
<p>Summary:</p> <p>This thesis is about finding parameters for laser- and abrasive waterjet cutting of fiber reinforced plastic that give a good enough quality of the cut. The materials studied were narrowed down to glassfiber-, carbonfiber and kevlarplates. The measuring of the quality of the cut was studied aswell as information about the different materials and the laser and the abrasive waterjet. The experimental part was divided in two. The first part was about testing the different methods and chosing either laser or abrasive waterjet cutting to the second part that was about determine if delamination of the composite plates varies with the cutting speed or the distance to an already cut side. Since the laser showed a much worse cutting quality was the second part done with abrasive waterjet. The cut edge was photographed and the picture was manipulated so that delamination could be calculated. The results gotten showed that the delamination does not seem to depend on the cutting speed or the distance from a precut edge. Delamination is still a problem at the intial penetration of the materia. This is however avoidable by starting the cut from a prebored hole or from outside of the material. The cuttingspeeds were measured to 3000 mm/min, 2900 mm/min and 2000 mm/min for glassfiber-, carbonfiber- and kevlarplates respectively. The cuttingspeeds were notably higher than the ones gotten from sources; 150 mm/min, 168 mm/min and 762 mm/min respectively.</p>	
Keywords:	Laser, lasercutting, abrasive waterjet, AWJ, carbonfiber, glassfiber, aramid, kevlar, fiber, composite, Laserle
Number of pages:	39
Language:	Swedish
Date of acceptance:	28.5.2012

# Innehållsförteckning

<b>1 FÖRORD</b> .....	<b>6</b>
<b>2 INTRODUKTION</b> .....	<b>7</b>
2.1 Problembeskrivning .....	7
2.2 Arbetets syfte och metod .....	8
<b>3 TEORI</b> .....	<b>8</b>
3.1 Skärkvalitet .....	9
3.2 Analys av delaminering.....	11
3.3 Komposita material .....	12
3.3.1 <i>Fibrer</i> .....	13
3.3.2 <i>Matrismaterial</i> .....	14
3.3.3 <i>Sandwichkonstruktioner</i> .....	15
3.4 Laserskärning .....	16
3.5 Abrasiv vattenskärning.....	18
3.6 Andra skärmetoder .....	19
3.6.1 <i>Sågning</i> .....	19
3.6.2 <i>Ultraljud</i> .....	20
3.7 Kvalitetsgranskning.....	20
<b>4 EXPERIMENTELL METOD</b> .....	<b>21</b>
4.1 Planering av test .....	21
4.2 Material .....	21
4.3 Profilerna.....	21
4.3.1 <i>Profilen i den preliminära analysen</i> .....	22
4.3.2 <i>Profilen i den detaljerade analysen</i> .....	22
<b>5 RESULTAT</b> .....	<b>23</b>
5.1 Preliminär analys .....	23
5.1.1 <i>Laserskärning</i> .....	23
5.1.2 <i>Abrasiv vattenskärning</i> .....	24
5.1.3 <i>Slutsatser</i> .....	25
5.2 Detaljerad analys .....	26
5.2.1 <i>Bildbehandling</i> .....	27
5.2.2 <i>Uppmätt skärkvalitet</i> .....	29
<b>6 SLUTSATSER</b> .....	<b>32</b>
<b>7 REKOMMENDATIONER</b> .....	<b>33</b>

<b>8</b>	<b>KÄLLFÖRTECKNING</b> .....	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>BILAGOR</b> .....	<b>37</b>
9.1	Uppmätt skärkvalitet vid skärning av glasfiber.....	37
9.2	Uppmätt skärkvalitet vid skärning av kolfiber.....	38
9.3	Uppmätt skärkvalitet vid skärning av kevlar.....	39

# 1 FÖRORD

Det hade kommit fram tidigare under studierna att jag jobbade inom metallbranschen med laser- och abrasiv vattenskrining på Laserle Ab. Då Rene Herrmann presenterade idén för slutarbetet var jag mycket nöjd över att kunna kombinera jobb och studier. Ett personligt intresse till kompositer och ett yrkesmässigt intresse till de olika skärmetoderna gav mycket motivation under arbetsprocessen. Ämnet i sig föreföll ganska nytt och udda, vilket också märktes i svårigheterna i att hitta bra och pålitliga källor. Det jag också märkte är att det tycks finnas en mycket stor kunskapskälla i bakhuvudet på folk inom varje industribransch som aldrig blir tryckt svart på vitt.

Jag vill rikta ett stort tack till min sambo Tanja Renman som stod ut med min isolering under kvällarna efter att våra barn, Emil och Linnéa, (äntligen) somnat.

Rene Herrmann som har varit ett otroligt stöd och motivationskälla under hela arbetsprocessen förtjänar också ett stort tack.

Ett speciellt tack förtjänar Laserle Ab för att jag fått använda maskinerna till experimenten utan kostnad. Också flexibiliteten i arbetstiderna som jag unnats under hela studietiden har gjort allting mycket lättare.

Sist men absolut inte minst vill jag tacka mina föräldrar Eija och Kjell som under hela studietiden bistått med ett månatligt understöd. Utan det skulle hela studietiden varit oändligt mycket krångligare.

Helsingfors i maj 2012

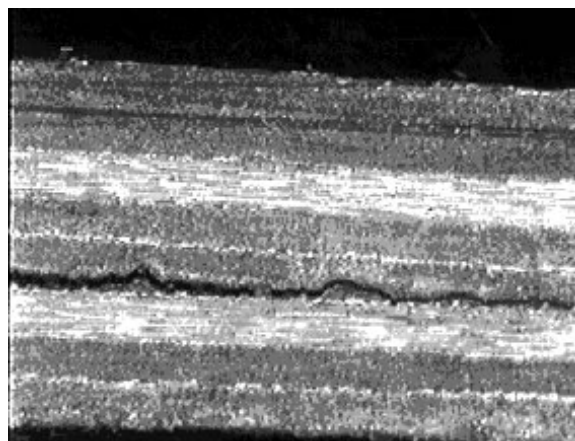
Petter Selenius

## 2 INTRODUKTION

Ett laminerat material består av fibrer som hålls ihop med hjälp av en matris. Då det laminerade materialet ska skäras uppstår det problem på grund av att materialet inte är homogent. Fibrerna och matrisen har olika egenskaper och uppför sig då olika då de utsätts för termiska eller mekaniska påfrestningar. I laserskärning behöver fibrerna mer energi för att klippas än vad matrisen behöver. (Lau 1990 s.179) Detta kan leda till att skärytan bränns och konturen som skulle skäras inte kan användas då egenskaperna förändrats eller då konturen har fel dimensioner.

### 2.1 Problembeskrivning

Vid abrasiv vattenskränning är delaminering d.v.s. att de olika lagren separeras, mest troligt att uppkomma i början av klippningen, då materialet penetreras av vattenstrålen. Delamination uppstår då fiberlagren har gått ifrån varandra och materialet inte är enhetligt mera. När vattenstrålen kommit igenom materialet är det mindre risk för delamination. Detta medför att det är fördelaktigt att påbörja klippningen utanför materialet så att strålen sedan körs in från sidan av stycket eller att klippningen börjas så långt från konturen som möjligt om inkörning inte är möjligt. Ett annat problem är att vatten och sand kan tränga in mellan matrisen och fibrerna. (Strong 2008 s. 369)



*Figur 1. Delamination (MERL Ltd 2011)*

## 2.2 Arbetets syfte och metod

Jag påstår att det finns parametrar med vilka det går att klippa laminerade material med hjälp av CNC styrda laser- och abrasiva vattenskarare så att en skäryta med ett  $R_a$  värde på åtminstone 6,3 uppnås. Målet med detta arbete är att finna och pröva dessa parametrar.

Påståenden:

- Det går att klippa komposita material med laser- och/eller abrasiv vattenskarning så att en tillräckligt bra skäryta uppnås.
- Det finns ett samband mellan delamination och avståndet till en sida som redan blivit skuren.

En vetenskaplig litteraturstudie genomförs kring skärning av komposita material.

Praktiska test utförs sedan med informationen från litteraturstudien som grund.

Då de olika materialen kan variera i både tjocklek, fiberriktning, själva fibermaterialet och matrismaterialet kommer det endast att prövas tre olika kombinationer av dessa; kolfiber, glasfiber och kevlar.

En preliminär analys genomförs först med både laser- och abrasiv vattenskarning för att få reda på vilken metod som är bäst lämpad för fortsatt analys. Där skärs en kontur ut med respektive skärmetod och skärkvaliteten jämförs. I den detaljerade analysen skärs en annan kontur ut med den valda tekniken och skärytan analyseras noggrannare genom att bildmanipulation på bilder tagna på skärytan.

## 3 TEORI

I det här kapitlet definieras nyckelbegrepp som är anknutna till problemet. Hur de olika fibrerna produceras har inte beaktats då det inte ansågs vara relevant för arbetet.



### 3.1 Skärkvalitet

Då ett material behandlas mekaniskt uppstår det en yta som med fördel ska göras så bra som möjlig. Ifall ytan är för dålig, behövs det extra arbetsinsatser för att få den att passa ihop med andra bitar eller för att få den estetiskt tilltalande om det är en synlig yta. Också om ytan är bättre än vad som är ändamålsenligt är detta oekonomiskt då det ödots resurser på någonting som inte gett mervärde.

Med snittyta menar man den ofta vinkelräta ytan som uppstår då materialet har skurits. Sneda ytor kan förekomma om maskiner med vridbart skärhuvud har använts. För att en snittyta ska anses vara bra ska den vara tillräckligt slät för att uppfylla sin uppgift. En yta mot en roterande axel ska vara slätare än en yta som inte syns och inte har någon speciell uppgift. Ytors släthet kan mätas med ett  $R_a$  värde, ett numeriskt värde som anger medelavvikelsen från mittlinjen på en yta och definieras:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (1)$$

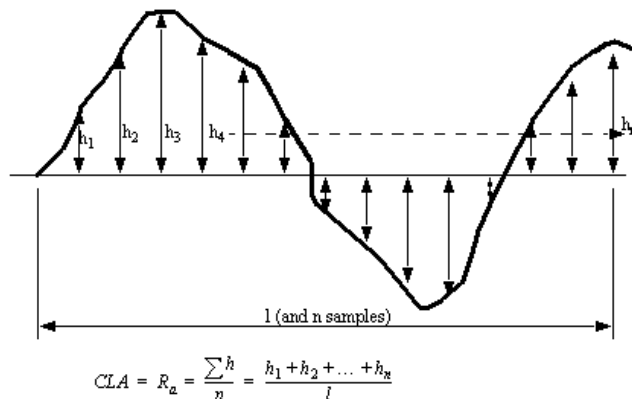
där

L = längden på ytan

$y(x)$  = profilen på ytan som en funktion av x

x = profilens riktning

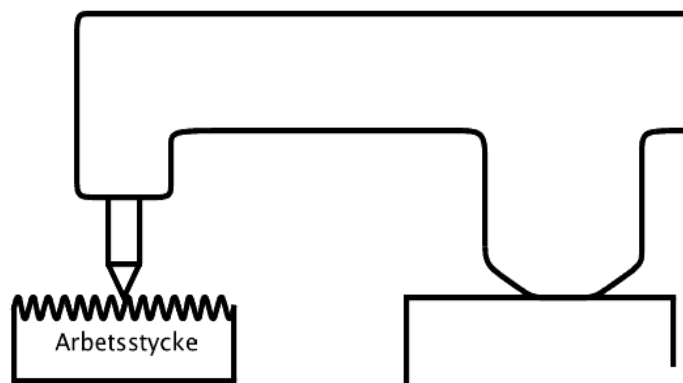
Figur 2 visar funktion (1) på ett grafiskt vis. Där adderas skillnader på ytan till mittlinjen som sedan delas på längden.



Figur 2. Uträkning av  $R_a$  värde grafiskt. (Hugh 2010)



Figur 3. Ytjämnhetsmätare (Mitutoyo Scandinavia Ab)

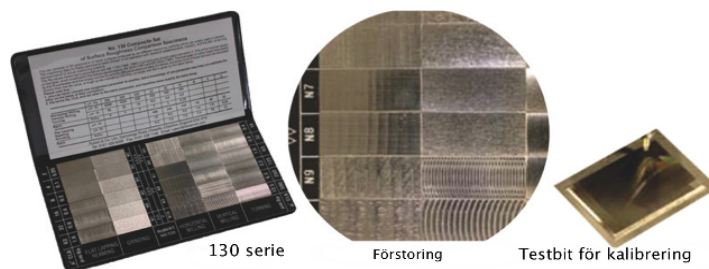


Figur 2. Mätning av  $R_a$ -värde (Hugh 2010).

$R_a$  värden kan mätas med så kallade surftester, se figur 3. En ytjämnhetsmätare kalibreras och förs över ytan.  $R_a$  värdet utläses sedan från skärmen. (Mitutoyo Scandinavia Ab, 2012)

Figur 4 visar principen för ytjämnhetsmätare. En nål förs över arbetsstycket vars ojämnheter registreras av en sensor i ytjämnhetsmätaren.

Ifall ytjämnhetsmätare inte är tillgängliga kan kvalitativa tester utföras för att avgöra hurdan yta produkten har. Ytan jämförs mot ett set (se figur 5) med definierade ytjämnheter genom optisk inspektion och känsel. (Hugh 2010)



Figur 5. Ytjämnhetsset för kvalitativ jämförelse (Teräskonttori Oy)

Spår av skärningen kan också förekomma på den undre ytan, ifall materialet fläkts upp då laser- eller vattenstrålen penetrerat det understa lagret. Delaminering kan också förekomma på övre ytan där klippningen påbörjats. Delamineringen bör minimeras eller elimineras helt för att skärkvaliteten ska anses vara bra. Då delamination förändrar objektets fysiska egenskaper är stycken med för mycket delamination inte användbara längre efter skärningen om inte stycket lamineras på nytt.

### 3.2 Analys av delaminering

För att granska hur mycket delaminering som uppstår under klippningen kan skärytan fotograferas. Med hjälp av ett bildbehandlingsprogram kan man sedan manipulera bilden så att man kan urskilja hur stor del av ytan som är delaminerad och hur mycket av ytan som fortfarande är hel. En procentuell delamination av ytan kan sedan räknas ut med formeln:

$$\frac{A_d * 100}{A_{Tot}} = \frac{Np_d * 100}{Np_{Tot}} = \% del. \quad (2)$$

där

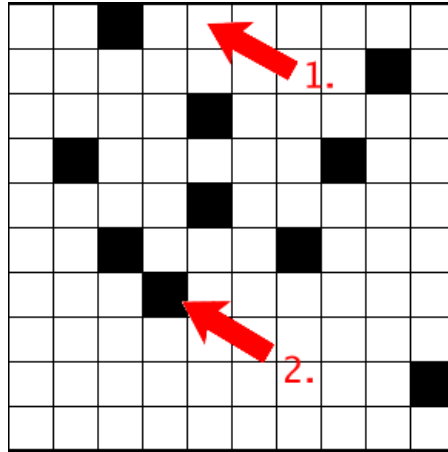
$A_d$  = delaminerade arean

$A_{Tot}$  = totala arean

$Np_d$  = antal delaminerade pixlar

$Np_{Tot}$  = totala antalet pixlar

% del. = den procentuella andelen delamination på den granskade ytan



Figur 6. Schematisk framställning av formel (2) som ger en delaminationsprocent på 10 % där:  
 1. hel, odelaminerad areaenhet och  
 2. delaminerad areaenhet  
 (Petter Selenius)

Delamineringsanalysen med hjälp av digital bildbehandling är schematiskt framlagd i figur 6. Då den totala arean,  $A_{Tot}$ , är 100 areaenheter och antalet delaminerade areaenheter,  $A_d$ , är 10 st. får man av formel (2) den procentuella andelen delamination på den granskade ytan till 10%.

Metoden är inte felfri då skuggor, ojämnheter och annat kan te sig som delamination när arean granskas med bildbehandlingsprogrammet. Detta leder till en delamineringsprocent som är högre än den som i verkligheten finns på arean som granskas. Det här ses dock inte som ett problem.

### 3.3 Komposita material

Ett material som innehåller två eller flera olika komponenter kallas för ett komposit material. Komponenterna bör kunna gå att urskiljas. Ifall de har smält ihop helt eller är upplösta i varandra kallas det inte mera ett komposit material utan en legering.

Komponenterna kan vara likvärdiga och vara av samma typ eller så kan en komponent verka mera som ett ämne som håller fast de andra komponenterna. En sådan komponent kallas för matris.

Komponenter kan också vara fint pulver eller fibrer av olika längd. (Saarela 2003 s. 17)

Fördelarna med komposita material är att de förenar fibrernas och matrisens goda egenskaper.

- Hög specifik styvhet, se tabell 1
- Hög specifik hårdhet, se tabell 1
  - De föregående punkterna medför att komposita material är lättare än bitar med samma egenskaper gjorda i metall
- Högre materialutmattningsgräns än för stål och aluminium
  - Komposita material passar bra på platser där materialet utsätts för låga cykliska belastningar (Engineers Edge, 2012a).
- Komposita material oxideras inte då yttre ytan är av plast (Mazumdar 2002 s. 6-7)

Det finns också nackdelar med komposita material. De främsta är att de kostar mycket jämfört med stål eller aluminium samtidigt som produktionshastigheten för att göra en produkt av komposita material är mycket långsammare än att göra samma produkt av metall.

Det här leder till flaskhalsar i produktionen. (Mazumdar 2002 s. 10)

Tabell 1. Olika materials egenskaper (Mazumdar 2002 s. 2)

	Densitet	E-modul	Dragspänning	Specifik styvhet	Specifik hårdhet	Max. anv. temperatur
	( $\rho$ )	(E)	( $\sigma$ )	(E/ $\rho$ )	( $\sigma/\rho$ )	T <sub>max</sub>
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[GPa]	[GPa]			[°C]
<b>Metaller</b>						
Stål, AISI 1045	7,8	205	0,57	<b>26,3</b>	<b>0,073</b>	<b>500-650</b>
Aluminium 6061-T6	2,7	69	0,27	<b>25,5</b>	<b>0,01</b>	150-250
<b>Komposita</b>						
S-glas/epoxy (45%)	1,81	39,5	0,87	21,8	<b>0,48</b>	<b>80-215</b>
Carbon/epoxy (61%)	1,59	142	1,73	<b>89,3</b>	<b>1,08</b>	<b>80-215</b>
Kevlar/epoxy (53%)	1,35	63,6	1,1	<b>47,1</b>	<b>0,81</b>	<b>80-215</b>

Notera i tabell 1 de specifika styvheter och hårdheter av de komposita materialen jämfört med metallerna stål och aluminium. En klar nackdel är den maximala användningstemperaturen.

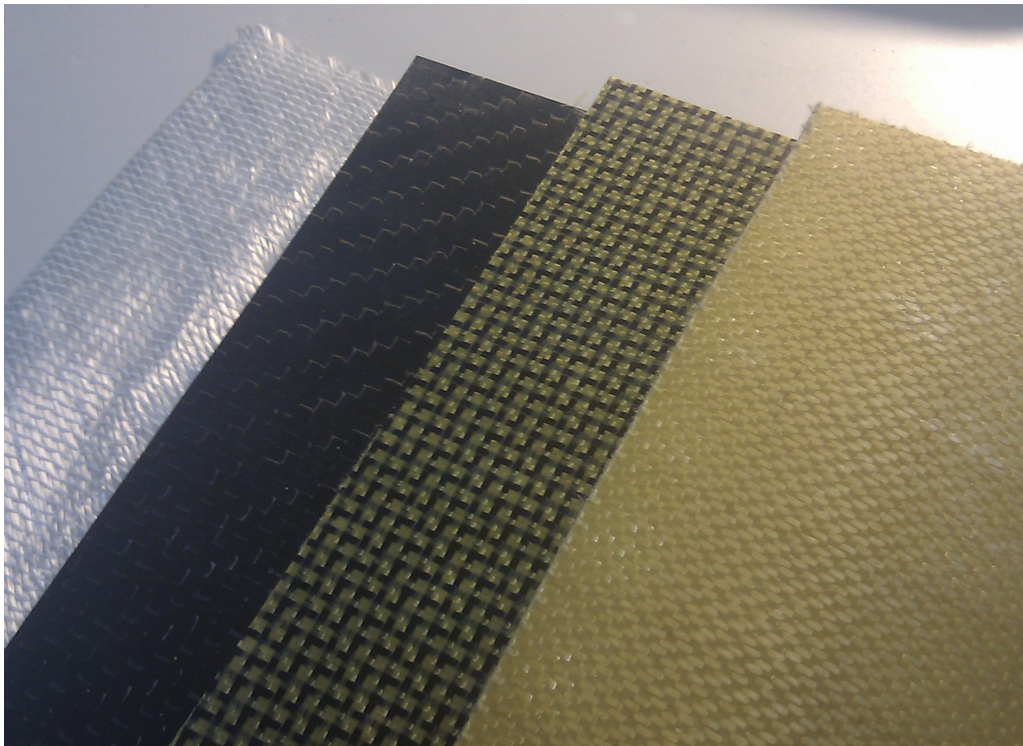
### 3.3.1 Fibrer

Fibrernas huvudsakliga uppgift i komposita material är att bära de krafter som påverkar stycket. De tre mest använda fibrerna är glas-, kol- och aramidfiber. Aramidfiber är mer

känt som kevlar. Tabell 2 visar de olika fibrernas egenskaper samt deras estimerade produktion år 2004. De olika fibrerna finns presenterade i figur 7.

Tabell 2. Fibrernas fysiska egenskaper (Saarela 2003, s. 74, 75, 86, 92)

Fiber	Kommersiellt namn	Densitet ( $\rho$ ) [g/cm <sup>3</sup> ]	E-modul (E) [Gpa]	Dragspänning (E/ $\rho$ ) [Gpa]	Töjning $\epsilon$ %	Estimerad produktion 2004 ton / %
Glasfiber	E-glas	2,54	75	3,6	3,5	2 400 000 / 95,1
Kolfiber	Grafil 34-700-12K	1,8	234	4,5	1,9	37 000 / 1,5
Aramid	Kevlar 49	1,44	124	3,62	2,5	40 000 / 1,6



Figur 7. Från vänster: Glasfibermatta, kolfiber-, kolfiber/aramid-, och aramid platta. (Petter Selenius)

### 3.3.2 Matrismaterial

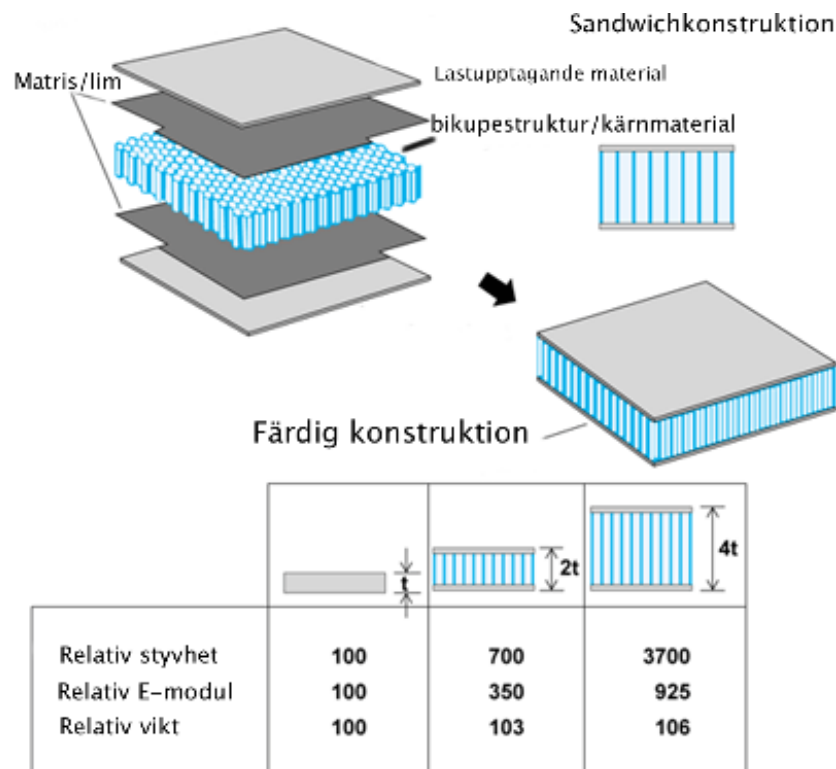
Matrismaterialiet håller ihop fibrerna i kompositstrukturen. Matrisen skyddar också fibrerna från kemikalier och andra yttre faktorer. För att fibrerna ska bära så stor belastning som möjligt måste matrisen också ha mindre E-modul och högre elasticitetsmodul än själva fibrerna. (Mazumdar 2002 s. 28)

Två allmänna matrismaterial är epoxi och polyesterharts. Epoxin blandas av två komponenter, harts och härdare. När de blandas börjar epoxin härdas genom en exoterm reaktion som avger värme. Epoxins fördelar är att det inte krymper vid härdning samt att det har hög elasticitetsmodul och liten vattenabsorbtförmåga. En nackdel är det höga priset på epoxi. Den termiska nedbrytningstemperaturen för epoxi är ungefär 350 °C (Simmons, 2012). (Kevra 2012)

Polyesterharts är en blandning av omättad polyester och styren som härdas med peroxid. Polyesterharts är billigare än epoxi, men har lägre användningstemperatur än epoxin. Också hälsoriskerna vid användningen av styren är en nackdel. Termiska nedbrytningstemperaturen för polyesterharts är nära 300 °C (Hansmann 2003 s. 15). (Kevra 2012)

### 3.3.3 Sandwichkonstruktioner

En sandwichkonstruktion är uppbyggt av ett kärnmaterial som är mellan två tunnare lastupptagande material. Figur 8 visar konstruktionen av ett sandwichmaterial



Figur 8. Sandwichkonstruktion och dess relativa egenskaper (Hexcel Corp).

Som kärnmaterial används ofta skumplaster. Andra möjliga kärnmaterial är bland annat balsa, aluminium och bikupestruktur. (Saarela 2003 s. 23). Kärnmaterialiets huvuduppgift är att hålla de lastupptagande materialen borta från den neutrala axeln. Detta medför att sandwichkonstruktioner har både mycket hög specifik hårdhet och specifik styvhet. (Mazumdar 2002 s. 52)

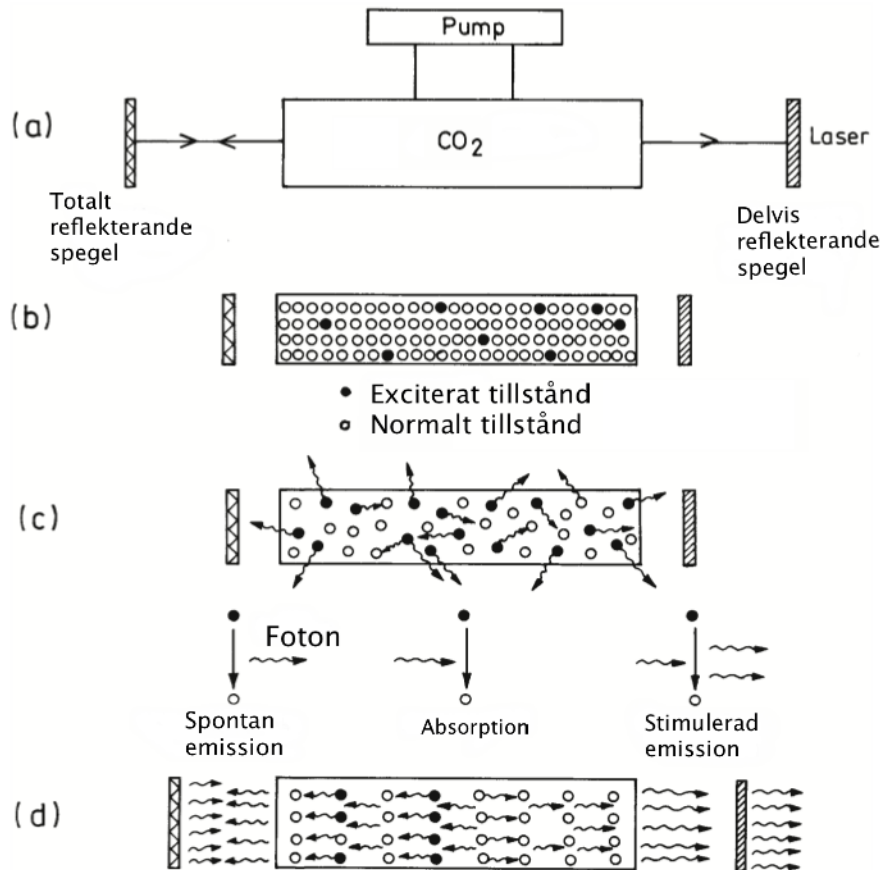
I detta arbete undersöks dock inte skärning av sandwichkonstruktioner med laser- och abrasiv vattenskränning då sandwichkonstruktionernas fysiska egenskaper skiljer sig så pass mycket från kompositer utan kärnmaterial. Framst för att sandwichkonstruktioner är mycket mer heterogena och komplexa än enkla plattor av komposita material på grund av att kärnmaterialiets egenskaper skiljer sig avsevärt från de lastupptagande materialen.

### **3.4 Laserskränning**

Laser är en förkortning av *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Mazumdar 2003, s. 495). I laserskränning koncentreras en stråle av monokromatiskt och konvergent ljus till en punkt av storleken 0,1 till 1 mm på materialet som ska skäras. Skärningen sker genom lokal smältning, förångning och kemisk degradering. (Mazumdar 2002, s. 339).

Laserstrålen bildas i en resonator där fotoner går igenom ett medium som är i ett exciterat tillstånd. Mediumet ligger mellan två speglar, den ena är totalt reflekterande och den andra är delvis reflekterande. När en foton går igenom mediumet, kan en reaktion mellan fotonen och en exciterad atom i mediumet ske. Reaktionen kan vara absorbering, spontan emission eller stimulerad emission. I absorberingsreaktionen exciteras en mediumatom från ett lägre energitillstånd till ett högre av en foton. Vid spontan emission återgår en mediumatom till ett lägre energitillstånd och ger upphov till en foton som i sin tur kan reagera med en mediumatom. Vid stimulerad emission återgår en exciterad mediumatom till sitt normala tillstånd och ger upphov till en till foton med samma frekvens och riktning som den ursprungliga fotonen som reagerat med den exciterade mediumatomen. Figur 9 visar de olika reaktionerna och en lasers viktigaste delar. Då fotonerna går fram och tillbaka genom det exciterade mediumet skapas det fler





Figur 9. Schematisk bild på en Co<sub>2</sub> laser. a) De viktigaste delarna i maskinen, b) begynnelsestillstånd, c) excitation och de-excitation av atomer, d) stimulerad emission och bildning av laserstrålen (Majumdar 2003 s.499)

och fler fotoner med samma frekvens och riktning. Varje gång går en del fotoner igenom den delvis reflekterande spegeln och ger upphov till laserstrålen som styrs med speglar och genom en lins till arbetsstycket. (Majumdar 2003, s. 499-500)

Kolfiber, glasfiber och aramid behöver höga förångningstemperaturer, 3300 °C, 2300 °C och 950 °C respektive. Detta ger upphov till degradering av matrisen lokalt och en bränd snittyta. Laserskärning är mer lämpad för klippning av förimpregnerade mattor än färdigt härdade material. (Mazumdar 2002, s. 339-341) Aramidkompositer kan dock skäras bättre med laser än de andra kompositerna (Saarela 2003, s. 217). Parametrar från källorna är sammanställda i tabell 3.

Tabell 3. Parametrar för laserskärning av laminerade material

Material	Tjocklek [mm]	Hastighet [mm/s]	Effekt [W]	Noter	Källa
Bor/epoxi	-	127	250	Förimpregnerade	Mazumdar 2002 s. 339-341
Aramid/epoxi	-	169	250	Förimpregnerade	"
Aramid/epoxi	5	-	1000	-	"
Aramid/epoxi	7,6	-	1000	Förkolning uppstår	"
Aramid/epoxi	<10	83 - 100		-	Saarela 2003 s. 217
Aramid/epoxi	<10	3		Pulserad klippning för hål	"
Glasfiber	6	33		-	"
Glasfiber	2	250		-	"
Kolfiber	3	33		1 mm från skärytan förkolnat	"

CNC lasern som används i experimenten är en hybrid CNC laser där skärbordet rör sig i en riktning och skärhuvudet rätvinkligt emot den riktningen. Laserenheten är en Rofin Sinar RS 1700 SM CO<sub>2</sub> laser. Skärbordet är av märket Balliu Minotaur och styrenheten är Siemens Ab Sinumerik 810M. Parametrarna som används som grund vid skärningen hittas från tabell 3.

### 3.5 Abrasiv vattenskarvning

I abrasiv vattenskarvning riktas en tunn, högtrycks vattenstråle mot stycket som ska skäras. Före vattenstrålen kommer ut ur munstycket blandas det in fina partiklar som hjälper till att skära materialet. De viktigaste parametrarna i abrasiv vattenskarvning är skärtrycket, skärhastighet, det skurna materialets tjocklek och munstyckets diameter. (Mazumdar 2002 s. 338)

Hurlburt och Cheng experimenterade med att skära komposita material med abrasiv vattenskarvning. De använde bidirektionella fiberlager och epoxi som matris i alla försöken. Skärmunstyckets avstånd från materialet var konstant 3 mm. Fibermaterialen, deras tjocklek, skärparametrarna som användes samt en kvalitativ evaluering av skärkvaliteten fritt översatt från engelska finns i tabell 4.

Tabell 4. Vattenskäring av komposita material (Mazumdar 2002 s. 340)

Fiber	Tjocklek [mm]	Vattentryck [bar]	Diameter [mm]	Skärhastighet [mm/s]	Noter
Kol-	1,70	3792	0,20	25,4	I princip ingen delaminering
	3,45	4137	0,25	12,7	Liten delaminering
	6,93	4137	0,36	2,8	Bra skärning, ingen delaminering
Bor-	1,47	4137	0,30	50,8	Dålig skärning, lösa fibrer vid skärytan
	3,45	4137	0,25	50,8	Dålig skärning, separation av matrislagret, övre och undre
Kevlar	1,47	3792	0,15	50,8	Liten delaminering, undre lagret
	3,18	3792	0,25	12,7	Bra skärning
Glas-	3,53	4137	0,25	2,5	Liten delaminering av det undre lagret
Kol/Bor	2,24	4137	0,30	5,8	Dålig skärning, lösa fibrer vid skärytan
	3,91	4137	0,30	50,8	Dålig skärning, lösa fibrer och delaminering av undre lagret
	8,15	4137	0,36	3,8	Liten delaminering av undre lagret
Kol/Kevlar	3,18	4137	0,25	6,4	Bra skärning
	6,35	4137	0,36	2,0	Mycket bra skärning
Kol/Glas	1,73	3792	0,30	3,8	Bra skärning
	6,43	4137	0,30	3,8	Allvarlig delaminering av undre lagret

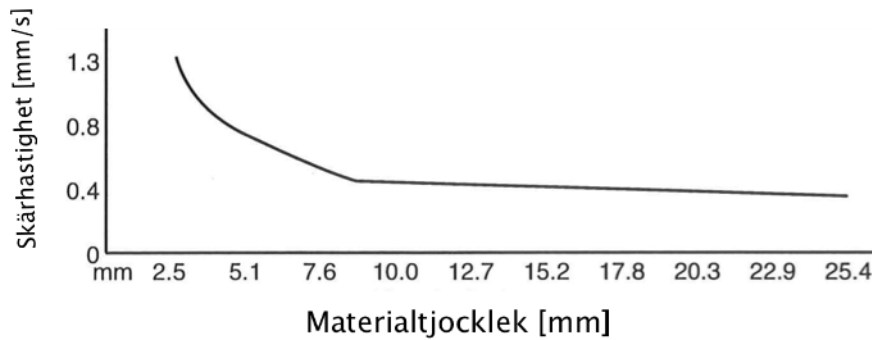
Den abrasiva vattenskäraren som användes i experimenten var en Aliko Watercut. Skärbassängen av modell X-Y 4500-2100, maskinnummer 1615 från 1996.

### 3.6 Andra skärmetoder

Laminerade komposita material kan också skäras med andra metoder än med laser- och abrasiv vattenskäring. Laser- och vattenskäring är dock de mest använda som kommit från flygplansindustrin. (Saarela 2003, s. 214)

#### 3.6.1 Sågning

Vid sågning av laminat med cirkelsåg används ofta blad med diamantbeläggning. Skärhastigheten rekommenderas till 1,3 mm/s för upp till 2,5 mm tjocka laminat, se nedanstående figur 10.



Figur 10. Skärhastighet vid sågning av olika tjockleks laminat med en cirkelsåg (Saarela 2003, s. 215)

Laminat kan också sågas med bandsåg med en hastighet på 3-5 mm/s. Jämför hastigheterna med cirkelsågens i figur 10. Vid sågning av kevlarlaminat rekommenderas ett sågblad med finare sågtänder och att sågriktningen är omvänt vinkelrät mot normalen. (Saarela 2003, s. 215)

### 3.6.2 Ultraljud

Klippning med ultraljud passar bäst klippning av förimpregnerade plattor och baserar sig på ett skärelement som vibrerar med hög frekvens, ofta 20 kHz. Vibrationen minskar friktionen mellan skärelementet och arbetsstycket. Klippningshastigheten är snabbare än med laser- och abrasiv vattenskarvning. (Saarela 2003, s.216)

## 3.7 Kvalitetsgranskning

De metoder som används för att granska skärkvalitén är ofta kvalitativa metoder men man kan också använda sig av optiska- eller svepelektronmikroskop (SEM). De senare passar bäst till att göras efter klippningen, då operatören med en kvalitativ granskning ofta kan avgöra vilka parametrar som ska ändras på för att göra skärkvalitén bättre. Maskinoperatören mäter sällan  $R_a$  värden. Om det färdiga stycket kräver extra fin yta efterbearbetas det genom slipning eller med motsvarande metoder.

## **4 EXPERIMENTELL METOD**

Det här kapitlet behandlar den experimentella delen av arbetet. Experimenten gjordes i två skeden då det inte var klart vilken skärteknik skulle klara sig bättre och ha förutsättningar för att producera tillräckligt bra skärkvalité.

### **4.1 Planering av test**

I den preliminära analysen skärs en profil med både laser- och abrasiv vattenskärning ur alla material med de parametrar som finns i tabellerna 3 och 4 som grund. Den teknik som visar bättre skärresultat fortsätter till det andra skedet som består av att skära de olika materialen med en ny profil för att bättre kunna analysera eventuella problem som funnits.

### **4.2 Material**

De material som klipps i experimenten är följande:

- Kolfiber härdad med epoxi, tjocklek 6 mm.
- Glasfiber härdad med epoxi, tjocklek 5 mm.
- Kevlarfiber härdad med epoxi, tjocklek 4 mm.

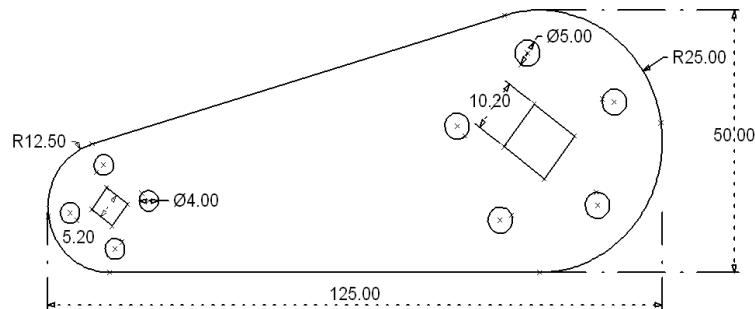
Tjockleken på de olika fiberplattorna som används kommer inte att varieras i experimenten då det skulle resultera i för många olika material att tillverkas och skäras.

### **4.3 Profilerna**

Det användes två olika profiler i experimenten. Profilen i preliminära analysen kan ses som ett eldprov. En ganska krånglig skärning med många penetreringar nära varandra, medan profilen i andra skedet är mer lämpad för att just analysera ifall delamineringen ändrar med avseende på avståndet till en färdigt skuren sida.

### 4.3.1 Profilen i den preliminära analysen

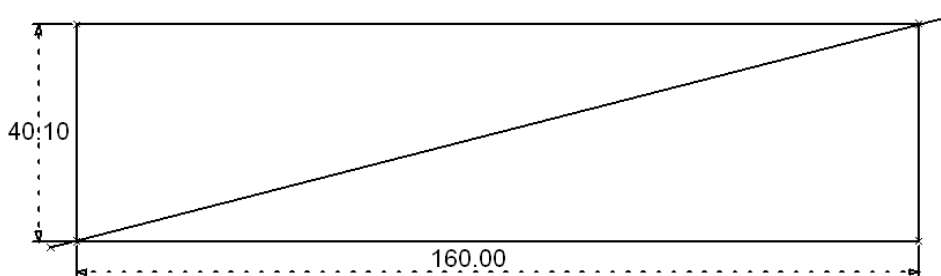
Profilen i figur 11 är en hypotetisk produkt som kunde göras med komposita material men i sig är svår att göra med andra metoder än laser- eller abrasiv vattenskärning. Främst på grund av den kvadratiske öppningen som inte går att borra direkt med en borrhål då det är kvadratisk.



Figur 11. Profilen som användes i första skedet. (Petter Selenius)

### 4.3.2 Profilen i den detaljerade analysen

Profilen i figur 12 är planerad så att man enkelt ska kunna urskilja när delamination uppstår då antingen vatten- eller laserstrålen närmar sig en redan skuren sida. Först skärs rektangeln som sedan halveras längs med diagonalen. Det bör noteras att delamination uppstår genast vid det övre högra hörnet där strålen penetrerar materialet



Figur 12. Profilen i den detaljerade analysen. (Petter Selenius)

vid början av skärningen. Det i sin tur kan också orsaka delamination i följande profils nedre högra hörn då profilerna skärs i serie. Det här kan orsaka fel vid mätningen den procentuella andelen delamination.

## 5 RESULTAT

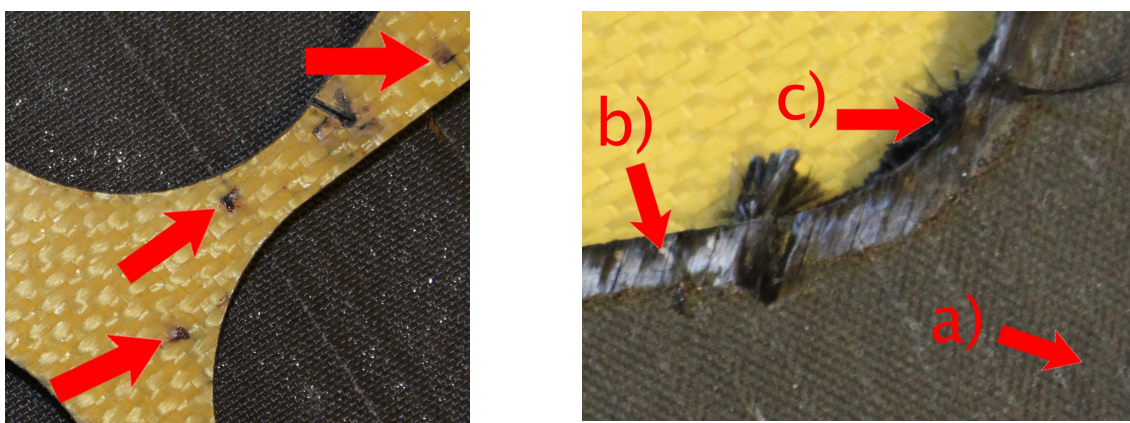
Det här kapitlet handlar om redovisning av resultat samt slutsatser baserade på iakttagna och uppmätta resultat.

### 5.1 Preliminär analys

Resultaten baserar sig på en kvalitativ analys av hurdan skärkvalitet som uppnåddes med de båda skärmetoderna.

#### 5.1.1 Laserskärning

Det blev klart med ens att laser inte passar sig för att skära laminat. Epoxin som förbränns orsakar illaluktande rök i stora mängder. Det bästa skärresultatet uppnåddes då kevlar skars. Skärytan var, trots det goda resultatet, bränd, vilket i sin tur skulle leda till antingen ytterligare arbetsinsatser för att få profilen godkänd eller att profilen inte längre är användbar. Ett annat problem i skärningen av kevlar var att värmen spred sig längs med fibrerna in mot mitten av profilen. Figur 13 till vänster åskådliggör problemet. I och med detta kan man inte garantera att kevlarprofilen håller vad den enligt eventuella hållfasthetsberäkningar borde hålla.



Figur 13. Till vänster: Laserskuren kevlar. De röda pilarna markerar fibrer som bränts på grund av värme som spridits i fibrerna.

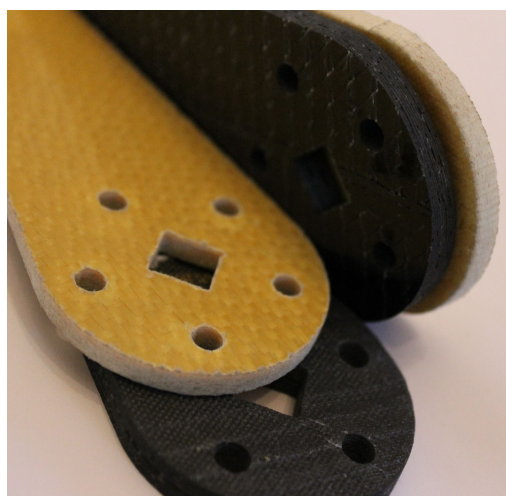
Till höger: laserskuren kolfiber. a) Oförändrad laminerad kolfiber. b) Epoxin bortbränd ur plattan. c) Ofullständig skärning. (Petter Selenius)

Då kolfiber skars var alla problem amplifierade som fanns vid skärning av kevlar. Rökbildningen var massiv och epoxin hade förbränts ungefär 5 mm från skärskåran vilket betyder att profilen i sig inte var användbar. Problemet illustreras till höger i figur 13. Epoxin förbrändes mycket mer än vid skärningen av kevlar för att skärhastigheten var mycket långsammare. Då hastigheten ökades uppkom det områden med ofullständig skärning. Också detta illustreras till höger i figur 13. Värmspridningen längs med fibrerna kunde inte urskiljas då materialet i sig var svart.

Glasfiberplattan kunde inte skäras överhuvudtaget då ledningen på Laserle Ab var rädda för att laserstrålen skulle reflekteras tillbaka mot linsen eller omgivningen och förstöra instrumenten. I och med detta är resultat för laserskärning av glasfiber inte tillgängligt.

### 5.1.2 Abrasiv vattenskärning

Den abrasiva vattenskärningen av materialerna var mycket mer lyckad än laserskärningen. Skärytan var så pass slät att vidare förbättring av den inte var nödvändig. Skärytan är med andra ord så bra att den inte kan uppfattas som ett problem. Det kan konstateras att skärytan blir slätare ju långsammare man skär materialet, men också i gränshastigheter där materialet just och just skärs igenom är skärytan mycket slät. Kevlar- och kolfiberprofilerna i figur 14 är klippta med abrasiv vattenskärning. Skärytorna har inte blivit behandlade efter klippningen.



Figur 14. Kevlar- och kolfiberskiva skuren med abrasiv vattenskärning. (Petter Selenius)



Delamineringen som uppstod då strålen penetrerade materialet vid början av skärningen var ett problem. Figur 15 visar hur mycket delamination det uppkommer i glasfiberprofilen. De ljusa områdena är delamination.



*Figur 15. Glasfiberskiva skuren med abrasiv vattenskärning.  
a) Helt, odelaminerat material.  
b) Delaminerat material  
(Petter Selenius)*

Det var inte möjligt att se exakt hur mycket delamination det fanns i kevlar- och kolfiberprofilerna då de inte är genomskinliga. Endast det att materialet blivit tjockare eller svullit upp nära penetrationspunkterna vittnade om delamination.

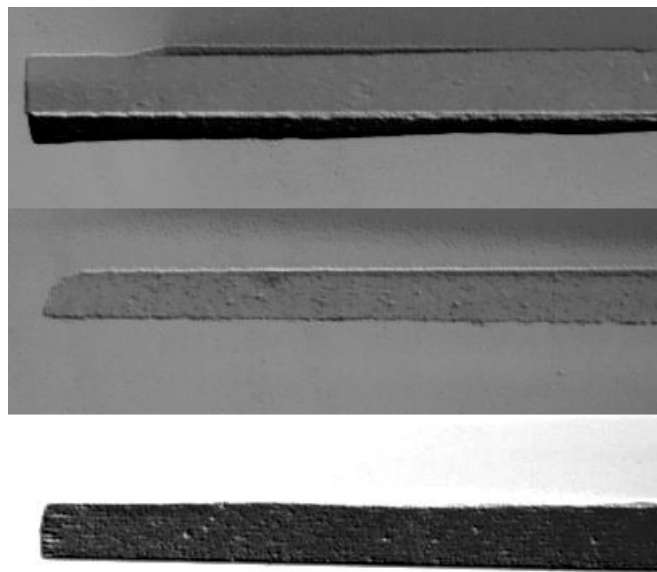
### **5.1.3 Slutsatser**

I det andra skedet kommer enbart vattenskärning studeras då det var klart att laserskärning inte passade lika bra för skärning av komposita material. Visserligen fick man en relativt bra skäryta vid klippning av kevlar, men den var trots allt bränd och värmespridningen i fibrerna var ett klart problem. Också utrustningsmässigt borde investeringar göras för att få rökspridningen under kontroll.

Den abrasiva vattenskärningen verkar mycket lovande som en teknik till att forma komposita material med. Delaminationen är dock ett stort problem och i det andra skedet kommer den att studeras ytterligare.

## 5.2 Detaljerad analys

Provbitarna skars enligt anvisningarna i kapitel 3 och på skärytorna togs det bilder med en Microsoft LifeCam VX-1000 webbkamera och dess program Microsoft LifeCam version 2.07. Hela skärytan fick inte plats på en bild, så det togs två fotografier per skäryta. Då materialen hade olik färg användes olika inställningar för respektive material så att en skarp bild av ytan erhöles. Bilderna togs i gråskala för att underlätta bildbehandlingen senare. Alla bilder togs med samma inställningar per material. Ett urval av bilderna finns nedanför i figur 16.



*Bild 16. Överst: glasfiber. Mitten: kevlar. Underst: kolfiber. (Petter Selenius)*

Glasfiberplattan fotograferades med en kolfiberprofil bakom sig, då den annars skulle ha varit för genomskinlig för att en tillräckligt skarp bild kunde fås.

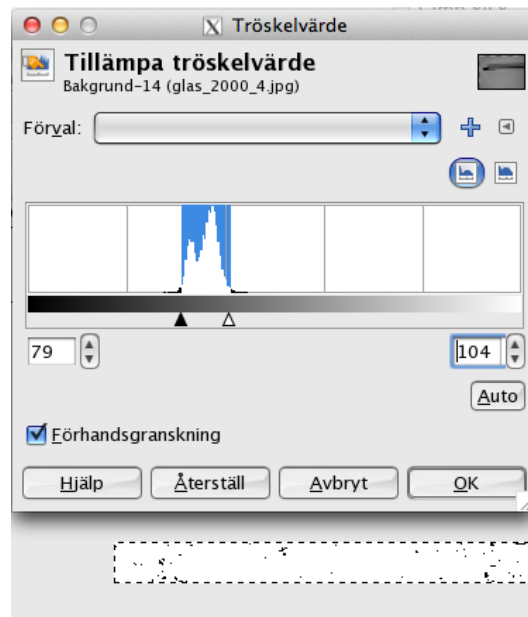
### 5.2.1 Bildbehandling

Som bildbehandlingsprogram användes GNU:s bildmanipuleringsprogram GIMP version 2.6.12. Bilderna på kol- och glasfiberskärytorna beskars till storleken 300\*30 pixlar så att bilderna var dels så stora som möjligt och att kanten på skärytan inte kom med i det beskärda området då det kunde te sig som delamination i de fortsatta stegen. Ifall profilerna var sneda i fotografiet, roterades de så att de var närmast möjligast horisontella och beskärningen lyckades. Kevlarskärytorna måste beskäras till 300\*28 pixlar då kevlarpattan var den tunnaste av de tre materialen. Ifall de skulle ha beskurits till 300\*30 skulle för mycket av kanterna på skärytorna komma med som skulle ha gett fel resultat. Skillnaden i storleken på de olika beskärningarna leder till att resultaten för de olika plattorna inte går att jämföras direkt med varandra då de beskurna bilderna har ett olika antal pixlar i sig. Ifall de då har absolut sett lika mycket delamination så ger det en högre procentuell del i bilderna på kevlar.



*Figur 17. Beskuren bild på en glasfiber skäryta. (Petter Selenius)*

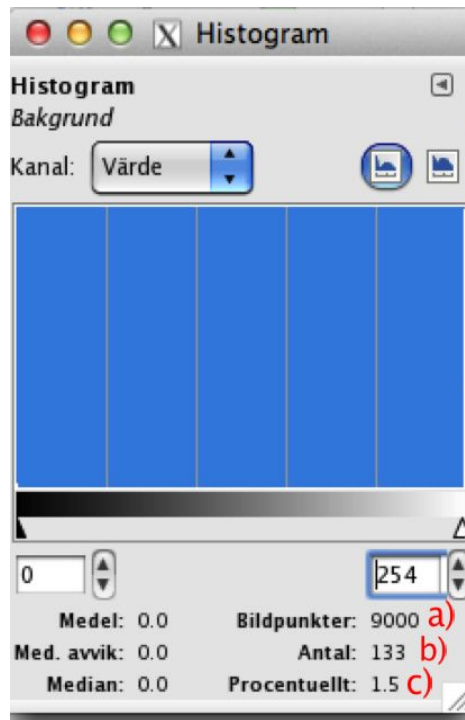
Den beskurna bilden är i gråskala och innehåller flera olika grader av grått blandat med vitt och svart. Figur 17 är ett exempel på en beskuren bild som användes. För att öka kontrasten mellan de mörkaste och ljusaste områdena och för att kunna räkna ut den procentuella andelen delamination måste bilden reduceras till endast två färger, vitt och svart. Kommandot "Tröskelvärde" reducerar bilden till just dessa två färger. När tröskelvärdet anges snävt visas bilden helt i svart och vitt. Pyramiden som finns i figur 18 visar de mörkaste punkterna i bilden. Då delaminationen ses som svart på de tagna



Figur 18. Tröskelvärdet modifierat för en beskuren bild på glasfiber.  
(Petter Selenius)

bilderna, är de mörkaste områdena delamination. När tröskelvärdet definieras så att pyramiden faller innanför gränserna, kommer de mörkaste områdena, d.v.s. delaminationen, att framträda mot ett vitt botten. De svarta pixlarna som nu syns antas vara till stor del delamination. De kan också vara skuggor, heterogena zoner eller andra missfärgningar som blir till svarta pixlar, men då detta skulle leda till att den egentliga delaminationen som undersöks skulle vara mindre än den uppmätta, uppfattas detta inte som ett problem.

De svarta pixlarna räknas med ett histogram som anger den statistiska distributionen av de olika färgerna i bilden, se figur 19. Då bilden är svart-vit finns det bara två färger och histogrammet berättar hur mycket svarta pixlar det finns och samtidigt den procentuella andelen svarta pixlar i hela bilden. Det procenttalet är det tal som anger hur mycket delamination det finns på skärytan.



Figur 19. Histogram på glasfiber från bild 16.  
 a) Totala antalet pixlar  
 b) Antal svarta pixlar  
 c) Procentuella antalet svarta pixlar av hela arean, delaminationsprocenten.  
 (Petter Selenius)

## 5.2.2 Uppmätt skärkvalitet

Alla de uppmätta värden finns i bilaga 1. Delamineringen som uppmättes var inte alls jämn i respektive material. De följande tabellerna visar hur mycket delamination som uppmättes i varje material med avseende på hastigheten. Tabellerna innehåller ett medeltal för den uppmätta delamineringen för respektive hastighet såväl som den minsta och största uppmätta delamineringen och deras differens.

Den uppmätta delamineringen i glasfiberprofilerna i tabell 5 uppvisar det jämnaste resultatet.

Tabell 5: Statistik för delamination i glasfiberprofilerna (Petter Selenius)

<b>Glasfiber statistik</b>				
<b>Hastighet</b>	<b>Medeltal</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Max-Min</b>
[mm/min]	[%]	[%]	[%]	[%]
1500	1,94	1,04	2,83	1,79
2000	1,90	1,31	3,03	1,72
2500	1,64	1,29	2,11	0,82
3000	1,92	1,02	2,42	1,40

Den uppmätta delamineringen i kolfiberprofilen i tabell 6 har det sämsta resultatet med avseende på konsistenta resultat och den uppmätta delamineringen. Medeltalen har stor spridning och de minsta och största värdena har stora skillnader. Det resultat man ser med en kvalitativ granskning av skärytan återspeglar sig inte i den uppmätta delamineringen.

Tabell 6: Statistik för delamination i kolfiberprofilerna (Petter Selenius)

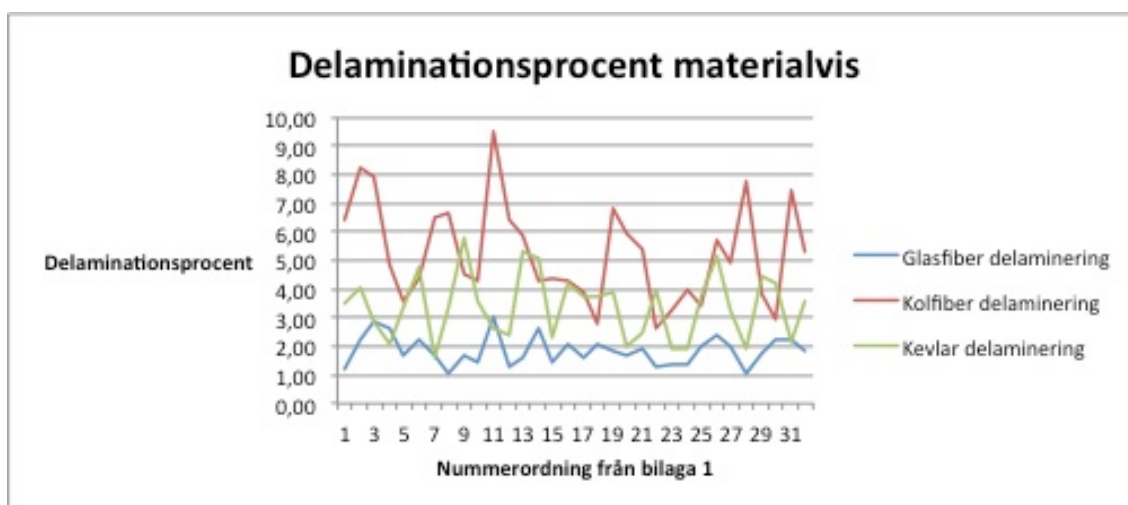
<b>Kolfiber statistik</b>				
<b>Hastighet</b>	<b>Medeltal</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Max-Min</b>
[mm/min]	[%]	[%]	[%]	[%]
1500	6,07	3,58	8,23	4,66
2000	5,44	4,26	9,50	5,24
2400	4,33	2,60	6,83	4,23
2900	5,15	2,92	7,72	4,80

Medeltalen av delaminationerna i kevlarbilderna i tabell 7 är jämna när man jämför de olika hastigheterna, men de minsta och största värden skiljer sig åt ganska mycket sinsemellan.

Tabell 7: Statistik för delamination i kevlarprofilerna (Petter Selenius)

Kevlar statistik				
Hastighet	Medeltal	Min	Max	Max-Min
[mm/min]	[%]	[%]	[%]	[%]
750	3,18	1,60	4,75	3,15
1000	3,91	2,27	5,81	3,54
1500	2,94	1,89	4,00	2,11
2000	3,56	1,93	5,19	3,26

Nedanför är en graf där alla delaminationsvärden materialvis från bilaga 1 är sammanställda. X-axelns nummerordning är tagen från bilaga 1; det första talet är bild 1a från den långsammaste skärhastigheten från respektive material, det andra talet är 1b och så vidare till det sista talet 32 som motsvaras av bild 4b av den snabbaste skärhastigheten av respektive material.



Figur 20. Delaminationsprocent materialvis (Petter Selenius)

Det går tydligt att se att skärningen av glasfiber är den mest konsistenta och den med minst delaminering. Skärningen av kevlar är inte lika konsistent och uppvisar likadan trend som kolfiberskärningen men ändå betydligt bättre uppmätt skärkvalitet med avseendet på delaminationsprocenten.

Det går att urskilja toppar och dalar i kurvorna som återspeglas i de andra materialen. I kolfiberkurvan finns det sex stycken tydliga toppar, motsvarande siffrorna 2, 7/8, 11, 19, 28 och 31. Alla dessa motsvarar en högre delamination tagen på en bild från den tunnare ändan av laminatet förutom siffran 2 som är från tjockare ändan av provbiten.

I kevlarkurvan finns det åtta toppar som går lätt att urskiljas. De motsvaras av siffrorna 2, 6, 9, 13/14, 16/17/18, 22,26 och 29/30. Alla dessa motsvarar en högre delamination tagen på en bild från den tjockare ändan av laminatet, förutom 16 som är från en tunnare ända av provbiten. Jämför med kolfiber som hade en helt motsatt trend.

Glasfiberkurvan är så pass jämn att inte fler än fyra toppar går att urskiljas. De motsvaras av siffrorna 3, 11, 14 och 26. Av dessa motsvarar hälften bilder tagna från den tunnare delen av provbiten och den andra hälften motsvarar bilder tagna på den tjockare delen av provbiten.

## 6 SLUTSATSER

Laserskärning av komposita material är problematiskt. Den höga skillnaden i förbränningstemperaturerna för fibrerna och epoxin är kanske det största problemet. Själva strukturen på glasfibern gör också det svårt att skäras pålitligt med laser. Med finslipning av parametrarna tror jag nog det skulle vara möjligt att skära färdigt laminerade kevlarskivor med laser och få en god skäryta. Skärytan skulle nog ännu vara bränd, det kan nog inte kringgås.

Vattenskärning av komposita material går bra. Ytjämnheten på den skurna ytan uppfattas inte som ett problem. Delaminationen verkar inte bero på skärhastigheten. Dock verkar delaminationen bero på avståndet från en färdigt skuren sida men också på materialet. Då kolfiber skars visade sig att mest delamination uppkommer vid den tunnare ändan men vid skärningen av kevlar uppkom det mest delamination på den tjockare ändan. Glasfibersdelamineringen var jämn. Det skulle dock krävas mer djuptgående undersökningar för att kunna dra definitiva slutsatser då granskningsmetoden endast betraktar bilder tagna av delar av den skurna sidan, inte materialet i sin helhet. Djupet på delamineringen granskas inte alls heller. På grund av detta kan resultaten ses mera som riktgivande än definitiva.



I och med dethär har båda påståendena i kapitel 1.1 blivit bekräftade:

- Det går att skära laminerade komposita material med abrasiv vattenskärning så att tillräckligt bra ytjämnhet erhålls.
- Det finns ett samband mellan delamineringen och avståndet till en färdigt skuren sida som också beror på materialet.

Delamineringen i penetrationspunkten är ett problem. Det kan dock kringgåas med att antingen börja skärningen i hål som är färdigt borrade i skivan eller så att skärningen börjas utanför plattan och körs in i materialet från sidan. När skärningen väl är igång uppstår det knappt någon ny delaminering.

Skärhastigheterna som uppmättes i experimenten var mycket högre än de som funnits i källorna. Kolfiber skars med 17 gånger, kevlar med nästan 3 och glasfiber med 20 gånger så hög hastighet än vad som källorna angav. Jag rekommenderar att åtminstone kolfiber inte skärs med hastigheter över 2900 mm/min då maskinen själv reglerade ner sig till den hastigheten automatiskt vid skärningen då målhastigheten var 3000 mm/min. Glasfiber kan skäras med 3000 mm/min. Varken skärytan eller maskinen gav tecken för att detta var den absoluta övre gränsen, men då det inte skurits snabbare kan inte högre hastigheter rekommenderas. Det samma gäller för kevlarskärhastigheten. Jag rekommenderar att man skär med 2000 mm/min. Jag är dock mycket säker på att hastigheter på över 3000 mm/min är uppnåeliga. Laserle Ab kommer att använda dessa skärhastigheter som grund vid skärandet av komposita material i framtida arbeten.

## **7 REKOMMENDATIONER**

Det skulle kunna undersökas om laserskärning skulle passa bättre för skärning av endast fibermattor för att få färdigt skurna bitar för laminering. Då skulle inte epoxin som orsakar röken finnas där och störa skärningen. Laserskärningen kunde visa sig vara bättre än andra skärmetoder då mattorna inte längre skulle bli våta och kontamineringen från sanden inte längre skulle vara ett problem i den abrasiva vattenskärningen. Också ifall fibrerna skulle smälta ihop i ändorna skulle det göra det lättare att hantera de

färdigt skurna profilerna då fibrerna inte längre skulle vävas upp från mönstret i mattan och orsaka svagare punkter i den bärande konstruktionen.

Laserskärning för tunnare laminat kunde också undersökas. Laminat med tjocklekar på runt 1 mm skulle kunna passa bättre för laserskärning. Delaminationen kanske skulle vara mindre än vid skärning med abrasiv vattenskarvning vilket skulle ge upphov till att mindre hål skulle kunna skäras då delamineringen inte längre skulle vara en begränsande faktor. Förbränningen av epoxin kan dock inte kringgå och är antagligen ett bestående problem.

Delamineringen vid abrasiv vattenskarvning kunde undersökas noggrannare. Vilken diameter det minsta hålet kan ha ifall färdigt borrade hål inte används? Hur diametern på det minsta möjliga hålet ändras beroende på fibertyp, matris och materialtjocklek. Det går lätt att mäta för glasfiber men då kol- och kevlarfiber inte är genomskinliga är det mycket svårare att mäta.

## 8 KÄLLFÖRTECKNING

Caydas, Ulas och Hascalik, Ahmet. 2007, *A study on surface roughness in abrasive waterjet machining process using artificial neural networks and regression analysis method*. University of Firat, Department of Manufacturing, Elazig, Turkey I. 2008, *Journal of Materials Processing Technology* 202 s 574 – 582.

Engineers Edge, 2012a. [www] Tillgänglig:

<[http://www.engineersedge.com/material\\_science/fatigue\\_failure.htm](http://www.engineersedge.com/material_science/fatigue_failure.htm)> Hämtad 1.2.2012

Engineers Edge, 2012b. [www] Tillgänglig:

<<http://www.engineersedge.com/manufacturing/surface-roughness-conversion.htm>> Hämtad 5.1.2012

Hansmann, H. 2003, *Composites ASM Handbook/extraction Polyester Resins*. Wismar Universitet

Hugh, Jack 2010. [e-bok] *Implementing Real Systems*. Tillgänglig:

<[http://engineeronadisk.com/V2/book\\_implementation/engineeronadisk.html](http://engineeronadisk.com/V2/book_implementation/engineeronadisk.html)>. Hämtad 1.2.2012

Hurlburt, G.H. och Cheung J.B. 1997, *Waterjet Cutting of Advanced Composite Materials*. SME Technical Paper No. MR77-225, Society of Manufacturing Engineers.

Kevra Oy 2011. [www] Tillgänglig:

<[http://www.kevra.fi/index.php?group=00000051&mag\\_nr=8](http://www.kevra.fi/index.php?group=00000051&mag_nr=8)> Hämtad 4.1.2012

Lau, W. S. et al. 1990, *Pulsed Nd:YAG Laser Cutting of Carbon Fibre Composite Materials*. I: J. R. Crookall et al. *CIRP Annals 1990 Manufacturing Technology Volume 39/1/1990*, s. 179-182.

Majumdar, Dutta J. och Manna, I. 2003, *Laser processing of materials. I: Sadhana Volume 28* s. 495-562.

Mazumdar, Sanjay K. 2002, *Composites manufacturing: Materials, product and process engineering*, Florida: CRC Press LLC, 392 s.

MERL Ltd, 2011. [www] Materials Engineering Research Laboratory Limited.  
“Interlaminar Fracture Testing and Composites” Tillgänglig: <[http://www.merl-ltd.co.uk/2003\\_materials/composites04.shtml](http://www.merl-ltd.co.uk/2003_materials/composites04.shtml)> Hämtad 3.5.2012.

Mitutoyo Scandinavia Ab, 2012. Produktbroschyr för ytjämnhetsmätare Surftest SJ-210.  
Tillgänglig:  
<[http://www.mitutoyo.se/sitespecific/mitutoyo\\_v2/files/SJ\\_210\\_eng.pdf](http://www.mitutoyo.se/sitespecific/mitutoyo_v2/files/SJ_210_eng.pdf)>  
Hämtad 1.2.2012.

Saarela, Olli et al. 2003, *Komposiittirakenteet*, Helsingfors: Hakapaino Ab, 494 s.

Simmons (Mouldings) Ltd, 2012. [www] *Material properties*. Tillgänglig:  
<<http://www.epoxyworktops.com/epoxy-resin/mech-properties.html>> Hämtad  
1.2.2012

Strong, Brent. 2008, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*, Society of Manufacturing Engineers, 625 s.

## 9 BILAGOR

### 9.1 Uppmätt skärkvalitet vid skärning av glasfiber

Nummer	Material	Hastighet	Bild	PixelX	PixelY	Total yta	Delaminering	% del.	Tunnare/tjockare
		[mm/min]						[px]	
1	Glasfiber	1500	1a	300	30	9000	107	1,19	Tjockare
2	"	1500	1b	300	30	9000	202	2,24	Tjockare
3	"	1500	2a	300	30	9000	255	2,83	Tunnare
4	"	1500	2b	300	30	9000	237	2,63	Tunnare
5	"	1500	3a	300	30	9000	148	1,64	Tjockare
6	"	1500	3b	300	30	9000	203	2,26	Tjockare
7	"	1500	4a	300	30	9000	150	1,67	Tunnare
8	"	1500	4b	300	30	9000	94	1,04	Tunnare
9	"	2000	1a	300	30	9000	150	1,67	Tjockare
10	"	2000	1b	300	30	9000	129	1,43	Tjockare
11	"	2000	2a	300	30	9000	273	3,03	Tunnare
12	"	2000	2b	300	30	9000	118	1,31	Tunnare
13	"	2000	3a	300	30	9000	145	1,61	Tjockare
14	"	2000	3b	300	30	9000	235	2,61	Tjockare
15	"	2000	4a	300	30	9000	133	1,48	Tunnare
16	"	2000	4b	300	30	9000	188	2,09	Tunnare
17	"	2500	1a	300	30	9000	142	1,58	Tjockare
18	"	2500	1b	300	30	9000	190	2,11	Tjockare
19	"	2500	2a	300	30	9000	162	1,80	Tunnare
20	"	2500	2b	300	30	9000	154	1,71	Tunnare
21	"	2500	3a	300	30	9000	171	1,90	Tjockare
22	"	2500	3b	300	30	9000	116	1,29	Tjockare
23	"	2500	4a	300	30	9000	124	1,38	Tunnare
24	"	2500	4b	300	30	9000	122	1,36	Tunnare
25	"	3000	1a	300	30	9000	183	2,03	Tjockare
26	"	3000	1b	300	30	9000	218	2,42	Tjockare
27	"	3000	2a	300	30	9000	176	1,96	Tunnare
28	"	3000	2b	300	30	9000	92	1,02	Tunnare
29	"	3000	3a	300	30	9000	157	1,74	Tjockare
30	"	3000	3b	300	30	9000	199	2,21	Tjockare
31	"	3000	4a	300	30	9000	198	2,20	Tunnare
32	"	3000	4b	300	30	9000	162	1,80	Tunnare

## 9.2 Uppmätt skärkvalitet vid skärning av kolfiber

Nummer	Material	Hastighet	Bild	PixelX	PixelY	Total yta	Delaminering	Procentuell	Tunnare/tjockare
		[mm/min]							
1	Kolfiber	1500	1a	300	30	9000	580	6,44	Tjockare
2	"	1500	1b	300	30	9000	741	8,23	Tjockare
3	"	1500	2a	300	30	9000	715	7,94	Tunnare
4	"	1500	2b	300	30	9000	432	4,80	Tunnare
5	"	1500	3a	300	30	9000	322	3,58	Tjockare
6	"	1500	3b	300	30	9000	390	4,33	Tjockare
7	"	1500	4a	300	30	9000	588	6,53	Tunnare
8	"	1500	4b	300	30	9000	602	6,69	Tunnare
9	"	2000	1a	300	30	9000	404	4,49	Tjockare
10	"	2000	1b	300	30	9000	383	4,26	Tjockare
11	"	2000	2a	300	30	9000	855	9,50	Tunnare
12	"	2000	2b	300	30	9000	576	6,40	Tunnare
13	"	2000	3a	300	30	9000	531	5,90	Tjockare
14	"	2000	3b	300	30	9000	389	4,32	Tjockare
15	"	2000	4a	300	30	9000	393	4,37	Tjockare
16	"	2000	4b	300	30	9000	385	4,28	Tjockare
17	"	2400	1a	300	30	9000	353	3,92	Tjockare
18	"	2400	1b	300	30	9000	253	2,81	Tjockare
19	"	2400	2a	300	30	9000	615	6,83	Tunnare
20	"	2400	2b	300	30	9000	534	5,93	Tunnare
21	"	2400	3a	300	30	9000	482	5,36	Tjockare
22	"	2400	3b	300	30	9000	234	2,60	Tjockare
23	"	2400	4a	300	30	9000	296	3,29	Tunnare
24	"	2400	4b	300	30	9000	354	3,93	Tunnare
25	"	2900	1a	300	30	9000	305	3,39	Tjockare
26	"	2900	1b	300	30	9000	514	5,71	Tjockare
27	"	2900	2a	300	30	9000	445	4,94	Tunnare
28	"	2900	2b	300	30	9000	695	7,72	Tunnare
29	"	2900	3a	300	30	9000	341	3,79	Tjockare
30	"	2900	3b	300	30	9000	263	2,92	Tjockare
31	"	2900	4a	300	30	9000	667	7,41	Tunnare
32	"	2900	4b	300	30	9000	481	5,34	Tunnare

### 9.3 Uppmätt skärkvalitet vid skärning av kevlar

Nummer	Material	Hastighet	Bild	PixelX	PixelY	Total yta	Delaminering	Procentuell	Tunnare/tjockare
		[mm/min]							
1	Kevlar	750	1a	300	28	8400	293	3,49	Tjockare
2	"	750	1b	300	28	8400	339	4,04	Tjockare
3	"	750	2a	300	28	8400	242	2,88	Tunnare
4	"	750	2b	300	28	8400	171	2,04	Tunnare
5	"	750	3a	300	28	8400	277	3,30	Tjockare
6	"	750	3b	300	28	8400	399	4,75	Tjockare
7	"	750	4a	300	28	8400	134	1,60	Tunnare
8	"	750	4b	300	28	8400	280	3,33	Tunnare
9	"	1000	1a	300	28	8400	488	5,81	Tjockare
10	"	1000	1b	300	28	8400	298	3,55	Tjockare
11	"	1000	2a	300	28	8400	223	2,65	Tunnare
12	"	1000	2b	300	28	8400	202	2,40	Tunnare
13	"	1000	3a	300	28	8400	449	5,35	Tjockare
14	"	1000	3b	300	28	8400	428	5,10	Tjockare
15	"	1000	4a	300	28	8400	191	2,27	Tunnare
16	"	1000	4b	300	28	8400	351	4,18	Tunnare
17	"	1500	1a	300	28	8400	314	3,74	Tjockare
18	"	1500	1b	300	28	8400	312	3,71	Tjockare
19	"	1500	2a	300	28	8400	327	3,89	Tunnare
20	"	1500	2b	300	28	8400	165	1,96	Tunnare
21	"	1500	3a	300	28	8400	205	2,44	Tjockare
22	"	1500	3b	300	28	8400	336	4,00	Tjockare
23	"	1500	4a	300	28	8400	161	1,92	Tunnare
24	"	1500	4b	300	28	8400	159	1,89	Tunnare
25	"	2000	1a	300	28	8400	312	3,71	Tjockare
26	"	2000	1b	300	28	8400	436	5,19	Tjockare
27	"	2000	2a	300	28	8400	273	3,25	Tunnare
28	"	2000	2b	300	28	8400	162	1,93	Tunnare
29	"	2000	3a	300	28	8400	370	4,40	Tjockare
30	"	2000	3b	300	28	8400	355	4,23	Tjockare
31	"	2000	4a	300	28	8400	180	2,14	Tunnare
32	"	2000	4b	300	28	8400	301	3,58	Tunnare