



Glasfiberkomposit som spännarmering i slipers

Hans Carlsson

Ola Johansson

Lars Paulsson

Sektionen för Väg och Vattenbyggnad
Avdelningen för Bärande Konstruktioner
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 Lund

Department of Civil Engineering
Division of Structural Engineering
Lund Institute of Technology
Box 118
S-221 00 Lund
Sweden

GLASFIBERKOMPOSIT SOM SPÄNNARMERING I SLIPERS

Glassfibercomposites as prestressed reinforcement in sleepers

av

Carlsson, Hans LTH, Lund

Johansson, Ola LTH, Lund

Paulsson, Lars LTH, Lund

1993

ABSTRACT: Use of glassfibercomposites as prestressed reinforcement in concrete railroad sleepers subjected to fatigue loading has been studied. Mechanical material parameters for a certain glassfibercomposite has been determined. Transferlength and anchorage problems have been analysed.

Rapport TVBK-5065
ISSN 0349-4969
ISRN: LUTVDG/TVBK--5065-SE

EXAMENSARBETE TVBK-5065

Handledare: Lars Sentler

LUND mars 1993

Hans Carlsson
Ola Johansson
Lars Paulsson

SAMMANFATTNING

Föreliggande examensarbete behandlar glasfiberkompositer som spännarmering i slipers.

Den typ av glasfiberkompositarmering som provats har uppvisat

- Perfekt linjärelastiskt samband med en elasticitetsmodul för en ϕ 8 mm stång på 46 GPa.
- Brotthållfasthet på ca 1100 MPa vid korttidbelastning.
- Storleksberoende elasticitetsmodul och brotthållfasthet i likhet med andra konstruktionsmaterial.
- Låg relaxation.

Förankringsegenskaperna hos den sandade glasfiberkompositarmeringen i ändankare och betong

- Leder till att ändankarna i dagens läge har stora dimensioner eftersom traditionella ändankare inte kan användas, men är tillförlitliga och återanvändbara.
- Ger avsevärt kortare förankringslängd i betongen än traditionell spännlina, vilket måste beaktas med hänsyn till sprickbildning

Beständigheten i korrosiva miljöer är mycket god men har inte ingått i provningarna. Denna beständighet är den främsta orsaken till att glasfiberkompositen är intressant som armering.

Försök visar att om de ovan påvisade egenskaperna beaktas vid tillverkning kan glasfiberkompositarmering användas i järnvägsslipers.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning

1	Inledning.....	1
1.1	Allmänt	
1.2	Förutsättningar för användning av fiberkompositer som armering	
1.3	Syfte	
1.4	Avgränsningar	
1.5	Genomförande	
2	Fiberkompositers struktur och uppbyggnad.....	6
2.1	Inledning	
2.2	Fysiska egenskaper	
2.3	Mekaniska egenskaper	
2.4	Fibermaterial	
2.5	Matrismaterial	
3	Materialkaraktisering.....	12
3.1	Allmänt	
3.2	Viskoelastisk materialrespons	
3.3	Viskoelastisk brotthållfasthet	
3.4	Utmattning	
4	Provning av glasfiberkompositers hållfasthet.....	20
4.1	Allmänt	
4.2	Provningsmetodik	
4.3	Brotthållfasthet	
4.4	Elasticitetsmodul	
4.5	Relaxation	
5	Förankring.....	27
5.1	Allmänt	
5.2	Ändankare	
5.3	Förankringsegenskaper i betong hos förspänd armering	
6	Tillverkning av slipers.....	39
6.1	Förberedelser	
6.2	Tillverkningsmetodik	
6.3	Gjutning och avspänning	

7 Provning av slipers.....	44
7.1 Inledning	
7.2 Beskrivning av utmattning i armerad betong	
7.3 Provuppställning	
7.4 Resultat	

Referenslista.....	56
--------------------	----

Bilagor

1. Mätförteckning
2. Beräkningar på sliper
3. Kraft-tid diagram för glasfiberarmering dragen till brott

1 INLEDNING

1.1 Allmänt

Betongkonstruktioner armeras normalt med stålarmring. Detta är en väl etablerad materialkombination som till stora delar fungerar tillfredsställande. Under det senaste decenniet har en ny form av armering blivit tillgänglig, nämligen fiberkomposit-armering. Denna form av armering kan tillverkas med högst varierande egenskaper där speciellt en god beständighet i armeringsaggressiv miljö kan uppnås. En sådan beständighet är inte möjlig med stålarmring, vilket gör fiberkompositarmeringen till ett intressant alternativ i krävande miljöer.

För betongkonstruktioner i allmänhet finns det alltid en risk för att armeringskorrosion ska uppstå i stålarmeringen. Anledningen till detta är att det skydd som betongens basiska miljö utgör kan gå förlorad. Detta sker naturligt i en långsam karboniseringsprocess som eliminerar betongens skyddande förmåga. Mer påtagliga problem kan uppstå om salter tränger in i betongen. Oftast är det speciellt kloridföreningar som är allvarliga men även en del andra föreningar kan behöva beaktas i vissa tillämpningar. Då armeringskorrosionen startar, vilket kräver tillgång till både vatten och syre, kommer betongkonstruktionen snabbt att förlora sin ursprungliga funktion om inte speciella åtgärder sätts in.

För spännarmerade betongkonstruktioner är armeringen mer känslig för korrosion eftersom det uppstår en samverkan mellan last- och miljöpåverkan som oftast kallas spänningskorrosion. Dessutom kan armeringens tillverkningstekniska egenskaper ha betydelse.

För speciella användningsformer av betongkonstruktioner kan ytterligare problem uppstå. Ett exempel på detta är om elektrisk ström leds genom armeringen. Detta kan i sig skapa speciella korrosionsproblem utan att andra beständighetsproblem är aktuella.

Fiberkompositarmering är, som nämnts ovan, ett nytt material vars egenskaper och funktion inte är ordentligt etablerade. Av denna anledning är det nödvändigt med experimentell verksamhet kring armeringens egenskaper och dess funktion i olika tillämpningar. I denna rapport behandlas fiberkompositarmering som spännarmering med praktisk inriktning på funktionen i slipers. Arbetet är en del av ett större projekt om fiberkompositarmering och denna speciella inriktning har genomförts i samarbete med Abetong teknik.

1.2 Förutsättningar för användning av fiberkompositer som armering

Vid en undersökning av ett nytt material och dess eventuella användbarhet som konstruktionsmaterial är det naturligt att jämföra dess fysiska egenskaper med etablerade material, i det här fallet stål. Alla material har sina fördelar och sina nackdelar. Det enklaste är oftast att välja det material som alltid använts, i stället för att använda det material som är lämpligast för en speciell tillämpning. I materialvalet bör man utöver de mekaniska egenskaperna även väga in aspekter som beständighet, användarvänlighet, lagringsbarhet och hur lättbearbetat materialet är.

Brotthållfastheten för en glasfiberkomposit är avsevärt högre än för vanlig stålarmring. Teoretiskt är det möjligt att uppnå brotthållfastheter som är mycket höga. I praktiken är brotthållfastheten jämförbar med den för spännarmring av stål eller något lägre. Vid speciella tillämpningar där högre hållfasthet önskas kan kolfiber- eller aramidfiberkomposit användas.

Glasfiberkompositarmeringens största svaghet i jämförelse med stålarmring är en lägre elasticitetsmodul. Beroende främst på typen av fiber kan elasticitetsmodulen variera mellan 40-160 GPa. Detta innebär vissa problem vid användning som slakarmering. Däremot kan det vara en fördel vid spännarmring, främst för att spännkraftsförluster kan minskas.

En fiberkomposit kan brytas ned i aggressiv miljö om dess komponenter icke är motståndskraftiga. Fiberkompositer kan till skillnad från stål göras korrosionsbeständiga, vilket innebär att täckskikt och karbonatisering ej kräver samma uppmärksamhet som vid stålarmring. Denna faktor bör ha en icke ringa betydelse för konstruktioner som vistas i korrosionsframkallande miljöer. Ett exempel är svinstallgolv som idag tillverkas av Abetong miljö i Varberg där slakarmerad glasfiberkomposit används trots den lägre E-modulen. En motsvarande tillämpning med stålarmring i denna ytterst aggressiva miljö skulle kräva stora täckskikt eller rostfritt stål.

Ytterligare en egenskap, som talar för fiberkompositers användning är dess flexibilitet. Den kan nämligen tillverkas efter önskade egenskaper.

Vid hantering av fiberkomposit är det först den låga vikten som märks. En 8 mm:s glasfiberstång väger ca 100 g/m mot cirka 390 g/m för en stålstång. Detta har betydelse för hanteringen under transport och produktion. Fiberkompositen kräver något större varsamhet än vad stål gör. Det täckande friktionsskiktet bör skyddas mot avskavning, smuts och olja. Armeringen levereras vanligtvis i rullar och kapas enkelt med en bågfil eller elektrisk sax.

1.3 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att behandla armering tillverkad av glasfiberkomposit och dess funktion i slipers. Både materialegenskaper och funktionsegenskaper beaktas på det principiella sätt som redovisas nedan:

Teoretisk genomgång av

- Fiberkompositer
- Materialegenskaper och dess karakterisering
- Utmattningsfenomen och hur det karakteriseras

Bestämning av materialegenskaper

Provning av glasfiberkompositer för att bestämma de egenskaper som är av primärt intresse vid tillverkning av slipers.

- Brotthållfasthet (korttidshållfasthet och långtidshållfasthet)
- Elasticitetsmodul
- Relaxationsegenskaper
- Förankringsegenskaper och förankringslängd
- Utmattningssegenskaper

Uppspänningsteknik

Utvärdering av uppspänningstekniken med speciell inriktning på ändankarens funktion.

Funktionsegenskaper vid användning i slipers

Provning av slipers för att bestämma funktionsegenskaper som

- Statisk brottlast
- Spricklast
- Utmattningsfenomen
- Armeringspåkänningar

Av ovanstående framgår att syftet är att undersöka förutsättningarna för en specifik kommersiell produkt. Men en strävan efter att öka kunskapen och förståelsen för fiberkompositer och dess användningsområden i ett större perspektiv kan också utrönas.

1.4 Avgränsningar

De egenskaper vi har studerat hos glasfiberkompositen är brotthållfasthet, E-modul, brottöjning och relaxation. Dessa egenskaper är specifika för de material vi har studerat och kan därför ej anses som generella. Glasfiberkompositer kan ha mycket god beständighet. Detta hävdar vi utan att själva ha gjort några undersökningar. Examens-arbetet omfattar alltså inga direkta beständighetsprovningar.

Långtidsförsök är alltid svåra att genomföra då de som namnet antyder tar lång tid. Därför utförs så kallade accelererade provningar. Dessa kan dock ge vanskliga resultat då det kan vara svårt att efterlikna ett verkligt tidsförlopp. En begränsad undersökning av fiberkompositens relaxationsegenskaper har gjorts. Vad gäller utmattningsförsöken är dessa utförda på ett begränsat antal slipers och visar sålunda bara tendenser för de uppmätta egenskaperna. På grund av det stora antal faktorer som påverkar utmattningshållfastheten och den stora spridning som kännetecknar utmattningsförsök, bör man utföra relativt stora försöksserier.

1.5 Genomförande

Intresset hos examensarbetarna för användning av glasfiberkompositer som armering uppstod under en gästföreläsning av Dr Lars Sentler, Lunds Tekniska Högskola i mars 1992. Projektet initierades senare samma vår och i april togs en första kontakt med Stefan Westberg, Abetong Teknik och Per Orre, Fiberkonst AB. Ett studiebesök i maj hos armeringstillverkaren, Fiberkonst AB, föregick sommarens förberedande litteraturstudier.

Vid höstterminens början var den primära uppgiften att fastställa glasfiberkompositens hållfasthetsegenskaper samt att välja rätt dimension på armeringstångerna vid den kommande tillverkningen av slipers. Provningsmetoder av hållfasthetsegenskaper ägde rum i Väg- och Vattensektionens laborationshall. Tid och omsorg fick läggas på att utarbeta provningsmetoder då inga standardiserade mätmetoder fanns utvecklade för fiberkompositer.

Under en helg i oktober, då ingen ordinarie tillverkning skedde, tillverkades ett trettiofem slipers vid Abetongs fabrik i Vislanda. Vid tillverkningen närvarade förutom examensarbetarna samt Lars Sentler, Stefan Westberg, Per Orre och en mindre del av Abetongs ordinarie personalstyrka. Slipers med stålarmoring och fiberkompositarmoring tillverkades sida vid sida för att identiska egenskaper avseende uppspanning och betongkvaliteter skulle uppstå. Detta var viktigt eftersom jämförande studier mellan de olika typerna av slipers skulle ske. Vid avspänningen registrerades förankringslängder med hjälp av trådtöjningsgivare för två slipers med stålarmoring och två slipers med fiberkompositarmoring. Under tillverkningen togs också kubprov på den använda betongen. Avklippta armeringsstänger av stål och fiberkomposit gjöts in i kubprover för senare utdragningsprover.

En månad senare började provning av slipers i laboratorium. Dessa provningar omfattade dels statisk hållfasthet dels dynamisk utmattningshållfasthet. En undersökning genomförd vid Tekniska högskolan i Luleå ligger som mall för utmattningsförsöken. De statiska försöken är inte speciellt tidskrävande till skillnad från de dynamiska som kan ta upp till en vecka per sliper. Parallellt med dessa undersökningar gjordes kompletterande prov av glasfiberkompositens hållfasthetsegenskaper. Det omfattande och tidskrävande arbetet med utmattningsegenskaperna fick oss att omvärdera ambitionen att bli färdiga till december 1992. Ett nytt datum fastställdes till mars 1993.

De mätdata och resultat som framkommit under arbetets gång har behandlats kontinuerligt. För att göra alla mätdata överskådliga utarbetades programrutiner skrivna i Fortran. Med dessa program har vi bestämt egenskaper som brottlast, E-modul, töjning och relaxation.

Examensarbetet omfattar sålunda studiebesök, litteraturstudier, tillverkning, provning och utvärdering av resultat.

2 FIBERKOMPOSITERS STRUKTUR OCH UPPBYGGNAD

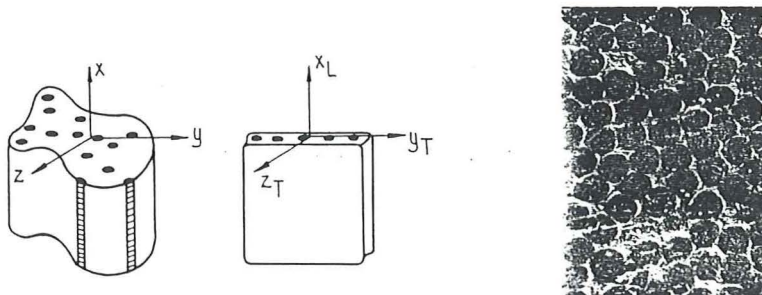
2.1 Inledning

Fiberkompositers egenskaper beror på en mängd olika faktorer. Till skillnad från traditionella konstruktionsmaterial där möjligheten att variera egenskaper oftast är begränsad erbjuder fiberkompositerna nästan obegränsade variationsmöjligheter.

Det slutliga resultatet vid tillverkning av fiberkompositerna beror på typ av fibrer, mängd fibrer och deras orientering, typ av matris och tillverkningsmetod. I det här kapitlet förs en allmän diskussion om uppbyggnad och struktur av fiberkompositerna.

2.2 Fysiska egenskaper

En högpresterande fiberkomposit består av ett stort antal parallella fibrer som hålls samman av en matris. Ibland kan de parallella fibrerna i matrisen omges av spirallindade fibrer eller ett speciellt yttre skikt.



Figur 2.1 Den principiella uppbyggnaden av en fiberkomposit i en riktning och en förstoring av ett tvärsnitt /11/.

En fiberkompositens egenskaper är inte bara en funktion av delmaterialens egenskaper utan beror också på uppbyggnaden. Typiskt för en fiberkomposit av den typ som visas i figur 2.1 är de parallella fibrerna i en riktning som gör den till ett icke isotropt material. Egenskaper i fibrernas riktning kommer att avvika högst markant från de egenskaper som gäller vinkelrätt mot fiberriktningen.

2.3 Mekaniska egenskaper

2.3.1 Allmänt

De mekaniska egenskaperna hos en fiberkomposit är komplicerade. Men inte mer än att det går att förklara på ett någorlunda tillfredställande sätt. För att göra detta är det nödvändigt att först beakta egenskaper hos fibrer och matris och därefter komponentegenskaper i den sammansatta produkten.

2.3.2 Fiberegenskaper

Kontinuerliga fibrers cirkulära form, de små dimensionerna och en relativt välorganiserad inre struktur medför goda hållfasthetsegenskaper. Under tillverkningen uppstår avvikelser från vad som skulle varit ett optimalt utförande. Diametern är inte densamma hos alla fibrer. Även om variationen är liten påverkar den enskilda fibrers töjning. Densiteten hos enskilda fibrer kan också variera, något som också kan påverka möjlig brottpåkänning. Dessutom, och detta är kanske det viktigaste, på ytan av en fiber uppstår brister i bindningarna mellan de olika komponenter som ingår i fibermaterialet. Vid en påkänning uppstår det på sådana ställen spänningskoncentrationer som kan initiera ett brott. Detta gör att spridningen i brotthållfasthet är högst påtaglig. På grund av att det antas att det är ytdefekterna som till största andelen är ansvariga för variationen i brotthållfasthet är det rimligt att förvänta sig att medelbrotthållfastheten sjunker med längden på en fiber. Samtidigt bör spridningen i brotthållfasthet minska. Då mängden fibrer ökar bör också hållfastheten minska av samma anledning som då längden på en fiber ökar, nämligen på grund av att mer fiberyta blir exponerad.

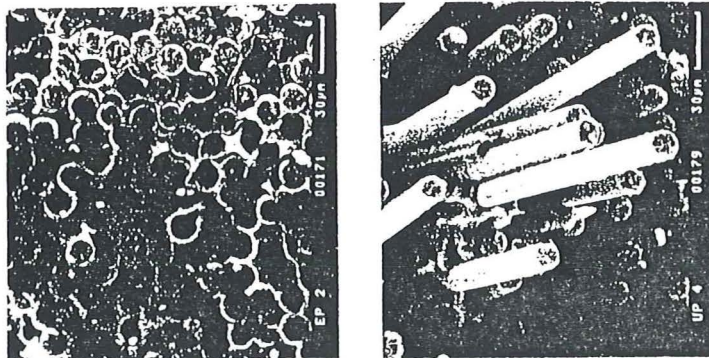
2.3.3 Matrisegenskaper

Matrisens två funktioner är att hålla ihop fibrer för att möjliggöra att påkänningar kan omfördelas mellan fibrer och att ge ett skydd mot omgivningen. Denna dubbla funktion är komplicerad och matrisen kan ses som den svaga länken i en fiberkomposit. Fibrer binds ihop genom kohesions- och attraktionskrafter mellan fibrer och matris. För att åstadkomma detta behöver matrismaterialet ha lämpliga egenskaper. Även fibrer kan behöva behandlas för att uppnå god bindning med matrismaterialet. Genom denna binding mellan fibrer och matris kan påkänningar överföras mellan fibrer. Detta medför att även matrisen utsätts för påkänningar.

Även om en matris har svagheter så tillför den också positiva egenskaper. Matrisen gör att en fiberkomposit uppför sig mer som normala konstruktionsmaterial men är också orsaken till tidsberoende egenskaper.

2.3.4 Kompositgenskaper

För en fiberkomposit är samspelet mellan fibrer och matris av stor vikt. Genom att matrisen kan omfördela påkänningar mellan fibrer kan fiberegenskaperna förbättras högst påtagligt. Detta medför att det markanta storleksberoende som finns hos enskilda fibrer kan reduceras. Men också att brottbeteendet och brottlasten påverkas. I övergången mellan matris och fiber finns det områden där bindningarna är mindre bra eller där en fiber utsätter matrisen för stora påkänningar. Här kan en mikrospricka initieras som sedan växer. Den vanligaste brottformen uppstår genom att mikrosprickor mellan fibrer och matris växer och frilägger fibrer lokalt. Om påkänningen är tillräckligt stor uppstår ett fiberbrott. Enskilda brott har ingen större betydelse men då detta sker på många olika ställen leder detta sluligen till att påkänningen inte kan tas upp av kvarvarande fibrer och ett brott utlöses. På grund av att fiberbrott uppstår på flera olika ställen blir brottytan oregelbunden och borstlik. En annan brottform uppstår om spricktillväxten mellan fibrer och matris inte hinner utvecklas. I stället kommer någon svaghetszon i matrisen medföra att omfördelningen mellan fibrer kollapsar så att många fibrer går till brott samtidigt. I detta fall blir brottytan relativt jämn eftersom alla fibrer går av på ungefär samma ställe.



Figur 2.2 Två olika brottyper /11/.

2.4 Fibermaterial

2.4.1 Allmänt

Möjligheten att tillverka fibermaterial med goda egenskaper har ökat snabbt under de senaste decennierna. Detta gäller dels tillverkningsmetodiken för traditionella fibermaterial som glasfiber och kolfiber, dels utvecklingen av helt nya fibermaterial såsom aramid.

Fibermaterial som ofta används är glasfibrer, syntetfibrer och kolfibrer. Fibrerna är cirkulära med en diameter som beror på typen av fibrer och varierar mellan 6-24 mikrometer. Det är de små dimensionerna tillsammans med speciella tillverkningsmetoder som ger de egenskaper som fibrer uppvisar, framför allt extremt goda brotthållfasthetsegenskaper.

2.4.2 Glasfiber

Utgångsmaterialet vid tillverkning av glasfiber är huvudsakligen silikater i form av kiselsand precis som för vanligt fönsterglas. Genom att ersätta en del av silikaterna med annat material kan glas ges lämpliga egenskaper. Vid tillverkning av fibrer krävs en mycket noggran sammansättning av råvarorna. Efter smältning rinner glaset ut genom hål i en platinadegel. Trådarna som kommer ut, oftast cirka 2000 stycken, dras ut för att få avsedd diameter och kyls sedan snabbt så att molekylstrukturen som råder i flytande form bibehålls. Genom att styra temperaturen i platinadeglarna och draghastigheten kan önskad fiberdiameter erhållas. Innan trådarna rullas upp på en trumma beläggs ytan med ett lager av silaner som dels skyddar ytan mot skador och fukt dels ger bättre vidhäftning till matrisen vid senare kompositstillverkning.

2.4.3 Syntetfibrer

Vissa termoplaster kan användas som utgångsmaterial vid fiberframställning. De syntetfibrer som erhålls har goda hållfasthetsegenskaper både med avseende på brottpåkänning och elasticitetsmodul. Andra egenskaper såsom beständighet i aggressiva miljöer är också genomgående mycket god.

Tillverkningsmetodiken som används påminner mycket om den som används för glasfibrer. En lämplig termoplast värms upp till flytande form eller löses i något lösningsmedel. Massan pressas sedan genom en dysa så att trådar med lämplig diameter erhålls. Därefter värms dessa samtidigt som de sträcks 5 - 10 gånger. Detta resulterar i en kraftig orientering av molekyler och kristaller som medför bra hållfasthetsegenskaper. Exempel på syntetfibrer är aramidfibrer, polyvinylalkoholfibrer och polyetenfibrer.

2.4.4 Kolfiber

Bindningarna mellan två kolatomer kan vara mycket starka. Beroende på detta fanns det anledning att försöka tillverka fibrer med kolatomer i väl strukturerad orientering. Inledningsvis medförde detta stora problem. Först då kolfibrer började produceras genom pyrolys av akrylnitrilfibrer (PAN) blev det möjligt att höja kvaliteten högst påtagligt. Tillverkningen går i princip till på följande sätt. Knippen med cirka 1000 PAN fibrer oxideras genom uppvärmning i luft till cirka 220 grader Celsius under flera timmar, vilket medför att en stegpolymer bildas. Under denna process hålls fibrerna sträckta så att de ej kan krympa. Fibrerna värms därefter upp till cirka 1000 grader Celsius under kontrollerad temperaturhöjning. Under denna process avges vatten, cyanväte och syrgas så att endast kolkedjor återstår. Värmebehandlingen fortsätter sedan vid temperaturer över 2000 grader Celsius som medför att en grafitstruktur skapas. Resultatet är en fiber med cirkulär eller oval form och med en diameter som ligger mellan 6 - 10 mikrometer.

2.5 Matrismaterial

2.5.1 Allmänt

Möjligheten att tillverka matrismaterial med goda egenskaper har funnits under relativt lång tid. Med material som har goda egenskaper avses här främst material som har en bra funktion tillsammans med fibrer av något slag. För att god funktion ska kunna uppnås ska matrismaterialen kunna samverka med fibrerna och kunna omfördela lasten mellan fibrerna. Två sådana material har funnits på marknaden under lång tid, nämligen polyester och epoxi.

2.5.2 Ester

Omättad esterplast utvecklades i USA i början på 1930-talet men det dröjde fram till 1950-talet innan materialet användes i någon större omfattning tillsammans med fibermaterial. Det omättade esterhartset är en polyester som vanligtvis tillverkas genom en polymerisation av dikarbonsyror och glykoler. Den upprepade molekylens i en polyester är således en ester bestående av en syra och en alkohol. Polyester är ett samlingsnamn för en mycket stor familj härdplaster med mycket olika egenskaper. Ofta klassificeras de efter sin mest karakteristiska beståndsdel. För användning som matrismaterial i den basiska miljön i betongkonstruktioner används två speciella polyestrar, bisfenolpolyester och epoxibaserad vinylester.

2.5.3 Epoxi

Epoxiplasterna utvecklades under andra världskriget i USA och Europa. Liksom för esterplast är epoxiplast ett samlingsnamn för en stor grupp material med liknande egenskaper. Det mest använda epoxihartset tillverkas av epiklorhydrin och bisfenol A. Variationsmöjligheterna vid framställning av epoxihartser är många, vilket medför att egenskaperna kan styras i den riktning som är önskvärd.

2.5.4 Vinylester

Vinylester är också ett samlingsnamn för ett antal kemiska varianter. Trots namnet är vinylester mer besläktat med epoxi än ester. Materialet utvecklades som ett alternativ till epoxi för att undvika de giftiga gaser som avges vid härdningen.

3 MATERIALKARAKTERISERING

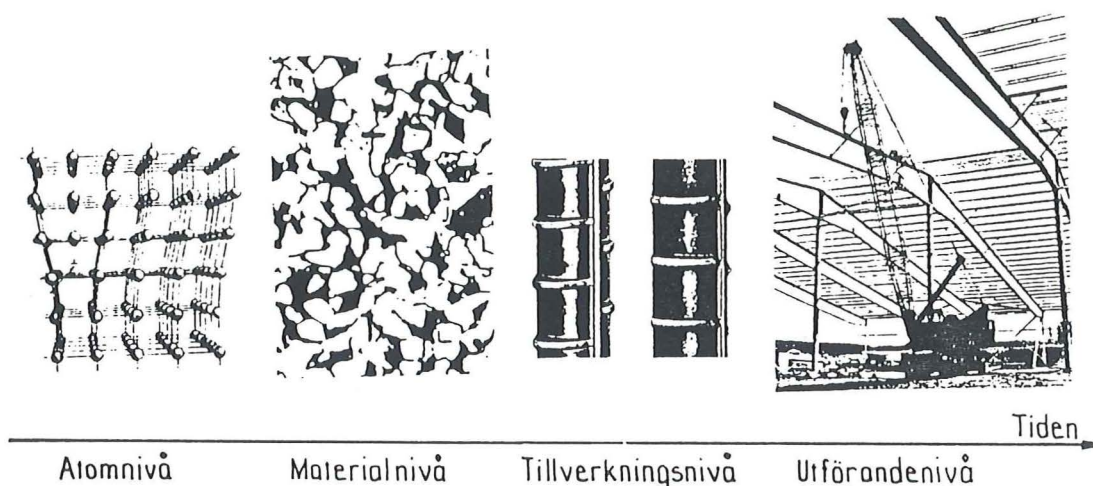
3.1 Allmänt

Ett materials egenskaper och speciellt dess hållfasthetsegenskaper kan beskrivas på flera olika sätt. Vad som är lämpligt beror på förutsättningen och den förväntade användningen.

Den vanligaste metodiken innebär att en materialmodell byggs kring elasticitetsteorin. Metoden har sina fördelar därför att det ger ett enkelt sätt kan karakterisera materialegenskaper som elasticitetsmodul och brotttjuning på. Men elasticitetsbaserade modeller har begränsningar eftersom de beskriver linjära samband som i princip endast gäller för små deformationer.

Ett materials allmänna egenskaper bestäms primärt av vad det är uppbyggt av och vilka bindningar som finns mellan dess komponenter. På den lägsta nivån är ett material uppbyggt av atomer som sammanhålls av starka bindningar, sk primärbindningar. Atomerna bildar molekyler, sammanbundna av metalliska, joniska eller kovalenta bindningar. Dessa sk sekundära bindningar skiljer sig markant från varandra och beroende på vilken typ som dominerar kan man få en relativ uppfattning om många grundläggande materialegenskaper. Det är emellertid inte möjligt att skapa ett material med perfekta bindningar. Härav följer att det alltid finns felaktigheter i ett material. Effekten blir att materialegenskaperna blir mer komplexa än vad som annars skulle varit fallet.

Felaktigheter och avvikelser från det optimala utförandet kan identifieras på olika nivåer, även om de grundläggande egenskaperna kan härledas till atomnivå.



Figur 3.1 Systemnivåer för materialegenskaper /12/.

Oberoende av på vilken nivå som felaktigheter introduceras, se figur 3.1, så kommer dessa att påverka egenskaperna. Ju mer markanta fel desto större inverkan. Felaktigheter som finns i ett material har flera effekter. Den teoretiskt möjliga brottlasten kommer att reduceras markant för ett dragbrott, men det kommer också att introduceras en viskös materialrespons utöver en elastisk respons. För att beakta dessa båda materialresponser utnyttjas en viskoelastisk materialmodell.

3.2 Viskoelastisk materialrespons

Då en kropp utsätts för en yttre last kommer materialet att deformeras. Denna deformation eller töjning hos en kropp är, till skillnad från den deformation som uppstår mellan atomer, mer komplicerad. Förutom en elastisk töjningsrespons kan också en viskös töjningsrespons uppstå. Det senare sker fördröjt i tiden för en påkänning som överskrider ett tröskelvärde.

Viskoelastiska materialegenskaper upptäcktes i början på detta århundrade vid analys av metalliska material som utsattes för höga påkänningar. Vid enaxiell dragbelastning kommer ett provobjekt utöver den initiella elastiska töjningen att uppvisa tidsberoende krypning av den form som visas i figur 3.3. Vid denna tidpunkt föreslogs att töjningen som funktion av tiden kunde skrivas som

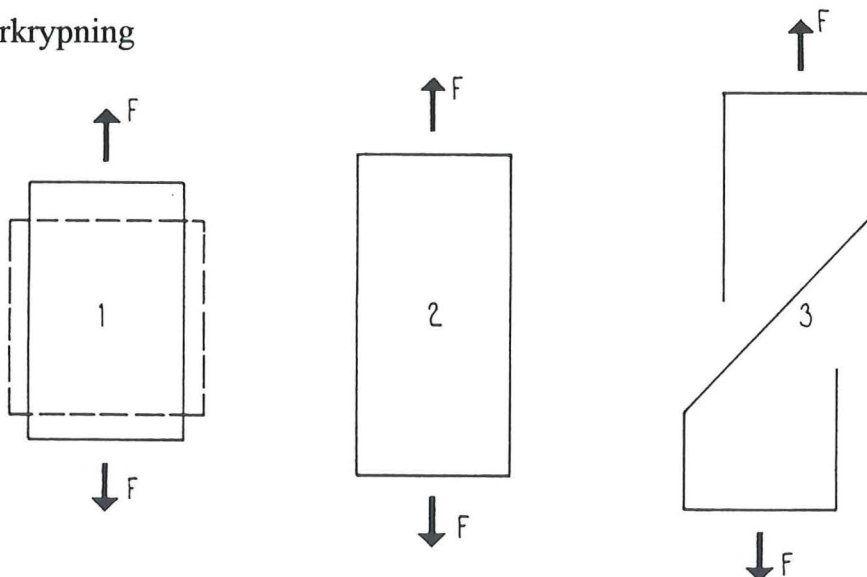
$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_p t^\alpha + \varepsilon_s t + \varepsilon_t t^\beta \quad , \quad \alpha < 1 < \beta \quad (3.1)$$

ε_0 = Initiell deformation

ε_p = Primärkrypning

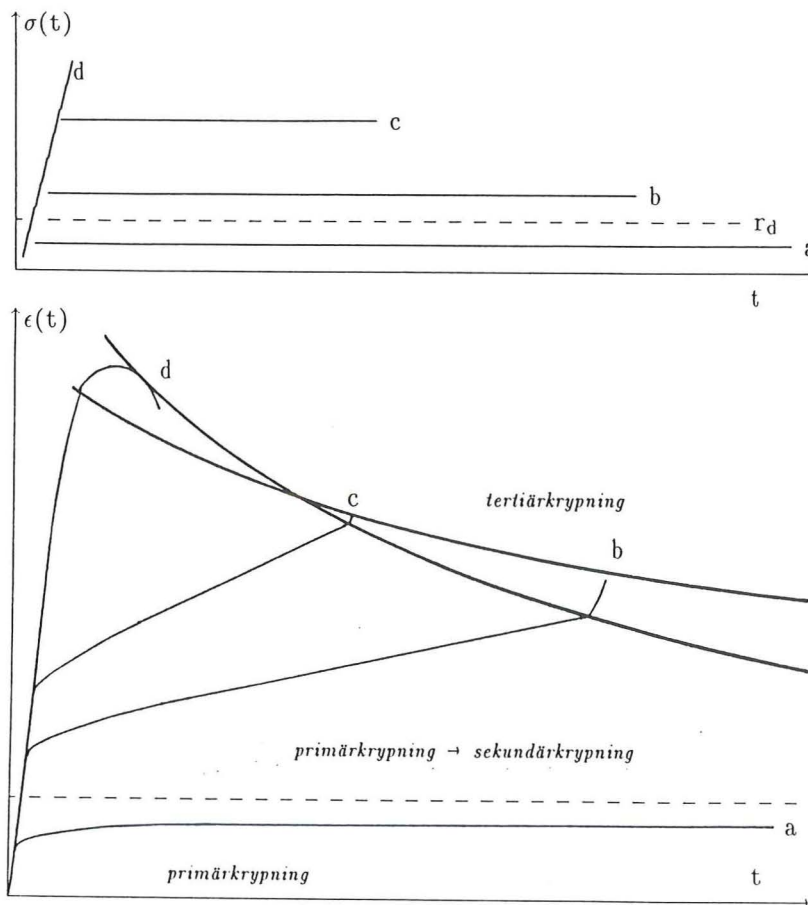
ε_s = Sekundärkrypning

ε_t = Tertiärkrypning



Figur 3.2 Deformationsbeteende vid belastning av ett metalliskt material /11/.

Direkt efter det att belastning påförts med en initiell deformation som följd, uppstår en fördröjd deformation i form av krypning. Denna krypning, kallad primärkrypning, innebär en inre omstrukturering av atomerna för att ett nytt jämviktsläge skall uppnås.



Figur 3.3 Krypningens beteende vid olika påkänningsnivåer /11/.

För högre påkänningar kommer primärkrypning att efterföljas av sekundärkrypning. Sekundärkrypningar är en inre glidning mellan atomplan, det vill säga en inre skjuvning äger rum. Dessa inre skjuvningar kan för vissa metalliska material innebära en förbättrad påkännings-töjningsfördelning efter en avlastning. Därför kallas fenomenet ofta för töjningshårdnande.

För vissa andra material, såsom fiberkompositer, där dessa metalliska bindningar inte finns, kommer ej en inre glidning att ske. I stället kommer bindningarna att brytas och det sker en spricktillväxt. Effekten är ofta ett försämrat påkännings- töjnings samband efter avlastning och fenomenet kan därför karakteriseras som ett töjningsmjuknande.

De töjningar som visas i figur 3.3 och som beskrivs av ekvation 3.1 avspeglar två fundamentalt olika materialbeteenden, ett elastiskt och ett visköst. Av denna anledning är det lämpligt att skriva ekvation 3.1 som

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e t^a + \varepsilon_v t \quad (3.2)$$

där ε_e är en elastisk respons och ε_v är en viskös respons. En serieutveckling av den första termen i ekvation 3.2 leder till

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e \left[1 + \frac{\alpha}{1!} \times \ln(t) + \dots \right] + \varepsilon_v t \quad (3.3)$$

som visar att den elastiska responsen kan delas upp i en tidsberoende initiell respons och en tidsberoende kryprespons.

För sekundärkrypningen, som då den förekommer är den helt dominerande formen av krypning, används ofta Nortons kryplag för att beskriva töjningshastigheten som funktion av påkänningsnivån. Denna kryplag kan skrivas

$$\varepsilon_s = \frac{(\sigma - \sigma_0)^n}{\eta} \quad (3.4)$$

η = Konstant

n = Materialkonstant för en viss omgivning (temperatur, fukt)

σ = Påkänningsnivå

σ_0 = Tröskelspänning

Den elastiska töjningskapaciteten och den viskösa töjningskapaciteten är inte obegränsad. I figur 3.3 visas de gränser som normalt finns för metalliska material. Även fiberkompositer uppvisar liknande begränsningar. Dessa gränstöjningar beskriver brottstadiet som funktion av tiden och är väsentliga då tidsberoende egenskaper behöver beaktas.

3.3 Viskoelastisk brotthållfasthet

Hållfastheten i ett material beror på dess töjningsegenskaper. Dessa töjningsegenskaper är, som tidigare sagts, beroende på existerande felaktigheter eller tillväxten av felaktigheter i tiden. Av denna anledning kommer brottöjningen inte bara att bero på påkänningen utan också av hur stor del av en kropp som är utsatt för denna påkänning och under vilken tid påkänningen verkar.

För en cirkulär kropp med effektiva längden L och effektiva tvärsnittsytan A utsatt för spänningen σ under tidsintervallet D kan brottöjningen skrivas

$$\varepsilon_g = g(\sigma, L, A, D) \quad (3.5)$$

Enligt tidigare resonemang består töjningen av elastisk och viskös töjning. Töjningsfunktionen kan alltså uttryckas i en elastisk och en viskös del.

$$\varepsilon_g = g_e(\sigma, L, A, D) + g_v(\sigma, L, A, D) \quad (3.6)$$

Där g_e och g_v är töjningsfunktioner enligt ekvation 3.2.

Den elastiska töjningskapaciteten beror i huvudsak på existerande initiella felaktigheter, vilket introducerar ett storleksberoende. Detta är samma grundläggande antagande som görs i den väletablerade Weibull teorin för att beskriva en elastisk brotthållfasthet. Den viskösa töjningskapaciteten kommer att bero på felaktigheter som växer eller tillkommer i tiden, vilket ger ett tidsberoende.

Töjningen vid brott bestäms av de fel som finns i materialet vilket innebär att den svagaste delen i materialet avgör töjningens storlek vid brott. Felaktigheterna i ett material är inte väldefinierade utan av variabel natur vilket gör att deras inverkan bäst beskrivs i statistiska termer.

Om man antar att de två olika brottformerna är oberoende av varandra kan den statistiska fördelningsfunktionen för sannolikheten att materialet går till brott för en viss töjning ε skrivas i form av en statistisk extremvärdesfördelning, en Weibull fördelning, som

$$F_x(\varepsilon(\sigma)) = 1 - \exp\left(-\frac{L_x}{L_0} \left(\frac{A_{yz}}{A_0}\right)^{k_x/k_{yz}} \left(\frac{D_x}{D_0}\right)^{k_x/h_x} \left(\frac{\sigma_x}{c_x}\right)^{k_x} - \frac{D_d}{D_0} \left(\frac{L_x}{L_0}\right)^{h_x/k_x} \left(\frac{A_{yz}}{A_0}\right)^{h_x/k_{yz}} \left(\frac{\sigma_d - r_d}{c_d}\right)^{h_x}\right) \quad (3.7)$$

där referensvärden L_0 , A_0 och D_0 har introducerats. Denna statistiska fördelning uttrycker sannolikheten för att ett brott uppstår för en elastisk eller viskös materialrespons i relation till dess varaktighet för en given volym som utsätts för en yttre påkänning.

Av praktiskt intresse i detta sammanhang är brotthållfasthetens medelvärde som för båda brottformerna kan uttryckas som

$$\sigma = \sigma_0 \left(a + b \left(\frac{L_0}{L}\right)^{1/k_l} \times \left(\frac{A_0}{A}\right)^{1/k_A} \times \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1/h}\right) \quad (3.8)$$

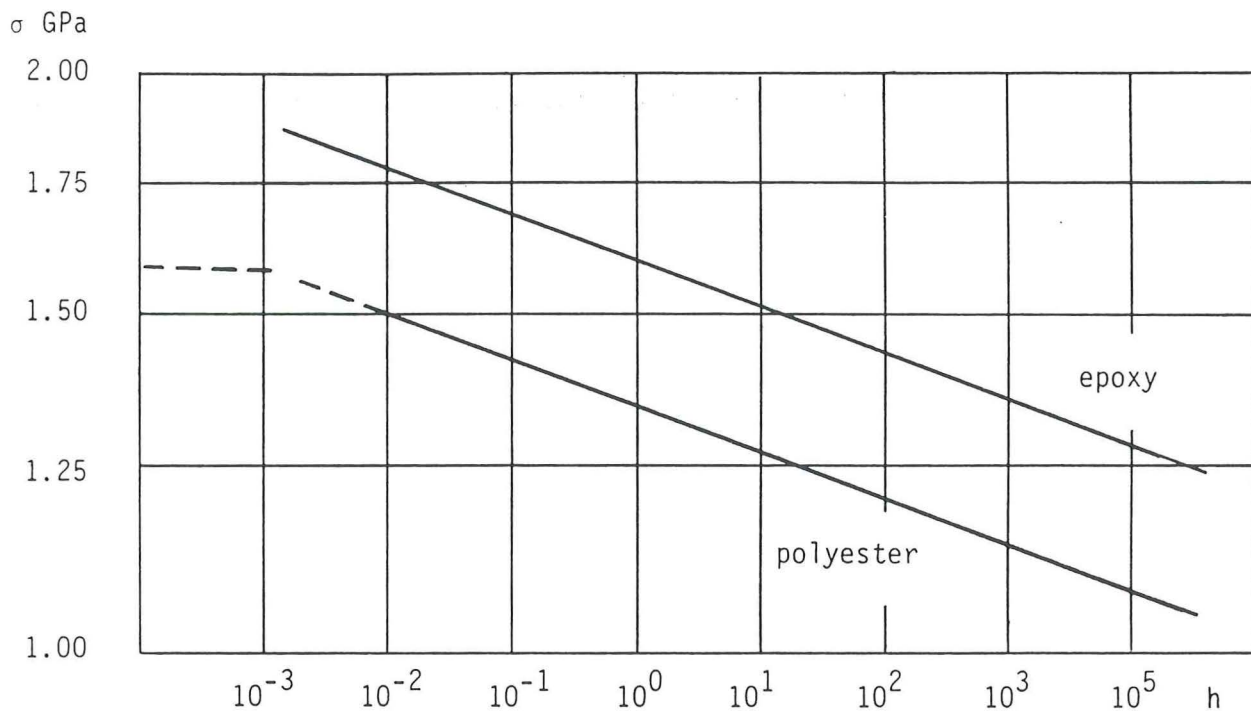
och brottlastens variationskoefficient som

$$c.o.v \approx \frac{b\left(\frac{L_0}{L}\right)^{1/k_L} \left(\frac{A_0}{A}\right)^{1/k_A} \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1/h}}{a + b\left(\frac{L_0}{L}\right)^{1/k_L} \left(\frac{A_0}{A}\right)^{1/k_A} \left(\frac{D_0}{D}\right)^{1/h}} f(k_L, h) \quad (3.9)$$

där $f(k_L, h) = \frac{\pi}{\sqrt{6}k_L}$ för en elastisk materialrespons

och $f(k_L, h) = \frac{\pi}{\sqrt{6}h}$ för en viskös materialrespons.

Med renodlade materialresponser är det möjligt att bestämma storleksberoendet och tidsberoendet.



Figur 3.4 Brottspänningens tidsberoende hos Polystal /14/.

3.4 Utmattning

3.4.1 Allmänt

Utmattningsfenomen spelar en stor roll för konstruktioner som utsätts för påtagliga varierande påkänningar. Vikten av detta materialbrottfenomen har ökat i samband med att konstruktioner dimensioneras effektivare och att påkänningar från egenvikter har blivit en allt mindre del av de totala påkänningarna. Detta gäller till exempel brokonstruktioner men också många andra former av konstruktioner som tex en vibrerande maskin vilande på ett betongfundament eller en byggnad utsatt för vindlast.

Utmattning är en komplex företeelse och beror på flera olika faktorer. Dessutom är det så att olika faktorer påverkar olika material på olika sätt. De faktorer som främst påverkar utmattningshållfastheten är

- Spänningsvidd
- Belastningsfrekvens
- Påkänningsnivå
- Belastningens form (sinuspuls, triangelpuls etc)

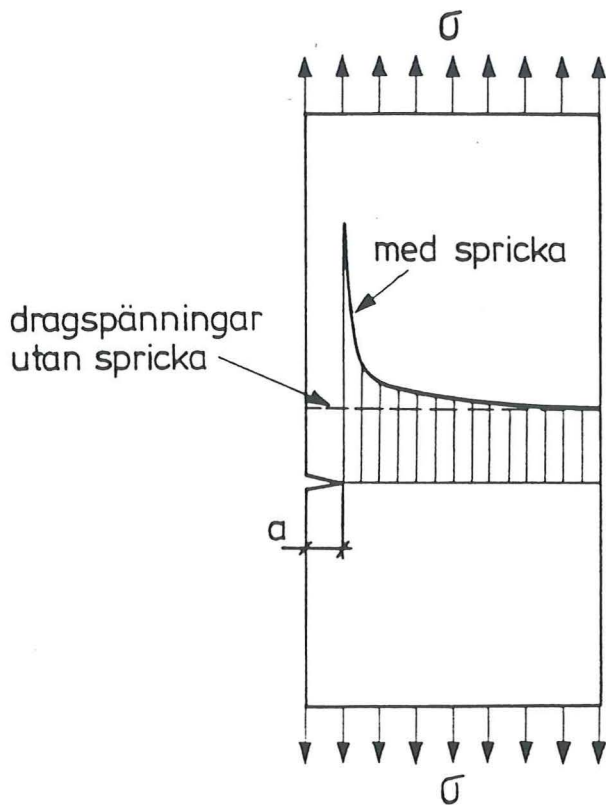
3.4.2 Materialrespons vid utmattning

Vid utmattning uppstår en materialrespons som har stora likheter med det som visas i figur 3.3. Antingen sker ett brott relativt snabbt i vad som betecknas "low cycle fatigue" eller långsamt i "high cycle fatigue". Det senare som är av praktiskt intresse kan ses som en viskös materialrespons.

Vid utmattning sker så gott som alltid en spricktillväxt. Till en början sker detta långsamt, på samma sätt som vid primärkrypning. Därefter följer en fas som ofta beskrivs med Paris-Erdogans lag för spricktillväxt vid konstant spänningsamplitud som

$$\Delta\varepsilon = \frac{[\sigma_{\max} - \sigma_{\min}]^n}{\eta} \times \Delta t \quad (3.10)$$

där $\Delta\varepsilon$ är spricktillväxten under tiden Δt för en påkänning som varierar mellan σ_{\max} och σ_{\min} och där n och η är materialparametrar. Detta uttryck beskriver en spricktillväxt på ett liknande sätt som Nortons kryplag. Men denna spricktillväxt är accelererad jämfört med viskös töjning som sker för en konstant påkänning. Precis innan brott uppstår är spricktillväxten mycket snabb. Utmattning medför en skadeackumulering i ett material och kommer därför att påverka den statiska hållfastheten. Hur mycket beror på typen av material och utmattningens omfattning.



Figur 3.5 Dragspänningsfördelning i provkropp med spricka /9/.

För en elastiskt materialkaraktisering går spänningen teoretiskt mot oändligheten vid en skarp sprickspets. Om spänningen varierar, kommer också den elasticitetsteoretiska spänningsvariationen att gå mot oändligheten vid sprickspetsen. Detta är teoretiskt möjligt för en varaktighet på påkänningen som går mot noll baserat på ekvation 3.8. I praktiken är detta inte möjligt och en skadeackumulering sker i form av en spricktillväxt. Denna spricktillväxt beskrivs oftast väl med Paris-Erdogans lag vilket innebär att det kan ses som en form av viskös materialrespons.

För fiberkompositer kan inte spricktillväxten mätas på något enkelt sätt. Dessutom förekommer den på många ställen samtidigt. Men på grund av en fiberkomposits uppbyggnad med en viskös matris är trögheten i systemet liten och utmattnings-egenskaperna blir i allmänhet goda. I stället tycks det som om det också är den effektiva tiden på en hög påkänningsnivå som spelar en stor roll för utmattnings-hållfastheten.

För praktiskt bruk används fortfarande Wöhlerkurvor som bestäms experimentellt och Palmgren-Minors delskadehypotes för summering av de skador som uppkommer vid utmattning med olika spänningsvidder.

4 PROVNING AV GLASFIBERKOMPOSITERS HÅLLFASTHET

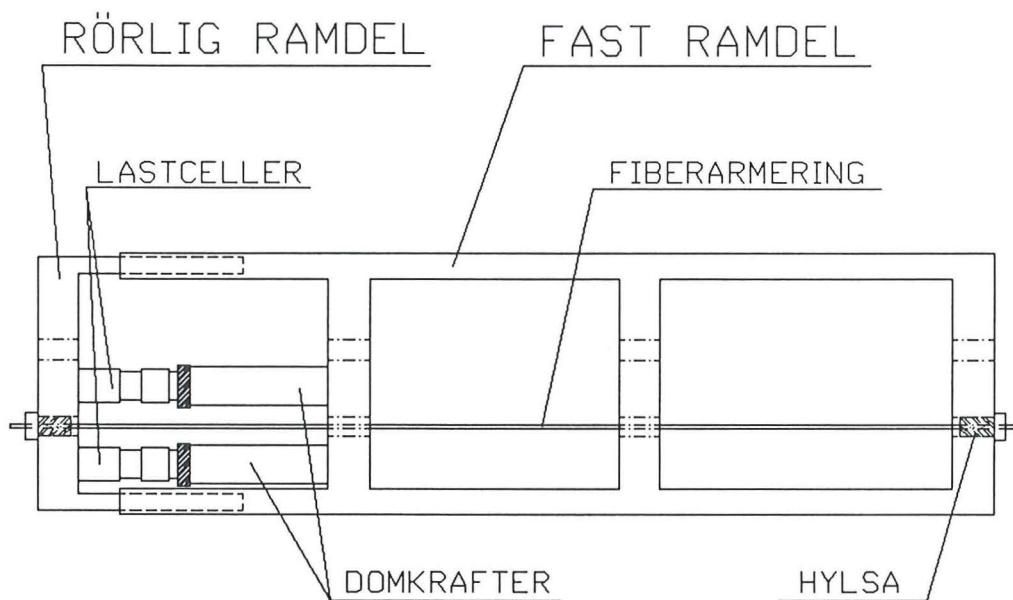
4.1 Allmänt

Hållfasthetsegenskaper definieras oftast som de egenskaper som kan bestämmas under en direkt belastning till brott. Detta är brottlasten, brottöjningen och elasticitetsmodulen. Då armering används som spännarmering är även långtidsegenskaper som relaxation av stor vikt. Mer generellt är det av intresse att bestämma de två brottytor som utgör brottkriteriet för ett material, se figur 3.4. Detta är grundvalen för en utvärdering av tillförlitligheten.

I provningarna ingick även en utvärdering av förankringsdon, som behandlas i följande kapitel.

4.2 Provningsmetodik

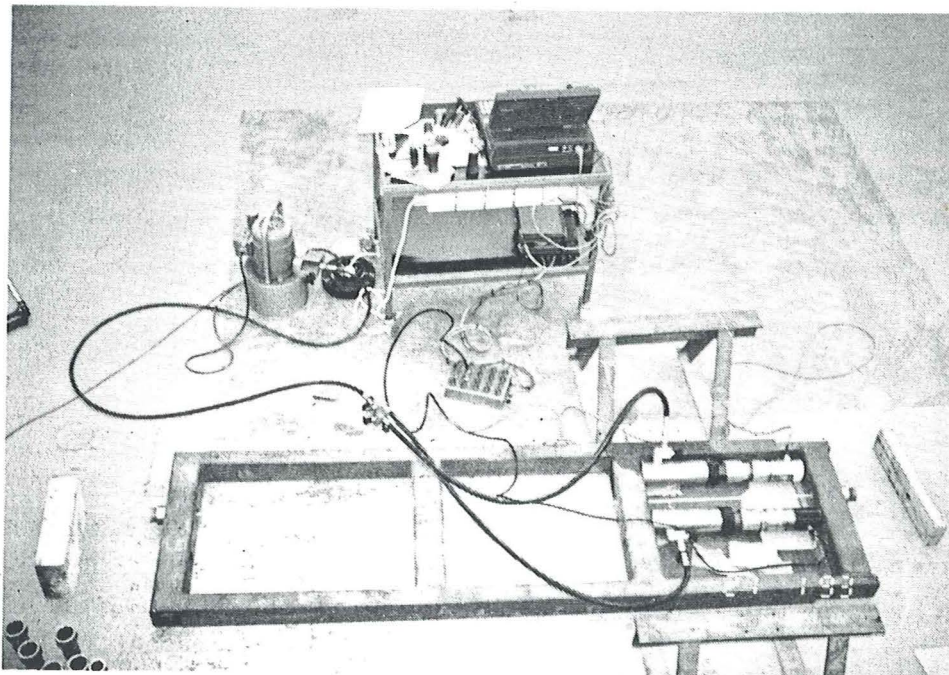
För att utvärdera olika materialegenskaper tillverkades en ram med det principiella utseende som visas i figur 4.1. Ramen tillverkades för att det skulle vara möjligt att prova olika längder, cirka 700 mm, 1400 mm och 2100 mm. Vid provningar som redovisas här har främst den större längden utnyttjats.



Figur 4.1 Principskiss över provram för bestämning av hållfasthetsegenskaper.

En provning tillgår på så sätt att stången får löpa genom borrarade hål i ramen och monteras med koniska nylonhylsor i stålhallare i respektive ytterkant av ramen. Två domkrafter pressar ut ramens rörliga del, vilket medför att de koniska hylsorna griper tag om stången och fixerar stångens ytterändar i ramen. Ytterligare utpressning av den rörliga delen gör att påkänningen i stången ökar.

Med lastceller monterade mellan ram och domkrafter erhålles lasten på stången som summan av de bägge cellerna. Lastcellerna är kopplade till dator som läser av insignaler med önskat tidsintervall.



Figur 4.2 Uppspänning av glasfiberstång i provram.

Genom att variera diameter och längd på provkropparna erhålls information om hur en glasfiberstång uppträder vid dragbelastning till brott. Ramen kan även utnyttjas vid relaxationsprovning genom att töjningen hålls konstant efter en lämplig uppspänning.

4.3 Brotthållfasthet

Brotthållfastheten har bestämts för stänger med varierande diameter och ur två olika tillverkningsserier. Den första serien ska mest ses som en testserie eftersom det visade sig att fel hade uppstått i produktionen av armeringsstängerna. Detta avspeglas främst i en hög variationskoefficient. Däremot är resultatet för tillverkningsserie två betydligt bättre. Resultat från båda tillverkningsserierna redovisas i tabell 4.1 och tabell 4.2.

Vid belastning till brott har lasten ökat manuellt. På grund av en speciell utväxlingsmetodik hos domkrafterna har belastningshastigheten varit cirka 1 kN/s initieellt och 0.35 kN/s vid belastningar som överskrider 25 kN (se bilaga).

Tabell 4.1 Brottlast för tillverkningsserie 1.

Diameter (ϕ , mm)	Antal försök	Brottlast (P, kN)	Brott- spänning (σ , MPa)	Standard- avvikelse (S_{σ} , MPa)	(C.O.V $_{\sigma}$, %)
7	8	36.30	940.0	70.7	7.52
8	3	50.11	996.9	44.1	4.42

Tabell 4.2 Brottlast för tillverkningsserie 2.

Diameter (ϕ , mm)	Antal försök	Brottlast (P, kN)	Brott- spänning (σ , MPa)	Standard- avvikelse (S_{σ} , MPa)	(C.O.V $_{\sigma}$, %)
6	7	32.24	1140.4	37.9	3.33
7	6	43.20	1122.5	71.5	6.37
8	13	55.92	1112.5	31.6	2.84

Under försöken kunde två olika brottformer observeras, där den ena relaterades till dragbrott och den andra till skjuvbrott. Dragbrottet initieras genom att mikrosprickor mellan fibrer och matris växer lokalt och frilägger fibrer i vilka fiberbrott sker. Då detta sker på flera ställen kan inte påkänningen tas upp av kvarvarande fibrer och ett totalt brott utlöses. På grund av att fiberbrott uppstod på olika ställen längs stängen blev brottytan borstlik och oregelbunden. Vissa delar skalades av och flög iväg en avsevärd sträcka.

Den andra brottformen uppstod i någon av de två förankringshylsorna. Brottytan var här relativt jämn. Detta brott initieras genom att en svaghetszon i matrisen uppstår vid

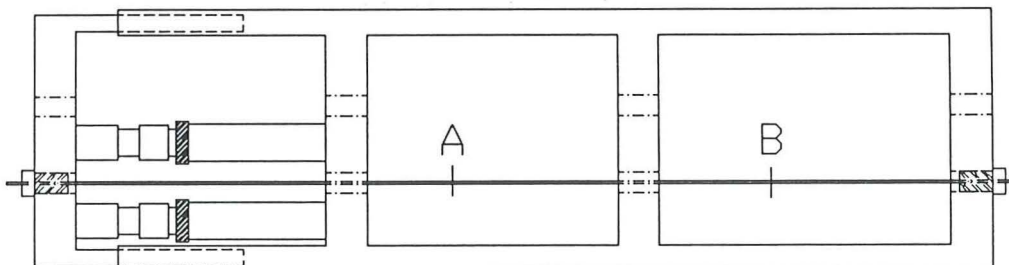
infästningen i hylsan som medför att omfördelningen mellan många fibrer kollapsar samtidigt och ett brott utlöses. Den vanligaste brottformen var dragbrottet. Hylsbrottet tenderade att förekomma i avsevärt mindre omfattning och slumpmässigt.

4.4 Elasticitetsmodul

För att bestämma elasticitetsmodul och brotttöjning krävdes deformationsgivare i provramen. Inledningsvis användes trådtöjningsgivare som var fastlimmade på stängen för att få ett direkt värde på töjningen. Metoden förkastades eftersom variationer i töjningen längs stängen gav orimliga värden.

Pålitligare resultat erhålls om de relativa lägesändringarna mäts för två punkter längs stängen. Genom att därefter dividera skillnaden mellan lägesförändringarna med det ursprungliga avståndet erhålls töjningen. Alla mätningar har utförts på cirka en meters sträcka.

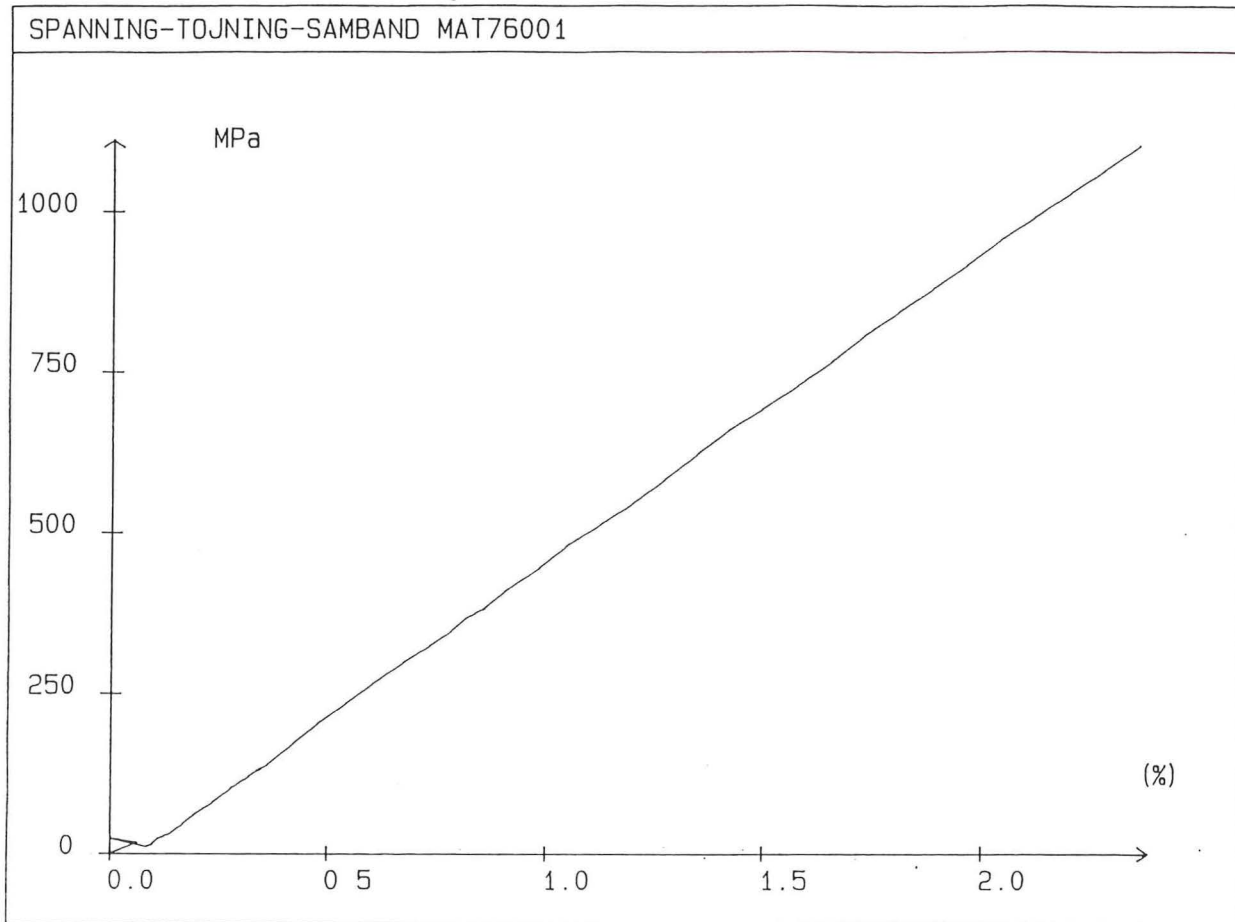
$$\varepsilon = \frac{\Delta L_B - \Delta L_A}{L} \quad (4.1)$$



Figur 4.3 Princip för utvärdering av E-modul.

Punkternas lägesförändringar mäts med deformationsgivare som mäter två träklotsars lägesändring. Träklotsarna är fixerade på stängen med hjälp av limklämmor. En möjlig felorsak vid ett dylikt förfarande är om träklotsarna glider längs stängen. Vid pålastning registrerar en dator pålagd last och lägesändring varje sekund. I de första försöken pumpades domkrafterna med handkraft. Senare pumpades domkrafterna med en elektrisk motor vilket gav en konstant lastökning. Belastningshastigheten var cirka 0.8 kN/s (se bilaga).

Av mätningarna framgår tydligt att ett nästan perfekt linjär-elastiskt förhållande råder mellan spänning och töjning. E-modulen har beräknats med minsta kvadrat metoden.



Figur 4.4 Spänning-töjning diagram för bestämning av elasticitetsmodul.

Tabell 4.3 Sammanställning över uppmätta E-moduler från tillverkningsserie 1.

Diameter (ϕ , mm)	Antal försök	E-modul (E, GPa)	Standard- avvikelse (S_E , %)	(C.O.V _E , %)	Brottöjning (%)
7	4	49.33	1.47	2.98	1.90

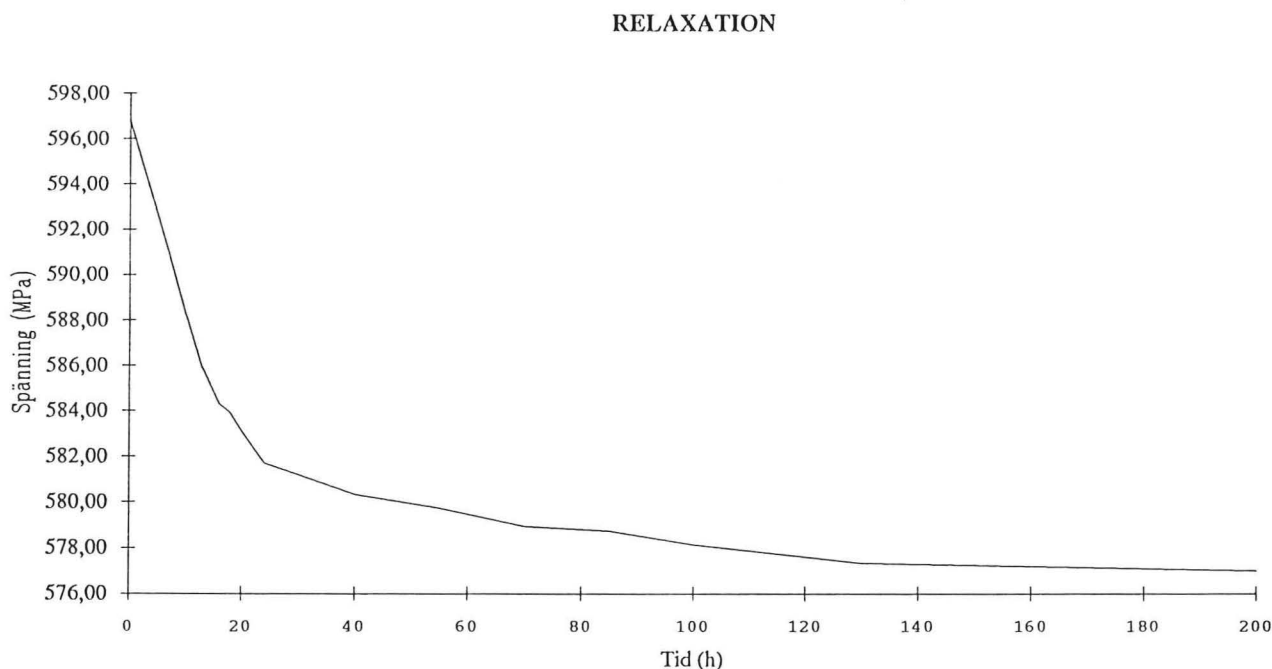
Tabell 4.4 Sammanställning över uppmätta E-moduler från tillverkningsserie 2.

Diameter (ϕ ,mm)	Antal försök	E-modul (E,GPa)	Standard- avvikelse (S_E ,%)	(C.O.V $_E$,%)	Brottöjning (%)
6	1	52,9	-	-	2.16
7	3	48.8	0.25	0.5	2.30
8	5	46.0	0.94	2.0	2.42

Trots få mätningar kan man se en tendens till att E-modulen ökar med avtagande tvärsnittsarea. Detta är kopplat till att hållfastheten avtar med ökad storlek hos kroppen.

4.5 Relaxation

I många tillämpningar är töjningen konstant i stället för påkänningen. Detta är fallet vid tillverkning av slipers då armeringsjärnen förspänns till en viss påkänning. I uppspant läge fixeras stängerna tills gjutningen är klar. Detta resulterar i att krypningen, som annars skulle ha ökat töjningen, i stället medför att spänningen i stången minskar. Fenomenet kallas för relaxation.



Figur 4.5 Relaxation under konstant töjning

Minskningen av påkänningen sker i två steg, primärkrypning och sekundärkrypning. Primärkrypningen medför en reducerad påkänningsnivå vilket kan uttryckas som

$$\sigma_1 = \sigma_i - \varepsilon_p E \quad (4.2)$$

Där σ_i är den initiella påkänningen och σ_1 är påkänningen då primärkrypningen avslutas

I försöken att fastställa relaxationsegenskaperna spändes armeringsstängerna till cirka 55 % av brottlasten i provramen. I detta läge fixerades stängerna och spänningen i stängerna registrerades med ett konstant tidsintervall.

Försöken visar att efter 100 timmar har 3.1 % relaxation skett. Efter 200 timmar har 3.3 % relaxation skett. Vid denna nivå har kurvan planat ut.

5 FÖRANKRING

5.1 Allmänt

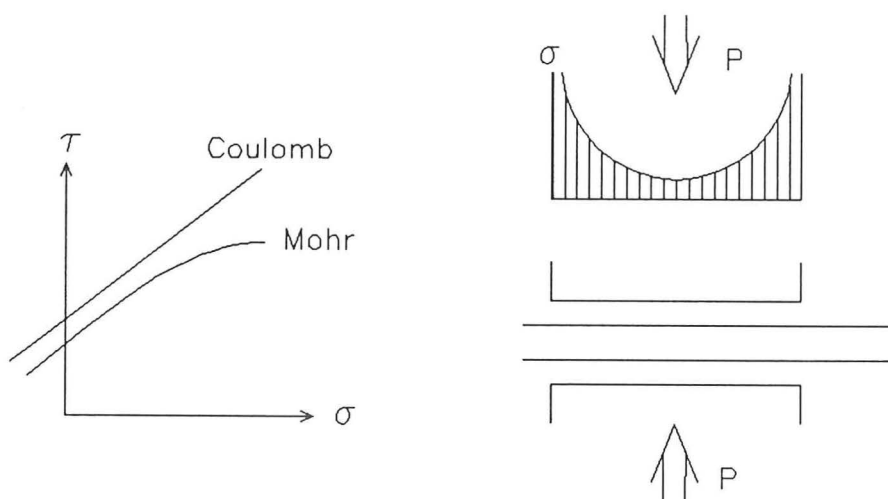
Armeringens förankringsegenskaper är väsentliga. Detta gäller armering i allmänhet men det är av speciellt intresse vid spännarmering. Spännarmering ska kunna förankras effektivt i ändarna vid uppspanning vilket ställer extrema krav på ändankarnas funktion och tillförlitlighet. Förankringen mellan armering och betong ska vara lämpligt anpassad. Dålig förankring kräver långa förankringssträckor i betongen medan för bra förankring kan medföra spjälksprickor. Hur dessa aspekter beaktas för fiberkomposit-armering redovisas nedan.

5.2 Ändankare

5.2.1 Ändankares funktion

I ett ändankare ska uppspanningskraften överföras till armeringen. I praktiska tillämpningar bör detta ske på så kort sträcka som möjligt. För att detta ska vara möjligt behöver funktionen hos hela systemet armering och ändankare behandlas tillsammans.

I princip överförs förankringskraften genom friktion. Enklast kan detta beaktas med Mohr-Coulombs princip som innebär att skjuvkraftskapaciteten ökar med normalkraften enligt figur 5.1. Genom att anbringa en lämplig normalkraft eller klämkraft mellan förankringsdon och armering uppnås en viss skjuvkraftskapacitet per längdenhet. Problemet kompliceras av att det inte är möjligt att anbringa en helt jämnt fördelad normalkraft utan att den initieellt har det teoretiska utseende som också visas i figur 5.1. Detta innebär att mycket höga tryckspänningar kan uppstå lokalt, vilket i sig kan initiera ett brott.



Figur 5.1 Principer för förankring.

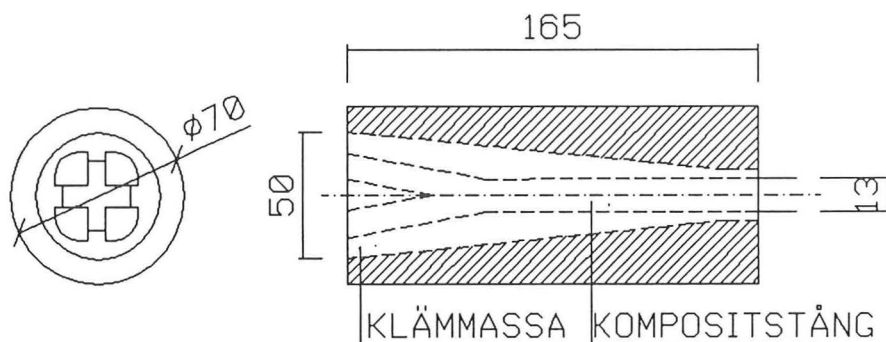
Spännlinor tillverkade av höghållfast stål, som är ett elastiskt och isotropt material, klarar av dessa tryckspänningar om monteringen av ändankarna är tillfredställande. Men med en glasfiberkomposit, som är ett ortotrop material och inte tål höga tryckpåkänningar, är det inte lika enkelt. Dessutom är elasticitetsmodulen lägre än för stål vilket skapar ytterligare problem vid stora töjningar.

5.2.2 Tidiga försök med olika förankringar

För att överföra kraften mellan stång och förankring utnyttjas vidhäftning eller friktion mellan stång och hylsa. I en tysk rapport från 1979 /3/ redovisas försök med olika typer av förankring. Där användes helt släta stänger till skillnad från de sandbelagda som ingår i denna undersökning. Försöken var mycket grundliga och lämnade ingenting åt slumpen. Förankringsprinciperna kan grovt sett delas in i två huvudgrupper:

1. **Aktiv förankring.** Ökad dragkraft i stängen ger ökad tryckkraft i hylsan och därmed förbättrad skjuvkapacitet.
2. **Passiv förankring.** Tryckkraften är konstant och därmed ändras inte skjuvkapaciteten.

Passiva förankringar kan vara lämpliga vid provningar i laboratorium eller då lämpliga aktiva ändankare inte finns tillgängliga. Problemet med dessa är att de kräver långa förankringssträckor och är omständliga. Passiva förankringar kommer endast att beröras kortfattat i denna rapport.



Figur 5.2 Klämförankring med en yttre konisk hylsa och en inre som skapats genom att stången kluvits på längden och harts injekterats /3/.

I de första tyska försöken injekterades harts i en rak hylsa av stål med längden 300 mm. De höga dragspänningarna i början på förankringen ledde till att vidhäftningen inte räckte till, vilket vid de flesta försöken ledde till utdragning av stängen ur hylsan. För att erhålla starkare förankring, provades ytterhylsor med koniska innertvårsnitt. En inre kon skapades genom att klyva armeringsstången i änden och därefter injektera harts ($E=350$ MPa) enligt figur 5.2.

Förankringskraften påverkas genom hylslängden, vägglutningen och E-modulen hos den injekterade hartsen. Försöksresultaten var blandade och problem erhöles med krympning hos hartsen då den härdade.

För att utvärdera modellen med konisk hylsa gjordes omfattande försök där man först beräknat påkänningarna i hylsan. En jämnt fördelad tryckspänning över hylsväggen antogs. Stängerna som användes var släta med måtten 15×15 mm och korttids-draghållfastheten var 1400 MPa. De instuckna stängerna klövs i 9 delar längs förankringslängden 150 mm, och separerades med distansringar. För att utvärdera innerhylsans krympning användes två olika material. Dels injekterades ren harts ($E=3800$ MPa), dels en blandning med 40 % harts och 60 % sand. Ytterhylsornas råhet på insidan utvärderades genom att jämföra polerade ytor med sandblästrade. I alla försöken smordes yttershylorna med teflon. De högsta dragspänningarna erhöles med en rå hylsyta och sandinblandad harts. Brotten låg på endast 65-75 % av stängens hållfasthet. Brottsnittet låg i allmänhet 3-4 cm in i hylsan, räknat från snittet där stängen går in i hylsan. Vid senare försök med 5×10 mm stänger uppnåddes 1290 MPa. Vid brottet splittrades stängen i den fria längden. Hållfastheten var visserligen mindre än 1400 MPa men målet att få fram en principiell förankring var nått. I rapporten förordas harts med sand som fyllnadsmaterial. För att få en jämnare påkänningsfördelning föreslås även en ytterhylsa med krökt konlinje.

5.2.3 Ändankare för fiberkomposit

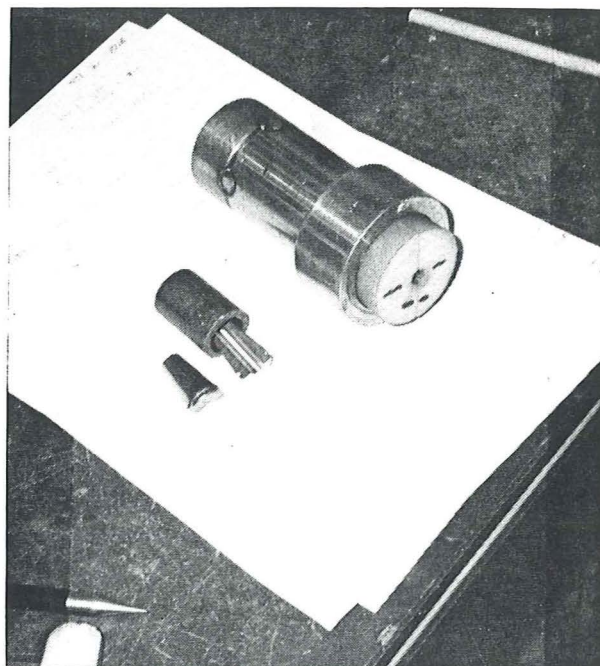
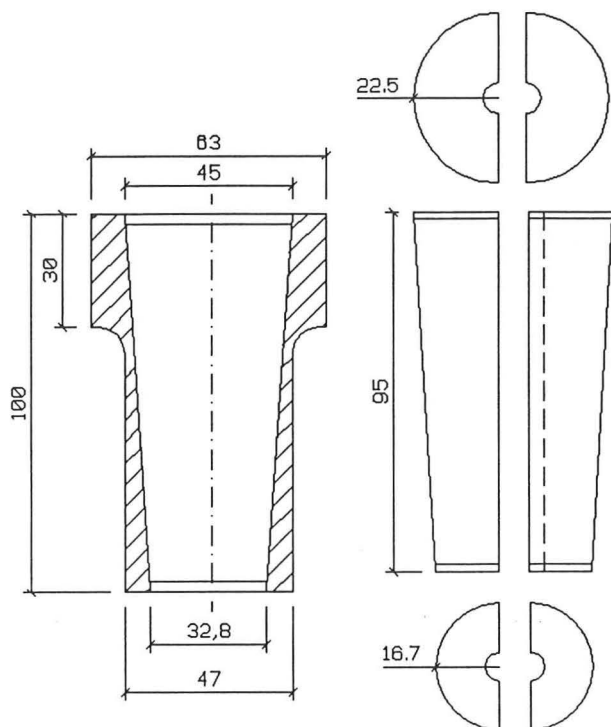
Under 80-talet vidareutvecklades förankringsmetoderna fram till den hylsa som använts vid de försök som redovisas i denna rapport. Förankringen visas i figur 5.3 och består av en stålhylsa och två innerhylsor av nylon. Med en innerhylsa av nylon uppnås två viktiga materialegenskaper. Nylon är ett material med en lämplig elasticitetsmodul som står i relation till den som gäller för fiberkomposit. Nylon uppvisar också lätt en viskös respons vilket minskar spänningskoncentrationen i förankringens ändar. Dessutom tycks den sandade ytan på en stång fungera väl i kontakten med nylon. Förankringen kräver att armeringsstången är sandad för att fungera tillförlitligt. Jämfört med de första ändankarna är det en klar förbättring. Splittring av stängen och injektering av harts kan undvikas. Hylsan är relativt kort och den går att återanvända. Utvecklingen av den är baserad på försök eftersom beräkningar med viskösa och plastiska responser i hylsan blir svåra och otillförlitliga. Nylonets respons beror nämligen inte bara på spänningstillståndet utan även på temperatur, tillverkningsmetod och fuktighet i materialet.

Ett ändankare för fiberkomposit har stora dimensioner jämfört med liknande förankring för ställina. En fortsatt utveckling kommer sannolikt att minska fiberkomposithylsans dimensioner.

MATERIAL

YTTERHYLSA-STÅL

INNERHYLSOR-POLYAMID PA6



Figur 5.3 Ändankare för fiberkomposit. På högra bilden visas även ändankare för ställina (den lilla).

Montering av förankringen görs genom att stången förs igenom den yttre stålhylsan. Därefter trycks nylonkilarna in med stången emellan sig. Vid uppspänningen greppas stålhylsan i klackarna och förs utåt. Nylonhylsorna följer då med stången in i ytterhylsan och klämmer samtidigt hårdare om stången. Klämkräften hos nylon tycks ge en jämnt fördelad tryckspänning över förankringslängden. Hylsan som visas i figur 5.3 är tänkt att användas till kompositarmering med samtliga fibrer orienterade i samma riktning och med en slät, sandad yta. Högpresterande fiberkompositer med ytliga fibrer lindade runt stången i spiralform lämpar sig troligtvis mindre bra för denna förankring.

Metoder för användning av många linor på en gång där ändankaret kvarlämnas under konstruktionens livslängd, som t. ex. vid ett vajerpaket i en bro finns utvecklade för vissa fiberkompositarmeringar, i Japan och Tyskland. Flera exempel på broar armerade med glasfiberkomposit finns utförda på detta sätt. En metod, som används i Tyskland, är en utveckling av den metodik som finns beskriven tidigare för en stång till

att även gälla för flera stänger. En annan metod provas i Japan där ett antal stänger fixeras i en gemensam konisk stålkonstruktion. Detta leder till stora spänningskoncentrationer i de fiberflätor som används och medger endast uppspanning till cirka 50 % av flätans brottslast.

Under de försök som redovisats i kapitel 4 har bara problem uppstått då armeringsstängerna varit bristfälligt sandade eller blivit skadade. Innerhylsor avsedda för ϕ 6 mm stång provades även tillsammans med en ϕ 7 mm stång och det fungerade utan problem. Det ska påpekas att utfräsningen i nylonet som ska ge plats för stängen ska ha något mindre dimension än armeringsstången.

På grund av den höga påkänningen som nylonhylsorna utsätts för uppstår förslitning och deformation i dem. Dessa deformationer yttrar sig i utvidgning av utfräsningen till stängen och sämre friktionsyta i densamma. Detta leder till att livslängden för den presenterade förankringen blir begränsad. Vid laboratorieförsök har stänger uteslutande dragits till brott, vilket ger större påfrestningar än normala arbetsbelastningar, och förankringen har då visat sig fungera cirka tio gånger utan byte av nylonhylsor. Hylsan anses fungerande så länge brottet uppstår i fria längden och ej i hylsan. Några vidare undersökningar av livslängden på hylsorna och dess beroende på material och påkänningar har inte gjorts.

5.3 Förankringsegenskaper i betong hos förspänd armering

5.3.1 Beskrivning av begrepp

Vid förspänning spänns armeringen upp före gjutningen. Efter att betongen härdat tillräckligt släpps förspänningen och kraften överförs till betongen via armeringens förankring. I Report on prestressing steel /1/ rekommenderas att betongen ska ha uppnått en kubtryckhållfasthet på minst 30 MPa vid avspänning och 40 MPa efter 28 dygn, för att betongen ska klara av denna överföring. Detta gäller för spännlina av stål med 7 trådar, men är troligtvis tillämpligt även för andra former av armering. Detta kan förväntas gälla också fiberkompositer.

Sträckan från balkänden som krävs för att full spännkraft helt ska överföras till betongen kallas förankringslängd. Inom förankringslängden stiger tryckspänningen i betongen från noll vid änden till det som avspeglar full förspänning. Samtidigt uppstår också dragpåkänningar vinkelrätt mot tryckpåkänningarna. Spänningsfördelningen inom tvärsnitten beror på armeringens placering. Vid snabb avspänning av armeringen kan förankringslängden påverkas negativt. De dynamiska effekterna leder till lokal spjälkning och en längre förankringssträcka erhålls.

De mekanismer som styr förankring är

1. Fysisk kontakt och låsning mellan armering och betong.
2. Friktion som beror på armeringens tvärsnitt.
3. Klämkraft som varierar längs förankringslängden beror på att diametern hos armeringen är större i början eftersom dragspänningen är liten. Tvärkontraktion medför detta fenomen som kan beskrivas som att armeringen har en mycket svag konisk form längs förankringslängden.

Vid överföring av förankringskraften till betongen uppstår en komplicerad påkännings-situation. Av speciellt intresse är dragpåkänningar som uppstår vinkelrätt mot armeringsriktningen.

En god förankring ger en kort förankringssträcka men också högre dragspänningar i betongen längs förankringen. Om dragspänningarna blir för stora bildas små sprickor i betongen som försämrar förankringen. Vid tillverkning efterstängs därför en lämplig förankringslängd där full förspänning uppnås så nära balkänden som möjligt utan att därmed riskera spjälksprickor.

Följande åtgärder är lämpliga för att minska dragspänningar i betongen

1. Tillräckliga avstånd mellan armeringsstängerna
2. Undvik överdriven vidhäftning som t.ex. kammar på stålarmeringen eller för kraftig sandning på en fiberkomposit.
3. Tillräcklig draghållfasthet i betongen vid avspänning.
4. Tillse att betongtäcksiktet är tillräckligt för aktuell armeringsdiameter.

5.3.2 Normer för beräkning av förankringslängd.

Normerna som beskriver förankringslängden varierar mellan olika länder. Alla parametrar som påverkar förankringslängden är svåra att uppskatta och tillverkningsmetoden spelar stor roll. I USA pågår för tillfället undersökningar som syftar till att ge bättre metoder för beaktning av förankringslängder.

BBK definerar förankringslängden L_t som sträckan som krävs för att överföra spännkraften till betongen. Kraftöverföringen påbörjas på avstånd 10ϕ från armeringens ände vid långsam avspänning och 20ϕ vid snabb avspänning. I BBK ges L_t som

$$L_t = \beta_b \phi \quad (5.1)$$

där β_b är 55 för ställina vid långsam avspänning. Verklig förankringslängd bestäms bäst genom provning.

I "Design of Prestressed Concrete" /6/ antas

$$L_t = \frac{f_{pe}}{3} d_b \quad \text{räknat från armeringens ände.} \quad (5.2)$$

f_{pe} =effektiv förspänning (ksi*)
 d_b =nominell lindiameter

(*) 1 ksi=6.895 Mpa, 1 inch=25.4 mm

Efter försök har formeln modifierats till

$$L_t = \frac{1.5f_{pi}}{f_{ci}} d_b - 4.6 \quad (\text{inches}^*) \quad (5.3)$$

f_{pi} = initiell förspänning (ksi)
 f_{ci} = betongens tryckhållfasthet vid avspänning (ksi)

vilken allmänt nämns i litteraturen och sägs vara tillförlitlig för betonghållfasthet mellan 14 och 55 MPa.

I USA rekommenderar branchorganisationen ACI för linor med 3 och 7 trådar

$$L_t = (f_{ps} - 2f_{pe}/3)d_b \quad (5.4)$$

f_{ps} = nominell hållfasthet (ksi)

Samma branchorgan redovisar i sin tidskrift /2/ en undersökning där förankringslängden bäst överensstämmer med

$$L_t = \frac{f_{pi}}{3} d_b \quad (5.5)$$

En stor polsk undersökning /1/ på 7-trådiga linor kom fram till

$$L_t = 13.2 d_b \sqrt{\frac{f_{pi}}{f_{ci}}} \quad (5.6)$$

I brottstadiet ökar förankringslängden eftersom sprickbildningen gör sig gällande. Då föreslås att (5.3) ersätts med

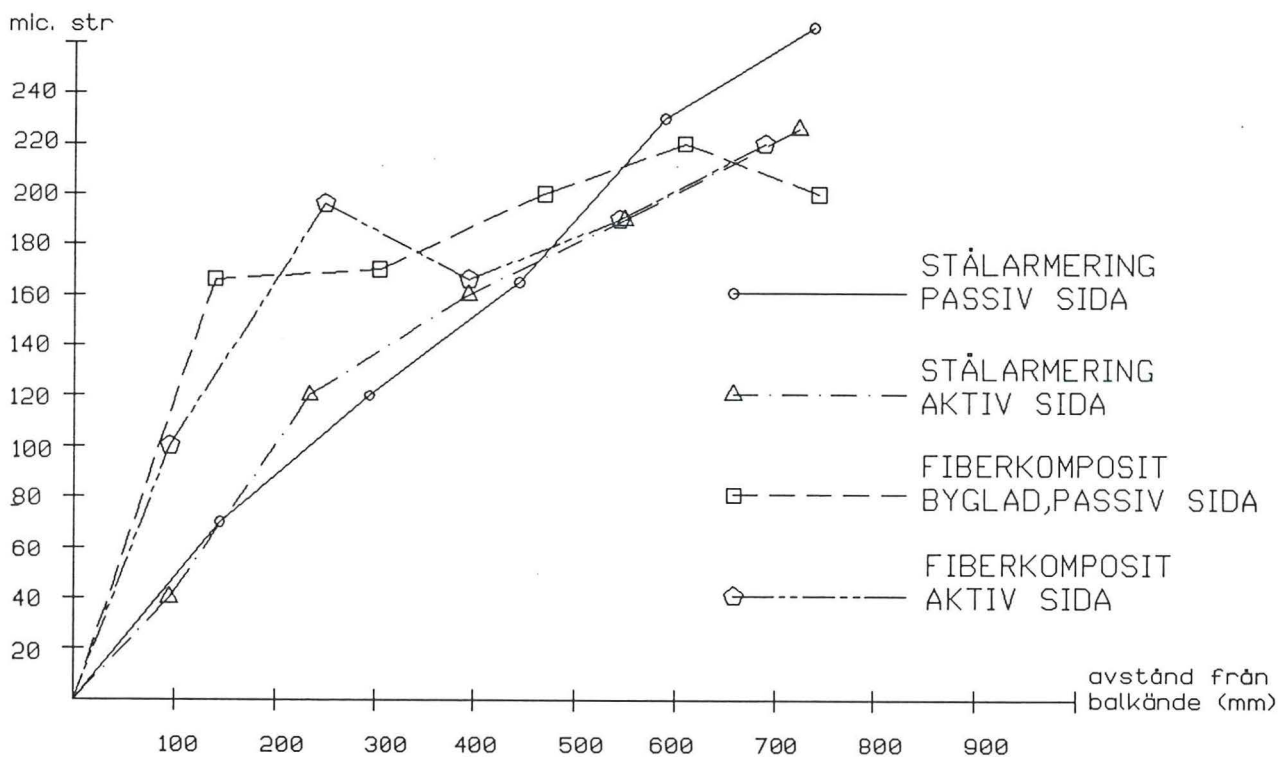
$$L_{t,brott} = 1.25(f_{pu} - f_{pe})d_b + L_t \quad (5.7)$$

f_{pu} = stålets dragbrottspressning (ksi)

Flera av normerna tar inte hänsyn till betonghållfastheten vilket förefaller orimligt då betongen har avgörande betydelse för förankringen. För att utvärdera de olika rekommendationerna kan en jämförelse med mätvärden från avspänningen av sliparna vara av intresse.

5.3.3 Uppskattning av förankringslängder i stålarmerad respektive fiberkompositarmerad sliper.

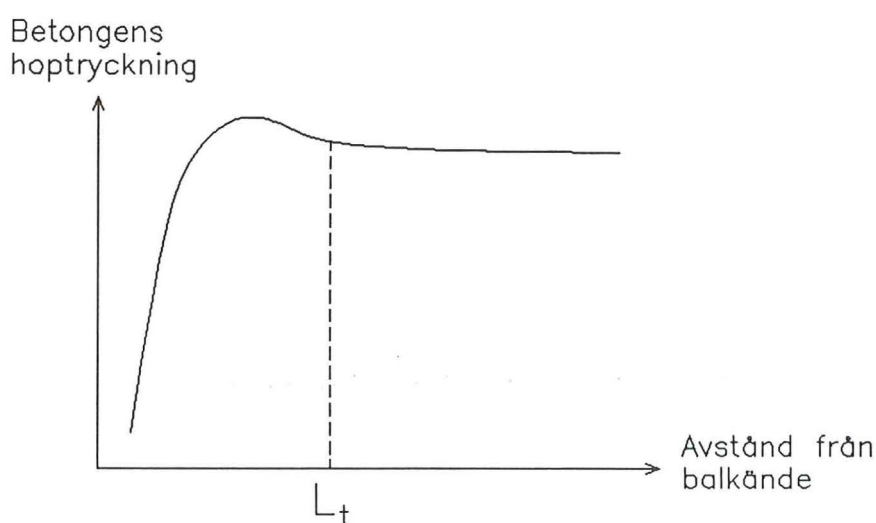
För att utvärdera förankringslängden hos armeringen i järnvägsslipers placerades trådtöjningsgivare på sidan av elementen. Genom att mäta betongens hopdragning vid avspänningen erhöles en god bild av hur förankringen är fördelad. Givarna placerades mellan 95 och 750 mm från balkände fördelade fem stycken per sliper. Alla sliparna hade olika förutsättningar för förankring. Resultatet visas i figur 5.4, där aktiv ände betecknar den riktning där uppspänningskolvorna befinner sig



Figur 5.4 Hoptryckning av betongen 10 min efter avspänning av fyra olika sliprar. Med aktiv ände menas den riktning där uppspänningskolvorna finns. Symbolerna markerar mätpunkt.

Figur 5.4 visar att betongen trycks ihop snabbare med den sandade fiberkompositstången än med ställinan. Slipern har varierande tvärsnittsarea (se figur 6.3) och därför blir hoptryckningen vid fullständigt överförd förspänning svår att utvärdera. Dessutom blir hoptryckningen större vid ytan eftersom armeringen är ytligt placerad i förhållande till tyngdpunkten.

Det förväntade utseendet på hoptryckningen av ett kontinuerligt tvärsnitt visas nedan i figur 5.5. Formen på kurvan har dokumenterats i ett flertal undersökningar. Puckeln som syns vid uppnådd förankringslängd saknas för de stålarmade sliprarna enligt figur 5.4, vilket troligtvis beror på det varierande tvärsnittet. Fiberkompositarmeringen har dock antydning till puckel vilket kan förklaras med att tvärsnittet inom den korta förankringslängden inte varierar lika mycket.



Figur 5.5 Förväntat utseende på hoptryckningen av betongen vid balkände.

För att kunna uppskatta förankringslängden ur figur 5.4 krävs en känd töjning i betongen som motsvarar fullt överförd förspänning. Eftersom uppspänningskraften är känd kan denna töjning beräknas enligt nedan.

$$A_{\text{btg,max}} = 48 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$E_{K70} = 37.5 \text{ GPa}$$

$$P_i = 0.9 \times 28 \text{ kN} = 25.2 \text{ kN}$$

$$\varepsilon = \frac{F}{A \times E} = \frac{25.2 \times 10^3}{48 \times 10^{-3} \times 37.5 \times 10^9} = 140 \mu\text{str}$$

Där 140 μstr får anses vara ett approximativt värde. Här räknas inte med några uppspänningsförluster. Trådtöjningsgivarna klistrades på då 90 % av uppspänningskraften återstod.

En jämförelse med kurvan ger att den byglade slipern (1 ϕ 6 bygel), som har den kortaste förankringslängden, trycks ihop 165 μstr vid 140 mm. Det faktum att hoptryckningen ökar även efter L_t beror dels på att betongarean har minskat efter sitt maximum under rälsen, dels på att täcksiktet är mindre, vilket medför att hoptryckningen ökar (se figur 6.3).

Om full förankring är uppnådd vid 140-180 μstr hoptryckning av betongen ger detta att förankringslängden är cirka 500 mm för stålarmrad sliper. Detta är även vad Abetong uppskattar. För fiberkompositen är då L_t cirka 300 mm. Bygelns inverkan syns tydligt och beror på den ökade draghållfastheten i snittet. Det verkar däremot inte som om förankringslängden skiljer sig påtagligt mellan aktiv och passiv sida. En noggrannare bestämning fordrar att töjningen mäts direkt på armeringen.

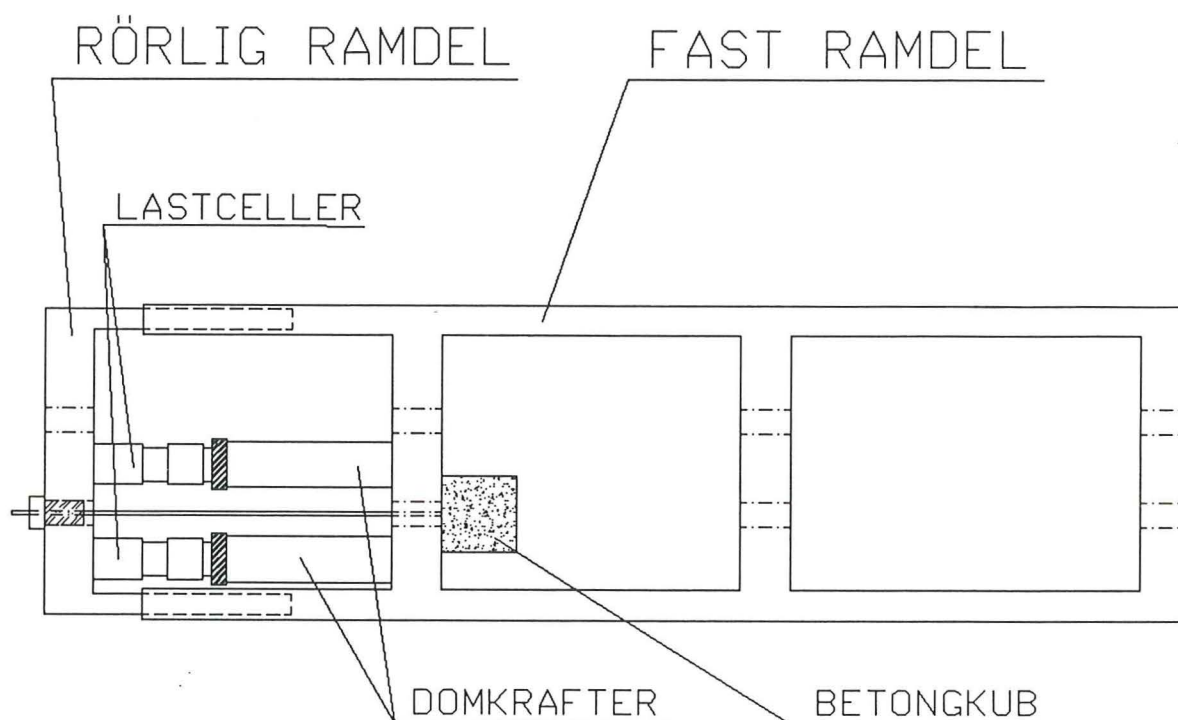
En jämförelse med rekommenderade uppskattningar av förankringslängden ger följande tabell.

Tabell 5.1 Jämförelser mellan olika rekommendationer för hur förankringslängden ska beräknas.

Parameter	Stålarmrad	Fiberkompositarmrad
f_{ci}	38.3 MPa	38.3 MPa
f_{ps}	1640 MPa	1100 MPa
d_b	6.5 mm	8.0 mm
f_{pe}	1130 MPa	520 MPa
f_{pi}	1320 MPa	560 MPa
uppskattad L_t ur figur 5.5	500 mm	300 mm
ekv. 5.1 (BBK)	358 mm	parameter saknas
ekv. 5.2	355 mm	201 mm
ekv. 5.3	219 mm	59 mm
ekv. 5.4	836 mm	874 mm
ekv. 5.5	415 mm	216 mm
ekv. 5.6	504 mm	404 mm

Skillnaderna är påfallande stora. Ekvation 5.3 underskattar förankringslängden kraftigt medan 5.4 överskattar densamma. En anledning till detta kan vara att 5.4 ger den längd

som rekommenderas av ACI och de vill vara på säkra sidan. Det ska påpekas att inga av ekvationerna påstås gälla för fiberkompositar.



Figur 5.6 Uppställning vid utdragningsprov.

För att få ytterligare jämförelser av förankringslängden hos stålarmering med fiberkompositarmering genomfördes utdragningsprov, där armering som gjutits fast i betongkuber drogs ut. Testkropparna var gjutna vid samma tillfälle som järnvägssliparna. Betongkuben fungerade som ändankare på ena sidan och en vanlig förankring på den andra enligt figur 5.6. Fri längd på armeringen var 70 cm.

Tabell 5.2 Resultat från utdragningsprov där armering dragits ur betongkuber.

Armeringstyp	Stållina 3 ϕ 3 mm (normal armering)	Glasfiberberkomposit ϕ 8 mm
antal prov	2	5
maxkraft	18.3 kN	26.5 kN
minkraft	13.5 kN	19.7 kN
medelkraft	15.9 kN	23.0 kN

Som tidigare nämnts kan resultatet inte överföras direkt till förhållandena i förspänd miljö. Utdragskraften är cirka 50 % högre för en kompositstång jämfört med en ställina. Till viss del kan detta förklaras med en större friktionsyta på kompositstången.

I spännarmerade konstruktioner utan permanenta ändankare, som det är frågan om här, drar armeringen ihop sig efter att ändankaret tagits bort. Denna hopdragning visar sig i balkändens kapsnitt där armeringen glider in i betongen. Inglidning av armering sker vid balkänden på all förspänd armering och beror på att armeringen drar ihop sig då uppspänningskraften ska överföras längs förankringslängden i stället för via ett ändankare. Linorna kan inte förankra uppspänningen direkt i kapsnittet eftersom det blir för höga dragspänningar i överföringsytan. Denna inglidning uppskattas till cirka 0.5 mm för de stålarmade sliprarna och cirka 2 mm för de kompositarmerade. Att indragningen skiljer sig beror mest på kompositens lägre E-modul.

"Anchorage and applications" /1/ ger inglidningen

$$\delta = \frac{4.6}{E_p} \times d_b \times \sqrt{\frac{f_{pi}^3}{f'_{ci}}} \quad \text{för 7-trådiga linor} \quad (5.8)$$

Ställinan i en sliper är 3-trådig men (5.8) borde vara tillämpbar och ger $\delta = 1$ mm.

6 Tillverkning av slipers

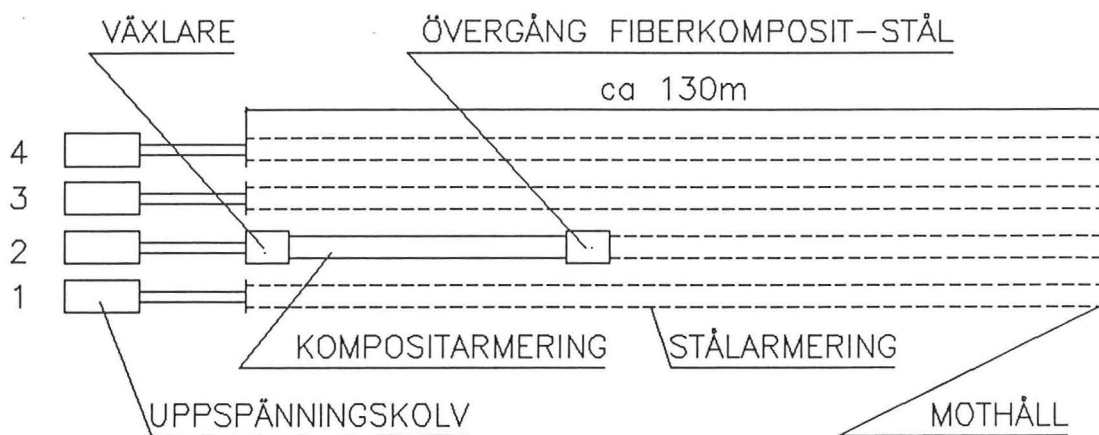
6.1 Förberedelser

I september-92 bestämdes formerna för hur tillverkningen av slipers med glasfiberkompositarmering skulle ske, och vilka problem som behövde lösas. Tanken med hela tillverkningen var att den skulle ske på samma sätt som med stålarmring (se ritning figur 6.3). Det största problemet var då att kolvarna i Abetongs fabrik i Vislanda var avpassade för att spänna upp en viss maxlängd. Glasfiberkompositens relativt stora töjningsförmåga medförde att uppspänningslängden måste ökas över kolvarnas maxlängd om spännkraften ska vara samma som för stålarmring. Problemet löstes genom en avvaxling som beskrivs i kap 6.2. Alla praktiska problem vid gjutningen, främst då uppspänningen, löstes av Abetong. Kontroll av hylsor och de påfrestningar som fiberkompositen skulle komma att utsättas för, ingår i detta examensarbete. Totalt tillverkades 16 stycken slipers med glasfiberkompositarmering. Av dessa 16 delades tre stycken i enlighet med provningsförfarandet som beskrivs i kapitel 7.

6.2 Tillverkningsmetodik

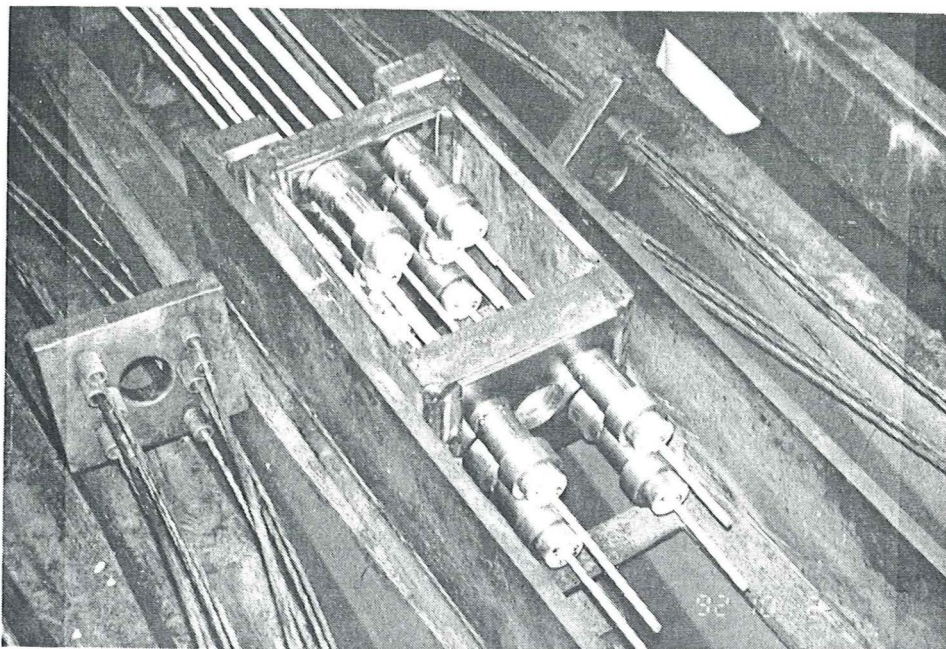
Eftersom tillverkningen endast var tänkt att vara ett försök och inte någon kommersiell produkt valdes ϕ 8 mm glasfiberkompositstång som spännarmering i sliperarna. Tillverkningen skedde i början av detta projekt, och då fanns endast begränsad information som visade glasfiberkompositens uppträdande under lång tid tillgänglig. Vid tillverkning sker uppspänning till 280 kN per paket om tio armeringslinor med diametern ϕ 6.5 mm. Fiberkompositsliperarna tillverkades på samma sätt. Detta innebar en medelbelastning på 560 MPa för armeringen som ska jämföras med korttidshållfastheten på 1100 MPa. Valet av dimension innebar en överdimensionering för att undvika överraskningar. Den optimala dimensionen skulle varit ϕ 7 mm. De förberedande provningarna visade så låga variationer i brottlast som 2 %. Hylsorna testades och fungerade bra efter justering av innerhylsornas diameter. Som en test utsattes även stången för milt våld då den var uppspänd till arbetslast.

Det befarades att fiberarmeringen skulle ha så kort förankringsstrecka att olika typer av sprickbildning skulle ställa till problem. Detta ledde till att de tre kompositarmerade slipers som skulle provas enligt kapitel 7 tillverkades med en ϕ 6 mm stålbygel i varje sliperhalvas ände. Den korta förankringssträckan ger bra momentkapacitet nära stöd men utsätter betongen för stora dragpåkänningar vid höga laster.



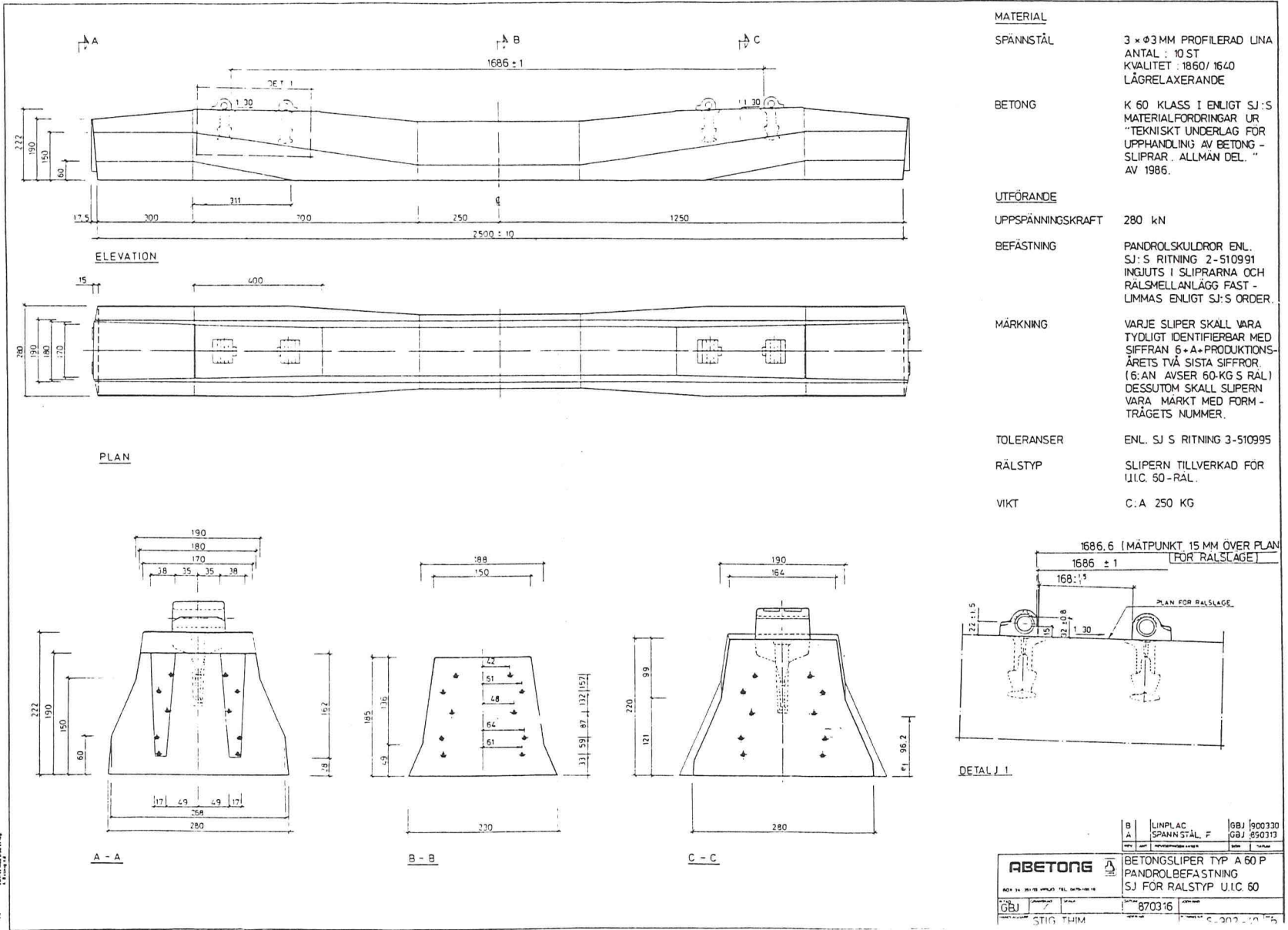
Figur 6.1 Schematisk bild över gjutbordet (ej skalenlig).
Varje armeringslinje motsvarar fem stycken armeringslinor.

Tillverkning sker på gjutbord som är ca 130 m långa där fyra rader gjuts enligt figur 6.1. Varje uppspänningskolv spänner upp armeringen till en rad med sliper. Därefter sker gjutning och härdning. Mellan varje sliper sitter mellanlägg som håller kvar betongen. I formarna finns även distansplattor som fixerar armeringen. Efter härdningen släpps förspänningen och armeringen kapas mellan elementen.



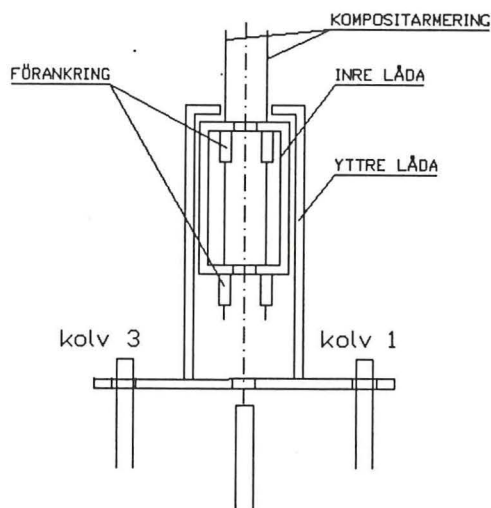
Figur 6.2 Hylsor placerade i uppspänningsanordning.

Figur 6.3 Ritning på sliper.

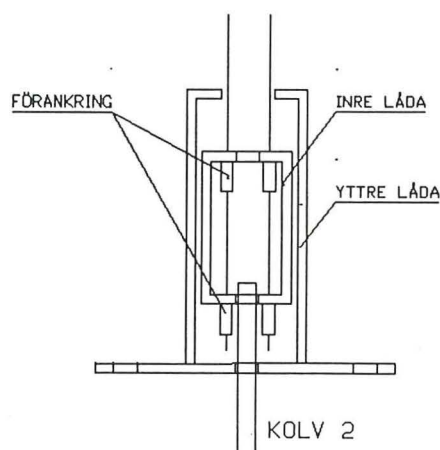


Vid gjutningen tillverkades inte en hel linje med kompositarmering och därför var det nödvändigt att ha en övergång mellan stål och fiberkomposit mitt på bordet. Detta möjliggjordes med en låda där övergången skedde. Vid aktiva änden monterades en avväxlande låda för att kunna öka uppspänningslängden. Funktionen var enkel. De intilliggande kolvarna 1 och 3 spände lådan en bit. Därefter kopplades kolv 2 på och fixerades vid en inre låda. Kolv 1 och 3 användes därefter som vanligt. Av bilderna nedan framgår att förankringen av fiberkompositen sker på olika nivåer i lådorna. Detta är nödvändigt eftersom kompositförankringen tar mycket större plats än stålförankringen.

FÖRSTA DELEN AV UPPSPÄNNINGEN

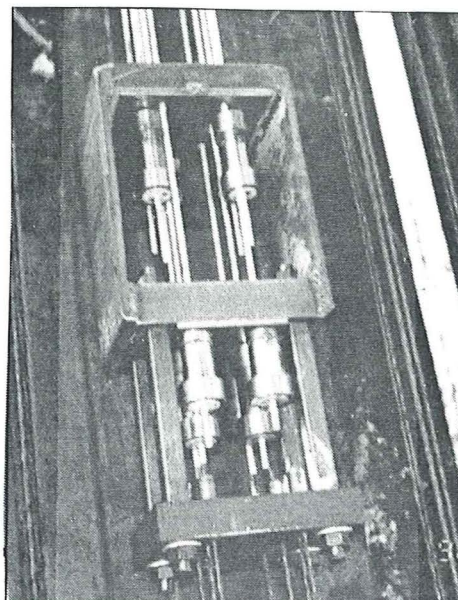
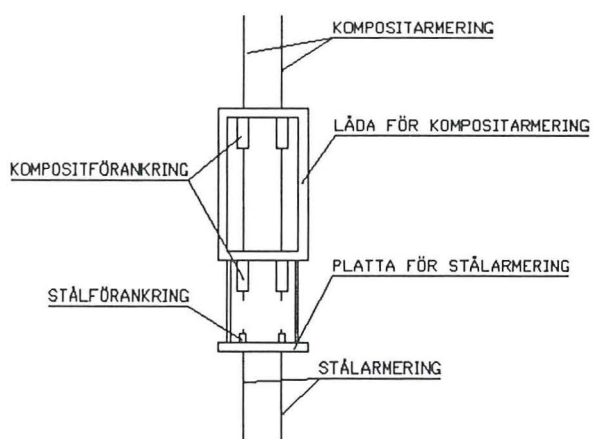


ANDRA DELEN AV UPPSPÄNNINGEN



Figur 6.4 Schematisk bild på funktionen hos den aktiva, växlande lådan. Varje armeringslinje motsvarar fem stycken armeringslinor.

ÖVERGÅNGSLÅDA FIBERKOMPOSIT-STÅL



Figur 6.5 Schematisk bild på passiv låda (vänster). Fotografi på samma låda (höger).

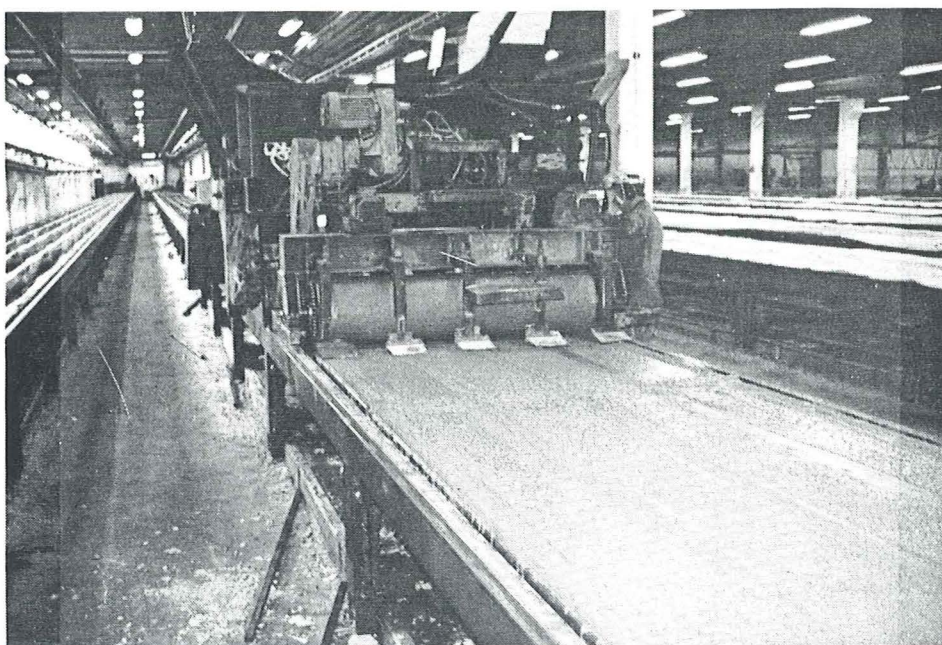
Med detta förfaringssätt uppnåddes en stor fördel eftersom en stålsliper kunde jämföras med en intilliggande fiberkompositssliper som var tillverkad under precis samma betingelser.

Uppspänning till halva förspänningskraften skedde dag 1. I vanliga fall sker full uppspänning direkt innan gjutning. Detta skedde med hänsyn till säkerheten.

6.3 Gjutning och avspänning

Dag 2 spändes armeringen upp fullt och därefter gjöts betongen enligt normalt förfaringssätt (se figur 6.6). Betongprover togs vid gjutbordets ändar samt vid mitten av bordet och trycktes före avspänning. Vid avspänningen var medelvärdet på kubtryckhållfastheten 38.3 MPa. För att få provkroppar till utdragningsproverna gjöts ett antal ekstrakuber där armeringlängder på 1 meter stacks ner i mitten på kuberna.

Betongen fick sedan härda i två dygn eftersom det var söndag och avspänning först kunde ske under måndagen. Normalt sker avspänning dagen efter gjutning. Före avspänning sänks formarna. För att kunna göra detta släpps cirka 10 % av förspänningen. När formarna sänkts monterades trådtöjningsgivarna på elementsidorna och förspänningen släpptes därefter helt. Spännkraften överförs då till betongen som blir tryckt i hela tvärsnittet vilket visas i figur 5.4. Sliprarna kapades och transporterades den vanliga vägen och lastades sedan av transportbandet.



Figur 6.6 Gjutning.

7 PROVNING AV SLIPERS

7.1 Inledning

I detta kapitel redovisas provningar som utförts på slipers. Syftet med provningarna var att jämföra kompositarmerade slipers med traditionellt armerade slipers. En statisk brottbelastning och fyra utmattningsprovningar har utförts på vardera armeringstypen. Tillvägagångssättet vid provningarna överensstämmer med det som anges i "Fatigue of Prestressed concrete sleepers" (Luleå 1982) /7/ vilket gör det möjligt att göra vissa jämförelser. I Luleårapporten har en äldre sliper typ SJ B10 provats, medan betongslipern i den här rapporten har beteckningen A 60 P. Eftersom endast en provning genomförts med varje kombination last-armering kan ingen statistisk bedömning göras.

7.2 Beskrivning av utmattning i armerad betong

I spännarmerade betongbalkar kan olika former av brott uppstå beroende på konstruktionens utformning och formen av belastning. De brottformer som speciellt kan urskiljas är

1. Tryckbrott i betongen.
2. Dragbrott i armeringen.
3. Förankringsbrott.
4. Skjuvbrott.

Dessa brottformer kan förekomma var för sig men uppstår ofta i kombination med varandra. Då detta sker kan det vara svårt att bestämma den primära orsaken till brott. Exempelvis leder ett förankringsbrott till att tryckzonen förskjuts, vilket kan ge tryckbrott i balkens ovankant. På samma sätt leder ett tryckbrott i ovankant till en ökad sprickbildning i balken och därmed försämrade förankringsmöjligheter. För en statisk last finns tillräckliga kunskaper för att kunna förutsäga brottformen och därmed optimera konstruktionen. Är lasten av en varierande typ blir det svårare och brottformerna 3 och 4 kan uppträda avsevärt tidigare än vad som avsetts.

Förankringsbrott och skjuvbrott i betongen är de farligaste brotten eftersom de kan uppstå plötsligt och utan att deformationerna ökat påtagligt. Vid dimensionering beaktas oftast inte dessa brottyper. Beräkningar sker med avseende på tryckbrott i betongen eller dragbrott i armeringen. Skjuvsprickorna uppstår beroende på tvärkrafter i balken och har ofta 45° vinkel mot huvudspänningarna. Tvärkrafts-armering i form av byglar kan användas för att höja skjuvhållfastheten. Skulle skjuvsprickor uppstå brukar de komma i armeringens förankringszon och därmed öka risken för förankringsbrott.

Utmattning eller skadeackumulering kan ske då den maximala påkänningen överskrider ett visst tröskelvärde. Två mekanismer för denna skadeackumulering kan identifieras, den effektiva tiden på en hög påkänningsnivå och påkänningsförändringen oftast uttryckt som spänningsvidden ($R = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$).

Betong har visat sig vara mest känslig för den effektiva tiden som den varierande lasten befinner sig över ett visst värde σ_0 , som även kallas utmattningsgräns. Påkänningar under utmattningsgränsen ger inte skador i materialet. Mycket talar för att denna utmattningsgräns är cirka 25 % av betongens tryckhållfasthet. I Fatigue of concrete /8/ redovisas betongprovningar som visar att en minskad testfrekvens drastiskt minskar antalet cykler till brott (n_{uc}). Detta gäller emellertid bara då spänningsvidden R är liten och σ_{max} är stor, dvs vid snabb utmattning. Vid maximalspänningar understigande 75 % av brottspänningen är förhållandet inte lika uppenbart.

Om betongen utsätts för en låg varierande last utan att gå till brott kan den statiska hållfastheten öka. Detta kan förklaras med att egenspanningar försvinner. Är betongen färsk kan utmattningshållfastheten förbättras eftersom härdningen fortgår.

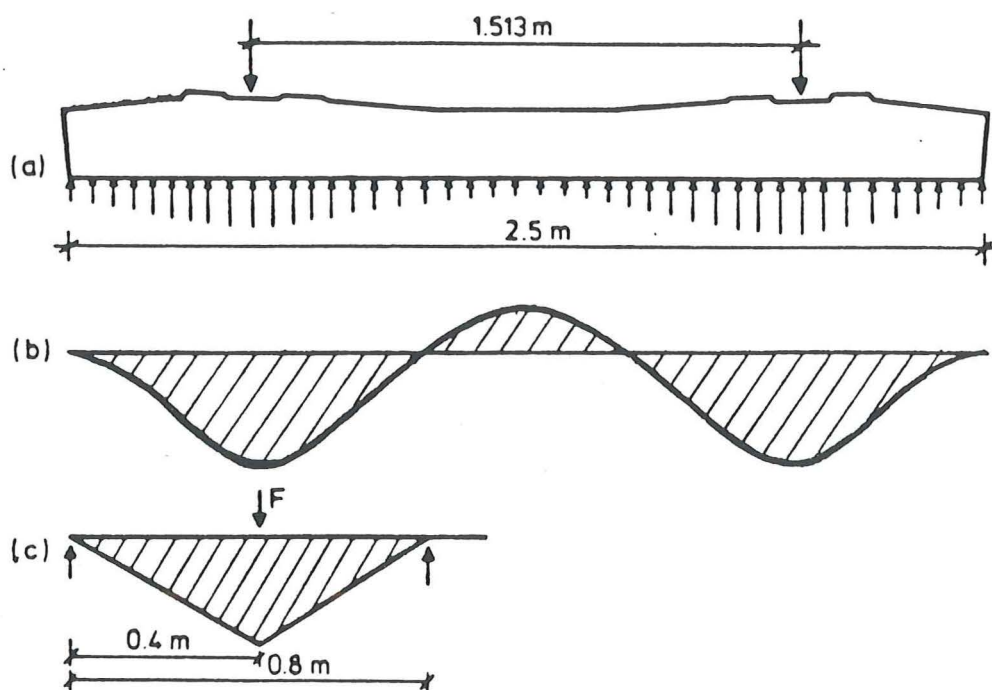
Stål har en utmattningsgräns som ligger på 150-200 MPa oavsett brotthållfasthet. Om stålspänningen ligger över utmattningsgränsen är hållfastheten starkt beroende av spänningsvidden R .

Fiberkompositens utmattningsegenskaper är inte uttalat beroende på någon speciell parameter. Utmattning beror både på spänningsvidd och påkänningsnivå. Inom flygindustrin har kompositmaterial använts under många år delvis på grund av dess goda utmattningsegenskaper.

Spänningarna i armering och betong förändras under tiden utmattning pågår beroende på krypning och sprickbildning. Armeringens påkänning förändras även beroende på förankringen. Eftersom betongen spricker upp ökar påkänningen i underkantsarmeringen vid pålastning. Vid avlastning förhindrar betongens förankringsyta att armeringen drar ihop sig och minspänningen i armeringen ökar. Mellan två sprickor i underkant kan därför armeringen utsättas för stora påkänningar som är svåra att uppskatta. Sprickbildningen kan även vara gynnsam om spänningsvidden R minskar.

7.3 Provuppställning

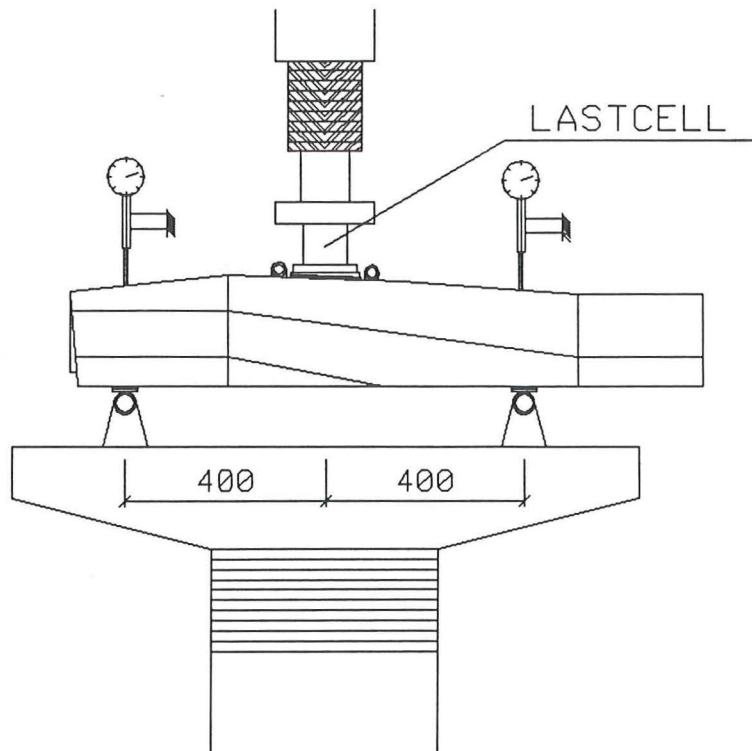
Provuppställningen som använts bygger på samma princip som redovisats i /7/, och grundar sig på det lastantagandet för en sliper som visas i figur 7.1. För att få en enkel och väldefinierad testuppställning delas sliperarna i två halvor. Momentfördelningen för en halv sliper visas i fig 7.1c och ska efterlikna momentfördelningen för en normalt belastad sliper som syns i fig 7.1b.



Figur 7.1 (a) Lastfördelning på normalt belastad sliper.
 (b) Momentfördelning för last enligt a.
 (c) Laster och momentfördelning för sliper utsatt för trepunktslast.

Vid provning placerades en sliperhalva i en dynamisk provningsmaskin enligt figur 7.2. Lastformen var en regelbunden sinuslast med konstant amplitud. Under provningen registrerades sprickutvecklingen och deformationerna. Deformationerna mättes över stöd eftersom mittpunkten var fixerad i testriggen. Mätningen gjordes av praktiska skäl med analoga mätklockor och maxdeformation samt mindeformation registrerades. Mellan avläsningarna avlastades klockorna med skumgummi för att inte skadas av utmattning. Det avlästes inga absoluta nedböjningar eftersom detta inte var praktiskt möjligt. De krypkurvor som redovisas längre fram refererar till en nollnedböjning som fastställdes då lasten stabiliserats efter cirka 1000-3000 cykler.

Innan proverna utsattes för dynamisk belastning lades en statisk last på för att uppnå sprickmomentet. Belastningen avbröts först då en spricka blev synlig. Detta gjordes för att balken inte skulle kunna ta tillvara dragkapaciteten i betongen. Maxantalet belastningscykler vid utmattningsprovningarna sattes till två megacykler, vilket motsvarar cirka sex dagars provning. Provningarna genomfördes enligt tabell 7.1.



Figur 7.2 Testrigg.

Tabell 7.1 Provningschema.

Lasttyp (F_{\min} - F_{\max})	Frekvens (varv/min)	Antal fiberslipers	Antal stålslipers
Statisk		1	1
40-80 kN	240	1	1
80-120 kN	240	1	1
120-160 kN	240	1	1
160-200 kN	220	1	1

7.4 Resultat

7.4.1 Statiska provningar

De första provningarna som genomfördes var statiska brottbelastningar vilka behövdes som utgångspunkt för de dynamiska provningarna. Vid provningarna som skedde med konstant deformationshastighet uppmättes ett kraft-tid samband. Dessa kurvor redovisas i figur 7.3 för slipers med båda armeringstyperna.

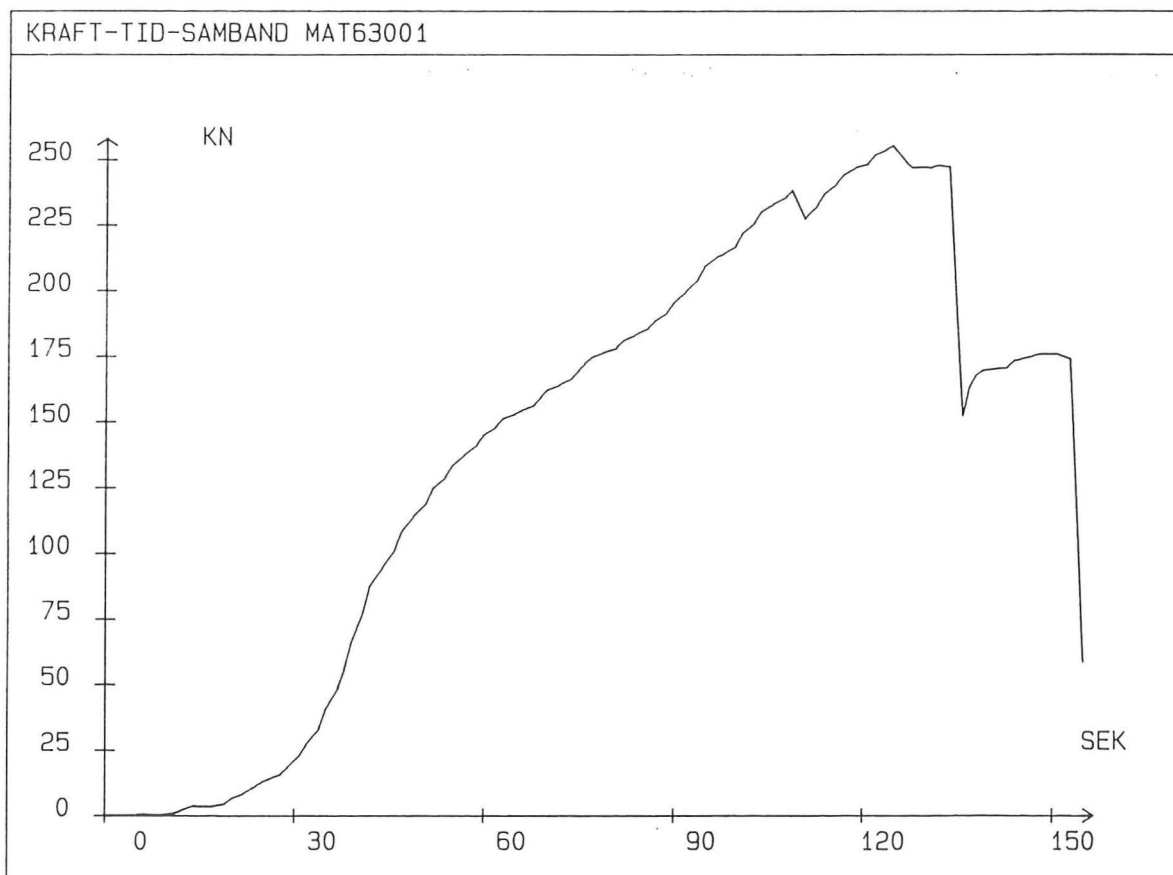
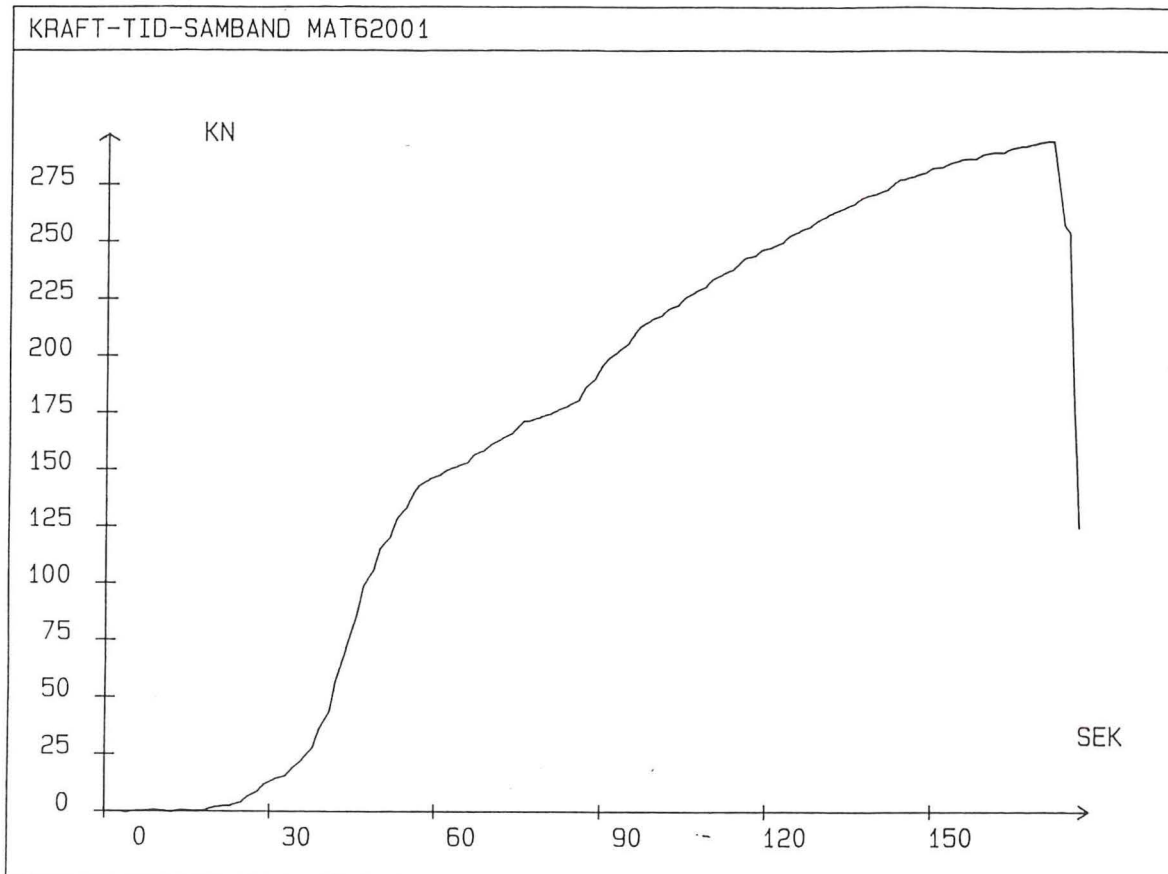
I figur 7.3 framgår av förändringar av lutningen på kurvorna vid 95 kN för stålslipern och 85 kN för fiberslipern, vilket avspeglar en förändring av styvheten, att spricklasten är uppnådd vid respektive last.

Stålslipern gick till brott vid 293 kN till följd av brott i betongen. Den fiberarmerade sliperns kurva är mer komplicerad. Första piken vid 235 kN är ett förankringsbrott i en av de nedre stängerna. Maxlasten uppnås vid 255 kN då ett andra förankringsbrott sker. Därefter har tryckzonen förflyttats så högt upp att betongen går till brott. Förankringsbrotten kan ha påverkats av att skjuvsprickor uppstod i förankringszonen. Den stålarmade slipern fick inga skjuvsprickor.

Resultaten var inte helt oväntade. I Luleårapporten /7/ genomfördes ett statiskt prov där betongbrott uppstod vid 266 kN. I detta fall blev brottlasten något högre. Den fiberarmerade slipern bör ha en lägre brottlast eftersom styvheten AE hos glasfiberarmeringen är lägre än hos ställinan vilket medför större deformationer.

$$AE_{\text{fiber}} = 50\text{mm}^2 \times 50\text{GPa} = 2.5\text{MNm}^2 / \text{m}^2$$

$$AE_{\text{stål}} = 21\text{mm}^2 \times 200\text{GPa} = 4.2\text{MNm}^2 / \text{m}^2$$

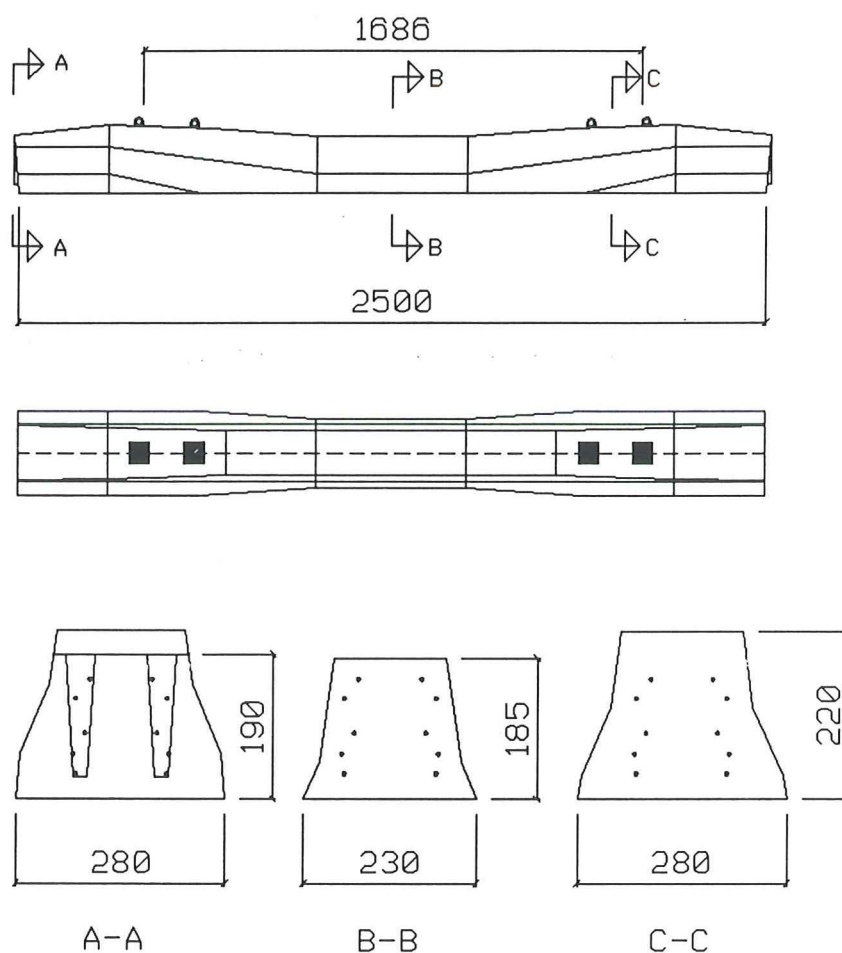


Figur 7.3 Statiska brottbelastningar. Stålarmerad (överst), glasfiberarmerad (underst).

7.4.2 Spricklast

Den sprickbelastning som eftersträvades före den dynamiska provningen varierade mellan 114 och 136 kN. Resultaten får anses som något godtyckliga eftersom detta avspeglar synliga sprickor. Någon skillnad i spricklast för de olika armeringstyperna kunde inte urskiljas. Värdena stämmer väl överens med tidigare mätningar /7/.

I bilaga 2 har beräkningar av spricklast gjorts i snitt c enligt figur 7.4. Där beräknas även den töjning som spricklasten motsvarar i understa armeringslinan. Beräkningarna är grundade på ett idealiserat tvärsnitt utan hänsyn till valvverkan eller ingjutningsgods och anses därför vara approximativa.



Figur 7.4 Järnvägsslipper typ A 60 P.(se även figur 6.3)

Tabell 7.2 Beräknade spricklaster och armeringspåkänningar i snitt c.

	Spricklast (kN)	Spänningsökning i uk-armering (σ_r ,MPa)	σ_r/σ_{fu} (%)
Draghållfasthet i betong ej tillgodoräknad. (dynamisk last)	48	18	1.0
2.5 MPa (BBK) draghållfasthet tillgodoräknad.	72	27	1.4
5 MPa (Betonghandboken) draghållfasthet tillgodoräknad	96	36	1.9

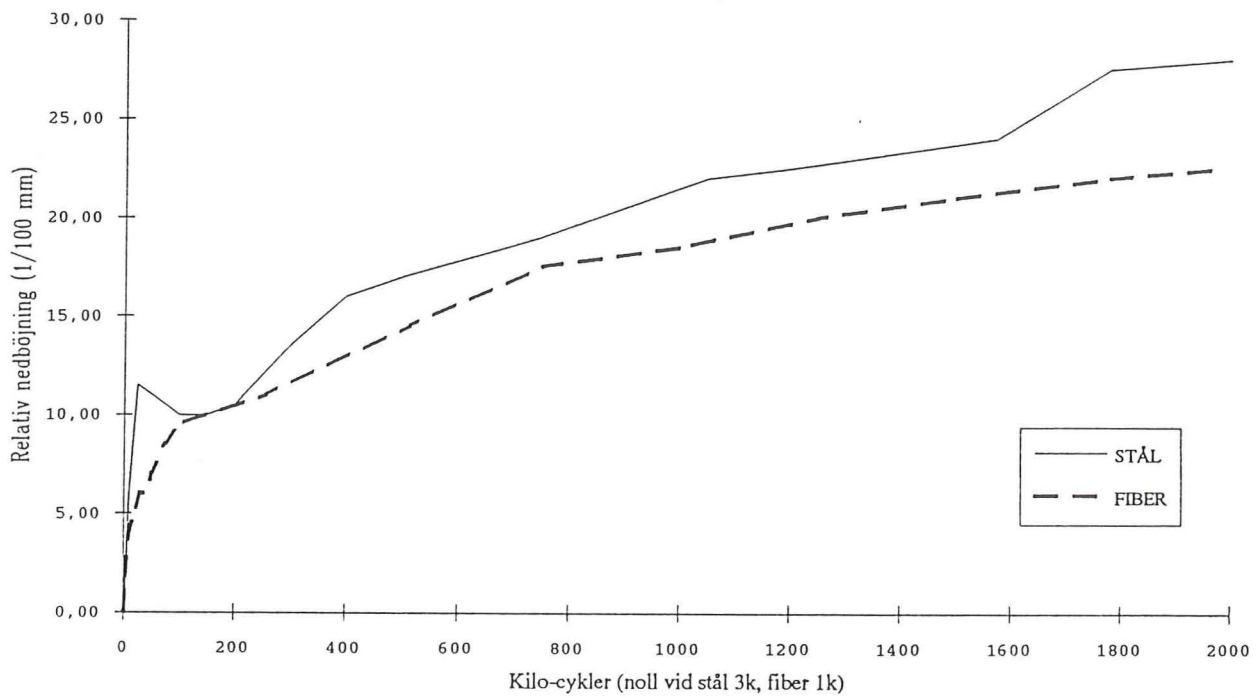
Den beräknade spricklasten blir lägre än lasten vid synlig spricka. Om betongens draghållfasthet beaktas stämmer tabell 7.2 väl överens med de spricklaster som uppskattas ur figur 7.3.

Alla beräkningar gäller stålarmrad sliper, men kan även anses gälla för fiberarmrad sliper eftersom armeringens styvhetsbidrag i osprucket stadium är litet jämfört med betongens.

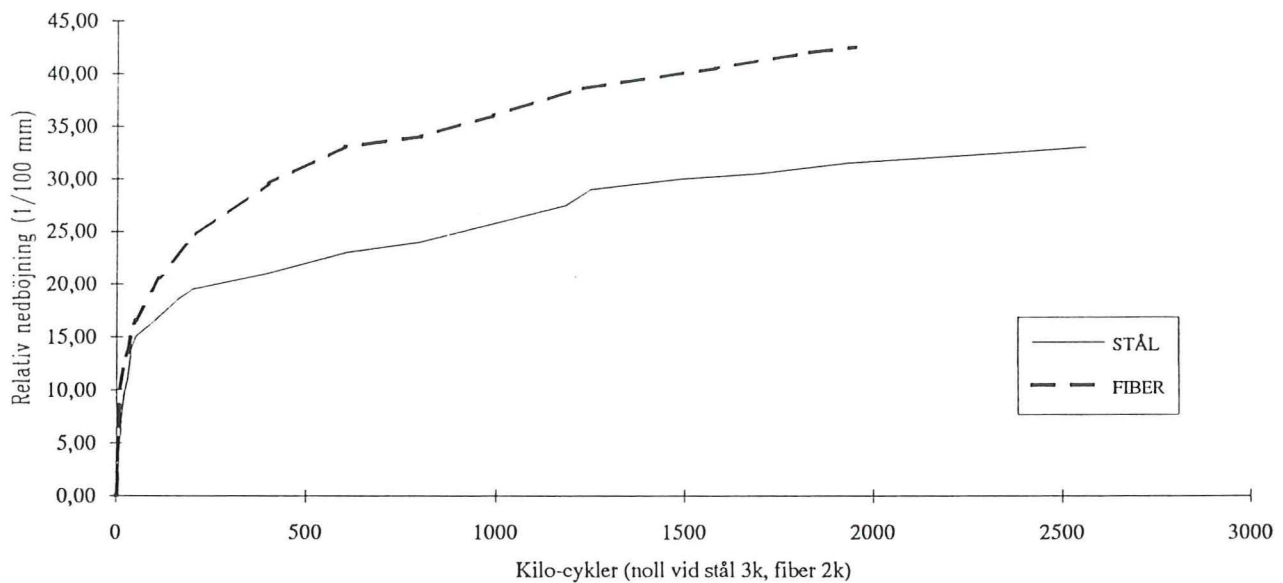
7.4.3 Dynamiska resultat

Den första provserien med belastningen 40-80 kN ansågs en formellt osprucken sektion. Efter två megacykler var krypningen obefintlig. Några krypkurvor presenteras inte i rapporten. Provserien 80-120 kN gav en krypkurva enligt figur 7.5 (överst) där relativ maxnedböjning plottats mot antalet cykler. Vid tolkning är nedböjningens absolutvärde av litet intresse eftersom den elastiska nedböjningen inte finns med och kurvorna har olika nollreferenser. I stället ska lutningarna jämföras med varandra och med figur 3.3. Figuren visar att lutningarna är avtagande under hela förloppet för bägge kurvorna och det borde betyda att det endast är primärkrypning som erhållits.

BELASTNING 80-120

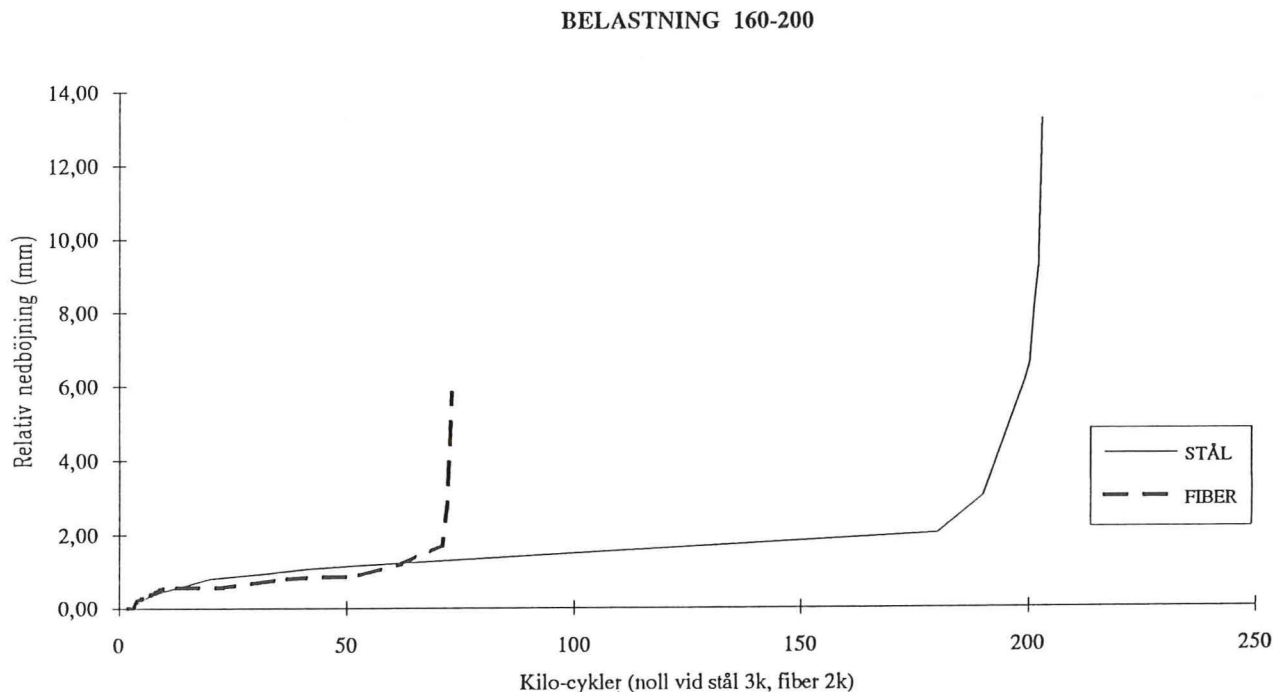


BELASTNING 120-160



Figur 7.5 Krypcurvor vid belastningen 80-120 kN (överst) och 120-160 kN (underst).

Nedre delen av figur 7.5 visar krypkurvorna för belastningen 120-160 kN. Stålslipern har här belastats över 2.5 megacykler och det finns en antydning till att kurvan planat ut och sekundärkrypning påbörjats. Den fiberarmerade slipern verkar befinna sig enbart i primärkrypning.

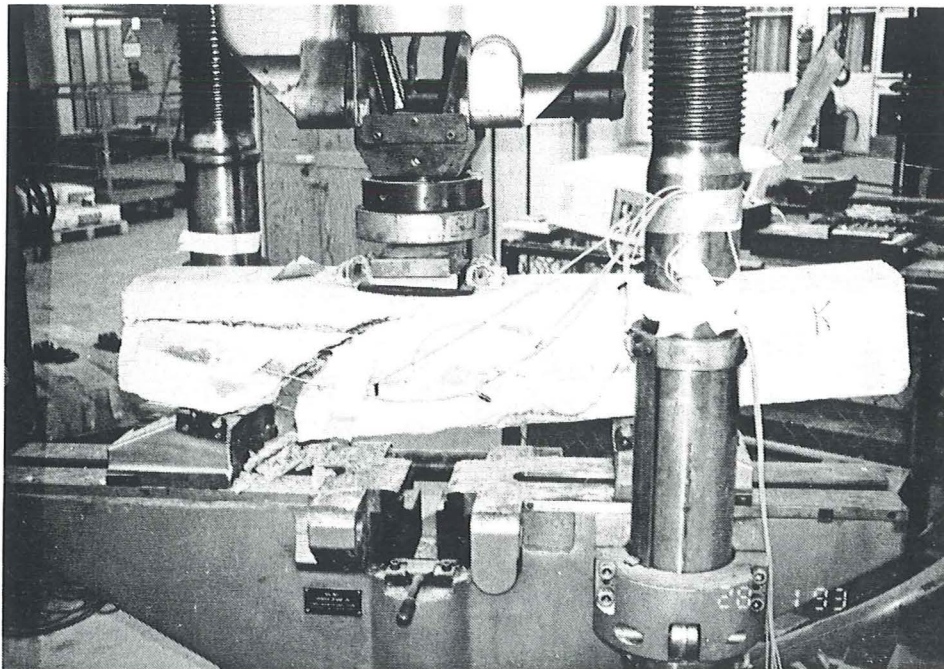


Figur 7.6 Krypkurva vid belastningen 160-200 kN.

I sista serien var belastningen 160-200 kN. Maxlasten ligger då på 0.77 SFL (statisk brottlast) för fiberkomposit slipern och 0.68 SFL för den stålarmade.

Vid så höga laster förväntades ingen av konstruktionstypena hålla två megacykler. I figur 7.6 syns krypkurvorna för denna belastning. Även här har relativ maxnedböjning plottats mot antalet cykler. Den stålarmade slipern har tydliga övergångar mellan de olika krypformerna (jämför fig 3.3). När tertiärkrypning väl inträffar sker brottet mycket snabbt, i det här fallet efter 203 kilocykler och till följd av förankringsbrott i samband med skjuvbrott i förankringszonen.

Den streckade kurvan i fig 7.6 visar krypkurvan för motsvarande fiberarmerad sliper. Brottet inträffade efter 75 kilocykler initierat av förankringsbrott. Vid slutliga brottet hade fem stycken armeringsstångers förankringar släppt medan övriga dragits till brott. I det här fallet uppstod ingen skjuvspricka. I kurvan ovan för den fiberarmerade slipern finns inga mätdata för tertiärkrypningen eftersom detta förlopp skedde mycket snabbt. Kurvans form är antagen efter stålsliperns brottförlopp.



Figur 7.7 Brott i stålsliper med belastningen 160-200 kN efter 203 kilocykler.

7.4.4 Mätningar vid verklig belastning

För att kunna göra en uppskattning av hur de pålagda lasterna överensstämmer med en verklig belastningssituation krävs mätresultat som visar påkänning i slipern då ett tåg passerar. I Luleårapporten /7/ redovisas mätningar på slipers utlagda mellan Stockholm och Göteborg. Armeringen i de preparerade sliprarna bestod av 7-trådiga linor med $A_s=24.5$ mm. Skillnaden mellan den armeringen och den aktuella får dock anses som liten. Det som mättes var töjningen i understa linan då hjulaxlar passerade. Under mättiden passerade 223 tåg och 97000 mätvärden togs.

Påkänningen i armeringen kan variera från plats till plats beroende på bäddmodul och andra faktorer. En jämförelse mellan tabell 7.2 och tabell 7.3 visar att en dynamisk belastning upp till att en spricka uppstår täcker in över 99 % av lasterna som en sliper utsätts för då ett tåg passerar. Alla utförda dynamiska provningar hade spänningsvidden 40 kN. Eftersom provningarna utfördes i sprucket stadium blev påfrestningarna i betong och armering avsevärt större än i osprucket stadium. Slutsatsen blir att provningarna täcker in de naturliga påfrestningarna enligt tabell 7.3 med god marginal.

Tabell 7.3 Fältmätningar på spänningsökningen i understa linan i snitt c /7/.
 ($\sigma_{fu} = 1820$ MPa)

Spänningsvidd (σ_r , MPa)	Antal mätvärden i gruppen	Procent av totala antalet	σ_r/σ_{fu} (%)
0-4	68390	70.5	0.2
4-8	17440	18.0	0.4
8-12	7601	7.8	0.7
12-16	2990	3.1	0.9
16-20	498	0.5	1.1
20-24	65	0.07	1.3
24-28	10	0.01	1.5
28-32	3	0.003	1.7
32-36	1	0.001	2.0
	Σ 96998	Σ 100.0	

REFERENSER

- /1/ "Report on prestressing steel: 2. Anchorage and application of pretensioned 7-wire strands"
Fe'de'ration Internationale de la pre'contrainte, 1978.
- /2/ PCI-Journal May/June 1992.
- /3/ G. Rehm, L. Franke och M. Patzak
"Zur frage der krafteinleitung in kunstharzgebundene glasfaserstäbe"
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1979.
- /4/ M.K. Hurst
"Pretensioned Concrete design"
Chapman and Hall Ltd, 1988.
- /5/ BBK 79
- /6/ Arthur H. Nilsson
"Design of pretensioned concrete", second edition.
John Wiley & Sons inc. 1987.
- /7/ K. Gylltoft, K. Cederwall, H. Johansson
"Fatigue of Prestressed concrete sleepers, an experimental study"
University of Luleå, Research report: TULEÅ 1982:6, LULEÅ 1982.
- /8/ "Fatigue of concrete"
ACI publication SP-41, 1974.
- /9/ Arne Hillerborg
"Kompendium i Byggnadsmateriallära FK del 1"
Avdelningen för Byggnadsmateriallära, LTH, LUND, 1990.
- /10/ Robert Danewid
"En undersökning av armerade betongbalkar utsatta för utmattningslast"
Avdelningen för Bärande konstruktioner, LTH. Rapport TVBK 1004,
LUND, 1985.
- /11/ Lars Sentler
"Fiberkompositers som armering, materialegenskaper"
Byggnadsforskningsrådet. Rapport R10:1992.
- /12/ S. Carlsson och A. Thomasson
"Glasfiberkompositers hållfasthetsegenskaper"
Avdelningen för Bärande konstruktioner, LTH. Rapport TVBK 5044,
LUND, 1990.

- /13/ "Derakane, Vinyl ester resins, Chemical resistance guide"
Produktinformation från DOW Chemicals.
- /14/ E. Overbeck
"Zur Bruchfestigkeit und Zeitfestigkeit von Glasfasern und unidirektionalen
GFK-stäben"
VDI-Fortschrittberichte, R.5,Nr.127,VDI-verlag,1987.

Bilaga 1 Mätförteckning

Materialegenskaper för glasfiberkompositstänger ur tillverkningsserie 1

Nr	Filnamn	Stång- Diameter ϕ ,mm	Syfte	Anmärkning
1	Mät10001	6	Brottlast	Hylsbrott
2	Mät11001	7	Brottlast	Dragbrott
3	Mät12002	7	Brottlast	Dragbrott
4	Mät13001	7	Brottlast	Dragbrott
5	Mät14001	7	Brottlast	Dragbrott
6	Mät17002	7	Brottlast	Dragbrott
7	Mät18001	7	Brottlast	Hylsbrott
8	Mät19001	7	Brottlast	Hylsbrott
9	Mät21001	8	Brottlast	Dragbrott (L=1450mm)
10	Mät22001	8	Brottlast	Dragbrott (L=1450mm)
11	Mät23001	8	Brottlast	Dragbrott (L=1450mm)
12	Mät24001	7	Brottlast	Dragbrott (L=1450mm)
13	Mät26001	7	E-modul	
14	Mät27003	7	E-modul	
15	Mät28001	7	E-modul	Uppspänning för relaxation
16	Mät28002	7	Relaxation	
17	Mät29001	7	Brotthållfasthet efter lång tid	
18	Mät30001	7	E-modul	

Materialegenskaper för glasfiberkompositstänger ur tillverkningsserie 2

Nr	Filnamn	Stång- Diameter ϕ ,mm	Syfte	Anmärkning
19	Mät31003	8	Brottlast	Dragbrott
20	Mät33001	8	E-modul	Uppspänning för relaxation
21	Mät33002	8	Relaxation	
22	Mät35001	8	Brottlast	Hylsglidning
23	Mät36001	8	Brottlast	Hylsglidning
24	Mät37001	8	Brottlast	Dragbrott
25	Mät38001	8	Brottlast	Hylsglidning
26	Mät39002	8	Brottlast	Dragbrott
27	Mät40001	8	Brottlast	Hylsglidning
28	Mät41001	8	Brottlast	Hylsglidning
29	Mät42001	8	Brottlast	Hylsglidning
30	Mät44001	8	Brottlast	Dragbrott (Nya Hylsor)
31	Mät45001	8	Brottlast	Dragbrott
32	Mät46001	8	Brottlast	Dragbrott
33	Mät47001	8	Brottlast	Dragbrott
34	Mät48001	8	Brottlast	Dragbrott
35	Mät49001	8	Brottlast	Dragbrott
36	Mät50001	8	Brottlast	Dragbrott
37	Mät51001	8	Brottlast	Dragbrott
38	Mät52001	8	Brottlast	Dragbrott
39	Mät53002	8	Brottlast	Dragbrott
40	Mät54001	8	Brottlast	Dragbrott
41	Mät55002	8	E-modul	
42	Mät56001	8	E-modul	
43	Mät58001	8	E-modul	
44	Mät59001	8	Brottlast	Vibrerad
45	Mät60001	8	E-modul	Uppspänning
46	Mät61001	8	Relaxation	

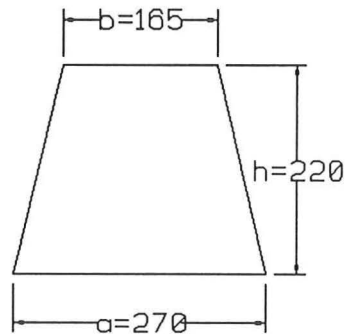
Materiallegenskaper för glasfiberkompositstänger ur tillverkningsserie 2

Nr	Filnamn	Stång- Diameter ϕ ,mm	Syfte	Anmärkning
47	Mät62001		Statisk brottlast	Stålarmerad sliper
48	Mät63001		Statisk brottlast	Fiberarmerad sliper
49	Mät64001	6	Brottlast	Hylsglidning
50	Mät65001	6	Brottlast	Dragbrott
51	Mät66001	6	Brottlast	Hylsglidning
52	Mät67001	6	Brottlast	Dragbrott
53	Mät68001	6	Brottlast	Hylsglidning
54	Mät69001	6	Brottlast	Dragbrott
55	Mät70001	6	Brottlast	Dragbrott
56	Mät71001	6	Brottlast	Hylsglidning
57	Mät72001	6	Brottlast	Dragbrott
58	Mät73001	6	Brottlast	Dragbrott
59	Mät74001	6	Brottlast	Dragbrott
60	Mät75001	6	E-modul	Hylsglidning
61	Mät76001	7	E-modul	Hylsglidning
62	Mät80001	8	Förankring	Stål
63	Mät81001	8	Förankring	Stål
64	Mät82001	8	Förankring	Fiberkomposit
65	Mät83001	8	Förankring	Fiberkomposit
66	Mät84001	8	Förankring	Fiberkomposit
67	Mät85001	8	Förankring	Fiberkomposit
68	Mät86001	8	Förankring	Fiberkomposit
69	Mät90001	7	Brottlast	Hylsglidning
70	Mät91001	7	Brottlast	Hylsglidning
71	Mät92001	7	Brottlast	Hylsglidning
72	Mät93001	7	Brottlast	Hylsglidning
73	Mät94001	7	Brottlast	Hylsglidning
74	Mät95001	7	Brottlast	Hylsglidning
75	Mät96001	7	Brottlast	Hylsglidning
76	Mät97001	7	E-modul	
77	Mät98001	7	E-modul	

Bilaga 2 Beräkningar på sliper

Beräkning av neutralt lager, spricklast för sliperhalva, armeringsförluster och armeringsspänningar vid spricklast.

Förenklat
tvärsnitt



1. Beräkning av neutralt lager i osprucket stadi. Om armering försummas är $NL=TP$.

$$TP = NL = \frac{3b + (a - b)}{2b + (a - b)} \times \frac{h}{3} = 101 \text{ mm} \approx 100 \text{ mm eller } 120 \text{ mm ovanifrån}$$

$$A_{\text{betong}} = \frac{h}{2}(a + b) = 47.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

2. Beräkning av uppspänningsförluster.

Uppspänningsförlusterna kan beräknas ur

$$\Delta\sigma_s = E_s \varepsilon_s + \varphi \frac{E_s}{E_c} \sigma_{\text{cp}} + \chi \sigma_{\text{cp}} \quad (\text{BBK 2-25})$$

Förutsättningar: Krympning i betong försummas ($\varepsilon_s=0$)
Krympningen $\varphi=2$ i betongen.
Relaxationen (χ) är 12 % för stål och 5 % för fiberkomposit.

$$A_s = 21.2 \text{ mm}^2 ; E_s = 200 \text{ GPa}$$

$$A_{\text{fiber}} = 50 \text{ mm}^2 ; E_{\text{fiber}} = 50 \text{ GPa}$$

$$A_{\text{btg}} = 48 \times 10^{-3} \text{ m}^2 ; E_{\text{btg}} = 37.5 \text{ GPa}$$

Formeln bygger på iterationsberäkning eftersom förlusterna beror på aktuell spänning i betong respektive armering och ger $\Delta\sigma_s$ som 189 MPa för stålarmrad sliper och 40 MPa för kompositarmerad.

Effektiv uppspanning kan sedan beräknas ur $f_{pe} = f_{pi} - \Delta\sigma_s$. Där f_{pi} är initiell uppspanning och beräknas direkt ur förutsättningarna till 1320 MPa för stålarmeringen och 560 MPa för fiberkompositen.

3. Beräkning av spricklast för sliperhalvan.

$$M_{\text{mitt}} = \frac{PL}{4} = \frac{0.8P}{4} = 0.2P$$

Räknar enbart på stålarmrad eftersom resultatet blir samma oavsett armeringstyp. Tvärsnittet antas tryckas helt jämnt.

$$\varepsilon_c = \frac{f_{pe}}{E} = \frac{10 \times 1130 \times 10^6 \times 21.2 \times 10^{-6}}{48 \times 10^{-3} \times 37.5 \times 10^9} = 133 \mu\text{str}$$

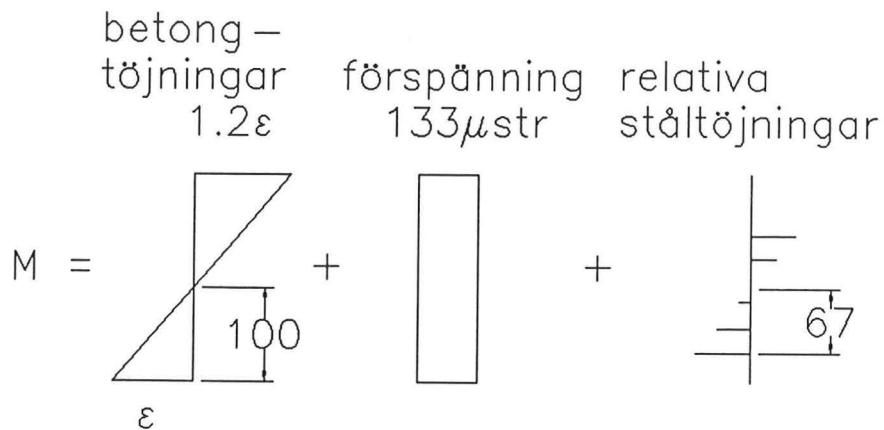
(Hoptryckning av betongen efter förluster)

Om tvärsnittet antas initialt helt tryckt blir beräkningen enkel eftersom armeringen då fungerar som slakarmering.

$$I_x = \frac{6b^2 + 6b(a-b) + (a-b)^2}{2b + (a-b)} \times \frac{h^3}{36} = 189 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_x = \frac{I_x}{e} = \frac{189 \times 10^{-6}}{0.1} = 1.89 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Då kan töjningarna beräknas ur figuren på nästa sida.



$$M_{\text{mitt}} = W_x E_c \varepsilon_c + 2 E_c \varepsilon_c A_s (\sum k_i^2) 0.1$$

Där k_i är respektive armeringslinas avstånd till NL relativt underkanten på betongsnittet som spricker ($\varepsilon_s = k_i \times \varepsilon_c$) och 0.1 m är avståndet från u_k till NL. Ekvationen ovan kan skrivas om till

$$\varepsilon_c = \frac{0.2P}{(71.3 + 0.9) \times 10^6}$$

Om inga dragspänningar tolereras ($\varepsilon_c = 133\mu\text{str}$) blir spricklasten $P = 48$ kN. Så är fallet vid dynamisk last. Skulle en dragkapacitet på 2.5 MPa i betongen tolereras blir spricklasten $P = 72$ kN. Dessa laster motsvarar tillskott i nedersta armeringslinan (σ_r) på 18 resp 27 MPa. Enligt betonghandboken kan dragkapaciteten uppskattas till 5 MPa och ger då en spricklast på 96 kN samt tillskottsspänning i armeringen på 36 MPa.

Bilaga 3 Kraft-tid kurvor

Övre kurvan visar handpumpning av en 8 mm glasfiberstång till brott.

Undre kurvan visar maskinpumpning av en 7 mm glasfiberstång till brott.

