

# KOMPOSITARMERING FÖR BETONGKONSTRUKTIONER

*Material och dimensionering*



Björn Täljsten, Luleå Tekniska Universitet

Thomas Blanksvärd, Skanska Sverige AB

2018-08-12

## FÖRORD

Arbetet med denna rapport har genomförts under 2017 och 2018. Syftet med rapporten har varit att ställa samma riktlinjer för dimensionering med intern FRP (Fibre Reinforced Polymer) armering. Utgångspunkten har tagits i befintliga riktlinjer och i nationell och internationell expertis. Arbetet har genomförts som en skrivbordsstudie, dvs. insamling av litteratur, genomgång av denna samt sammanställning av resultaten i rapportform.

Huvudförfattare respektive medförfattare är Björn Täljsten och Thomas Blanksvärd. Björn Täljsten är professor på deltid vid Luleå tekniska universitet och driver parallellt sin eget konsultföretag. Thomas Blanksvärd är biträdande professor vid Luleå tekniska universitet och arbetar för övrigt på Skanska Sverige AB inom enheten Skanska Teknik. Båda författarna har lång erfarenhet inom områdena betongrehabilitering och förstärkning av byggnadskonstruktioner samt kompositmaterial för byggbranschen.

Författarna vill i första hand tacka SBUF och Skanska för ekonomiskt stöd utan vilket denna rapport inte varit möjlig att genomföra

Stockholm och Luleå augusti 2018.

## SAMMANFATTNING

I denna rapport fokuseras på fiberarmerade kompositer som ersättning eller komplement till traditionell stålarmering i betongkonstruktioner. Det är framförallt tre områden inom byggbranschen där kompositarmering kan övervägas att användas: 1) för ökad beständighet och livslängd då kompositarmering inte påverkas av klorider eller karbonatiseringsprocessen i samma utsträckning som stålarmering. 2) I samband med elektromagnetisk neutralitet, t ex i lokaler med resonanstomografi där man inte vill ha störande magnetfält samt 3) temporära konstruktioner t ex i samband med tunnelbrytning eller formsättning av betong.

Materialegenskaperna hos FRP-armering är riktningsberoende (anisotropa), vilket betyder att man måste ta hänsyn till hur fibrerna är placerade i kompositen. För armeringsstänger är oftast majoriteten av fibrerna placerade i längdriktningen, vilket också betyder att hållfasthetsegenskaperna och styvheten är helt dominerande i denna riktning. De mekaniska egenskaperna är mycket olika vid tryck- och dragbelastning, och betydligt bättre vid drag än vid tryck. Fibern ger styrka och styvhet åt kompositen. Matrisens funktion är att binda samman fibrerna och att skydda dem vid såväl tillverkning som användning, samt att överföra krafter mellan fibrerna. De vanligaste matrismaterialen är vinylester, polyester och epoxi och de vanligast förekommande fibrerna är glas, kol, aramid och basalt. Mest använt för armering i betong har varit glasfiberarmerad vinylester. Generella fördelar för en FRP är:

- Hög styrka i förhållande till vikt: FRP armering har generellt en hållfasthet överstigande traditionell stålarmering med flera multiplar samtidigt som det väger betydligt mindre än stål
- Beständighet: Motstånd mot korrosion och många kemikalier minskar underhållsbehovet.
- Termisk och elektrisk konduktivitet: påverkas inte av magnetism, radio- och telekommunikationssignaler.

Två av utmaningarna med FRP armering är högre initial materialkostnad och bristande erfarenhet hos såväl konstruktörer som utförare. Dessutom måste böjda detaljer förtillverkas, dvs. man kan inte bocka FRP armeringen på plats

1980-talet kan sägas vara det årtionde då FRP började användas kommersiellt inom byggbranschen. Dock hade forskningen inom området pågått sedan 1950-60-talet, framförallt i Storbritannien, USA och tidigare Sovjetunionen. De tidigaste systemen kan inte anses vara lyckosamma och inte förrän under 1970-talet med introduktion av pultruderingsprocessen ansåg man att kvalitén började motsvara efterfrågade krav. Icke förspänd och förspänd inre FRP armering började utvecklas så tidigt som under 1960-talet i USA och under 1970-talet i Europa och Japan. FRP i byggbranschen delas normalt in i följande fyra kategorier; 1) Hela bärande konstruktionselement, 2) Icke-bärande element, 3) Material för extern förstärkning av befintliga konstruktioner samt 4) Inre armering för nya betongkonstruktioner

Hela konstruktionselement består primärt av en typ av FRP, men de kan även vara sammanfogade av flera olika typer beroende på hur man vill optimera bärförmågan. De tillverkas för deras slutliga användning och utformas normalt som I eller T-tvärsnitt, rektangulära eller cirkulära ihåliga tvärsnitt. Andra former kan vara färdiga delar till brodäck t ex utformade som sandwichkonstruktioner.

Icke-bärande element täcker området som inte har en bärande funktion, men nyttjar fördelarna med FRP. Till exempel i icke ledande tillämpningar, för att undvika köldbryggor, som tidigare nämnts fönster och dörrar. Produkterna har ofta diskontinuerliga fibrer som armering och komponenterna är små i förhållande till det övriga bärande byggsystemen.

Den mest lyckosamma tillämpningen med FRP-material har varit inom rehabilitering och förstärkning av befintliga konstruktioner där det dominerande FRP materialet har varit kolfiberkomposit. Man kan förstärka för såväl böjning som tvärkraft och vridning samt i utmattning. System för utanpåliggande förspänning finns också att tillgå. Förstärkningsmetodikerna har funnit kommersiellt tillgänglig sedan slutet av 1980-talet och kan idag anses etablerad i hela världen.

Inre armering med FRP kan vara korta diskontinuerliga fibrer som blandas direkt i betongen eller för att erhålla största möjliga styrka och styvhet kontinuerliga fibrer inbakade in en matris i stångform vilka kan användas som slakarmering eller som spännarmering. Normalt sett används inre FRP-armering i nya byggnadsverk där speciella krav ställs, t ex ökad beständighet mot korrosion och där man vill ha icke-ledande armering. För att erhålla bästa möjliga materialegenskaper riktas fibrerna i FRP stångens längdriktning, vilket medför att materialegenskaperna blir anisotropa. För att förbättra vidhäftningen till betongytan kan denna antingen sandas, deformeras eller förses med kammar av något slag. Dimensionerna är liknande de för traditionell stålarmring och den vanligaste produkten är GFRP, men det finns även stänger av CFRP och AFRP.

När det gäller FRP armering för betong är det vanligtvis GFRP-armering man avser, även om CFRP har betydligt bättre materialegenskaper. Den främsta anledningen till detta är kostnaden då CFRP-armering är ca 10 gånger så dyr. GFRP har ca  $\frac{1}{4}$  av stålets E-modul, men en draghållfasthet motsvarande ca 2 gånger en vanlig armering. Materialet är linjärelastiskt och man brukar dimensionera med hänsyn till tillåten töjning. Styrande för dimensionering är ofta bruksgränstillståndet efter uppsprickning och då med avseende på nedböjning. I rapporten presenteras dimensionering av betongelement för böjning och tvärkraft. Dimensionering görs i såväl bruks- som brottgränstillstånd, även vissa detaljlösningar diskuteras. Dimensioneringssambanden är hämtade ur den Amerikanska dimensioneringsanvisningen (ACI 440.1R-15), den Kanadensiska, CSA S806-12 (R2017) samt från det tidigare Europeiska samarbetet genom EU-projektet EUROCRETE som sammanfattats i (fib bulletin 40). Det bör även nämnas att det pågår arbete med en Europisk harmonisering inom CEN (CEN/TC250/SC2/WG1/TG1) gällande inre FRP armering för betong och där det anses befogat har även information från detta arbete presenterats.

Från ett hanterings- och installationsperspektiv skiljer sig FRP armering inte speciellt mycket från traditionell stålarmring. En stor skillnad är dock vikten där FRP armering väger ca  $\frac{1}{4}$  av stålet vilket gör placeringen i formen ofta lättare, vilket är positivt framförallt ur ett arbetsmiljöperspektiv. En annan effekt av detta är att armeringskorgar av FRP ofta måste förankras för att inte flyta upp i samband med vibrering. FRP armering är dock känsligare mot slag och stötar samt måste även skyddas mot UV-ljus.

Därutöver är inte FRP-armering standardiserat på samma sätt som stål, detta är ofta inte ett problem. Detta innebär t ex att definition av funktion istället för mängd material föreskrivs, dvs vilken last man ska ta upp i brottgränstillståndet och de krav som ska följas i bruksgränstillståndet.

Potentialen med att använda dessa material är stor, framförallt om man ser på konstruktionens hela livscykel. För att tekniken ska få genomslag krävs en bättre förståelse i byggprocessens alla led, från beställare till konstruktör och entreprenör. Denna rapport är ett steg i att öka förståelse.



# FÖRKORTNINGAR OCH NOTATIONER

## Förkortningar

|      |                                                                                            |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| ACI  | American Concrete Institute                                                                |
| AFRP | Aramid Fiber Reinforced Polymer                                                            |
| CSA  | Canadian Standard Association                                                              |
| CFRP | Carbon Fiber Reinforced Polymer                                                            |
| fib  | The international federation for structural concrete                                       |
| FRP  | Fiber Reinforced Polymer                                                                   |
| GFRP | Glass Fiber Reinforced Polymer                                                             |
| HM   | High modulus                                                                               |
| HS   | High strength                                                                              |
| ISIS | Canadian network of centers of excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures |
| JSCE | Japanese Society of Civil Engineers                                                        |
| PEEK | Polyetereterketon                                                                          |
| PPS  | Polyfenylsulfid                                                                            |
| PSU  | Polysulfon                                                                                 |
| SLS  | Serviceability Limit State                                                                 |
| ULS  | Ultimate Limit State                                                                       |
| UV   | Ultra-Violet                                                                               |

## Notationer

|              | <i>Beskrivning</i>                                                      | <i>Enhet</i> |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------|
| $a_v$        | Avstånd                                                                 | $m$          |
| $b$          | Bredd                                                                   | $m$          |
| $b_f$        | Bredd på tryckzonen                                                     | $m$          |
| $b_w$        | Bredd                                                                   | $m$          |
| $c$          | Avstånd till neutral axel                                               | $m$          |
| $c$          | Reduktionsfaktor för tryckblock                                         | --           |
| $c$          | Täckande betongskikt                                                    | $m$          |
| $c_b$        | Avstånd till neutral axel                                               | $m$          |
| $c_c$        | Täckskikt                                                               | $m$          |
| $c_d$        | Täckskikt                                                               | $m$          |
| $c_d$        | Dimensioneringsvärde som tar hänsyn till evt. spjälksprickor, se EC2    | $m$          |
| $c_{d,conf}$ | Faktor                                                                  | $m$          |
| $d$          | Effektiv höjd                                                           | $m$          |
| $d_b$        | Armeringsstångens diameter                                              | $m$          |
| $d_c$        | Avstånd från underkant betongelement till centrum av nedersta FRP stång | $m$          |
| $d_{cs}$     | Avstånd                                                                 | $m$          |
| $f_{bd}$     | Betongens draghållfasthet                                               | $N/m^2$      |
| $f_c$        | Betongens tryckhållfasthet                                              | $N/m^2$      |
| $f_{cd}$     | Betongens tryckhållfasthet, dimensionerande värde                       | $N/m^2$      |
| $f_{ck}$     | Betongens tryckhållfasthet, karaktäristiskt värde                       | $N/m^2$      |
| $f_{ck}^*$   | Modifierad tryckhållfasthet                                             | $N/m^2$      |
| $f_{ctm}$    | Betongens draghållfasthet, dimensionerande värde                        | $N/m^2$      |
| $f_{ctd}$    | Betongens draghållfasthet i brottgränstillstånd                         | $N/m^2$      |
| $f_c'$       | Betongens tryckhållfasthet                                              | $N/m^2$      |
| $f_f$        | Spänning FRP                                                            | $N/m^2$      |
| $f_{fb}$     | Dimensionerande spänning i FRP-bygel                                    | $N/m^2$      |
| $f_{fe}$     | Spänning i FRP beroende på förankringslängd                             | $N/m^2$      |
| $f_{fd}$     | Dimensionerande spänning FRP                                            | $N/m^2$      |

|              |                                                                        |         |
|--------------|------------------------------------------------------------------------|---------|
| $f_{fk}$     | Spänning FRP, karakteristiskt värde                                    | $N/m^2$ |
| $f_{frp}$    | Spänning FRP                                                           | $N/m^2$ |
| $f_{fs}$     | Spänning FRP i bruksgränstillstånd                                     | $N/m^2$ |
| $f_{fv}$     | Spänning FRP, byglar                                                   | $N/m^2$ |
| $f_{fw}$     | Spänning FRP, byglar                                                   | $N/m^2$ |
| $f_{rpu}$    | Dimensionerande spänning FRP                                           | $N/m^2$ |
| $f_{fu}$     | Dimensionerande brottspänning i FRP                                    | $N/m^2$ |
| $f_{fu}^*$   | Brottspänning i FRP                                                    | $N/m^2$ |
| $f_{yd}$     | Flytspänning stål                                                      | $N/m^2$ |
| $f_{ywd}$    | Flytspänning stålbyglar                                                | $N/m^2$ |
| $h$          | Höjd                                                                   | $m$     |
| $h_{c,eff}$  | Effektiv höjd                                                          | $m$     |
| $h_{frp}$    | Avstånd överkant till FRP armering                                     | $m$     |
| $h_s$        | Avstånd överkant till stålarmering                                     | $m$     |
| $h_1$        | Avstånd                                                                | $m$     |
| $h_2$        | Avstånd                                                                | $m$     |
| $k$          | Faktor                                                                 | --      |
| $k_b$        | Faktor                                                                 | --      |
| $k_c$        | Faktor                                                                 | --      |
| $k_{conf}$   | Faktor                                                                 | --      |
| $k_t$        | Faktor                                                                 | --      |
| $k_1$        | Faktor                                                                 | --      |
| $k_2$        | Faktor                                                                 | --      |
| $k_3$        | Faktor                                                                 | --      |
| $k_4$        | Faktor                                                                 | --      |
| $k_5$        | Faktor                                                                 | --      |
| $l_{db,req}$ | Förankringslängd                                                       | $m$     |
| $l_e$        | Förankringslängd                                                       | $m$     |
| $l_{thf}$    | Överlappslängd                                                         | $m$     |
| $n_b$        | Förankrade stänger inom sprickyta                                      | --      |
| $n_f$        | Proportionalitetskonstant                                              | --      |
| $n_t$        | Antal möjliga sprickor                                                 | --      |
| $q_d$        | Utbredd last                                                           | $N/m$   |
| $r_b$        | Radie på krökt FRP stång                                               | $m$     |
| $s$          | Avstånd mellan byglar                                                  | $m$     |
| $s$          | Centrumavstånd mellan armeringsstänger som ger omslutning              | $m$     |
| $s_{max}$    | Maximalt avstånd mellan FRP armering för att kontrollera uppsprickning | $m$     |
| $u$          | Medelskjuvspänning                                                     | $N/m^2$ |
| $w_k$        | Maximal sprickvidd                                                     | $m$     |
| $x$          | Avstånd till neutral axel                                              | $m$     |
| $x_{tp}$     | Avstånd till tyngdpunkt                                                | $m$     |
| $x_{tp,s}$   | Avstånd till tyngdpunkt, stålarmering                                  | $m$     |
| $x_{tp}$     | Avstånd till tyngdpunkt, FRP                                           | $m$     |
| $y_I$        | Nedböjning stadium I                                                   | $m$     |
| $y_{II}$     | Nedböjning stadium II                                                  | $m$     |
| $y_t$        | Avståndet från tyngdpunkten i osprucken sektion till undersida         | $m$     |
| $y_{tot}$    | Total nedböjning                                                       | $m$     |
| $y_{tot,f}$  | Total nedböjning FRP armering                                          | $m$     |
| $y_{tot,s}$  | Total nedböjning stålarmering                                          | $m$     |
| $z$          | Inre hävarm                                                            | $m$     |
| $z$          | Parameter                                                              | $N/m$   |

## Romerska Versaler

|              | <i>Beskrivning</i>                                     | <i>Enhet</i> |
|--------------|--------------------------------------------------------|--------------|
| $A_b$        | Armeringsarea FRP                                      | $m^2$        |
| $A_{c,eff}$  | Effektiv betongarea                                    | $m^2$        |
| $A_{ct}$     | Area betongens dragzon före uppsprickning              | $m^2$        |
| $A_f$        | Armeringsarea FRP                                      | $m^2$        |
| $A_{f, bar}$ | Tvårsnittsarea på FRP                                  | $m^2$        |
| $A_{f, min}$ | Minsta armeringsarea FRP                               | $m^2$        |
| $A_{frp}$    | Armeringsarea FRP                                      | $m^2$        |
| $A_{fv}$     | Armeringsarea FRP, byglar                              | $m^2$        |
| $A_{fv,P}$   | Armeringsarea FRP, byglar, reducerad tvärkraft         | $m^2$        |
| $A_{fv,q}$   | Armeringsarea FRP, byglar                              | $m^2$        |
| $A_{fw}$     | Armeringsarea FRP, byglar                              | $m^2$        |
| $A_s$        | Armeringsarea stål                                     | $m^2$        |
| $A_{sw}$     | Armeringsarea stålbyglar                               | $m^2$        |
| $A_{sw,P}$   | Armeringsarea stålbyglar för reducerad tvärkraft       | $m^2$        |
| $A_{sw,q}$   | Armeringsarea stålbyglar pga utbredd last q            | $m^2$        |
| $A_{f,min}$  | Minimiarmering FRP                                     | $m^2$        |
| $A_{s,min}$  | Sprickfördelning armering                              | $m^2$        |
| $C$          | Tryckresultant betong                                  | $N$          |
| $C_E$        | Miljöfaktor                                            | $N/m^2$      |
| $C_{Rd,c}$   | Nationell parameter                                    | --           |
| $E$          | Elasticitetsmodul                                      | $N/m^2$      |
| $E_{cm}$     | Elasticitetsmodul betong, karakteristiskt värde        | $N/m^2$      |
| $E_{c,eff}$  | Betongens effektiva E-modul i bruksgränstillståndet    | $N/m^2$      |
| $E_f$        | Elasticitetsmodul FRP                                  | $N/m^2$      |
| $E_{fk}$     | Elasticitetsmodul FRP, karakteristiskt värde           | $N/m^2$      |
| $E_{fw}$     | Elasticitetsmodul FRP, byglar                          | $N/m^2$      |
| $E_{frp}$    | Elasticitetsmodul FRP                                  | $N/m^2$      |
| $E_s$        | Elasticitetsmodul stål, karakteristiskt värde          | $N/m^2$      |
| $F_c$        | Tryckresultant i betong                                | $N$          |
| $F_f$        | Dragkraft i FRP                                        | $N$          |
| $F_s$        | Dragkraft i stål                                       | $N$          |
| $F_{sw}$     | Dragkraft i stålbyglar                                 | $N$          |
| $I$          | Tröghetsmoment                                         | $m^4$        |
| $I_{cr}$     | Tröghetsmoment för uppsprucken sektion                 | $m^4$        |
| $I_e$        | Effektivt tröghetsmoment för studerat tvärsnitt        | $m^4$        |
| $I_g$        | Tröghetsmoment för osprucken sektion                   | $m^4$        |
| $I_t$        | Tröghetsmoment för transformerat tvärsnitt             | $m^4$        |
| $I_I$        | Tröghetsmoment för stadium I (osprucket)               | $m^4$        |
| $I_{I,f}$    | Tröghetsmoment för stadium I (osprucket), FRP armering | $m^4$        |
| $I_{I,s}$    | Tröghetsmoment för stadium I (osprucket), stålarmoring | $m^4$        |
| $I_{II}$     | Tröghetsmoment för stadium II (sprucket)               | $m^4$        |
| $I_{tot}$    | Tröghetsmoment                                         | $m^4$        |
| $K_l$        | Faktor                                                 | --           |
| $L$          | Längd                                                  | $m$          |
| $M$          | Moment i maxmomentsnitt                                | $Nm$         |
| $M_a$        | Maximalt moment i bruksgränstillstånd                  | $Nm$         |
| $M_{cr}$     | Sprickmoment                                           | $Nm$         |
| $M_{cr,f}$   | Sprickmoment FRP armering                              | $Nm$         |
| $M_{cr,s}$   | Sprickmoment stålarmoring                              | $Nm$         |
| $M_{Ed}$     | Dimensionerande moment i bruksgränstillstånd           | $Nm$         |
| $M_n$        | Nominella momentet                                     | $Nm$         |
| $M_r$        | Dimensionerande moment                                 | $Nm$         |
| $M_{rd}$     | Dimensionerande moment                                 | $Nm$         |
| $M_f$        | Dimensionerande moment                                 | $Nm$         |
| $M_u$        | Dimensionerande moment                                 | $Nm$         |

|              |                                           |             |
|--------------|-------------------------------------------|-------------|
| $P_d$        | Dimensionerande punktlast                 | $N$         |
| $R_A$        | Upplagsreaktion                           | $N$         |
| $R_B$        | Upplagsreaktion                           | $N$         |
| $R_n$        | Motståndsfaktor                           | $Nm$        |
| $S_{L,max}$  | Avstånd                                   | $m$         |
| $S_n$        | Lasteffekten                              | $Nm$        |
| $S_{r,max}$  | Sprickavstånd                             | $m$         |
| $T$          | Dragresultant stål                        | $N$         |
| $T_n$        | Dragresultant FRP                         | $N$         |
| $T_g$        | Glasomvandlingstemperatur                 | $^{\circ}C$ |
| $V_f$        | Tvärkraftskapacitetens tillskott från FRP | $N$         |
| $V_{cf}$     | Tvärkraftskapacitet för betongelement     | $N$         |
| $V_{Ed,A}$   | Tvärkraft                                 | $N$         |
| $V_{Ed,B}$   | Tvärkraft                                 | $N$         |
| $V_{Ed,max}$ | Tvärkraft                                 | $N$         |
| $V_{Ed,A}$   | Tvärkraft                                 | $N$         |
| $V_{Rd,c}$   | Betongens tvärkraftskapacitet             | $N$         |
| $V_{Rd,max}$ | Tvärkraft                                 | $N$         |
| $V_{red,P}$  | Reducerad tvärkraft av punktlast P        | $N$         |
| $V_1$        | Tvärkraft i snitt 1                       | $N$         |

## Grekiska bokstäver

|                      | <i>Beskrivning</i>                                                                                                                                              | <i>Enhet</i> |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| $\alpha$             | Säkerhetsfaktor                                                                                                                                                 | --           |
| $\alpha$             | Vinkel                                                                                                                                                          | --           |
| $\alpha_{cc}$        | Faktor som tar hänsyn till långtidseffekter på tryckhållfasthet                                                                                                 | --           |
| $\alpha_d$           | Faktor                                                                                                                                                          | --           |
| $\alpha_e$           | Förhållande mellan stålets och betongens elasticitetsmoduler                                                                                                    | --           |
| $\alpha_{es}$        | Förhållande mellan stålets och betongens elasticitetsmoduler                                                                                                    | --           |
| $\alpha_{ef}$        | Förhållande mellan FRP och betongens elasticitetsmoduler                                                                                                        | --           |
| $\alpha_l$           | Utjämningsfaktor för spänningsblock (rektangulärt)                                                                                                              | --           |
| $\beta$              | Reduktionsfaktor för tryckblock                                                                                                                                 | --           |
| $\beta$              | Förhållande mellan avstånd från neutrala lagret till underkant<br>betongelement samt avstånd från neutrala lagret och avstånd till centrum<br>av dragarmeringen | --           |
| $\beta$              | Koefficient                                                                                                                                                     | --           |
| $\beta_l$            | Faktor, 0.85 i ACI, reduceras över 28MPa, men inte mindre än 0.65                                                                                               | --           |
| $\Delta_{(cp+sh)}$   | Långtidsdeformationer med hänsyn till krypning och krympning                                                                                                    | $m$          |
| $(\Delta_i)_{sus}$   | Deformation på grund av korttidslast                                                                                                                            | $m$          |
| $\gamma$             | Säkerhetsfaktor                                                                                                                                                 | --           |
| $\gamma$             | Faktor                                                                                                                                                          | --           |
| $\gamma_c$           | Partiell säkerhetsfaktor för betong                                                                                                                             | --           |
| $\gamma_f$           | Partiell säkerhetsfaktor för FRP                                                                                                                                | --           |
| $\varepsilon_c$      | Stukning betong                                                                                                                                                 | --           |
| $\varepsilon_{cm}$   | Medelstukning i betong                                                                                                                                          | --           |
| $\varepsilon_{cu}$   | Stukning betong, brott                                                                                                                                          | --           |
| $\varepsilon_{c2}$   | Stukning betong                                                                                                                                                 | --           |
| $\varepsilon_{cu2}$  | Stukning betong                                                                                                                                                 | --           |
| $\varepsilon_f$      | Töjning FRP                                                                                                                                                     | --           |
| $\varepsilon_{fd}$   | Dimensionerande töjning FRP                                                                                                                                     | --           |
| $\varepsilon_{frp}$  | Dimensionerande töjning FRP                                                                                                                                     | --           |
| $\varepsilon_{fu}$   | Dimensionerande töjning FRP                                                                                                                                     | --           |
| $\varepsilon_{fu}^*$ | Brottöjning enligt materialspecifikationer                                                                                                                      | --           |
| $\varepsilon_{fud}$  | Dimensionerande töjning FRP                                                                                                                                     | --           |
| $\varepsilon_{fu}$   | Dimensionerande töjning FRP byglar                                                                                                                              | --           |

|                    |                                                                                                   |         |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $\varepsilon_s$    | Töjning stål                                                                                      | --      |
| $\varepsilon_{sm}$ | Medeltöjning i stål                                                                               | --      |
| $\varepsilon_{su}$ | Brottöjning stål                                                                                  | --      |
| $\varepsilon_{sy}$ | Töjning stål                                                                                      | --      |
| $\varepsilon_{yd}$ | Flyttöjning stål                                                                                  | --      |
| $\varepsilon_r$    | Töjning                                                                                           | --      |
| $\varphi$          | Kryptal                                                                                           | --      |
| $\zeta$            | Fördelningskoefficient                                                                            | --      |
| $\zeta_f$          | Fördelningskoefficient FRP armering                                                               | --      |
| $\zeta_s$          | Fördelningskoefficient stålarmring                                                                | --      |
| $\eta$             | Faktor som definierar effektiva hållfastheten för betong                                          | --      |
| $\eta_f$           | Förhållande mellan elasticitetsmodulerna hos FRP och betong                                       | --      |
| $\theta$           | Vinkel                                                                                            | --      |
| $\lambda$          | Faktor som definierar effektiva höjden på tryckzonen                                              | --      |
| $\lambda$          | Faktor som tar hänsyn till typ av betong, 1.0 för vanlig betong                                   | --      |
| $\lambda_\Delta$   | Faktor                                                                                            | --      |
| $\nu$              | Reduktionsfaktor                                                                                  | --      |
| $\rho$             | Armeringsinnehåll                                                                                 | --      |
| $\rho_{conf}$      | Förhållandet mellan den armering som ger omslutning samt den armering som förankras eller skarvas | --      |
| $\rho_f$           | Armeringsinnehåll FRP                                                                             | --      |
| $\rho_{fb}$        | Balanserat armeringsinnehåll FRP                                                                  | --      |
| $\rho_{fmin}$      | Armeringsinnehåll min FRP                                                                         | --      |
| $\rho_{fw,min}$    | Armeringsinnehåll min FRP tvärkraft                                                               | --      |
| $\rho_l$           | Armeringsinnehåll längsarmring                                                                    | --      |
| $\rho_{p,eff}$     | Förhållande mellan armeringens tvärsnittsarea och den effektiva betongarean                       | --      |
| $\rho_s$           | Armeringsinnehåll stålarmring                                                                     | --      |
| $\rho_w$           | Armeringsinnehåll byglar                                                                          | --      |
| $\rho_{w,min}$     | minimiarmeringsinnehåll byglar                                                                    | --      |
| $\rho'$            | Armeringsinnehåll för tryckarmeringen                                                             | --      |
| $\xi$              | Förhållandet mellan avståndet till neutrala axeln $x$ och effektiva höjden $d$                    | --      |
| $\xi$              | Töjningsfördelning                                                                                | --      |
| $\xi$              | Tidsberoende faktor                                                                               | --      |
| $\xi$              | Fördelningskoefficient                                                                            | --      |
| $\xi_s$            | Fördelningskoefficient stålarmring                                                                | --      |
| $\xi_f$            | Fördelningskoefficient FRP armering                                                               | --      |
| $\sigma_f$         | Spänning i FRP armering                                                                           | $N/m^2$ |
| $\sigma_r$         | Spänning                                                                                          | $N/m^2$ |
| $\sigma_s$         | Armeringsspänning som tillåtes efter sprickbildning                                               | $N/m^2$ |
| $\sigma_{sd}$      | Yttre tryckspänning                                                                               | $N/m^2$ |
| $\sigma_{st}$      | Armeringsspänning beräknad för spricklast                                                         | $N/m^2$ |
| $\phi$             | Diameter armeringsstång                                                                           | $m$     |
| $\phi$             | Säkerhetsfaktor                                                                                   | --      |
| $\phi_c$           | Säkerhetsfaktor betong                                                                            | --      |
| $\phi_{ACI}$       | Säkerhetsfaktor ACI                                                                               | --      |
| $\phi_C$           | Reduktionsfaktor betong                                                                           | --      |
| $\phi_{CFRP}$      | Säkerhetsfaktor CFRP                                                                              | --      |
| $\phi_{FRP}$       | Reduktionsfaktor FRP                                                                              | --      |
| $\phi_\varepsilon$ | Förhållandet mellan töjning i FRP-armering och töjning i stålarmring                              | --      |
| $\phi_{GFRP}$      | Säkerhetsfaktor GFRP                                                                              | --      |
| $\phi_{(c,t0)}$    | Kryptal                                                                                           | --      |

# INNEHÅLL

|                                                        |             |
|--------------------------------------------------------|-------------|
| <b>FÖRORD</b> .....                                    | <b>0</b>    |
| <b>SAMMANFATTNING</b> .....                            | <b>I</b>    |
| <b>FÖRKORTNINGAR OCH NOTATIONER</b> .....              | <b>V</b>    |
| FÖRKORTNINGAR.....                                     | V           |
| NOTATIONER.....                                        | V           |
| <i>Romerska Versaler</i> .....                         | <i>VII</i>  |
| <i>Grekiska bokstäver</i> .....                        | <i>VIII</i> |
| <b>INNEHÅLL</b> .....                                  | <b>1</b>    |
| <b>INTRODUKTION</b> .....                              | <b>1</b>    |
| BAKGRUND.....                                          | 2           |
| <b>SYFTE</b> .....                                     | <b>3</b>    |
| <b>METODIK</b> .....                                   | <b>3</b>    |
| <b>BEGRÄNSNINGAR</b> .....                             | <b>3</b>    |
| <b>PROJEKTETS GENOMFÖRANDE</b> .....                   | <b>3</b>    |
| <b>RAPPORTENS STRUKTUR</b> .....                       | <b>4</b>    |
| <b>INTRODUKTION TILL ICKE METALLISK ARMERING</b> ..... | <b>5</b>    |
| ALLMÄNT .....                                          | 5           |
| MATERIALDATA .....                                     | 6           |
| <i>Fiberarmerade polymerer</i> .....                   | 6           |
| <i>Fibrer</i> .....                                    | 7           |
| Allmänt .....                                          | 7           |
| Glasfiber.....                                         | 8           |
| Kolfiber.....                                          | 8           |
| Aramidfibrer.....                                      | 9           |
| Basaltfibrer .....                                     | 9           |
| <i>Polymera matriser</i> .....                         | 9           |
| Allmänt .....                                          | 9           |
| Härdplaster .....                                      | 9           |
| Termoplaster .....                                     | 10          |
| HISTORISK TILLBAKABLICK OCH FRAMTIDA MARKNAD .....     | 10          |
| <i>Allmänt</i> .....                                   | 10          |
| <i>Byggbranschen</i> .....                             | 12          |
| ICKE METALLISK ARMERING .....                          | 13          |
| <i>Allmänt</i> .....                                   | 13          |
| <i>Materialdata</i> .....                              | 14          |
| <i>Materialdata för utvalda FRP produkter</i> .....    | 15          |
| <i>Beständighet</i> .....                              | 16          |
| Allmänt .....                                          | 16          |
| Fukt (Vatten och saltlösning) .....                    | 16          |
| Alkalitet .....                                        | 17          |
| UV-Strålning.....                                      | 17          |
| Frysning.....                                          | 17          |
| Brand och höga temperaturer .....                      | 17          |

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Utmattning.....                                                         | 18        |
| <b>TIDIGARE ERFARENHETER AV FRP ARMERING I BETONG.....</b>              | <b>19</b> |
| INLEDNING.....                                                          | 19        |
| TILLÄMPNINGAR.....                                                      | 19        |
| <b>DIMENSIONERING.....</b>                                              | <b>23</b> |
| ALLMÄNT .....                                                           | 23        |
| GRUNDER FÖR DIMENSIONERING .....                                        | 23        |
| GRÄNSTILLSTÅND.....                                                     | 23        |
| BRUKSGRÄNSTILLSTÅND .....                                               | 24        |
| BROTTGRÄNSTILLSTÅND.....                                                | 24        |
| HISTORISK UTVECKLING AV EXISTERANDE ANVISNINGAR OCH NORMER .....        | 25        |
| VAL AV DIMENSIONERINGSANVISNINGAR .....                                 | 26        |
| BROTTGRÄNSTILLSTÅND – DIMENSIONERING FÖR BÖJNING .....                  | 26        |
| <i>Allmänt</i> .....                                                    | 26        |
| <i>Brottmöder</i> .....                                                 | 27        |
| <i>Säkerhetsfaktorer</i> .....                                          | 27        |
| <i>Dimensionering baserad på ACI</i> .....                              | 28        |
| <i>Dimensionering baserad på CSA</i> .....                              | 29        |
| <i>Dimensionering baserad på fib bulletin No 40</i> .....               | 30        |
| BROTTGRÄNSTILLSTÅND – DIMENSIONERING FÖR TVÄRKRAFT .....                | 32        |
| <i>Allmänt</i> .....                                                    | 32        |
| <i>Dimensionering för tvärkraft med FRP armering</i> .....              | 33        |
| <i>Dimensionering för tvärkraft baserad på CSA</i> .....                | 34        |
| <i>Dimensionering för tvärkraft baserad på ACI</i> .....                | 35        |
| <i>Dimensionering för tvärkraft baserad på fib bulletin No 40</i> ..... | 36        |
| <i>Bruksgränstillståndet</i> .....                                      | 37        |
| <i>Uppsprickning baserad på ACI</i> .....                               | 38        |
| <i>Uppsprickning baserad på CSA</i> .....                               | 38        |
| <i>Uppsprickning baserad på fib bulletin 40 (EC2)</i> .....             | 39        |
| <i>Nedböjning baserad på ACI</i> .....                                  | 40        |
| <i>Nedböjning baserad på CSA</i> .....                                  | 42        |
| <i>Nedböjning baserad på fib bulletin 40 (EC2)</i> .....                | 42        |
| VIDHÄFTNING OCH FÖRANKRING .....                                        | 44        |
| <i>Förankring baserad på ACI</i> .....                                  | 44        |
| <i>Förankring baserad på CSA</i> .....                                  | 45        |
| <i>Förankring baserad på fib bulletin No 40 (EC2)</i> .....             | 46        |
| DETALJER .....                                                          | 47        |
| <b>PRAKTISK HANDHAVANDE, INSTALLATION OCH KONTROLL.....</b>             | <b>49</b> |
| INTRODUKTION .....                                                      | 49        |
| MOTTAGNING OCH FÖRVARING .....                                          | 49        |
| INSTALLATION OCH SAMMANFOGNING .....                                    | 49        |
| KVALITETSKONTROLL OCH INSPEKTION .....                                  | 50        |
| <i>Innan byggande</i> .....                                             | 50        |
| <i>Under byggande</i> .....                                             | 50        |
| <b>REFERENSER.....</b>                                                  | <b>53</b> |
| <b>WEBBASERADE REFERENSER.....</b>                                      | <b>58</b> |

|                                                             |          |
|-------------------------------------------------------------|----------|
| <b>APPENDIX A – KOMMERSIELLA FRP PRODUKTER.....</b>         | <b>1</b> |
| V-ROD (WWW.VROD.CA) .....                                   | 1        |
| ASLAN (WWW.ASLANFRP.COM) .....                              | 2        |
| COMBAR (WWW.SCHOECK-COMBAR.COM) .....                       | 2        |
| FIBERBAR (WWW.FIBERBAR.COM).....                            | 3        |
| <b>APPENDIX B – BERÄKNINGSEXEMPEL.....</b>                  | <b>1</b> |
| B.1 DIMENSIONERING FÖR BÖJNING .....                        | 1        |
| <i>B1.1 Förutsättningar</i> .....                           | 1        |
| <i>B1.2 Lösningsförslag</i> .....                           | 1        |
| B.2 DIMENSIONERING FÖR TVÄRKRAFT .....                      | 9        |
| <i>B2.1 Förutsättningar</i> .....                           | 9        |
| <i>B2.2 Lösningsförslag</i> .....                           | 9        |
| <b>APPENDIX C – INSTALLERAD FRP ARMERING TOM 2016 .....</b> | <b>1</b> |
| <b>APPENDIX D – BRO ÖVER RÅÅN VID OTTARPS KYRKA .....</b>   | <b>1</b> |

## INTRODUKTION

Utvecklingen inom byggbranschen är starkt kopplat till utvecklingen inom materialområdet. Detta har delvis också varit en pådrivande faktor när det gäller förbättrad produktionsteknik och ökad effektivitet samt i förlängningen ökad lönsamhet. Till exempel är dagens betong en avancerad produkt som kan skräddarsys för många olika ändamål. Detsamma gäller stål och många andra material, inte minst isolermaterial och olika typer av ytskikt och skydd. Det förväntas att utvecklingen inom materialområdet får en än starkare betydelse i framtiden. Detta lyfts också fram i en rapport från World Economic Forum, (WEF, 2016) som ett av viktiga framtida fokusområden för att skapa en mer konkurrenskraftig och lönsam industri. Materialutvecklingen kan vara relaterad till funktionella, produktionsmässiga eller estetiska krav. EU uppskattar att 70% av alla produktinnovationer, sett över samtliga industrier, är att härröra från materialutvecklingen. Vidare uppskattas att ca 1/3 av byggkostnaden är relaterat till materialkostnaden (WEF, 2016). I tillägg till detta är en gemensam faktor för alla material som används, enskilt eller i system, att de ska vara beständiga över tiden. I de fall där material inte kan bytas ut eller ersättas förväntar man att materialen skall uppfylla sin funktion under hela byggnadsverkets livslängd.

Beständighet och livslängd hos byggnadsverk av armerad betong har idag stor fokus där det i många fall kan noteras att den dimensionerande livslängden, > 100 år, inte alltid uppnås samt att underhållsbehov är större än en gång antaget vid uppförandet. Det borde egentligen vara en självklarhet att man vid utformningen av ett byggnadsverk, oavsett vilket material man tänker använda, försöker så noggrant som möjligt beakta den kommande exponeringsmiljön och värdera framtida underhållsbehov. En orsak till ökade underhållsbehov och kortare livslängder än planerat kan vara att betongkonstruktioner historiskt sett antagits mer eller minder underhållsfria. I alla fall upp till början på 80-talet. Det finns många mekanismer som kan bryta ner en betongkonstruktion där de vanligaste är armeringskorrosion orsakad av karbonatisering och/eller klorider, sönderfrysning och alkalikiselreaktioner. Många av dessa skador skulle ha kunnat undvikas om man hade valt en betong med rätt kvalitet, om man varit mer observant på betongens täckskikt och även i vissa fall om man hade ersatt den befintliga stålarmering med rostfri eller icke metallisk FRP (Fibre Reinforced Polymer) armering som inte korroderar.

Det finns betydande kostnadsbesparande potential ur ett entreprenadperspektiv om FRP-armering i större grad kan nyttjas i byggandet. Materialen har låg vikt i förhållande till sin styvhet och hållfasthet, hanteringen på arbetsplatsen ur ett arbetsmiljöperspektiv är således positivt. Vidare, med en armering som inte korroderar kan även betongens täckskikt minska, vilket då direkt ger lägre vikt på t ex prefabricerade betongelement, enklare hantering, men framförallt lägre CO<sub>2</sub> -påverkan genom mindre åtgång av betong. Det finns också stora möjligheter att kombinera stålarmering och FRP armering, där man t ex använder FRP armering i aggressiva miljöer t ex skvalpszonen eller i brokantbalkar och stålarmering i mindre miljöaggressiva områden. En stor anledning till att materialen inte kommit till större användning i Sverige hävdar författarna är bristen på kunskap i samtliga led, såväl hos beställare, konstruktör som hos entreprenörer samt också en kortsiktighet i samband med byggandet som helhet där större fokus ligger på byggkostnad än anläggningens totalkostnad. Ägaren till anläggningen bör till större grad ta hänsyn till totalkostnad. Man har svårt att uppskatta potentialen hos FRP armering och om ingen efterfrågar samt föreskriver dessa material kommer inte entreprenörerna heller att använda dom även om man kan förstå den långsiktiga nyttan. Detta kan jämföras med tekniken med förstärkning av betong med kolfiberkomposit, det är först efter det att riktlinjer och beräkningsstöd tagits fram som förstärkningsmetodiken fick större spridning, (Täljsten m. fl. 2016).

Internationellt används FRP (Fibre Reinforced Polymer) armering i allt större utsträckning, vilket delvis kan bero på att det finns internationella dimensioneringsnormer och guidelines inom området. I den kommande revideringen av Eurokod 2 kommer även dimensionering av FRP armering finnas med som möjligt alternativ till traditionell armering.

Fiberarmerade kompositer har funnits kommersiellt tillgängliga i mer än 20 år, och mer än 10 miljoner meter används inom den internationella byggnadsindustrin årligen. Det finns flera anledningar till varför FRP kan vara lämplig som armering i betong: först och främst beständigheten, men också att vissa typer av FRP är opåverkade av elektromagnetiska fält, har hög hållfasthet och låg vikt. Eftersom materialen är linjärelastiska kan de även göra stor nytta i bruksgränstillståndet som t ex sprickarmering. Materialen kan även skräddarsys beroende på tillämpning, man kan t ex skapa kompositer med E-modul liknande betongen likväl som nära och överstigande stål.

Förenklat består en fiberarmerad komposit av fibrer (armering) och matris. Materialegenskaper beror på såväl tillverkningsprocesser som råmaterialet. Inom byggnadsindustrin är erfarenhet och kunskap när det gäller fiberarmerade kompositer förhållandevis ringa om man jämför med traditionella byggnadsmaterial som stål och betong. Detta är i och för sig förklarligt eftersom för såväl stål, trä och betong har omfattande forskning och erfarenhet under de senaste 100 åren gett grundläggande materialkunskaper och dimensioneringsregler samt ett omfattande produktionskunnande, vilket av naturliga skäl inte gäller fiberarmerade kompositmaterial. Forskningen och utvecklingen har dock varit betydande de senaste 15-20 åren och idag finns rekommendationer och normer för dimensionering, se t.ex. fib 14 (2007), ACI 440.1R-15 (2015), CSA S806-12, för att nämna några. Det finns också omfattande praktisk erfarenhet från olika armeringsprojekt världen över. Sverige har varit begränsat delaktig i denna forskning och utveckling, förutom visst genomfört arbete vid framförallt Chalmers genom professor Ralejs Tepfers se t ex ((Tepfers m.fl., 1992), (Tepfers, 1993), (Tepfers, 1997), (Tepfers, 1998) och (Deijke, 2001) samt även mindre delar från Lunds tekniska Högskola, (Carlsson m.fl., 1993), (Sentler m.fl., 2004). Sverige har dock tillämpat tekniken i brobyggnad då vi så tidigt som 1994 installerade glas och kolfiberstänger i ett brodäck i södra Sverige. I omvärlden har forskningen varit mer omfattande och det har dock bedrivits omfattande internationell forskning och utveckling inom detta område de sista 30-åren, här kan bl a nämnas forskning från (Benmokrane & Rahman, 1998), (Burgoyne, 2001), Cosenza m.fl., 2001), (Dolan m.fl., 1999), (Ehsani, 1993), (El-Badry, 1996), (Iyer & Sen, 1991), (Nanni, 1993), (Taerwe, 1995) och det finns idag ett stort antal genomförda projekt runt om i världen, i appendix C har en relativt omfattande projektlista ställts samman

## Bakgrund

Bakgrunden till aktuellt SBUF projektet är i första hand att problem med armeringskorrosion inte enkelt kan byggas bort, även om beständighetsdimensionering har förbättrat förutsättningarna för beständiga betongkonstruktioner under senare år. Ett alternativ kan vara att byta ut eller komplettera befintlig armering med kompositarmering. Tillämpningen av icke metallisk armering förväntas även ge samhällsvinster i form av mer beständiga konstruktioner med mindre underhållsåtgärder jämfört med traditionella armeringstyper. Detta har man inte minst sett i de fullskaletillämpningar som gjorts i Kanada och USA. Det är bl a tillåtet i Kanada att bygga kompletta brodäck helt utan stålarmering och detta har då specifikt lett till minskat underhåll på dessa brotyper.

Det förväntade resultatet är en ökad förståelse hur icke metallisk armering kan komma till användning och nytta som armering för betong.

Projektet är relevant ur branschsynpunkt då behov finns av en vägledning för FRP armering i betong och befintliga internationella vägledningar inte kan anses uppfylla de behov som föreligger i Sverige. Dessutom kan tekniken påverka arbetsmiljön i positiv riktning genom att armeringsmaterialen är lättare att arbeta med i jämförelse med vanlig stålarmering. En lägre transportvikt av armering kan samtidigt minska utsläppen av CO<sub>2</sub>.

## SYFTE

Det primära syftet med denna studie är att ställa samman anvisningar för dimensionering och utförande gällande icke metallisk armering, FRP-armering, i betong. Målet är att anvisningarna ska vara utformad på sådant sätt att beställare, konstruktörer och även entreprenörer ska känna tillförlitlighet och börja tillämpa den här typen av armeringsteknik i sina konstruktioner.

För att målet ska kunna uppnås hade dock det varit nödvändigt med något eller några pilotprojekt i Sverige där man kunde följa och dokumentera under byggandet. Här skulle man då även titta på ett projekt som helhet från projektering till förvaltning där man även tog hänsyn till livscykelkostnader.

## METODIK

Arbetet har i första hand bedrivits som en skrivbordsstudie och i arbetet har internationella och befintliga handböcker och regler för dimensionering av betongkonstruktioner med FRP armering använts.

Utöver detta har författarnas tidigare erfarenheter från lång tids forskning vid Luleå tekniska universitet (LTU) samt vid Danmarks tekniska universitet (DTU) legat till grund för arbetet. Dessutom diskuteras kortfattat erfarenheten med arbetet inom SIS och TK556 gällande revideringen av Eurokod 2 och kommande dimensioneringsföreskrifter gällande kompositarmering.

## BEGRÄNSNINGAR

Arbetet är som tidigare nämnts i första hand en skrivbordsstudie och författarna har begränsade kunskaper om produktionstekniska utmaningar när det gäller FRP armering. Dock har författaren erfarenhet gällande provning av FRP armering i laboriemiljö. Studien omfattar således inga specifika försök eller fältstudier. Därtill har endast slakarmerade betongkonstruktioner beaktats.

Det bör också lyftas upp att fastän de studerade dimensioneringsanvisningarna uppvisar många likheter, finns det också skillnader i betraktelsesätt gällande dimensionering. Författarna har i denna rapport inte beskrivit i detalj dessa skillnader då det vid denna tidpunkt inte anses att skillnaderna motsvarar den stora arbetsinsats som det skulle krävas.

## PROJEKTETS GENOMFÖRANDE

Projektet har delats upp i tre faser, 1) Insamling av litteratur, 2) genomgång av litteratur samt 3) sammanställning av anvisningar/handbok i rapportform. Sammanställningen omfattar dock även beräkningsexempel vilka inte var möjliga att ta direkt obehandlade från litteraturen, dvs detta krävde en omfattande arbetsinsats.

## RAPPORTENS STRUKTUR

Rapporten inleds med en introduktion till icke metallisk armering där bl. a. materialdata, historik, marknad och beständighet diskuteras. Därefter följer en kort presentation av tidigare erfarenheter av FRP armering i betong. En omfattande del i rapporten behandlar dimensionering i brott- och bruksgränstillstånd. Dimensionering i brottgränstillstånd behandlar böjning och tvärkraft och i bruksgränstillstånd uppsprickning och nedböjning. Dessutom diskuteras förankring och detaljlösningar. Innan referenser och appendix, presenteras praktiskt handhavande, installation och kontroll.

I appendix A presenteras några leverantörer av FRP armering och i appendix B presenteras beräkningsexempel i böjning och tvärkraft. Vidare redovisas tillämpningar runt om i världen i appendix C och slutligen i appendix D visas en ritning av bron över Råån vid Ottarps kyrka där Trafikverket (dåvarande Vägverket) utförde fullskaleförsök med FRP armering i ett brodäck.

# INTRODUKTION TILL ICKE METALLISK ARMERING

## Allmänt

I denna rapport fokuseras på fiberarmerade kompositer som ersättning eller komplement till traditionell stålarmering i betongkonstruktioner.

Materialegenskaperna hos FRP-armering är riktningsberoende (anisotropa), vilket betyder att man måste ta hänsyn till hur fibrerna är placerade i kompositen. För armeringsstänger är oftast majoriteten av fibrerna placerade i längdriktningen, vilket också betyder att hållfasthetsegenskaperna och styvheten är helt dominerande i denna riktning. De mekaniska egenskaperna är mycket olika vid tryck- och dragbelastning, och betydligt bättre vid drag än vid tryck. Fibern ger styrka och styvhet åt kompositen. Matrisens funktion är att binda samman fibrerna och att skydda dem vid såväl tillverkning som användning, samt att överföra krafter mellan fibrerna.

De vanligaste matrismaterialen är vinylester, polyester och epoxi och de vanligast förekommande fibrerna är glas, kol, aramid och basalt. Mest använt för armering i betong har varit glasfiberarmerad vinylester. Generella fördelar för en FRP är:

- **Hög styrka:** FRP armering har generellt en hållfasthet överstigande traditionell stålarmering med flera multiplar.
- **Beständighet:** Motstånd mot korrosion och många kemikalier minskar underhållsbehovet.
- **Termisk och elektrisk konduktivitet:** påverkas inte av magnetism, radio- och telekommunikationssignaler. Lämpligt att använda i områden med hög spänning och magnetism.
- **Låg vikt:** Hög styrka i förhållande till vikt ger längre transportvikt i jämförelse med stål samt ger förutsättningar för förbättrad arbetsmiljö på arbetsplatsen.

Två av utmaningarna med FRP armering är högre initial materialkostnad och bristande erfarenhet hos såväl konstruktörer som utförare. Dessutom måste krökta detaljer förtillverkas, dvs. man kan inte bocka FRP armeringen på plats

En fiberarmerad kompositarmering kan vara uppbyggd på många olika sätt och behöver inte alls se ut som t ex ett traditionellt armeringsjärn, de kan ha cirkulära, rektangulära, kvadratiska, homogena eller öppna tvärsnitt, men det vanligaste är runda stänger med kammar, spirallindade eller med sandad yta. Dimensionerna spänner från små millimeterstora stavar/stänger/band upp till hela konstruktionselement, t ex I-balkar. Som kuriositet kan nämnas att man tillverkat en brobalk (H-tvärsnitt) av kolfiber till en höjd av ca 1200 mm. Kunskap om användningsområde samt de ingående materialens egenskaper skapar basen för analys och dimensionering av de byggnadsdelar eller komponenter man vill tillverka. I figur 1 visas några olika typer av FRP-armeringsprodukter. Armeringen längst till vänster är en traditionell stålarmering, därefter följer GFRP armering med sandad yta, GFRP armering med slät yta, spirallindad armering, två stycken med ribbor och slutligen and CFRP lina.



Figur 1 Exempel på armering av FRP (Quayyum, 2010)

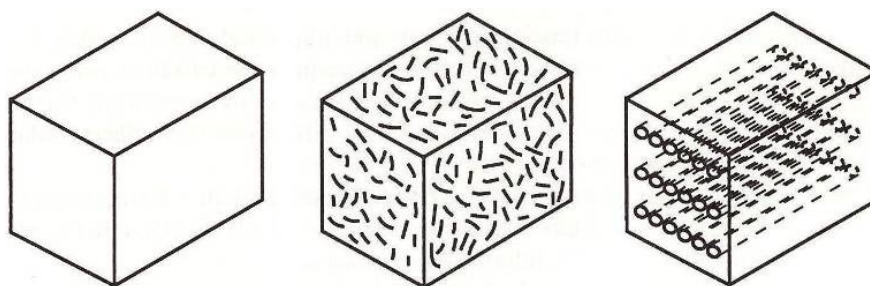
## Materialdata

### Fiberarmerade polymerer

En komposit består av ett eller flera material som kombineras för att skapa ett nytt material med egenskaper som överstiger de av de enskilda ingående materialen. Vanligtvis kombineras två material för att kompensera för mindre fördelaktiga egenskaper hos ett av materialen. I ett bredare perspektiv har kompositmaterial redan funnits i byggbranschen under lång tid, från halmförstärkta lerhyddor fram till dagens moderna armerade betong.

Gruppen polymera kompositer är en av de största grupperna av kompositer. Normalt, ger ett av materialen styrka och styvhet och benämns då armering. Detta material är normalt inbäddat in det andra materialet, matrisen. Kompositens egenskaper påverkas starkt av egenskaperna hos matrisen, armeringen och volymförhållandet mellan dessa material. I tillägg har riktningen av armering (fibrer) och tillverkningsprocessen betydelse för de slutliga materialegenskaperna.

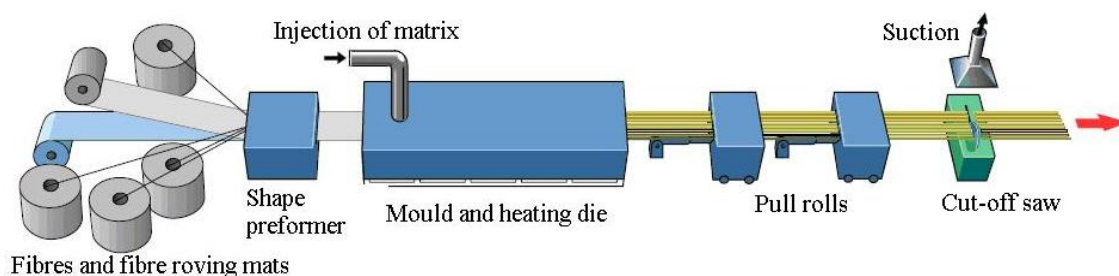
Fibrerna kan vara diskontinuerliga (korta fibrer) eller kontinuerliga (långa fibrer) och kan appliceras slumpvis eller orienteras speciellt i matrisen, se figur 2, detta kan också göras i kombination. Detta kan t ex jämföras med fiberarmerad- respektive armerad betong. Fiberarmerade kompositer har använts i över 75 år (Agarwal & Broutman, 1990)



Figur 2 Icke armerad matris, slumpmässigt armerad samt orienterat armerad, (Kim, 1995)

Den vanligast förekommande produktionsprocessen för kompositarmering är pultrudering, se figur 3. Metoden uppfanns under 1970-taler. Fibrerna befinner sig i drag på båda sidor om form och upphettat verktyg. Dragkraften har endast som syfte att centrera fibrerna. Fibrerna dras genom verktyget och matrisen tillsätts samtidigt som härdning genomförs med värme.

Slutligen kapas kompositen till avsedd längd. Verktöget avgör geometri på den komponent som skall tillverkas. Teoretiskt sett kan man tillverka oändligt långa kompositprodukter, men fysiska begränsningar sätter stopp, t ex möjligheten till transport. I efterföljande avsnitt beskrivs fiber, matris och det färdiga kompositmaterialet mer ingående.



Figur 3 Pultruderingsprocessen, från (www.fiberline.com, 2018)

## Fibrer

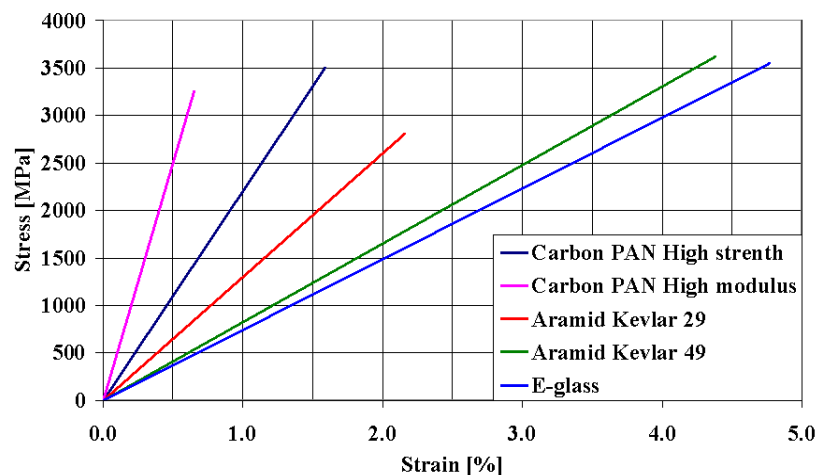
### Allmänt

De konstruktiva och funktionella kraven på en fiber i kompositarmering beror på förhållandet mellan elasticitetsmodul, brotthållfasthet och töjbarhet. Eftersom kompositarmeringen är linjärelastisk innebär det att töjbarheten är lägre vid hög elasticitetsmodul och vice versa. Således måste man vid dimensionering ta hänsyn till vilken parameter som är styrande. Låg spridning på materialegenskaper hos individuella fibrer är förstås också en fördel. Från hanteringssynpunkt är det även en fördel om fibrerna har låg vikt. När det gäller yttre förstärkning av stål eller betongkonstruktioner är kolfiber helt dominerande även om i vissa fall såväl glas-, aramid (kevlar®)- som basaltfiber har använts. För armeringsprodukter är glasfiberkomposit mer vanligt. I tabell 1 ges några typiska materialegenskaper hos fibrer i jämförelse med slakarmering och i figur 4 redovisas arbetskurvor för några typiska fibrer.

Tabell 1 Sammanställning av materialegenskaper för vissa fibrer som är lämpliga för armeringsanvändning, Täljsten et. al. 2016.

| Material    | Densitet             | Draghållfasthet | Elasticitetsmodul | Brottöjning | Värmeutvidgnings-koefficient | Max användnings-temperatur |
|-------------|----------------------|-----------------|-------------------|-------------|------------------------------|----------------------------|
|             | (kg/m <sup>3</sup> ) | (MPa)           | (GPa)             | (%)         | (10 <sup>-6</sup> /°C)       | (°C)                       |
| E-glas      | 2500                 | 2000 - 3700     | 72-77             | 3.0-4.5     | 5                            | 300                        |
| S-glas      | 2500                 | 3500 - 4900     | 80-90             | 4.2-5.4     | 2.9                          | 300                        |
| AR glas     | 2270                 | 3000-3300       | 71-74             | 3.0-4.3     | -                            | 300                        |
| Kolfiber HM | 1950                 | 2500-4000       | 350-800           | 0.2-0.9     | -1.2 – (-0.1)                | 400                        |
| Kolfiber HS | 1750                 | -6000           | 240               | -2.0        | -0.6 – (-0.2)                | 400                        |
| Aramid      | 1440                 | 3500-4100       | 70 - 130          | 2.5-5.0     | -2.0 long.<br>59 radial      | 200                        |
| Basalt      | 2800                 | 4500-4900       | 80-95             | 3.1         | 8                            | 400                        |
| Armering    | 7 500                | Ca 550          | 210               | 0.2*        | 10                           | 300                        |

\*Flytgräns för stål, därefter betar sig stål icke linjärt. Brottöjningen är avsevärt större.



Figur 4 Icke armerad matris, slumpmässigt armerad samt orienterat armerad, (Kim, 1995)

### Glasfiber

Glasfiber är en oorganisk fiber som tillverkas genom att smält glas pressas genom en öppning som är i storleksordningen 1-3 mm i diameter. Därefter dras fibern ut vilket ger den en tjocklek av ca 3-20  $\mu\text{m}$ . Under tillverkningen förses fibrerna med en sk appretur (sizing) för att förbättra vätningsegenskaperna och för att öka vidhäftningen mot matrismaterialiet.

De vanligaste förekommande glasfibrerna består av E-glas (eng: electric), S-glas (eng. strength) och alkaliresistent (AR) glasfiber. E-glas har lägst tillverkningskostnad och har många olika användningsområden inom plastindustrin. S-glas har högre elasticitetsmodul och draghållfasthet i jämförelse med E-glas, men är också dyrare vilket gör att den inte används i samma uträkning. Fibrer av AR-glas har ett förhöjt motstånd mot alkalisk miljö och tillverkas genom att man tillsätter zirkonium, materialegenskaperna är annars likvärdiga med E-glasets.

Glasfiber påverkas negativt av höga temperaturer, men har oförändrade egenskaper i de normala temperaturer i byggbranschen. Materialelegenskaperna påverkas negativt över tiden under konstant last som överstiger ca 25 % av brottöjningen, samt i samband med kemisk korrosion. Kompositerna av glasfiber lämpar sig därför inte till förspänning.

### Kolfiber

Utvecklingen av kolfiber började i slutet på 1950-talet i USA och fortsatte sedan under 1960-talet i Storbritannien och Japan. Målet var att finna ett styvt, starkt och lätt material för högteknologiska tillämpningar, t ex i flyg- och militärindustrin. Kolfiber är en oorganisk fiber som tillverkas i form av buntar (tråd) om ca 10 000 stycken enskilda fiber (filament) vars diameter är 5-15  $\mu\text{m}$ . Det finns två olika tillverkningsprocesser för kolfiber där den huvudsakliga skillnaden är råmaterialen. Båda processerna innefattar värmebehandling (upp till 2000 °C beroende på kvalitet), sträckning och oxidation. Egenskaperna hos kolfiber varierar med kristallstrukturen, ju mer ordnad kristallstruktur desto högre styvhet.

Elasticitetsmodul och hållfasthet hos kolfiber är relativt opåverkad av höga temperaturer, de är också okänsliga för den miljö som vanligtvis förekommer i byggbranschen. Fibrerna är linjärelastiska upp till brott. Den kolfiber som anses bäst, men som också är dyrast, tillverkas av polyacrylonitril (PAN). Det är oftast också dessa som är mest lämpade i lastbärande konstruktioner.

## Aramidfibrer

Aramidfiber är en organisk fiber som tillverkas av en lösning med aromatisk polyamid som pressas genom ett munstycke och sedan sträcks. Aramidfibers diameter är ca 10-15  $\mu\text{m}$ . Aramidfiber har en hög förmåga att ta upp energi t.ex. i samband med stötar, den har bra egenskaper i utmattning (drag), låg krypning och kan motstå relativt höga temperaturer, upp till 200 °C. En nackdel är att de är känsliga för UV-ljus samt absorberar vatten. Aramidfiber används sparsamt som armering i betongkonstruktioner. Exempel på tillämpningar är i segel och i skottsäkra västar men också som skydd i arbetskläder.

## Basaltfibrer

Basaltfibrer tillverkas av basalt som i sin tur är sammansatt av mineralerna plagioklas, pyroxen samt olivin. Tillverkningen av basaltfibrer liknar den för glas, dvs man smälter ner basalten vid ca 1400 °C, varefter den smälta bergarten extruderas genom små munstycken till kontinuerliga trådar. Fibrerna har en diameter på 9-12  $\mu\text{m}$ . Materialegenskaperna hos basaltfibrerna ligger någonstans mellan E- och S-glas avseende hållfasthet, men basaltfibrerna tål höga temperaturer och alkaliska miljöer bättre. De är betydligt billigare än kolfiber men något dyrare än glasfiber. En viss spridning inom byggbranschen kan skönjas, men i jämförelse med glas- och kolfiber är den blygsam. Det har även lyfts fram ett antal frågetecken om basaltfibers beständighet i betongkonstruktioner, se bl. a. (Portal, 2015).

## Polymera matriser

### Allmänt

Matrismaterialets funktion är att binda samman fibrerna, överföra skjuvkrafter mellan fiber samt skydda fibrerna mot negativ påverkan från omgivningen. Fiberkompositer som används i byggnadsindustrin har vanligtvis en härdplastmatris bestående av antingen polyester, epoxi eller vinylester, men även matriser av termoplast förekommer. Härdplaster består av två eller flera komponenter som reagerar kemiskt när de blandas samman.

Härdplaster är jämförelsevis spröda och en termoplast mer formbar, speciellt om den värms upp till ca 55-60 °C. Matrismaterialet har stor inverkan på flera av kompositens mekaniska egenskaper, t ex transversell elasticitetsmodul – vilken är avsevärt lägre än elasticitetsmodulen i fiberriktningen, 1/100-1/50. I laminat med fibern i en riktning tar matrisen upp laster i tvärriktningen, dvs det är viktigt hur laminatet placeras i förhållande till belastningen. Vidare bestäms kompositens skjuvmotstånd och fibers egenskaper att motstå buckling till stora delar av matrismaterialets egenskaper.

### Härdplaster

Härdplast tillverkas genom en kemisk process och resultatet är en högvärdig plast med goda tekniska egenskaper. Före härdning har den låg viskositet som medför att den väl omsluter fibrerna. Vid upphettning över den sk glasomvandlingstemperaturen,  $T_g$ , börjar de polymera kedjorna brytas upp och materialet mjuknar.  $T_g$  är beroende på material och härdningstemperatur. Ju högre temperatur vid härdning desto högre  $T_g$ . I tabell 2 visas materialegenskaper för några vanligt förekommande matrismaterial.

Tabell 2 Egenskaper hos vanligt förekommande hårdplaster, Täljsten et. al. 2011.

| Egenskap                                           | <i>Matris (hårdplast)</i> |             |             |
|----------------------------------------------------|---------------------------|-------------|-------------|
|                                                    | Polyester                 | Epoxi       | Vinylester  |
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> )                      | 1200 – 1400               | 1200 – 1400 | 1150 – 1350 |
| Draghållfasthet (MPa)                              | 34.5 – 104                | 55 – 130    | 73 – 81     |
| Elasticitetsmodul (GPa)                            | 2.1 – 3.45                | 2.75 – 4.10 | 3.0 – 3.5   |
| Brottöjning (%)                                    | 1.0 - 6.5                 | 1.5 – 9.0   | 4.0 – 5.0   |
| Poisson's tal                                      | 0.35 – 0.39               | 0.38 – 0.40 | 0.36 – 0.39 |
| Värmeutvidgningskoefficient (10 <sup>-6</sup> /°C) | 55 - 100                  | 45 - 65     | 50 - 75     |
| Fuktupptagning (%)                                 | 0.15 – 0.60               | 0.08 – 0.15 | 0.14 – 0.30 |

## Termoplaster

Termoplaster tillverkas under hög temperatur, där de mjuknar. De är betydligt mer svårbearbetade än hårdplaster, men har fördelen att efter att ha stelnat kunna värmas upp igen och omformas utan att tappa sina egenskaper. De har också mycket stor töjbarhet före brott. De är generellt sett dyrare än hårdplaster och tillverkningsprocessen medför också att kompositstänger med termoplast är betydligt mindre förekommande. I tabell 3 visas materialegenskaper för några typiska termoplaster.

Tabell 3 Egenskaper hos vanligt förekommande termoplaster, fib bulletin 40, 2007

| Egenskap                                           | <i>Matris (termoplast)</i> |      |      |
|----------------------------------------------------|----------------------------|------|------|
|                                                    | PEEK                       | PPS  | PSU  |
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> )                      | 1320                       | 1360 | 1240 |
| Draghållfasthet (MPa)                              | 100                        | 82.7 | 70.3 |
| Elasticitetsmodul (GPa)                            | 3.24                       | 3.30 | 2.48 |
| Brottöjning (%)                                    | 50                         | 5    | 75   |
| Poisson's tal                                      | 0.40                       | 0.37 | 0.37 |
| Värmeutvidgningskoefficient (10 <sup>-6</sup> /°C) | 47                         | 49   | 56   |

PEEK: Polyetereterketon, PPS: Polyfenylsulfid, PSU: Polysulfon

## Historisk tillbakablick och framtida marknad

### Allmänt

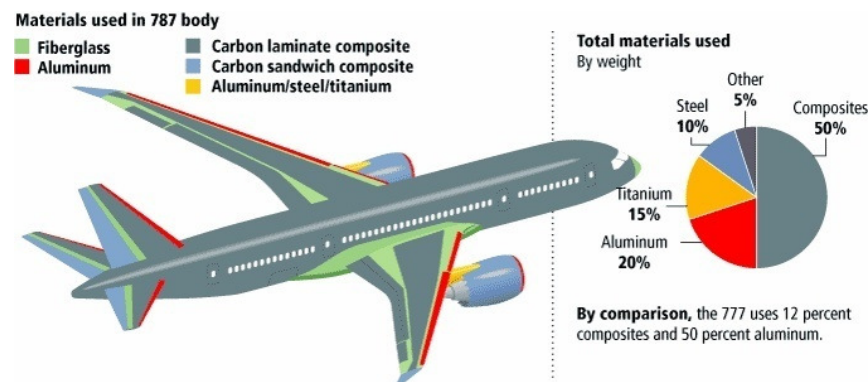
Fiberarmerade kompositer (plaster) uppkom under början av 1900-talet. Den första rapporterade applikationen var en båt från mitten av 1930-talet. Det blev dock ingen större succé då materialet vid denna tid var för sprött. Under andra världskriget ökade brukandet av armerade plaster, bl a av U.S navy, U.S Air force and R.A.F för flygplan och radomer (icke korrosiva, låg vikt och opåverkade av magnetism). FRP användes även i mindre utsträckning inom Manhattan-projektet (kärnvapen). Militära tillämpningar har därefter ökat och inte bara för skepp och flyg utan även inom rymd. Privata tillämpningar började strax efter andra världskriget, t ex pipelines av GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymers), och den privata marknaden har sedan dess med råge överstigit den militära.

För deras positiva icke korrosiva egenskaper och för motstånd mot kemikalier började under 1950-talet FRP användas i stor skala inom oljeindustrin och den kemiska industrin. Under 1960-talet blev den marina industrin den största brukaren av FRP och sedan dess har de flesta båtar (fritidsbåtar) blivit tillverkade av armerad plast. I början var GFRP dominerande, men även AFRP (Aramid Fibre Reinforced Polymers) och CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymers) började användas under 60-talet. Under 1960-talet började även fritidsindustrin med de första sportapplikationerna, t ex fiskespön, racketsporter och även cyklar.

Under 1970-talet växte användningen inom bilindustrin där första trevande försök gjordes under 1950-talet med bl a stötfångare. Idag består t ex Formel-1 bilarnas chassi uteslutande av CFRP. Bilindustrin är en av de största användarna av FRP idag (ACI, 2005).

Under 1970- och 1980-talet började FRP i större skala användas inom flygindustrin, framförallt i icke lastbärande detaljer och för att minska vikten, t ex. 2 ton lägre vikt på en Boeing 767, (Kim, 1995). I många moderna militära stridsflygplan är idag den procentuella andelen FRP mer än 80-90% och inom den privata flygindustrin börjar den närma sig 50%, se figur 5 där en schematisk skiss av en Boeing 787 (Dreamliner) visas (<https://www.quora.com>).

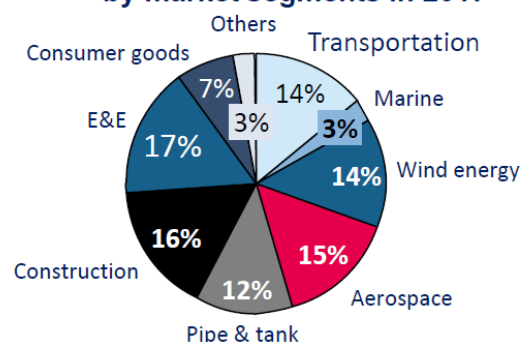
I tillägg används FRP idag i stor utsträckning inom den elektriska industrin och elektronikindustrin på grund av dessa materials icke ledande förmåga och att de inte påverkas magnetfält, att dessa material inte stör telekommunikationssignaler och radiofrekvenser är dessutom ett plus.



Figur 5 Moderna transportflygplan använder idag upp till ca 50% FRP, (<https://www.quora.com>)

I figur 6 visas världsmarknaden för kompositmaterial 2017 ([www.lucintel.com](http://www.lucintel.com)). Här kan vi se att brukande i byggbranschen till och med överstiger bil- och flygindustrierna. De flesta produkterna är dock inte för direkt lastbärande konstruktionsdetaljer utan kan vara t ex dörrar, fönster, räcken, badkar, lyktstolpar, simbassänger etc. Den världsdelen som står för största investeringarna gällande FRP för byggbranschen är Asien följt av Nord Amerika. Totala marknaden uppgår till ca 30 mdr USD varav då byggsidan utgör 4,8 mdr USD

**Global composite materials distribution (\$ mil)  
by market segments in 2017**



Figur 6 Världsmarknaden för FRP 2017 ([www.lucintel.com](http://www.lucintel.com)). Totala marknaden är ca 30 mdr USD

## Byggbranschen

1980-talet kan sägas vara det årtionde då FRP började användas kommersiellt inom byggbranschen. Dock hade forskningen inom området pågått sedan 1950-60-talet, framförallt i Storbritannien, USA och tidigare Sovjetunionen. De tidigaste systemen kan inte anses vara lyckosamma och inte förrän under 1970-talet med introduktion av den tidigare beskrivna pultruderingsprocessen ansåg man att kvalitén började motsvara efterfrågade krav. Icke förspänd och förspänd inre FRP armering började utvecklas så tidigt som under 1960-talet i USA och under 1970-talet i Europa och Japan (Uomoto, 2002), (Bakis mfl. 2002).

Anledningen till att FRP material fick större fokus under 1980-talet var den relativt omfattande nedbrytningen av våra betongkonstruktioner till vilket stora delar kunde hänföras korrosion i stålarmeringen. Det första kända förspända FRP systemet utvecklades 1978 och bestod av pultruderad GFRP stänger and användes för en liten gångbro (6,5 m i upplagslängd) under början av 1980-talet. Världens första förspända vägbro, 47 m i två spann, med GFRP byggdes i 1986 i Düsseldorf, Tyskland, (Wolff, 1987) och (Wolff och Miessler, 1989). Man hade dock problem med utmattning i GFRP materialet vid de höga spänningsnivåer som det applicerades.

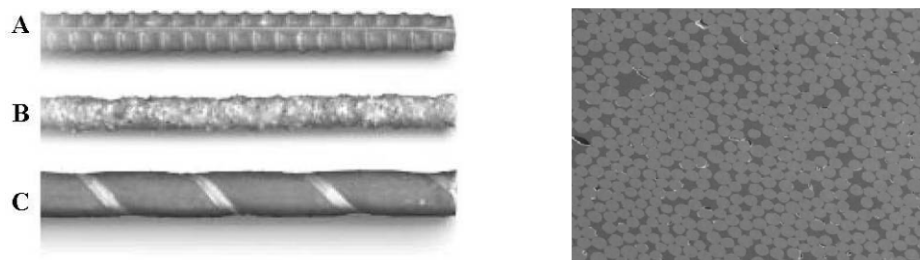
Sedan de trevande tillämpningarna med FRP i bärande konstruktioner kan det idag anses kommersiellt användbara och delas normalt in i följande fyra kategorier:

1. Hela bärande konstruktionselement
2. Icke-bärande element
3. Material för extern förstärkning av befintliga konstruktioner
4. Inre armering för nya betongkonstruktioner

Hela konstruktionselement består primärt av en typ av FRP, men de kan även vara sammanfogade av flera olika typer beroende på hur man vill optimera bärformågan. De tillverkas för deras slutliga användning och utformas normalt som I eller T-tvärssnitt, rektangulära eller cirkulära ihåliga tvärssnitt. Andra former kan vara färdiga delar till brodäck t ex utformade som sandwichkonstruktioner (Bakis, 2002, Fiberline, 2018).

Icke-bärande element täcker området som inte har en bärande funktion, men nyttjar fördelarna med FRP. Till exempel i icke ledande tillämpningar, för att undvika köldbryggor, som tidigare nämnts fönster och dörrar. Produkterna har ofta diskontinuerliga fibrer som armering och komponenterna är små i förhållande till det övriga bärande byggsystemen.

Den mest lyckosamma tillämpningen med FRP-material har varit inom rehabilitering och förstärkning av befintliga konstruktioner där det dominerande FRP materialet har varit kolfiberkomposit. Man kan förstärka för såväl böjning som tvärkraft och vridning samt i utmattning. System för utanpåliggande förspänning finns också att tillgå. Förstärkningsmetodiken har funnit kommersiellt tillgänglig sedan slutet av 1980-talet och kan idag anses etablerad i hela världen, (Täljsten mfl., 2016). Inre armering med FRP kan vara korta diskontinuerliga fibrer som blandas direkt i betongen eller för att erhålla största möjliga styrka och styvhet kontinuerliga fibrer inbakade in en matris i stångform vilka kan användas som slakarmering eller som spännarmering. Normalt sett används inre FRP-armering i nya byggnadsverk där speciella krav ställs, t ex ökad beständighet mot korrosion och där man vill ha icke-ledande armering. I fortsättningen i denna rapport fokuseras endast på inre slakarmerad FRP armering. För att erhålla bästa möjliga materialegenskaper riktas fibrerna i FRP stångens längdriktning, vilket medför att materialegenskaperna blir anisotropa. För att förbättra vidhäftningen till betongytan kan denna antingen sandas, deformeras eller förses med kammar av något slag. Dimensionerna är liknande de för traditionell stålarmering och den vanligaste produkten är GFRP, men det finns även stänger av CFRP och AFRP (Bakis,et.al. 2002), se också figur 7.



Figur 7 Vänstra bilden: Tre olika typer av FRP stänger: (A) kammar, (B) deformerad samt (C) sandad och omlindad för deformation (ACI, 2006). Högra bilden: tvärsnitt av en GFRP stång visande de längsgående fibrernas fördelning i tvärsnittet, fibrerna har en diameter av ca 10μm, (Schöeck, 2006).

Det kan vara intressant att se marknadsförväntningarna gällande inre FRP armering. I figur 8 visas marknaden i USA för FRP armering i USD 2015 samt dess uppskattade utveckling fram till 2024 där en förväntad omsättning kommer att vara ca 500 millioner USD. I jämförelse var den uppskattade världsmarknaden 2015 590 millioner USD ([www.gminsights.com](http://www.gminsights.com)). Skulle den förväntade utvecklingen på världsmarknaden vara densamma skulle då volymen 2024 uppgå till ca 1.1 mdr USD



Figur 8 Världsmarknaden för FRP armering 2013-2024, (<https://www.gminsights.com/industry-analysis/fiber-reinforced-polymer-frp-rebars-market>).

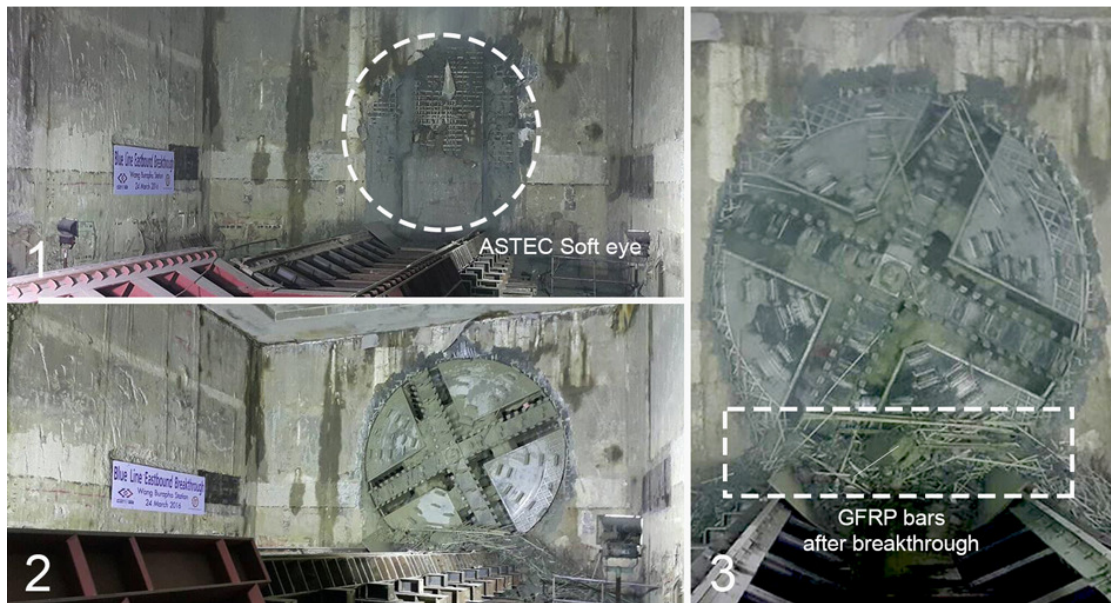
## Icke metallisk armering

### Allmänt

Icke metallisk armering kan ses som ett komplement till traditionell stålarmring för att armera betongkonstruktioner. Det är speciellt tre områden där kompositarmring kan övervägas att användas. Det första området är för ökad beständighet eftersom kompositarmringen inte påverkas av klorider eller karbonatiseringsprocessen och korroderar således inte. Man kan här tänka sig att använda kompositarmring i kloridpåverkade konstruktioner och närmast betongytan. I figur 9 visas en bro där man monterat FRP armering i brodäcket. Det andra området gäller tillämpningar där man strävar efter elektromagnetisk neutralitet, t ex i samband med magnetisk resonanstomograf eller för MAGLEV tåg har man i konstruktionen använt fiberkompositarmring. Det tredje området är för temporära konstruktioner, t ex i samband med tunnelbrytning där man sedan relativt länge använder glasfiberkompositarmring för att armera upp sektioner där man senare ska ta sig igenom genom, se figur 10.



Figur 9 Brodäck armerat med 19 mm GFRP stänger, Kansas City, I-635, USA ([www.aslanfrp.com](http://www.aslanfrp.com)).



Figur 10 Tunnelborrningsmaskin som arbetar sig genom en GFRP armerad betongvägg i tunnelbanan i Bangkok 2016, ([www.dextragroup.com](http://www.dextragroup.com)).

## Materialdata

I tabell 4 och 5 redovisas generiska materialdata för kompositarmering som slak- respektive spännarmering. Jämförelse med stål görs. För slakarmerad armering kan materialdata väl matcha stålarmoring. När det gäller spännarmering är det lite annorlunda. Genom att FRP materialen är linjärelastiska upp till brott, se figur 11, betyder det också att man "förbrukar" en del av töjningen när man spänner upp materialen och att man har mindre kvarvarande töjning till brott. Brott i en FRP slakarmerad betongkonstruktion kan uppvisa väldigt duktigt beteende. För spännarmerade FRP system föreligger dock risken för spröda brott och man brukar i vissa fall dimensionera med glidning i förankringen.

Tabell 4 Materialegenskaper för slakarmerade kompositstänger provade i drag, CSA, 2002.

| Egenskap                      | Stål    | AFRP      | CFRP      | GFRP      |
|-------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> ) | 7900    | 1250-1400 | 1500-1600 | 1250-2100 |
| Draghållfasthet (MPa)         | 483-690 | 1720-2540 | 600-3690  | 483-1600  |
| Elasticitetsmodul (GPa)       | 200     | 41-125    | 120-580   | 35-51     |
| Flyttöjning (‰)               | 1.4-2.5 | ---       | ---       | ---       |
| Brottöjning (‰)               | 6-12    | 19-44     | 5-19      | 12-31     |
| Flytspänning (MPa)            | 500-600 | ---       | ---       | ---       |

A: Aramidfiber, C: Kolfiber, G: Glasfiber

Tabell 5 Materialegenskaper för spännarmerade kompositstänger provade i drag, CSA, 2002.

| Egenskap                      | Stål      | AFRP      | CFRP      | GFRP      |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> ) | 7900      | 1250-1400 | 1500-1600 | 1250-2400 |
| Draghållfasthet (MPa)         | 1379-1862 | 1200-2068 | 1650-2410 | 1379-1724 |
| Elasticitetsmodul (GPa)       | 186-200   | 50-74     | 152-165   | 48-62     |
| Flyttöjning (‰)               | 1.4-2.5   | ---       | ---       | ---       |
| Brottöjning (‰)               | >4        | 20-26     | 10-15     | 30-45     |
| Flytspänning (MPa)            | 1034-1396 | ---       | ---       | ---       |

A: Aramidfiber, C: Kolfiber, G:Glasfiber

## Materialdata för utvalda FRP produkter

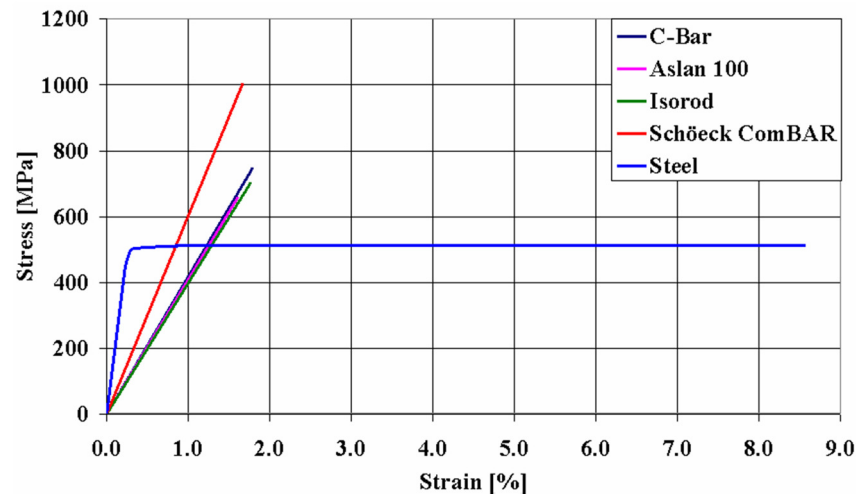
I tabell 6 redovisas typiska materialdata utvalda FRP produkter. Här har valts att göra en jämförelse med traditionell stålarmering med diametern 16 mm. Det finns även fler leverantörer runt om i världen och anledningen till att de i tabell 6 valdes är framförallt att de har använts i praktiska projekt och att det var relativt enkelt att erhålla de specifika materialegenskaperna.

Tabell 6 Materialegenskaper för några vanligt förekommande kommersiella produkter i jämförelse med traditionell armering, se också appendix A.

| Egenskap                               | Stål                | V-Rod (Isorod) | C-bar | Aslan | ComBAR                                           |
|----------------------------------------|---------------------|----------------|-------|-------|--------------------------------------------------|
| Tvärsnitt                              | Ø16                 | Ø15            | Ø15   | Ø16   | Ø16                                              |
| Densitet (kg/m <sup>3</sup> )          | 7900                | 1898           | 2093  | 2350  | 2200                                             |
| Draghållfasthet (MPa)                  | 483-690             | 1100           | 746   | 724   | >1000                                            |
| Elasticitetsmodul (GPa)                | 200                 | 60             | 42    | 46    | 60                                               |
| Flyttöjning (‰)                        | 1.4-2.5             | ---            | ---   | ---   | ---                                              |
| Brottöjning (‰)                        | >4                  | 18,3           | 18,0  | 15.7  | 16,7                                             |
| Flytspänning (MPa)                     | 500-600             | ---            | ---   | ---   | ---                                              |
| Temperaturutvidgningskoefficient (1/K) | $9.0 \cdot 10^{-6}$ | ---            | ---   | ---   | $a: 6.0 \cdot 10^{-6}$<br>$r: 2.2 \cdot 10^{-6}$ |

*a: axiellt, r: radiellt*

I jämförelse med vanligt armeringsstål uppför sig kompositarmeringen linjärelastiskt och för de mest överkomliga kompositerna (AFRP och GFRP) har stålet en högre elasticitetsmodul. För slakarmerade konstruktioner är den vanligast använda kompositarmeringen GFRP (glasfiberkomposit) och anledningen är en kombination av pris, materialegenskaper och tillgänglighet. I samband med spännarmerade konstruktioner är CFRP (kolfiberkomposit) det som nästan uteslutande används. Kostnaden är betydligt högre än traditionella spännstålssystem och dessa produkter används för specifika ändamål, t ex när låg vikt eftersträvas eller om man har en väldigt aggressiv miljö och traditionella stålkablar kan vara svåra att skydda.



Figur 11 Spänning-töjningsdiagram för olika GFRP produkter jämförda med stål

## Beständighet

### Allmänt

En av de stora fördelarna med kompositarmering framför stålarmering är den potentiellt goda beständigheten. FRP är tämligen opåverkad i miljöer där stål snabbt korroderar, t ex i betong där karbonatisering eller kloridinträngning äger rum, se t ex figur 12. Man bör dock beakta att FRP armering också har sina svagheter och kan brytas ner, om än på grund av andra mekanismer än de som orsakar stålkorrosion. De ingående materialen i fiberkompositen kan påverkas negativt av andra miljöfaktorer, men skillnaderna mellan olika fibertyper och matrismaterial är stora. Det har bedrivits omfattande forskning gällande användning av fiberkompositer som armering i betong, se till exempel (Gerritse, 1992), (Takewaka and Khin, 1996), (Rostasy, 1998), (Benmokrane and Rahman, 1998) och (Dejke, 2001). Nedan sammanfattas viktiga resultat från litteraturen för några vanligt förekommande byggfysikaliska miljöer.



Figur 12 Beständigheten hos GFRP är överlägsen stål i marina miljöer utsatta för havsvatten. Vänster: Skyddsmur i Florida, USA, i mitten och höger: Rehabilitering av en torrdoca i Pearl Harbor, Hawaii, med GFRP armering (<http://www.hughesbros.com/>)

### Fukt (Vatten och saltlösning)

Alla polymera material (t ex matrisen) tar upp vatten vilket kan påverka de mekaniska egenskaperna såväl reversibelt som icke reversibelt. Effekterna har dock visat sig små för de matrismaterial (epoxi och vinytester) som normalt används till FRP kompositer. Kolfiber är opåverkat av fukt och salter medan skyddade aramidfibrer har en benägenhet att ta upp fukt. Rena glasfibrer har inte någon benägenhet att ta upp fukt i sin struktur men kan påverkas negativt under långvarig påverkan.

Beständigheten hos FRP-armering i miljöer med salt är en av de största fördelarna och saltets inverkan på mekaniska egenskaper är marginell, se t ex (Adimi m.fl. 1998)

I en FRP skyddas fibrerna av matrisen vilket gör dessa mindre utsatta för nedbrytning orsakad av vatten. En viss försämring av draghållfastheten kan dock erhållas då GFRP och AFRP utsätts för fuktig miljö under lång tid. Resultaten från olika försök är dock inte samstämmiga och skiljer sig åt beroende på FRP fabrikat och försöksutformning. CFRP anses inte påverkas i någon nämnvärd utsträckning vid närvaro av vatten, salt eller fukt.

### Alkalitet

Betong utgör en starkt basisk miljö med ett pH-värde som normalt ligger mellan 13 och 14 förutsatt att karbonatisering inte skett. För traditionell stålarmering utgör den alkaliska miljön i betongen ett skydd eftersom stål är passiverat vid pH-värden över 11,8. För FRP-armering, speciellt GFRP-armering utgör dock den alkaliska miljön en möjlig nedbrytningskälla. Av de flesta forskare anses det naturliga alkaliska tillståndet i betong utgöra den mest aggressiva miljö som fibrer och matrismaterial utsätts för, (Sheard m.fl., 1997), (Bank and Puterman, 1997), (GangaRao and Vijay, 1997), (Uomoto, 2000), (Robert and Benmokrane, 2013), (Belarbi and Wang, 2012)

Accelererande laboratorieförsök med högt pH har visat sig ha en negativ effekt på matrismaterialet. Detsamma gäller för rena glasfibrer. Därför rekommenderas att alkaliresistent glasfiber används i betong. Denna effekt har inte noterats hos kolfiber. Dessutom har inte någon negativ effekt av betongens alkalitet noterats hos vare sig GFRP- eller CFRP- kompositer ingjutna i betong över längre tid, >15 år, (Onofrei, 2005). Den gängse uppfattningen bland forskare är att isolerade accelererade försöken gjorda på FRP-stänger i olika vattenlösningar vid olika temperaturer inte är helt representativa för FRP kompositer i betong.

### UV-Strålning

Många polymerer är känsliga för UV-ljus eftersom strålningsenergin kan få de molekylära bindningarna att släppa. Eftersom matrismaterialet är en polymer ska långvarig exponering i solljus undvikas för alla FRP-typer. Vid behov kan dock särskilda tillsatsmedel vid användas vid tillverkningen för att skapa mindre känsliga kompositer. Oavsett skyddande tillsatsmedel är det viktigt att skärma FRP-stängerna från solljus vid lagring och montage. Påverkan av UV-strålning är dock även avhängigt produkt och för vissa GFRP, AFRP och CFRP produkter har ingen negativ effekt kunnat påvisas (Tomosawa and Nakatsuji, 1996, 1997)

### Frysning

Det finns inget i litteraturen som tyder på att vanlig FRP-armering ska vara känslig mot frysning. Endast ett fåtal studier inom detta område finns beskrivet i litteraturen. En studie av (Steckel m.fl., 1998) rapporterar att ingen förändring i mekaniska egenskaper observerades hos 4 CFRP och 3 GFRP laminat som utsattes för 20 temperaturcykler mellan -18 °C och 38 °C efter först ha fuktmättats under två veckor i 100% relativ fuktighet vid 38 °C.

### Brand och höga temperaturer

Brandmotståndet för FRP-armerad betong liknar det för betong med traditionell stålarmering. Typ av FRP armering, ballast och täckskiktet är de parametrar som påverkar brandmotståndet mest. Ballast och täckskikt, (Kodur and Bisby, 2005), (Nigro m.fl., 2011) påverkar värmeöverföringen till FRP armeringen i stor utsträckning, se t ex (Bisby m.fl., 2005). Hos FRP armeringen är det i första hand matrismaterialet som påverkas negativt i samband med höga temperaturer, (Sakashita m.fl., 1997). För FRP-armering ingjuten i betong har man en stor skyddande effekt av betongen själv och betongens täckskikt.

I första hand är det vidhäftningen mot betongen som påverkas och vid en temperatur av ca 200 °C vid FRP-armeringen har man kvar ca 20% av vidhäftningen, (Bisby and Kodur, 2007). Vid en simulering och provning gällande pelare som utsatts för brand visade det sig att betongens täckskikt har stor betydelse för hur temperaturen fördelas och för bärförmåga. Man uppnådde likvärdiga resultat som vid traditionell stålarmering, (Wang m.fl., 2009) det har också påvisats att ca 70% av kvarvarande bärförmåga uppnåts vid provning av FRP armerade betongbjälklag upphettade till 300 °C och därefter provade vid rumstemperatur, (Hajiloo and Green, 2018).

Vid dimensionering i bruksgränstillståndet ska temperaturen inte överstiga  $T_g$  hos FRP armeringen.  $T_g$  uppgår till mellan 80 °C– 120 °C. I brottgränstillståndet är ofta hållfastheten hos FRP förstärkta betongelement större än motsvarande för stålarmering eftersom FRP armerade konstruktioner styrs av dimensionering i bruksgränstillståndet (styvhet och nedböjning) och torde därmed ha en större reservkapacitet (Bisby and Kodur, 2007).

### Utmattning

Det finns omfattande information och data från utmattning i själva kompositmaterialen, störst fokus har varit på kompositer lämpliga för flyg- och rymdforskning (Wicaksono & Chai, 2013). En del av denna information kan även vara nyttig för kunskapsuppbyggnad i byggbranschen. Av samtliga FRP material som använts i byggbranschen är CFRP det material som är minst påverkat av utmattning och cykler till brott (S-N kurvan), vissa forskare rapporterar här endast upp till 5-8% försämrade hållfasthet efter 10 miljoner cykler, (Curtis, 1989).

FRP armering som utsatts för utmattningsförsök i vattenbad/höjd temperatur/alkali kan brytas ner om matrisen är skadad, men resultaten är inte helt entydiga utan beror bl a på fiber och matristyp, lösningens koncentration och hur provkropparna förbehandlats innan utmattningsförsöken, (Hayes m.fl., 1998), (Rahman m.fl., 1997). Utmattningsförsök av betongplattor i stansning med ingjutna GFRP stänger (You m.fl., 2015) och jämförelse med motsvarande provkroppar med stålarmering visade ingen skillnad i utmattningskapacitet med skillnaden att nedböjningen var något större för provkropparna med GFRP. Vidare visade försöken att man vid maximal last skall ligga under ca 60% av den statistiska brottlasten för att man ska kunna uppnå 2 miljoner cykler innan brott. Det finns också forskning presenterat som har undersökt effekten av utmattning på vidhäftning av GFRP stänger i olika miljöer (Sippel and Mayer, 1996), (Nanni m.fl., 1998) och (Katz, 2000). Resultaten är inte entydiga, utan beroende på undersökt produkt ökade, minskade eller var vidhäftningen densamma som vid statistiska försök.

Generellt kan man dock säga att GFRP inte har sämre utmattningsegenskaper än stål, men att resultaten är beroende av produkt, testmetod och om man provar materialen separat eller ingjutna i betong. En viktig del att beakta är att styrande vid dimensionering är bruksgränstillståndet, vilket då ger en överkapacitet i brottgränstillståndet. Detta leder då också till att man har en högre utmattningskapacitet än motsvarande betongkonstruktion med stålarmering. Man skulle dock kunna förvänta sig större sprickbildning för GFRP armerade konstruktioner i brottgränstillståndet.

# TIDIGARE ERFARENHETER AV FRP ARMERING I BETONG

## Inledning

I dag finns det tusentals byggnader och anläggningar som helt eller delvis har armering i form av FRP komposit, vanligen GFRP. Det kan nämnas att upp till 2016 hade 65 broar i USA och 202 broar i Kanada byggts med FRP armering (<https://acmanet.org/>). En anledning kan vara att man har en drivande industri inom kompositområdet samt att man i båda länderna har dimensioneringsregler och vägledning hur man ska dimensionera och bygga med FRP armering, (ACI 440.1R-15), CSA S806-12 (R2017). Nedan redovisas kortfattat några exempel på tillämpningar gällande installationer i byggnadsverk. Det bör också nämnas att Trafikverket, dåvarande Vägverket, var tidiga med att prova FRP armering vilket även detta redovisas kortfattat nedan.

## Tillämpningar

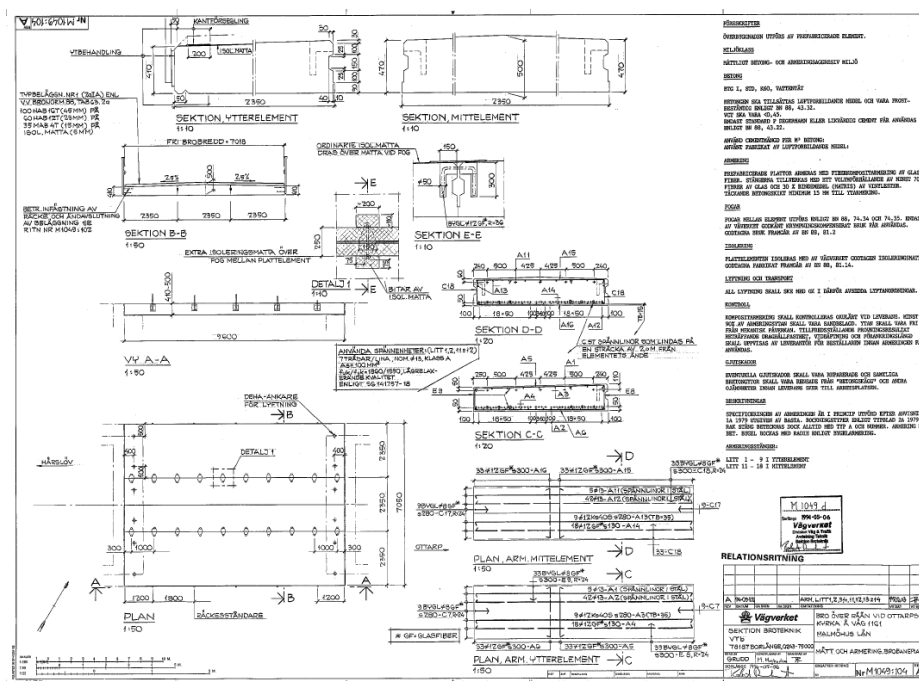
Nedan ges några exempel på tillämpningar med FRP armering i betong och i appendix C har en lista sammanställts på fler applikationer som författaren sammanställt från litteraturen.

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Projekt</b>        | Halls's Harbour Wharf                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>År</b>             | 1999                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Land</b>           | Kanada                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Typ</b>            | Hamn/Kaj                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Orsak till FRP</b> | Den gamla kajen hade kollapsat och när man valde att bygga en ny ville man ha mer beständig armering                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Armering</b>       | Pultrall V-rod GFRP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Beskrivning</b>    | <p>Hall's hamn och kajanläggning är den första kajen i Kanada med en komplett CFRP armerat betongdäck. En 40 m lång sektion från den gamla vågbrytaren och kajen byggd 1904 kollapsade efter en storm 1998. Den nya 120 m långa konstruktionen dimensionerades för 80 år med ny GFRP armering.</p> <p>I tillägg monterades ett fiberoptiskt system för att följa beteendet över tiden. Den ökade kostnaden för med denna nya typ av armering var endast 4.5% (20 000 \$ CAD) i jämförelse med stålarmring.</p> <p>Det uppskattades dock att totala kostnaden över livslängden avsevärt understiger alternativet med stålarmring då mindre underhåll krävs. Konstruktionen utsätts för havsvatten, stormar och fryscyklar samt och upp till 10 m skillnad i tidvatten. En undersökning 13 år efter installation av utborrade prov visade inga skador, brister i vidhäftning eller påverkan av betongens alkalitet.</p> |
| <b>Figurer</b>        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Referenser</b>     | <a href="http://www.pultrall.com">www.pultrall.com</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Projekt</b>        | Magog Bridge                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>År</b>             | 2002                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Land</b>           | Kanada                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Typ</b>            | Bro (1 av 3 spann armerades med FRP, de andra med traditionell stålarmering)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Orsak till FRP</b> | Utvärdering av armering. Minskat underhåll. Tösalter.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Armering</b>       | Pultrall Isorod) V-rod GFRP och CFRP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Beskrivning</b>    | <p>Mogogbron är en motorvägsbro i tre spann med omfattande trafikmängd (35 000 fordon/dag). Bron är förenklat uppbyggd med 5 stycken kontinuerliga stålbalkar under en betongplatta. Betongplattan är 4 x 2,845 m + 2 x 1,352 m konsolöverhäng åt sidorna, dvs totalt en bredd av ca 14,1 m.</p> <p>Brons totala längd är 83,7 m. Plattan är armerad med <math>\phi 16</math> mm GFRP (E-modul: 40 GPa, draghållfasthet: 670 MPa, brotttöjning: 1,67%) stänger cc150 mm i överkant i båda riktningarna och i underkant med <math>\phi 10</math> mm CFRP (E-modul: 114 GPa, draghållfasthet: 1536 MPa, brotttöjning: 1,2%) stänger cc 90 mm i tvärriktningen och <math>\phi 16</math> mm GFRP cc 150 mm i längsriktningen.</p> <p>Motsvarande stålarmering var <math>\phi 15</math> mm cc 160 mm i överkant och underkant i tvärriktningen och <math>\phi 15</math> mm cc 240 mm i underkant och överkant i längsriktningen.</p> <p>Det var positiv respons från entreprenören som installerade FRP armering och bl a påpekande man enkelheten i arbetet. Provb belastning efter att bron färdigställdes visade att töjningar var under spricklasten och endast 0,1-0,2 % av brotttöjningen i FRP:n.</p> |
| <b>Figurer</b>        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Referenser</b>     | Bank et. al., 2003, Benmokrane et. al., 2007                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Projekt</b>        | Bridge over Cartoogechaye Creek/Macon County                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>År</b>             | 2005                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Land</b>           | USA/North Carolina                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Typ</b>            | Brodäck                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Orsak till FRP</b> | Ersättning av gammal bro. Utprovning av mer beständig armering                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Armering</b>       | Aslan 100 GFRP, $\phi 16$ , $\phi 19$ , $\phi 22$ samt mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Beskrivning</b>    | <p>Innan byggandet av bron hade man genomfört fullskaleprovning i lab samt provning av förankring samt materialegenskaper och även olika beständighetsprovningar där man bl a titta på vattenupptagning i vatten samt saltlösning. Detta gjordes för fyra olika FRP tillverkare. Varav sedan en tillverkares produkter valdes för installation i brodäcket.</p> <p>Bron består av 4 förspända sk AASHTO typ III betongbalkar, h=1189mm, i tre spann, två yttre spann är 15,2 m och det inre spannet 18,3 m, total längd på bro ca 48,7 m, cc balkar 2,03 m och konsol 900 mm . Brons bredd var ca 7,9 m</p> <p>Brodäcket är gjutet i kvarsittande form och är 203 mm tjockt. FRP armeringen av själva brodäcket mellan stöd utgjordes av <math>\phi 16</math> mm i överkant i båda riktningar samt av <math>\phi 16</math> i längsriktning och <math>\phi 19</math> i tvärriktning i underkant, i båda fall cc 150 mm. Övrig armering vid upplag och över stöd.</p> <p>Mätning och provbelastning efter byggande visade på mycket små påkänningar i GFRP armering varvid en slutsats var att man skulle kunna nöjt sig med mindre mängd armering.</p> |
| <b>Figurer</b>        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Referenser</b>     | www.aslanfrp.com, Gergely J. et. al (2007)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Projekt</b>        | Bro över Råån vid Ottarps Kyrka                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>År</b>             | 1994                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Land</b>           | Sverige                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Typ</b>            | Brodäck                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Orsak till FRP</b> | Ersättning av gammal bro. Utprovning av mer beständig armering. Befintlig armering hade korroderat.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Armering</b>       | Glasfiberarmering/Svensktillverkad/Fiberbar, $\phi$ 8 (byglar)samt $\phi$ 12 mm (Längs och tvärarmering). $\phi$ 12 Ks40S samt $\phi$ 13 mm Spännlinor i stål                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Beskrivning</b>    | <p>Det finns få Svenska projekt utförda med FRP armering, men vi var väldigt tidiga jämfört med omvärlden. Nedan rapporteras ett projekt från 1994 utfört av dåvarande Vägverket och Lunds tekniska högskola. En liten plattbro över Råån skulle bytas ut. Man tillverkade tre stycken plattelement vardera med bredden 2350 mm och längden 9600 mm. Tjockleken på plattan varierade mellan 410 mm vid kant till 500 mm vid centrum av plattan. Lutning 2,5%. De tre bro elementen kopplades samman med byglar som gjöts in. Sidoelementen armerades med 5 <math>\phi</math> 13 spännlinor i stål i ök. samt 42 <math>\phi</math> 13 spännlinor i stål i uk. Sidoelementen armerades därefter med 9 <math>\phi</math> 12 Ks 40S, s=280 mm i längsled ök. samt med 18 <math>\phi</math> 12 GFRP, s=130 mm i längsled i uk samt 22 <math>\phi</math> 12 GFRP, s=300 mm i tvärlid i såväl uk. som ök.</p> <p>Kantbalkarna i sidoelementen armerades med 33 GFRP byglar <math>\phi</math> 8, s=300 mm, r=24 mm. Mittenelementet armerades med 5 <math>\phi</math> 13 spännlinor i stål i ök. samt 42 <math>\phi</math> 13 spännlinor i stål i uk. Mittenelementet armerades därefter med 9 <math>\phi</math> 12 Ks40S, s=280 i ök. i längsled samt med 18 <math>\phi</math> 12 GFRP, s=130mm i uk. I tvärlid såväl i ök. som i uk. armerades med 33 GFRP <math>\phi</math> 12, s=300 mm. Materialkvaliteten på Fiberbar GFRP armeringen hade utprovats till 950 MPa samt 50 GPa för draghållfasthet respektive elasticitetsmodul. 2004, dvs efter 10 år togs prover på GFRP armeringen ut från bron och provades vid Luleå tekniska universitet. Ingen försämring hos materialet kunde noteras.</p> <p>I figuren nedan visas den färdiga bron samt bygglararmering av GFRP i form av spiralarmering. En ritning av bron visas i figur 13. Efter detta projekt genomfördes ytterligare ett projekt där man bytte ut stålarmring mot GFRP armering i kantbalkar på en bro på E4:an mellan Skånes Fagerhult och Markaryd.</p> |
| <b>Figurer</b>        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Referenser</b>     | Intern rapport Lunds Tekniska Högskola, (2004)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |



Figur 13 Ritning över den första betongbron i Sverige med GFRP armering, (Vägverket, 1994)



# DIMENSIONERING

## Allmänt

När det gäller FRP armering för betong är det vanligtvis GFRP-armering man avser, även om CFRP har betydligt bättre materialegenskaper. Den främsta anledningen till detta är kostnaden då CFRP-armering är ca 10 gånger så dyr. Det finns även andra FRP material att tillgå, till exempel AFRP (Aramid Fibre Reinforced Polymers) och BFRP (Basalt Fibre Reinforced Polymers), men dessa är betydligt mindre vanliga, dels beroende att aramid är känsligt för fukt och att man anser det behövs mer forskning gällande basalt för att det ska kunna rekommenderas. GFRP har ca  $\frac{1}{4}$  av stålets E-modul, men en draghållfasthet motsvarande ca 2 gånger en vanlig armering. Materialet är linjärelastiskt och man brukar dimensionera med hänsyn till tillåten töjning. Styrande för dimensionering är ofta bruksgränstillståndet efter uppsprickning och då med avseende på nedböjning. Nedan presenteras dimensionering av betongelement för böjning och tvärkraft. Dimensionering görs i såväl bruks- som brottgränstillstånd, även vissa detaljlösningar diskuteras. Dimensioneringssambanden är hämtade ur den Amerikanska dimensioneringsanvisningen (ACI 440.1R-15), den Kanadensiska, CSA S806-12 (R2017) samt från det tidigare Europeiska samarbetet genom EU-projektet EUROCRETE som sammanfattats i (fib bulletin 40). Det bör även nämnas att det pågår arbete med en Europisk harmonisering inom CEN (CEN/TC250/SC2/WG1/TG1) gällande inre FRP armering för betong och där det anses befogat har även information från detta arbete presenterats. Vid denna tidpunkt anser dock författarna att arbetsmaterialet inom CEN inte är tillräckligt stringent och tydligt för att kunna presenteras i sin helhet.

## Grunder för dimensionering

Vanligtvis dimensioneras konstruktioner baserat på villkoret i Ekvation (1) där motståndsfaktorn (kapaciteten)  $R_n$ , av ett element (konstruktionsdel) reduceras genom att multipliceras med en (material) säkerhetsfaktor,  $\phi < 1$ , och en kontroll utförs att denna reducerade kapacitet är större än lasteffekten,  $S_n$ , ökade med en (last) säkerhetsfaktor  $\alpha > 1$ .

$$\phi R_n \geq \alpha S_n \quad (1)$$

Dimensioneringsbestämmelser i de flesta normer baseras på dimensionering i gränstillstånd. För en betongkonstruktion kan man sammanfatta att de krav som tillgodoses vid dimensionering skall:

- Ge betryggande brottsäkerhet
- Undvika att skadlig sprickbildning uppstår under brukande
- Undvika besvärande deformationer under brukande

## Gränstillstånd

Gränstillstånd definieras normalt som den gräns vid vilken konstruktionen inte längre uppfyller ställda dimensioneringskrav med avseende på materialbrott, beständighet, instabilitet och deformation. Gränstillstånd delas in i:

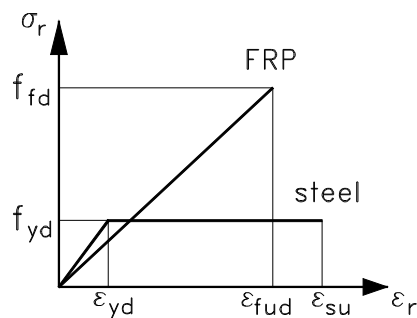
- Bruksgränstillstånd (SLS: Serviceability Limit State), samt
- Brottgränstillstånd (ULS: Ultimate Limit State)

Ett bruksgränstillstånd uppnås då en konstruktion under dess livstid är på gränsen att inte uppfylla de krav som ställs på den med hänsyn till dess normala användning och omfattar vanligtvis:

- *Spänningar*; dessa ska begränsas för att undvika flytning i armering, skador eller krypning i betongen.
- *Deformationer och nedböjningar*; konstruktionskrav gällande deformationer och nedböjningar ska följas. Dessutom måste man även kontrollera påverkan på närliggande delar av konstruktionen.
- *Sprickor*; sprickor som påverkar vidhäftningen ska kontrolleras, detsamma gäller övriga sprickor i betongkonstruktionen som kan påverka beständigheten över tid.
- *Svängningar*, krav på acceptabla svängningar, beror på verksamhet, byggnadsverk och komfortkrav

Till bruksgränstillståndet kan man också hänföra beständighetsdimensionering och utmattning. Kraven vad som kan anses acceptabelt ställs vanligtvis av den som brukar konstruktionen och kan i vissa fall variera.

Brottgränstillståndet kan anses vara uppnått då en konstruktion, eller en konstruktionsdel, inte kan bära större last än vad som är för handen. Ofta definieras brottgränstillståndet av ett formellt brottvillkor. Man försöker också dimensionera att spröda brott undviks. Brottgränstillstånd avser det tillstånd då materialets bärförmåga är på gränsen till brott, t ex materialbrott, instabilitet, kollaps eller förlust av jämvikt i konstruktionen. Brott kan definieras genom provning eller genom beräkningar baserade på materialets spännings-töjningsegenskaper. När det gäller fiberkompositens egenskaper anses dessa följa en rätlinjig kurva upp till brott, se figur 14. Detta betyder att kompositmaterialen inte har en uttalad flytgräns som för stål. Detta måste man ta hänsyn till i samband med dimensionering.



Figur 14 Generell jämförelse mellan komposit och traditionell stålarmring

## Bruksgränstillstånd

I bruksgränstillstånd tar man, för betongkonstruktioner, hänsyn till att inte för stora sprickor eller deformationer uppstår, men det kan även gälla andra faktorer t.ex. en byggnadsdels svängningsegenskaper.

## Brottgränstillstånd

I brottgränstillstånd beaktas en konstruktions bärförmåga med hänsyn till tänkbara brottmekanismer. Vid dimensionering används då vanligen förstörade lastvärden och reducerade hållfasthetsvärden. En viktig egenskap i brottgränstillstånd för en konstruktion är dock inte bara vilken last den kan bära med önskad säkerhet, utan även dess deformationsförmåga eller möjlighet till segt brott. God deformationsförmåga kan ge förvarning om brott samt möjlighet till omfördelning av krafter. Konstruktioner med stålarmring kan ges god deformationsförmåga tack vare stålets möjlighet till plastisk deformation.

Även konstruktioner med fiberkompositer kan uppvisa stora deformationer, och därmed förvarning, innan brott. Dock saknar fiberkompositerna plastisk deformationsförmåga, vilket beaktas vid dimensionering, innebärande att deras höga hållfasthet inte bör utnyttjas fullt ut. En betongkonstruktion med fiberkompositer dimensioneras vanligen för att uppnå tryckbrott. I detta kapitel redovisas dimensionering av FRP armering i betong i bruks- respektive brottgränstillståndet. En jämförelse görs mellan olika normer och dimensioneringsföreskrifter.

## Historisk utveckling av existerande anvisningar och normer

I det följande avsnittet presenteras kortfattat utvecklingen av några av de idag befintliga och använda dimensioneringsanvisningar och normer. Det finns också leverantörsspecifika anvisningar för dimensionering som i många fall bygger på de nedan presenterade, men dessa diskuteras inte i denna rapport.

Forskningskommittéer etablerades under slutet av 80-talet för att utveckla anvisningar gällande dimensionering av betongkonstruktioner med FRP-armering. Japan och Kanada var tidiga och i Japan gavs en state-of-the-art rapport ut 1992 (JSCE, 1992) och en dimensioneringsanvisning 1996 med engelsk översättning 1997 (JSCE, 1997). Japan var ledande i detta område och hade under 1990-talet mer än 100 applikationer (ACI, 2007).

I Kanada gavs en state-of-the-art rapport ut 1991, ett år innan den Japanska. De Kanadensiska dimensioneringsanvisningarna publicerades dock inte förrän 1998 som en del av den Kanadensiska bronormen. Därutöver har Kanada varit ledande inom forskning och utveckling gällande FRP armeringens tillämpning i betong. Drivande var ISIS Canada (Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures). Under 2001 publicerades en dimensioneringsmanual för FRP vilket även blivit uppdaterad och finns i dag i den tredje upplagan (Newhook & Svecova, 2007). ISIS Canada har idag övergått till SIMTREC (Structural Innovation and Monitoring Technologies Resource Center), [www.simtrec.ca](http://www.simtrec.ca).

I USA, the American Concrete Insitute (ACI), etablerade en forskningskommitté ACI 440, 1991. ACI 440 publicerade sin första state-of-the-art rapport 1996 vilken följdes av dimensioneringsanvisningar för förstärkning med FRP 2002 och för intern armering 2003. Dessa har därefter blivit uppdaterade flera gånger och i denna rapport hänvisar till versionen ACI 440.1R-15 från 2015. Det första FRP armerade broddäcket i USA byggdes 1996 (McKinleywill West Virginia), ACI, (2005) och det första i Kanada 1997, (Joffre, Quebec), ISIS, (2001).

Under 1990-talet genomfördes flera forskningsinitiativ även i Europa, bl a det stora EUROCRETE (Taerwe and Matthys, 1999) projektet mellan 1993-1997 med syfte att utveckla FRP armering för betong. En del var här att utarbeta dimensioneringsanvisningar vilket gjordes genom att man inom fib (International Federation of Concrete) 1996 startade upp arbetsgruppen 9.3 vilken tillsammans med det Europeiska nätverket ConFibreCrete, etablerat 1997, gav ut en teknisk rapport om extern FRP (Waldron, 2005). Under 2005 gavs dimensioneringsanvisningar för intern samt extern FRP armering ut fib (2005), dessa har senare uppdateras till fib (2007).

Även Sverige var med i denna utveckling och en state-of-the-art rapport ställdes samman av en nationell kommitté ledd av betongföreningen under 2002, (Täljsten m.fl., 2002). Sverige var också ett av de länder där tekniken med intern FRP armering var tidig att tillämpas där tidigare exempel från 1994 belyser detta. Dock har tillämpningarna på broar varit få efter denna tidpunkt och endast ett projekt med FRP armering i kantbalkar har rapporterats (Sentler m.fl., 2004). I motsats till dimensioneringsanvisningar gällande extern FRP, (Täljsten, mfl, 2016) har inga nationella anvisningar för intern FRP ställts samman.

I tabell 7 nedan har några av de existerande dimensioneringsanvisningarna sammanställts.

Tabell 7 Dimensioneringsanvisningar för intern FRP armering.

| Land   | Beteckning                              | År   | Titel                                                                                                          |
|--------|-----------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| USA    | ACI 440.1R-15                           | 2015 | Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars                                     |
| Kanada | CAN/CSA-S806-12 (R2017)                 | 2017 | Design and construction of building structures with Fibre-Reinforced Polymers                                  |
|        | CAN/CSA-S6-14                           | 2014 | Canadian Highway Bridge Design Code                                                                            |
|        | ISIS Canada, Design Manual No. 3, V2.   | 2007 | Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers                                                 |
| Japan  | Japan Society of Civil Engineers (JSCE) | 1997 | Recommendation for design and construction of concrete Structures using continuous fiber reinforcing materials |
| Europa | fib technical report                    | 2007 | FRP Reinforcement for RC structures, Bulletin 40                                                               |

## Val av dimensioneringsanvisningar

I denna rapport väljs tre dimensioneringsanvisningar ut vilka jämförs inbördes.

- ACI 440.1R-15 (ACI, 2015)
- CAN/CSA-S806-12 (R2017)
- fib technical report No 40 (fib, 2007)

## Brottgränstillstånd – dimensionering för böjning

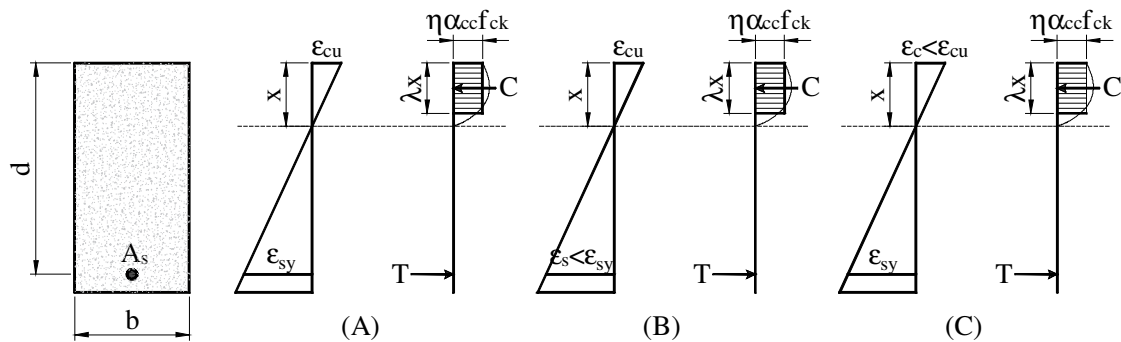
### Allmänt

Det allmänna antagande i dimensioneringsprocessen gällande dimensionering för böjande moment av armerade betongbalkar ges nedan. Beroende på mängden armering, armeringsförhållandet och om övriga brottmoder kan undvikas antas brott kunna uppstå på följande sätt:

- Krossning av betongen (överarmerat tvärsnitt)
- Flytning av stålarmeringen (underarmerat eller normalarmerat tvärsnitt)
- Samtidig flytning av armering och krossning av betongen (balanserat tvärsnitt)

För böjda tvärsnitt görs följande antaganden, se också figur 15:

- Vidhäftningen mellan armering och betong är fullgod upp till brott
- Betongstukningen  $\varepsilon_c$  får ej överstiga värdet av  $\varepsilon_{cu}$
- Den icke linjära betongspänningen kan beskrivas med ett konstant spänningsblock med tryckspänningen motsvarande betongens tryckhållfasthet
- Betongens draghållfasthet försummas
- Töjningen i en punkt i tvärsnittet är proportionell till det vertikala avståndet till neutrala axeln, dvs plana tvärsnitt förblir plana under hela belastningen (Bernouillis hypotes)



Figur 15 (A) Balanserat tvärsnitt, (B) Överarmerat tvärsnitt (C) Underarmerat tvärsnitt

Ovanstående antaganden och gränstillståndsdimensionering gäller även för FRP armering, med vissa modifieringar. Samtliga dimensioneringsanvisningar påvisar att dimensionering med FRP armering begränsas av bruksgränstillståndet (SLS), uppsprickning, nedböjning etc., speciellt om GFRP används. Detta beroende på den förhållandevis låga E-modulen hos materialet, ca ¼ av stål. Detta i motsats till vanlig stålarmring där dimensioneringen i många fall begränsas till brottgränstillståndet (ULS). I och med övergången till Eurokod 2 2011 har det dock blivit vanligare att dimensioneringen begränsas av minimiarmring, dvs bruksgränstillståndet. Vidare kan i SLS två olika skeenden definieras, före och efter uppsprickning. Före uppsprickning styrs styvheten hos betongelementet av betongmaterialet och geometri – så skillnaden mellan en vanlig armering och FRP armering i detta skede är små. Efter eventuell uppsprickning är skillnaden mellan en stålarmrad och GFRP-armerad sektion större och man kan behöva större mängd FRP för att kompensera för denna deformation. Detta betyder också att nyttjandegraden av FRP armeringen blir lägre, i alla fall om GFRP används.

### Brottnoder

Ett FRP-armerat betongelement belastat i böjning har liknande brottnoder som för stålarmring:

- Tryckbrott i betongen
- Dragbrott i FRP-armeringen
- Samtidig krossning av betongen och dragbrott i FRP-armeringen

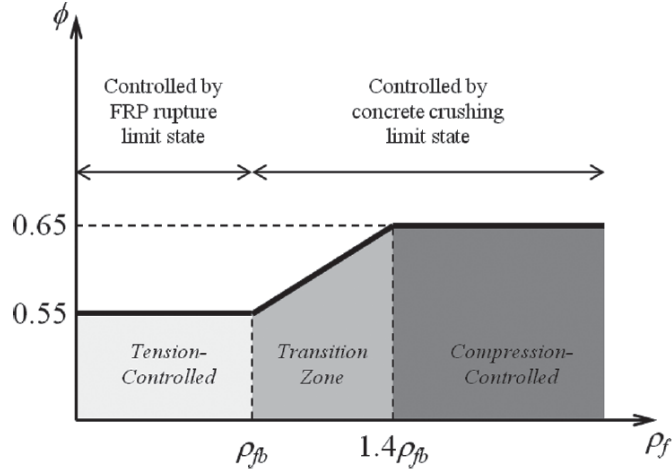
Det bör lyftas fram att för ett stålarmerat betongelement är flytning i dragarmeringen en duktil brottnod. Skulle dragbrott i FRP-armeringen uppstå är dock detta sprött. Beroende på dimensionering kan man dock erhålla uppsprickning och stora deformationer innan brott. Brottet i brottgränstillståndet dimensioneras oftast för tryckbrott. Man kan också nämna att så länge bara uppsprickning är stor, dvs befinner sig i stadium II, så återgår betongelementet till ursprungligt läge vid avlastning. Detta sker inte för ett stålarmerat betongelement om man börjar uppnå flytning – då erhålls i stället en kvarvarande deformation.

### Säkerhetsfaktorer

Den amerikanska dimensioneringsanvisningen använder sig av en reduceringsfaktor på det nominella momentet  $M_n$  enligt Ekvation (2). Reduktionsfaktorn beror på armeringsinnehållet,  $\rho_f$ , se Ekvation (3) och figur 16. Det kan noteras att reduktionsfaktorn för GFRP brott,  $\phi_{GFRP}=0.55$  är lägre än för tryckbrott i betongen,  $\phi=0.65$ . Däremellan har man en övergångszon, se figur 16.

$$\phi M_n \geq M_n \quad (2)$$

$$\phi = \begin{cases} 0.55 \text{ för } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0.3 + 0.25 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \text{ för } \rho_{fb} < \rho_f < 1.4\rho_{fb} \\ 0.65 \text{ för } \rho_{fb} < \rho_f \end{cases} \quad (3)$$



Figur 16 Reduktionsfaktor,  $\phi$ , ACI, (2015)

ACI, (2015) applicerar också en miljöfaktor,  $C_E$ , beroende på i vilken miljö FRP materialet ska användas. Man delar in det i två klasser, betong som inte utsätts för mark eller väder,  $C_E=0.8$  för GFRP, och betong som utsätts för mark eller väder,  $C_E=0.7$ . Motsvarande faktorer för CFRP är  $C_E=1.0$ , respektive  $C_E=0.9$ . Den dimensionerande spänningen:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (4a)$$

respektive töjningen kan då skrivas:

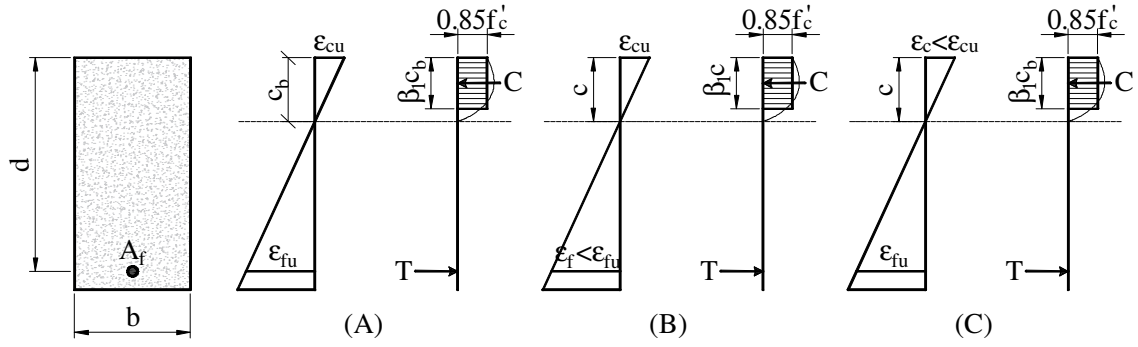
$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^* \quad (4b)$$

Den Kanadensiska dimensioneringsföreskriften, (CSA, 2017) använder sig endast av en säkerhetsfaktor (motståndsfaktor) för att ta hänsyn till variationen i material, laster och miljöpåverkan. Säkerhetsfaktorn sätts till,  $\phi_{GFRP} = 0.40$  för GFRP och för CFRP är  $\phi_{CFRP} = 0.80$ . En jämförelse av ACI och CSA ger vid överslag att den kombinerade säkerhetsfaktorn för ACI:  $\phi_{ACI} = \phi_{GFRP} \cdot C_E$ , varierar mellan 0.38 och 0.44, vilket stämmer ganska väl med CSA 0.40.

Den Europeiska dimensioneringsföreskriften, fib bulletin No 40, (2007) använder partialsäkerhetsfaktorer,  $\gamma$  i enlighet med Eurocode.

### Dimensionering baserad på ACI

Den Amerikanska dimensioneringsföreskriften ACI, (2015) tar hänsyn till samtliga tre brottmoder, se figur 17.



Figur 17 (A) Balanserat brott, (B) Betongtryckbrott och (C) Brott i FRP

Balanserat armeringsinnehåll,  $\rho_b$ , ges av Ekvation (5) och momentkapaciteten för FRP brott med Ekvation (6). Momentkapaciteten vid tryckbrott beräknas med Ekvation (7) och (8). Det ska noteras att i ACI, (2015) används  $\varepsilon_{cu} = 3.0 \text{ ‰}$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \left( \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \right) \quad (5)$$

$$M_n = A_f f_{fu} d \left( 1 - 0.5\beta_1 \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) \quad (6)$$

$$M_n = A_f f_{fu} \left( d - 0.5\beta_1 \frac{A_f f_f}{0.85b f'_c} \right) \quad (7)$$

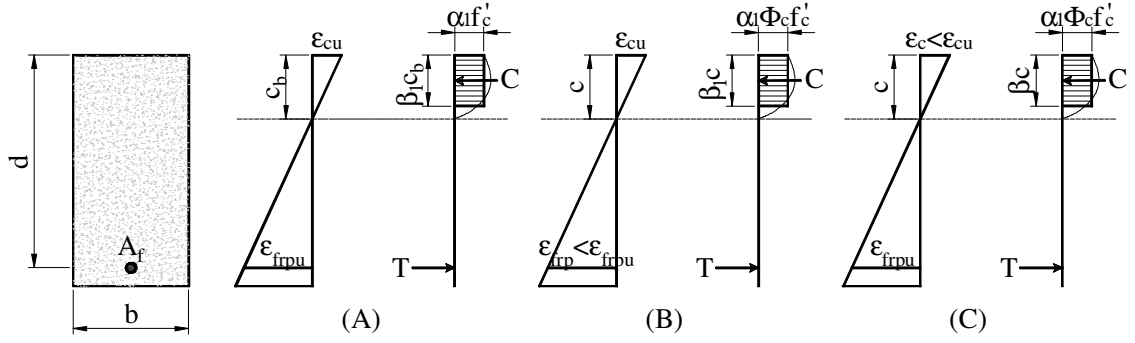
$$f_f = A_f f_{fu} \sqrt{\frac{(E_f \varepsilon_f)^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu}} \quad (8)$$

En minsta armeringsmängd krävs för att motverka brott precis efter uppsprickning. Detta krav måste kontrolleras för  $\rho_f < \rho_{fo}$  eftersom minimiarean automatisk erhålls för  $\rho_b \leq \rho_f$ . För att försäkra sig om att brottmomentet är högre än sprickmomentet av den armerade sektionen, kan en minimimängd av armering appliceras, se Ekvation (9):

$$A_{f,min} \geq \frac{0.41\sqrt{f'_c}}{f_{fu}} b_w d \geq \frac{2.26}{f_{fu}} b_w d \quad (9)$$

### Dimensionering baserad på CSA

Även den Kanadensiska dimensioneringsanvisningen täcker samtliga tre brottmoder, se figur 18, men framhåller att betongtryckbrott är att föredra framför brott i FRP.



Figur 18 (A) Balanserat brott, (B) Betongryckbrott samt (C) Brott i FRP.

Olika faktorer för storlek och position för betongens spänningsblock används i den Kanadensiska dimensioneringsanvisningen jämfört med den Amerikanska, dessutom sätts  $\epsilon_{cu} = 3.5 \text{ ‰}$ . Det balanserade armeringsinnehållet ges av Ekvation (10):

$$\rho_{frpb} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{frpu}} \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{frpu}} \right) \quad (10)$$

Böjmomentet för brott i FRP armeringen ges av ekvation (10) och böjmomentet för tryckbrott i betongen ges av Ekvation (11a) och Ekvation (11b):

$$M_r = A_{frp} \phi_{frp} \epsilon_{frpu} E_{frp} \left( d - \frac{\beta c}{2} \right) \quad (11a)$$

$$M_r = \alpha_1 \beta_1 \phi_c f'_c c b_f \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (11b)$$

Varje sektion av betongelementet ska dimensioneras så att man inte erhåller brott direkt efter uppsprickning, dvs momentkapacitet  $M_r$  skall överstiga sprickmomentet  $M_{cr}$ . Om inte kravet i Ekvation (12a) uppfylls ska kriteriet i Ekvation (12b) uppfyllas. Utifrån dessa ekvationer kan man definiera en minimimängd armering.

$$M_r \geq 1.5 M_{cr} \quad (12a)$$

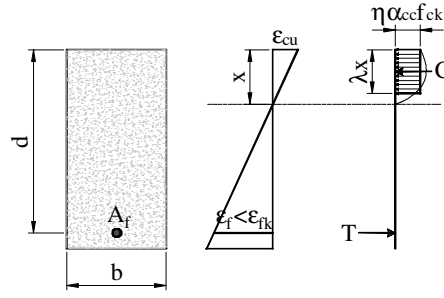
$$M_r \geq 1.5 M_f \quad (12b)$$

### Dimensionering baserad på fib bulletin No 40

Den Europeiska dimensioneringsanvisningen accepterar endast stukning hos betongen som brottmod och använder sig av uttrycket i Ekvation (13) för balanserat tvärsnitt. Med  $\rho_f > \rho_{fmin} = \rho_{fb}$  erhålls den efterfrågade brottmoden och dimensionerande böjmoment ges av Ekvation (14). Dimensioneringsprocessen, vilken följer Eurocode 2, visas schematiskt i figur 19.

$$\rho_{fb} = \frac{0.81(f_{ck} + 8)\epsilon_{cu}}{f_{fk} \left[ (f_{fk} / E_{fk}) + \epsilon_{cu} \right]} \quad (13)$$

$$M_u = \eta f_{cd} b d^2 (\lambda \xi) \left( 1 - \frac{\lambda \xi}{2} \right) \quad (14)$$



Figur 19 Den Europeiska dimensioneringsanvisningen accepterar endast tryckbrott i betongen

Där:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} \quad (15)$$

$\alpha_{cc}$  är en nationell parameter, rekommenderat värde i EC2 är 1.

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}} \quad (16a)$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = 0.8 \\ \eta = 1 \end{array} \right\} \text{för } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (16b)$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = 0.8 - \left( \frac{f_{ck} - 50}{400} \right) \\ \eta = 1 - \left( \frac{f_{ck} - 50}{200} \right) \end{array} \right\} \text{för } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \quad (16c)$$

$$\varepsilon_f = \frac{-\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + (4\eta\alpha_{cc}f_{ck}\lambda\varepsilon_{cu} / \gamma_c \rho_f E_f)}}{2} \quad (16d)$$

Ekvation (17) kan användas för att beräkna spänningen som utvecklas i FRP-armeringen och på så sätt verifiera att brott i armeringen undviks.

$$\sigma_f = \varepsilon_f E_f < \frac{f_{fk}}{\gamma_f} \quad (17)$$

Om mängden FRP-armering i en sektion understiger  $\rho_b$ , är den förväntade brottmoden brott i FRP armeringen och för att beräkna brottmomentet enligt Ekvation (18) är det nödvändigt att bestämma betongens trycktöjning  $\varepsilon_c$  vid vilken FRP brottet uppstår. Detta kan åstadkommas genom en iterativ process genom att lösa Ekvationerna (19) och (20).

$$M_u \geq \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f} \left( 1 - \frac{\xi}{2} \right). \quad (18)$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{fu} + \varepsilon_c}. \quad (19)$$

$$F_c = F_T \rightarrow bd\xi \frac{\int_0^{\varepsilon_c} f_c d\varepsilon_c}{\varepsilon_c} = \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f} \quad (20)$$

Där  $f_c$  beräknas från Ekvation (21). Värdena för  $\varepsilon_{c2}$  och  $\varepsilon_{cu}$  kommer från Eurocode 2 (CEN, 2004).

$$f_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right) \right] \left\{ \begin{array}{l} \text{för } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \\ \text{för } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{array} \right. \quad (21)$$

$$f_c = f_{cd}$$

För att försäkra sig om att brottmomentet är högre än sprickmomentet av den armerade sektionen, en minimimängd av armering kan appliceras, se Ekvation (22):

$$A_{f,min} \geq 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{fk}} bd \quad (22)$$

## Brottgränstillstånd – Dimensionering för tvärkraft

### Allmänt

Under de senaste årtiondena har ett flertal olika teorier och antaganden framlagts, vilka ibland motsäger varandra, hur skjuvkrafter tas om hand och överförs inom ett betongelement, t ex Mitchell och Collins, (1974), Nielsen, (1984), Vecchio and Collins, (1986), Hsu et. al., (1987). Fastän kunskapen för tvärkraftsarmerade betongbalkar har ökat avsevärt sedan fackverksmodellen, Morsh, (1909), innebär komplexiteten hos de framtagna modellerna att de blir svåra att direkt implementera i dimensioneringsanvisningar. Detta har fått resultatet att de flesta existerande normer och regler baserar sig på ett semi-empiriskt angreppssätt med det underliggande antagandet att omfördelning av spänningar kan ske och att stålarmeringen flyter. Detta medför då också att tvärkraftskapaciteten kan uttryckas i termer av en bidragande del från betongen och en bidragande del från armeringen till bärformågan.

Omfördelning av spänningar kan dock vara mer problematiskt när linjärelastiska material som FRP används. Dock visar det sig, förutsatt att skjuvsprickor kan kontrolleras, att additionsprincipen fungerar väl för FRP armerade betongelement i tvärkraft och att analytiska beräkningar stämmer bra överens med laboratorieförsök samt att tillräckliga säkerhetsmarginaler kan erhållas, Maruyama och Zaou, (1994, 1996), Nagasaka mfl. (1995), Mathys and Taerwe, (2000).

Tvärkraftskapaciteten för en befintlig betongbalk beror på flera olika faktorer: betongens hållfasthet, lastens angreppspunkt, balkens geometri, yttre pålagd normalkraft (t ex spännarmering), armeringens placering etc.

**Betongens hållfasthet:** Spänningstillståndet i balkens liv omfattar huvudpåkänningarna i drag och tryck. Den lutande spricklasten är en funktion av betongens draghållfasthet och armeringsinnehåll. Betongens draghållfasthet är den mest relevanta egenskapen för tvärkraftskapaciteten. Livbrott uppträder när den sneda huvuddragpåkänningen överstiger betongens draghållfasthet. Om det finns skjuvarmering kan bärformågan öka när uppsprickning har uppstått och det slutliga brottet blir i de flesta fall antingen ett tryckbrott eller ett böjskjuvbrott. Tryckbrottet styrs av betongens tryckhållfasthet i förhållande till huvudtryckspänningarna.

En annan materialparameter som påverkar betongens bidrag till tvärkraftskapaciteten är ballastmaterialets storlek. Allteftersom diameter hos den grova ballasten ökar kommer råheten hos sprickytorna att öka vilket ger större skjuvpåkänningar som ska överföras tvärs över sprickorna (MacGregor and Wight, 2012)

**Skjuvförhållandet spann–balkhöjd:** Transversella belastningar som verkar nära stöd överförs direkt till stödet genom valvverkan. I många normer reduceras belastningarnas verkan nära stöd i stället för att man tar hänsyn till de verkliga lastbärande mekanismerna.

**Balkens geometri:** Utöver det faktum att ett stort tvärsnitt har en mycket större tvärkraftskapacitet jämfört med ett litet, inverkar även andra geometriska parametrar på bärförmågan, t ex medför en sned lutning av armeringen att bärförmågan påverkas mer eller mindre gynnsamt beroende på utformningen.

**Normalkraft:** Axiella krafter kan orsakas av externa normalkrafter, såsom t ex spännarmering. För normala konstruktioner minskar tvärkraftskapaciteten med axiella dragkrafter, medan den ökar med axiella trycklaster.

**Dragarmeringsinnehållet:** Närvaro av böjsprickor styr bildningen av böjskjuvsprickor. När armeringsförhållandet är litet sträcker sig böjsprickorna högre upp, med en större sprickvidd, än vad som skulle vara fallet vid stor mängd dragarmering. En ökad sprickbredd leder till en minskning av tvärkraftskapaciteten från den del av skjuvkraften som överförs över de sneda sprickorna genom sk dymlingsverkan och inte genom friktion i sprickplanet.

**Skjuvarmering:** Tvärkraftskapaciteten för en konstruktion kan, vid byggandet, enkelt förbättras genom användning av byglar. Syftet med byglar är att säkerställa att skjuvkrafterna överförs tvärs över en skjuvspricka. Före den sneda sprickbildningen är påkänningen i bygeln lika med motsvarande påkänning i betongen. Vid dessa påkänningsnivåer är tvärkraftsbidraget från byglarna begränsat och de börjar inte bli riktigt verksamma förrän en spricka utvecklas. Detta innebär således att byglar inte förhindrar sneda sprickor från att bildas men de kontrollerar sprickornas öppning och dess utveckling.

## Dimensionering för tvärkraft med FRP armering

Tryckbrott i betongelementet uppstår på motsvarande sätt som för stålbygelarmerade tvärsnitt. För FRP tvärkraftsarmerade tvärsnitt kan även brott i FRP materialet uppstå.

Den underliggande principen när det gäller rekommendationer för FRP-armerade betongelement är att man förutsätter att tillräcklig vidhäftning mellan armering och betong uppnås, att man är oberoende av vilken längsgående armering som används. Med vilket avses att om en dimensionering ger att samma töjning i längsarmeringen ( $\epsilon_f = \epsilon_s$ ), och samma krafter uppstår ( $F_f = F_s$ ) då uppnår man samma säkra resultat som om stålarmering hade använts. I litteraturen benämns detta antagande som ”töjningsantagandet”, se t ex Guadagnini mfl. (2003). Baserat på detta antagande kan en ekvivalent böjarmeringsarea bestämmas, se Ekvation (23a) samt (23b):

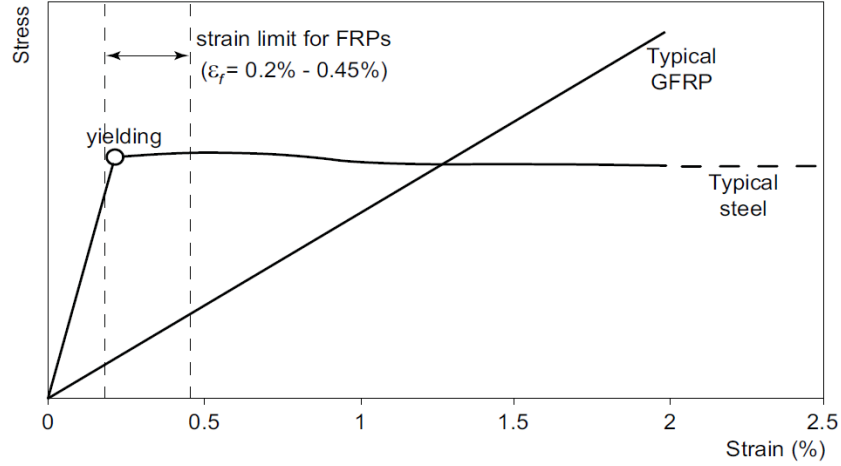
$$F_f = \epsilon_f E_f A_f = \epsilon_s E_s A_s = F_s \quad (23a)$$

$$A_s = A_f \frac{E_f}{E_s} \quad (23b)$$

När det gäller mängden skjuvarmering (FRP) som krävs bestäms denna genom att kontrollera maximal töjning,  $\epsilon_{fu}$ , som kan uppstå i skjuvarmeringen. Den maximala spänningen som kan utvecklas i FRP-byglarna ( $f_{fu}$ ) beräknas enligt:

$$f_{fw} = \varepsilon_{fw} E_{fw} \quad (24)$$

Töjningens begränsningsområde i tvärkraft redovisas i figur 20, se också (fib, 2007). Detta medför att man även begränsar sprickvidden. Skjuvarmeringen av stål nyttjas dock till flytgränsen men med maximalt 0.45%.



Figur 20 Begränsande töjning för FRP skjuvarmering enligt gällande föreskrifter, (fib, 2007).

### Dimensionering för tvärkraft baserad på CSA

Den Kanadensiska dimensioneringsanvisningen beräknar tillskott från betong respektive armering till totala tvärkraftskapaciteten för betongelementet, CSA, (2017). För betongelement med effektiv höjd,  $d$ , mindre än  $300 \text{ mm}$  används Ekvation (25a) för  $d$  större än  $300 \text{ mm}$  används ekvation (25b) för betongens tillskott.

$$V_{cf} = 0.035 \lambda \left( f'_c \rho_f E_f \frac{V_f}{M_f} d \right)^{1/3} b_w d \quad (25a)$$

$$V_{cf} = \left( \frac{130}{1000 + d} \right) \lambda \sqrt{f'_c} b_w d \quad (25b)$$

Om FRP byglar används istället för stålbyglar tas detta hänsyn till i samma ekvation som för stål men med den skillnad att man reducerar töjningen för FRP armeringen till 40% av brotttöjningen, se Ekvation (26a)

$$V_f = \frac{0.4 A_{fw} f_{fw} d}{s} \quad (26a)$$

I (CSA, 2017) ges en minst mängd FRP tvärkraftsarmering:

$$\rho_{fw, \min} = 0.2 \sqrt{f'_c} \frac{1}{f_{fu}} \quad (26b)$$

Dock anges det inte här minsta avstånd mellan stänger.

## Dimensionering för tvärkraft baserad på ACI

I den Amerikanska dimensioneringsanvisningen beräknas betongens tvärkraftstillskott för tvärsnitt med FRP som huvudarmering enligt Ekvation (27), se också figur 21. Denna ekvation är semiempirisk och har visat sig ge tillräcklig säkerhet för FRP-armerade balkar utprovade på olika armeringsmängder och för olika betongkvaliteter, (Tureyen and Frosch, 2003).

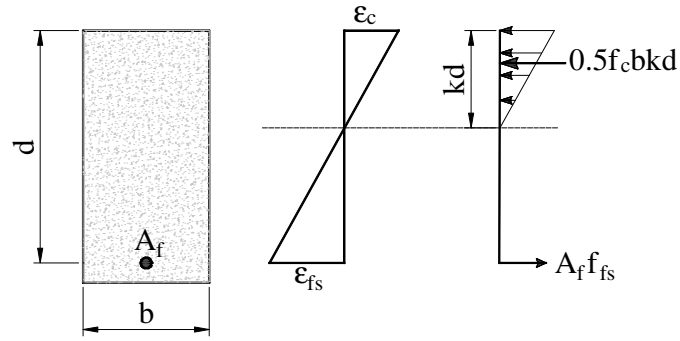
$$V_{cf} = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w k d \quad (27)$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (28a)$$

och

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w d} \quad (28b)$$

$$n_f = \frac{E_s}{E_c} \quad (28c)$$



Figur 21 Elastisk spänning- och töjningsfördelning efter ACI, (2015).

Bidraget från tvärkraftsbyglar av FRP beräknas på samma sätt som bidraget för stålarmring, men med en begränsning av töjningen i FRP-armeringen, se Ekvation (29) och (30).

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (29)$$

$$f_{fv} = 0.004 E_f \leq f_{fb} \quad (30)$$

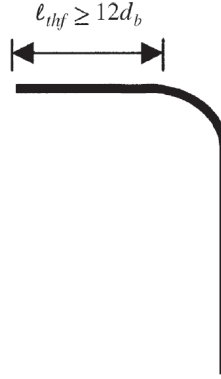
där

$$f_{fb} = \left( 0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (31)$$

och  $r_b$  är radie på bygel samt  $d_b$  diameter på bygel. I ACI anger man också en minsta mängd av tvärkraftsarmering:

$$A_{fv, \min} = 0.35 \frac{b_w s}{f_{fv}} \quad (34c)$$

Avståndet mellan byglar för högst uppgå till  $d/2$  eller 600 mm. Vidare anger man att förhållandet mellan radie och diameter på byglar,  $r_b/d_b$  ska minst vara 3. I tillägg skall en överlappsläng av  $12d_b$  användas, se figur 22.



Figur 22 Erforderlig överlappslängd för FRP byglar, efter ACI, (2015).

Dimensionering för tvärkraft baserad på fib bulletin No 40.

I (fib, 2007), har man föreslagit en modifiering till Eurocode 2, där man tar hänsyn till egenskaperna hos FRP som huvudarmering, se Ekvation (32):

$$V_{cf} = 0.12 \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \left( 100 \frac{A_f}{b_w d} \frac{E_f}{E_s} \phi_\varepsilon f_{ck} \right)^{1/3} b_w d \quad (32)$$

där:

$$\phi_\varepsilon = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_y} \quad (33)$$

Där  $\varepsilon_f = 0.0045$  och  $\varepsilon_y$  flyttöjningen hos dragarmeringen. Bidraget från FRP-bygelarmeringen beräknas på samma sätt som får stålbyglar men med en reduktion i tillåten töjning till  $0.0045$ , se ekvation (34a) och (34b) samt figur 20.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_v d}{s} \quad (34a)$$

$$f_{fv} = 0.0045 E_f \leq f_{fb} \quad (34b)$$

Här går man också i linje med EC2 när det gäller tvärkraftskapaciteten, dvs för tvärkraftsarmerade betongelement så får man inte tillgodoräkna sig tillskottet från betongen,  $V_{cf}$ . I (fib, 2007) skall FRP armeringsinnehållet minst uppgå till:

$$\rho_{fw, \min} = 0.08 \sqrt{f'_c} \frac{1}{0.0045 E_f} \quad (34c)$$

Vidare anger man att avståndet mellan byglar,  $s$ , högst får vara  $0.75d$ .

## Bruksgränstillståndet

En skillnad mellan stålarmering och FRP-armering, och då framförallt GFRP-armering, är att den har som tidigare nämnts väsentligt lägre E-modul. Detta har mindre betydelse för ospruckna betongelement, men har större betydelse när väl uppsprickning har skett. Detta medför att för motsvarande armeringsmängd blir sprickorna större. Detta har oftast ingen betydelse när det gäller beständighet, men nedböjningarna ökar. De tre dimensioneringsanvisningarna använder något olika angreppssätt, se tabell 8. Dimensioneringen enligt Amerikanska anvisningarna och fib har infört begränsningar på uppsprickning och nedböjning från vilket begränsat böjmoment kan beräknas. Den Kanadensiska dimensioneringsanvisningen definierar momentet i bruksgränstillståndet som det moment vilket motsvarar  $\epsilon_{frp}=2\text{ ‰}$ . Man är dock tillåten att öka denna töjning upp till  $\epsilon_{frp}=3\text{ ‰}$  beroende på nedböjningskrav. Det visar sig också att EC2 fungerar bra för att beräkna sprickvidder, men där måste hänsyn tas till de specifika egenskaperna för FRP armeringen.

Begränsningar i nedböjning/deformation i bruksgränstillståndet är ofta relaterat till estetiska hänsynstaganden samt för att undvika skador i anliggande byggnadsdelar. Deformationer kan undersökas indirekt t ex genom ett maximalt förhållande mellan spann och höjd, vilket typiskt ligger mellan 5-20 beroende på elementets typ och upplagsvillkor. Ett annat sätt att kontrollera deformationer är att jämföra direkta beräkningar med tillåtna gränser. Direkta beräkningar genomförs med vanlig byggnadsstatisk analys och med elementens styvhetsparametrar, dvs elasticitetsmodulen  $E$  och tröghetsmomentet  $I$ , där man gör jämförelse mellan före uppsprickning och efter uppsprickning. Endast beräkningar för kortidslast genomförs. I allmänhet förväntar man sig större deformationer med FRP armering jämfört med stålarmering alla andra parametrar lika.

Tabell 8 Definitioner i bruksgränstillstånd

| Kriterium     | ACI                      | CSA                                                                     | fib                      |
|---------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Uppsprickning | Sprickbegränsning        | Sprickbegränsning med hänvisning till<br>$\epsilon_{frp}=2\text{ ‰}$    | Sprickbegränsning        |
| Nedböjning    | Begränsning i nedböjning | Begränsning baserad på $M_s$ motsvarande<br>$\epsilon_{frp}=2\text{ ‰}$ | Begränsning i nedböjning |

Sprickviddsbegränsningar sätts normalt på stålarmerade betongelement för att skydda mot korrosion. Detta är inte fallet för FRP armerade element där man tillåter sprickvidder på 1.5-1.8 gånger de maximala för stål, se tabell 9. Det bör dock noteras att angivna sprickviddskrav baseras på lägre exponeringsklasser för stålarmerade konstruktioner, dvs högre krav kan förekomma. Sprickbreddskraven är kopplade till exponeringsklass i EK2 samt EKS10, för XC2 t.ex. har man 0.3 – 0.4 mm i krav men allteftersom att exponeringsklasserna ökar, ökar även kraven på sprickvidden.

Tabell 9 Tillåtna sprickvidder från olika dimensioneringsanvisningar

| Norm                              | Material | Exponering | Tillåten sprickvidd  |
|-----------------------------------|----------|------------|----------------------|
| Eurocode 2                        | Steel    | Normal     | 0.3mm                |
| ACI 318-05                        | Steel    | Inomhus    | 0.4mm                |
|                                   |          | Utomhus    | 0.3mm                |
| ACI 440.1R-15,<br>CAN/CSA S806-12 | FRP      | Inomhus    | 0.7mm                |
|                                   |          | Utomhus    | 0.5mm                |
| fib 2007                          | FRP      | -          | Refererar till andra |

### Uppsprickning baserad på ACI

Den amerikanska dimensioneringsanvisningen har modifierat sprickekvationen från ACI 318-05. Det angreppssätt man använder sig av är att begränsa avståndet mellan FRP stänger enligt Ekvation (35).

$$s_{max} = 1.15 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} - 2.5c \leq 0.92 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} \quad (35)$$

Denna kontroll av böjsprickor är indirekt och motivering till detta angreppssätt ges av (Ospina & Bakis, 2007). Vidare är  $c$  täckande betongskikt till underkant FRP armering,  $w$  är vald sprickvidd. För den valda spänningen i FRP och vald sprickbegränsning, ska man också ta hänsyn till centrumavstånd till närmaste FRP armering,  $d_c$ , när man beräknar avståndet mellan FRP stängerna.  $d_c$  anges här som avståndet från underkant till centrum av den FRP armering som ligger närmast underkanten av betongelementet.

$$d_c \leq \frac{E_f w}{2f_{fs}\beta k_b} \quad (36a)$$

Och  $f_{fs}$  är spänningen i FRP armeringen i bruksgränstillstånd:

$$f_{fs} = 0.67 f_y \quad (36b)$$

Vidare är  $\beta$  förhållandet mellan avståndet från neutrala lagret till underkant betongelement samt avståndet från neutrala lagret till centrum av dragarmeringen.  $k_b$  avser en faktor som tar hänsyn till vidhäftningen mellan FRP-stången och omgivande betong. I de fall man har bättre vidhäftning än stål är  $k_b$  satt till mindre än 1.0 och i de fall man har sämre vidhäftning än stål är  $k_b$  större än 1.0. I de fall man inte känner värdet på  $k_b$  så väljer man konservativt  $k_b$  till 1.4.

### Uppsprickning baserad på CSA

Den Kanadensiska dimensioneringsanvisningen beräknar den maximala sprickvidden med hänsyn till den modifierade Gergely-Lutz ekvationen i Ekvation (37).

$$w = 11 \frac{E_s}{E_{frp}} k_b \beta f_{frp} \sqrt[3]{d_c A_f} \cdot 10^{-6} \quad (37)$$

där  $\beta = h_1/h_2$ , och  $h_1$  är avståndet mellan neutral axeln och tyngdpunkten på dragarmeringen samt  $h_2$  är avståndet från neutral axeln till underkant balk/betongelement. För sprickkontroll har även den Kanadensiska dimensioneringsanvisningen infört en parameter  $z$ . Parametern får inte överstiga  $45\ 000\ N/mm$  för exponering inomhus och  $38\ 000\ N/mm$  för exponering utomhus när FRP armering används, se ekvation (38).

$$z = \frac{E_s}{E_{frp}} k_b f_{frp} \sqrt[3]{d_c A_f} \quad (38)$$

### Uppsprickning baserad på fib bulletin 40 (EC2)

Den Europeiska dimensioneringsanvisningen tar sin utgångspunkt i Eurocode 2 för att bestämma maximalt sprickavstånd  $S_{r,max}$  och maximal sprickvidd,  $w_k$ , respektive (CEN, 2004), se ekvation (39)

$$S_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff} \quad (39)$$

där

- $c$ : täckande betongskikt hos dragarmeringen
- $\phi$ : diameter på stång
- $k_1$ : en faktor som beaktar armeringens ytegenskaper
- $k_1$ : 0.8 för kamstänger, eller vid god vidhäftning
- $k_1$ : 1.6 för släta stänger, t ex spännstål
- $k_3$ : 3.4 (nationell parameter, rekommenderat värde)
- $k_4$ : 0.425 (nationell parameter, rekommenderat värde)
- $k_2$ : en faktor som beaktar inverkan av töjningsgradienten

$$k_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2\varepsilon_1}, \text{ där} \quad (40a)$$

- $\varepsilon_1$ : tvärsnittets största dragtöjning
- $\varepsilon_2$ : tvärsnittets minsta dragtöjning
- $k_2$ : 1.0 vid rent drag
- $k_2$ : 0.5 vid ren böjning

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (40b)$$

där

$$h_{c,eff} = \min \left\{ 2.5(h-d); \frac{h-x}{3}; \frac{h}{2} \right\} \quad (40c)$$

och  $h-d$  är avståndet från kant till armeringens tyngdpunkt

$$w_k = S_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (40d)$$

där  $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$  är skillnaden mellan stålets och betongens medeltöjning, vilket får uppskattas som:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \frac{k_t f_{ctm} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s \rho_{p,eff}} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (40e)$$

där

- $\sigma_s$ : armeringsspänning för sprucket tvärsnitt (stadium II)  
 $k_t$ : faktor som beaktar lastens varaktighet  
 $k_t = 0.6$  för korttidslast  
 $k_t = 0.4$  för långtidslast

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad (40f)$$

Enligt EC2, 7.3.2 ska konstruktionsdelarnas dragzon förses med en minsta mängd sprickfördelande armering  $A_{s,min}$  som beräknas enligt följande:

$$\sigma_s A_{s,min} \geq k_c k f_{ctm} A_{ct} \quad (41)$$

där

- $\sigma_s$ : armeringsspänning som tillåts efter sprickbildning, högst  $f_{yk}$  för stål  
 $A_{ct}$ : area för betongens dragzon före uppsprickning, dvs. beräknad utan hänsyn till att betongen spricker.  
 $k_c$ : faktor som beaktar spänningsfördelning före sprickbildning  
 $k_c = 1.0$  vid ren dragning  
 $k_c = 0.4$  vid ren böjning  
 $k$ : faktor som beaktar spänningsfördelning av inre spänningar, uppkommer genom förhindrat rörelsebehov  
 $k = 1.0$  för liv med  $h \leq 300 \text{ mm}$  eller fläns med  $b_w \leq 300 \text{ mm}$   
 $k_c = 0.65$  för liv med  $h \geq 800 \text{ mm}$  eller fläns med  $b_w \geq 800 \text{ mm}$

För mellanliggande dimensioner kan interpolering tillämpas.

### Nedböjning baserad på ACI

Den Amerikanska dimensioneringsanvisningen använder sig av ett direkt angreppssätt när det gäller att beräkna deformationer, men man ger även en indirekt rekommendation på minsta tjocklek av betongelementen som ett startvärde för dimensionering, se tabell 10. Detta relaterat till en minsta krökning av elementen, se också Ospina & Gross (2005).

Tabell 10 Rekommenderad minsta tjocklek för enkelarmerade (icke-förspända) balkar och plattor

| Element                | Minsta tjocklek, $h$ |                         |                             |         |
|------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|---------|
|                        | Fritt upplagd        | En sida<br>kontinuerlig | Båda sidor<br>kontinuerliga | Konsol  |
| Enkelarmerad<br>Platta | $L/13$               | $L/17$                  | $L/22$                      | $L/5.5$ |
| Balk                   | $L/10$               | $L/12$                  | $L/16$                      | $L/4$   |

Tröghetsmomentet för en uppsprucken sektion ges av:

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + \eta_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (42)$$

där

$$k = \sqrt{2\rho_f\eta_f + (\rho_f\eta_f)^2} - \rho_f\eta_f \quad (43)$$

och

$$\eta_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (44a)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (44b)$$

Det effektiva tröghetsmomentet, Ekvation (45), baseras på ett modifierat samband föreslaget av Bischoff, (2005, 2011), där man lagt till en faktor  $\gamma$  för att ta hänsyn till styvhetsvariationen längs betongelementet. Faktorn  $\gamma$  är beroende av last och randvillkor och tar hänsyn till längden av osprucket tvärsnitt och förändringen av styvhet i de uppspruckna zonerna. Faktorn  $\gamma$  ges av Ekvation (46).

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[ 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \leq I_g, \text{ där } M_a \geq M_{cr} \quad (45)$$

$$\gamma = 1.72 - 0.72 \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right) \quad (46)$$

Sprickmomentet beräknas enligt ACI som:

$$M_{cr} = \frac{0.62\lambda\sqrt{f'_c}I_g}{y_t} \quad (47)$$

där  $y_t$  är avståndet från tyngdpunkten i osprucken sektion till undersida betongelement. I den Amerikanska dimensioneringsanvisningen tar man även hänsyn till långtidsdeformationer med hänsyn till krypning och krympning av betongen, detta uttrycks som:

$$\Delta_{(cp+sh)} = \lambda_{\Delta} (\Delta_i)_{sus} \quad (48a)$$

där  $(\Delta_i)_{sus}$  är deformation på grund av korttidslast och  $\lambda_{\Delta}$  ges av:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{\xi}{1 + 50\rho'} \quad (48b)$$

där  $\rho'$  sätts till 0 då FRP armeringen inte är effektiv som tryckarmering.  $\xi$  är en tidsberoende faktor för kontinuerlig last, t ex egenvikten. Vidare reduceras uttrycket med 40% för att tillåta större initiala deformationer av det FRP armerade tvärsnittet. Ekvation (48a) kan därför skrivas som:

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0.6\xi(\Delta_i)_{sus} \quad (49)$$

där faktorn  $\xi$  ges i tabell 11

Tabell 11 Tidsberoende faktor  $\xi$  som funktion av tiden, från (ACI 318R-14, 2014)

| Kvarvarande last, (månader) | Tidsberoende faktor, $\xi$ |
|-----------------------------|----------------------------|
| 3                           | 1.0                        |
| 6                           | 1.2                        |
| 12                          | 1.4                        |
| 60 eller flera              | 2.0                        |

### Nedböjning baserad på CSA

Den Kanadensiska dimensioneringsanvisningen accepterar både ett indirekt angreppssätt och en direkt beräkning för kontroll av nedböjning. Den indirekta metoden använder töjningen i bruksgränstillståndet och tvärsnittsparametrar för att konvertera till FRP, se Ekvation (50). Här är  $L$  längden på betongelementet och  $h$  höjden/tjockleken.

$$\left(\frac{L}{h}\right)_{frp} = \left(\frac{L}{h}\right)_s \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{frp}}\right)^{\alpha_d} \quad (50)$$

där

$$\alpha_d = 0.50 + 0.03(b/b_w) - b/80h_s \quad (51a)$$

$$\frac{L}{h} \leq \frac{48\eta}{5K_1} \left(\frac{1-k}{\varepsilon_{fs}}\right) \left(\frac{\Delta}{L}\right)_{max} \quad (51b)$$

Där  $k$  och  $\eta=d/h$  tidigare definierats i Ekvation (43) och (44a).  $(\Delta/L)_{max}$  är tillåten nedböjning.  $K_1$  är en faktor som tar hänsyn till randvillkor och är 1.0, 0.8, 0.6 samt 2.4 med utbredd last och för fritt upplagt betongelement, en ände kontinuerlig, två ändar kontinuerliga och konsol.  $\varepsilon_s$  är töjningen i FRP armering under brukslast i mittspann, utom för konsol där  $\varepsilon_{fs}$  anges vid upplag. Den direkta beräkningsmetoden baseras på ett effektivt tröghetsmoment:

$$I_e = \frac{I_t I_{cr}}{I_{cr} + \left(1 - 0.5 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right) (I_t - I_{cr})} \quad (52)$$

där  $I_t$  är tröghetsmomentet från transformerat tvärsnitt. Från det effektiva tröghetsmomentet kan man sedan med hjälp av traditionell byggnadsstatik beräkna deformationer. Den Kanadensiska dimensioneringsanvisningen begränsar deformationerna till  $L/180$  och  $L/480$  beroende på användningsområde.

### Nedböjning baserad på fib bulletin 40 (EC2)

För FRP-armerade betongelement appliceras samma ekvationer som ges i EC2 där en tillpassning ges när det gäller materialspecifika delar. I dagsläget förutsätter det dock att man har samma vidhäftning till betongen som vid vanlig stålarmring. En förenklad beräkning av deformationerna kan göras enligt följande, se också (Almssad, 2015):

Beräkna nedböjningen  $y_l$  för osprucket tvärsnitt med konstant  $EI_l$

Beräkna nedböjningen  $y_{II}$  för helt sprucket tvärsnitt med konstant  $EI_{II}$ , därefter den totala nedböjningen för det studerade elementet:

$$y_{tot} = \zeta y_{II} + (1 - \zeta) y_I \quad (53)$$

där

$\zeta$ : är fördelningskoefficient som beaktar dragspänningar i betong mellan sprickor

$$\zeta = 1 - \beta \left( \frac{\sigma_{st}}{\sigma_s} \right)^2 = 1 - \beta \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^2 \quad (54)$$

$\zeta$ : 0 för ospruckna tvärsnitt

$\beta$ : är en koefficient som beaktar inverkan av medeltöjningen av lastens varaktighet eller av upprepade belastningar.

$\beta=1.0$  för enstaka korttidslast

$\beta=0.5$  för långtidslast eller upprepade last

$\sigma_s$ : spänningen i dragarmeringen för sprucket tvärsnitt

$\sigma_{st}$ : är motsvarande spänning i dragarmeringen beräknad för spricklast.

Vid ren böjning kan  $\sigma_s / \sigma_{st}$  ersättas med  $M_{cr} / M$  eller för  $N_{cr} / N$  för rent drag.

$M_{cr}$ : är sprickmomentet

$M$ : är momentet i maxmomentsnittet för aktuell last

Sprickmomentet  $M_{cr}$ , beaktas normalt utgående från betongens medeldraghållfasthet:

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} I_I}{x_{tp}} = \frac{f_{ctm} \frac{bh^3}{12}}{\frac{h}{s}} \quad (55)$$

$f_{ctm}$ : medeldraghållfasthet

$I_I$ : tvärsnittets tröghetsmoment utan medverkan av armering (stadium I),

vidare, Stadium I: Osprucket stadium

$$(EI)_I = E_{c,eff} I_{tot} \quad (56)$$

$E_{c,eff}$ : betongens effektiva E-modul i bruksgränstillståndet

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)} \quad (57)$$

där

$I_{tot}$ : tvärsnittets tröghetsmoment

$\varphi(\infty, t_0)$ : lämpligt kryptal med hänsyn till last och tidsperiod

samt, Stadium II: Sprucket stadium för enkelarmerad betongbalk eller platta

$$(EI)_{II} = 0.5bd^3\xi^2 E_{c,eff} \left(1 - \frac{\xi}{3}\right) = E_s A_s d^2 (1 - \xi) \left(1 - \frac{\xi}{3}\right) \quad (58)$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \alpha_e \rho \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \rho}} - 1 \right) \quad (59)$$

där  $x$  är avstånd från tryckt kant till neutrallagret i stadium II, och

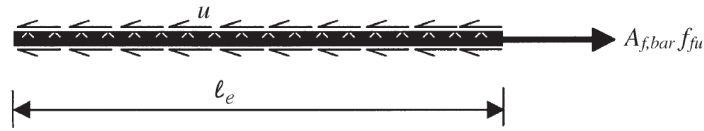
$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}} \quad (60a)$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_c} = \frac{A_s}{bd} \quad (60b)$$

EC2 begränsar deformationerna till  $L/250$  för estetiska och funktionella krav samt  $L/500$  för skademinimering på närliggande eller anslutande icke bärande element

## Vidhäftning och förankring

I ett armerat betongelement utsatt för böjning balanserar dragkraften i armeringen tryckkraften i betongen. Dragkraften överförs till armeringen genom vidhäftning mellan armering och den omgivande betongen. Skjuvspänningar uppstår när dragkraften ändras. Vidhäftning mellan FRP armering och betong följer samma mekanism som för traditionell armering och beror på typ av FRP, elasticitetsmodul, ytans utformning och geometrin på FRP stången, (Al-Zahrani m.fl., 1996), (Uppuluri m.fl., 1996), (Gao m.fl., 1998b), (Tepfers, 2002). Figur 23 visar jämviktssambanden för en i betong ingjuten FRP-stång med längden  $\ell_e$ . Kraften i stången hålls tillbaka med en medelskjuvspänning,  $u$ , på ytan av stången.



Figur 23 Överföring av laster genom vidhäftning efter ACI, (2015).

Vid cirkulär stång kan jämviktssambandet uttryckas som:

$$1_e \pi d_b u = A_{f,bar} f_f \quad (61)$$

Där  $f_f$  är den utvecklade spänningen i FRP stångens ände vid betongens förankringslängd. I motsats till traditionell armering behöver inte full kapacitet hos FRP stången utvecklas, speciellt inte med tanke på att böjkapaciteten kontrolleras genom krossning i betongen och att spänningen i FRP-stången vid brott hos betongelementet är lägre än dess brottspänning.

## Förankring baserad på ACI

I ACI 440.1R-15 har man utgått för dimensioneringssambanden i ACI 318 gällande traditionell armering där man utförde utdragsförsök på ett relativt stort antal provkroppar (Orangun m.fl., 1977). Ett motsvarande angreppssätt användes av (Wambeke och Shield, 2006) och från laborieförsöken tog man fram ett samband byggt på regressionsanalys enligt Ekvation (62).

$$\frac{u}{0.083\sqrt{f'_c}} = 4.0 + 0.3 \frac{c}{d_b} + 100 \frac{d_b}{1_e} \quad (62)$$

där

- $c$ : minsta avståndet från betongkant till FRP stång
- $d_b$ : diameter på FRP stång

Ekvationerna (61) och (62) kan lösas för uppnåbar spänning i FRP stången beroende på förankringslängd och täckskikt, vilket redovisas i Ekvation (63).

$$f_{fe} = \frac{0.083\sqrt{f'_c}}{\alpha} \left( 13.6 \frac{1_e}{d_b} + \frac{c}{d_b} \frac{1_e}{d_b} + 340 \right) \leq f_{fu} \quad (63)$$

där  $c/d_b$  inte får bli större än 3.5,  $\alpha$  är en faktor som tar hänsyn till placeringen av FRP stången på så sätt att om 300 mm färsk betong är gjutet under förankringslängden eller vid en skarv skall  $\alpha$  enligt ACI, (2015) väljas till 1.5 annars 1.0. Orsaken till detta är att vid placering av armeringen i överkant av ett betongelement föreligger risk att fina partiklar och vatten rör sig uppåt genom betongmassan och lägger sig kring armeringen och på så sätt försämrar vidhäftningen. Detta är baserat på laboratorieförsök och torde mer ha med handhavande än verkliga fenomen att göra. Betongtäckskiktet har betydelse för brottmod. Om täckskiktet  $c$  är lika med eller mindre än diametern,  $d_b$ , på stången erhålls vid rena dragförsök spjälkning av täckskiktet. Däremot om  $c$  är större än  $d_b$  erhålls utdragsbrott.

### Förankring baserad på CSA

I CSA, (2017) kan man antingen välja att redovisa erforderlig förankringslängd i drag för vald FRP-produkt/stång eller beräkna förankringlängden antingen baserat på normala krav eller med tillåten variation, se Ekvation (64a) och (64b):

$$l_d = 1.15 \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5}{d_{cs}} \frac{f_f}{\sqrt{f'_c}} A_b \quad (64a)$$

men  $d_{cs}$  får inte vara större än  $2.5d_b$  och  $\sqrt{f'_c}$  får inte vara större än 8.0 MPa.

$$l_d = 0.5 \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5}{d_{cs}} \frac{f_f}{\sqrt{f'_c}} d_b \quad (64b)$$

förutsatt att täckskiktet and avståndet mellan FRP stängerna är åtminstone  $1.5d_b$  och  $1.8d_b$  respektive. Här är:

- $A_b$ : tvärsnittsarea på FRP stång
- $d$ : inre hävarm
- $d_b$ : diameter på FRP stång
- $d_{cs}$ : det minsta av (a) avståndet mellan närmaste betongyta till centrum av stång eller (b) två-tredjedelar av centrum till centrum av närliggande FRP stänger
- $f'_c$ : angiven tryckhållfasthet för betongen
- $f_f$ : dimensionerande spänning i FRP stång i brottgränstillståndet
- $l_d$ : förankringlängden av FRP stänger utsatta för drag.
- $k_1$ : faktor för stångens placering.  
 $k_1=1.3$  för horisontal FRP armering i fall då 300 mm färsk betong är gjuten under förankring eller skarv.  $k_1=1.0$  för alla andra fall. Jmf. med  $\alpha$  i ACI.
- $k_2$ : faktor för betongens densitet/kvalitet.

- $k_2=1.3$  för lättbetong, låg densitet
- $k_2=1.0$  för normal betong och
- $k_2=1.2$  för betong däremellan.
- $k_3$ : faktor för stångstorlek (sammanlagd area).
  - $k_3=0.8$  för  $A_b \leq 300 \text{ mm}^2$  och
  - $k_3=0.8$  för  $A_b > 300 \text{ mm}^2$ .
- $k_4$ : faktor för typ av FRP.
  - $k_4=1.0$  för CFRP och GFRP samt
  - $k_4=1.25$  för AFRP
- $k_5$ : faktor för stångprofil.
  - $k_5=1.0$  för sandbelagda stänger eller stänger med hög friktion
  - $k_5=1.05$  för stänger med spiralformat mönster runt omkretsen
  - $k_5=1.0$  för flätade stänger
  - $k_5=1.05$  för stänger med kammar
  - $k_5=1.80$  för stänger med inbuktningar

Vidare anger CSA att dragarmeringen skall dras ut en längd  $d$  eller  $12d_b$  – den som är längst, över momentnollpunkten utom vid upplag av fritt upplagda balkar, vid den fria änden av konsoler och vid yttre upplag för kontinuerliga spann. Dessutom framhålls att man ska om möjligt ska undvika förankring i anknytning till maximal påkänning. Man anger också att längd för överlapp skall ges av tillverkaren av FRP-armeringen.

### Förankring baserad på fib bulletin No 40 (EC2)

I fib bulletin 40, (2007) finns det inte specifikt angiven någon dimensionering för förankringslängden utan man diskuterar allmänt olika modeller för förankring och hänvisar därefter till ACI samt CSA och även den Japanska dimensioneringsanvisningen. Dock pågår det ett arbete inom CEN/TC250/SC2/WG1/TG1. Här föreslås det ett uttryck för att beräkna förankringslängden enligt Ekvation (65).

$$l_{db,req} = 50\phi \left( \frac{25 \text{ MPa}}{f_{ck}} \right)^{1/2} \left( \frac{\phi}{20 \text{ mm}} \right)^{1/3} \left( \frac{1.5\phi}{c_d} \right)^{1/2} \left( \frac{f_{yd}}{435 \text{ MPa}} \right)^{3/2} \geq 12\phi \quad (65)$$

där förhållandena  $(\phi/20 \text{ mm})$  och  $(1.5\phi/c_d)$  inte får vara mindre än 0.5 respektive 0.4. För FRP armering med långtidsvärden på vidhäftningen för en given betonghållfasthet jämfört med stålarmring kan Ekvation (65) modifieras genom att ersätta  $f_{ck}$  med  $f_{ck}^*$  enligt Ekvation (66).

$$f_{ck}^* = \left( \frac{f_{bd}}{0.315} \right)^{3/2} < 1.1 f_{ck} \quad (66)$$

med

$$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad (67)$$

Här antas  $\eta_1 = 0.7$  på säkra sidan och  $\eta_2 = 1.0$  för  $\phi < 32 \text{ mm}$ . Dessutom måste man undersöka att  $l_{db,req}$  är större eller lika med:

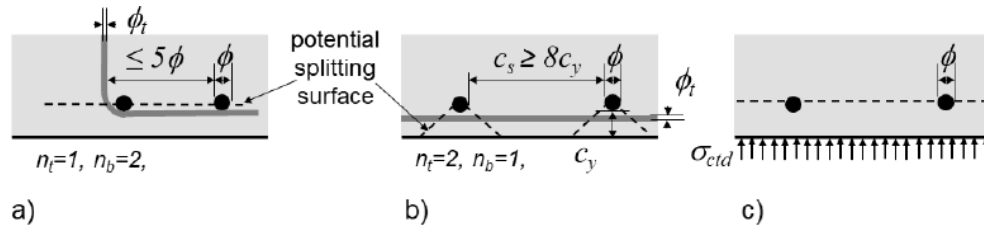
$$l_{b,reqd} = \left( \frac{\phi}{4} \right) \left( \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \right) \quad (68)$$

I de fall vi kan påräkna oss omslutande armering i form av t ex byglar är det tillåtet att reducera förankringslängden genom att byta ut parametern  $c_d$  mot  $c_{d,conf}$  i Ekvation (65), se också figur 24.

$$c_{d,conf} = c_d + \left( 20k_{conf}\rho_{conf} + 8\sigma_{ctd} / \sqrt{f_{ck}} \right) \phi \leq 3.75\phi \quad (69)$$

där

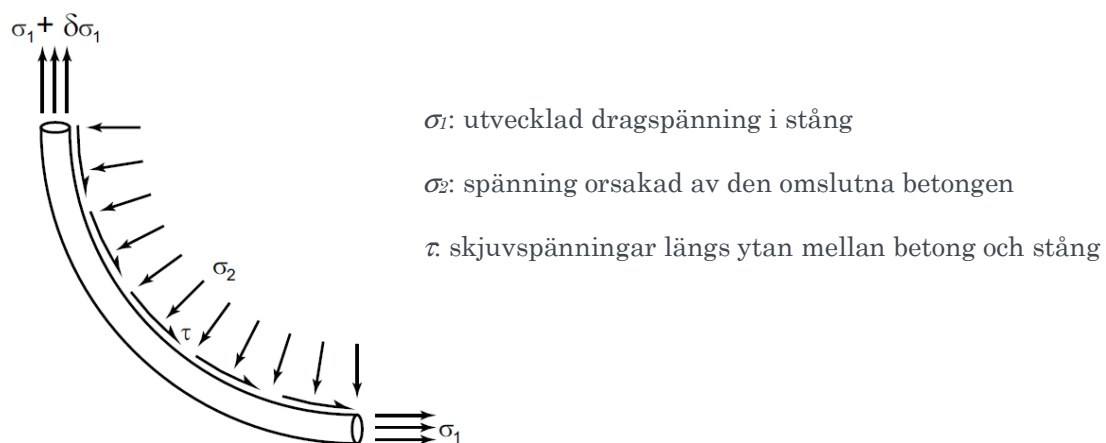
- $\rho_{conf}$ : är förhållandet mellan armeringen som ger omslutning samt den armering som förankras eller skarvas:  $\rho_{conf} = n_t \pi \phi_t^2 / 4 n_b \phi s$
- $\phi$ : diameter på den stång som förankras eller skarvas
- $\phi_t$ : diameter på den stång som ger omslutning
- $c_d$ : är ett dimensioneringsvärde som tar hänsyn till evt. spjälksprickor, se EC2.
- $n_t$ : antal möjliga sprickytor enligt figur 24
- $n_b$ : antal förankrade stänger inom sprickyta enligt figur 24
- $s$ : är centrumavstånd mellan armeringsstänger som ger omslutning
- $k_{conf}$ : anger en effektivitetsfaktor beroende på armeringsdetaljen  
 $k_{conf} = 1.0$  för omslutande armering som korsar potentiellt sprickplan och uppfyller kraven enligt figur 24 a) (avståndet minst  $5\phi$ ).  
 $k_{conf} = 0.25$  för tvärgående armering med täckskiktet  $c_y$  och uppfyller kraven enligt figur 24 b) (avståndet  $c_s \geq 8c_y$ ).  
 $k_{conf} = 0$  för övriga fall
- $\sigma_{ctd}$ : är dimensionerande yttre tryckspänning vinkelrätt mot sprickplan, se figur 24 c).



Figur 24 Definitioner av fall där förankringslängden kan reduceras på grund av (a) omslutande armering, (b) tvärgående armering samt (c) yttre tryck. CEN, (2017).

## Detaljer

Forskning har visat att draghållfastheten hos FRP-armering kan bli avsevärt reducerad vid en kombination av drag- och skjuvpåkänningar, (Ehsani m.fl., 1995), (Ishihara m.fl., 1997). Detta fenomen kan vara påtagligt för t ex byggar av FRP, se figur 25 och speciellt när kompositen upptar höga dragspänningar finns det risk för brott i hörnet. Det har också påvisats av olika forskare, (Imjai m.fl., 2007a), (Morphy m.fl., 1997), (Yang m.fl., 2004) att draghållfastheten av en böjd FRP stång kan vara så låg som 40% i jämförelse med den raka delen. Den reduktion som uppstår i hörnet av en böjd FRP stång är vanligtvis kvantifierat genom empiriska modeller som t ex den som föreslagits i den Japanska dimensioneringsanvisningen, (JSCE, 1997). I denna enkla modell är hållfastheten i den böjda delen,  $f_{fb}$ , uttryckt i termer av draghållfastheten för en rak stång,  $f_{fu}$ , och geometrin av stången, dvs. diameter  $d_b$  och radie på den böjda delen  $r_b$ .



Figur 25 Longitudinella och transversella spänningar verkande på en böjd FRP stång, efter fib bulletin No 40 (2007).

$$f_{fb} = \left( 0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fu} \leq f_{fu} \quad (70)$$

# PRAKTISK HANDHAVANDE, INSTALLATION OCH KONTROLL

## Introduktion

Från ett hanterings- och installationsperspektiv skiljer sig FRP armering inte speciellt mycket från traditionell stålarmering. En stor skillnad är dock vikten där FRP armering väger ca  $\frac{1}{4}$  av stålet vilket gör placeringen i formen ofta lättare, vilket är positivt framförallt ur ett arbetsmiljöperspektiv. En annan effekt av detta är att armeringskorgar av FRP ofta måste förankras för att inte flyta upp i samband med vibrering. FRP armering är dock känsligare mot slag och stötar samt måste även skyddas mot UV-ljus.

Därutöver är inte FRP-armering standardiserat på samma sätt som stål, detta är ofta inte ett problem. Detta innebär t ex att definition av funktion istället för mängd material föreskrivs, dvs vilken last man ska ta upp i brottgränstillståndet och de krav som ska följas i bruksgränstillståndet.

Ur ett arbetsmiljöperspektiv är det viktigt att man har på sig arbetshandskar när man handhar FRP-stängerna, lösa fibrer eller fibrer vid kapning av dessa är vassa och kan skapa irritationer. Man ska också användas sig av mask vid kapning så man undviker att andas in damm.

Krökta armeringsdetaljer måste förtillverkas då man inte kan böja stängerna på plats. FRP-armeringen kan de flesta fall inte heller utformas med samma radie som för stål, utan radien blir därmed större, normalt ca 3.5-4 gånger diameter på stången. Som tidigare nämnts, är hållfastheten lägre i böjda FRP detaljer och uppgår till ca 50% av en rak stång. Detta ska konstruktören ta hänsyn till i samband med dimensionering.

## Mottagning och förvaring

Materialleverantören ska garantera egenskaperna hos FRP armeringen, det är viktigt vid mottagning att man kontrollerar:

- Tillverkarens namn, adress och kontakt
- Typ av FRP, material och dimension
- Att godkända intyg finns från provning

Vid förvaring ska detta ske i en ren miljö och man ska skydda FRP armeringen mot:

- Olja, fett och smuts
- UV-strålning (tex genom att täcka armeringen)
- Höga temperaturer (50 °C) under längre tid
- Kemikalier som kan skada matrisen, kontrollera med materialleverantör

Var aktsam vid lyft och förflyttningar så att inte matrisen skadas, t ex släpa inte armeringen och se till att lyft sker i flera punkter. Hantera alltid FRP-stängernas med skyddshandskar.

## Installation och sammanfogning

Eftersom FRP har låg vikt i jämförelse med stål kan man montera ihop korgar och nät utanför själva arbetsplatsen och enkelt lyfta dom på plats. När man kapar FRP-armeringen ska man använda vinkelslip. Vidare gäller:

- Sammanfogning med plastband, se figur 26
- Armeringsstolar av plast

- Täcksikt minst 20 mm, avsteg kan finnas. Kontakta materialleverantör.
- Förankring av armering för att hindra upplyftning vid gjutning
- Vid placering av betongen skall man vara försiktig så man inte förflyttar armeringen
- Använd vibrator med plastskydd, vibrera inte direkt mot armeringen
- Böjda armeringsdelar måste förtillverkas
- Var försiktig när man går på armeringen, i vissa fall kan skydd behöva placeras ut
- Skarvning görs enligt konstruktörs anvisningar. Mekaniska skarvar får inte användas
- I de fall CFRP armering används får den inte vara i direkt kontakt med vanlig stålarmering på grund risken av galvanisk korrosion.



Figur 26 Sammanfogning av armering med plastband

## Kvalitetskontroll och inspektion

Kvalitetskontroll följer gängse rutiner, det som kan vara speciellt viktigt för FRP-armering är:

### Innan byggande

Att vald FRP armering uppfyller ställda krav och att dokumenterade materialegenskaper finns presenterade. Att man har tagit hänsyn till att man använder sig av ett material som skiljer sig något från vanlig armering, framförallt avseende hantering och gjutning.

### Under byggande

Hantering enligt ovan även under byggandet. Var speciellt noga med att FRP armeringen kan förflytta sig i sidled och även flyta, förankra armering. Undersök speciellt täcksikt och toleranser. Även om man kan tillåta mindre täcksikt med FRP armering får armeringen inte ligga direkt i ytan, man måste minst ha ca 1.5d i täcksikt. I figur 27 visas delar av arbetsprocessen under gjutning av en FRP armerad bro i Vermont, USA.



Figur 27 Gjutning av brodäck i Vermont i USA 2002



## REFERENSER

- Adimi M.R, Rahman A.H. and Benmokrane B., (1998), Durability of FRP Reinforcements under Tension-Tension Axial Cyclic loading, Proceedings from the First International Conference on Durability of Fibre reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, Sherbrooke, August 1998, pp 645-647.
- Almssad A., (2015), Betongkonstruktion, Studentlitteratur, ISBN 978-91-44-10996-1, p 463
- Al-Zahrani M.M., Nanni A., Al-Dulaijan S.U. and Bakis C.E., (1996), Bond of FRP to Concrete for Rod with Axisymmetric Deformations, Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-II), Montreal, QC, Canada, pp. 853-860.
- American Concrete Institute (ACI), (2007), Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, ACI 440R-07, p 100, ISBN 978-0-87031-259-5
- American Concrete Institute (ACI), (2014), An ACI Standard and Report, Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318-14), Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14), p 524, ISBN: 978-0-87031-930-3.
- American Concrete Institute (ACI), (2015), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Rebars, ACI 440.1R-15, p 84, ISBN 978-1-942727-10-1.
- Bank L.C., Olivia M.G., Russel J.S., Dieter D.A. and Dietsche J.S., 2003, Details and specification or bridge deck with FRP formwork, grid rebar, FRPRCS, Singapore, 8-10 July 2003, Edt. Kian Hwee Tan, ISBN 9812384014
- Bank L.C. and Puterman M., (1997), Microscopic Study of surface Degradation of Glass Fibre-Reinforced Polymer Rods Embedded in Concrete Castings Subjected to Environmental Conditioning, High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites, V2., ASTM STP 1302, T.S. Gates and H.H. Zureick eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, pp 191-205.
- Belarbi A. and Wang H., (2012), Durability of FRP Bars Embedded in Fibre-Reinforced-Concret, Journal of Composites for Construction, V.16., No.4., pp. 371-380.
- Benmokrane B., El-Salakawy E., El-Ragaby A. and El-Gamal S., 2007, Performance evaluation of innovative concrete bride deck slabs reinforced with fibre-reinforced-polymer bars, Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(3): 298-310.
- Benmokrane B. and Rahman H. eds. (1998), Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, Proceedings of the First International Conference (CDCC '98), QC, Canada, Fbe. 692 pp.
- Bisby L.A., Green M.F. and Kodur V.K.R., 2005, Response to Fire of Concrete Structures that Incorporate FRP, Progress in Structural Engineering and Materials, V.7., No. 3., pp. 136-149.
- Bisby L.A. and Kodur V., Evaluating the Fire Endurance of Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars: Considerations for a Holistic Approach, Composites: Part B, 38, 2007, pp. 547~558.
- Burgoyne C., ed., (2001), Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures – FRPRCS-5, Proceedings, International Conference, Cambridge, UK.

- Carlsson H., Johansson O. och Paulsson L., (1993), Glasfiberkomposit som spännarmering i slipers, Rapport TVBK-5065, Tekniska Högskolan i Lund, Avdelningen för Bärande Konstruktioner, ISSN 0349-4989, 70 p.
- CEN, (2004), Eurocode 2, Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings (EN 1992-1-1), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Cosenza E., Manfredi G. and Nanni A., eds., (2001), Composites in Construction: A Reality, Proceedings, International Workshop, Capri, Italy, ASCE, Reston, VA., 277 p.
- CSA S806-12 (R2017), (2017), Design and Construction of Building Structures with Fibre Reinforced Polymers, [www.csa.ca](http://www.csa.ca), p. 206.
- Curtis P.T. (1989), The Fatigue Behavior of Fibrous Composite Materials, Journal of Strain Analysis, 24(4), pp 235-244.
- Dejke V., (2001), Durability of FRP Reinforcement in Concrete, Literature and experiments, PhD thesis at Dept. of Building Materials, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Dolan C.W., Rizkalla S., and Nanni A., eds., (1999), Fourth International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, SP-188, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1182 p.
- Ehasani M.R., (1993), Glass-Fibre reinforcing Bars, Alternative Materials for the Reinforcement of Prestressing of Concrete, J.L. Clarke, Blackie Academic & Professional, London, UK., pp 35-54.
- Ehsani M.R., Saadatmanesh H., and Tao S., (1995), Bond of hooked glass fibre reinforced plastics (GFRP) reinforcing bars to concrete, ACI Materials Journal Vol. 122, No. 3, pp 247-257.
- El-Badry M., ed., (1996), Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-II), Proceedings of the Second International Conference, Montral, QC, Canada, 1027 p.
- GangaRao H.V.S, Taly N and Vijay P.V., (2007), Reinforced Concrete Design with FRP Composites, CRC Press, p382, ISBN 0-8247-5829-3
- GangaRao H.V.S. and Vijay P.V., (1997), Aging of Structural Composites under Varying Environmental Conditions, Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), V2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 91-98.
- Gao D., Benmokrane B. and Tighiouart B., (1998), Bond Properties of FRP rebars to Concrete, Technical Report, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 27 pp.
- Gergely J., Boyajian D.M., Young D. T., Frank, C. R. and Szabo I.F., (2007), Analysis and Testing of a Bridge Deck Reinforced with GFRP Rebars, North Carolina Department of Transportation, Resarch project No. HWY-2005-22, Dep. Of Civil Engineering, Univ. of North Carolina, April 2007, p211.
- Gerritse A., (1992), Durability Criteria for Non-metallic Tendons in an Alkaline Environment, Proceedings of the First International Conference on Advance Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-I), Canadian Society of Civil Engineering, Sherbrooke, QC, Canada, pp. 129-137.

- Hajiloo H and Green M.F., (2018), Post-fire residual properties of GFRP reinforced concrete slabs: A holistic investigation, *Composite Structures*, Vol. 201, October 2018, pp. 398-413.
- Hayes M.D., Garcia K., Verghese N. and Lesko J., (1998), The Effect of Moisture on the Fatigue Behaviour of a Glass/Vinyl Ester Composite, *Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure, (ICCI-98)*, V.1., Tuscon AZ, pp. 1-12.
- Imjai T., Guadagnini M., and Pilakoutas K., (2007a), Mechanical performance of curved FRP bars: Part I – experimental study, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*, Hong Kong, The University of Hong Kong, Hong Kong, Vol. 1, pp 333-338.
- Ishihara K., Obara T., Sato Y. and Kakuta Y., (1997), Evaluation of ultimate strength of FRP rods as bent-up portion, *Proceedings of 3rd International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement*.
- Iyer S.L. and Sen R., eds., (1991), *Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures*, *Proceedings of the Specialty Conference*, ASCE, Reston, VA, 443 p.
- JSCE, (1992), Subcommittee on Continuous Fibre reinforcement, 1992, *Proceedings of the Utilization of FRP-Rods for Concrete Reinforcement*, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, 314 pp.
- JSCE, (1997), Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforcing materials, *Research Committee on Continuous Fibre Reinforcing Materials*, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan.
- Katz A., (2000), Bond to Concrete of FRP Rebars after Cyclic Loading, *Journal of Composites for Construction*, V.4., No. 3., pp. 137-144.
- Kodur V.K.R. and Bisby I.A., (2005), Evaluation of Fire Endurance of Concrete Slabs Reinforced with Fibre-Reinforced Polymer Bars, *Journal of Structural Engineering*, V. 131. No. 1, Jan., pp 34-43.
- MacGregor J.G., and White J.L., (2012), *Reinforced concrete mechanics and design*, 6<sup>th</sup> edition, Pearson, Singapore, ISBN-13: 978-0-13-217652-1, 1177 p.
- Morphy R., Sheata E. and Rizkalla S, (1997), bent effect on strength of CFRP stirrups, *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, Japan, Japan Concrete Institute, Tokyo, Vol. 2, pp 19-26.
- Nanni A., ed., (1993), *Fibre reinforced-Plastic (FRP) reinforcement for Concrete Structures and Applications*, *Development in Civil Engineering*, V.42, 450 p.
- Nanni A., Bakis C.E., Al-Zahrani M.M., Al-Dulaijan S.U. and Boothby T.E., (1998), Effect of Cyclic Loading on Bond Behavior of GFRP rods Embedded in Concrete Beams, *Journal of Composites, Technology and Research*, V.20., No. 1, pp. 29-37.
- Newhook J. and Svecova D, (2007), *Reinforcing Concrete Structures with Fibre reinforced Polymers (ISIS Canada)*, Design Manual no. 3, version 2, September 2007, ISBN 0-9689006-6-6, p. 151
- Nigero E., Cefarelli G., Bilotta A., Manfredi G. and Cosenza E., (2011), Fire Resistance of Concrete Slabs Reinforced with FRP Bars, Part II: Experimental Results and Numerical Simulations on the Thermal field, *composites Part B Engineering*, V.42., No. 6. pp 1751-1763.
- Orangun C., Jirsa J.O. and Breen J.E., 1977, A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, *ACI Journal Proceedings*, V.74, No. 3, Mar. pp. 114-122.

- Ospina C.E. and Gross S.P., (2005), Rationale for the ACI 440.1R-06 Indirect Deflection Control Design provisions, Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-7), SP-230, C. Shield, J. Busel, S. Walkup and D. Gremel, eds. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 651-670.
- Ospina, C.E., and Bakis C.E., (2007), Indirect Flexural Crack Control of Concrete Beams and On-Way Slabs Reinforced with FRP Bars, Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Fibre Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8), T.C. Triantafillou ed. University of Patras, Greece. (CD-ROM)
- Quayyum S., (2010), Bond behaviour of fibre reinforced polymer (FRP) rebars in concrete, Master Thesis, The University of British Columbia, June 2010, p 189
- Portal N.W., (2015), Usability of Textile Reinforced Concrete: Structural Performance, Durability and Sustainability, PhD-Thesis, Chalmers University of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, ISBN 978-91-7597-233-6, p 129.
- Rahman H., Adimi R. and Crimi J., (1997), Fatigue behavior of a Carbon FRP Grid Encased in Concrete, Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), V.2., Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 219-226.
- Robert M. and Benmokrane B., (2013), Combined Effects of Saline Solution and Moist Concrete on Long-Term Durability of GFRP Reinforcing Bars, Journal of Construction and Building Materials, V.38., Jan., pp. 274-284.
- Rostasy F.S., (1997), On Durability of FRP in Aggressive Environments, Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), V.2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 107-114.
- Sakashita, M., Masuda, Y., Nakamura, K., Tanano, H., Nishida, I., and Hashimoto, T. (1997), Deflections of Continuous Fibre Reinforced Concrete Beams under High Temperatures Loading, Non-metallic (FRP) Reinforcement Concrete Struct. Proc. 3rd Int Symp., 2, 1997, pp. 51~58.
- Sentler L., Orre P., Rosell E. och Bruneby T., Fiberkompositarmering i kantbalkar, Byggkonstruktion Lunds Tekniska Högskola, Intern Rapport (In Swedish), 2004, p 42.
- Sheard P., Clarke J., Dill M., Hammersley G. and Richardsson D, (1997), Eurocrete – Taking Account of Durability or Design of FRP Reinforced Concrete Structures, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium, Vol 2, Sapporo, Oct. 1997, pp.75-82.
- Sippel T.M. and Mayer U., (1996), Bond Behavior of FRP Strands under Short-Term, Reversed and Cyclic Loading, Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridge and Structures (ACMBS-2), M.M. El-Badry ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp. 837-844.
- Steckel G.L., Hawkins G.F. and Bauer J.L., (1998), Environmental Durability of Composites for Seismic Retrofit of Bridge Columns, Fibre Composites in Infrastructure, Proceedings of the Second International Conference on Fibre Composites in Infrastructure ICCI 98, Vol. 2, Tuscon, 1998, pp. 460-475.
- Svenska Betongföreningen, (2002), Fiberkompositar (FRP) för betongkonstruktioner, Betongrapport nr 9, p 171, ISBN 91-973445-2-4.

- Takewake and Khin, (1996), Deterioration of stress rupture of FRP >Rods in Alkaline Solutions Simulation as Concrete Environment, *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M.M. El-Badry ed., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC, Canada, pp. 649-664.
- Taerwe L., ed., (1995), Non-Metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures, *Proceedings of the Second International RILEM Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-2)*, Ghent, Belgium, 714 p.
- Taerwe L. and Matthys s, (1999), FRP for Concrete Construction: Activities in Europe, *ACI – Concrete International*, October 1999, Vol. 21, No.10., pp33-36.
- Taerwe L. (Edt), fib – Technical report bulletin 40, (2007), FRP reinforcement in RC structures, p 147, ISBN 978-2-88394-080-2
- Tepfers R., Molander I., och Thalenius K., (1992), Experience from testing concrete reinforced with carbon fibre and aramid fibre strands, *XIV Nordic Concrete Congress & Nordic Concrete Industry Meeting*, 6-8 August, 1992, Icelandic Concrete Association, Reykjavik, pp. 337-347.
- Tepfers R., ed., (1993), Fibre Composites as Nonmetallic Reinforcement in Concrete, Seminar March 15-16, 1993, at Chalmers University of technology, Göteborg, Chalmers University of technology, Department of Building Materials, p-93:3, Work No 539, Göteborg, 1993, 199 p.
- Tepfers R., (1997), Bond of FRP Reinforcement in Concrete, A State-of-the-Art in preparation, *American Concrete Institute (ACI) SP-180*, 1998, pp. 493-508.
- Tepfers R., (1998), Fibre Composites FRP as reinforcement in concrete, *Modern Konstruktionsteknik '98*, Forum för avancerad konstruktionsteknik, Chalmers technical University, Göteborg, Sweden in coopion with CDB and Chalmers industriteknik, CIT, 1998-11-09, 14 p.
- Tepfers R., (2002), Test System for Bond Properties of FRP Reinforcement in Concrete, *Proceedings of the Third International Symposium on Bond in Concrete – From Research to Standards*, Budapest, Hungary, pp. 657-666.
- Tomosawa F. and Nakatsuji T, (1997), Evaluation of the ACM Reinforcement Durability by Exposure Test, *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V.2., Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 139-146.
- Tumkur M. (Edt.), (2002), CSA (Canadian Standards Association) Standard - S806-02, Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers, p177, ISBN 1-55324-853-8
- Tureyen, A. K. and Frosch R.J., (2003), Concrete Shear Strength: Another Perspective, *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 5. Sept.-Oct. pp. 609-615.
- Täljsten B., Blanksvärd T. och Sas G. (2011), *Handbok för dimensionering och utförande I samband med förstärkning av betongkonstruktioner med pålimmade fiberkompositer*, Luleå University of Technology, p 186, ISBN 978-91-7439-146-6.
- Yang X., Wei J., Nanni A. and Dharani L.R., (2004), Shape effect on the performance of carbon fibre reinforced polymer wraps, *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol. 8, No. 5, pp. 333-451.
- You Y.J., Kim J-H.J., Park Y-H. and Choi J-H., (2015), Fatigue Performance of Bridge Deck Reinforced with Cost-to-Performance Optimized GFRP rebar with 900 MPa Guaranteed tensile Strength, *Journal of Advanced Concrete Technology*, V.13., May 2015, pp. 252-262.

Uomoto T., (2000), Durability of FRP as Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, ACMBS-3, J.L. Humar and A.G. Razaqpur eds. Canadian Society for Civil Engineering Montreal, QC, Canada, pp 3-17.

Uppuluri V.S., Bakis C.E., Nanni A. and Boothby T.E., (1996), Analysis of the Bond Mechanism in FRP Reinforced Rods: The Effect of Rod Design and Properties, Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS-II), Montreal, QC, Canada, pp 893-900.

Wambeke B. and Shield C., (2006), Development Length of Glass Fibre Reinforced Polymer Bars in Concrete, ACI Structural Journal, V. 103, No. 1, Jan.-Feb., pp. 11-17.

Wang H., Zha Z. and Ye J., (2009), Fire Resistance performance of FRP Rebar Reinforced Concrete Columns, International Journal of Concrete Structures and Materials, vol. 3, No. 2, pp. 111-117, December 2009.

Wicaksono S., and Chai G.B., (2013), A review of Advances in Fatigue and Life Prediction of Fibre-reinforced Composites, Journal of Materials Design and Applications, V.227, pp. 179-195.

Wolff R., (1987), Heavy Duty Composite Material for Concrete Structures, IABSE Paris-Versailles Symposium, IABSE Reports, Vol. 55, 1987, pp. 419-424.

Wolff R. and Miesslerer H.J., (1989), New Materials for Prestressing and Monitoring Heavy Structures, Concrete International, Vol. 11, No. 9, September 1989, pp. 86-89.

## WEBBASERADE REFERENSER

(<https://www.acmanet.org/>)

(<https://www.aslanfrp.com>).

(<https://www.dextragroup.com/>).

(<https://www.fiberbar.com>).

(<https://www.fiberline.com>).

(<https://www.gminsights.com>).

(<https://www.hugesbros.com>).

(<https://www.lucintel.com>).

(<https://www.pultrall.com>).

(<https://www.quora.com>).

(<https://www.schoeck-combar.com>).

## APPENDIX A – KOMMERSIELLA FRP PRODUKTER

Vissa av de produkter som presenteras nedan har fler dimensioner. Här har också valt att endast presentera fyra materialleverantörer. Det finns fler att tillgå, men här är referenserna mer sparsamma. Materialspecifikationerna är givna av materialleverantör.

### V-Rod ([www.vrod.ca](http://www.vrod.ca))



#### V-Rod 60

|                                 |       | $\phi 10$  | $\phi 12$ | $\phi 15$ | $\phi 20$ | $\phi 25$ |
|---------------------------------|-------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Draghållfasthet, $\sigma_f$     | [MPa] | 1100       |           |           |           |           |
| Skjuvhållfasthet, $\tau_f$      | [MPa] | 180        |           |           |           |           |
| E-modul – drag, $E_f$           | [GPa] | 60         |           |           |           |           |
| Brottöjning, $\varepsilon_f$    | [%]   | 18,3       |           |           |           |           |
| Effektiv diameter, $\phi_{eff}$ | [mm]  | 10.33      | 13.59     | 17.22     | 20.39     | 26.99     |
| Vikt, $g$                       | [g/m] | 175        | 310       | 442       | 633       | 1127      |
| Matris                          |       | Vinylester |           |           |           |           |

#### V-Rod 50

|                                 |       | $\phi 6$   | $\phi 10$ | $\phi 12$ | $\phi 15$ | $\phi 20$ | $\phi 22$ | $\phi 25$ |
|---------------------------------|-------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Draghållfasthet, $\sigma_f$     | [MPa] | 1000       |           |           |           |           |           |           |
| Skjuvhållfasthet, $\tau_f$      | [MPa] | 160        |           |           |           |           |           |           |
| E-modul – drag, $E_f$           | [GPa] | 46         |           |           |           |           |           |           |
| Brottöjning, $\varepsilon_f$    | [%]   | 21,7       |           |           |           |           |           |           |
| Effektiv diameter, $\phi_{eff}$ | [mm]  | 6.65       | 9.49      | 12.56     | 15.61     | 18.52     | 21.71     | 24.66     |
| Vikt, $g$                       | [g/m] | 73.4       | 150.8     | 264.5     | 403.7     | 567.4     | 760.5     | 1012.6    |
| Matris                          |       | Vinylester |           |           |           |           |           |           |

#### V-Rod Böjd Stång

|                                       |                    | $\phi 10$  | $\phi 12$ | $\phi 15$ | $\phi 20$ | $\phi 22$ | $\phi 25$ |
|---------------------------------------|--------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Draghållfasthet, $\sigma_f$           | [MPa]              | 1022       |           |           |           |           |           |
| Hållfasthet i böj, $\sigma_b$         | [MPa]              | 460        | 459       | 450       | 463       | 452       | 446       |
| E-modul – drag, $E_f$                 | [GPa]              | 50         |           |           |           |           |           |
| Brottöjning, $\varepsilon_f$          | [%]                | 9.2        | 9.2       | 9.0       | 9.2       | 9.0       | 8.9       |
| Effektiv tvärsnittsarea, $\phi_{eff}$ | [mm <sup>2</sup> ] | 71.26      | 126.68    | 197.93    | 285.02    | 387.95    | 506.71    |
| Vikt, $g$                             | [g/m]              | 167        | 292       | 443       | 651       | 887       | 1136      |
| Matris                                |                    | Vinylester |           |           |           |           |           |

Aslan ([www.aslanfrp.com](http://www.aslanfrp.com))



Aslan 100

|                              |                    | $\phi 6$   | $\phi 10$ | $\phi 13$ | $\phi 16$ | $\phi 22$ | $\phi 25$ | $\phi 35$ | $\phi 41$ |
|------------------------------|--------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Draghållfasthet, $\sigma_f$  | [MPa]              | 896        | 827       | 758       | 724       | 655       | 620       | 482       | 413       |
| Skjuvhållfasthet, $\tau_f$   | [MPa]              | --         | --        | --        | --        | --        | --        | --        | --        |
| E-modul – drag, $E_f$        | [GPa]              | 46         |           |           |           |           |           |           |           |
| Brottöjning, $\varepsilon_f$ | [%]                | 19.4       | 17.9      | 16.4      | 15.7      | 14.2      | 13.4      | 10.4      | 9.0       |
| Effektiv area, $A_{eff}$     | [mm <sup>2</sup> ] | 31.67      | 71.26     | 126.7     | 197.9     | 387.9     | 506.7     | 958.1     | 1338      |
| Vikt, $g$                    | [g/m]              | 77.4       | 159.0     | 281.3     | 427.1     | 809.6     | 1042      | 1935      | 2872      |
| Matris                       |                    | Vinylester |           |           |           |           |           |           |           |

ComBar ([www.schoeck-combar.com](http://www.schoeck-combar.com))



ComBar

|                              |                    | $\phi 8$   | $\phi 12$ | $\phi 16$ | $\phi 20$ | $\phi 25$ | $\phi 32$ |
|------------------------------|--------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Draghållfasthet, $\sigma_f$  | [MPa]              | >1000      |           |           |           |           |           |
| Skjuvhållfasthet, $\tau_f$   | [MPa]              | >150       |           |           |           |           |           |
| E-modul – drag, $E_f$        | [GPa]              | 60         |           |           |           |           |           |
| Brottöjning, $\varepsilon_f$ | [%]                | 16.7       |           |           |           |           |           |
| Effektiv area, $A_{eff}$     | [mm <sup>2</sup> ] | 50.3       | 113       | 201       | 314       | 491       | 804       |
| Vikt, $g$                    | [g/m]              | 130        | 290       | 520       | 790       | 1210      | 1940      |
| Matris                       |                    | Vinylester |           |           |           |           |           |

Fiberbar ([www.fiberbar.com](http://www.fiberbar.com))



### Fiberbar

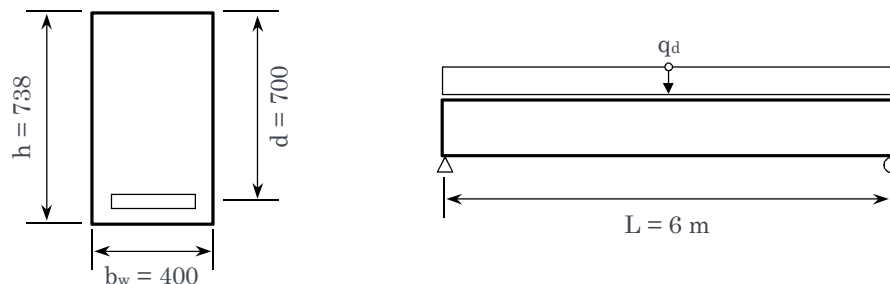
|                              |                      | $\phi 6$   | $\phi 8$ | $\phi 10$ | $\phi 12$ | $\phi 15$ | $\phi 20$ |
|------------------------------|----------------------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Draghållfasthet, $\sigma_f$  | [MPa]                | >1200      |          |           | >1000     |           |           |
| Skjuvhållfasthet, $\tau_f$   | [MPa]                | --         | --       | --        | --        | --        | --        |
| E-modul – drag, $E_f$        | [GPa]                | 50         |          |           | 40        |           |           |
| Brottöjning, $\varepsilon_f$ | [‰]                  | 24         |          |           | 25        |           |           |
| Effektiv area, $A_{eff}$     | [mm <sup>2</sup> ]   | --         | --       | --        | --        | --        | --        |
| Vikt, $g$                    | [g/cm <sup>3</sup> ] | 1.95       |          |           |           |           |           |
| Matris                       |                      | Vinylester |          |           |           |           |           |

## APPENDIX B – BERÄKNINGSEXEMPEL

### B.1 Dimensionering för böjning

#### B1.1 Förutsättningar

En balk med tvärsnitt enligt figur,  $b_w \cdot d = 0.4 \cdot 0.7 \text{ m}$ ,  $h = 0.738 \text{ m}$ , upplagslängd  $6 \text{ m}$  fritt upplagd, utförs i betong med C30/37 med stålarmering B500B alternativt FRP-armering Combar. Dimensionera för böjande moment  $M_{Ed} = 265 \text{ kNm}$  ( $q_d = 58.89 \text{ kN/m}$ ), i säkerhetsklass 3.



Figur B.1.1 Tvärsnitt och balk för dimensionering

#### B1.2 Lösningsförslag

Materialegenskaper och tvärsnittsdimensioner

Betong C30/37 ( $E_{cm} = 33 \text{ GPa}$ ,  $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$ ,  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$  och  $f_{ctm} = 2.9 \text{ MPa}$ , effektivt kryptal  $\varphi = 2.2$ )

Dragarmering B500B ( $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$ ,  $E_s = 200 \text{ GPa}$ )

För SK3;  $\gamma_d = 1.0$ ,  $\gamma = \gamma_c = 1.5$

Dragarmering FRP, Combar ( $f_{fd} = 1000 \text{ MPa}$ ,  $E_f = 60 \text{ GPa}$ ,  $\varepsilon_{fu} = 16.7\%$ ,  $\varepsilon_{fd} = 7.4$ ).

Beräkna dragarmeringsmängd för stål. Bestäm neutralaxelns läge

$$M_{Rd} = 0.8x \cdot f_{cd} \cdot b_w (d - 0.4x) = 0.8x \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 0.4 (0.7 - 0.4x) = 265 \text{ kNm} \quad (\text{B1.1})$$

$$4480x - 2560x^2 = 265 \rightarrow x = 61 \text{ mm} \quad (\text{B1.2})$$

Töjningen i armeringen bestäms utifrån töjningsfördelningen i tvärsnittet

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu} (d - x)}{x} = \frac{0.700 - 0.061}{0.061} \cdot 3.5 \cdot 10^{-3} = 36.5 \cdot 10^{-3} \quad (\text{B1.3})$$

Flyttöjningen är

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{435 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^9} = 2.175 \cdot 10^{-3} \quad (\text{B1.4})$$

Dvs. flytning sker. Kraftjämvikt i tvärsnittet ger

Vilket motsvaras av ca 5 stycken  $\phi 16$ ,  $A_s = 1005 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ .

Beräkna dragarmeringsmängd för FRP i brottgränstillståndet. FRP armeringsmängden kan överslagsmässigt beräknas enligt

$$M_u = \frac{A_f f_{fk} \left(1 - \frac{\xi}{2}\right)}{\gamma_f} \rightarrow A_f = \frac{M_u}{E_f \varepsilon_{fd} \left(1 - \frac{\xi}{2}\right)} \quad (\text{B1.5})$$

där

$$\xi = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}} \quad (\text{B1.6})$$

och

$$\varepsilon_f = \frac{-\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + (4\eta\alpha_{cc}f_{ck}\lambda\varepsilon_{cu} / \gamma_c\rho_f E_f)}}{2} \quad (\text{B1.7a})$$

med

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = 0.8 \\ \eta = 1 \end{array} \right\} \text{för } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (\text{B1.7b})$$

$$\alpha_{cc} = 1$$

och

$$\rho_{fb} = \frac{0.81(f_{ck} + 8)\varepsilon_{cu}}{f_{fk} \left[ (f_{fk} / E_{fk}) + \varepsilon_{cu} \right]} \quad (\text{B1.8a})$$

ger

$$\rho_{fb} = \frac{0.81(30 + 8) \cdot 3.5}{1000 \left[ (1000 / 60) + 3.5 \right]} = 0.00534 \quad (\text{B1.8b})$$

Då erhålles

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= \frac{-\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + (4\eta\alpha_{cc}f_{ck}\lambda\varepsilon_{cu} / \gamma_c\rho_f E_f)}}{2} = \\ &= \frac{-3.5 \cdot 10^{-3} + \sqrt{(3.5 \cdot 10^{-3})^2 + (4 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 0.8 \cdot 3.5 \cdot 10^{-3} / 1.5 \cdot 5.34 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^9)}}{2} = \\ &= 11.6 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Men enligt materialleverantören är dimensionerande värde 7.4 ‰. Vi erhåller då

$$\xi = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_f + \varepsilon_{cu}} = \frac{3.5}{7.4 + 3.5} = 0.321 \quad (\text{B1.9})$$

FRP dragarmeringen ges då av

$$A_f = \frac{M_{Ed}}{E_f \varepsilon_{fd} \left(1 - \frac{\xi}{2}\right)} = \frac{265 \cdot 10^3}{60 \cdot 10^9 \cdot 7.4 \cdot 10^{-3} \left(1 - \frac{0.321}{2}\right)} = 711 \cdot 10^{-6} m^2 \quad (B1.10)$$

Vilket motsvaras av 5 stycken  $\phi 16$ .  $A_f = 1005 \cdot 10^{-6} m^2$ . Kontrollera även att denna armering överstiger minimiarmeringen.

$$A_{f,\min} \geq 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{fk}} b_w d = 0.26 \frac{2.9}{1000} \cdot 0.3 \cdot 0.5 = 113 \cdot 10^{-6} mm^2 \quad (B1.11)$$

Undersök därefter om stukning i betongen erhållers vid brott, dvs att brott i FRP undviks

$$\sigma_f = \varepsilon_f E_f = 7.4 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 10^9 = 444 MPa < \frac{f_{fk}}{\gamma_f} = \frac{1000}{1.5} = 667 MPa; ok. \quad (B1.12)$$

Beräkna därefter nödvändig förankringslängd för FRP.

$$l_{db,req} = 50\phi \left( \frac{25 MPa}{f_{ck}} \right)^{1/2} \left( \frac{\phi}{20 mm} \right)^{1/3} \left( \frac{1.5\phi}{c_d} \right)^{1/2} \left( \frac{f_{fd}}{435 MPa} \right)^{3/2} \geq 12\phi \quad (B1.13)$$

där förhållandena  $(\phi/20 mm)$  och  $(1.5\phi/c_d)$  inte får vara mindre än 0.5 respektive 0.4. I detta fall antages raka stänger, vilket ger  $c_d$  av det minsta avståndet mellan stänger och täckskikt till sida eller underkant. Antag att  $c_d$  är 30 mm.

För FRP armering med långtidsvärden på vidhäftningen för en given betonghållfasthet jämfört med stålarmring kan Ekvation (B1.13) modifieras genom att ersätta  $f_{ck}$  med  $f_{ck}^*$  enligt Ekvation (B1.14).

$$f_{bd} = 2.25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} = 2.25 \cdot 0.7 \cdot 1.0 \cdot 1.4 = 2.2 MPa \quad (B1.14)$$

$$f_{ck}^* = \left( \frac{2.2}{0.315} \right)^{3/2} = 18.5 MPa < 1.1 f_{ck} = 1.1 \cdot 30 = 33 MPa; ok. \quad (B1.15)$$

$$\begin{aligned} l_{db,req} &= 50\phi \left( \frac{25 MPa}{f_{ck}} \right)^{1/2} \left( \frac{\phi}{20 mm} \right)^{1/3} \left( \frac{1.5\phi}{c_d} \right)^{1/2} \left( \frac{f_{fd}}{435 MPa} \right)^{3/2} = \\ &= 50 \cdot 16 \cdot \left( \frac{25}{30} \right)^{1/2} \left( \frac{16}{20} \right)^{1/3} \left( \frac{1.5 \cdot 16}{30} \right)^{1/2} \left( \frac{444}{435} \right)^{3/2} = 625 mm \geq 12\phi = 192 mm; ok. \end{aligned} \quad (B1.16)$$

Dessutom måste man undersöka att  $l_{db,req}$  är större eller lika med:

$$l_{b,rqd} = \left( \frac{\phi}{4} \right) \left( \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \right) = \left( \frac{16}{4} \right) \left( \frac{444}{2.2} \right) = 807 mm \quad (B1.17)$$

Välj således 807 mm.

Beräkna nedböjning i bruksgränstillståndet både för tvärsnitt med stålarmring och tvärsnitt med FRP-armering. Här tillämpas samma ekvationer som ges i EC2 med en anpassning till materialspecifika delar avseende FRP.

Bestäm böjstyvheten  $(EI)_I$  i osprucket stadium

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi_{(\infty, t_0)}} = \frac{33}{1 + 2.2} = 10.31 GPa \quad (B1.18)$$

$$(EI)_I = E_{c,eff} \frac{b_w h^3}{12} = 10.91 \cdot 10^9 \cdot \frac{0.4 \cdot 0.738^3}{12} = 138.1 MNm^2 \quad (B1.19)$$

Bestäm böjstyvheten  $(EI)_{II}$  i sprucket stadium II

$$(EI)_{II} = 0.5 b_w d^3 \xi^2 E_{c,eff} \left( 1 - \frac{\xi}{3} \right) \quad (B1.20)$$

$$\xi = \alpha_e \rho \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \rho}} - 1 \right) \quad (B1.21)$$

$$\alpha_{es} = \frac{E_s}{E_{c,eff}} = \frac{200}{10.31} = 19.40 \quad (B1.22)$$

$$\alpha_{ef} = \frac{E_f}{E_{c,eff}} = \frac{60}{10.31} = 5.82$$

Armeringsandelen

$$\rho_s = \frac{A_s}{b_w d} = \frac{1005 \cdot 10^{-6}}{0.4 \cdot 0.7} = 3.59 \cdot 10^{-3} \quad (B1.23)$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w d} = \frac{1005 \cdot 10^{-6}}{0.4 \cdot 0.7} = 3.59 \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{aligned} \xi_s &= \alpha_{es} \rho_s \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_{es} \rho_s}} - 1 \right) = \\ &= 19.40 \cdot 3.59 \cdot 10^{-3} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{19.40 \cdot 3.59 \cdot 10^{-3}}} - 1 \right) = 0.310 \end{aligned} \quad (B1.24)$$

$$\begin{aligned} \xi_f &= \alpha_{ef} \rho_f \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_{ef} \rho_f}} - 1 \right) = \\ &= 5.82 \cdot 3.59 \cdot 10^{-3} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{5.82 \cdot 3.59 \cdot 10^{-3}}} - 1 \right) = 0.185 \end{aligned}$$

Böjstyvheten i stadium II

$$\begin{aligned} (EI)_{II,s} &= 0.5 b_w d^3 \xi_s^2 E_{c,eff} \left( 1 - \frac{\xi_s}{3} \right) = \\ &= 0.5 \cdot 0.4 \cdot 0.7^3 \cdot 0.310^2 \cdot 10.31 \cdot 10^9 \cdot \left( 1 - \frac{0.310}{3} \right) = 60.94 MNm^2 \\ (EI)_{II,f} &= 0.5 b_w d^3 \xi_f^2 E_{c,eff} \left( 1 - \frac{\xi_f}{3} \right) = \\ &= 0.5 \cdot 0.4 \cdot 0.7^3 \cdot 0.185^2 \cdot 10.31 \cdot 10^9 \cdot \left( 1 - \frac{0.185}{3} \right) = 22.71 MNm^2 \end{aligned} \quad (B1.25)$$

Nedböjningen av en fritt upplagd balk med utbredd last ges av

$$y_{mitt} = \frac{5q_d L^4}{384EI} \quad (\text{B1.26})$$

Undersök om den dimensionerande balken klarar bruksgränsdimensioneringen

$$\zeta = 1 - \beta \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^2 \quad (\text{B1.27})$$

$$y_{tot} = \zeta y_{II} + (1 - \zeta) y_I \quad (\text{B1.28})$$

$$y_I = \frac{5q_d L^4}{384(EI)_I} = \frac{5 \cdot 58.89 \cdot 10^3 \cdot 6^4}{384 \cdot 138.1 \cdot 10^6} = 7.2 \cdot 10^{-3} m \quad (\text{B1.28a})$$

$$y_{II,s} = \frac{5q_d L^4}{384(EI)_{II,s}} = \frac{5 \cdot 58.89 \cdot 10^3 \cdot 6^4}{384 \cdot 60.94 \cdot 10^6} = 16.3 \cdot 10^{-3} m \quad (\text{B1.28b})$$

$$y_{II,f} = \frac{5q_d L^4}{384(EI)_{II,f}} = \frac{5 \cdot 58.89 \cdot 10^3 \cdot 6^4}{384 \cdot 22.71 \cdot 10^6} = 43.8 \cdot 10^{-3} m \quad (\text{B1.28c})$$

$$\begin{aligned} x_{tp,s} &= \frac{b_w h \cdot \frac{h}{2} + (\alpha_{es} - 1) \cdot A_s d}{b_w h + (\alpha_{es} - 1) \cdot A_s} = \\ &= \frac{0.4 \cdot 0.738 \cdot \frac{0.738}{2} + (19.4 - 1) \cdot 1005 \cdot 10^{-6} \cdot 0.7}{0.4 \cdot 0.738 + (19.4 - 1) \cdot 1005 \cdot 10^{-6}} = 0.389 m \\ x_{tp,f} &= \frac{b_w h \cdot \frac{h}{2} + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_f d}{b_w h + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_f} = \\ &= \frac{0.4 \cdot 0.738 \cdot \frac{0.738}{2} + (5.82 - 1) \cdot 1005 \cdot 10^{-6} \cdot 0.7}{0.4 \cdot 0.738 + (5.82 - 1) \cdot 1005 \cdot 10^{-6}} = 0.373 m \end{aligned} \quad (\text{B1.29})$$

Ideella tröghetsmomentet blir då

$$\begin{aligned} I_{I,s} &= \frac{b_w h^3}{12} + b_w h \left( x_{tp,s} - \frac{h}{2} \right)^2 + (\alpha_{es} - 1) \cdot A_s \left( d - x_{tp,s} \right)^2 = \\ &= \frac{0.4 \cdot 0.738^3}{12} + 0.4 \cdot 0.738 \cdot \left( 0.389 - \frac{0.738}{2} \right)^2 + \\ &+ (19.4 - 1) \cdot 1005 \cdot 10^{-6} \cdot (0.7 - 0.389)^2 = 15.30 \cdot 10^{-3} m^4 \end{aligned} \quad (\text{B1.30a})$$

$$\begin{aligned}
I_{I,f} &= \frac{b_w h^3}{12} + b_w h \left( x_{tp,f} - \frac{h}{2} \right)^2 + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_f (d - x_{tp,f})^2 = \\
&= \frac{0.4 \cdot 0.738^3}{12} + 0.4 \cdot 0.738 \cdot \left( 0.373 - \frac{0.738}{2} \right)^2 + \\
&+ (5.82 - 1) \cdot 1005 \cdot 10^{-6} \cdot (0.7 - 0.373)^2 = 13.92 \cdot 10^{-3} m^4
\end{aligned} \tag{B1.30b}$$

$$M_{cr,s} = \frac{f_{ctm} \cdot I_{I,s}}{x_{tp,s}} = \frac{2.9 \cdot 10^6 \cdot 15.30 \cdot 10^{-3}}{0.389} = 114.06 kNm \tag{B1.31a}$$

$$M_{cr,f} = \frac{f_{ctm} \cdot I_{I,f}}{x_{tp,f}} = \frac{2.9 \cdot 10^6 \cdot 13.92 \cdot 10^{-3}}{0.373} = 108.23 kNm \tag{B1.31b}$$

$\beta = 0.5$  vid långtidslast

$$\zeta_s = 1 - 0.5 \left( \frac{114.06}{265} \right)^2 = 0.907 \tag{B1.32a}$$

$$\zeta_f = 1 - 0.5 \left( \frac{108.23}{265} \right)^2 = 0.917 \tag{B1.32a}$$

$$\begin{aligned}
y_{tot,s} &= \zeta_s y_{II,s} + (1 - \zeta_s) y_I = \\
&= 0.907 \cdot 16.3 + (1 - 0.907) \cdot 7.2 = 15.45 mm
\end{aligned} \tag{B1.33a}$$

$$\begin{aligned}
y_{tot,f} &= \zeta_f y_{II,f} + (1 - \zeta_f) y_I = \\
&= 0.917 \cdot 43.8 + (1 - 0.917) \cdot 7.2 = 40.76 mm
\end{aligned} \tag{B1.33a}$$

Kravet är  $L/250$ , vilket är  $6000/250=24$  mm. Detta klarar balken med stålarmering, men inte balken med FRP armeringen. Öka därför mängden armering FRP till 6 stycken  $\phi 20$ , vilket ger  $A_f = 1885$   $mm^2$ . Motsvarande beräkningar ger

Armeringsandelen

$$\rho_f = \frac{A_f}{b_w d} = \frac{1885 \cdot 10^{-6}}{0.4 \cdot 0.7} = 6.73 \cdot 10^{-3} \tag{B1.34}$$

$$\begin{aligned}
\xi_f &= \alpha_{ef} \rho_f \left( \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_f \rho_f}} - 1 \right) = \\
&= 5.82 \cdot 6.73 \cdot 10^{-3} \left( \sqrt{1 + \frac{2}{5.82 \cdot 6.73 \cdot 10^{-3}}} - 1 \right) = 0.243
\end{aligned} \tag{B1.35}$$

Böjstyvheten i stadium II

$$\begin{aligned}
(EI)_{II,f} &= 0.5 b_w d^3 \xi_f^2 E_{c,eff} \left( 1 - \frac{\xi_f}{3} \right) = \\
&= 0.5 \cdot 0.4 \cdot 0.7^3 \cdot 0.243^2 \cdot 10.31 \cdot 10^9 \cdot \left( 1 - \frac{0.243}{3} \right) = 38.37 MNm^2
\end{aligned} \tag{B1.36}$$

Nedböjningen av en fritt upplagd balk med utbredd last ges av

$$y_{II,f} = \frac{5q_d L^4}{384(EI)_{II,f}} = \frac{5 \cdot 58.89 \cdot 10^3 \cdot 6^4}{384 \cdot 38.37 \cdot 10^6} = 25.89 \cdot 10^{-3} m \quad (B1.37)$$

$$\begin{aligned} x_{tp,f} &= \frac{b_w h \cdot \frac{h}{2} + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_f d}{b_w h + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_f} = \\ &= \frac{0.4 \cdot 0.738 \cdot \frac{0.738}{2} + (5.82 - 1) \cdot 1885 \cdot 10^{-6} \cdot 0.7}{0.4 \cdot 0.738 + (5.82 - 1) \cdot 1885 \cdot 10^{-6}} = 0.379 m \end{aligned} \quad (B1.38)$$

Ideella tröghetsmomentet blir då

$$\begin{aligned} I_{I,f} &= \frac{b_w h^3}{12} + b_w h \left( x_{tp,f} - \frac{h}{2} \right)^2 + (\alpha_{ef} - 1) \cdot A_f (d - x_{tp,f})^2 = \\ &= \frac{0.4 \cdot 0.738^3}{12} + 0.4 \cdot 0.738 \cdot \left( 0.379 - \frac{0.738}{2} \right)^2 + \\ &+ (5.82 - 1) \cdot 1885 \cdot 10^{-6} \cdot (0.7 - 0.379)^2 = 14.36 \cdot 10^{-3} m^4 \end{aligned} \quad (B1.39)$$

$$M_{cr,f} = \frac{f_{ctm} \cdot I_{I,f}}{x_{tp,f}} = \frac{2.9 \cdot 10^6 \cdot 14.36 \cdot 10^{-3}}{0.379} = 109.91 kNm \quad (B1.40)$$

$\beta = 0.5$  vid långtidslast

$$\zeta_f = 1 - 0.5 \left( \frac{109.91}{265} \right)^2 = 0.914 \quad (B1.41)$$

$$\begin{aligned} y_{tot,f} &= \zeta_f y_{II,f} + (1 - \zeta_f) y_I = \\ &= 0.914 \cdot 25.89 + (1 - 0.914) \cdot 7.2 = 24.3 mm \end{aligned} \quad (B1.42)$$

Vilket då får anses vara godtagbart i det aktuella fallet.

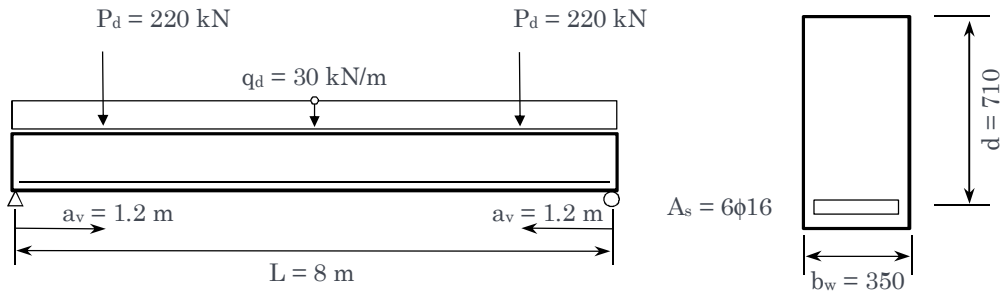
Kommentarer: Genom att materialleverantören rekommenderat relativt lågt nyttjande av FRP stången i brottgränstillståndet så tillser man att momentkapaciteten är så pass mycket högre att brottet blir tryckbrott. Det framgår tydligt också att det är bruksgränstillståndet som blir dimensionerande. Detta betyder att man har en avsevärd överkapacitet i brottgränstillståndet. Om möjligt skulle man i det aktuella fallet ökat höjden på balken i samband med FRP armering. Exemplet gjordes för att läsare ska kunna jämföra stålarmering och FRP armeringen – skillnader och likheter.



## B.2 Dimensionering för tvärkraft

### B.2.1 Förutsättningar

Dimensioneringen tar utgångspunkt i EC2, se också (Almssad, 2015). Kontrollera om betongbalken i figur B.1 har tillräcklig tvärkraftskapacitet. Kontroll skall göras i brottgränstillståndet och för vänstra balkänden. Dimensionera för maximalt värde efter reduktion av last nära upplag. Balken är armerad med stålarmering för böjning. Dimensioneringen genomförs för byglar av stålarmering, därefter för byglar av FRP.  $P_d = 220 \text{ kN}$ ,  $q_d = 30 \text{ kN/m}$  (inklusive egentygnd).



Figur B.2.1 Betongbalk för dimensionering

### B.2.2 Lösningsförslag

Dimensionerande materialegenskaper

Betong C25/30 ( $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$  och  $f_{cd} = 16.7 \text{ MPa}$ )

Bygelarmering B500B,  $\phi 8 \text{ mm}$  ( $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ ,  $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$ ,  $A_{sw}$  (1 skär) =  $50,26 \text{ mm}^2$ )

Bygelarmering FRP, Combar  $\phi 12 \text{ mm}$ , ( $E_f = 60 \text{ GPa}$ ,  $f_{fu} = 1000 \text{ MPa}$ ,  $A_{fw}$  (1 skär) =  $113,1 \text{ mm}^2$ ,  $r = 30 \text{ mm}$ )

Beräkna dimensionerande tvärkraft och upplagsreaktioner. Moment kring B

$$R_A \cdot 8 - P_d \cdot 6.8 - \frac{q_d \cdot 8^2}{2} - P_d \cdot 1.2 = 0 \quad (\text{B.2.1a})$$

$$R_A = \frac{220(1.2 + 6.8) + \frac{q_d \cdot 8^2}{2}}{8} = 340 \text{ kN} = V_{Ed,A} \quad (\text{B.2.1b})$$

$$\uparrow: R_A + R_B - 2P_d - q_d \cdot 8 = 0 \rightarrow R_B = 340 \text{ kN} = V_{Ed,B} \quad (\text{B.2.2})$$

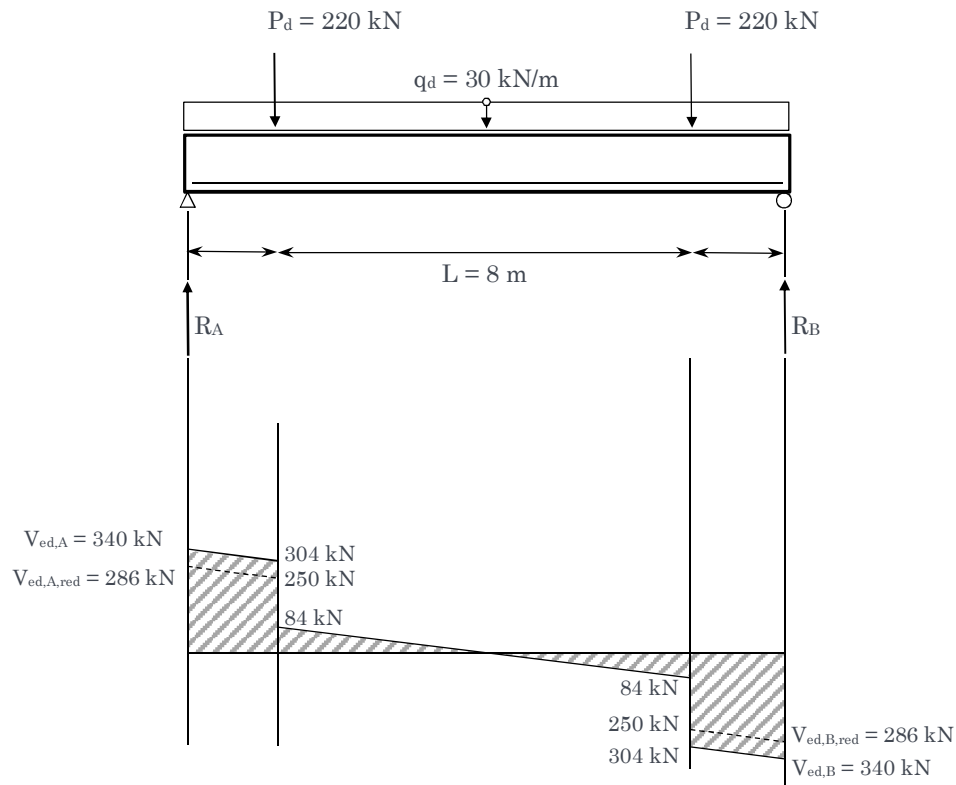
$$V_{Ed,(1,2)} = V_{Ed,A} - q_d \cdot 1.2 = 340 - 30 \cdot 1.2 = 304 \text{ kN} \quad (\text{B.2.3})$$

Inverkan av last nära upplag

$$2d = 2 \cdot 0.71 = 1.42 > 1.2 \text{ m} \quad (\text{B.2.4})$$

Lasten ligger inom området 1.42 m, dvs. reduktion krävs enligt:

$$\begin{aligned}
V_{Ed,red} &= V_{Ed,max} - \left( q_d \frac{2d}{2} - 0.25q_d \frac{0.5d}{2} \right) - P_d \left( 1 - \frac{a_v}{2d} \right) = \\
&= V_{Ed,max} - 0.94q_d d - P_d \left( 1 - \frac{a_v}{2d} \right) = \\
&= 340 - 0.94 \cdot 30 \cdot 0.71 - 220 \left( 1 - \frac{1.2}{2 \cdot 0.71} \right) = 285.6 \text{ kN}
\end{aligned} \tag{B.2.5}$$



Figur B.2.2 Tvärkraftsdiagram

Beräkna tvärkraftskapaciteten utan tvärkraftsarmering

Kontroll av livtryckbrott görs enligt

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} \tag{B.2.6}$$

$$V_{Rd,max} = 0.5 \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d \tag{B.2.7a}$$

$$\nu = 0.6 \left[ 1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0.6 \left[ 1 - \frac{25}{250} \right] = 0.54 \text{ MPa} \tag{B.2.7b}$$

$$V_{Rd,max} = 0.5 \cdot 0.54 \cdot 16.7 \cdot 10^6 \cdot b \cdot 350 \cdot 710 = 1120.5 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 340 \text{ kN}; \text{ok.} \tag{B.2.7c}$$

Kontroll av böjskjuvbrott görs enligt

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \tag{B.2.8}$$

$$V_{Rd,c} = \left[ C_{Rd,c} \cdot k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} b_w d \right] \geq (v_{\min} \cdot b_w \cdot d) \quad (\text{B.2.9})$$

där  $f_{ck}$  i  $[MPa]$  och  $b_w d$  i  $[mm]$ .

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{710}} = 1.53 < 2.0; ok. \quad (\text{B.2.10})$$

Tvärkraftskapaciteten vid ändstöd med 6  $\phi 16$  vid böjning

$$\rho_l = \frac{A_{si}}{b_w d} = \frac{6 \cdot 201 \cdot 10^{-6}}{0.35 \cdot 0.71} = 0.00485 < 0.02; ok. \quad (\text{B.2.11})$$

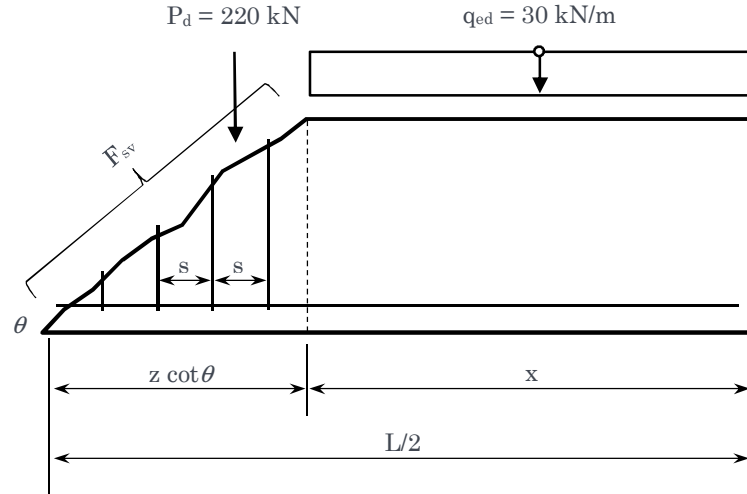
$$C_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c} = \frac{0.18}{1.5} = 0.12 \quad (\text{nationell parameter}) \quad (\text{B.2.12})$$

$$V_{Rd,c} = \left[ 0.12 \cdot 1.53 (100 \cdot 0.00485 \cdot 25)^{\frac{1}{3}} 350 \cdot 710 \right] = 104.8 kN \quad (\text{B.2.13})$$

$$v_{\min} = 0.035 \sqrt{k^3 \cdot f_{ck}} = 0.035 \sqrt{1.53^3 \cdot 25} = 0.331 \quad (\text{B.2.14})$$

$$V_{Rd,c} \geq (v_{\min} \cdot b_w \cdot d) = 0.331 \cdot 350 \cdot 710 = 82.3 kN \quad (\text{B.2.15})$$

Men  $V_{Rd,c} = 104.8 kN < V_{Ed,A,red} = 285.9 kN$  (ej ok.). Tvärkraftsarmering vid stöd A och stöd B behövs, reduktion av last nära upplag hjälper inte. Vid dimensionering av tvärkraftsarmering väljs både vid stål och FRP vertikala byglar,  $z \approx 0.9d = 0.64 m$  (inre hävarm),  $\cot \theta = 2.5$  (övre gräns för  $\cot \theta$  enligt rekommenderat värde).



Figur B.2.3 Figuren visar jämviktsvillkoren.

$$x = \frac{L}{2} - z \cot \theta = \frac{L}{2} - 0.9d \cdot \cot \theta = 4 - 0.9 \cdot 0.71 \cdot 2.5 = 2.4 m \quad (\text{B.2.16})$$

Tvärkraften i snitt 1 är

$$V_1 = q_d \cdot x = 30 \cdot 2.4 = 72 \text{ kN} \quad (\text{B.2.17})$$

Vertikal jämvikt kräver att kraften i byglarna är lika med tvärkraften. Kraften i byglarna är således:

$$F_{sw} = \frac{z \cdot \cot \theta}{s} \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd} = V_1 \quad (\text{B.2.18})$$

Erforderlig armeringsarea per längdenhet blir

$$\frac{A_{sw,q}}{s} = \frac{V_1}{f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{72 \cdot 10^3}{435 \cdot 0.64 \cdot 2.5} = 103.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{m} \quad (\text{B.2.19})$$

Inverkan av last nära upplag beaktas, reducerad tvärkraft av koncentrerad last  $P_d$  blir

$$V_{red,P} = P_d \cdot \left(1 - \frac{a_v}{L}\right) \left(\frac{a_v}{2d}\right) = 220 \cdot \left(1 - \frac{1.2}{8}\right) \left(\frac{1.2}{2 \cdot 0.71}\right) = 158 \text{ kN} \quad (\text{B.2.20})$$

Armeringen för reducerad tvärkraft blir

$$A_{sw,P} = \frac{V_{red,P}}{f_{ywd}} = \frac{158 \cdot 10^3}{435 \cdot 10^6} = 363.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (\text{B.2.21})$$

Armeringen fördelas inom längden  $0.75a_v$

$$\frac{A_{sw,P}}{s} = \frac{A_{sw,P}}{0.75a_v} = \frac{363.2 \cdot 10^{-6}}{0.75 \cdot 1.2} = 403.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{m} \quad (\text{B.2.22})$$

Total skjuvarmering

Mellan upplaget och punktlasten summeras den erforderliga armeringen för utbredd last och för punktlast enligt:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{A_{sw,q}}{s} + \frac{A_{sw,P}}{s} = (103.5 + 403.6) \cdot 10^{-6} = 507.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{m} \quad (\text{B.2.23})$$

$$s = \frac{101 \cdot 10^{-6}}{507.1 \cdot 10^{-6}} = 0.19 \text{ m} \quad (\text{B.2.24})$$

I övriga delar är minimiarmeringen dimensionerande. Kontroll görs enligt:

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} > \rho_{w,\min} = 0.08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (\text{B.2.25a})$$

$$\rho_w = \frac{101 \cdot 10^{-6}}{0.2 \cdot 0.35 \cdot 1} = 0.00144 > \rho_{w,\min} = 0.08 \frac{\sqrt{25}}{500} = 0.0008; \text{ok.} \quad (\text{B.2.25b})$$

$$S_{L,\max} = 0.75 \cdot d(1 + \cot \alpha) = 0.75 \cdot 0.71 \cdot (1 + 0) = 0.532m \quad (\text{B.2.26})$$

Beräkna minsta tvärkraftsarmering

$$\begin{aligned} \rho_w &= \frac{A_{sw}}{s \cdot b_w} > \rho_{w,\min} \rightarrow \left( \frac{A_{sw}}{s} \right)_{\min} = \rho_{w,\min} \cdot b_w = \\ &= 0.0008 \cdot 0.35 = 280 \cdot 10^{-6} m^2 / m \end{aligned} \quad (\text{B.2.27})$$

$$s = \frac{101 \cdot 10^{-6}}{280 \cdot 10^{-6}} = 0.36m < 0.75d = 0.75 \cdot 0.710 = 0.532m; ok. \quad (\text{B.2.28})$$

Svar: Välj stålbyglar för tvärkraftsarmering vid stöd A och stöd B, byglar  $\phi 8$  s 190 mm. Minsta tvärkraftsarmering för resten av balken byglar  $\phi 8$  s 350 mm.

Motsvarande beräkning görs för byglar av FRP. Längsarmeringen är av stål.

$$f_{fv} = 0.0045 \cdot E_f \leq f_{fb} \quad (\text{B.2.29})$$

$$f_{fv} = 0.0045 \cdot 60 \cdot 10^9 = 270 \text{ MPa} \quad (\text{B.2.30})$$

Erforderlig armeringsarea per längdenhet blir

$$\frac{A_{fv,q}}{s} = \frac{V_1}{f_{fv} \cdot z \cdot \cot \theta} = \frac{72 \cdot 10^3}{270 \cdot 0.64 \cdot 2.5} = 166.7 \cdot 10^{-6} m^2 / m \quad (\text{B.2.31})$$

Inverkan av last nära upplag beräknas (samma som tidigare). Armeringen för reducerad tvärkraft blir

$$A_{fv,P} = \frac{V_{red,P}}{f_{fv}} = \frac{158 \cdot 10^3}{270 \cdot 10^6} = 585.2 \cdot 10^{-6} m^2 \quad (\text{B.2.32})$$

Armeringen fördelas inom längden  $0.75a_v$

$$\frac{A_{fv,P}}{s} = \frac{A_{fv,P}}{0.75a_v} = \frac{585.2 \cdot 10^{-6}}{0.75 \cdot 1.2} = 650.2 \cdot 10^{-6} m^2 / m \quad (\text{B.2.33})$$

Total skjuvarmering

$$\frac{A_{fv}}{s} = \frac{A_{fv,q}}{s} + \frac{A_{fv,P}}{s} = (166.7 + 585.2) \cdot 10^{-6} = 752 \cdot 10^{-6} m^2 / m \quad (\text{B.2.34})$$

$$s = \frac{226.2 \cdot 10^{-6}}{752 \cdot 10^{-6}} = 0.30m \quad (\text{B.2.35})$$

I övriga delar är miniarmeringen dimensionerande. Kontroll görs enligt

$$\begin{aligned} \rho_{fw,\min} &= 0.08 \sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{1}{0.0045 E_f} = \\ &= 0.08 \cdot \sqrt{25} \cdot \frac{1}{270} = 0.00148 \end{aligned} \quad (\text{B.2.36})$$

$$\rho_{fw} = \frac{A_{fv}}{s \cdot b_w \cdot \sin \alpha} > \rho_{fw, \min} \quad (\text{B.2.37})$$

$$\rho_{fw} = \frac{226 \cdot 10^{-6}}{0.3 \cdot 0.35 \cdot 1} = 0.00215 > \rho_{fw, \min}; ok. \quad (\text{B.2.38})$$

Beräkna minsta tvärkraftsarmering

$$\begin{aligned} \rho_{fw} = \frac{A_{fv}}{s \cdot b_w} > \rho_{fw, \min} &\rightarrow \left( \frac{A_{fw}}{s} \right)_{\min} = \rho_{fw, \min} \cdot b_w = \\ &= 0.00148 \cdot 0.35 = 518 \cdot 10^{-6} m^2 / m \end{aligned} \quad (\text{B.2.39})$$

$$s = \frac{226 \cdot 10^{-6}}{518 \cdot 10^{-6}} = 0.436 m < 0.75d = 0.75 \cdot 0.710 = 0.532 m; ok. \quad (\text{B.2.40})$$

Kontrollera vidare att dragspänningen i bygels krök uppfyller villkoret nedan

$$f_{fb} = \left( 0.05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fu} = \left( 0.05 \cdot \frac{30}{12} + 0.3 \right) \cdot 1000 \cdot 10^6 = 425 MPa \leq f_{fu}; ok. \quad (\text{B.2.41})$$

I tillägg till detta ska överlappslängden för bygeln vara minst  $12d$ , dvs  $144 \text{ mm}$ .

Svar: Välj FRP tvärkraftsarmering stöd A och stöd B, byglar  $\phi 12 \text{ s } 300 \text{ mm}$ . Minsta tvärkraftsarmering för resten av balken byglar  $\phi 12 \text{ s } 400 \text{ mm}$ .

Kommentar: I det aktuella fallet hade byglar  $\phi 10$  fungerat, dock hade den valda materialleverantören inte den dimensionen. Vidare hade man fått ersatt Ekvation (B.9) med ekvationen nedan om man hade haft FRP armering som längsarmering.

$$V_{cf} = 0.12 \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \left( 100 \frac{A_f}{b_w d} \frac{E_f}{E_s} \phi_{\epsilon} f_{ck} \right)^{1/3} b_w d \quad (\text{B.2.42})$$

## APPENDIX C – INSTALLERAD FRP ARMERING TOM 2016

I tabell nedan har de broar som författaren funnit i litteraturen sammanställts. Materialet är sammanställt från leverantörsdata, webben samt artiklar och böcker. Materialet är inte komplett utan visar på delar av det som blivit installerat i världen. Dock är både USA och Kanada helt dominerande när det gäller FRP installationer i broar. Obs installationerna är enbart FRP armering där inte annat anges.

Tabell C.1 – Broprojekt i USA med installerad FRP armering (L:längd, B:bredd, P:platta, B:Balk, U:Upplag/Stöd, S:stång, N:nät, K: spännkabel/lina

| Leverantör               | Namn                                                      | Plats                      | År   | L (m)  | B (m) |         |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|------|--------|-------|---------|
| Autocon Composites       | Rollinsford Bridge, Rollins Road over Main St. and B&M RR | Rollinsford, New Hampshire | 2000 | 30,48  | 9,75  | P/S/N   |
| Composite Deck Solutions | Salem Ave Bridge (5) (State Rt 49)                        | Dayton, Ohio               | 2000 | 33,53  | 15,24 | P/S/N   |
| Diversified Composites   | Salem Ave Bridge (4) (State Rt 49)                        | Dayton, Ohio               | 1999 | 294,13 | 15,24 | P/S/N   |
| Diversified Composites   | US 151 over SH 26                                         | Fond de Lac, Wisconsin     | 2003 | 65,23  | 11,89 | P/S/N   |
| Hughes Bros. Inc.        | Fate Bridge                                               | Coral Gables, Florida      | 2015 | 62,79  | 3,96  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | 53rd Ave Bridge (1)                                       | Bettendorf, Iowa           | 2001 | 18,90  | 29,26 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Salem Ave Bridge (6) (State Rt 49)                        | Dayton, Ohio               | 1999 | 294,13 | 1,83  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Walker Street Bridge                                      | Rolla, Missouri            | 1999 | 3,05   | 10,97 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | North Kayford Bridge                                      | Charleston, West Virginia  | 2000 | 13,11  | 7,32  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Sierrita de la Cruz Creek Bridge                          | Amarillo, Texas            | 2000 | 48,77  | 13,72 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | South Acme Bridge                                         | Charleston, West Virginia  | 2000 | 7,32   | 9,14  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | North Acme Bridge                                         | Charleston, West Virginia  | 2001 | 7,32   | 9,14  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | North Kayford Bridge                                      | Charleston, West Virginia  | 2001 | 7,32   | 10,97 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | South Acme Bridge                                         | Charleston, West Virginia  | 2001 | 10,36  | 7,32  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | I-225 & SH83 Interchange                                  | Aurora, Colorado           | 2002 | 409,96 | 12,80 | P/S/N/K |
| Hughes Bros., Inc.       | US 151 over SH 26                                         | Fond de Lac, Wisconsin     | 2003 | 32,61  | 13,11 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Cartoogechay Bridge                                       | Macon Co, North Carolina   | 2004 | 48,16  | 7,92  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Howard Lane Bridge                                        | Austin, Texas              | 2004 | 0,30   | 14,63 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Southview Bridge                                          | Rolla, Missouri            | 2004 | 12,19  | 12,19 | P/S/N/K |
| Hughes Bros., Inc.       | Green County Bridge                                       | Springfield, Missouri      | 2005 | 43,89  | 7,32  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Middle Road Bridge over Crow Creek                        | Bettendorf, Iowa           | 2006 | 63,40  | 22,25 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Boone Co Bridge                                           | Columbia, Missouri         | 2007 | 64,62  | 7,62  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Roaring Brooke Bridge                                     | Matinsburg, New York       | 2008 | 11,89  | 7,92  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | Emma Park Bridge                                          | Helpner, Utah              | 2009 | 26,82  | 27,13 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc.       | State Street Bridge                                       | Pleasant Grove, Utah       | 2009 | 37,19  | 28,04 | P/S/N   |

|                                                               |                                                              |                               |      |         |       |          |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------|------|---------|-------|----------|
| Hughes Bros., Inc.                                            | Miami Airport Mover                                          | Miami, Florida                | 2010 | 76,20   | 6,10  | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | Miami Metrorail                                              | Miami, Florida                | 2010 | 4023,36 | 3,05  | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | Riverside Underpass                                          | Austin, Texas                 | 2013 | N/A     | N/A   | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | I-635 Over State Street                                      | Kansas City, Kansas           | 2014 | 69,49   | 20,73 | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | Schuyler County Bridge                                       | Glenwood, Missouri            | 2014 | 43,89   | N/A   | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | Elkhorn Bridge                                               | Washington, Nebraska          | 2015 | N/A     | N/A   | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | University of Miami Pedestrian Bridge                        | Miami, Florida                | 2015 | 43,89   | N/A   | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | I-84 Bridge                                                  | Manchester, Connecticut       | 2016 | 32,31   | 20,12 | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | Penobscot River Bridge                                       | Howland/Enfield, Maine        | 2016 | 286,51  | 12,19 | P/S/N    |
| Hughes Bros., Inc.                                            | T.H. 42 Over Dry Creek –                                     | Wabasha, Minnesota            | 2016 | 24,38   | N/A   | P/S/N    |
| Marshall Composite Technologies                               | Buffalo Creek Bridge                                         | McKinleyville, West Virginia  | 1996 | 53,95   | 9,14  | P/S/N    |
| Marshall Industries Composites LLC                            | Roger's Creek (US 460 )                                      | Bourbon County, Kentucky      | 1997 | 11,89   | 10,97 | P/S/N    |
| Marshall Industries Composites LLC                            | Bayonne Bridge                                               | New York, New York            | 1999 | 24,69   | 12,19 | P/S/N    |
| Marshall Industries Composites LLC                            | Pierce St Bridge                                             | Lima, Ohio                    | 1999 | 50,90   | 14,02 | P/S/N    |
| Marshall Industries Composites LLC                            | Parker @I-225 Bridges                                        | Denver, Colorado              | 2000 | 39,62   | 10,97 | P/S/N/K  |
| Marshall Industries Composites LLC                            | Two Mile Creek                                               | Clark County, Kentucky        | 2001 | 19,51   | 7,92  | P/S/N    |
| Marshall Industries Composites                                | Walters Street Bridge                                        | St. James, Missouri           | 2001 | 7,32    | 7,92  | P/S/N    |
| Marshall Industries Composites LLC                            | Martha Queen's Bridge                                        | Lewis County, West Virginia   | 2002 | 15,24   | 9,14  | P/S/N    |
| Mitsubishi Chemical / Tokyo Rope Mfg. Co., Ltd.               | Bridge St Bridge over Rouge River                            | Southfield, Michigan          | 2001 | 60,35   | 9,14  | P/S/N/K  |
| N/A                                                           | Barrackville Covered Bridge                                  | Marion County, West Virginia  | 1999 | 39,93   | 4,88  | K        |
| N/A                                                           | Dans Run Slab Bridge                                         | Mineral County, West Virginia | 2000 | 3,66    | 4,27  | P/S/N    |
| N/A                                                           | Route 250 Broad Street River over Tuckahoe Creek             | Virginia                      | 2001 | N/A     | N/A   | P/S/N    |
| No Rust Rebar Inc. / Hughes Bros. Inc. / Tokyo Rope Mfg. Ltd. | Innovation Bridge                                            | Coral Gables, Florida         | 2016 | 21,34   | 4,57  | 100% FRP |
| Pultrall, Inc.                                                | Morristown Bridge - Route 100 over Ryder Brook (Bridge #213) | Morristown, Vermont           | 2002 | 43,89   | 10,36 | P/S/N    |
| Pultrall, Inc.                                                | Thayer Road Bridge over I-65                                 | Newton County, Indiana        | 2004 | 58,22   | 10,67 | P/S/N    |
| Pultrall, Inc.                                                | Millport Slough Bridge                                       | Glenneden Beach, Oregon       | 2011 | 88,39   | 24,38 | P/S/N    |
| Pultrall, Inc.                                                | Steep Falls Bridge                                           | Cumberland, Maine             | 2014 | N/A     | N/A   | P/S/N    |
| Pultrall, Inc.                                                | Enfield Bridge                                               | Howland, Maine                | 2015 | N/A     | N/A   | P/S/N    |
| Pultrall, Inc.                                                | Thomaston Bridge                                             | Thomaston, Maine              | 2016 | N/A     | N/A   | P/S/N    |
| Pultrall, Inc.                                                | Walt Whitman Bridge                                          | Delaware River, PA & NJ       | 2016 | N/A     | N/A   | P/S/N    |
| Seaward International                                         | Walt Whitman Bridge                                          | Philadelphia, Pennsylvania    | 1998 | N/A     | N/A   | P/S/N    |
| Seaward International                                         | 150052 SR 682                                                | St Petersburg, Florida        | 2000 | 76,20   | 13,72 | P/S/N    |
| Seaward International                                         | Moon River                                                   | Chatham County, Georgia       | 2000 | 400,20  | 10,67 | P/S/N    |
| Seaward International                                         | Seabreeze Bridge SR 430                                      | Volusia County, Florida       | 2000 | 97,54   | 11,28 | P/S/N    |

|                       |                          |                         |      |        |       |       |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------|------|--------|-------|-------|
| Seaward International | Skidaway Narrows         | Chatham County, Georgia | 2000 | 307,24 | 10,67 | P/S/N |
| Seaward International | Summer Street            | Boston, MA              | 2000 | 153,62 | 30,48 | P/S/N |
| Teijin Ltd.           | M-15 over Goodings Creek | Vassar, Michigan        | 2000 | 14,94  | 13,72 | P/S/N |

Tabell C.2 – Broprojekt i Kanada med installerad FRP armering (L:längd, B:bredd, P:platta, B:Balk, U:Upplag/Stöd, S:stång, N:nät, K: spännkabel/lina

| Leverantör         | Namn                             | Plats                              | År   | L (m)  | B (m) |         |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------------|------|--------|-------|---------|
| Autocon Composites | Salmon River Bridge              | Kemptown, Nova Scotia              | 1995 | 31,09  | 14,02 | P/S/N   |
| Autocon Composites | Chatham Bridge                   | Chatham, Ontario                   | 1996 | 65,84  | 10,06 | P/S/N   |
| Autocon Composites | Waterloo Creek Bridge            | Vancouver Island, British Columbia | 1997 | 24,99  | 11,89 | P/S/N   |
| Autocon Composites | Centre Street Bridge             | Calgary, Alberta                   | 2000 | 135,33 | 6,10  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Trout River Bridge               | KM 732 Alcan Hwy, British Columbia | 2003 | 32,61  | 13,11 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Clarke Road Bridge               | London, Ontario                    | 2004 | 18,29  | 12,19 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Becketts Bridge                  | Wainfleet, Ontario                 | 2006 | 51,21  | 7,92  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Brant Bowstring Bridge           | Brantford, Ontario                 | 2006 | 46,94  | 9,75  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Cherry Ave Bridge                | Lincoln, Ontario                   | 2006 | 16,76  | 8,84  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Glenmore Trail Pedestrian Bridge | Calgary, Alberta                   | 2006 | 33,53  | 3,66  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Ottawa Pedestrian Bridge         | Ottawa, Ontario                    | 2006 | 106,68 | 6,10  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Red River Bridge TCH#1E          | Winnipeg, Manitoba                 | 2006 | 696,16 | 15,24 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Smith River Bridge               | Edmonton, Alberta                  | 2006 | 15,24  | 9,14  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | South Perimeter Bridge           | Winnipeg, Manitoba                 | 2006 | 524,26 | 15,24 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Baden Creek Bridge               | Toronto, Ontario                   | 2007 | 12,80  | 11,58 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Clarks Mill Bridge               | Summerside, Prince Edward Island   | 2007 | 24,38  | 7,92  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Maple Leaf Bridge                | Toronto, Ontario                   | 2007 | 29,26  | 14,94 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Queens Bridge                    | Toronto, Ontario                   | 2007 | 38,71  | 14,94 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Rock Cliff Bridge                | Toronto, Ontario                   | 2007 | 16,76  | 14,94 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | 3rd Concession Rd Bridge         | Windsor/Chatham, Ontario           | 2008 | 57,00  | 9,75  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Bow Trail Bridge Barrier Wall    | Calgary, Alberta                   | 2008 | 533,40 | 1,22  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Bronson Ave Canal Bridge         | Ottawa, Ontario                    | 2008 | 93,88  | 30,48 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | CNR Waterdown Rod Bridge         | Burlington, Ontario                | 2008 | 64,62  | 7,62  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | County Rd 17 Bridge Railing      | Hawkesbury, Ontario                | 2008 | 211,84 | 1,22  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Eglinton Ave Bridge              | Mississauga, Ontario               | 2008 | 53,34  | 1,22  | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Main Street Bridge               | Cambridge, Ontario                 | 2008 | 57,61  | 17,98 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Mather Creek Bridge              | Emo, Ontario                       | 2008 | 13,41  | 10,67 | P/S/N/K |
| Hughes Bros., Inc. | Montrose Bridge                  | Prince Co, Prince Edward Island    | 2008 | 52,12  | 12,80 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | Sturgeon Creek Bridge            | Emo, Ontario                       | 2008 | 13,72  | 10,67 | P/S/N/K |
| Hughes Bros., Inc. | 18th Street Bridge               | Brandon, Manitoba                  | 2009 | 120,09 | 16,46 | P/S/N   |
| Hughes Bros., Inc. | 18th Street Bridge               | Brandon, Manitoba                  | 2010 | 120,09 | 16,46 | P/S/N   |

|                                |                                   |                               |      |        |       |           |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------|--------|-------|-----------|
| Hughes Bros., Inc.             | Bloor Street Bridge               | Toronto, Ontario              | 2010 | 45,72  | 1,83  | P/S/N     |
| Hughes Bros., Inc.             | Darnley Bridge                    | Darnley, Prince Edward Island | 2010 | 137,16 | 14,63 | P/S/N     |
| Hughes Bros., Inc.             | Ross' Corner Bridge               | North Bedeque, Prince Edward  | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Hughes Bros., Inc.             | Washington County Bridge          | Potosi, Missouri              | 2012 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Hughes Bros., Inc.             | CPR Overhead Bridge               | Port Hope, Ontario            | 2014 | N/A    | N/A   | U         |
| Hughes Bros., Inc.             | Wyandot Bridge                    | Moorefield, Ontario           | 2016 | N/A    | N/A   | U         |
| Marshall Industries Composites | Crowchild Trail Bridge            | Calgary, Alberta              | 1997 | 89,92  | 10,97 | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Taylor Bridge                     | Manitoba                      | 1995 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Joeffre Bridge                    | Sherbrook, Quebec             | 1997 | 7,32   | 11,58 | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Pike River Bridge                 | Montreal, Quebec              | 1997 | 9,14   | 6,10  | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Hall's Harbor Warf                | Hall's Harbor, Nova Scotia    | 1999 | 39,93  | 4,88  | P/S/N/B/K |
| Pultrall, Inc.                 | Wotton Bridge                     | Wotton, Quebec                | 2001 | 30,48  | 7,92  | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Magog Bridge                      | Magog, Quebec                 | 2002 | 85,34  | 15,24 | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Cookshire-Eaton Bridge            | Quebec                        | 2003 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Shell River Bridge                | Winnipeg, Manitoba            | 2004 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Val-Alain - Trans Canada Hwy. 20E | Quebec                        | 2004 | N/A    | N/A   | P/S/N/U   |
| Pultrall, Inc.                 | Melbourne Bridge, Rt 55N          | Quebec                        | 2005 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | 59th Avenue Bridge Floodway       | Winnipeg, Manitoba            | 2006 | N/A    | N/A   | P/S/N/U   |
| Pultrall, Inc.                 | Maryland Bridge                   | Winnipeg, Manitoba            | 2006 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Black Creek Bridge                | Sault St. Marie, Ontario      | 2007 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Candiac Bridge on Hwy 30E         | Montreal, Canada              | 2007 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Clarence Avenue Overpass          | Saskatchewan                  | 2007 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Clark's Mill Bridge               | Prince Edward Island          | 2007 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Merritt St. Bridge                | St. Catherine, Ontario        | 2007 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | MTQ_Candiac                       | Montreal, Quebec              | 2007 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Sunshine Creek                    | Ontario                       | 2007 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Wayne Gretsky Pedestrian Bridge   | Brantford, Ontario            | 2007 | 79,86  | 3,96  | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Noden Causeway (phase 1)          | N-W Region, Ontario           | 2008 | 274,93 | 10,97 | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | 23rd Avenue Overpass              | Edmonton, Alberta             | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | 3 Mile Lake Bridge                | N-E Region, Ontario           | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Ancienne Lorette Bridge           | Quebec                        | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Black River Bridge                | N-W Region, Ontario           | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Bridgeport Bridge                 | Waterloo, Ontario             | 2009 | 124,97 | 3,05  | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Buller Creek Bridge               | N-W Region, Ontario           | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Coaticook Bridge                  | Quebec                        | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | Eagle River Bridge                | N-W Region, Ontario           | 2009 | 86,87  | 14,94 | P/S/N     |
| Pultrall, Inc.                 | East Duffin Bridge                | Central Region, Ontario       | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N     |

|                |                                  |                              |      |        |       |         |
|----------------|----------------------------------|------------------------------|------|--------|-------|---------|
| Pultrall, Inc. | Echangeur Dorval (Phase 1)       | Montreal, Quebec             | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Étagement Gouin Bridge           | Quebec                       | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Hawk Lake Bridge                 | N-W Region, Ontario          | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N/B |
| Pultrall, Inc. | LaVallee Bridge                  | N-W Region, Ontario          | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Log River Bridge                 | Ontario                      | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Merritt Road Bridge              | Niagara Region, Ontario      | 2009 | 18,59  | 15,85 | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Montee Godin Bridge              | Quebec                       | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Mullet Creek/Credit River Bridge | Mississauga, Ontario         | 2009 | 539,80 | 3,05  | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Nestor Falls Bridge              | N-W Region, Ontario          | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Perth Line 9 Bridge              | Simco Region, Ontario        | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Rae Bridge                       | Wellington County, Ontario   | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Saint Justine Bridge             | Quebec                       | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Skagit River Bridge              | Colombie Britannique, Quebec | 2009 | 39,93  | 10,06 | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Victoria Bridge                  | Prince Edward Island         | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Wabigoon Bridge                  | N-W Region, Ontario          | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Walker Brook Bridge              | Nouveau, New Brunswick       | 2009 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | 15 Mile Creek                    |                              | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | 400 King Road Bridge             | Toronto, Ontario             | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | 5th Line Bridge                  | Ontario                      | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Addington Avenue Bridge          | Toronto, Ontario             | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Anderson MTO 2010- 4002          | Ontario                      | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Baxter Bridge                    | Simco Region, Ontario        | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Beaver Creek Bridge              | N-E Region, Ontario          | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Belleville Bridge                | Kingston, Ontario            | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Cameron Bridge                   | Durham, Ontario              | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Chukuni Bridge                   | N-W Region, Ontario          | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Duncan Mills Bridge              | Quebec                       | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Fontarabie Bridge                | Quebec                       | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Grande Riviere Yamachiche Bridge | Quebec                       | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Highway 401                      | East Region, Ontario         | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Highway 417                      | Ottawa, Ontario              | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Highway 97                       | British Columbia             | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Lewis Street Bridge              | Toronto, Ontario             | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Mackenzie River                  | N-W Region, Ontario          | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Magnetawan Bridge                | Ontario                      | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Moirs River Bridge               | Kingston, Ontario            | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | MTO 2008-5113                    | Ontario                      | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |

|                |                              |                      |      |     |     |       |
|----------------|------------------------------|----------------------|------|-----|-----|-------|
| Pultrall, Inc. | MTO 2009-2020                | Ontario              | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2009-4004                | Ontario              | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2009-4016                | Ontario              | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-3003                | Ontario              | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-5101                | Ontario              | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Noden Causeway (phase 2)     | N-W Region, Ontario  | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | O'Reilly's Bridge            | Hamilton, Ontario    | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Pontiac Bridge               | Quebec               | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Prolongement 410 Bridge      | Quebec               | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Ridgeway Drive Bridge        | Mississauga, Ontario | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Riviere petit Chicot         | Quebec               | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Saint-Ambroise Bridge        | Quebec               | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Shadow River Bridge          | N-E Region, Ontario  | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | South Trout Bridge           | N-W Region, Ontario  | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | St. Peters Bridge            | Prince Edward Island | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Steel River Bridge           | N-W Region, Ontario  | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | West River Bridge            | Prince Edward Island | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | White Lake Road Bridge       | Ottawa, Ontario      | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Wilson Bridge                | Waterloo, Ontario    | 2010 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Altona Road Bridge           | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Catbert Bridge               | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Echangeur Dorval (phase 2)   | Montreal, Quebec     | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Hodder Avenue                | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Little Pic MTO 2010- 6049    | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | McLaughlin Road Bridge       | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Metras, St-Chrysostom Bridge | Quebec               | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2009-4009                | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-4003                | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-4006                | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-4012                | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-4042                | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-5101                | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-5148 A-B            | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | MTO 2010-6050                | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Noden Causeway (phase 3)     | Ontario              | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Peace River                  | Calgary, Alberta     | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |
| Pultrall, Inc. | Petite Riviere du Loup       | Quebec               | 2011 | N/A | N/A | P/S/N |

|                |                                             |                           |      |       |       |         |
|----------------|---------------------------------------------|---------------------------|------|-------|-------|---------|
| Pultrall, Inc. | Petite Riviere Yamachiche                   | Quebec                    | 2011 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Pont de la Riviere Mainguy                  | Quebec                    | 2011 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Queensway Bridge                            | Ontario                   | 2011 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Ross' Corner Bridge                         | Prince Edward Island      | 2011 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Ruisseau Beaudry                            | Gaspesie, Quebec          | 2011 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Sarnia Road Bridge                          | Ontario                   | 2011 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Wabigoon MTO 2010- 6045                     | Ontario                   | 2011 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Nipigon River Bridge                        | Nipigon, Ontario          | 2014 | N/A   | 36,88 | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Distress River Bridge                       | Northeast Region, Ontario | 2015 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Gravel River Bridge                         | Northwest Region, Ontario | 2015 | N/A   | N/A   | P/S/N/B |
| Pultrall, Inc. | MTO 2014-2004                               | Central Region, Ontario   | 2015 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | MTO 2014-4006                               | Eastern Region, Ontario   | 2015 | 3,05  | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | MTO 2014-6026                               | Northwest Region, Ontario | 2015 | 11,58 | N/A   | P/S/N/B |
| Pultrall, Inc. | Temiskaming Dam Bridge                      | Ontario                   | 2015 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Elliot Bridge Replacement                   | Ontario                   | 2016 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | OLRT - Booth St. Bridge                     | Ontario                   | 2016 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Pultrall, Inc. | Ray Lawson Blvd. Bridge                     | Ontario                   | 2016 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Irvine Creek Bridge                         | Ontario                   | 2007 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | 3rd Concession Underpass                    | Ontario                   | 2008 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Essex County Road 43 Underpass              | Ontario                   | 2008 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Queen's Line Bridge                         | Ontario                   | 2008 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Walker Road Overpass                        | Ontario                   | 2008 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | 9th Concession Road Underpass               | Ontario                   | 2009 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Caso Overhead                               | Ontario                   | 2009 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | McHugh Little River Bridge                  | Windsor, Ontario          | 2009 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Provincial Road Overpass                    | Ontario                   | 2009 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | QEW Widening                                | Burlington, Ontario       | 2009 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Quantum-Nano Center, University of Waterloo | Waterloo, Ontario         | 2009 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Ashton Station Road                         | Kingston, Ontario         | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Blacks Road Underpass                       | London, Ontario           | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Dwyer Hill Road                             | Kingston, Ontario         | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Furnival Road Bridge                        | London, Ontario           | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Metro Toronto (Steeles West, Sheppard West) | Toronto, Ontario          | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Metro Toronto TYSSE                         | Toronto, Ontario          | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Nanticoke Creek Bridge                      |                           | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Southminster, Black Creek (MTO 2010-3003)   | London, Ontario           | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |
| Schöck         | Weightman Bridge                            | Niagara Falls, Ontario    | 2010 | N/A   | N/A   | P/S/N   |

|                      |                                          |                       |      |        |       |         |
|----------------------|------------------------------------------|-----------------------|------|--------|-------|---------|
| Schöck               | Whiteman's Creek Bridge                  |                       | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Wilsons's Bridge                         | Wellington, Ontario   | 2010 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Alma Street Bridge                       | Peterborough, Ontario | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Atkinson Bridge                          | Wellington, Ontario   | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Christie Street Bridge                   | Grimsby, Ontario      | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Coutt's Line Bridge SW                   | Ontario               | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Dawes Road Bridge                        | Toronto, Ontario      | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Fairway Extension (Grand River Bridge)   | Kitchener, Ontario    | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Fairway Extension (Randall Creek Bridge) | Kitchener, Ontario    | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Grand River Bridge                       | Kitchener, Ontario    | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | James Potter Rd. - Bridge                | Brampton, Ontario     | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | James Potter Rd. - Culverts              | Brampton, Ontario     | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Katherine Bridge & Northfield Bridge     | Waterloo, Ontario     | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | MTO 2010-3010 - Hwy 40 SW                | Ontario               | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | MTO 2010-3016 - Hwy 24 part 1            | Toronto, Ontario      | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | MTO 2010-3016 - Hwy 24 part 2            | Toronto, Ontario      | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | MTO 2010-4042 - Cyrville Road            | Ottawa, Ontario       | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | MTO 2010-4042 Hwy 17                     | Ottawa, Ontario       | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | MTO 2011-3001 - Queen's Line Bridge      | Chatham, Ontario      | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | MTO 2011-3015                            | Chatham, Ontario      | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | MTO 2011-4042 2011                       |                       | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Randall Creek Bridge                     | Kitchener, Ontario    | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Schöck               | Sarnia Rd. Bridge                        | London, Ontario       | 2011 | N/A    | N/A   | P/S/N   |
| Tokyo Rope Mfg. Ltd. | Beddenton Trail Bridge/Central St.       | Calgary, Alberta      | 1993 | 42,06  | 15,24 | K       |
| Tokyo Rope Mfg. Ltd. | Taylor Bridge                            | Headlingley, Manitoba | 1997 | 131,98 | 17,07 | P/S/N/K |

Tabell C.3 – Japan med installerad FRP armering (L:längd, B:bredd, P:platta, B:Balk, U:Upplag/Stöd, S:stång, N:nät, K: spännkabel/lina

| Leverantör | Namn                 | Plats                | År   | L (m) | B (m) |       |
|------------|----------------------|----------------------|------|-------|-------|-------|
| NEFMAC     | Shin-Horikawa Bridge | Ishikawa Prefecture  | 1996 | 20,12 | 3,35  |       |
| NEFMAC     | Benten Bridge        | Fukushima Prefecture | 2002 | 60,05 | 3,05  | P/S/N |

Tabell C.4– Övrigt med installerad FRP armering (L:längd, B:bredd, P:platta, B:Balk, U:Upplag/Stöd, S:stång, N:nät, K: spännkabel/lina

Tåg och Spårkonstruktioner

| Leverantör | Namn                     | Plats                    | År   | L (m) | B (m) |     |
|------------|--------------------------|--------------------------|------|-------|-------|-----|
| Schöck     | Universitetstorget       | Magdeburg/Tyskland       | 2004 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Spårvagnskonstruktion    | Delft/Holland            | 2005 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Spårvagnskonstruktion    | Basel/Schweiz            | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Tåganläggning            | Rotterdam/Holland        | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Torg/Tågstation          | Bern/Schweiz             | 2007 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Tågbro                   | Monterrey/Mexico         | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Basel Tram Depot         | Basel/Schweiz            | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Banhofcity West station  | Wien/Österrike           | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Spårbro                  | München/Tyskland         | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | S19, Munich Pasing       | München Pasing/Tyskland  | 2012 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Edinburgh Tram Haymarket | Edinburgh/Storbritannien | 2012 | N/A   | N/A   | S/N |

Fasader och förtillverkade betongkomponenter

| Leverantör | Namn                           | Plats                    | År   | L (m) | B (m) |     |
|------------|--------------------------------|--------------------------|------|-------|-------|-----|
| Schöck     | Fasad, Skola Guthirt           | Xug/Schweiz              | 2005 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Skydd kabelgrav                | Essen/Tyskland           | 2007 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Militärt skyddsprojekt         | Blackpool/Storbritannien | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Prefab betong                  | Wangen/Tyskland          | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Armerade plattor               | Aitrach/Tyskland         | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Betongtrappor                  | Freiburg/Tyskland        | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Fasadskivor/Sjukhus            | Ulm/Tyskland             | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Fasadskivor RWTH               | Aachen/Tyskland          | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Fönsterbågar i betong          | Wörleschwant/Tyskland    | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Geomagnetisk simulator         | Lehmbek/Tyskland         | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | St leonhard, bjälklag          | Aachen/Tyskland          | 2012 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Renovering av en betongpergola | Albstadt/Tyskland        | 2012 | N/A   | N/A   | S/N |

Industriella golv

| Leverantör | Namn                                    | Plats              | År   | L (m) | B (m) |     |
|------------|-----------------------------------------|--------------------|------|-------|-------|-----|
| Schöck     | Driverless transportation system - golv | Moers/Tyskland     | 2007 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | CoCa-Cola                               | Osnabrück/Tyskland | 2007 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Driverless transportation system - golv | Moers/Tyskland     | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Knauf KG                                | Iphofen/Tyskland   | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Turner Contemporary                     | Burbach/Tyskland   | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |

## Forskningsinstitut och sjukhus

| Leverantör | Namn                                   | Plats                | År   | L (m) | B (m) |     |
|------------|----------------------------------------|----------------------|------|-------|-------|-----|
| Schöck     | Inst. For Plant Genetics               | Gatersleben/Tyskland | 2005 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Caree'                                 | Enschede/Holland     | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Quantum-nano Center                    | Waterloo/Kanada      | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Microscopy Building                    | Berlin/Tyskland      | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Helmholtz Center                       | Munich/Tyskland      | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | IBM Nanotech center                    | Zurich/Schweiz       | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Center for Addiction and mental Health | Toronto/Kanada       | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | CeNTech II, Nanotechnology             | Münster/Tyskland     | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Max Planck Institute                   | Stuttgart/Tyskland   | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | IBM Rüschlikon                         | Rüschlikon/Schweiz   | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Helmholtz Center                       | Berlin/Tyskland      | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Kampus UW w Biatystok                  | Biatystok/Polen      | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Experimental Physics                   | Aachen/Tyskland      | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Rostock/Physics Institute              | Rostock/Tyskland     | 2012 | N/A   | N/A   | S/N |

## Parkeringshus

| Leverantör | Namn                                         | Plats                      | År   | L (m) | B (m) |     |
|------------|----------------------------------------------|----------------------------|------|-------|-------|-----|
| Schöck     | Gesundheitszentrum an der Nahe               | Bad Kreuznach/Tyskland     | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Forum Steglitz                               | Berlin/Tyskland            | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | T-Mobile Car Park                            | Bonn/Tyskland              | 2007 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Festo Esslingen 1st phase                    | Esslingen/Tyskland         | 2007 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Lidl Freiburg multi-storey car park          | Freiburg/Tyskland          | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Park & Fly multi-storey car park Kelsterbach | Kelsterbach/Tyskland       | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | VEGA Grieshaber multi.storey car park        | Schiltach/Tyskland         | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Multi-storey car park at Küchwald hospital   | Küchwald/Tyskland          | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Edeka Zuffenhausen                           | St.-Zuffenhausen /Tyskland | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Buchholz multi-storey car-park               | Buchholz/Tyskland          | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Renovation of multi-storey car park Siegen   | Siegen /Tyskland           | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Pre-fab parking deck Marienhospital          | Emsdetten/Tyskland         | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |

## Bostadshus

| Leverantör | Namn                                                      | Plats                      | År   | L (m) | B (m) |     |
|------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------|------|-------|-------|-----|
| Schöck     | Hausmann residence                                        | Zürich/Schweiz             | 1997 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Residence                                                 | Bad Lippspringe/Tyskland   | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Kiessling residence                                       | Arnsberg/Tyskland          | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Zülle residence                                           | Fahrwangen/Schweiz         | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Foundation for Schäfer residence                          | Alpirsbach-Reutin/Tyskland | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Floor slab for Moldan residence                           | Iphofen/Tyskland           | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | House suitable for Multiple Chemical Sensitivity patients | Zürich-Leimbach/Schweiz    | 2012 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Hoschek residence                                         | Waging am See/Tyskland     | 2012 | N/A   | N/A   | S/N |

## Tunnlar

| Leverantör | Namn                                                | Plats                 | År   | L (m) | B (m) |      |
|------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|------|-------|-------|------|
| Schöck     | Randstad Rail                                       | Rotterdam/Holland     | 2004 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | North-south line                                    | Amsterdam/Holland     | 2004 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Main drainage collector (WSK-E)                     | Wien/Österrike        | 2005 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Berlin U5 Brandenburg Gate                          | Berlin/Tyskland       | 2006 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Cologne north-south suburban train                  | Cologne               | 2006 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Harbour Crossing Tunnel                             | Durban/Sydafrika      | 2006 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Northern access route to Brenner pass               | Inntal/Österrike      | 2006 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Leipzig rescue tunnel - section 1a                  | Leipzig/Tyskland      | 2007 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Flood spillway tunnel Lake Thun                     | Thun/Schweiz          | 2007 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Malmö City Tunnel                                   | Malmö/Sverige         | 2007 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | T5 Heathrow Airport                                 | London/Storbritannien | 2007 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | U4 launching shaft                                  | Hamburg/Tyskland      | 2007 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Metroline 4                                         | Budapest/Ungern       | 2007 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Wehrhahn line                                       | Düsseldorf/Tyskland   | 2008 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Leipzig rescue tunnel                               | Leipzig/Tyskland      | 2008 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Emscherkanal: tubbing segment                       | Dortmund/Tyskland     | 2008 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Diabolo Tunnel                                      | Brussels/Belgien      | 2008 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | U4 terminal shaft                                   | Hamburg/Tyskland      | 2008 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Liefkenshoekspoorverbinding                         | Antwerpes/Beligen     | 2009 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Rainwater sedimentation tank Quellenbusch           | Düsseldorf/Tyskland   | 2009 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | K5-Kiehlufer                                        | Berlin/Tyskland       | 2009 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | XFEL Desy particle accelerator                      | Hamburg/Tyskland      | 2009 | N/A   | N/A   | Vägg |
| Schöck     | Emscherkanal: Pump stations Bottrop & Gelsenkirchen | Bottrop/Tyskland      | 2009 | N/A   | N/A   | Vägg |

|        |                                                          |                        |      |     |     |      |
|--------|----------------------------------------------------------|------------------------|------|-----|-----|------|
| Schöck | Dattelner Mühlenbach                                     | Datteln/Tyskland       | 2010 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | CFPP power station Wilhelmshaven                         | Wilhelmshaven/Tyskland | 2010 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Schelmsrasen                                             | Schweinfur/Tyskland    | 2010 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Large-scale power plant Mannheim                         | Mannheim/Tyskland      | 2010 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Wehrhahn line                                            | Düsseldorf/Tyskland    | 2011 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Underground feed channel to rainwater sedimentation tank | Düsseldorf/Tyskland    | 2011 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Kö-Bogen                                                 | Düsseldorf/Tyskland    | 2011 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Metro Toronto: Steeles West station                      | Toronto/Kanada         | 2011 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Metro Toronto: Sheppard West station                     | Toronto/Kanada         | 2011 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Metro tunnel                                             | Karlsruhe/Tyskland     | 2012 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Metro U5 Berlin                                          | Berlin/Tyskland        | 2012 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Emscherkanal: Lots 31, 32, 33                            | Gelsenkirchen/Tyskland | 2012 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Ecological improvements for Schondelle river             | Dortmund/Tyskland      | 2012 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Emscherkanal pump station AKE Bottrop II                 | Bottrop/Tyskland       | 2012 | N/A | N/A | Vägg |
| Schöck | Air-Sea-Link Gdansk                                      | Gdansk/Poland          | 2012 | N/A | N/A | Vägg |

#### Industribyggnader

| Leverantör | Namn                                                    | Plats                           | År   | L (m) | B (m) |     |
|------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|------|-------|-------|-----|
| Schöck     | Dubai Aluminium Factory                                 | Dubai/Förenade Arabemiraten     | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Transformer foundation                                  | Hamneset/Norge                  | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Qatar Aluminium Factory - rectifier                     | Qatar/Förenade Arabemiraten     | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Seafront Villa Qatari Royal Family                      | Qatar/Förenade Arabemiraten     | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Carriageway slab                                        | Péage de Tain, France/Frankrike | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Underground transformer block 5063                      | Kaprun/Österrike                | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Peiner Träger GmbH steelworks                           | Peine/Tyskland                  | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Large-scale power plant Mannheim: Ceiling reinforcement | Mannheim/Tyskland               | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Large-scale power plant Mannheim: Cooling buildings     | Mannheim/Tyskland               | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Conversion of switching stations at chemical park       | Marl/Tyskland                   | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | ERAM repository                                         | Morsleben/Tyskland              | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Reactive current compensation plan                      | Emmenbrücke/Schweiz             | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | ThyssenKrupp: Coal scraper                              | Duisburg/Tyskland               | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Taschinas II power station                              | Taschinasbach/Schweiz           | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Thyssen-Krupp: Coal scraper                             | Duisburg/Tyskland               | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |

|        |                                                      |                                |      |     |     |     |
|--------|------------------------------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----|-----|
| Schöck | Transformer foundations                              | Nantes/Frankrike               | 2011 | N/A | N/A | S/N |
| Schöck | Ras Al Khair Aluminium Factory                       | Jubail/Saudiarabien            | 2011 | N/A | N/A | S/N |
| Schöck | Taschinas II power station                           | Grüsch/Schweiz                 | 2011 | N/A | N/A | S/N |
| Schöck | Thyssen-Krupp Steel Europe: MS filter circuit system | Bochum/Tyskland                | 2011 | N/A | N/A | S/N |
| Schöck | Rio Tinto Alcan: Aluminium smelter                   | Hafnarfjörður/Island           | 2011 | N/A | N/A | S/N |
| Schöck | Poste RTE, Siemens                                   | Nantes/Frankrike               | 2011 | N/A | N/A | S/N |
| Schöck | RTE Siemens Tourbe                                   | Chichebovill/Frankrike         | 2011 | N/A | N/A | S/N |
| Schöck | Louis Neel                                           | Grenoble/Frankrike             | 2011 | N/A | N/A | S/N |
| Schöck | Reactor coil foundations                             | Wehrendorf, Bad Essen/Tyskland | 2012 | N/A | N/A | S/N |

#### Övrigt

| Leverantör | Namn                                                        | Plats                            | År   | L (m) | B (m) |     |
|------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------|------|-------|-------|-----|
| Schöck     | Gare de Péage de Tain                                       | Southern France/Frankrike        | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Renovation of anchors for minster façade slabs              | Salem/Tyskland                   | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Renovation of St. Stephan's Cathedral                       | Wien/Österrike                   | 2006 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Templo de la Sagrada Familia                                | Barcelona/Spanien                | 2008 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Bam citadel (UNESCO heritage site)                          | Iran                             | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Manching airfield: Compass rose                             | Manching/Tyskland                | 2009 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Renovation of Thalheim Castle Vienna                        | Wien/Österrike                   | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Arctic Sea attraction at Hagenbeck zoo                      | Hamburg/Tyskland                 | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Renovation of the swimming pool at the Technical University | Darmstadt /Tyskland              | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Upstream fish migration Algershofer weir                    | Algershofen /Tyskland            | 2010 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Student hall of residence                                   | Heidenheim an der Brenz/Tyskland | 2011 | N/A   | N/A   | S/N |
| Schöck     | Qatar Old Palace, ringwall reinforcements                   | Doha/Förenade Arabemiraten       | 2012 | N/A   | N/A   | S/N |

## D1

