

# Kolfiberförstärkning av nitförband

ANDREAS OSKARSSON

**CIVILINGENJÖRSPROGRAMMET**  
**Väg- och vattenbyggnadsteknik**

Luleå tekniska universitet  
Institutionen för Samhällsbyggnad  
Avdelningen för Byggkonstruktion



---

# Förord

Detta arbete, det största arbete som jag åstadkommit under min studietid här på LTU är nog det jobbigaste, mest tidsödande, mest frustrerande arbete men samtidigt bland de mest lärorika och intressanta arbeten som jag gjort.

Vare sig man är två som skriver ett examensarbete eller som jag ensam så behövs hjälp och stöd från olika håll. Därför skulle jag vilja tacka några personer som har hjälpt mig och gjort detta arbete möjligt.

Först skulle jag vilja tacka min handledare och examinator Anders Carolin för hans hjälp och stöd under arbetets gång, tack Anders.

Sen skulle jag vilja tacka Gabriel Saas, Tobias Larsson och Alann André för deras hjälp och guidning genom arbetets olika stadier.

Det skulle förstås inte vara möjligt med ett examensarbete med laborationsinslag om man inte hade hjälp av kunnig personal i labbet, så ett tack till Georg, Lars och övriga av Testlabs kunniga personal för er hjälp.

Mätningarna på järnvägsbron krävde hjälp där Banverket ställde upp. Så tack Magnus Edfast och Anders Kronborg.

Slutligen skulle jag vilja tacka mina samtida examensarbetande kamrater för hjälp och råd under arbetets gång samt deras sällskap.

Luleå, december 2006

Andreas Oskarsson



---

# Sammanfattning

En av de saker som är säkert här i världen är att saker och ting förändras, inte minst konstruktioner och kraven på konstruktioner. Dessa konstruktioner går mot sitt slut hur man än gör, men tiden det tar dit kan påverkas. För att denna tid, den så kallade livslängden, ska bli så lång som möjligt måste underhåll ske för att konstruktionen inte ska försämrans. Ibland så ändas dock kraven, oftast är det att belastningarna kommer att öka. Då finns det två olika alternativ att lösa detta problem: den första är att byta ut den befintliga konstruktionen mot en ny, men detta är ofta en väldigt kostsam lösning. Detta leder till den finansiellt mer ekonomiska varianten, förstärkning av befintlig konstruktion.

Förstärkning med kolfiberkomposit som detta examensarbete handlar om, har gjorts på konstruktionsavdelningen vid institutionen för Samhällsbyggnad på Luleå Tekniska Universitet i samverkan med Banverket kan vara ett alternativ när förstärkning skall ske. Kolfiberförstärkning har använts en hel del inom byggbranschen och då framförallt som förstärkning av betong. Förstärkning har däremot varit sparsam på stål dels på grund av okunskap och dels så att ståldetaljer kan bytas ut mot nya eller att nya ståldetaljer svetsas utanpå de befintliga. Det kan dock finnas problem vid förstärkningar av gamla utmattade konstruktioner där det inte är helt ovanlig att stålet är av sådan kvalitet att svetsning är omöjlig dessutom kan det vara problem med att byta ut befintliga delar. Vid sådana situationer skulle kolfiberförstärkning kunna vara en bra metod.

Detta arbete är inriktat mot att undersöka om kolfiberförstärkning av utmattade nitförband kan vara ett alternativ till att byta ut förbandet alternativt konstruktionen. Eftersom liten eller ingen forskning alls har gjorts inom området är arbetet inom det första stadiet av utvecklandet av en metod att förstärka nitförband med kolfiber. Därför har enklast möjliga lastfall antagit vid laborationerna. Det är sex olika provkroppar av fyra olika slag som testat i drag där mätningarna har gjorts dels med speckelmätning och dels med data från provriggen. Provkropparna som användes var två referenser för bultförbanden och två för kolfiber dessutom testades en provkropp med kolfiber utanpå bultförbandet och en annan med kolfiber utanpå ett bultförband där bultarna var kapade så att de inte tog någon kraft. Bultar användes istället för nitar pga. att nytillverkning av nitförband är väldigt svår samt att vid bultförband blir de ingående faktorerna kända vilket inte fallet skulle vara om användning av befintliga nitförband användes.

Det har även utförts ett fältförsök där de verkliga töjningarna i ett nitförband på Käriskjokibron efter Haparandabanan försökts mätas. Förbandet som var utdömt ur utmatningssynpunkt enligt Banverkets rapport mättades med speckelmätning vid belastning av ett lok (T66).

För att kunna få en uppfattning av materialegenskaperna av de använda och tilltänkta förstärkningsmaterialen samt få en inblick i fenomenet utmattning gjordes en litteraturundersökning. Denna undersökning tar bara upp de material som anses vara intressant för förstärkningarna som gjordes i labbet samt de material som anses komma att behövas vid permanenta förstärkningar. Bland stålets brottsfenomen tas bara utmattningsbrott upp. Litteraturundersökningen är inte särskilt djup utan är bara till för att få en inblick och uppfattning om hur de olika sakerna fungerar.

De viktigaste slutsatserna som kan dras av detta arbete är att förstärkning över ett nitförband som är draget ger ett styvt förband där kolfiberkompositen kommer att ta kraft så att belastningsamplituden sänks vilket gör att risken för utmatningen minskar.

---

## Summary

One of the things that are sure in the world is that everything changes, not at least constructions and the demands on the constructions. These constructions goes to the end no matter what we do, but the time it takes can be influenced. To make this time, the so called lifetime, as long as possible maintenance has to be done. Sometimes the demands are changing, often is it the load that will increase. This problem can be solved in two different ways: the first one is to change the old construction to a new one, which often costs a lot of money. This leads to the often cheaper method, strengthening of the existing construction.

Strengthening with carbon fibre composite (that this thesis is about) can be an alternative when strengthening will be done. Carbon fibre strengthening has been used a lot within the construction business, primarily on concrete. On steel, strengthening has been modest due to lack of knowledge and the fact that details of steel can be replaced or new details can be welded onto existing ones. Problems can arise when strengthening old and fatigued steel constructions, where the quality of steel makes welding impossible and replacing of old details can be difficult. In situations like that, strengthening with carbon fibre composite can be a good alternative.

The aim of this thesis is to examine whether carbon fibre composite strengthening of fatigued rivet joint can be an alternative to replacing the joint or the construction. Since little or no research has been conducted within the area, this thesis is in the first stage of developing a new method of strengthening rivet joints with carbonfibre. Therefore has the easiest load combination, tensile, been choosed. Six test specimens of four different kinds have been tested in tension force, where measurements have been conducted with photogrammetry and data from the testing equipment. The test specimens that have been used are two reference bolts, two reference carbonfibre, one with carbonfibre over bolt joint and one with carbonfibre over bolt joint where the bolts were cut.

A field test has also been conducted, where stains on a real rivet joint have been measured on the railroad bridge over Käräsjoeki after Haparandabanan. The joint, that was condemned in fatigue by the Swedish rail road admidistration, has been mesured with photogrammetry and a T66 engine was used as load.

To get an understanding of the material quality of the used strengthening material and get a glimpse of the fatigue phenomena, a literature investigation has been done. This investigation is only about fatigue of steel and the materials that have been used and probably will be used in permanent strengthening.

The most important conclusion of this work is that a rivet joint reinforcement with carbonfiber is a stiff joint in tensile. The carbonfibre will take force so the load amplitude will decrease, which will decrease the risk of fatigue.

---

## Symboler och förkortningar

$A$	area	[m <sup>2</sup> ]
$E$	elasticitetsmodul stål	[GPa]
$F_{b,Rd}$	bärförmåga hålkant	[kN]
$F_{v,Rd}$	bärförmåga bultar	[kN]
$F_{Rd}$	bärförmåga förbandsplatta/plattstål	[kN]
$f_{yk}$	karaktäristisk flytgräns	[MPa]
$f_{uk}$	karaktäristisk brottgräns	[MPa]
$f_{um}$	medelvärde brottgräns	[MPa]
$f_{ym}$	medelvärde flytgräns	[MPa]
$k$	variabel som multipliceras med medelspänningen för att få ramspänningen vid sprickan	[-]
$k_1$	korrektionsfaktor	[-]
$a_b$	inperfektionsfaktor	[-]
$a$	konstant	[-]
$d$	krökningsradien	[m]
$a$	spricklängd (radien vid ellips)	[m]
$g_{M2}$	partialkoefficient	[-]





---

# Innehållsförteckning

<b>Inledning</b> .....	1
1.1 Syfte/Mål .....	2
1.2 Metod .....	3
1.3 Avgränsningar .....	3
1.4 Rapportens innehåll .....	3
<b>Litteraturstudie</b> .....	5
2.1 Utmattning .....	5
2.1.1 Historik .....	5
2.1.2 Definition .....	6
2.1.3 Hur utmattning uppkommer .....	7
2.2 Nitförband .....	8
2.3 Fiberkomposit .....	9
2.3.1 Allmänt .....	9
2.3.2 Fiber .....	10
2.3.3 Kolfiber .....	10
2.3.4 Armidfiber .....	11
2.3.5 Glasfiber .....	12
2.4 Matris .....	13
2.4.1 Epoxiplaster .....	13
2.4.2 Härdning .....	13
2.4.3 Epoxityper .....	14
2.4.4 Epoxiplasternas karateristiska egenskaper .....	15
2.4.5 Hantering av epoxi .....	16
2.5 Galvaniska element .....	16
2.6 Haparandabanan .....	16
<b>Beräkningar</b> .....	17
3.1 Provkroppar .....	17
<b>Försöksuppställning</b> .....	21
4.1 Försöksuppställning i labbet .....	21
4.1.1 Mätning .....	25
4.2 Speckelmätning .....	26
4.3 Provning i fält .....	28
4.3.1 Provning .....	28
<b>Resultat</b> .....	31
5.1 Styvhet och bärförmåga .....	31
5.2 Töjningsfördelning .....	32

5.3 Nitförband på järnvägsbro.....	37
<b>Slutsatser/Diskussion</b> .....	39
6.1 Slutsatser .....	39
6.2 Saker som skulle ha gjorts annorlunda.....	39
6.3 Felkällor .....	40
6.4 Förslag till fortsatt forskning .....	40
6.5 Öviga reflektioner .....	41
<b>Referenser</b> .....	43
<b>Appendix:</b> .....	45

# Kapitel 1:

---

## Inledning

Genom hela människans historia har denna varelse byggt konstruktioner av olika slag. Från början var konstruktionerna i huvudsak bara inriktade på det mest nödvändiga för att överleva dagen till att idag omfatta till exempel transport, boende eller bara rena skrytbyggen. Även om vissa konstruktioner står väldigt länge som pyramiderna så har alla konstruktioner det gemensamma att de ej står för evigt.

Hur länge en konstruktion står, eller det som är intressantare, hur lång livslängd en konstruktion har. Detta beror på många olika saker så som miljö, material, ändrade krav eller helt enkelt slumpen. Eftersom konstruktioner inom många områden kan vara väldigt dyra så är det önskvärt med så lång livslängd som möjligt. För att uppnå detta är ofta den viktigaste åtgärden underhållet, men ibland räcker det inte med underhåll, som vid ökade belastningar då den gamla konstruktionen inte uppfyller kraven. Detta problem kan självklart åtgärdas genom att byta ut den gamla mot en ny konstruktion. Då det ofta är pengarna som styr så kan en betydligt mer kostnadseffektiv åtgärd vara att förstärka den befintliga konstruktionen.

Behovet av förstärkning finns alltså varvid frågan kommer: Vilken förstärkningsmetod är lämpligast? Något generellt svar finns förstås inte eftersom konstruktionerna i sig skiljer sig åt så mycket samt vilket material de är gjorda av. Inom det här området liksom många andra pågår en ständig utveckling av metoder, där en av de metoder som på senare tid uppkommit är att limma kompositmaterial utanpå konstruktionerna. Kompositen som oftast är kolfiber har till sin fördel att den är lätt samtidigt som den är styv, har hög hållfasthet och att den ej rostar, dessutom är den tålig mot de flesta kemikalier. Denna metod har inom byggbranschen framförallt använts på betongkonstruktioner men även undersökts på trä. Däremot har användandet varit minst sagt sparsamt inom förstärkning av stålkonstruktioner. I arbetet med detta examensarbete har inga studier (av liknande slag dvs. förstärkning av nitförband med kompositmaterial) kunnat påvisas. Nyttan med att förstärka ett nitförband med kolfiber skulle vara att ta kraften i kolfibern istället för nitarna då den förstärkningen av förbanden ofta sker på grund av utmattning. Detta skulle göra att en förlängt livslängd på konstruktionen skulle kunna uppnås.

## **1.1 Syfte/Mål**

Arbetet syftar till att undersöka om förstärkning med kolfiber kan vara ett alternativ vid förstärkning av nitförband samt se hur krafterna fördelas i dessa förband då kolfibern läggs på en ojämn yta. Dessutom är syftet att se om speckelmätning kan användas till att bestämma de verkliga krafterna i ett befintligt förband i fält där mönstret målas.

## **1.2 Metod**

Arbetet har delats in i tre delar: litteraturstudie, laboratorieförsök samt fältförsök. Litteraturstudien ger en inblick i de olika förstärkningsmaterialens egenskaper samt hur det berörda brottsfenomenet uppkommer och fortplantar sig. Laboratorieförsöken omfattar belastning av fyra olika provkroppar till brott. Fältlaborationen består av att uppmäta töjningarna i ett nitförband på en befintlig bro vid belastning.

## **1.3 Avgränsningar**

Litteraturstudien har begränsats till att i huvudsak handla om de olika appliceringsmaterialen som använts samt eventuellt skulle användas vid framtida appliceringar i fält (epoxi och olika typer av fibrer). Stålets generella egenskaper tas inte upp då det antas att de som läser denna rapport har dessa kunskaper. Det experimentella arbetet i labb har avgränsats till att endast behandla ett sorts lastfall och sex provkroppar av fyra olika slag. Arbetet i fält har avgränsats till att omfatta ett förband och en typ av belastning.

## **1.4 Rapportens innehåll**

*Kapitel 2* Innehåller beskrivning av de material som tros kunna användas vid förstärkning av nitförband. Dessutom innehåller detta kapitel en grundläggande beskrivning av utmattningsavstånd för framförallt stål. Detta kapitel kan hoppas över om grundläggande kunskaper om utmattningsavstånd och kompositerna innehåller.

*Kapitel 3* Beskriver beräkningar på provkropparnas bärförmåga.

*Kapitel 4* Beskriver försöksupställningarna samt provkropparna som har använts i laborationen. Det beskrivs även hur mätningarna av nitförbandet på bron har gått till.

*Kapitel 5* Behandlar de resultat som erhållits vid dragförsöken samt mätningarna på nitförbandet ute i fält. Dessutom fås även en beskrivning av speckelmätning som används både i fält och i labbet.

*Kapitel 6* Diskussion av vilka slutsatser som kan dras av resultaten av laborationerna i detta ex-jobb. Dessutom diskuteras felkällor och vad som kan tänkas göras i framtiden inom detta område.

*Kapitel 7* Innehåller referenser till litteratur, rapporter och elektronisk information som använts i detta arbete

*Appendix* Där finns bilder som tagit under ex-jobbets gång.

# Kapitel 2:

---

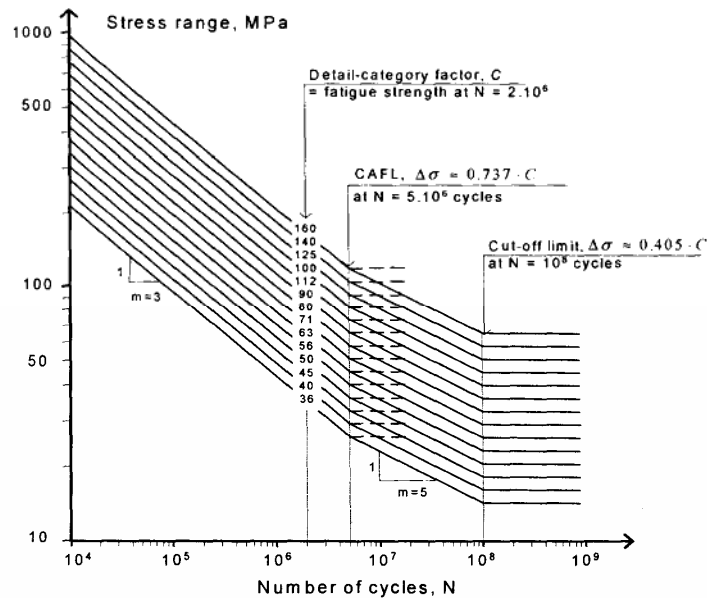
## Litteraturstudie

### **2.1 Utmattning**

#### **2.1.1 Historik**

Ordet utmattning kommer från ordet "uttröttat" och började användas vid 1800-talet början, då man observerade att konstruktioner som utsattes för upprepade belastningar förlorade sin hållfasthet. Detta fenomen syntes framförallt på broar och järnvägskomponenter runt om i Europa. Allt eftersom århundradet gick så blev järn/stål allt vanligare i konstruktioner och maskiner vilket gjorde att problemet med utmattning växte. I slutet av 1850-talet utförde den tyske ingenjören Agust Wöhler utmattningstester på hjulaxlar och såg där att dessa stålaxlar kunde haverera på grund av upprepade laster betydligt mindre än vid en enstaka belastning. Vid utvärdering av dessa tester såg han ett samband mellan belastningsnivå(S) och antalet lastväxlingar(N) vilket kallas S-N-diagram, men är mer känt i Europa som Wöhlerdiagram (*figur 2.1*). Ur dessa diagram kunde man sedermera få en uppfattning om vilken utmattningshållfasthet en konstruktion hade, så att minimerande eller eliminerande av risken för utmattningsbrott kunde ske. Denna metod med Wöhlerdiagram lever kvar även i dagens utmattningsdimensioneringar samt vid haveriutredningar. I slutet av 1800-talet började allt mera produceras av stål, vilket ledde till att ett behov av dimensioneringsregler för utmattning började skapas. Detta gjorde att det från och med då till än idag sker en hel del forskning inom området. Även om fenomenet utmattning var känt sedan i början av 1800-talet, var det inte förrän i början av 1900-talet som fysiska kunskaperna om vad som händer i materialet uppdagades och gjorde att man fick bättre koll på vad som händer i materialet när det utmattas.[1]





Figur 2.1 Wöhlerdiagram som använd vid utmattningsberäkningar [1].

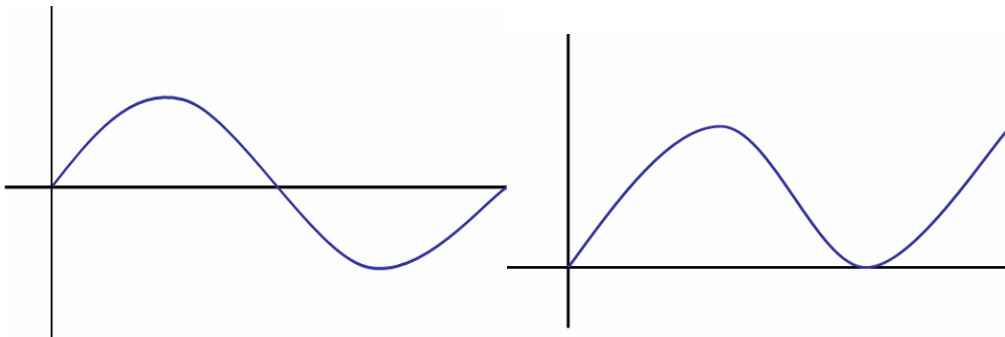
## 2.1.2 Definition

Utmattning definieras som försvagning på grund av upprepade belastningar. En konstruktion som upprepade gånger lastas på och avlastas kommer efter åtskilliga cykler att drabbas av utmattning och således haveri om belastning fortsätter. Utmattningen är en ackumulerings-skada, det vill säga en skada där skadan av varje belastning ackumuleras till en total skada. [2]

Det finns ett flertal olika faktorer som påverkar utmattning i en konstruktion där de viktigaste är lastrelaterade faktorer, konstruktionens beskaffenhet samt miljön. Med lastrelaterade faktor menas vilken last som konstruktionen utsätts för eller rättare sagt spänningsamplituden mellan största och minsta belastning. När beräkningar av spänningsamplitud skall göras, ska först identifiering av vilken typ av spänningsamplitud ske. I regelverket finns två olika fall, pulserande där amplituden sker under drag samt växlande som sker under växelvis tryck och drag, se skillnaden i figur 2.2. Generellt brukar det sägas att bara dragen belastning kan ge upphov till utmattning, men även tryck ger upphov till utmattning i vissa speciella fall då egenspänningarna är höga i t.ex. en svets [3]. Till de lastrelaterade förutsättningarna hör även hur många cykler som bron utsätts för. Antalet cykler som behövs för utmattning styrs av hur stor spänningsamplituden är. Däremot har frekvensen på belastningscykeln inte någon större betydelse för brons utmattningshållfasthet, men den får däremot inte vara lika med brons egensvängning, vilket medför att lasterna

adderas och som i sin tur ger en högre last än den verkliga vilket i sin tur kan leda till haveri av konstruktionen. [1],[3]

För en konstruktions utmattningshållfasthet har dess beskaffenhet stor betydelse, det vill säga hur bron är uppbyggd. Positivt ur utmattningssynpunkt är om den är byggd så att det inte blir några större spänningskoncentrationer vilket kan uppkomma vid skarpa hörn, infästningar och vid skarvar. Dessa saker är i och för sig omöjliga att undvika och då gäller det att placera dessa på ett ställe där de utsätts för så lite kraft som möjligt. Om man sedan tittar på förbanden så kan man urskilja att det är i de flesta fall bättre med ett nit- eller bultförband i jämförelse med ett svetsat förband, då de svetsade förbanden försämras avsevärt mer vid rost som ofta uppkommer vid långvarig användning i korrosionskänslig miljö.



Figur 2.2 Växlande och pulserande belastning

### 2.1.3 Hur utmattning uppkommer

I mitten av 1900-talet blev mikroskoperna avsevärt bättre vilket medförde att man kunde kika på metallerna på kornnivå. Sedan dess har man försökt förstå vad som startar utmattningsprocessen. I dagsläget säger man att det finns tre stadier i utmattningsprocessen: bildningsfas, utvidgningsfas samt haveri. I steg 1, bildningsfasen bildas det en eller flera mikrosprickor på några korns storlek. I denna fas har det ingen större betydelse om den utsatta konstruktionsdelen blir tryckt eller dragen utan dessa sprickor bildas i vilket fall som helst.

I steg 2 utvidgningsfasen så växer sprickorna som bildats i steg 1 och desto större sprickorna blir desto snabbare växer sprickorna (se formel 2.1).[1],[3]

$$k = 1 + a \cdot \sqrt{\frac{a}{d}} \quad (2.1)$$

Där:

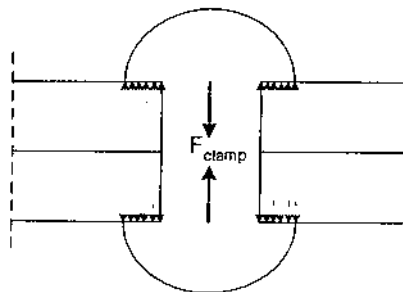
- = konstant (2 vid ellips)
- = krökningsradien

$a$  = spricklängd (radien vid ellips)  
 $k$  = variabel som multipliceras med medelspänningen för att få ramspänningen vid sprickan

Det är på grund av det snabba slutskedet i steg 2, vilket ger ett brott som liknar ett sprött brott som gör att utmattningsbrott är så farliga. Detta medför att konstruktioner dimensioneras för att inte uppnå steg 2 och om en konstruktion kommer upp i steg 2 så är den utdömd ur utmattningssynpunkt och måste därefter förstärkas, lagas eller bytas ut. Utmattning uppkommer vid spänningskoncentrationer. Dessa koncentrationer finns oftast vid skarvar, håligheter eller andra ojämnheter som skapar spänningskoncentrationer. Rost i sig är inget större problem vid utmattning men problemet är att det skapar en ojämn yta som gör att det bildas spänningskoncentrationer vilket kan leda till utmattningssprickor.[3]

## 2.2 Nitförband

Nitning var den vanligaste metoden att sammanfoga konstruktionsstål i Sverige fram till slutet av 1930-talet. Sedan har gradvis svets- och bultförband tagit över, så idag används inte nitning vid sammanfogning av konstruktionsstål.



Figur 2.4 Tvångskrafter i nit

Innan nitning förborras hål som är ca 1mm större än niten, därefter värms niten (som har ena sidan förpressad) upp till cirka 1000°C. Därefter placeras den i det förborrade hålet och den sida av niten som ej är preparerad slås eller pressas ut till en nitskalle. Vid pressningen av niten så utvidgas niten radiellt så att glappet mellan det förborrade hålet och bulten minskar eller försvinner. När sedan niten svalnar så vill niten krympa i både radiell och längdled. Krympningen i längdled förhindras delvis av de ihopnitade plåtarnas motstånd mot sammanpressning. Detta leder till att en tvångskraft, som trycker ihop plåtarna, bildas i niten (se figur 2.4). Storleken på tvångskraften som uppkommer vid nitar som värms upp vid applicering beror på många olika variabler

som styvheten i niten och plattorna, temperatur vid och färdig applicering av förbandet samt vilken nitnings metod som används. Osäkerheterna kring storleken på tvångskraften (se tabell 2.1) gör att till skillnad från den liknande kraften som uppkommer vid förbelastade bultar inte får tillgodoräknas vid hållfasthetsberäkningar av förbandet. En av fördelarna om tvångskraften skulle få räknas med är att friktionskraften i ett skjuvförband skulle höja den beräknade bärförmågan på förbandet samt att vid utmatning skulle amplituden sänkas vilket är den avgörande största faktorn för utmattningsberäkningar.

Storleken på avståndet mellan nit och hål efter avkyllning beror på nitens längd, temperatur vid drivningen av niten samt hur stort utrymmet mellan nit och hål var innan avkyllning.

Tabell 2.1 Uppmätta tvångsspänningar i nitar [1]

Utredning	Antal nitar	Uppmätt tvångsspänning [MPa]			
		max	min	medel	standardavvikelse
Wilsson and Thomas	37	282	83	222	48
Åkesson	6	189	110	151	33
Zhou et al.	9	165	34	83	41

## 2.3 Fiberkompositer

### 2.3.1 Allmänt

Ordet komposit kommer från det latinska ordet *compo'situs* som översatt till svenska betyder sammansatt. Det finns flera olika sätt att definiera kompositer men en vanlig definition är: ”klass av material som innehåller två eller flera komponenter och som har egenskaper som väsentligt skiljer sig från de ingående komponenternas egenskaper” [4],[5]. Många material är till definitionen kompositer. Det gäller speciellt de naturliga material då de oftast består av flera sammansatta ämnen. Som exempel på detta kan vanligt trä tas där cellulosan binds ihop av ligninet[6]. När man ser på tillverkade material på makronivå har man ett grundmaterial, det så kallade matrisen som oftast består av plast, keram eller en metall. Formen på det armerande materialet kan vara partiklar, skivor eller fibrer. Möjligheterna till kombination av dessa ämnen ger nästan oändliga möjligheter bl.a. kan man tillverka flygplansvingar som ändrar form efter fart eller en båtpropeller som ändrar bladvinkel efter motstånd[7].

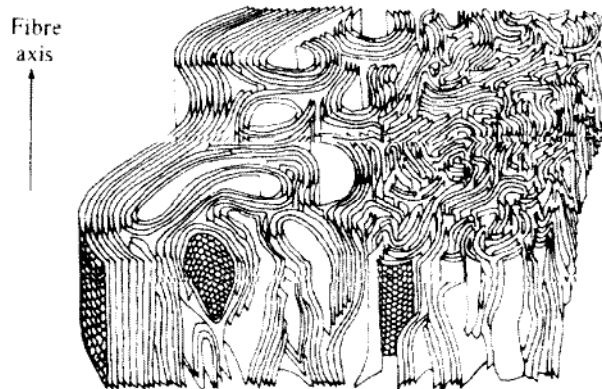
### 2.3.2 Fiber

I byggtkniska sammanhang har fibrer under en mycket lång tid haft en plats. Fibrerna har framförallt använts till att förstärka olika typer av konstruktioner där ett av de första exemplen är vasstrån, som användes som förstärkning i lerkonstruktioner för tusentals år sedan. Sedan dess har utvecklingen gått vidare med bland annat olika typer av stålfibrer och bland det senast högmodulfibrerna. För att fibrerna skall räknas som högmodula ska de ha en E-modul högre än 30GPa[8]. De vanligast syntetiska fibrerna som hör till de högmodula är armid- glas- samt kolfibrer där kolfibrer är den fiber som har det största användningsområdet inom byggsektorn. Som kan ses i tabell 2.2 så har de olika fibertyperna ganska vitt skilda egenskaper vilket gör att de används i olika användningsområden. Men inom byggsektorn är det inte bara de mekaniska egenskaperna som har betydelse, utan fibertyperna väljs även efter ålderbeständighet, krypbarhet och i många sammanhang har kostnaden stor inverkan. I detta examensarbete kommer endast kolfiber, armidfiber och glasfibrer beskrivas.

### 2.3.3 Kolfiber

Kolfiber användes och utvecklades i sin barndom av Thomas Edisons under 1800-talet som glödtråd i sina glödlampor. Sedan dess har gundmaterialet i kolfibern byts från förkolnad bambu till bl.a. polyakrylnitril(PAN), dessutom har kolfiber bytts ut mot volfram i lamporna. Kolfibern har genom historien används till de mest skiftande saker och har idag även ett stort spann av användningsområden, som exempel kan nämnas skidstavar, flygplansdelar, skyddsutrustning samt utsmyckning.

Kolfiber är starkt anisotropt vilket gör att dess hållfasthet kan kopplad direkt till belastningsriktningen. Kolfibern är uppbyggd av flera kristallina skikt. Inom dessa skikt är atomerna sammanbundna med starka kovalenta bindningar. Bindningarna mellan skicken är däremot svaga van der Waals bindningar vilket gör att E-modulen ortogonalt jämfört med längs fibrerna kan vara så låg som 3-10%. Däremot har kolfibern generellt E-modul och hållfasthet i drag samma storleksordning som i tryck.[9]. Kolfiberarmerad epoxi är också det starkaste konstruktionsmaterialet i förhållande till sin vikt.



Figur 2.5 Schematisk bild av kolfiberstrukturen [11]

Olika grundmaterial och produktionssätt gör så att fibern kan få olika strukturer. En kolfiber kan som exempel vara baserad på PAN, pitch och rayon där den oljebaserade PAN är den vanligaste. De olika strukturerna gör så att styvhet och hållfasthet varierar vilket gör att kolfiber indelas i olika grupper enligt nedan:

- UHM - Ultra High Modulus: kolfiber med elasticitetsmodul över 500GPa
- HM - High Modulus: kolfiber med elasticitetsmodul mellan 300 och 500GPa
- HT/HS – High Tensile/Strength: kolfiber med draghållfasthet över 3000MPa

Tabell 2.2 Mekaniska parametrar för olika kolfiber [4]

Typ/tillverkare	E-modul [GPa]	Draghållfasthet [MPa]	Brottöjning [%]	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Basmaterial
HS / Hercules	227	3996	1,6	175	PAN
Ultra HS / Toray	289	7027	1,82	1820	PAN
HM / Amoco	390	2900	0,7	1810	PAN
HM / Amoco	379	2068	0,5	2000	Pitch
UHM / Celion	517	1816	0,36	1960	PAN
UHM / Amoco	689	2240	0,31	2150	Pitch

### 2.3.4 Aramidfiber

Aromatisk polyamid eller förkortningen Aramid uppfanns på 1920-talet av DuPont och var ett av de första kompositerna som blev tillgänglig på marknaden. Aramidfibrerna finns som två olika typer, para- och metantyp som skiljer sig lite åt i de mekaniska egenskaperna. Båda typerna hör till gruppen högttemperaturstabila organiska fibrer, som tål 180°C under en längre tid utan att uppvisa några större förändringar[2]. Aramid är troligen mest känt som kevlar (paratyp) vilket är DuPonts försäljningsnamn på aramid sedan de började tillverkningen 1973. Aramidfibrer

tillverkas genom spinning- och extrudering process. Processen börjar genom att polymer löst i en syra passerar en spinnings process för att fibrerna ska få en hög grad av orientering. Efter rening från resterande syra, sker en ökad grad av orientering genom extrudering under förhöjd temperatur. Eftersom molekylerna ligger parallellt i längdriktningen och molekylerna binds ihop av svaga vätebindningar blir materialet kraftigt anisotropt. Materialet använd för närvarande bland annat i skyddskläder, fiskelinor samt i fiberoptiska kablar där armidens höga E-modul kommer väl till pass[6].

### 2.3.5 Glasfiber

Glasfiber är det vanligaste förekommande fibermaterialet och har används till förstärkning inom olika typer av konstruktioner sedan 1950-talet, men har funnits på den kommersiella marknaden alltsedan slutet av 1930-talet[7].

Glasfiber tillverkas genom smältning av råmaterialet, vanligtvis bestående av kalksten, sand och aluminium vid ca 1700 grader Celsius. Smältan får rinna till en platinadegel försedd med dysor som har upp till 2000 fina hål. Glaset dras därefter ut ur hålen och tvinnas tillsammans till en starkare tråd. Vid denna tidpunkt har glaset avsvanat till ca 1300 grader Celsius. Innan upplindning på en trumma tillförs vatten och små mängder organiska ämnen för att förstärka samt skydda tråden mot skador.

Det finns flera olika typer av glasfiber och skillnaderna beror främst på vilken eller vilka sammansättningar man har av grundmaterialet. Vissa skillnader mellan produktionssätten finns dock, men i det stora hela går produktionen till enligt ovanstående. Några av de vanligaste förekommande glasfibrerna är:

- E-glas (Electro)
- S-glas (Höghållfast)
- AR-glas (Alkali Resistent)
- C-glas (Korrosion)

E-glaset, som är den mest använda fibern har god hållfasthet, styvhet, bra elektriska egenskaper samt är relativt billig. Däremot har det dålig motståndskraft mot alkalier vilket till exempel gör att den inte lämpar sig så bra vid förstärkning av betong. De tre andra typerna av glasfiber har den användning som namnet skvallrar om. AR-glas är svagare, styvare och mycket dyrare än E-glas. Dock är den alkalieresistent vilket gör att den kan vara ett bra alternativ i en alkalisk miljö. C-glaset har bra korrosionsegenskaper och behövs det en hög hållfasthet och styvhet skall S-glaset användas även om priset är betydligt högre jämfört med E-glas. Gemensamt för glasfibertyperna är att de är brandsäkra, det vill säga att de inte brinner. Däremot är de inte värmebeständiga utan deras egenskaper förändras när de värms upp till en temperatur på 400 grader eller mer. Andra egenskaper som är gemensamma för glasfiber är att materialet är Isotropt samt att det är besvärligt att återvinna efter det används som armering i hårdplast.

## **2.4 Matris**

Matrisen i en fiberkomposit är det material som har i uppgift att skydda fibrerna samt föra över kraften mellan dessa. Matrisen kan också vara det ämne som fäster kompositen med det förstärkta materialet när kompositen används som förstärkningsmaterial. Det vanligaste är att det är någon sorts plast som används som matris i fiberkompositer. Det finns två olika plaster som används som matris, härdplast och termoplast. En termoplast formas efter att den blivit uppvärmd, härdplasten är däremot flytande och härdar genom tillsättning av en accelerator, UV-ljus m.m. Det finns flera olika härdplaster som används som matris som exempel kan nämnas polyester och vinylester men det är epoxi som används vid laborationerna och som anses lämpligast i detta examensarbete. Dessutom är det troligt att det är det ämne som skulle användas ute i fält.

### **2.4.1 Epoxiplaster**

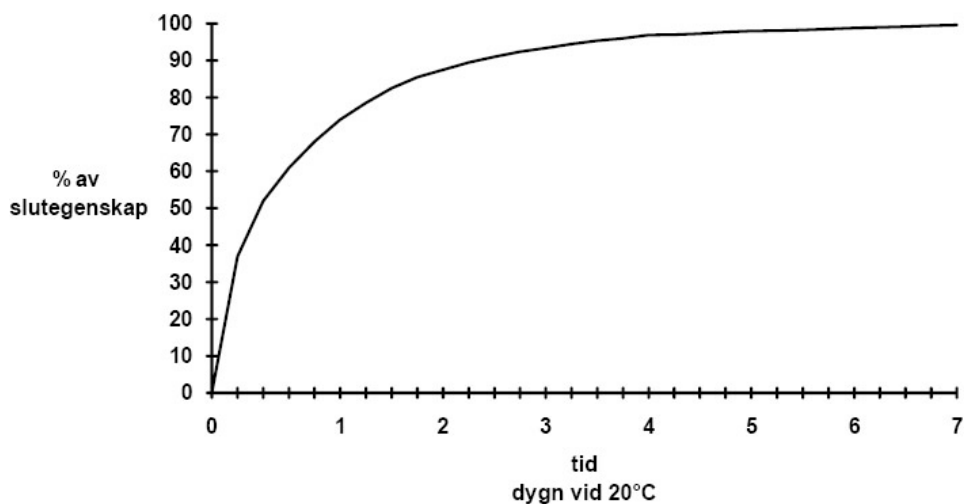
Epoxiplasten vilket är den starkaste härdplasten tillgänglig för fiberlaminering har sitt ursprung från 1930-talet då Pierre Castan lyckades syntetisera ett epoxiharts. Syftet med utvecklandet var från början att finna ett bindemedel som var resistent mot alkalier. Under åren som gått har det upptäckts att den har många goda egenskaper vilket gjort att det används inom många andra områden. Idag har epoxin en given plats inom flera olika branscher så som flyg-, rymd-, elektronik- och bilbranschen samt inom en mängd andra branscher.

### **2.4.2 Härdning**

För att epoxihartsen skall övergå till epoxiplast krävs det en relativt stor mängd härdare vilket varierar kraftigt från ca: 10% till 50% av blandningen [9]. Generellt går det inte att styra härdningstiden genom tillsatser. Däremot finns det en hel massa olika epoxityper som är anpassade att härda olika snabbt och vid olika temperaturintervaller beroende på användningsområdet. Om man vill påskynda härdnings processen så kan värmehärdning vara ett alternativ, generellt kan sägas att en 10 gradig temperaturökning ger halverad härdningstid. Värmehärdning sker oftast i två steg en lägre temperatur direkt efter att eventuell väv har vätsklart men fortsfvarande inte härdnat för att sedan höja temperaturen i ett senare skede. Temperaturhöjningen i det senare skedet gör så att tvärbindingen mellan molekylerna blir bättre varvid laminatet blir starkare, hårdare och får en lägre brottöjning. Dessutom höjs laminatets glastransitionstemperatur dvs. den temperatur när laminaten börjar mjukna och förlora sin hållfasthet. Vid rumstemperaturhärdade epoxi kan lämplig temperatur vara 50°C vid steg ett och 70-120°C vid steg två.



Vid härdning går epoxin igenom olika stadier från flytande till mer tjockflytande till ett tugummiliknande och klubbfrött stadium där formen fortsvarande kan påverkas. Därefter blir den genomhärdad och hård. För privatpersoner och vid mindre komplex industriell tillverkningen är det framförallt rumstemperaturhärdande epoxi som används. Denna typ är genomhärdad efter ca en vecka men har uppnått ca 75 % av sina egenskaper efter 1 dygn vid rumstemperatur, ca 20°C *se figur 2.7.*



Figur 2.7 Exempel på härdningsförloppet för rumstemperaturhärdande lamineringsepxi [9]

Liksom många andra plaster härdar epoxi exotermt dvs. värme frigörs när molekylerna tvärbinds. Temperaturökningen på grund av härdningen beror på hur snabbhärdande epoxin är samt hur stor avkylningsytan är i jämförelse med volymen. Eftersom epoxin härdar snabbare vid högre temperaturer är det viktigt att välja epoxityp efter hur stor mängd epoxi som skall blandas för att inte riskera att stora mängder måste kasseras.

### 2.4.3 Epoxityper

Det finns ett 50 tal olika ämnen som uppfyller kraven för epoxiharts och om man sedan tänker på att det finns flera hundra olika härdare kan man lätt se att det finns nästintill oändligt många olika epoxiplaster med olika egenskaper [4]. Däremot kan epoxiplasterna delas in i tre huvudgrupper utifrån i vilken temperatur epoxin bör härdas, *se tabell 2.3.* När epoxityp ska väljas kan typ väljas efter några olika grundförutsättningar:

- Härdningstemperatur - temperaturen som epoxin skall härda i.
- Potlife - Hur lång tid man har att lägga på epoxin
- Härdningstid – Tiden det tar för epoxin att härda

- T<sub>g</sub>, glastransitionstemperatur- Den temperatur som epoxin klarar innan den mjuknar och förlorar sina hållfasthetsegenskaper.

Tabell 2.3 Grunddata grundtyper av lamineringepoxi [9]

Epoxityp	Härddningstemperatur [°C]	Potlife (+20°C)	Härddningstid	T <sub>g</sub> [°C]
Rumstemperaturhärddande	15-25 värmehärddning: 50 efterhärddning: 70-120	15 min – 2 h	1 vecka (+20°C) 2-10 h vid värmehärddning	40-70
Värmehärddande	50-180	24 h	1 h - 3 dygn (beroende på härddningstemperatur)	90-200
Snabbhärddande	10-25	1-10 min	2h – 1dygn	40-70

#### 2.4.4 Epoxiplasternas karateristiska egenskaper

Som tidigare sagt finns det nästintill oändligt många olika typer av epoxi, dock finns vissa egenskaper som är karakteristiska för dessa:

- **Krympning** - Vid härddning sker endast en liten omorientering av epoximolekylerna vilket medför att krympningen blir ringa.
- **Vidhäftning** - en av epoxins mest utmärkande egenskaper är att den fäster vid nästan all material förutom ”hala” termoplaster och andra material med låg ytspänning.
- **Mekanisk hållfasthet** – En korrekt blandad epoxiplast är den härddplasten som uppvisar den högsta mekaniska hållfastheten av härddplasterna. Den kan ha draghållfasthet som överstiger 50 MPa, mycket tack vare de ringa krympningarna vilket gör att egenspanningarna blir låga.
- **Kemisk beständighet** - Generellt är epoxi resistent mot alkalier och tack vare möjligheterna att variera sammansättningen av epoxin framförallt genom härddarna kan den göras beständig mot de flesta kemikalier.
- **Modifierbarhet** - en av epoxins främsta egenskaper är att dess egenskaper kan varieras vilket gör att de kan möta de mest speciella krav.
- **Täthet** – epoxiplasterna kan betraktas som täta och har relativt hög ånggenomströmningstal och används ofta som skydd mot vatten. Dock går det via tillsatser att få en diffusionsöppen epoxi som t.ex. går att ändvända på en våt betong [4].

### **2.4.5 Hantering av epoxi**

För att få använda epoxi måste arbetsmiljöverkets utbildning om härdplaster genomgå. Exponering av kemikalier kan ske genom munnen, huden eller inandning. Epoxiharts anses i sig själv vara ofarlig men härdarna anses vara skadliga vid felaktig användning. Förtäring av epoxi kan ses som högst osannolik men exponering genom inandning och hudkontakt är däremot desto större. Därför ska täckande kläder, gummihandskar, skyddsglasögon och andningsmask användas. Exponering ger ofta eksem eller klåda vid kontakt men kan även ge allergi och frätskador medan inandning ger irritation.

### **2.5 Galvaniska element**

Galvaniska element uppkommer om ett ämne som är elektriskt ledande kommer i kontakt med ett ämne vars elektronegativitet avviker det andra ämnet. Galvaniska elementet nämns i dagligt tal som batteri. Vid en konstruktion som innefattar en metall och ett elektriskt ledande ämne med en elektonegativitet som avviker från metallen uppkommer ett galvanisk element vilket får till följd att metallen oxiderar (om den är mindre ädel). Galvaniska element kan antingen undvikas genom att ett icke ledande ämne väljs eller att något icke ledande ämne sätts mellan de båda ämnena som en elektrisk isolering.

### **2.6 Haparandabanan**

Haparandabanan går mellan Boden och Haparanda och vidare till Torneå i Finland. Banan som öppnades i etapper från år 1900 och framåt är inte elektrifierad förutom de första fyra kilometrarna som är gemensam med malmbanan. Stickspår mellan Morjärv-Kalix byggdes på 60-talet för att serva skogsindustrin i Kalix. Eftersom banan är i väldigt dåligt skick har en ny bana börjat byggas mellan Kalix och Haparanda. Delen Boden-Kalix kommer att uppgraderas samt elektrifieras. Banans huvudsakliga syfte är godstransport och är Sveriges enda järnvägsanslutning österut. När den nya banan tas i bruk kommer den befintliga banan mellan Morjärv-Haparanda att läggas ner. Dock tar det åtskilliga år att bygga den nya banan så den gamla sträckningen kommer att vara i drift upp till 10 år till. I väntan på att den nya banan öppnar ska den tillåtna axellasten på banan ökas från nuvarande 22,5 till 25 ton. Enligt en av Banverkets utredningar så är utmattningshållfastheten för låg för denna ökning av axellast på ett antal broar. Eftersom banan är så pass gammal är stålbroarna nitade och det är framförallt i dessa förband som hållfastheten är för låg.

# Kapitel 3:

---

## Beräkningar

### 3.1 Provkroppar

Kapitlet är inriktat på beräkningar och val av provkroppar. Det som har dimensioneras är provkroppens stålförband som utsätts för drag. Det viktigaste med dimensioneringen var att se till att provkroppens svagaste länk skulle vara hålkanterna på förbandsplattorna samt att provrighen skulle klara av att dra den till brott. Eftersom dimensioneringsreglerna[10] innehåller säkerhetsfaktorer och en ren dimensionering enligt dessa skulle ge en kraftig underskattning av hållfastheten så plockades alla säkerhetsfaktorer bort eller sattes till 1,0. Eftersom den veckliga hållfastheten skall beräknas bör hållfasthetsmedelvärden på stålet användas. Dock är det karakteristiska värdet på stålen som slålproducenterna sätter ut på stålet. Det karakteristiska värdet är 5%-fraktilen vilket ger en underskattning av stålhållfastheten. På grund av svårigheten med att få medelvärdet används en uppskattning av medelvärdet enligt *formel 3.1*. Eftersom provkropparna skulle belastas så att stålet deformeras plastiskt samt osäkerheten kring hållfastheten på provkroppen som var kolfiberförstärkt över bultförbandet gjorde det att den dimensionerande hållfastheten på förbandet ansågs vid detta stadium inte få uppnå mer än halva provrighens kapacitet vilket var 60 ton.

$$f_m = f_k \cdot 1,03 \quad (3.1)$$

De brottstyper på ståldetaljerna som kontrollerades var:

- Hålkantsbrott i förbandsplatta som beräknades enligt formel 3.2

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (3.2)$$
$$= 212,6 \text{ kN}$$

- Hålkantsbrott i plattstål som beräknades enligt formel 3.2

$$=318,9 \text{ kN}$$

- Bultbrott som beräknades enligt formel 3.3

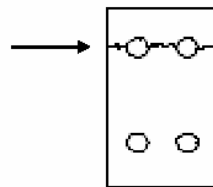
$$F_{v,Rd} = \frac{a_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad (3.3)$$

$$=397,6 \text{ kN/förband(4 skjuvpunkter)}$$

- Brott vid bult förbandsplatta enligt formel 3.4

$$F_{Rd} = f_u \cdot A \quad (3.4)$$

$$=278 \text{ kN}$$



Figur 3.1 Brott vid bult förbandsplatta

- Brott vid bult plattjärn enligt formel 3.4

$$= 495 \text{ kN}$$



Figur 3.2 brott vid bult plattjärn

Antagna värden

$$g_{M2} = 1,0$$

$$k_1 = 2,5$$

$$a_b = 1,0$$

Materialparametrar ståldetaljer

$$f_{yk} = 275MPa$$

$$f_{uk} = 430MPa$$

$$f_{ym} = 275MPa$$

$$f_{um} = 430MPa$$

$$E = 210GPa$$

Materialparametrar bultar

$$f_{yk} = 640MPa$$

$$f_{uk} = 800MPa$$

$$f_{ym} = 275MPa$$

$$f_{um} = 430MPa$$

$$E = 210GPa$$

Dessutom kontrollerades att bultavstånden som valts låg inom EC3 1-8 dimensioneringsgränser.

Dimensioneringen av kolfibern utfördes med synpunkt på styrka och styvhet. Styrkan dimensionerades så att brottet skulle ske i förankringen mellan stål och fiberkompositen. Ur styvhetssynpunkt så eftersöktes en komposit så pass styv att stor del av kraften skulle tas upp av denna även när ett bultförband låg under kompositen. Dessutom lades två lager fiber ortogonalt mot längdriktningen på provkroppen för att eventuella krafter i den ledden skulle kunna ta upp. Kolfiberlagrens placering i kompositen kan se i kapitel fyra.



# Kapitel 4:

---

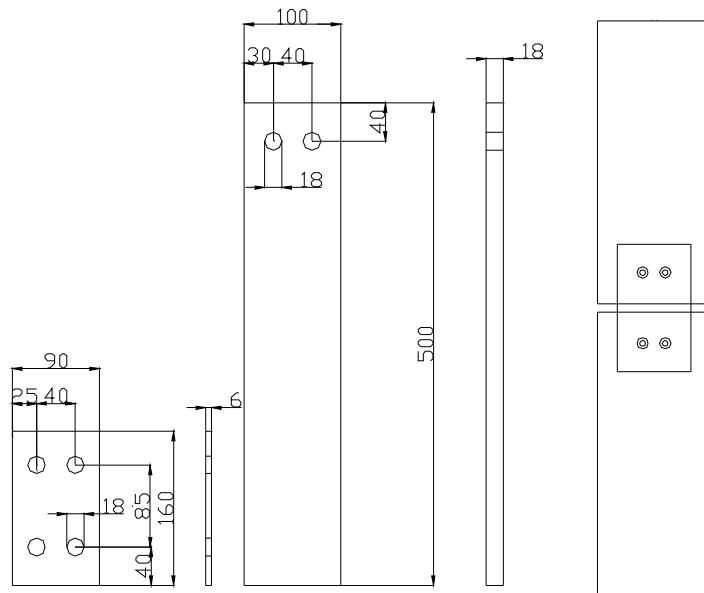
## Försöksuppställning

### 4.1 Försöksuppställning i labbet

I labbet testades fyra olika typer av provkroppar (*se figur 4.2*). På grund av svårigheterna med att uppnå repeterbarhet med nitade förband så användes bultförband med avrundade bultskallar och muttrar för att i det längsta möjliga likna ett nitförband. Svårigheterna med att använda ett befintligt nitförband i förhållande till ett bultförband är framförallt att provkroppens utseende inte kan bestämmas, samt att osäkerheter kring materialparametrar och stålets skick (ex. mikrosprickor). Provkropparnas dimensioner bestämdes utifrån tre huvudaspekter:

- **Hanterbarhet** - provkroppen bör utan större problem gå att lyfta utan hjälpmedel samt vara i en storlek att de ska vara lätt att lägga på kolfiberkompositen.
- **Provriggens kapacitet** – provrigger måste kunna dra sönder provkroppen. Detta medförde att handberäkningar på hållfastheten på provkroppen gjordes och jämfördes med provriggens kapacitet. I beräkningarna som kan ses i kapitel 3 togs alla säkerhetsfaktorer bort för att på ett ungefär få fram vilken hållfasthet som provkroppen kunde tänkas hålla för.
- **Möjlighet till speckelmätning** – Provkroppen var tvungen att vara så pass stor att den gick att speckelmäta på.





Figur 4.1 Produktionsritningar ståldetaljer[mm]samt hur de sitter ihop

De olika provkropparna som testas var:

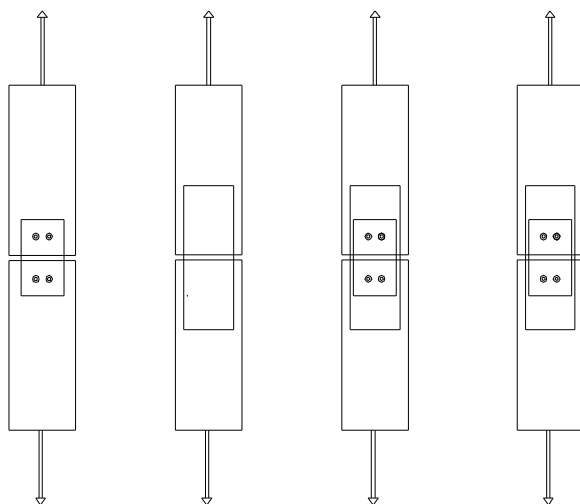
- |                    |  |
|--------------------|--|
| Referens bultar:   | Provkroppen sätts samman med ett bultarförband bestående av fyra 8.8 bultar med diametern 16mm enligt figur 1. Två provkroppar av denna sort testades. Ingående delar kan ses i figur 4.4. Vid analyseringen av speckelmätningen valdes subbildsstorlek till 64*64 pixlar vilket i detta fall är ca 9*9 mm |
| Referens kolfiber: | Plåtarna sammanfogas med kolfiber som limmats fast med epoxi. Två provkroppar av denna modell testades. Ingående delar kan ses i figur 4.4. Vid analyseringen av speckelmätningen valdes subbildsstorlek till 64*64 pixlar vilket i detta fall är ca 9*9 mm  |

Kolfiber och bultar:

En kombination av provkropparna ovan där kolfiber limmades över ett liknande förband som använts i "referens bultar". På bultförbandet har bultskallarna samt muttrarna avjämnats för att så långt som möjligt efterlikna nitarnas form (se figur 4.4). Områdena kring bultarna och övergång förbandsplatta/dragplåt har spacklats upp med epoxi för att undvika tvära kanter som kan ge upphov till luftfickor och spänningskoncentrationer. En provkropp av denna modell testades. Ingående delar kan ses i figur 4.7. Vid analyseringen av speckelmätningen valdes subbildsstorlek till 64\*64 pixlar vilket i detta fall är ca 14\*14 mm

Kolfiber och kapade bultar:

Likadant som prov 3 men med skillnaden att bultarna var kapade så att de inte tog någon kraft. En provkropp av denna modell testades. Ingående delar kan ses i figur 4.7. Vid analyseringen av speckelmätningen valdes subbildsstorlek till 64\*64 pixlar vilket i detta fall är ca 14\*14 mm



Figur 4.2 Provkropparna som testades i labbet. F.v. referens bultar, referens kolfiber, kolfiber och bultar, kolfiber och kapade bultar

Referens provkropparna hade i syfte att vara referens för de två andra provkropparna dvs. de behövdes för att kunna se skillnaden mellan oförstärkt och förstärkt samt se vad hållfastheten på kolfibern var utan störning av underliggande förband.

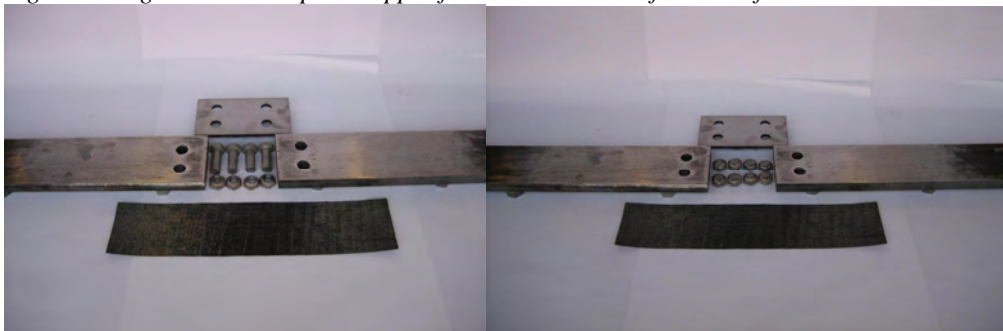


*Figur 4.3 Avrundad och kapad bultskalle.*

På provkropp 2,3 och 4 limmades tio lager kolfiberväv varav två lager ortogonalt med längriktningen på provkroppen. De ortogonala lagren av kolfibern las på lagren 4 och 8 räknat från stålet och utåt. Innan limmig slipades provkropparna med sandpapper för att eliminera eventuell rost. Just innan limning rengjordes provkropparna med aceton att få bort smuts och fettrester som kunde minska vidhäftningen mellan stålet och kompositen.



*Figur 4.4 Ingående delar i provkropp referens bultar och referens kolfiber*



*Figur 4.5 Ingående delar i provkropp kolfiber och bultar samt kolfiber och kapade bultar*

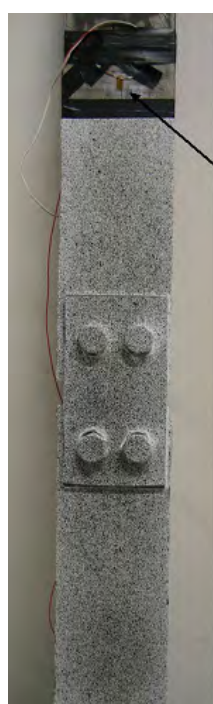
Kolfiberväven var 90 mm bred och förankringslängden valdes till 200 mm vilket gav en total längd av 400 mm på provkropp två och 560 mm på tre och fyra. Kolfibern som användes var BPE NSMR 200S vilket betyder att det var en kolfiber av S-typ med 200g/m<sup>2</sup> vilket gjorde att den totala kolfibermängden blev 2kg/m<sup>2</sup> och sida. Kolfibrens materialparametrar kan ses i tabell 4.1 nedan.

Tabell 4.1 Produktdata enligt leverantören på kolfibern som användes i labbarna (bredd=300mm),[11].

BPE® NSMR	Tvårsnittsarea (mm <sup>2</sup> )	E-modul (GPa)	Draghållfasthet (MPa)	Brottöjning (%)
200S	33	228	3600	1.5

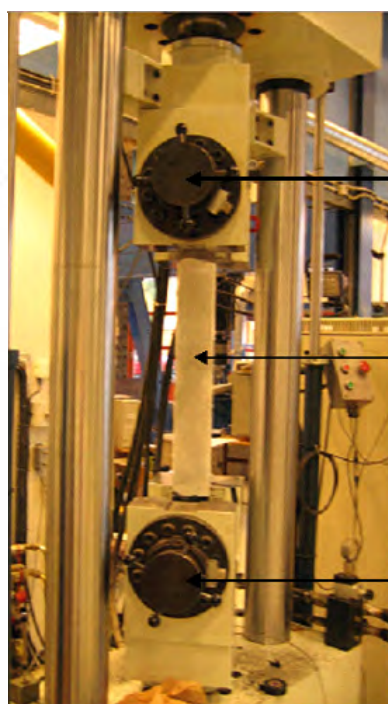
### 4.1.1 Mätning

Provkropparna utsattes för drag i provriggen i figur 4.7 nedan. Töjningarna i provkropparna mättes genom speckelmätning (fotogrammetri). På proverna sattes även en töjningsgivare strax utanför mätområdet för att rimligheten i speckelmätningen skulle kunna bedömas, se placering i figur 4.6.



Töjningsgivare

Figur 4.6 Placering av töjningsgivare



Grepp

Provkropp

Grepp

Figur 4.7 Provrigg som användes i labbet

Proven drogs med en jämn deformationshastighet av 0,01mm/s. Bilder till speckelmätningen togs på var 10 kN förutom i slutskedet av dagningen av provkroppen referens bultar då bilderna togs med ett intervall av 50 sekunder eftersom kraften ökade sakta. Samtidigt som deformationerna ökade i samma takt som förut. Fotografierna togs med en digitalkamera med hög upplösning (Canon EOS 5D med ca 13 megapixel), samt att en studioblix användes för att få så jämn ljusbild som möjligt. För att minska risken att kameran skulle flytta sig under fotograferingen användes fjärtlösare till kameran. Bilderna analyseras sedan i ett dataprogram där töjningarna kan ses. Utöver mätningarna med speckelmätning mättes förskjutningarna på provkroppen (förskjutningarna mellan angreppspunkterna), kraft och töjning. Förskjutning, kraft och töjning mättes fem gånger per sekund.

## 4.2 Speckelmätning

Metoden är en mätmetod där förskjutningar inom mätområdet mäts genom analysering av fotografier som tas på det önskade området. Förskjutningarna kan i sin tur översättas till töjningar. Mätningen sker genom fotografisk mätning vilket innebär att man tar foton före och under belastning av provkroppen. Innan belastning sker har provkroppen preparerats med ett mönster inom det tänkta mätområdet. Mönster består av ett oregelbundet mönster av ljusa och mörka fält vilket ger stor kontrast mellan de olika fälten. Dessa fält kan exempelvis byggas upp antingen av att man limmar svart och vit sand på ytan eller målar en ljus bakgrund och därefter sprättar på svart färg för att få ett mönster. Den svarta färgen kan appliceras på provkroppen med hjälp av en diskborste (se figur 4.8). Med sandmetoden är det lättare att få ett jämt mönster jämfört med det målade mönstret, medans fördelen med att måla mönstret är att färgen följer provkroppen och inte döljer små förändringar samt att den är lättare att applicera. Analyseringen av bilderna sker genom att bilderna som föreställer mätområdet före och under belastning läggs in i dataprogrammet DSP, vilket delar upp det mätta fältet i mindre ytor (subbilder). Därefter beräknas tyngdpunkten i vart och ett av ytorna och en jämförelse av före och under belastningsbilderna sker. Tyngdpunktsförändringen i bilderna översätter programmet sedan till töjningar varefter resultatet kan ses i en bild där töjningarnas storlekar ger olika färger (se figur 5.2), lik de bilder som fås i ett FEM program. Dessutom kan resultatet fås i siffror (förskjutningarnas storlek och var på provkroppen) samt bild på huvudtöjningsriktningarna och dess storlek. Vid fortsatt analys av de provresultaten fås krafterna räknas ut, under förutsättning att det testade materialets materialegenskaper är kända. Fördelarna med speckelmätningarna gentemot andra testmetoder, är att man får en helhetsbild över testområdet som man i annat fall skulle vara svårt eller omöjligt att åstadkomma, en annan fördel är att metoden är relativt enkel att utföra. Det enda som behövs är en bra kamera (hög upplösning och helst digital), studioblix (vid svagt ljusförhållanden) och ett mönster på provkroppen [5].

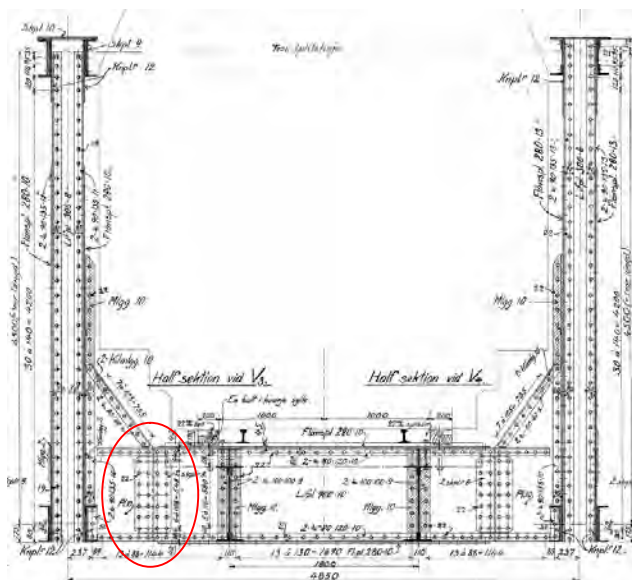


*Figur 4.8 Sprättning av mönster samt färdigt resultat*

## 4.3 Provning i fält

### 4.3.1 Provning

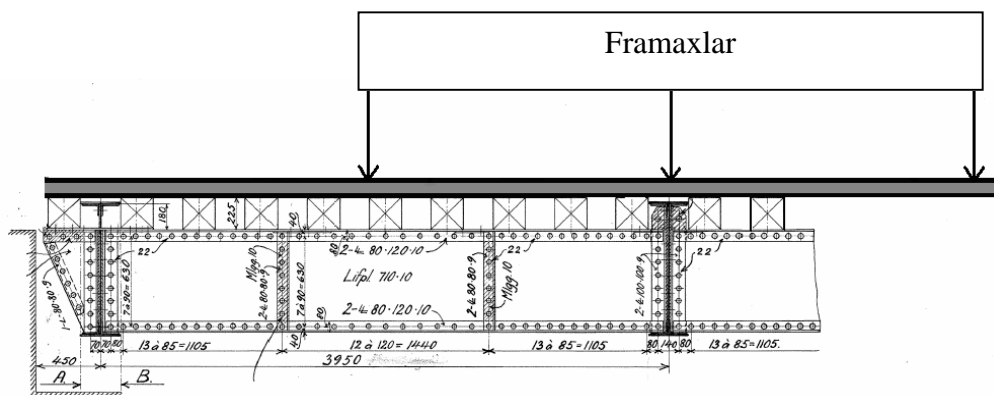
Provningen skedde på bron över Kärnsjoki efter Haparandabanan där mätningar gjordes på belastad samt obelastad bro. Provningen skedde på nitförbandet som sitter på tvärbalken se *figur 4.9*. Enligt Banverkets tidigare utredning så ska det aktuella förbandet inte uppfylla utmattningskraven om banverket höjer axellasten som planerat från 22,5 tons axellast till 25 ton. Eftersom bron ligger på den del av Haparandabanan som ska ersättas med en nybygd bana inom ett antal år är ett byte av bron inte aktuellt. Därför var banverket intresserad av att få det aktuella förbandet uppmätt för att se om krafterna är så stor som beräkningarna säger. Som belastning på bron användes ett T66 lok på 126 ton vilket stod stilla med det mittersta hjulparet av tre på främre boggin rakt över den aktuella balken. Mätningarna på belastad bro gjordes när bron stabiliserat sig från de svängningar som uppkommer efter att loket kört ut på bron. Som mätmetod användes speckelmätning. Mätningarna skedde på oförstärkt bro och eftersom bron hade en ljus färg så målades ingen bakgrund utan endast de mörka fälten målades. För att få en jämn ljusbild på mätområdet så hängdes en pressning ner från bron vilket gjorde att skugga bildades på hela mätområdet. Kameran placerades under bron på brofundamentet för att få en stabil plattform. Vid analyseringen valdes subbildsstorleken till 64\*64 pixlar vilket är ca: 19\*19mm på provkroppen.



Figur 4.9 Sektion av Kärnsjoki bron där det testade området är inringat. [12]



Figur 4.10 Kärnsjöbron samt förbandet som testades



Figur 4.11 Placering av framaxlarna på tåget vid belastning av bron.[12]





# Kapitel 5:

---

## Resultat

### 5.1 Styvhet och bärförmåga

Gemensamt för proven med kolfiber är att styvheten är hög, ca 117 kN/mm oavsett om underlaget är platt eller ojämnt på grund av underliggande förband. Däremot skiljer hållfastheten väsentligt mellan provkropparna, där högsta uppmätta bärförmåga är 292 kN för provkropp ”kolfiber och bultar”. Minsta uppmätta bärförmåga är 142 kN på provkroppen kolfiber och kapade bultar.

I diagramlinjen för ”kolfiber och bultar” *figur 5.1* kan ett stort jack i kurvan ses, dock kan det även observeras att lutningen efter jacket i princip är desamma. En markant skillnad mellan de förstärkta förbanden och de oförstärkt är att de oförstärkta behöver en viss förskjutning innan de börjar ta last medan de förstärkta förbanden tar last direkt då töjningarna börjar.

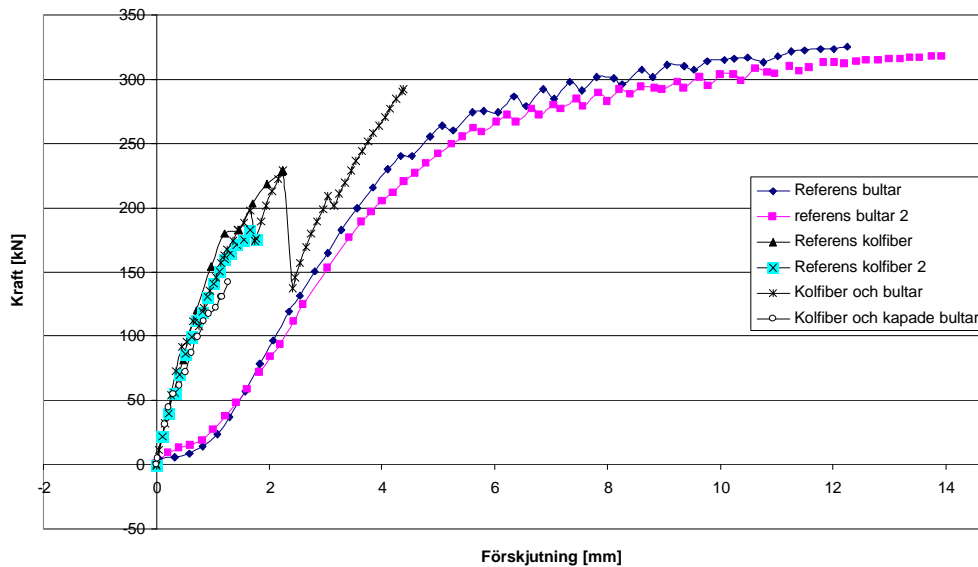
Referens bultförband kan delas in i tre stadier:

1. Förskjutning ca: 0-1,2 mm. I det området sker förskjutning utan att någon större kraftökning sker.
2. Förskjutning ca: 1,2-4,4 mm, I det intervallet har provet en hög styvhet dvs. en ökning av förskjutningen kräver stor kraft.
3. Förskjutning ca 4,4- mm, här har styvheten minskat så att en liten kraftökning ger stor förskjutningsökning.

I stadie 2 är provkropparna är som styvas uppnås en styvhet på ca: 69 kN/mm vilket är betydligt lägre än de provkroppar med kolfiber.

Tabell 5.1 Förskjutning vid max kraft

Testkropp	Max kraft [kN]	Förskjutning vid max kraft [mm]
Referens bultar	325	12,3
Referens kolfiber	229	2,26
Referens bultar 2	318	13,73
Referens kolfiber 2	189	1,77
Kolfiber och bultar	292	4,38
Kolfiber och kapade bultar	144	1,28



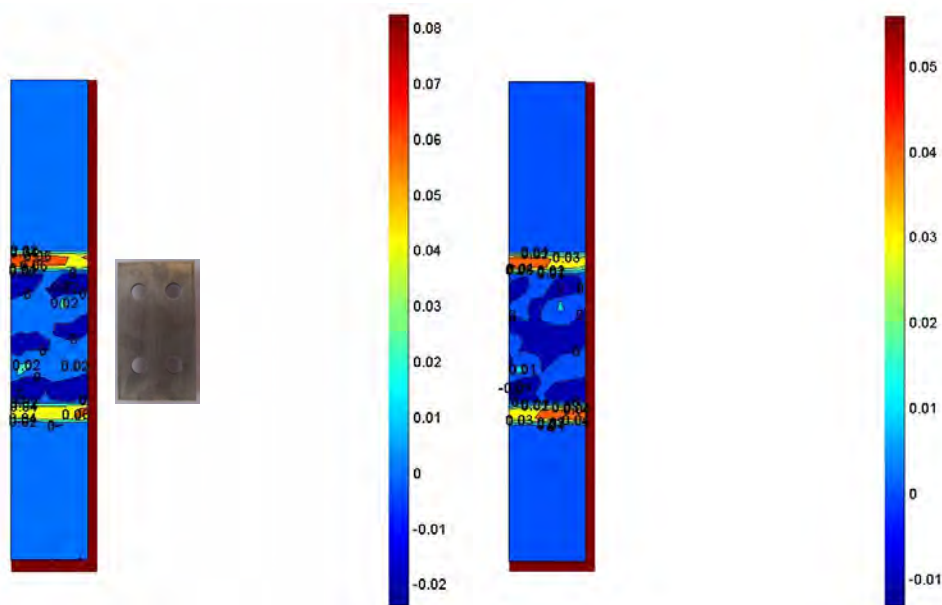
Figur 5.1 Förhållande mellan kraft och töjningar på provkropparna

## 5.2 Töjningsfördelning

Resultaten av speckelmätningen av provkropparna presenteras i två bilder per provkroppstyp där ena bilden visar töjningarna just innan brott/avbrutet försök och den andra bilden visar belastning vid 130 kN. Gemensamt för de tre provkropparna som syns på figur 5.4, 5.6 och 5.8 är att provområdet som syns på bilderna är området som är täckt av kolfiberkompositen.

### Referens bultar:

Töjningsbilderna visar stora töjningar upp till 6% vid avbrutet försök (325kN) och 3% vid 130kN vid skarven mellan förbandsplatta och plattjärnen, *se figur 5.2*. Provningsen av denna provkropp avbröts när plasticering ansågs ha uppnåtts varvid hålkantsbrott på förbandsplattan uppkommit, *se figur 5.3*.



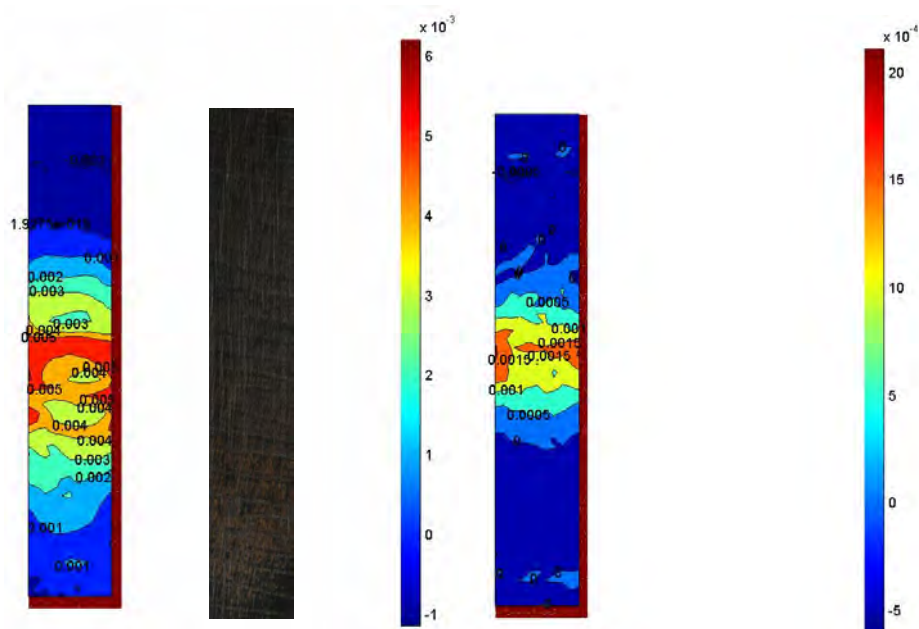
*Figur 5.2* Töjningar i y-led på provkropp "referens bultar" vid 325kN samt vid 130kN. Dessutom visas placering av förband i y-led.



*Figur 5.3* Hålkantsbrott på förbandsplatta

### Referens kolfiber:

Där uppvisas de största töjningarna mellan plattjärnen och minskar successivt ut mot slutet av mätområdet. Speckelbilden när belastningen är 220kN uppvisar töjningar ända ut till slutet av kolfibern vilket är desamma som mätområdet, medan töjningarna minskar till noll på bilden vid 130kN, se figur 5.4. Brottsmodet på denna var förankringsbrott mellan stol och kolfiber enligt figur 5.5



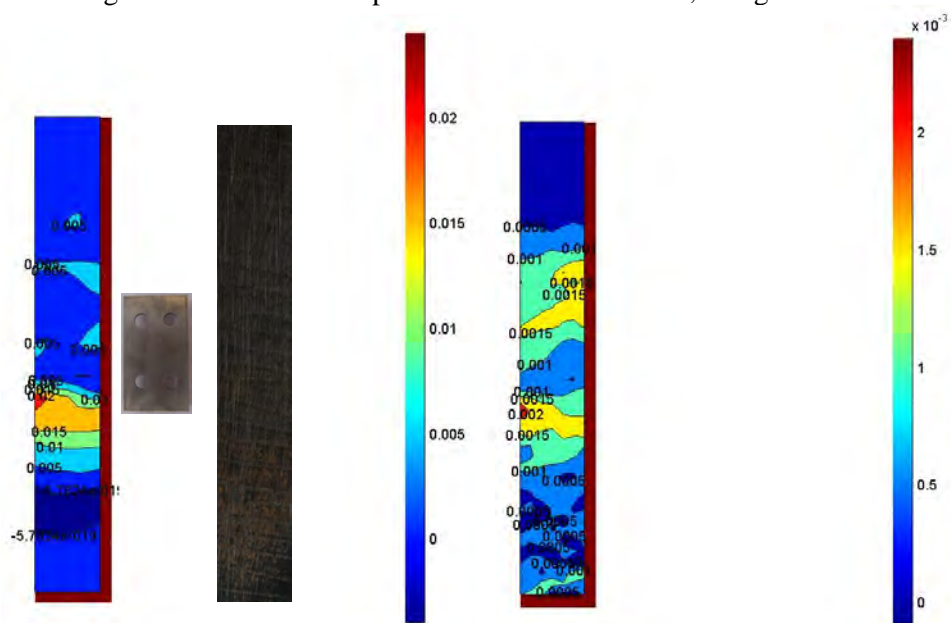
Figur 5.4 Töjningar y-led av provkropp "referens kolfiber" vid 220 och 130kN samt placering av kolfibern i y-led



Figur 5.5 Förankringsbrott

### Bultar och kolfiber:

Speckelbilden av provkroppen uppvisar extremt höga töjningar då dessa når upp till fibrernas brottgräns, däremot uppvisar figuren över töjningarna vid 130 kN (se figur 5.6) töjningar på 0,2% vilket är 13% av kolfibers brotttöjning. Denna provkropp gick till brott genom att kolfiberkompositen lossnade från stålet, se figur 5.7.



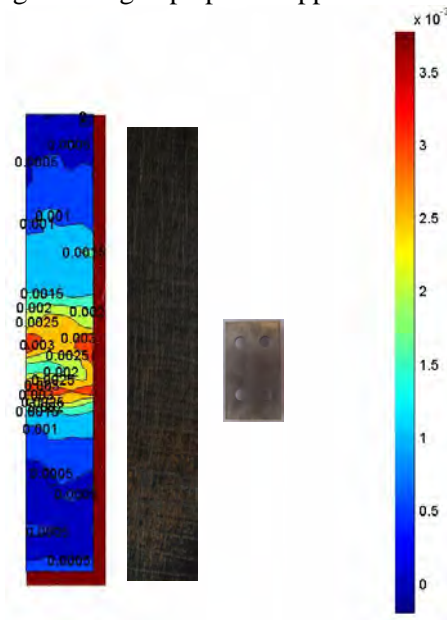
Figur 5.6 Töjningar i y-led provkropp "kolfiber och bultar" vid 290kN och 130kN samt placering av förbandsplatta och kolfiber i y-led.



Figur 5.7 Brott på provkroppen "kolfiber och bultar"

### Kolfiber och kapade bultar:

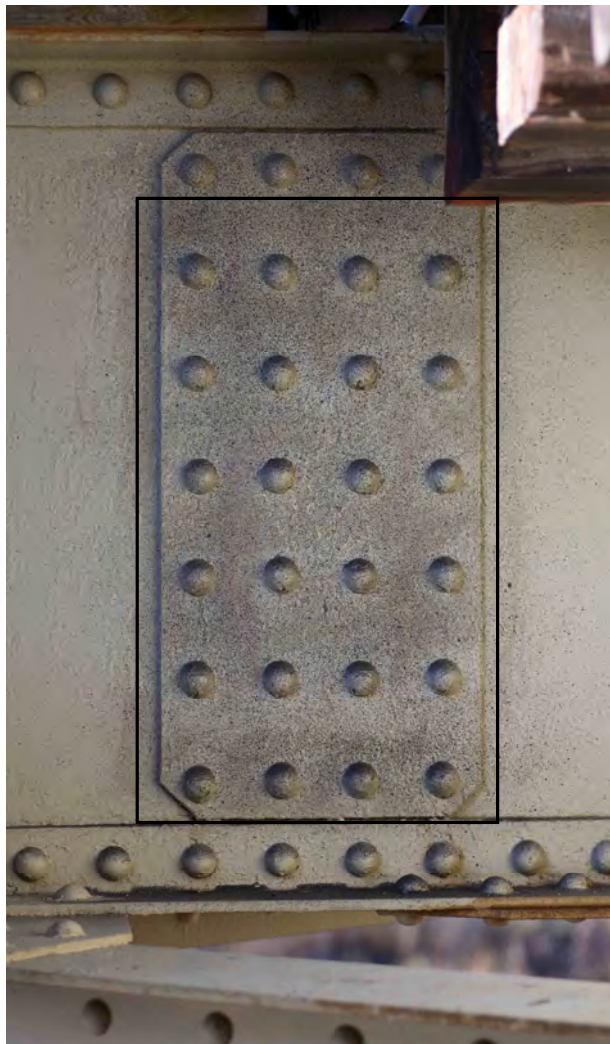
Speckelbilden visar att de högsta töjningarna just innan brott (130kN) är från bultarna och ut mot kanten av provkroppen. Där nås en töjning på 0,3% och från detta värde minskar töjningarna i längdriktningen på provkroppen.



Figur 5.8 Töjningar i y-led provkropp Kolfiber och kapade bultar

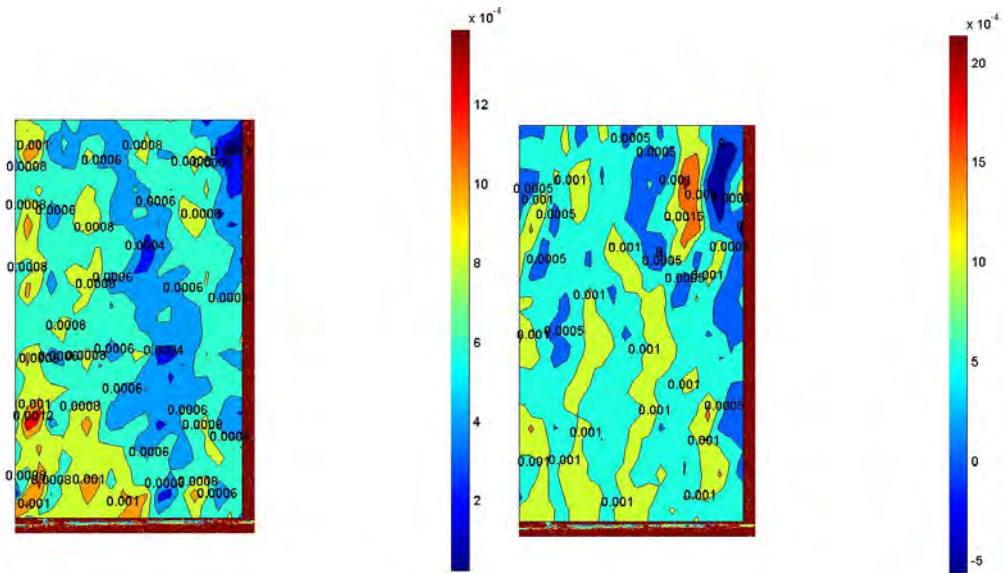
### 5.3 Nitförband på järnvägsbro

Figurerna 5.10 och 5.11 nedan visar töjningarna på förbandet i x- respektive y led . töjningarna presenteras med två figurer av varje sort med belastning vid samma belastningsfall (126 ton tungt T66 lok). Bilderna visar att töjningarna i y-led är positiva över hela mätområdet och är som störst längst ner på förbandet. Där visar figur 5.11 en töjning på upp till 0,2 %. Det som också går att utläsa ur figurerna är att töjningarna generellt är lite lägre i x-led i jämförelse med y-led.

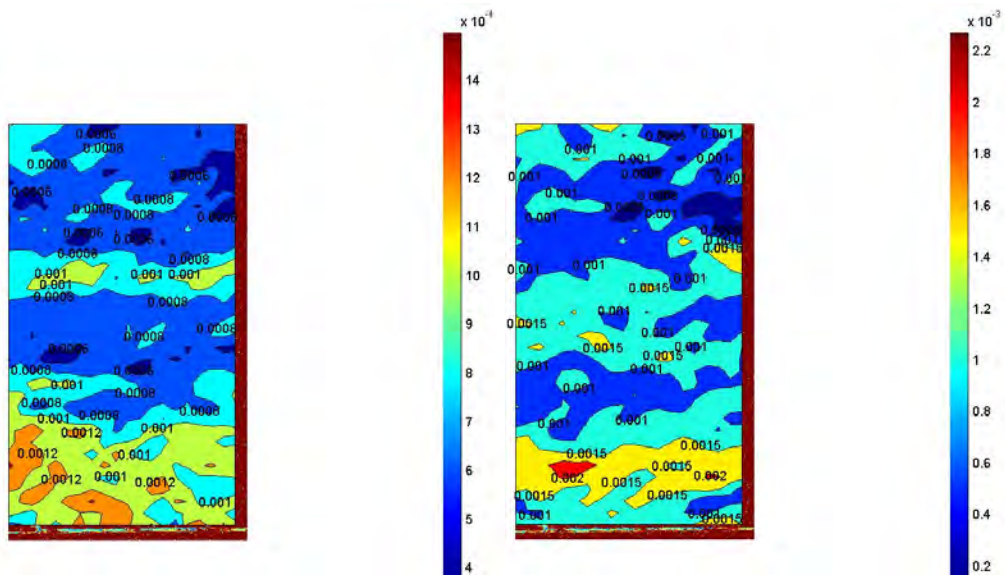


Figur 5.9 Mätområdet för speckelbilderna i figur 5.10 och 5.11





Figur 5.10 Töjningar i x-led



Figur 5.11 Töjningar i y-led

# Kapitel 6:

---

## Slutsatser/Diskussion

### 6.1 Slutsatser

Ur mätdata i resultatkapitlet kan följande slutsatser dras:

- Förstärkning med kolfiber över nitförband blir ett väldigt styvt förband som tar krafter efter att förskjutningarna börjar uppkomma. Detta medför att kraften och amplituden i kraftväxlingarna på det underliggande förbandet minskar. Minskningen av amplituden, den viktigaste enskilda faktorn vid utmattning gör att utmattningshållfastheten ökar.
- De största påkänningarna på kolfiberkompositen sker längs bultraderna vinkelrätt kraftriktning i labben.
- Mönstret som applicerades hade god korrelation på brons mätyta, dvs. mönster på mätytorna var bra så att mätning med fotogrammetri är möjligt i vid sådana förhållanden som rådde vid fältförsöket.

### 6.2 Saker som skulle ha gjorts annorlunda

Om jag skulle ha gjort detta arbete med de kunskaper detta arbete gett mig vissa saker ha gjort annorlunda. Detta för att få bättre data att analysera eller bara göra arbetet lättare. Saker som eventuellt skulle ha gjorts annorlunda är:

- Kameraplaceringen vid speckelmätningen skulle ändras från att vid början av detta arbete vara placerad så att bilden är bredare än hög till att vara högre än bred dvs. kameran skulle ha ställts på högkant. Eftersom provkropparna är högre än bred så skulle denna kameraplacering medföra att större del av fotografiet upptogs av mätområdet vilket gör att bilden över mätområdet blir på fler pixlar. Sedan skulle det tänka sig att endast halva nuvarande mätområde fotograferades eftersom symmetri råder på övre och under halvan av provkroppen. Denna ändring skulle göra att kameran skulle kunna flytas närmare och mätområdet skulle även då bestå av fler pixlar.
- Placering av töjningsgivare på den halva av provkropparna som inte skulle fotograferas, enligt ovan. Detta skulle göra att säkerheten av de uppmätta töjningarna skulle bli större.

- Vara två stycken på arbetet vilket skulle minska tiden att framställa en rapport som istället kunde användas till att tillverka flera provkroppar av varje slag. Då skulle med större säkerhet hållfastheten av kolfiberförstärkning kunna sägas.
- Någon sorts kalibrering av töjningarna på brons mätytan eftersom säkerheten på vad som mäts inte helt går att säkerställa.

### **6.3 Felkällor**

Vid ett arbete som innefatta laborationer smyger det alltid in en del faktorer som göra att resultaten inte alltid blir vad de skulle om ideala förhållanden hade rått. Därför har tänkbara felkällor som finns inbakade i resultaten listats upp nedan.

Felkällor i labbet:

- Provrigen pumpar dvs. jämn töjningshastighet har inte alltid erhållits.
- Glapp mellan bult och hål.
- Initial krokighet av provkropparna vilket leder till initial spänning vilket i sin tur kan ge lägre hållfasthet.

Felkällor vid mätning av bron:

- Inga felkällor av någon större betydelse har observerats under arbetet.

### **6.4 Förslag till fortsatt forskning**

För att i framtiden börja använda förstärkning med kolfiber på permanenta nitkonstruktioner så behövs mer forskning på området med provning av andra lastfall och fältförsök. Vid framtida användning på permanenta konstruktioner finns det vissa saker som upptäckts i detta arbete som måste betänkas vid framtida permanenta förstärkningar. Kolfiberkomposit är elektriskt ledande och har en elektronegativitet som skiljer sig från stål, detta medför att ett galvaniskt element kommer att uppstå om kompositen limmas direkt på stålet. Det galvaniska elementet kommer att göra så att stålet rostar vilket gör att vidhäftningen mellan komposit och stål minskar. Detta ska dock inte vara något större problem då det troligen går att lösa med att ett icke elektrisk ledande ämne placeras mellan kolfiber och stålet. Detta ämne skulle förslagsvis vara glasfiber vilket fungerar bra ihop med kolfiber samt att det inte är elektriskt ledande.

## **6.5 Övriga reflektioner**

Vid mätning av bron blir töjningarna väldigt höga (upp till 0,2 %) samt att hela mätytan är dragen. Vid omräkning till spänningar skulle dessa töjningar motsvara 400MPa vilket är verkar orimligt eftersom stålet på denna bro då skulle flyta.



# Kapitel 7:

---

## Referenser

- [1] Mohammad A. (2002). Fatigue in riveted railway bridges  
Department of structural Engineering steel and timber structures. Göteborg. Chalmers  
university of Technology. (ISBN 91-7291-211-1)
- [2] Larsson T. (2006). Material and fatigue properties of old metal bridges.  
Department of Civil and Environmental Engineering. Luleå University of Technology.  
(ISSN 1402-1757)
- [3] Eriksson K. (2006) Att konstruera med stål, Modul 8 Utmattning, Luleå Tekniska  
Universitet
- [4] Becker D. (2003). Betongplattor förstärkta med kolfiberkomposit. Examensarbete  
2003:130 CIV Avdelningen för konstruktionsteknik, Luleå tekniska universitet (ISSN  
1402-1617)
- [5] Carolin A. Photographic strain monitoring for civil engineering, Luleå University  
of Technology
- [6] Hull D & Clay T.W. (2006) An introduction to composite materials, 2<sup>nd</sup> edition,  
The press syndicate of the University of Cambridge, (ISBN 0 521 38190 8)
- [7] Clarin M. (2002). Betongbalkar förstärkta med kolfiberkomposit. Examensarbete  
2002:130 CIV Avdelningen för konstruktionsteknik, Luleå Tekniska Universitet.  
(ISSN 1402-1617)
- [8] Andreasson B. kompositmaterials hydro-mekaniska egenskaper
- [9] [www.kolfiber.info.se](http://www.kolfiber.info.se) 2006-11-03
- [10] Eurocode 3 Design of Steel Structures (2005)
- [11] [www.bpesystems.se](http://www.bpesystems.se) 2006-11-01
- [12] Banverket, ritning: lit.B.1886-C



## Appendix:

---



*Kolfiberkompositen på provkroppen "referens kolfiber" härdar*



*Praktikant och James på bron över keräsjoki*





*Kapad och avrundad bult med tillhörande mutter*



*T66 tåget strax efter belastning av bron*