

# **Beständighet hos FRP-armering i betong**

**Etapp III**

**Valter Dejke  
Olivier Poupard**

**2003-09-26**

## **Sammanfattning**

Ett forskningsprojekt har genomförts där beständigheten hos betongarmering av glasfiberkomposit studerats. Experiment har utförts där tre exponeringsbetingelser använts: ingjutning i fuktmättad betong, ingjutning i ”normalfuktig” betong samt ingjutning i fuktmättad betong och samtidigt utsatt för kontinuerlig dragspänning. Stänger som varit ingjutna i fuktmättad betong och exponerats i utomhustemperatur i drygt fyra år har kvar mellan 75% och 90% av ursprunglig hållfasthet. Fuktnivån har visat sig ha extremt stor inverkan på materialnedbrytningens omfattning. Glasfiberkompositstänger som varit ingjutna i betong i 3 år hade 94% kvarvarande draghållfasthet om betongens relativa fuktighet var 75%, men endast 53% om betongens relativa fuktigheten var 100%. Resultaten för stänger som exponerats för fuktig betong under belastning tyder inte på att dragspänningen har någon negativ inverkan på nedbrytningens hastighet, förutsatt att belastningen inte är så hög att spänningsskorrosion inträffar. Spänningsskorrosion inträffade för fyra stänger som varit ingjutna i fuktmättad betong vid 60°C i 141 till 234 dygn under en samtidig belastning motsvarande 25% av ursprunglig draghållfasthet.

## **Förord**

Projektet Beständighet hos FRP-armering Etapp III, som redovisas i denna rapport, är fortsättningen på Projektet Beständighet hos FRP-armering Etapp I och II som bedrivits på Institutionen för byggnadsmaterial under perioden 1997-2000, och som ledde fram till licentiatexamen för Valter Dejke i början av 2001. I denna rapport redovisas de resultat som framkommit i projektet fram till september 2003. För ett mindre antal stänger har dock exponeringstiden beslutats förlängas med knappt ett år till juni 2004. Skälet till detta är att spridningen i hållfasthetsreduktion (i förhållande till den absoluta hållfasthetsreduktionen) har visat sig vara större än förväntat, vilket försvårar utvärderingen. En längre exponeringstid skulle dock betyda större nedbrytning (dvs. lägre resthållfasthet) vilket gör att inverkan från den relativt stora resultatspridningen blir mindre, och resultaten därför lättare att tolka.

Arbetet i Etapp III har i huvudsak utförts av Valter Dejke och Olivier Poupard. Lars-Olof Nilsson har varit projektledare. Ett tack till SBUF, Formas och EU-nätverket TMR ConFibreCrete som bidragit med finansieringen. Ett tack också till Per Åhman (som svarat för projektsamordningen) och övriga medlemmar i referensgruppen från FoU-Väst, samt Ralejs Tepfers, för deras insats.

# 1 Bakgrund

Projektet ”Beständighet hos FRP-armering Etapp III”, som från och med nu benämns Etapp III, är fortsättningen på Projektet Beständighet hos FRP-armering Etapp I och II som bedrivits på Institutionen för byggnadsmaterial under perioden 1997-2000. Etapp I utgjordes av en litteraturstudie där beständighet hos GFRP-armering i alkalisk miljö identifierades som det område där forskningsbehovet var störst. I Etapp II utsattes olika typer av obelastade GFRP-armeringsstänger för accelererad exponering i betong, alkalisk lösning respektive vatten vid olika temperaturer. Genom att studera skillnaden i nedbrytningshastigheten vid olika temperaturer kunde en ”tidsförskjutningsfaktor” bestämmas. Arbetet i Etapp I och II ledde fram till licentiatexamen i början av 2001. I Etapp III (projektstart hösten 2001) har GFRP-stänger gjutits in i betong och utsatts för konstant mekanisk belastning under olika temperaturer för att studera hur temperaturen påverkar nedbrytningshastigheten och därmed tidsförskjutningsfaktorn, under sådana betingelser. I Etapp III har även ingått att hållfasthetstesta, och analysera resultaten för ett antal stänger för vilka exponering startades i Etapp II men som ej har testats i den etappen.

## 2 Studiens syfte och omfattning

Etapp III har omfattat kvantifiering av nedbrytningen (i form av draghållfasthetsreduktion), samt bedömning av tid-temperatursambandet för glasfiberkompositstänger som utsatts för olika typer av exponering. Etapp III kan indelas i tre delstudier enligt nedan, där exponeringsbetingelser och syftet med respektive delstudie kortfattat beskrivs.

### **Inverkan av fuktmättad betong**

Exponering: Provstänger ingjutna i fuktmättad betong utan samtidig mekanisk belastning och lagrad vid olika temperaturer. Exponeringen av dessa stänger startades i etapp II. Syftet med denna delstudie har varit att, med hjälp av accelererad provning, bestämma hur snabbt obelastat materialet bryts ner i betongkonstruktioner i mycket fuktig miljö. Tidigare studier (refererade till i Dejke, 2001) pekar på att nedbrytning sker snabbare ju fuktigare exponeringsmiljön är. Resultaten som denna delstudie ger kan därför betraktas som liggande på den ”säkra sidan”, eftersom betongkonstruktioner utomhus i regel ej är fuktmättade. Med undantag för stänger exponerade utomhus har data för denna typ av exponering redan framtagits, inom etapp II, men mätningarna inom etapp III ger resultat för längre exponeringstider.

### **Inverkan av ”normalfuktig” betong**

Exponering: Provstänger ingjutna i betong utan samtidig mekanisk belastning och lagrad vid 75% RF (relativ fuktighet), vilket är en fuktighetsnivå som ligger relativt nära den som råder i de flesta betongkonstruktioner utomhus. Exponeringen av dessa stänger startades i etapp II. Syftet med denna delstudie har varit att jämföra nedbrytningens storlek i betong med en ”normal” fuktighetsnivå, med den som föreligger i fuktmättad betong.

### **Inverkan av fuktig betong och samtidig dragspänning**

Provstänger ingjutna i fuktmättad betong med samtidig mekanisk belastning och lagrad vid olika temperaturer. Syftet med denna delstudie har varit att undersöka den mekaniska belastningens inverkan på nedbrytningens storlek. Teorier har framförts som går ut på att mekanisk dragbelastning bör påskynda nedbrytningen, dels för att mikrosprickor kan vidgas

vid belastningen vilken medför att skadliga ämnen lättare kan penetrera matrisen och nå de känsliga fibrerna, dels anses dragbelastning allmänt ha en negativ inverkan på kemisk materialnedbrytning. Storleken på dragbelastningens inverkan har dock varit okänd.

### 3 Utförande

Här ges en mycket kortfattad översikt av det experimentella utförandet i etapp III. För mer detaljerad information hänvisas till Dejke (2001), bilaga 1 och bilaga 2.

#### 3.1 Material

Provningar i Etapp III har omfattat två typer av armeringsstänger av glasfiberkomposit, här benämnda ”FIBERBAR” och ”Grey bar”. Båda innehåller kontinuerliga längsgående glasfibrer av typen E-glas, och har en matris bestående av Vinylester (en härdplast). För en detaljerad beskrivning av de båda armeringstyperna hänvisas till Dejke (2001).

#### 3.2 Exponeringsbetingelser

I denna rapport redovisas provningsresultat för stänger som utsatts för exponering enligt någon av nedanstående exponeringskategorier:

##### **Kategori A) Betong, 100% RF, ute**

Stänger tillhörande denna kategori har varit ingjutna i betong och förvarats i en plastlåda, med 100% RF, utomhus i Göteborg (taket, V-huset, CTH).

##### **Kategori B) Betong, 100% RF, 20°C**

Stänger tillhörande kategori B har varit ingjutna i betong och förvarats i 100 RF vid 20°C.

##### **Kategori C) Betong, 100% RF, 40°C**

Stänger tillhörande kategori C har varit ingjutna i betong och förvarats i 100 RF vid 40°C.

##### **Kategori D) Betong, 100% RF, 60°C**

Stänger tillhörande kategori D har varit ingjutna i betong och förvarats i 100 RF vid 60°C.

##### **Kategori E) Betong, 75% RF, 40°C**

Stänger tillhörande kategori E har varit ingjutna i betong (med samma sammansättning som för övriga provstänger) och förvarats i 75% RF vid 40°C. Klimatet har åstadkommit genom att kärl med mättad natriumkloridlösning, som ger ca 75% RF i angränsande luft vid jämvikt, placerats i exponeringsboxen tillsammans med provstängerna. Att önskad RF uppnåtts i boxen har verifierats med RF-mätningar.

##### **Kategori F) Betong, 100% RF, 20°C, 5% last**

Stänger tillhörande kategori F har varit ingjutna i betong och förvarats i 100% RF vid 20°C, samt har utsatts för en konstant dragbelastning motsvarande 5% av ursprunglig lastkapacitet.

##### **Kategori G) Betong, 100% RF, 20°C, 25% last**

Stänger tillhörande kategori G har varit ingjutna i betong och förvarats i 100% RF vid 20°C, samt har utsatts för en konstant dragbelastning motsvarande 25% av ursprunglig lastkapacitet.

### **Kategori H) Betong, 100% RF, 60°C, 5% last**

Stänger tillhörande kategori H har varit ingjutna i betong och förvarats i 100% RF vid 60°C, samt har utsatts för en konstant dragbelastning motsvarande 5% av ursprunglig lastkapacitet.

### **Kategori I) Betong, 100% RF, 60°C, 25% last**

Stänger tillhörande kategori I har varit ingjutna i betong och förvarats i 100% RF vid 60°C, samt har utsatts för en konstant dragbelastning motsvarande 25% av ursprunglig lastkapacitet.

#### Kommentar 1:

Att stängerna varit ingjutna i betong, enligt beskrivningarna ovan, avser i själva verket endast stängernas mittersta del (20 cm). Stängernas ändar har varit oexponerade för betong med syftet att bevara erforderlig styrka i ändförankringarna inför provdragningarna.

#### Kommentar 2:

För beskrivning av provkroppstillverkningen och detaljer rörande exponeringarna hänvisas till Dejke (2001) för kategori A-E, och bilaga 1 för kategori F-I).

### **3.3 Utförda provningar**

För samtliga stänger har draghållfastheten uppmätts. För vissa av stängerna som tillhör kategori F-I har dessutom töjningar uppmätts med hjälp av trådtöjningsgivare som fästs på provstängerna. För detaljerad beskrivning av utförande vid draghållfasthetsprovningarna hänvisas till Dejke (2001). För detaljer rörande töjningsmätningarna hänvisas till bilaga 2.

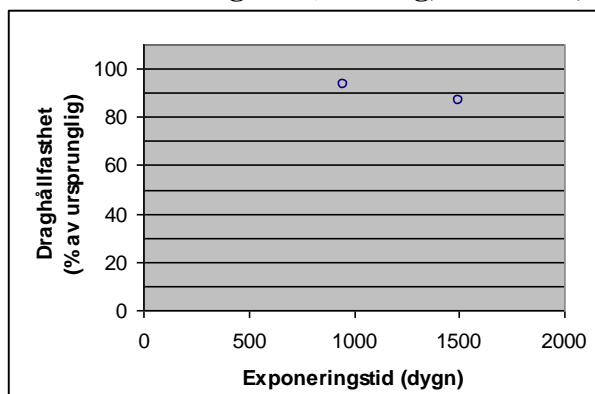
## 4 Resultat

I detta kapitel redovisas resultaten från provdragningar utförda i etapp III. I diagrammen representerar varje symbol medelvärdet av uppmätt draghållfasthet efter viss exponeringstid. Medelvärdet baseras på provdragningar som till antalet varierar från 1 till 8, vilket framgår av Tabell 1. För resultat av töjningsmätningar hänvisas till bilaga 2.

### 4.1 Inverkan av fuktmättad betong

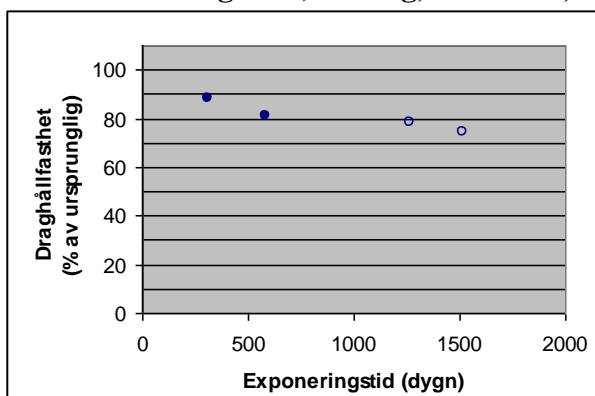
Stänger tillhörande exponeringskategori A, B och D har ingått i denna delstudie. För kategori A och B har både armeringstyperna FIBERBAR och Grey bar ingått, medan endast Grey bar ingått i kategori D. Följande resultat erhöles:

**FIBERBAR: Kategori A) Betong, 100% RF, ute**



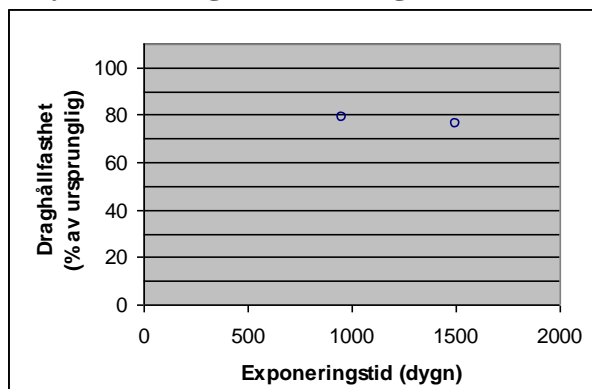
**Figur 1** Resultat för FIBERBAR ingjutna i fuktmättad betong utomhus.

**FIBERBAR: Kategori B) Betong, 100% RF, 20°C**



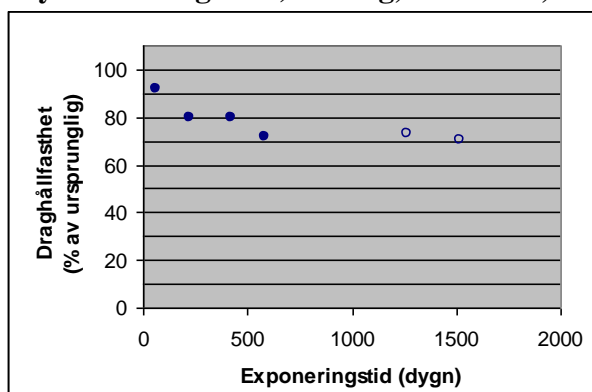
**Figur 2** Resultat för FIBERBAR ingjutna i fuktmättad betong vid 20°C. Fyllda symboler indikerar resultat som rapporterats tidigare (i etapp II).

**Grey bar: Kategori A) Betong, 100% RF, ute**



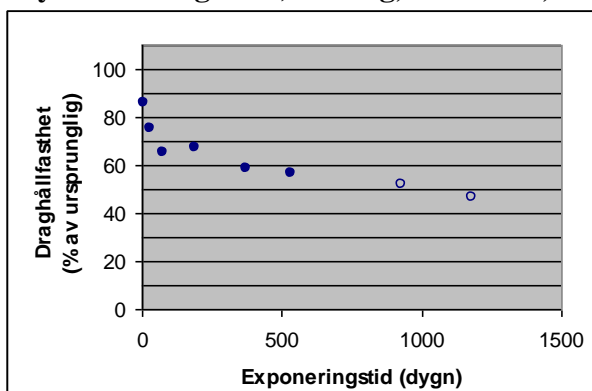
**Figur 3** Resultat för Grey bar ingjutna i fuktmättad betong utomhus.

**Grey bar: Kategori B) Betong, 100% RF, 20°C**



**Figur 4** Resultat för Grey bar ingjutna i fuktmättad betong vid 20 °C. Fyllda symboler indikerar resultat som rapporterats tidigare (i etapp II).

**Grey bar: Kategori D) Betong, 100% RF, 60°C**



**Figur 5** Resultat för Grey bar ingjutna i fuktmättad betong vid 60 °C. Fyllda symboler indikerar resultat som rapporterats tidigare (i etapp II).



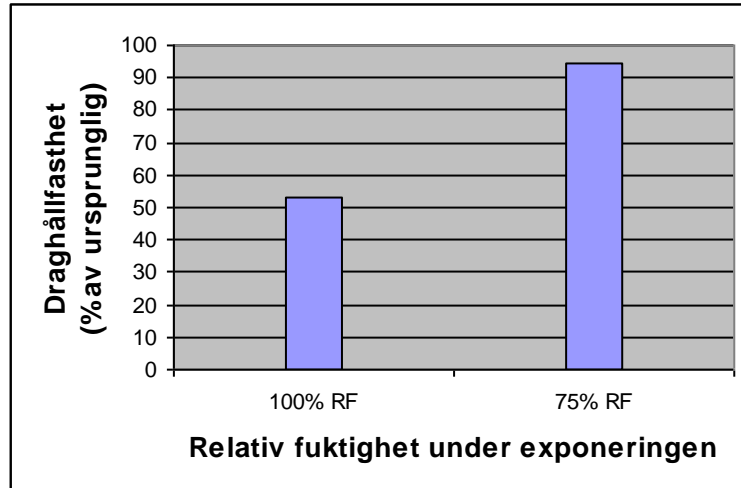
## Kommentar och diskussion

Resultaten för stänger exponerade utomhus visar att nedbrytningen ej hunnit lika långt efter cirka 1500 dygns, som för stänger exponerade inomhus vid 20°C. Detta var väntat eftersom årsmedeltemperaturen utomhus i Göteborg är kring 10°C. Anmärkningsvärt är dock att hållfasthetsreduktionen för stänger exponerade utomhus är betydligt mindre för FIBERBAR än för Grey bar. Vid högre exponeringstemperaturer är dock nedbrytningsgraden ungefär lika stor för de båda armeringstyperna. Det är oklart om skillnaden vid utomhusexponeringen beror på skillnader i materialet eller om den uppmätta skillnaden kan förklaras av tillfälligheter orsakade av draghållfasthetens stora spridning.

För Grey bar verkar det tid-temperatursamband som rapporterades i etapp II gälla approximativt, även med hänsyn tagen till de resultat som framkommit från etapp III. För FIBERBAR tyder de nya resultaten på att den tidsförskjutningsfaktor som föreslogs i etapp II i själva verket bör vara något större. Som tidigare konstaterats gör det relativt lilla antalet provstänger i kombination med en stor resultatspridning att det är svårt att dra några säkra slutsatser angående detta.

### 4.2 Inverkan av "normalfuktig" betong

**FIBERBAR: Kategori E) Betong, 75% RF, 40°C samt Kategori C) Betong, 100% RF, 40°C**



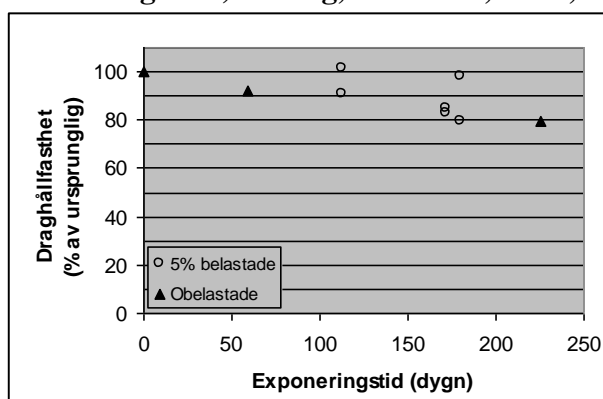
**Figur 6** Hållfasthetsreduktion för FIBERBAR exponerad för 100% RF vid 40 °C (referensstänger) respektive 75% RF vid 40 °C i cirka 1100 dygn (1141 för stänger exponerade i 100% RF och 1078 dygn för stänger exponerade i 75% RF).

## Kommentar och diskussion

Den stora skillnaden i hållfasthetsreduktion visar tydligt att fuktighetsnivån har stor inverkan på nedbrytningsförloppet. Skillnaden i exponeringstid (1078 respektive 1141 dygn) kan i detta sammanhang anses helt försumbart. Det är inte uppenbart hur stor nedbrytningshastigheten är vid fuktigheter mellan 75% och 100%, men troligen är det inte ett linjärt samband mellan fuktighetsnivå och nedbrytningshastighet inom detta intervall. Resultatet indikerar att fuktigheten i GFRP-arterad betong är en mycket viktig parameter att ta hänsyn till vid en eventuell beständighetsdimensionering.

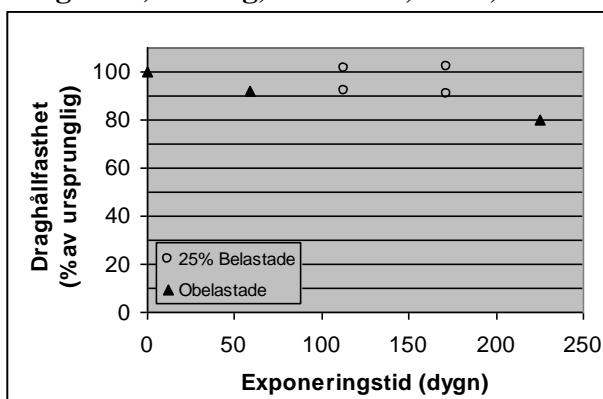
### 4.3 Inverkan av fuktig betong och samtidig dragbelastning

#### Grey Bar: Kategori F) Betong, 100% RF, 20°C, 5% last



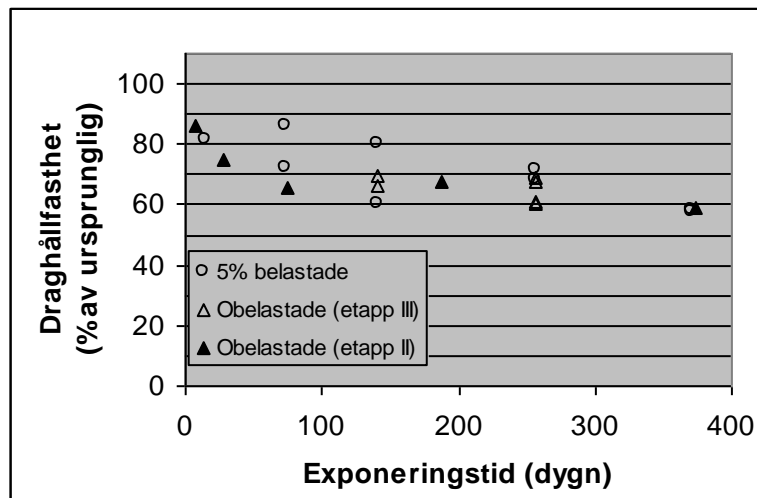
**Figur 7** Hållfasthetsreduktion för stänger exponerade för fuktmättad betong vid 20 °C och samtidig dragbelastning motsvarande 5% av ursprunglig lastkapacitet. Resultat (från etapp II) för obelastade Grey bar exponerade för samma klimat har införts i diagrammet för att möjliggöra jämförelse. Fyllda symboler indikerar resultat som rapporterats tidigare (i etapp II).

#### Kategori G) Betong, 100% RF, 20°C, 25% last



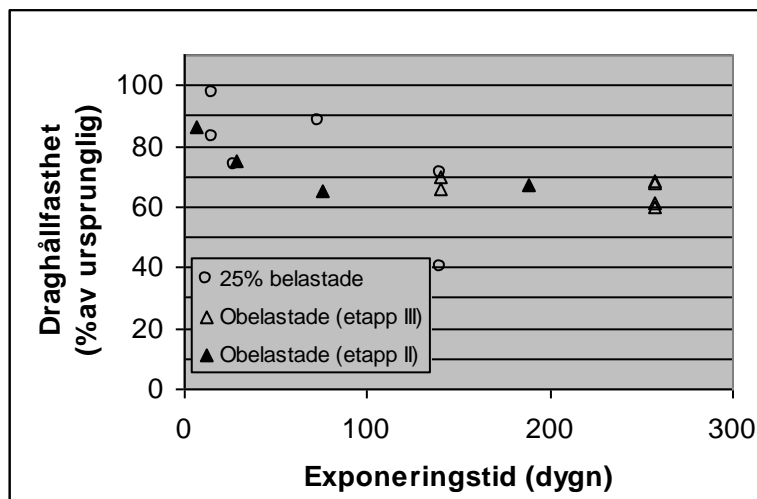
**Figur 8** Hållfasthetsreduktion för stänger exponerade för fuktmättad betong vid 20 °C och samtidig dragbelastning motsvarande 25% av ursprunglig lastkapacitet. Resultat (från etapp II) för obelastade Grey bar exponerade för samma klimat har införts i diagrammet för att möjliggöra jämförelse. Fyllda symboler indikerar resultat som rapporterats tidigare (i etapp II).

### Kategori H) Betong, 100% RF, 60°C, 5% last



**Figur 9** Hållfasthetsreduktion för stänger exponerade för fuktmättad betong vid 60 °C och samtidig dragbelastning motsvarande 5% av ursprunglig lastkapacitet. Resultat för obelastade Grey bar som exponerats i samma klimatbox, samt stänger exponerade i etapp II (i samma klimat), har införts i diagrammet för att möjliggöra jämförelse. Fyllda symboler indikerar resultat som rapporterats tidigare (i etapp II).

### Kategori I) Betong, 100% RF, 60°C, 25% last



**Figur 10** Hållfasthetsreduktion för stänger exponerade för fuktmättad betong vid 60 °C och samtidig dragbelastning motsvarande 25% av ursprunglig lastkapacitet. Resultat för obelastade Grey bar som exponerats i samma klimatbox, samt stänger exponerade i etapp II (i samma klimat), har införts i diagrammet för att möjliggöra jämförelse. Fyllda symboler indikerar resultat som rapporterats tidigare (i etapp II).

## Kommentar och diskussion

Resultaten för stänger som exponerats för fuktig betong under belastning tyder inte på att dragspänningen har någon negativ inverkan på nedbrytningens hastighet. Vid en jämförelse med resultaten från etapp II för obelastade stänger i Figur 7 och Figur 8 framstår det tvärt om som om dragspänningen har en positiv inverkan på beständigheten. Detta är dock med all säkerhet en skenbar effekt som beror på att stängerna för vilka exponeringar startades i etapp II och III ej kommer från samma tillverkningsbatch, och att etapp III-stängerna är av något bättre kvalitet (viss kvalitetsvariation förekommer vid tillverkning av fiberkomposit). En annan förklaring kan vara att klimatboxarna i etapp II och III ej gav identiska klimat (även om så var ämnat).

I Figur 9 och Figur 10 kan en jämförelse göras mellan belastade och obelastade stänger från samma materialleverans och som exponerats i samma typ av exponeringsbox. Dragspänningen orsakade dock spontanbrott efter viss tid för stänger som exponerats för fuktig betong vid 60°C under 25% belastning (Figur 1). Spontanbrotten är med all sannolikhet orsakade av så kallad spänningskorrosion (och alltså inte orsakad av ”normal materialnedbrytning”), vilket innebär att brott på grund av spricktillväxt sker efter viss tid hos ett material som utsätts för konstant dragbelastning. Glasfiberkomposit är speciellt känsliga för detta fenomen. Det var dock oväntat att spänningskorrosion skulle inträffa för provstängerna i denna studie eftersom spänningsnivån 25% bedömdes var tillräckligt låg för att spänningskorrosion skulle undvikas, även vid temperaturen 60°C (syftet med denna studie var inte att studera spänningskorrosion). Spontanbrott uppstod för 4 stänger tillhörande Exponeringskategori I. Exponeringstiden tills spontanbrott uppstod var 141, 157, 214 och 234 dygn. Detta är skälet till att endast hållfasthetsdata för upp till 140 dygns exponering har kunnat uppmätas för denna kategori stänger. Inte heller från resultaten som presenteras i dessa båda diagram kan man dra slutsatsen att dragspänningen har någon negativ inverkan på den ”normala materialnedbrytningen”. Förvisso återstod endast cirka 40% draghållfasthet för en av stängerna efter 140 dygns exponering (se Figur 10). Detta kan dock bero på spänningskorrosion i ett relativt sent stadium för den provstången.

Resultatspridningen för stänger utsatta för samtidig miljöexponering och dragspänning är för stor för att det skall anses meningsfullt att försöka bestämma tidsförskjutningsfaktorn, som ursprungligen planerats.

Förhöjd temperatur (60°C) har uppenbarligen haft en accelererad inverkan på spänningskorrosionens förlopp. Det är dock omöjligt att inom ramen för denna studie kvantifiera denna acceleration, eftersom de tid-temperatursamband som tidigare kvantifierats (i etapp II) gäller ”normal materialnedbrytning”, och inte behöver gälla för spänningskorrosionens tid-temperatursamband.

#### 4.4 Sammanställning av utförda provdragningarna

I Tabell 1 redovisas resultatet av lyckade provdragningar som utförts i etapp III. Vissa provdragningar, framför allt för armeringstypen FIBERBAR, misslyckades på grund av att stången drogs ut ur ändförankringsröret eller att brott uppstod inne i ett ändförankringsrör. Detta har medfört att antalet mätdata för vissa exponeringsbetingelser i vissa fall är färre än vad som först planerats. Hållfasthetsresultat som införts i diagrammen i figurer 1-10, men som erhöles i etapp II redovisas inte i Tabell 1 eftersom dessa redan tidigare avrapporterats.

**Tabell 1** Sammanställning av resultat för provdragningar som utförts i etapp III.

Resultat redovisat i:	Armeringstyp	Betong-fuktighet (RF)	Exponerings-temperatur	Belastning (av ursprunglig draghållf.)	Exponeringstid	Draghållfasthet (av ursprunglig hållfasthet.)
Figur 1	FIBERBAR	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	950 dygn	89,0 %
Figur 1	FIBERBAR	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	950 dygn	95,4 %
Figur 1	FIBERBAR	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	950 dygn	95,4 %
Figur 1	FIBERBAR	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	1501 dygn	87,0 %
Figur 2	FIBERBAR	100%	20°C	Obelastad	1266 dygn	80,2 %
Figur 2	FIBERBAR	100%	20°C	Obelastad	1266 dygn	74,9 %
Figur 2	FIBERBAR	100%	20°C	Obelastad	1266 dygn	79,2 %
Figur 2	FIBERBAR	100%	20°C	Obelastad	1518 dygn	72,8 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	950 dygn	80,3 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	950 dygn	79,8 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	950 dygn	76,1 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	1501 dygn	74,4 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	1501 dygn	80,2 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	1501 dygn	75,8 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	1501 dygn	76,2 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	1501 dygn	70,4 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	1501 dygn	80,9 %
Figur 3	Grey bar	100%	10°C <sup>1</sup>	Obelastad	1501 dygn	76,5 %
Figur 4	Grey bar	100%	20°C	Obelastad	1266 dygn	75,2 %
Figur 4	Grey bar	100%	20°C	Obelastad	1266 dygn	71,2 %
Figur 4	Grey bar	100%	20°C	Obelastad	1518 dygn	68,1 %
Figur 4	Grey bar	100%	20°C	Obelastad	1518 dygn	72,9 %
Figur 5	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	930 dygn	49,8 %
Figur 5	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	930 dygn	54,8 %
Figur 5	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	1180 dygn	44,8 %
Figur 5	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	1180 dygn	47,9 %
Figur 6	FIBERBAR	100%	40°C	Obelastad	1141 dygn	55,9 %
Figur 6	FIBERBAR	100%	40°C	Obelastad	1141 dygn	52,0 %
Figur 6	FIBERBAR	100%	40°C	Obelastad	1141 dygn	53,7 %
Figur 6	FIBERBAR	100%	40°C	Obelastad	1141 dygn	54,9 %
Figur 6	FIBERBAR	100%	40°C	Obelastad	1141 dygn	50,0 %
Figur 6	FIBERBAR	100%	40°C	Obelastad	1141 dygn	54,9 %
Figur 6	FIBERBAR	100%	40°C	Obelastad	1141 dygn	51,0 %
Figur 6	FIBERBAR	100%	40°C	Obelastad	1141 dygn	53,5 %
Figur 6	FIBERBAR	75%	40°C	Obelastad	1078 dygn	91,1 %
Figur 6	FIBERBAR	75%	40°C	Obelastad	1078 dygn	106,5 %
Figur 6	FIBERBAR	75%	40°C	Obelastad	1078 dygn	104,2 %
Figur 6	FIBERBAR	75%	40°C	Obelastad	1078 dygn	95,2 %
Figur 6	FIBERBAR	75%	40°C	Obelastad	1078 dygn	88,4 %
Figur 6	FIBERBAR	75%	40°C	Obelastad	1078 dygn	82,3 %

Fortsättning av tabell 1

<b>Resultat redovisat i:</b>	<b>Armeringstyp</b>	<b>Betong-fuktighet (RF)</b>	<b>Exponerings-temperatur</b>	<b>Belastning (av ursprunglig draghållf.)</b>	<b>Exponeringstid</b>	<b>Resultat (av ursprunglig draghållf.)</b>
Figur 7	Grey bar	100%	20°C	5%	113 dygn	101,4 %
Figur 7	Grey bar	100%	20°C	5%	113 dygn	90,7 %
Figur 7	Grey bar	100%	20°C	5%	172 dygn	84,6 %
Figur 7	Grey bar	100%	20°C	5%	172 dygn	83,0 %
Figur 7	Grey bar	100%	20°C	5%	180 dygn	79,8 %
Figur 7	Grey bar	100%	20°C	5%	180 dygn	98,1 %
Figur 8	Grey bar	100%	20°C	25%	172 dygn	90,7 %
Figur 8	Grey bar	100%	20°C	25%	172 dygn	102,2 %
Figur 8	Grey bar	100%	20°C	25%	113 dygn	101,0 %
Figur 8	Grey bar	100%	20°C	25%	113 dygn	92,1 %
Figur 9 & 10	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	140 dygn	66,0 %
Figur 9 & 10	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	140 dygn	69,5 %
Figur 9 & 10	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	257 dygn	68,6 %
Figur 9 & 10	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	257 dygn	67,8 %
Figur 9 & 10	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	257 dygn	60,0 %
Figur 9 & 10	Grey bar	100%	60°C	Obelastad	257 dygn	61,0 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	73 dygn	72,1 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	73 dygn	85,9 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	15 dygn	81,4 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	140 dygn	60,0 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	140 dygn	80,4 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	257 dygn	71,3 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	257 dygn	68,2 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	370 dygn	57,8 %
Figur 9	Grey bar	100%	20°C	5%	370 dygn	58,6 %
Figur 10	Grey bar	100%	60°C	25%	73 dygn	87,9 %
Figur 10	Grey bar	100%	60°C	25%	27 dygn	73,7 %
Figur 10	Grey bar	100%	60°C	25%	15 dygn	82,7 %
Figur 10	Grey bar	100%	60°C	25%	15 dygn	97,7 %
Figur 10	Grey bar	100%	60°C	25%	140 dygn	40,2 %
Figur 10	Grey bar	100%	60°C	25%	140 dygn	71,0 %

<sup>1</sup> varierande temperatur, angiven temperaturen avser årsmedeltemperaturen i Göteborg.

## 5 Slutsatser

Av resultaten som framkommit i denna studie kan följande slutsatser dras:

- Stänger som varit ingjutna i fuktmättad betong och exponerad i utomhustemperatur i drygt fyra år har kvar mellan 75% och 90% av ursprunglig hållfasthet.
- Den tidsförskjutningsfaktor (tid- temperatursamband) som bestämdes för Grey bar i ett tidigare delprojekt (etapp II) kan anses gälla approximativt med hänsyn tagen till resultaten från denna studie.
- För FIBERBAR tyder de nya resultaten på att den tidsförskjutningsfaktor som föreslogs i etapp II i själva verket bör vara större. Dock gör det relativt lilla antalet provstänger i kombination med en stor resultatspridning att det är svårt att dra några säkra slutsatser angående detta.
- Fuktnivån har visat sig ha extremt stor inverkan på materialnedbrytningens omfattning. FIBERBAR-stänger som varit ingjutna i betong i 3 år hade 94% kvarvarande draghållfasthet om betongens relativa fuktighet var 75%, men endast 53% om betongens relativa fuktigheten var 100%.
- Resultaten för stänger som exponerats för fuktig betong under belastning tyder inte på att dragspänningen har någon negativ inverkan på nedbrytningens hastighet, förutsatt att belastningen inte är så hög att spänningskorrosion inträffar.
- Spänningskorrosion inträffade för fyra stänger som varit ingjutna i fuktmättad betong vid 60°C i 141 till 234 dygn under en samtidig belastning motsvarande 25% av ursprunglig draghållfasthet. Detta var inte väntat, men kan eventuellt förklaras av att temperaturen har en starkare inverkan på spänningskorrosionsförloppet än på det ”normala” materialnedbrytningsförloppet.
- Under åren 1997-2003 har forskningsprojekt inom området beständighet hos glasfiberkompositarmering i betong bedrivits på Institutionen för byggnadsmaterial, Chalmers tekniska högskola. Det resultat som anses viktigast är inte föreslagna värden på tidsförskjutningsfaktorn, utan utarbetandet av metodiken, för kvantifiering av fiberkompositarmerings livslängd, som sådan. För att på ett tillförlitligt och säkert sätt kunna dimensionera FRP-arterade betongkonstruktioner med avseende på beständighet, behöver den accelererade provningen anpassas till just de förhållande (fukt, temperatur, betongtyp, etc.) som råder i aktuell tillämpning. Dessutom måste man finna ett sätt att hantera den stora spridningen i mekaniska egenskaper, framförallt efter miljöexponering, som försvårat utvärderingen i denna studie.

## 6 Referenser

Dejke V., “Durability of FRP reinforcement in concrete”, Licentiat rapport, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för byggnadsmaterial, 2001

## **THE INFLUENCE OF SUSTAINED STRESS ON THE DURABILITY OF GFRP BARS EMBEDDED IN CONCRETE**

V. DEJKE <sup>a,c</sup>, O. POUPARD <sup>a,b</sup>, L.O. NILSSON <sup>a</sup>,

R. TEPFERS <sup>a</sup>, A. AÏT-MOKHTAR <sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Department of Building Materials, Chalmers University of Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden*

<sup>b</sup> *L.E.P.T.A.B., University of La Rochelle, Av. Michel Crépeau, 17041 La Rochelle cedex 1, France*

<sup>c</sup> *IFP Research AB, SE-431 22 Mölndal, Sweden*

A new test equipment has been created to study the combined effect of environmental exposure and external stress on the durability of a GFRP (E-Glass/Vinyl ester) rebar. GFRP specimens embedded in moisture-saturated concrete have been conditioned at two temperatures and at two levels of sustained tensile stress (5% and 25% of the ultimate tensile strength). According to the preliminary results, stress levels up to 25% of the original tensile strength do not appear to have a negative influence on the durability of GFRP bars embedded in concrete.

### **1 INTRODUCTION**

During the last decade, the use of fibre reinforced polymer (FRP) reinforcement for concrete has gained an increasing interest worldwide. The main advantage over steel is their good corrosion resistance in aqueous and saline environments and in long-term contact with organic solvents. Nevertheless, the concrete reinforcement application is relatively new and consequently, there is a lack of data available regarding their long-term performance. In concrete, degradation of glass FRP (GFRP) may take place, primarily due to the high alkalinity of concrete and in some applications high moisture levels, which results in deterioration of the mechanical properties. Consequently, the durability issue is essential for use and design of GFRP materials in civil engineering application.

Many studies have reported the influence of various environmental conditions (alkaline or saline environment, moisture and freeze-thaw actions) on the GFRP durability<sup>1,2</sup>. However they are commonly limited to exposure tests on unstressed specimens. A literature review highlights the lack of quantitative information on the durability of GFRP reinforcement under the combined effect of environmental conditioning and mechanical stress<sup>3,4,5</sup>. The research project discussed in this article is a continuation of the project reported in Deijke's thesis<sup>1</sup>.

### **2 Objectives**

In the current project the overall objective is to investigate the combined effect of sustained stress and environmental conditioning on the durability of GFRP bars. The ambition is to be able to determine the allowable design strength for GFRP-reinforcement with account for the environmental influence. In more detail, the objectives are as follows:

- (a) to develop a test equipment suitable to subjecting GFRP specimens to a combination of environmental exposure and different stress levels,
- (b) to characterize the relationship between the stress level and the environmental conditioning on the durability of GFRP composites in terms of tensile properties,
- (c) to suggest a service life predictive model that incorporates both environmental and load conditions.

The aim is not to study the stress-rupture phenomena but rather the degradation process occurring at stress levels lower than that required for stress-rupture. This paper presents the development of the test method and discusses the first experimental results.



### 3 Literature Review

Durability is an important topic when considering the use of GFRP materials in civil engineering infrastructure applications. The influence of water absorption, alkali attack and application of mechanical loading have been identified as major factors that may cause the degradation of the material through a wide range of chemical and physical processes<sup>1,2,3</sup>. Experimental results on the degradation of GFRP composites under alkaline and moist environments have shown that, in order to safely design concrete structures, it is necessary to take account for the long-term deterioration of the mechanical properties<sup>1,6,7,8</sup>. Some predictive models have been suggested based on the “Arrhénius” equation<sup>1,6,8</sup>. However these studies are limited to the case of unstressed specimens (only environmental exposure). Nevertheless, in real applications, the reinforcement will be subjected to a sustained load, and more particularly those used as primary reinforcements. The degradation mechanism at a combination of load and environmental influence may be quite complex due to the occurrence of several interacting physico-chemical and mechanical processes. The application of a mechanical stress can affect the durability of the material in various ways by causing<sup>3,9</sup>:

- (a) the formation of microscopic cracks even in the absence of aggressive environmental conditions,
- (b) a displacement of the molecules from their original position involving a lower energy necessary to break the intra-molecular bindings in the non-fissured matrix area,
- (c) an increase of the “plasticization” effect in the composite matrix during ageing process.

Furthermore, the formation and the opening of micro-cracks enable more aggressive species from the surroundings to penetrate the matrix and reach the sensitive fibres at a higher rate. Despite the potential accelerating influence of stress, only relatively few reports have been published on the combined effect of environmental exposure and external stress on durability of GFRP<sup>3, 4, 5</sup>.

## 4 Experimental program

### 4.1 Material

One type of GFRP bars was studied in this experimental work. Its characteristics are given in Table 1. The initial ultimate tensile strength (UTS) was measured to about 770 MPa (average value on five specimens). The standard deviation was 17 MPa.

Table 1. Characteristics of GFRP rebar.

Fibre	Matrix	Diameter (specified)	Diameter (measured)
E-Glass	Vinyl ester	9 mm	10.1 mm

For the environmental conditioning, the GFRP bars were embedded in “concrete prisms” (with a square cross-section of 5 cm and a length of 20 cm, Figure 1), consisting of a low alkali Portland cement (“Degerhamn PC”) and a water/cement ratio of 0.5. At the ends of the bars, steel pipes were cast (using epoxy) to enable a strong anchorage at exposure and testing. The concrete/GFRP specimens were kept in 100% humidity at room temperature during 28 days (cure period) before the test. Only the middle part (about 20 cm) of the length of the bars was embedded in concrete. To prevent the concrete from carrying any load during the exposure, slits were cut in the concrete, which reduced the cross-section area by approximately 80%. This ensured that the concrete cracked due to the tensile load and that the load consequently acted only on the GFRP bars at the positions of the cracks. Furthermore, the distances between the slits/cracks were not long enough to build up stresses in the concrete to any appreciable extent.



Figure 1. View of the specimens.

**4.2 Experimental equipment**

A new device was developed within the project, that enables to simultaneously subject the specimens to environmental conditioning and sustained load. The set-up consists of: lever arms, counter weights and concrete support. The experimental device is shown in Figures 2 and 3. Compared to other test methods described in the literature<sup>4,7</sup>, this one is cheap (no expensive parts), reliable (the concrete support and the lever arm are very robust and the “hinge” is attached on the lever arm to ensure that the stress acting on the bar is constant). Moreover, the load level is not affected by any relaxation process. This device requires roughly 1.2×2.5 meters of floor space for one structure (6 specimens per structure). Two stress levels, 5% and 25%, of the UTS, have been applied in this study. At these stress levels, stress rupture is assumed to not take place<sup>10</sup>.

To be able to determine the time temperature relationship for the strength deterioration, the GFRP bars are exposed to moisture saturated concrete at two temperatures, 20°C and 60°C. The specimens are put in a thermally insulated box with the bottom part consisting of a water tank. A heater in the water and a thermostat is used to control the temperature. A good homogenization of the environmental conditions (temperature and humidity) is ensured with a fan inside the box. The temperature and the relative humidity are frequently checked during exposure. The moisture condition (100% relative humidity) have been chosen as it will represent the “worst case condition” faced by GFRP-reinforcement when used in out-door structures. The results obtained in this study will, hence, be on the safe side for most normal applications.

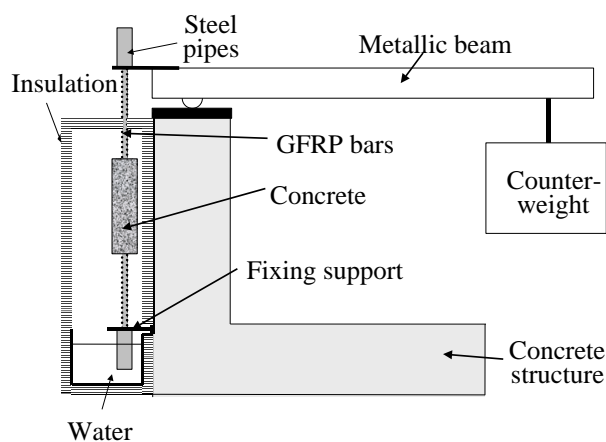


Figure 2. Schematic view of the experimental set-up.

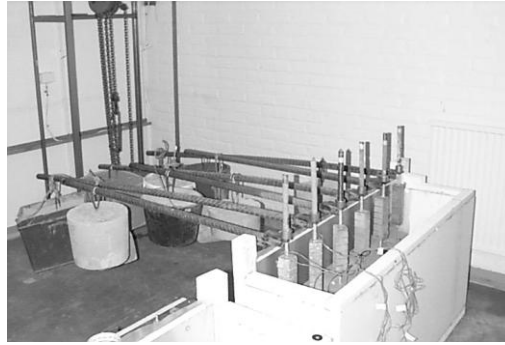


Figure 3. Photography of the experimental set-up.

Special measures were taken to ensure a uniform stress distribution in the bar. For some bars a small bending was observed during loading. This behaviour was attributed to an uneven distribution of the strength from the lever arm to the bar, via the steel pipes. To handle this problem, a bearing support device was made (Figure 4). In principle the “bearing” consists of a “rubber washer” (5 mm thick) between two steel washers. The rubber is used to ensure a reliable distribution of the applied strength on the steel pipes. A rubber with a relatively low stiffness has been selected to improve the deformability, and thereby the stress distributive capability. Because of its viscous characteristics, the rubber tends to “float away” when the load is applied. To avoid this problem, the system (rubber and steel washers) is encapsulated by a metallic pipe. This method showed to be effective for low stresses at 20°C. However, at 60°C, and especially for the specimens subjected to 25% of UTS, the rubber tended to “float” away through the narrow gap present between the GFRP bars and the steel washers. Therefore this system was only used for the specimens subjected to load of 5% of UTS at 20°C.

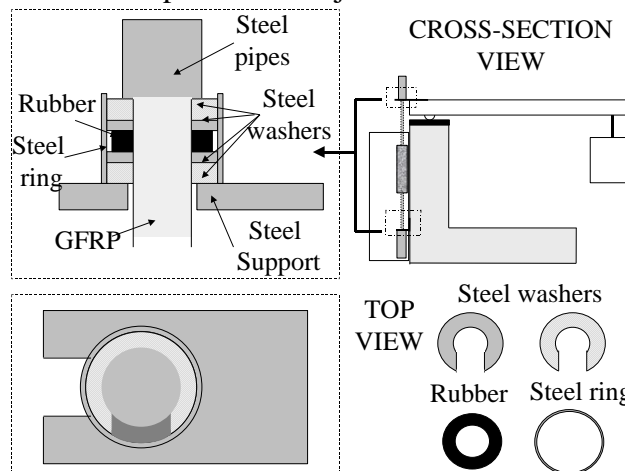


Figure 4. Experimental device to improve the stress distribution between the metallic support and the specimen.

### 4.3 Test Method and Test Program

Aged GFRP bars have been tested in terms of tensile properties, initially and after exposure. Table 2 shows the details of the experimental test program.

Table 2. Experimental program.

<i>Load level (% of the UTS)</i>	<i>Temperature</i>	<i>Tem</i>	<i>Relative humidity</i>	<i>Total number of specimens</i>
5	20°C		100%	6
	60°C		100%	6
25	20°C		100%	6
	60°C		100%	6
<b>Initial tests of unaged specimens</b>				5

Prior to the tensile strength testing, the bars were extracted from the concrete.

## 5 Preliminary results and Discussion

At the time this article was written, only test results for specimens aged for up to 4 months were available. The test values are given in Table 3. Only specimens who showed fibre rupture located in the region exposed to the concrete have been included.

Table 3. Tensile strength retention for the specimens.

<i>Stress level</i>	<i>Temperature</i>	<i>Exposure duration</i>	<i>Tensile strength (% of UTS)</i>		
			<i>#1</i>	<i>#2</i>	<i>Average</i>
5%	20°C	114 days	101	90	96
		172 days	83	84	83
	60°C	15 days	81	-	81 <sup>1</sup>
		73 days	72	85	79
25%	20°C	114 days	101	92	96
		172 days	90	102	96
	60°C	15 days	82	97	90
		27 days	74	-	74 <sup>a</sup>
		73 days	88	-	88 <sup>a</sup>

As reported by several researchers, the test results obtained so far in this project indicates that the environment of moist concrete has a negative influence on the mechanical properties of GFRP-reinforcement. Moreover, the degradation mechanism, causing the deterioration, is accelerated by an elevated temperature. The stress, as previously discussed, is generally believed to generate growth of flaws or micro-cracks within the bulk composite, which increases the diffusion of aggressive species and consequently speeds up the degradation.

<sup>1</sup> : only one measurement available

However, the results do not indicate such behaviour. There is no noticeable effect of the stress level applied on the tensile strength retention. These experimental data have been compared to the experimental results obtained by Dejke<sup>1</sup> for unstressed specimens under similar environmental conditions. Figures 5 and 6 summarize the strength retention for the unstressed and stressed specimens, at 20°C and 60°C respectively. Each data point represents an average value (on 1 or 2 specimens tested). It is believed that when the stress level applied is sufficiently low, the viscoelastic behaviour of the matrix provides stress relief so that the crack formation does not occur<sup>11</sup>. From the results obtained within this project it appears that sustained stress, 25% of UTS and lower, does not have a pronounced effect on the rate of deterioration of tensile strength for GFRP reinforcement embedded in moist concrete. Only the environmental conditions seem to have an influence effect on the tensile strength decrease. However, these test data are obtained after relatively short exposure durations and are rather limited in number and therefore not sufficient for drawing a clear conclusion regarding the stress effect on the durability of GFRP rebars in concrete. It is expected that stronger conclusions can be drawn later in the project when more test results will be available.

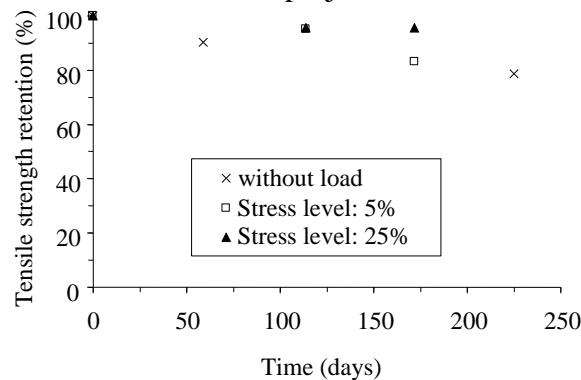


Figure 5. Tensile strength retention for the specimens exposed to concrete at 20°C without stress<sup>1</sup>, and at 5% and 25% of UTS.

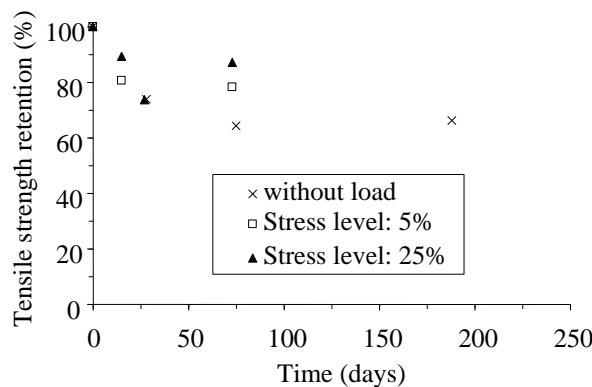


Figure 6. Tensile strength retention for the specimens exposed to concrete at 60°C without stress<sup>1</sup>, and at 5% and 25% of UTS.

Comment:

There is an unexpected difference, between the results obtained within the present and the previous project<sup>1</sup>, for specimens exposed at 60°C (as can be seen in Figure 6) the strength retention is lower for the bars exposed without load. The reason for this is unclear at present time. Possible explanations are: a) misleading information due to big scattering of test data, b) overlooked differences in the exposure conditioning used in the two projects or c) different quality of GFRP-bars used in the two projects (the bars in the two projects originates from different batches).

## 6 CONCLUSIONS

This study investigates the influence of stress, temperature and moist concrete on the durability of GFRP reinforcement. The following conclusions can be drawn:

- (a) a new test equipment has been proposed in which GFRP bars can be subjected to a combination of environmental exposure and sustained stress. Thereby the conditions at real applications can be simulated,
- (b) moist concrete cause a time dependant deterioration of the tensile strength, and the mechanism leading to deterioration is accelerated at elevated temperatures,
- (c) the first results (for short conditioning periods) do not indicate that the presence of a sustained load, of 25% of UTS or lower, accelerates the degradation process.

The test program is ongoing and planned to run through year 2003. The ambition is to base a service life prediction model for GFRP bars (in real case applications) on the data obtained within this project. Such models are essential for a safe and optimal design of concrete structures using GFRP reinforcement.

## 7 ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge ConFibreCrete (Training and Mobility of researchers, EU project), the Development Fund of the Swedish Construction Industry (SBUF) and the Swedish Research Council for Environment, Agricultural Sciences and Spatial Planning (FORMAS) for their financial support and Hughes Brothers Inc. who has supplied the GFRP bars used in the experiments.

## 8 REFERENCES

1. Dejke V., "Durability of FRP reinforcement in concrete", *Licentiate Thesis*, Chalmers University of Technology, Sweden, 2001  
(Can be downloaded at [www.bm.chalmers.se/research/publika/doktor.htm](http://www.bm.chalmers.se/research/publika/doktor.htm))
2. Schutte C.L., "Environmental durability of Glass Fibre Composites", *Materials Sciences and Engineering*, 7, 1994, pp. 265-322.
3. Kajorncheappunngam S., "The effects of environmental Aging on the durability of Glass/epoxy composites", *Thesis Dissertation*, West Virginia University, USA, 1999.
4. Buck S.E., Lischer D.W., Nemat-Nasser S., "The durability of E-Glass/Vinyl Ester composite materials subjected to environmental conditioning and sustained loading", *Journal of Composite Materials*, 32(9), 1998, pp. 874-892.
5. Rahman A.H., Lauzier C., Kingsley C., Richard J., Crimi J. "Experimental investigation of the mechanism of deterioration of FRP reinforcement for concrete", *2<sup>nd</sup> International Conference on Fibre Composites in Infrastructure*, Vol. 2, Tucson, 1998, pp. 501-511.

6. Porter M. L. and Barnes B. A., "Accelerated ageing degradation of glass fibre composites", *2<sup>nd</sup> International Conference on Fibre Composites in Infrastructure*, Vol. 2, Tucson, 1998, pp. 446-459.
7. Benmokrane B., Rahman H., Ton-That M.T., Robert J.F., "Improvement of the Durability of FRP Reinforcements For Concrete Structures", *1<sup>st</sup> International Conference on Durability of FRP Composites for Construction*, Sherbrooke, 1998, pp. 571-585.
8. Vijay P. V., and GangaRao V. S., "Accelerated and Natural Weathering of Glass Fibre Reinforced Plastic Bars", *4<sup>th</sup> international Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*, Baltimore, 1999, pp. 605-614.
9. Comyn J., "Polymer permeability", *Chapman and Hull*, Printed in Great Britain by Ipswich Book Co, Ipswich, Suffolk, 1985.
10. Audenaert K., Taerwe L., Gazouli D., "Stress-rupture of FRP: state of the art", *5<sup>th</sup> International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*, Cambridge, 2001, vol.1, pp. 517-526.
11. Devalapura RK., Gauchel J.V., Greenwood M.E., Hankin A., Humphrey T. "Long-term durability of Glass-fibre reinforced polymer composite in alkaline environment", *3<sup>rd</sup> International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Vol. 2, Sapporo, 1997, pp. 83-90.

## 1 Results of the strain gauges measurements

Strain gauges have been fixed on some specimens (2 per conditioning type) allowing the control of the elongation of GFRP composite during exposure test. These data will make it possible to bring information on creep effects that specimen could undergo during such a condition exposure.

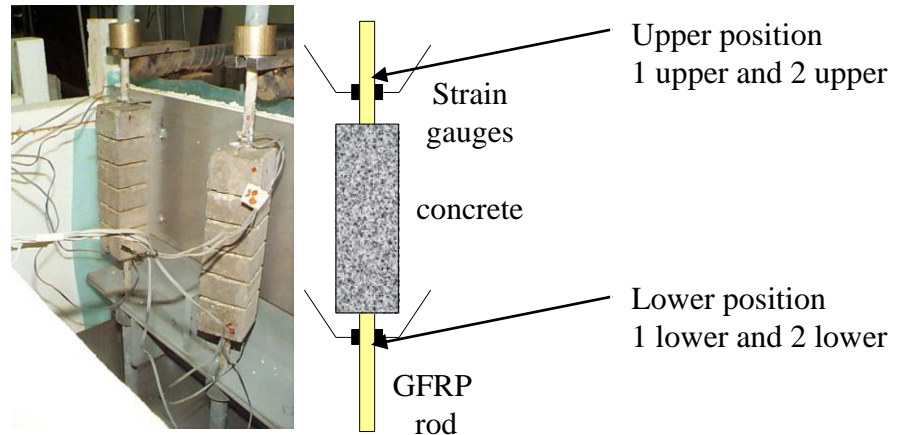


Figure 1: View of the distribution of the strain gauges on GFRP specimens

Two strain gauges were fixed on the “*upper*” part of the GFRP rebar (in the area unexposed to the environmental conditioning (temperature and saturated humidity)).

Two other strain gauges were fixed on the “*lower*” part of the GFRP rebar (in the area exposed to the environmental conditioning (temperature and saturated humidity)).

The words “upper” and “lower” shown in the following legends on the plots will indicate strain data from strain gauges put in unexposed environment and exposed environment, respectively.

We must notice that the measurement have been only performed on specimens exposed at 20°C.

Problems have occurred at 60°C and unfortunately non data are available.

Table 1 summarizes the experimental theoretical values for the elongation of the GFRP rebar depending on the applied tensile stress level.

For the theoretical values,  $E = 50 \text{ GPa} \pm 7 \text{ GPa}$  (deduced from initial tensile tests).

Table 1: experimental theoretical values for the elongation of the GFRP rebar when the load is applied

	Stress level	Experimental values (microstrain)			Theoretical values (microstrain)	
		Upper	Lower	Average	Average	Std. Error
Specimen 1	5%	935	835	885	781,9040439	155,2
	25%	3900	3965	3932,5	3912,018315	574,7
Specimen 2	5%	810	1000	905	781,9040439	155,2
	25%	4170	4455	4312,5	3912,018315	574,7



NB: the difference between upper and lower for specimen 2 at a 5% stress level can be explained by the tensile stress distribution to the GFRP rebar.

Figure 2 shows the values given by each strain gauges put on a GFRP specimen, for a specimen under 5% stress level load (a) and 25% stress level load, respectively. These results show the good distribution of the stress level. On each side of the GFRP rebar the elongation is similar.

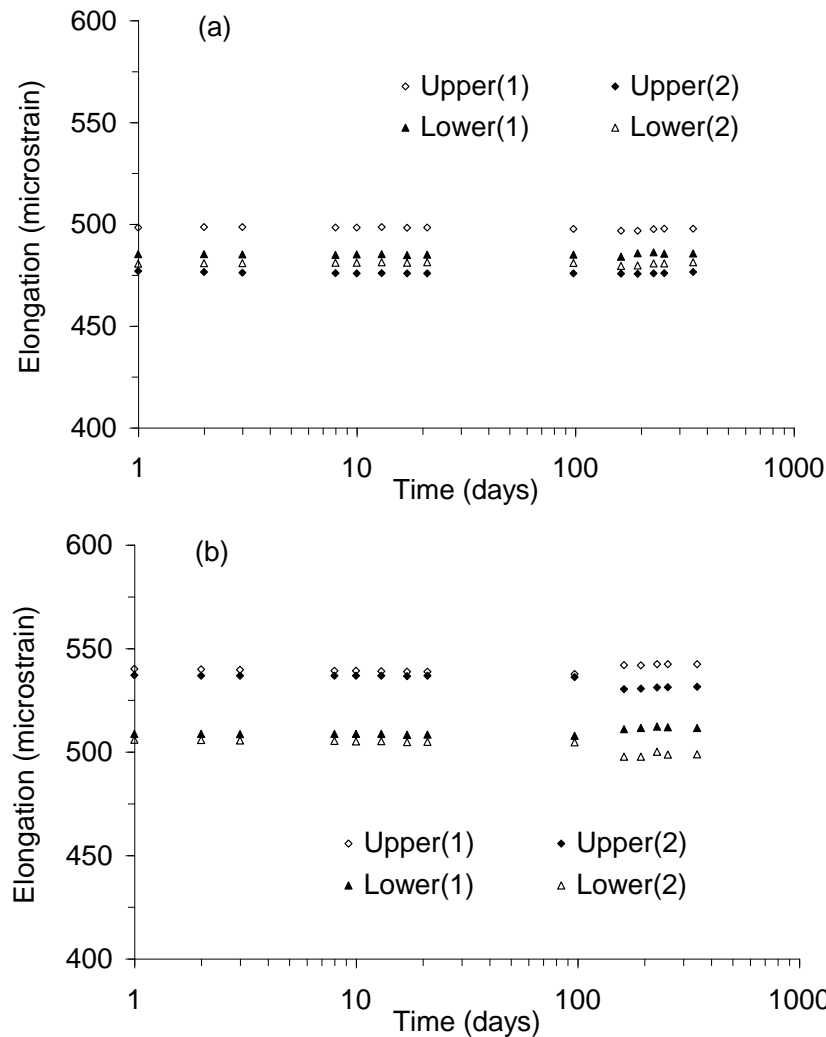


Figure 2: Strain values for the 4 strain gauges put on a GFRP specimen (a) stress level 5% (b) stress level 25%

On Figures 3 and 4, we can monitor the evolution of the elongation over time, for 5% stress level and 25% stress level, respectively.

The data are given for two specimens for each environment.

The first results showed no significant variation of the elongation over time. The strain values remain constant over time exposure.

Moreover, the position of the strain gauges (unexposed or in saturated environment) has no influence on the evolution over time.

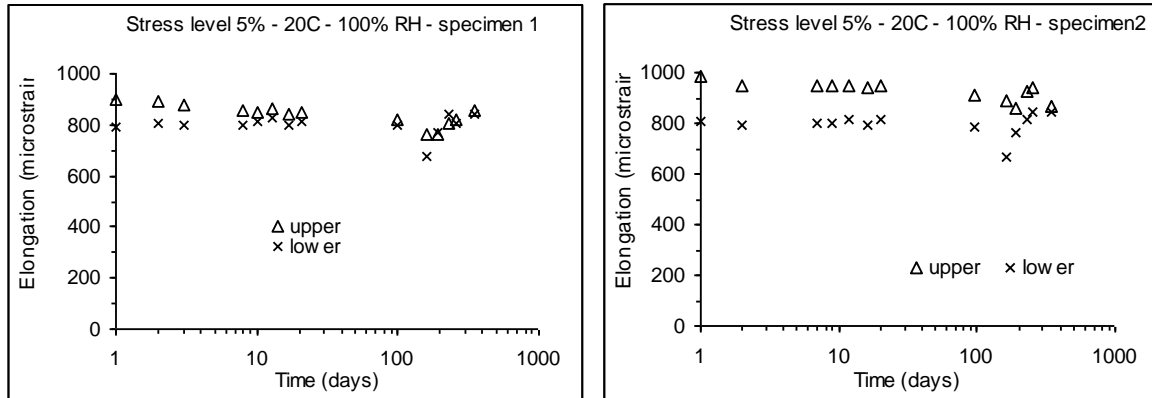


Figure 3: View of the distribution of the strain gauges on GFRP specimens

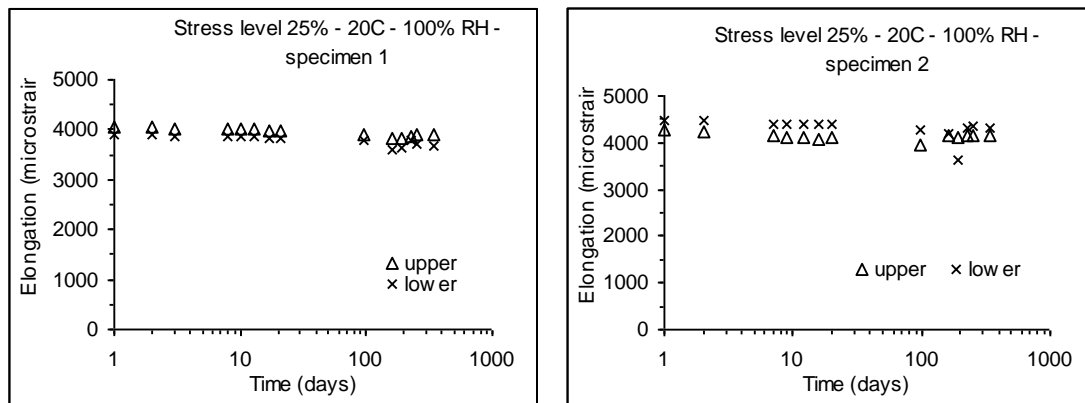


Figure 4: View of the distribution of the strain gauges on GFRP specimens

In Figure 5, we have summarizes the evolution over time of the strain elongation (average value from the 4 strain gauges).

For the two stress level studied, the results show that no creep effect on GFRP specimens. This strain vs. time plot shares no creep features as described in literature

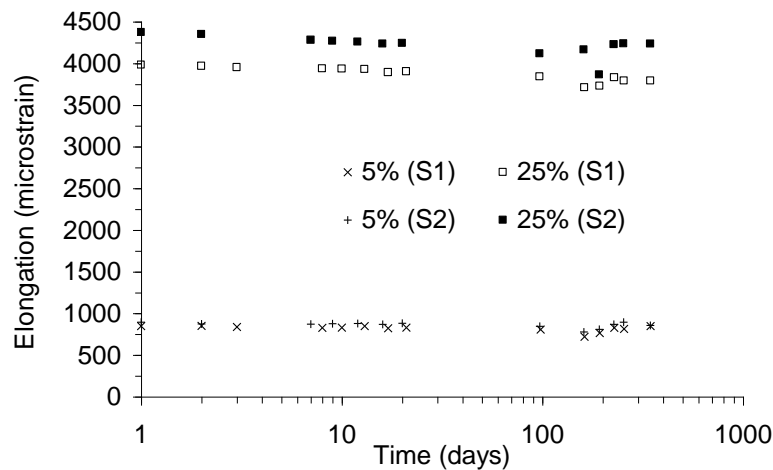


Figure 4: View of the distribution of the strain gauges on GFRP specimens

To conclude, these results show:

- the pertinence of the device used to homogenize and ensure a good distribution of the stress applied to the specimen.

## **Bilaga 2**

### Beskrivning av töjningsmätningar (Olivier Poupard)

- After 300 days, no creep behaviour is observed. At such low stress level, as described in literature, the creep is very small and has no significant effect on the durability of GFRP rebars.
- At 20°C, no influence of the presence of the aggressive environment on the evolution over time of the strain values.