



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



**Rapport**

**R10:1992**

**Fiberkompositer som armering  
Materialegenskaper**

**Lars Sentler**

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400129211

**Byggforskningsrådet**

Plac.: BFR -  
Rapport

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA  
VÄG- OCH VATTENBYGGNAD  
BIBLIOTEKET

R10:1992

FIBERKOMPOSITER SOM ARMERING

Materialtegenskaper

Lars Sentler

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 900672-0  
från Bygghörsningsrådet till Lunds tekniska högskola,  
Bärande konstruktioner, Lund.

## REFERAT

Fiberkompositer har börjat att spela en allt större roll som konstruktionsmaterial i olika sammanhang. I denna rapport behandlas förutsättningar och de möjligheter som finns att använda fiberkompositer som armering i betongkonstruktioner. Först ges en allmän översikt av fiberkompositers egenskaper och hur dessa kan karakteriseras. Sedan redovisas materialegenskaper hos existerande fiberkompositarmering med tyngdpunkten på spännarmering. Därefter redovisas ett antal projekt som genomförts med armering av fiberkompositer.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R10:1992

ISBN 91-540-5418-4  
Byggforskningsrådet, Stockholm

**gotab** 95385, Stockholm 1992

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	
1.1	Allmänt	5
1.2	Bakgrund	5
1.2	Allmänna fiberkompositegenskaper	6
1.3	Praktisk användning av fiberkompositer	8
2	FIBERKOMPOSITERS EGENSKAPER	
2.1	Allmänt	11
2.2	Fysiska egenskaper	11
2.3	Mekaniska egenskaper	13
2.4	Miljömässiga egenskaper	19
3	HÅLLFASTHETSKARAKTERISERING	
3.1	Allmänt	21
3.2	Materialrespons	21
3.3	Elasticitetsmodulen hos fiberkompositer	24
3.4	Brotthållfastheten hos fiberkompositen	27
3.5	Utmattning hos fiberkompositer	31
3.6	Miljöpåverkan hos fiberkompositer	32
4	FIBERMATERIAL	
4.1	Allmänt	33
4.2	Glasfibrer	36
4.3	Syntetfibrer	38
4.4	Kolfibrer	40
5	MATRISMATERIAL	
5.1	Allmänt	43
5.2	Ester	45
5.3	Epoxi	46
5.4	Modifierat akrylat	47
6	ARMERINGSPRODUKTER	
6.1	Allmänt	49
6.2	Polystal	51
6.3	Arapree	57
6.4	Nefmac	61
6.5	Stål	67

7	PRAKTISKA ERFARENHETER	
7.1	Allmänt	69
7.2	Polystal	75
7.3	Arapree	81
7.4	Nefmac	87
	REFERENSER	83
	BILAGA A MATERIALEGENSKAPER	87
	BILAGA B VISKOELASTISK HÅLLFASTHETSTEORI	93

# INLEDNING

## 1.1 ALLMÄNT

Många material är egentligen fiberkompositer utan att detta väcker någon större uppmärksamhet. Ett typiskt exempel är konstruktionsvirke som är en naturlig fiberkomposit och som använts som byggnadsmaterial sedan urminnes tider. Men oftast associeras begreppet fiberkomposit med ett material som förstärkts med fibrer för att förbättra vissa egenskaper, främst draghållfastheten. På detta sätt förbättras soltorkat tegel genom inblandning av kohår i leran. Fiberarmerad betong kan ses som en modern utveckling av denna metodik men där kraven på att ta upp dragkrafter är betydligt större. Men fibrer kan användas på många andra sätt och möjligheten att förbättra materialegenskaper utnyttjas inom många områden.

En speciell form av fiberkompositer är de som innehåller fibrer med en längd som vida överstiger tvärsnittsdimensionerna i den kropp de befinner sig i. En sådan fiberkomposit är en diskontinuerlig fiberkomposit om styvheten varierar med fiberlängden. Om fibrernas längd är sådan att styvheten inte påverkas i någon större omfattning av fiberlängden, då är fiberkompositen kontinuerlig. De flesta kontinuerliga fiberkompositer innehåller fibrer som är av samma längd som den kropp de befinner sig i. Denna form av fiberkompositer kan erbjuda hållfasthetsegenskaper som är mycket attraktiva i många tillämpningar och i vissa sammanhang karakteriseras dessa som högpresterande fiberkompositer. Men även andra egenskaper som utomordentlig beständighet kan uppnås. Tyngdpunkten i denna presentation ligger på denna form av fiberkompositer och möjligheterna i att använda dem som armeringsmaterial i betongkonstruktioner.

## 1.2 BAKGRUND

Fiberkompositer utvecklades därför att inga andra existerande konstruktionsmaterial kunde möta de krav som ställdes i vissa tillämpningar. Det var speciellt utvecklingen inom flyg- och rymdindustrin som kontinuerligt medförde allt större krav. I detta sammanhang gällde det extremt goda hållfasthetsegenskaper i relation till låg vikt och god beständighet. Aluminiumlegeringar som normalt används har god brotthållfasthet i förhållande till vikten. Men problem med utmattning och korrosion gjorde det nödvändigt att finna nya lösningar. Under andra världskriget gjordes stora ansträngningar i utvecklingen av kommersiella tillämpningar med fiberkompo-

siter, speciellt för flygplan, men det var först i början på 50-talet som ett genombrott kom. Sedan dess har utvecklingen gått allt snabbare med allt fler tillämpningar inom vitt skilda områden.

För att möta de krav som ställs i olika tillämpningar har både nya fibertyper och material som omger och håller samman fibrer, oftast kallat matris, utvecklats. Denna utveckling har lett till att det idag finns många olika typer av fibrer med mycket varierande egenskaper. För matrismaterial har en ännu mer dramatisk utveckling skett för att göra det möjligt att använda fiberkompositer i de mest skiftande miljöer.

För fibrer startade utvecklingen med glasfibrer som sedan har följts av bland annat aramidfibrer och kolfibrer. Glasfibrer dominerar fortfarande som den mest använda fibern i en fiberkomposit på grund av sitt relativt låga pris. Men aramidfibrer och kolfibrer som uppvisar bättre hållfasthets-egenskaper kan förväntas att bli använda i allt större omfattning i framtiden. Speciellt eftersom ett initieellt relativt högt pris har sjunkit med jämna mellanrum då produktionen har överstigit konsumtionen.

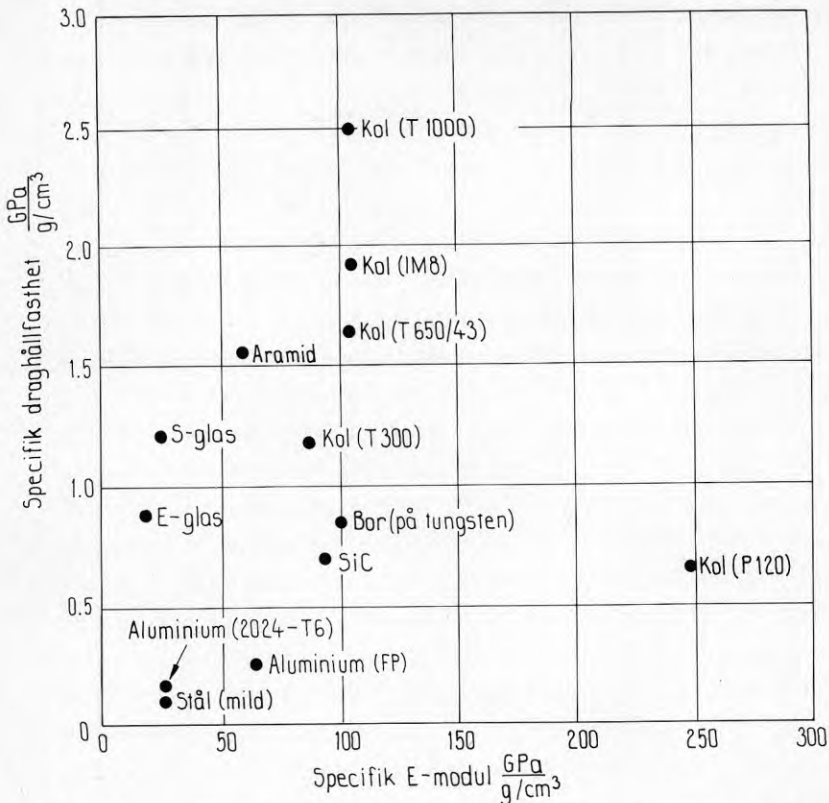
Som matrismaterial användes först polyester. Detta matrismaterial har fortfarande en stor marknadsandel eftersom det är billigt och lätt att använda, speciellt tillsammans med glasfibrer. Men behovet av matrismaterial med olika egenskaper har medfört en lavinartad utveckling av nya matrismaterial. Av speciellt intresse är epoxibaserade och vinylesterbaserade produkter som uppvisar en mycket hög beständighet även i mycket aggressiv miljö. Vinylester används till exempel i tankar för starka syror som ersättning för syrafast stål.

Det pågår ständigt en utveckling av nya fibrer och bättre matrismaterial som primärt kan avspegla ett speciellt behov, främst för militära tillämpningar, men som senare kan förväntas få ett betydligt större användningsområde. Detta gör att fiberkompositer kommer att bli allt vanligare och på sikt överta många traditionella materials användningsområde.

### 1.3 ALLMÄNNA FIBERKOMPOSITEGENSKAPER

Fiberkompositer kan erbjuda flera intressanta egenskaper. Av speciellt intresse i många tillämpningar är en hög brotthållfasthet i förhållande till en låg vikt. En sådana jämförelse visas i Figur 1.1 för fiberkompositer med 65% fibrer i en matris av epoxi. Jämförelsen är relativ och redovisar den specifika brotthållfastheten,  $\sigma/\rho$ , i förhållande till den specifika elasticitetsmodulen vid dragbelastning,  $E/\rho$  för de vanligaste fiberkompositerna. Även stål och aluminium är inkluderade som jämförelse.





Figur 1.1 Specifik draghållfasthet ( $\sigma/\rho$ ) i förhållande till specifik elasticitetsmodul i drag ( $E/\rho$ ) för kommersiellt använda fiberkompositerna med 65% fibrer i en matris av epoxi. Även stål och aluminium är inkluderade som jämförelse (ASM kompositen).

De relativa egenskaper som visas i Figur 1.1 är intressanta som jämförelse. I verkliga applikationer är det också många andra egenskaper som är väsentliga. Detta gäller de reella egenskaperna vid både korttidsbelastning och långtidsbelastning. Sådana egenskaper och hur de kan karakteriseras redovisas i senare kapitel.

En fiberkompositkonstruktion kan göras lättare än om den är uppbyggd med konventionella material. Detta innebär att den kan komma att utsättas för en större del variabel last än en konventionell konstruktion som normalt är tyngre. Av denna orsak är utmattningsegenskaperna ofta av stort intresse. I allmänhet är utmattningsegenskaperna för fiberkompositerna utmärkta. Detta beror på den speciella uppbyggnaden av en fiberkomposit som innebär att en spricktillväxt under utmattning sker lokalt kring fibrer. Ett enskilt fiberbrott medför normalt inget speciellt eftersom lasten i denna fiber kan tas upp i intilliggande fibrer. Dessa goda egenskaper är betydligt

svårare att uppnå för metalliska material med hög brotthållfasthet och hög elasticitetsmodul. Orsaken är den alltför snabba spricktillväxt hos dessa material på grund av den inre strukturen som uppstår vid hög legeringsgrad (ASM composites).

#### 1.4 PRAKTISK ANVÄNDNING AV FIBERKOMPOSITER

Användningen av fiberkompositerna skiljer sig från användningen av normala konstruktionsmaterial i flera avseenden. Detta gäller materialegenskaper, dimensionering och tillverkning.

Materialegenskaper hos fiberkompositerna kan variera inom ett mycket stort område. Detta beror på friheten och möjligheten att välja fibermaterial och matrismaterial i en mängd olika kombinationer. Detta innebär att egenskaper kan anpassas till de aktuella behoven. Detta är i och för sig tilltalande men det innebär också svårigheter. Kunskapen om vilka egenskaper som kan uppnås och hur detta åstadkoms är för närvarande begränsad till speciella materialkombinationer. Någon övergripande sammanställning finns inte.

Användningen av fiberkompositerna kan ställa till med vissa problem. Ofta behöver dimensionering ske på ett annorlunda sätt än för konventionella material. Speciella hänsyn behöver oftast tas till detaljer som infästningar. En lägre elasticitetsmodul medför att deformationer kan få ett större inflytande än vad som är fallet för normala konstruktionsmaterial. I vissa tillämpningar behöver också de viskösa krypegenskaperna beaktas, eftersom detta kan leda till ett brott.

En fiberkomposit kan tillverkas på flera olika sätt. Vad som är en lämplig metodik beror i första hand på typen av produkt men även andra aspekter kan vara viktiga. Detta gäller speciellt om högpresterande fiberkompositerna ska produceras. För dessa fiberkompositerna gäller i allmänhet att en relativt hög fibermängd är önskvärd samtidigt som eventuella defekter i fiberkompositen bör minimeras. Defekter är oftast lokalt mindre bra utjämnat matrismaterial inne i fiberkompositen men också egenspanningar. För att uppnå ett optimalt resultat krävs både rätt tillverkningsutrustning och kunskap om produktionsmetodernas fördelar men också svagheter.

För att bemästra de speciella problem som användningen av fiberkompositerna innebär behövs kunskap och erfarenhet. Detta finns idag främst hos flygindustrin som använt fiberkompositerna under lång tid. Från början användes det nya materialet för att spara vikt i delar med måttliga påkänningar. Nu kan fiberkompositerna användas som det dominerande konstruk-

tionsmaterialet i vissa tillämpningar. Detta gäller vissa attackhelikoptrar där enbart vissa motordetaljer fortfarande är gjorda av metalliskt material. Den senaste varianten av strategiska bombplan lär också vara uppbyggda med mycket fiberkompositer. Även alltmer delar av civila flygplan byggs idag med fiberkompositer.

Inom det marina området är fiberkompositer det dominerande materialet för småbåtstillverkning. Anledningen är främst att en god beständighet kan uppnås som medför små underhållskostnader. Men även vikten och möjligheten för bättre design än med trä har en viss betydelse i vissa sammanhang. Under senare år har även större båtar börjat att tillverkas i fiberkompositer. Även här har beständigheten varit en viktig orsak för övergången till ett nytt material. Men i vissa tillämpningar som minsvepare har ett icke magnetiskt material uppenbara fördelar.

Användningen av fiberkompositer inom byggnadsområdet är inte ny. En stor mängd olika typer av komponenter innehåller delvis eller helt och hållet fiberkompositer. Men hittills har användningen huvudsakligen varit begränsad till icke bärande konstruktioner. Ett exempel på detta är fönsterramar som tillverkas med glasfibrer i en epoximatrix.

Men under de senaste åren har högpresterande fiberkompositer börjat att användas som ett konstruktivt material också. Det finns idag balkar med liknande utformning som stålbalkar i fiberkompositmaterial och armering för betongkonstruktioner. För dessa produkter gäller att de inte bara har bra hållfasthetsegenskaper utan också god beständighet. Ofta är det möjligheten att producera material med en mycket hög beständighet som är det väsentliga. Detta innebär att urvalet av lämpliga materialkombinationer blir begränsat. I första hand är det de fibermaterial och matrismaterial som redovisas i Tabell 1.1 som är aktuella idag.

Tabell 1.2 Olika fibermaterial och matrismaterial för användning i kemiskt krävande miljöer.

---

Fibrer

- Glasfibrer
- Aramidfibrer
- Kolfibrer

Matriser

- Polyester
  - Epoxi
  - Vinylester
-

I denna rapport redovisas främst aspekter som berör armering för betongkonstruktioner men allt teoretiskt är tillämpligt för konstruktionsmaterial i allmänhet. Stor vikt läggs vid beständigheten men där beständighet ges en vidare bemärkelse än vad som oftast är fallet idag. Beständighet definieras som en acceptabel respons hos ett material i tiden då det påverkas av laster och den omgivande miljön. Vad som är acceptabelt beror på vilken respons som avses. I detta sammanhang är töjningsresponsen av dominerande intresse eftersom den kan utnyttjas för att definiera en förväntad livslängd. Men respons kan även inkludera andra faktorer som i sin förlängning till och med kan avspegla estetiska aspekter.

# FIBERKOMPOSITERS EGENSKAPER

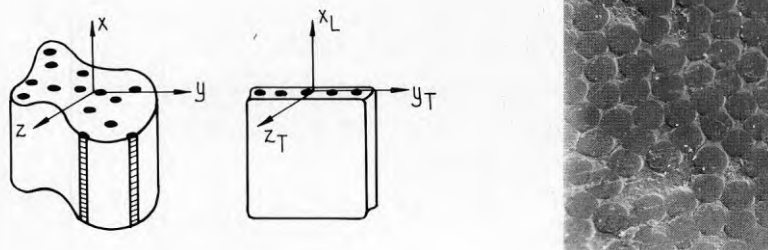
## 2.1 ALLMÄNT

Fiberkompositers egenskaper beror på en mängd olika faktorer. Till skillnad mot normala konstruktionsmaterial där möjligheten att variera egenskaper oftast är begränsad erbjuder fiberkompositerna nästan obegränsade variationsmöjligheter. Detta beror på att typen av fiber, mängden av fibrer och deras orientering, typen av matris och tillverkningsmetod påverkar det slutliga resultatet. Möjligheten att kunna påverka flera faktorer för att på så sätt uppnå lämpliga egenskaper är intressant men det skapar också vissa problem. För att uppnå de egenskaper som eftersträvas behövs kunskap om hur en fiberkomposit är uppbyggd och fungerar.

I detta sammanhang begränsas redovisningen till fiberkompositerna med kontinuerliga fibrer orienterade i en riktning. Sådana fiberkompositerna karakteriseras som högpresterande fiberkompositerna eftersom det är möjligt att uppnå mycket bra egenskaper. Detta gäller speciellt hållfasthetsegenskaperna vid både korttidsbelastning och långtidsbelastning i högst varierande miljö.

## 2.1 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. Principen för en sådan fiberkomposit och en förstoring av ett tvärsnitt visas i Figur 2.1. De materialegenskaper som kan uppnås hos en sådan fiberkomposit beror främst på typen av fibrer, den relativa mängden fibrer, typen av matrismaterial och tillverkningsmetodik.



Figur 2.1 Den principiella uppbyggnaden av en fiberkomposit med fibrer i en riktning och en förstoring genom ett tvärsnitt.

Fibermaterial som ofta används är glasfibrer, aramidfibrer och kolfibrer. Som framgår av Figur 2.1 är fibrer cirkulära. Diametern är beroende på typen av fiber och varierar oftast mellan 12 – 24  $\mu\text{m}$ . Det är de små dimensionerna som tillsammans med speciella tillverkningsmetoder medför de egenskaper som fibrer uppvisar, speciellt extremt goda brotthållfasthets-egenskaper. De fibertyper som nämnts ovan finns i flera olika kvaliteter där främst brotthållfasthet och elasticitetsmodul skiljer.

Vanliga matrismaterial är polyester, vinylester och epoxi. Matrisens uppgift är dels att hålla samman fiberkompositen dels att skydda fibrerna. En god sammanhållning innebär att matrisen ska kunna omfördela påkänningar inne i fiberkompositen. För att uppnå detta räcker det oftast inte med enbart med en mekanisk samverkan utan någon form av bindning mellan matrisens och fiberns molekyler är önskvärd. Samtidigt ska matris-materialet vara så kemiskt stabilt som möjligt för att kunna motstå den påverkan som kan uppkomma i den miljö den befinner sig i. Detta har medfört att de matrismaterial som redovisades ovan har utvecklats till en mängd olika varianter för att tillfredställa olika behov.

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 isotropiskt material. Egenskaper i fibrernas riktning kommer att avvika högst markant från de egenskaper som gäller vinkelrätt mot fiberriktningen. Detta gäller speciellt mekaniska egenskaper men också andra egenskaper som längdutvidgning och diffusionsegenskaper.

Materialegenskaper bestäms normalt genom provning. Detta är också fallet med fiberkompositen. Men till skillnad från konventionella material så är standardiserade provningsmetoder inte etablerade i någon större omfattning. Detta beror på att mängden materialkombinationer är nästan obegränsad samtidigt som de ortotropa egenskaperna medför riktning beroende egenskaper. Dessutom har tillverkningstekniken också ett inflytande som inte är försumbart. Detta medför att provningsomfattningen kan bli mycket omfattande om alla egenskaper ska bestämmas generellt.

Den information som finns tillgänglig om fiberkompositen är av förklarliga skäl begränsad till speciella egenskaper som är relativt enkla att etablera. Detta gäller speciellt egenskaper i fibrernas längsriktning som är lättast att bestämma. Andra egenskaper bestäms genom materialmodeller som behandlas i följande kapitel.

## 2.3 MEKANISKA EGENSKAPER

De mekaniska egenskaperna hos en fiberkomposit är komplicerade. Men inte mer än att de 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 kompositens egenskaper.

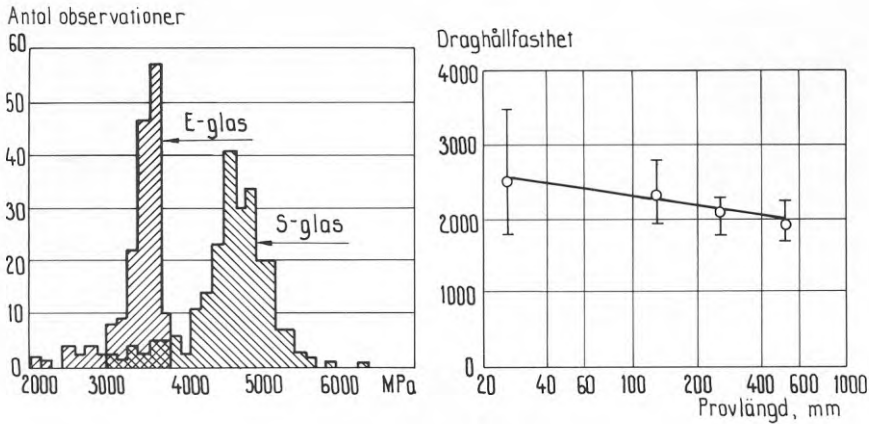
I detta sammanhang är det viktigt att beakta att alla material är viskoelastiska. Med detta avses att vid belastning kan responsen hos materialet vara elastisk eller viskös. Elastiska egenskaper är typiska för måttliga belastningar och avspeglas i att påkännings-töjningskurvan är approximativt linjär. Viskösa egenskaper uppstår under långtidsbelastning och den mest typiska manifestationen är krypning.

### 2.2.1 Fiberegenskaper

Kontinuerliga fibrers cirkulära form, de små dimensionerna och en relativt välorganiserad inre struktur medför goda hållfasthetsegenskaper. I teorin skulle hållfastheten kunna göras ändå högre om fibrerna gavs än ännu mindre diameter. I praktiken sätter tillverkningstekniska aspekter en begränsning för detta. Orsaken är att det är omöjligt att producera fibrer som är tillräckligt felfria.

Under tillverkningen uppstår avvikelser från vad som skulle varit ett optimalt utförande. Från Figur 2.1 framgår att diametern inte är exakt densamma för alla fibrer. Även om variationen är liten påverkar den enskilda fibrers möjliga brottpåkänning. Denna variation av diametern finns också längs en fiber. Densiteten hos enskilda fibrer kan också variera, något som också kan påverka möjlig brottpåkänning. Dessutom, och detta är kanske viktigast, på ytan av en fiber uppstår brister i bindningarna mellan de olika komponenterna som ingår i fibermaterialet. Vid en påkänning uppstår det på sådana ställen spänningskoncentrationer som kan initiera ett brott. För att förbättra materialegenskaperna hos fibrer läggs en så kallad aperatur på ytan. För glasfibrer används silaner som är kemiskt besläktade med glas och som förbättrar ytegenskaperna. Men det hindrar inte att spridningen i brotthållfasthet är högst påtaglig. Ett exempel på detta visas för två typer av glasfiber i Figur 2.2 (ASM Composites).

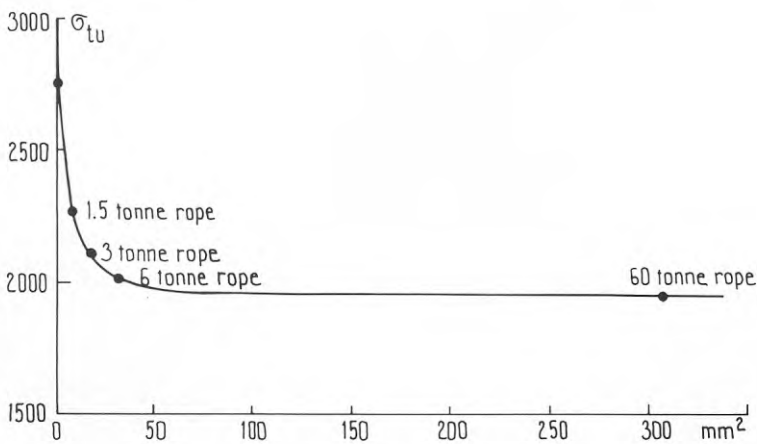
Medelbrotthållfastheten för testerna i Figur 2.2 är 3450 MPa och 4590 MPa för E-glas respektive S-glas för den givna provningshastigheten. För en ökande belastningshastighet ökar brottpåkänningens medelvärde liksom spridningen. På grund av att det antas att det är ytdetekterna som till största delen 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. Så är också



Figur 2.2 Draghållfastheten hos enskilda fibrer med 70 mm:s längd och töjningshastigheten 0,062 mm/mm/minut till vänster. Till höger effekten av olika längd på en fiber.

fallet vilket också visas i Figur 2.2 för en annan provserie (ASM Composites).

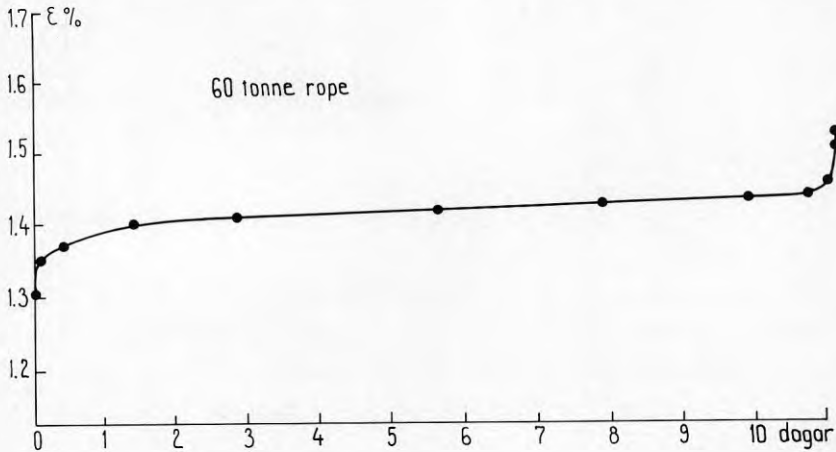
Då mängden fibrer ökar bör också hållfastheten minska av samma anledning som då längden på en fiber ökar, nämligen på grund av att mer fiberyta blir exponerad. Detta är också fallet och detta är exemplifierat för aramidfibrer i Figur 2.3. Resultatet avspeglar en kommersiell produkt, Parafil rope, som säljs som rep med varierande fibermängd. Brotthållfastheten för en enskild fiber är över 3000 MPa. För en ökande fibermängd sjunker brottlasten på ett likartat sätt som för längsberoendet men oftast inte lika markant.



Figur 2.3 Draghållfastheten som funktion av total fibrerarea.



För Parafil rope är också de viskösa egenskaperna utvärderade. För en konstant belastning som är 75% av brottlasten vid korttidsbelastning uppstår typiska viskösa deformationer i form av primärkrypning, sekundärkrypning och tertiärkrypning. För påkänningar under cirka 50% av brottlasten tycks enbart primärkrypning ske.



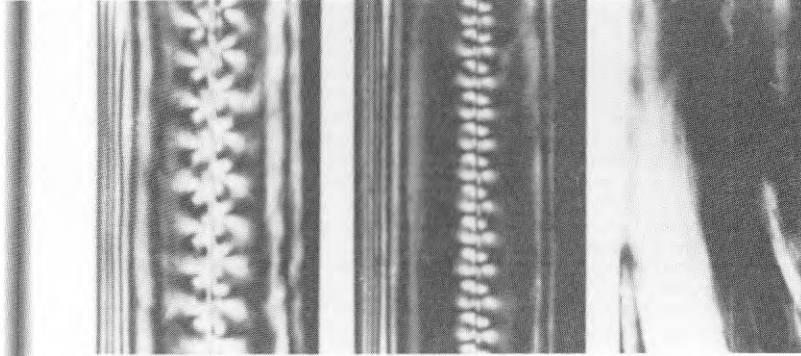
Figur 2.4 Viskös respons hos aramidfibrer utsatta för en konstant påkänning på 75% av korttidshållfastheten.

Alla brott som uppstår med fibrer sker snabbt och ger intrycket av att vara spröda. Detta innebär att den elastiska töjningskapaciteten dominerar även om en viss viskös töjningskapacitet är möjlig, i varje fall för aramidfibrer.

### 2.2.2 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. Detta innebär att matrisen både ska tillföra viskösa egenskaper till fiberkompositen samtidigt som den är kemiskt stabil i krävande miljöer. Denna dubbla funktion är komplicerad och matrisen kan ses som den svaga länken i en fiberkomposit.

Fibrer binds ihop genom kohession och attraktionskrafter mellan fibrer och matris. För att åstadkomma detta behöver matrismaterialet ha lämpliga egenskaper. Men även fibrerna kan behöva behandlas för att uppnå god bindning mellan fibrer och matris. Genom denna bindning mellan fibrer kan påkänningar överföras mellan fibrer. Detta resulterar i att även matrisen utsätts för påkänningar. Ett exempel på hur detta kan se ut visas



Figur 2.5 Påkänningsvariationer i en matris då fibrer utsätts för en påkänning.

i Figur 2.5 där polariserat ljus använts för att visa påkänningsbilden kring fibrer (ASM Composites).

Samtidigt som matrisen omfördelar påkänningar mellan fibrer, vilket förbättrar fiberkompositens egenskaper, så är det också den svaga länken i en fiberkomposit. Detta gäller speciellt bindningen mellan fibrer och matris. I övergången mellan fibrer och matris finns det ställen där bindingarna är mindre bra eller där en fiber utsätter matrisen för stora påkänningar. Här kan en mikrospricka initieras som sedan växer. På sådana ställen kan inte en påkänning hos fibrerna omfördelas lika effektivt och detta kan medföra att ett fiberbrott uppstår. Detta behöver i och för sig inte innebära att hela fiberkompositen går till brott. Detta kräver oftast att påkänningen är tillräckligt hög eller av långtidskaraktär.

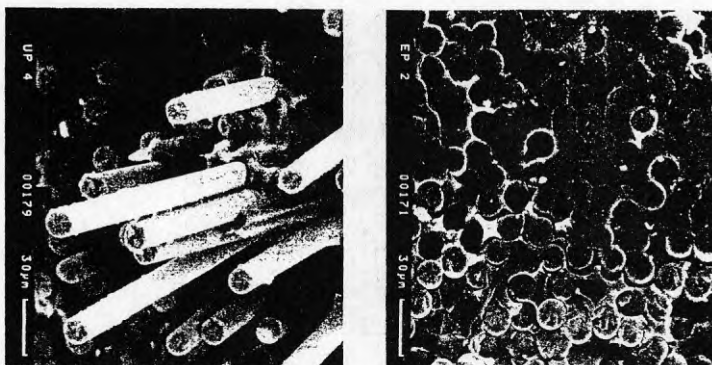
Även om en matris har svagheter så tillför den också positiva egenskaper. Matrisen tillför viskösa egenskaper som gör att en fiberkomposit uppför sig mer som normala konstruktionsmaterial. Samtidigt ger den ett skydd mot omgivningen som oftast är nödvändigt.

Matrisen bestämmer till stor del under vilka omständigheter som en fiberkomposit kan användas. Detta gäller både normala temperatur och fuktbetaingelser eller extrema miljöer.

### 2.2.3 Kompositegenskaper

För en fiberkomposit är samspelet mellan fibrer och matris av stor vikt. Genom att matrisen kan omfördela påkänningar mellan fibrer kan egenskaperna förbättras högst påtagligt. Detta medför att det markanta storleksberoende som finns hos fibrer kan reduceras. Men också att brottbeteendet och brottlasten påverkas.

Den vanligaste brottformen uppstår genom att mikrosprickor mellan fibrer och matris växer och frilägger fibrer lokalt. Det markanta storleks-



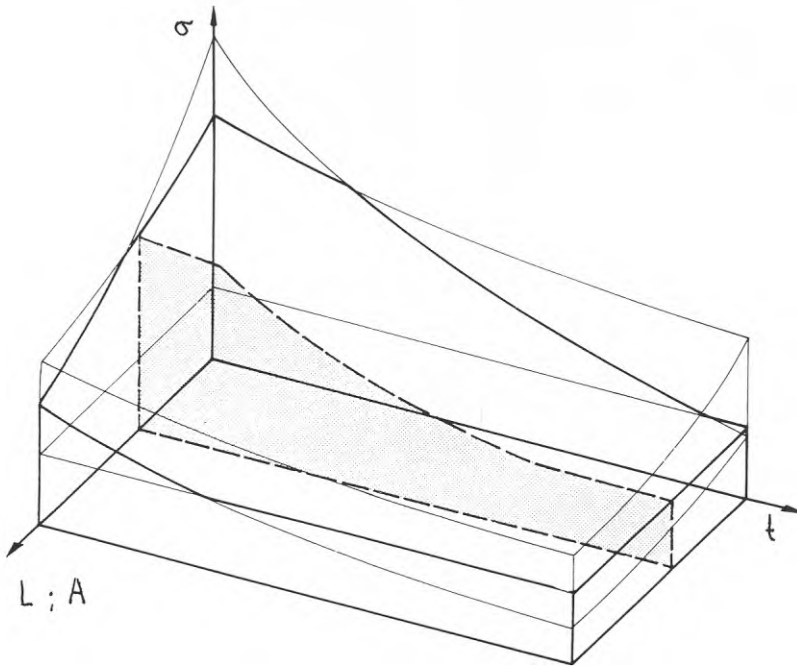
Figur 2.6 Mikroskopfotografier av de två brottmoderna som kan uppstå hos en fiberkomposit.

beroende som finns i längsriktningen hos brottlasten för enskilda fibrer kommer då att medföra ett lokalt fiberbrott lätt uppstår om påkänningen är tillräckligt hög. Enskilda brott har ingen större betydelse men då detta sker på många ställen leder detta slutligen till att påkänningen inte kan tas upp av kvarvarande fibrer och ett totalt brott utlöses. På grund av att fiberbrott uppstår på 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 att medföra att omfördelningen mellan många fibrer kollapsar samtidigt och ett brott utlöses. I detta fall blir brottytan relativt jämn eftersom alla fibrer går av på ungefär samma ställe.

De två brottformer som kan uppstå visas i Figur 2.6. Båda brottformerna framstår som spöda dragbrott i fibrerna men den senare brottformen är snarast ett skjuvbrott i matrisen. Den första brottformen uppvisar ett betydligt större storleks- och tidsberoende än den andra brottformen. Orsaken är den som kortfattat beskrevs om spricktillväxten och enskilda fiberbrott före det slutliga brottet uppstår. Resultatet kan illustreras som i Figur 2.7 med två brottytor. Det skuggade området avspeglar brottpåkänningens tidsberoendet för en fiberkomposit med givna dimensioner. Brottmoden med det större storleks- och tidsberoendet är vanligast men den andra brottformen uppstår om vissa villkor är uppfyllda. Om temperaturen är låg eller om belastningshastigheten är hög kommer inte sprickor mellan fibrer och matris att utvecklas i tillräcklig omfattning. Ett brott kommer då att genereras som den andra formen av brott.

På grund av omfördelningen av påkänningar mellan fibrer kan också brottlasten höjas jämfört med vad som gäller för enbart fibrerna. Denna höjning i brottlast beror på hur nära fibrer befinner sig i medeltal, eller den



Figur 2.6 De två brottmoderna hos en fiberkomposit illustrerat i form av två brottytor. Brotthållfastheten är en funktion av storleken på fiberkompositen och belastningstiden.

relativa fibermängden. Om avståndet mellan fibrer blir för stort kan inte en omfördelning ske lika effektivt och brottlasten närmar sig det som gäller för enbart fibrer. Då fibermängden närmar sig det som är praktiskt möjligt, i storleksordningen 70 – 80% fibrer, kan brottlasten öka med mer än 50% jämfört med enbart fibrer.

Vid långtidsbelastning för konstant eller varierande last har matrisen en avgörande betydelse. I varje fall om en fiberkomposit ska kunna användas för relativt höga påkänningar. Vid långtidsbelastning med en konstant påkänning kommer samma beteende som i Figur 2.4 att uppstå. Efter den initiella responsen sker krypning där speciellt sekundärkrypningen är av stort intresse. Sekundärkrypning avspeglar i detta fall en spricktillväxt mellan fibrer och matris och det är viktigt att den sker så långsamt som möjligt. Vid variabel påkänning och speciellt vid snabba lastväxlingar kommer spricktillväxten att gå fortare. I många tillämpningar kan denna spricktillväxt och den reducerade hållfasthet som detta medför vara av avgörande betydelse.

## 2.4 MILJÖMÄSSIGA EGENSKAPER

Den miljö en fiberkomposit befinner sig i kan vara av stor betydelse. Detta dels för att de flesta konstruktionsmaterial finns i en förädlad form som innebär att de strävar efter att återgå till en mer stabil kemisk förening dels att olika aggressiva ämnen kan finnas i den omgivande miljön som bryter ner dem snabbare. Dessutom kan en fiberkomposit utsättas för kombinationen last och miljöpåverkan som kan vara allvarligare.

### 2.4.1 Miljöpåverkan

Det är speciellt matrismaterial som ska vara ett skydd i den miljö som en fiberkomposit befinner sig i. Av denna anledning är det viktigt att matrisen är tillräckligt kemisk stabil. Speciellt gäller detta tillämpningar där kraftigt reaktiva ämnen finns närvarande. Detta gäller speciellt starka baser eller syror.

Fibrer kan vara känsliga för den omgivande miljön och behöver därför skyddas. Men det är ofta minst lika viktigt att kompositegenskaperna inte går förlorade. Om bindningen mellan fibrer och matris påverkas negativt kommer brottpåkänningen att reduceras. Detta gäller korttidshållfastheten men inte minst långtidshållfastheten.

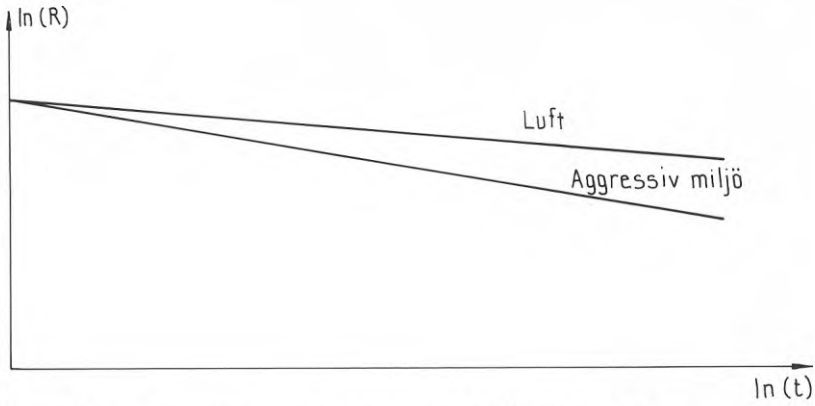
Matrismaterial är inte helt täta. Därför är det möjligt för gaser och vätskor att diffundera in i matrisen även om det kan ta mycket lång tid. Ett exempel är vatten som kan komma in i matrisen och få den att svälla. Detta ökar avståndet mellan fibrer och kommer att reducera brotthållfastheten.

För fiberkomposit som kommer att utsättas för starka syror eller baser kommer en nedbrytning att ske. Men det finns matrismaterial som är tillräckligt kemiskt stabila för att detta ska ske mycket långsamt.

### 2.4.2 Last och miljöpåverkan

I många tillämpningar är den kombinationseffekt som uppstår vid påverkan av någon miljöfaktor samtidigt som en lastpåverkan är närvarande väsentlig. Detta gäller speciellt bärande konstruktionsdelar där tillförlitligheten ska vara tillfredställande.

Resultatet av en kombinerad last- och miljöpåverkan kommer att påverka de tidsberoende egenskaperna. Spricktillväxten mellan fibrer och matrismaterial kommer att gå fortare och resultatet märks primärt för långtidshållfastheten. Med utgångspunkt från kurvan som utgör begränsningen vid långtidsbelastning i Figur 2.6 så kan en ny situation åskådliggöras som i Figur 2.7.



Figur 2.7 Inverkan av miljöfaktorer på hållfastheten i tiden.

Genom att göra försök och bestämma förändringen i tiden kan inverkan av olika miljöfaktorer beaktas på ett konkret sätt i en tillförlitlighetsanalys. Denna teknik utnyttjas för att analysera inverkan av olika miljöfaktorer på fiberkompositers hållfasthetsegenskaper.

# HÅLLFASTHETSKARAKTERISERING

## 3.1 ALLMÄNT

En fiberkomposits hållfasthetsegenskaper kommer att avspegla de ingående delmaterialens egenskaper. Men detta sker inte på ett enkelt sätt även om vissa egenskaper approximativt kommer att avspegla ett medelvärde av de ingående materialen. Andra egenskaper kan förbättras högst påtagligt jämfört med delmaterialens egenskaper. Detta beror på att samverkan mellan de olika delmaterialen är komplex. En konsekvens av detta är att en komposits verkliga egenskaper inte kan beskrivas enkelt med utgångspunkt från de ingående delmaterialen. Däremot är det möjligt att få en uppskattning av vissa förväntade egenskaper.

En fiberkomposit bör ses som ett konstruktionsmaterial i allmänhet. Detta innebär att beständigheten med avseende på påverkan av laster och miljö är mycket väsentlig. En konsekvens av detta är att det är nödvändigt att beakta inte bara korttidshållfastheten utan speciellt långtidshållfastheten och de förändringar som kan ske i tiden. Lämpligen bör detta göras så att tillförlitligheten kan beaktas på ett acceptabelt sätt.

## 3.2 MATERIALRESPONS

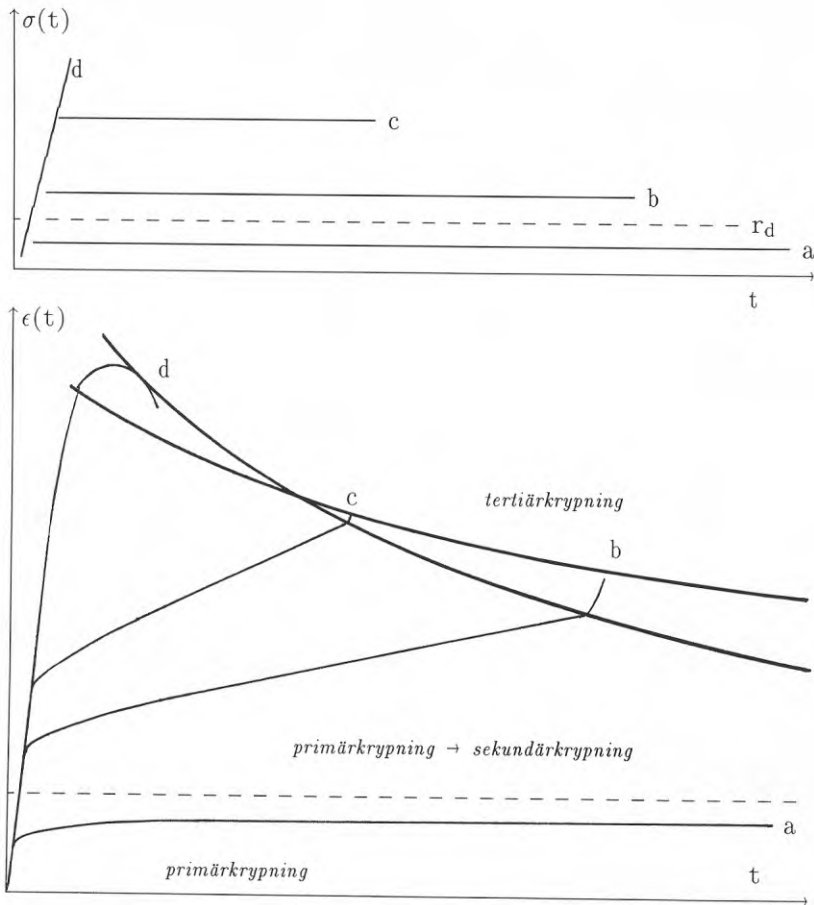
Då en kropp utsätts för en påkänning kommer det att uppstå en respons i form av en deformation eller töjning. Men responsen är inte begränsad till en initieell töjning utan efterföljs av primärkrypning. Denna primärkrypning avspeglar att en inre påkänningsutjämning eftersträvas. Primärkrypningen kan återgå i fördröjd form vid en avlastning. För en påkänning som överstiger ett visst tröskelvärde kan inte en inre jämvikt åstadkommas. Det resulterar i att primärkrypningen övergår i sekundärkrypning. Slutligen kan även tertiärkrypning ske kort innan ett brott uppstår.

### 3.2.1 Krypning vid konstant påkänning

Då krypning sker vid konstant påkänning fås de resposser som visas i Figur 3.1. Som jämförelse visas också responsen för en kontinuerligt ökande påkänning.

De töjningar som uppstår i ett material för en normalpåkänning brukar ofta uttryckas som

$$\epsilon(t) = \epsilon_i + \epsilon_{pt}^\alpha + \epsilon_{st} + \epsilon_{tt}^\beta \quad (3.1)$$



Figur 3.1 Kryp beteende vid olika påkänningsnivåer och en belastning direkt till brott som jämförelse.

där  $\epsilon_i$  är en initiell respons,  $\epsilon_p$  är primärkrypning,  $\epsilon_s$  är sekundärkrypning och  $\epsilon_t$  är tertiärkrypning. För exponenterna gäller relationen  $\alpha < 1 < \beta$ . De töjningar som visas i Figur 3.1 och som beskrivs med ekv 3.1 avspeglar två fundamentalt olika materialbeteenden, ett elastiskt och ett visköst. Av denna anledning kan det vara lämpligt att förenkla och skriva ekv 3.1 som

$$\epsilon(t) = \epsilon_e t^\alpha + \epsilon_v t \quad (3.2)$$

där  $\epsilon_e$  är en elastisk respons och  $\epsilon_v$  är en viskös respons. En serieutveckling av den första termen i ekv 3.2 leder till

$$\epsilon(t) = \epsilon_e \left[ 1 + \frac{\alpha \cdot \ln(t)}{1!} + \dots \right] + \epsilon_v t \quad (3.3)$$

som beskriver långtidsbeteendet i primärkrypning bättre än ekv. 3.1. Den



elastiska töjningen beskrivs normalt med Hook's lag som

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad (3.4)$$

där  $\sigma$  är påkänningen och  $E$  är elasticitetsmodulen. Även töjningen i primärkrypningen kan beskrivas på ett liknande sätt.

Sekundärkrypningen är däremot av en helt annan karaktär och avspeglar en viskös deformation i materialet. Denna viskösa deformation beskrivs oftast med Nortons kryplag som

$$\epsilon_s = \frac{(\sigma - \sigma_0)^n}{\eta} \quad (3.5)$$

där  $\sigma$  är en påkänning som är större än en tröskelpåkänning  $\sigma_0$ , och  $\eta$  och  $n$  är materialparametrar. Tröskelvärde  $\sigma_0$  är temperaturoberoende och sjunker med ökande temperatur. I många tillämpningar är denna fördröjda viskösa töjning av minst lika stort intresse som den initiella eftersom den ger upphov till en skadeackumulering och den kan leda till ett brott om den får pågå tillräckligt länge.

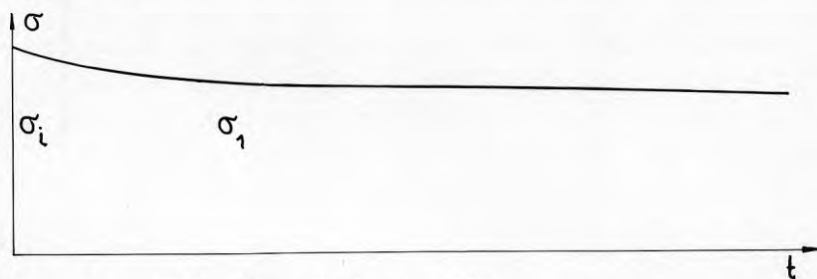
I Figur 3.1 finns också brottlinjer markerade som avspeglar en elastisk töjningskapacitet och en viskös töjningskapacitet i tidsrummet. Förutom detta tidsberoende finns det ett storleksberoende vilket gör brottkriterierna till brottytor.

### 3.2.2 Relaxation

I många tillämpningar är inte påkänningen konstant utan töjningen. Detta resulterar i att krypningen som annars skulle ha ökat töjningen i stället medför att påkänningen minskar. Denna minskning av påkänningen sker i två steg, under primärkrypningen och under sekundärkrypningen. Detta är illustrerat i Figur 3.2. Under det första skedet medför primärkrypningen en reducerad påkänningsnivå som kan uttryckas som

$$\sigma_1 = \sigma_i - \epsilon_p E \quad (3.6)$$

där  $\sigma_i$  är den initiella påkänningen och  $\sigma_1$  påkänningen då primärkrypningen avslutats.



Figur 3.2 Relaxation under konstant töjning.

Under det andra skedet kommer den viskösa töjningen att reducera den elastiska töjningen. Då sekundärkrypningen startar kan detta skrivas

$$\epsilon = \frac{\sigma_1}{E} + \frac{(\sigma_1 - \sigma_0)^n}{\eta} t = 0 \quad (3.7)$$

För att beakta att påkänningen förändras i tiden differentieras ekv 3.7 och integreras. Detta resulterar i

$$-(n-1) \ln \left[ \frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_1} \right] = \ln \left[ 1 + (n-1) \frac{E}{\eta} \sigma_1^{n-1} t \right] \quad (3.8)$$

där  $\sigma$  är påkänningen vid tiden  $t$ . Om den relativa påkänningsförändringen  $(\sigma_1 - \sigma)/\sigma_1$  introduceras kan vänster sida om likhetstecknet serieutvecklas

$$-(n-1) \ln \left[ 1 - \frac{\sigma_1 - \sigma - \sigma_0}{\sigma_1} \right] \approx (n-1) \frac{\sigma_1 - \sigma - \sigma_0}{\sigma_1} \quad (3.9)$$

om  $(\sigma_1 - \sigma)/\sigma_1 \ll 1$ . Den relativa påkänningsändringen kan skrivas som

$$\ln t \approx \text{konst.} + (n-1) \frac{\sigma_1 - \sigma - \sigma_0}{\sigma_1} \quad (3.10)$$

Oftast sätts  $\sigma_1 = \sigma_1$  och  $\sigma_0 = 0$  i tillämpningar. För att ekv 3.10 ska vara relevant så behöver sekundärkrypning verkligen ske. Detta kan ta lång tid.

### 3.3 ELASTICITETSMODULEN HOS FIBERKOMPOSITER

Vissa egenskaper hos fiberkompositen kan på ett approximativt sätt beskrivas som ett medelvärde av de ingående delkomponenterna. Detta gäller speciellt de elastiska egenskaperna och detta illustreras genom en utvärdering av elasticitetsmodulen för en fiberkomposit med kontinuerliga fibrer i en riktning. Belastning sker i fibrernas riktning eller vinkelrätt deras riktning.

Vid enaxiell dragbelastning i fibrernas riktning erhålls en situation som kan åskådliggöras på det sätt som visas i Figur 3.3. Vid små deformationer blir töjningen i de båda materialen samma vilket, baserat på Hook's lag för linjärelastiskt beteende, kan skrivas som

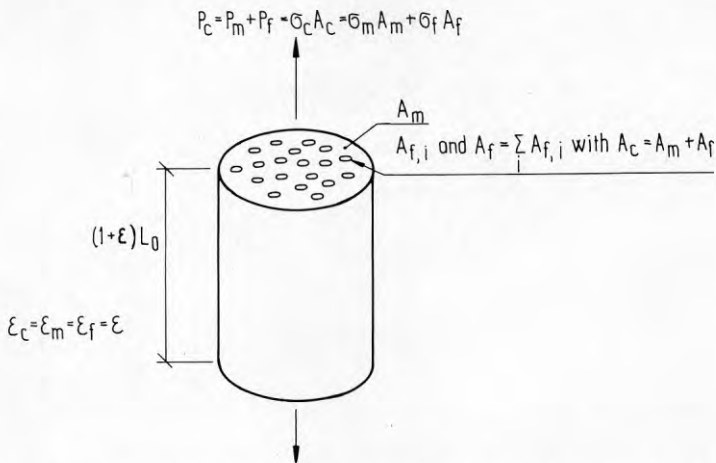
$$\epsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} = \epsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (3.11)$$

där alla parametrar är definierade i Figur 3.3. Det framgår också att den last som tas upp i fiberkompositen är

$$P_c = P_m + P_f \quad (3.12)$$

Definitionsmässigt blir påkänningen

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (3.13)$$



Figur 3.3 Enaxiell dragning av en fiberkomposit med kontinuerliga fibrer.

där parametrarna är definierade i Figur 3.3. Genom att kombinera ekv 3.11 och ekv 3.13 fås

$$E_c \epsilon_c A_c = E_m \epsilon_m A_m + E_f \epsilon_f A_f \quad (3.14)$$

För små deformationer är  $\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f$  vilket innebär att fiberkompositens elasticitetsmodul kan skrivas

$$E_c = E_m \frac{A_m}{A_c} + E_f \frac{A_f}{A_c} \quad (3.15)$$

På grund av den cylindriska geometrin i Figur 3.3 är tvärsnittsytandelen samma som volymsandelen vilket kan skrivas

$$E_c = v_m E_m + v_f E_f \quad (3.16)$$

som är ett uttryck som kan generaliseras för diffusionsegenskaper, termisk ledningsförmåga och elektrisk ledningsförmåga.

Vid belastning vinkelrätt fibrernas riktning uppstår en situation som kan illustreras på det sätt som visas i Figur 3.4. För dessa förutsättningar gäller

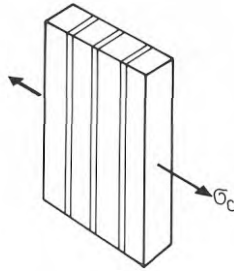
$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f \quad (3.17)$$

Den totala förlängningen  $\Delta L_c$  blir i detta fall summan av förlängningen i matris och fibrer. Således

$$\Delta L_c = \Delta L_m + \Delta L_f \quad (3.18)$$

Genom att dividera med totala längden i belastningsriktningen erhålls

$$\frac{\Delta L_c}{L_c} = \frac{\Delta L_m}{L_c} + \frac{\Delta L_f}{L_c} \quad (3.19)$$



Figur 3.4 Belastning vinkelrätt fiberriktningen.

På grund av geometrin i Figur 3.4 så blir längden av varje komponent i belastningsriktningen proportionell mot sin ytandel. Detta innebär

$$L_m = A_m L_c \quad L_f = A_f L_c \quad (3.20)$$

Genom att kombinera ekv 3.19 och ekv 3.20 erhålls

$$\frac{\Delta L_c}{L_c} = \frac{A_m \Delta L_m}{L_m} + \frac{A_f \Delta L_f}{L_f} \quad (3.21)$$

Definitionsmässigt är  $\epsilon = \Delta L/L$  och ytandelen är lika med volymsandelen i Figur 3.4. Ekvation 3.21 kan därför skrivas

$$\epsilon_c = v_m \epsilon_m + v_f \epsilon_f \quad (3.22)$$

Vid denna påkänningsform är  $\sigma = E_c \epsilon_c = E_m \epsilon_m = E_f \epsilon_f$  vilket innebär att ekv 3.22 kan uttryckas som

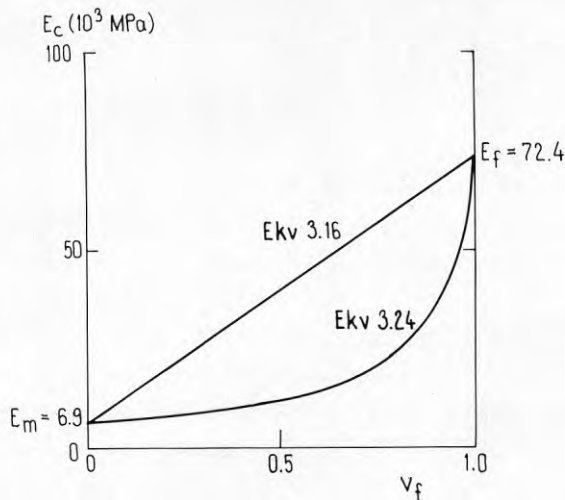
$$\frac{\sigma}{E_c} = v_m \frac{\sigma}{E_m} + v_f \frac{\sigma}{E_f} \quad (3.23)$$

Genom att dividera bort termen  $\sigma$  och skriva om ekv. 3.23 kan elasticitetsmodulen skrivas

$$E_c = \frac{E_m E_f}{v_m E_f + v_f E_m} \quad (3.24)$$

vilket innebär ett mindre effektivt utnyttjande av fiberegenskaper.

I Figur 3.5 visas en jämförelse mellan ekv 3.16 och ekv 3.24 för glasfibrer i en epoximatris. Elasticitetsmodulen för glasfibrer av E-glas och epoxi är 72,4 MPa respektive 6,9 MPa. I normala tillämpningar överstiger fibermängden oftast inte cirka 70% av den totala volymen vilket innebär att elasticitetsmodulen blir 52,8 GPa för belastning i längsriktningen och 18,3 GPa för belastning i tvärriktningen.



Figur 3.5 Elasticitetsmodulens beroende på belastningsriktningen i förhållande till fiberriktningen i relation till mängden fibrer  $v_f$ .

I praktiken är det belastning i fiberriktningen som är mest intressant. För detta fall skulle ekv 3.16 vara en rimlig approximation. Men den räta linje som avspeglar elasticitetsmodulens direkta beroende på fibermängden är bara approximativ. I stället blir kurvan krökt nedåt mot den kurva som avspeglar en belastning vinkelrätt den yttre lastens riktning. Detta avspeglar att det uppstår ett påkänningstillstånd vinkelrätt fiberriktningen som beror dels på en tvärkontraktion i materialet dels på att last omfördelas mellan fibrer inne i fiberkompositen. En bättre och generell beskrivning av elasticitetsmodulen är därför

$$E_c^n = v_m E_m^n + v_f E_f^n \quad (3.25)$$

som inkluderar både ekv 3.16 och ekv 3.24. För  $n = 1$  erhålls ekv 3.16 och för  $n = -1$  erhålls ekv 3.24. För många verkliga material antar parametern  $n$  ett värde mellan 0 och 1 vilket ger en svagt nedåtböjd kurva. En generell beskrivning av elasticitetsmodulen kräver att värdet på parametern  $n$  också bestäms.

### 3.4 BROTTHÅLLFASTHETEN HOS FIBERKOMPOSITER

Vid användandet av en medelvärdesprincip antas det att ett materials egenskaper huvudsakligen beror på de elastiska egenskaperna. Detta är en acceptabel approximation vid små påkänningar men inte vid höga påkänningar. Med utgångspunkt från ekv 3.12 kan fördelningen av last mellan fibrer och matris vid dragning i fiberriktningen uttryckas som

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_c A_c} = \frac{E_f \epsilon_f A_f}{E_c \epsilon_c A_c} = \frac{E_f}{E_c} v_f \quad (3.26)$$

vilket innebär att huvuddelen av dragkraften tas upp i fibrerna. I fallet med 70% glasfibrer i en epoximatrix blir  $P_f/P_c = 0,96$ . Detta innebär att brottlasten skulle höjas med cirka  $1/0,96 = 1,02$  för fibrer inbakade i en matrix jämfört med fria fibrer. I verkligheten är lastfördelningen inne i en fiberkomposit komplex och brottlasten kan vara mer än 50% högre än för enbart fibrerna.

Vid höga påkänningar är det lämpligt att karakterisera en fiberkomposit som ett viskoelastiskt material vilket innebär att hållfasthetsegenskaperna blir annorlunda. Sådana egenskaper kommer då att avspegla töjningarna i materialet och detta kan beskrivas på det sätt som ges av ekv 3.2 med tillhörande ekvationer.

Utgångspunkten i en sådan karakterisering är existensen av felaktigheter i en fiberkomposit. Sådana felaktigheter finns i både fibrer och matrixmaterial men speciellt i övergången mellan fibrer och matrix. Den inverkan som dessa felaktigheter har är helt avgörande för fiberkompositens brott-hållfasthet. Men inget precist kan sägas om dessa felaktigheter. Bara att de tenderar att förekomma slumpmässigt och att mer markanta felaktigheter är vanligare för större volymer som påverkas. Dessa kan dessutom växa i tiden under inverkan av en påkänning.

Påkänningstillståndet för en fiberkomposit kan definieras i volymspåkänningar och en distortionspåkänning som

$$\sigma_v = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (3.27)$$

$$\sigma_d = 1/3 \left( (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right)^{1/2} \quad (3.28)$$

där  $\sigma_x$  verkar i fiberkompositens längsriktning och  $\sigma_y$  och  $\sigma_z$  verkar vinkelrätt längsriktningen.

Då en fiberkomposit utsätts för en dragpåkänning  $\sigma_x$  kan en elastisk eller viskös töjning uppstå. Detta kan uttryckas som

$$\epsilon(t) = g_e(\sigma_x; t) + g_v(\sigma_d; t) \quad (3.29)$$

som är av samma form som ekv 2.2.

På grund av existensen av felaktigheter kommer brotttöjningen också att bero på en effektiv volym som utsätts för en påkänning. Detta kan skrivas som

$$\epsilon_u(t) = g_e(\sigma_x; D_x, L_x, A_{yz}) + g_v(\sigma_d; D_d, L_x, A_{yz}) \quad (3.30)$$

där volymen är uppdelad på en längskomponent  $L_x$  och en tvärsnittskomponent  $A_{yz}$ . Tvärsnittsarean är vald här av praktiska skäl även om det är möjligt att fiberytan varit lämpligare. Tiden uttrycks som en effektiv varaktighet  $D_x$  och  $D_d$  motsvarande påkänningarna  $\sigma_x$  respektive  $\sigma_d$ .

De felaktigheter som finns antas inverka på ett sådant sätt att den svagaste delen i fiberkompositen är avgörande. Men detta kan ske på två sätt, som en inverkan på den elastiska eller den viskösa töjningskapaciteten.

Vid en direkt belastning till brott uppstår huvudsakligen en elastisk töjning. För detta fall antas att töjningskapaciteten är primärt beroende på den svagaste delen i längsriktningen. Detta kan skrivas i statistiska termer för ett antal oberoende längsenheter  $nL_x$  som

$$F(\epsilon_e(\sigma_x)) = 1 - \left[1 - F_x(\sigma_x; D_x, A_{yz})\right]^{nL_x} \quad (3.31)$$

där  $F_x(\sigma_x; D_x, A_{yz})$  är den statistiska fördelningsfunktionen för den elastiska töjningen vid brott för en liten längd  $L_x$  av fiberkompositen över tvärsnittet  $A_{yz}$  med varaktigheten  $D_x$ . Detta är ett liknande antagande som görs i Weibull teorin.

Vid en långtidsbelastning kommer viskösa töjningar att uppstå under sekundärkrypningen. Här antas att töjningskapaciteten är primärt tidsberoende. Detta kan skrivas i statistiska termer för ett antal oberoende tidsintervall  $mD_d$  som

$$F(\epsilon_v(\sigma_d)) = 1 - \left[1 - F_d(\sigma_d; L_x, A_{yz})\right]^{mD_d} \quad (3.32)$$

där  $F_v(\sigma_d; L_x, A_{yz})$  är den statistiska fördelningsfunktionen för den viskösa töjningen vid brott för en liten varaktighet  $\Delta D_d$  för fiberkompositen med längden  $L_x$  och tvärsnittet  $A_{yz}$ . Detta antagande avspeglar att för ett ökande antal tidsintervall ökar också sannolikheten för ett brott.

Eftersom ett brott kan uppstå antingen som ett elastiskt dragbrott eller som ett visköst skjubbrott blir den totala brottsansolikheten

$$F(\epsilon(\sigma)) = 1 - \left[1 - F(\epsilon_e(\sigma_x))\right] \left[1 - F(\epsilon_v(\sigma_d))\right] \quad (3.33)$$

som med ekv 3.31 och ekv 3.32 insatt ger

$$F(\epsilon(\sigma)) = 1 - \left[1 - F_x(\sigma_x; D_x, A_{yz})\right]^{nL_x} \left[1 - F_d(\sigma_d; L_x, A_{yz})\right]^{mD_d} \quad (3.34)$$

Om det antas, för enkelhets skull, att töjningen är direkt beroende på påkänningen, och att det finns en kontinuitet i tiden och i rummet mellan de två töjningsformerna, fås efter övergång till den asymptotiska extremvärdesfördelningen följande uttryck

$$F_x(\epsilon(\sigma)) = 1 - \exp\left(-\frac{L_x}{L_0} \left[\frac{A_{yz}}{A_0}\right]^{k_x/k_{yz}} \left[\frac{D_x}{D_0}\right]^{k_x/h_x} \left[\frac{\sigma_x}{c_x}\right]^{k_x} - \frac{D_d}{D_0} \left[\frac{L_x}{L_0}\right]^{h_x/k_x} \left[\frac{A_{yz}}{A_0}\right]^{h_x/k_{yz}} \left[\frac{\sigma_d - r_d}{c_d}\right]^{h_x}\right) \quad (3.35)$$

där  $k_x$  och  $k_{yz}$  är storleksparametrar i längsled respektive över ett tvärsnitt och  $h_x$  är en tidsparameter. Normalt gäller för dessa parametrar att  $h_x > k_{yz} > k_x$ . Parametern  $r_d$  är det tröskelvärde över vilket viskösa töjningar sker och  $c_x$  och  $c_d$  är normaliseringskonstanter.

Den första delen i ekv. 3.35 avspeglar sannolikheten för att ett elastiskt dragbrott ska uppstå i fibrerna medan den sista delen motsvarar ett visköst skjuvbrott i matrisen. En jämförelse mellan ett isotropt material visar att skillnaden huvudsakligen ligger i storlekseffekten. Då storleksparametrarna är identiska förenklas ekv 3.35 till samma uttryck som för ett isotropt material. En utvärdering av den effektiva volymen under påkänning och motsvarande effektiva varaktighet utförs på i princip samma sätt som för ett isotropt material vilket finns redovisat i Bilaga B.

Ett generellt brottkriterium kan bara uttryckas i form av töjningar där storlekseffekter och tidseffekter kan beaktas godtyckligt i en statistisk extremvärdesfördelning av den form som ges av ekv 3.35. Motsvarande brottpåkänning kan enbart utvärderas i form av statistiska moment som medelvärde och varians för givna värden på dimensioner och varaktighet. Medelvärdet för ekv. 3.35 kan för båda brottformerna skrivas som

$$\sigma_i = \sigma_{oi} \left( a + b \left[ \frac{L_0}{L_x} \right]^{1/k_x} \left[ \frac{A_0}{A_{yz}} \right]^{1/k_{yz}} \left[ \frac{D_0}{D_i} \right]^{1/h_x} \right) \quad (3.36)$$

där index  $i$  står för  $x$  eller  $d$  motsvarande ett dragbrott hos fibrer respektive ett skjuvbrott i matrisen. I detta uttryck har en referenshållfasthet  $\sigma_{oi}$  introducerats som motsvarar brotthållfastheten för en referenslängd  $L_0$ , referens tvärsnittsarea  $A_0$  och referensvaraktighet  $D_0$ . Parametrarna  $a$  och  $b$  antar olika värden beroende på brottmoden. För ett dragbrott är  $a \approx 0$  och  $b \approx 1$ . För ett skjuvbrott motsvarar parametern  $a$  den skjuvhållfasthet under vilken bara en skjuvdeformation uppstår och därför gäller normalt  $a > 0$  och  $b < 1$ . För påkänningar över tröskelvärdet  $a\sigma_{oi}$  kommer en viskösa skjuvdeformation att uppstå i matrisen. Variationskoefficienten, standardavvikelsen/medelvärdet, kan skrivas som

$$\text{c.o.v.} = \frac{b \left[ \frac{L_0}{L_x} \right]^{1/k_x} \left[ \frac{A_0}{A_{yz}} \right]^{1/k_{yz}} \left[ \frac{D_0}{D_i} \right]^{1/h_x}}{a + b \left[ \frac{L_0}{L_x} \right]^{1/k_x} \left[ \frac{A_0}{A_{yz}} \right]^{1/k_{yz}} \left[ \frac{D_0}{D_i} \right]^{1/h_x}} G(k_x, k_{yz}, h_x) \quad (3.37)$$

där funktionen  $G(k_x, k_{yz}, h_x)$  innehåller gamma funktioner med avseende på någon av parametrarna  $k_x$ ,  $k_{yz}$  eller  $h_x$  beroende på om brottformen. Ofta kan detta uttryckas som  $G(\gamma) = \pi/(\gamma\sqrt{6})$ .

Effekten av ekv. 3.36 är att brotthållfastheten för en fiberkomposit minskar med ökande längd och fiberarea men också med avseende ökande belastningstid. Detta avspeglar relativt väl de erfarenheter som finns för



högpresterande fiberkompositer. Samtidigt visar ekv 3.37 att variationskoefficienten är relativt konstant vilket medför att spridningen minskar då hållfastheten minskar. Mer information om principer och tillämpning av denna metodik redovisas i Bilaga B.

Parametervärden som gör det möjligt att använda ekv 3.35, 3.36 och 3.37 behöver bestämmas från experiment. Storleksparametrarna beror på kombinationen fiber och matris men också på tillverkningsmetodiken. Tidsparametern tycks däremot huvudsakligen avspegla matrisegenskaperna och då förmodligen matrisens töjningsegenskaper.

### 3.5 UTMATTNING HOS FIBERKOMPOSITER

Utmattning hos fiberkompositer avspeglar en accelererad spricktillväxt som för andra material. För material där spricktillväxten kan mätas karakteriseras den ofta med Paris–Erdogans empiriska lag som kan skrivas som

$$\Delta \epsilon = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^n}{\eta} \Delta t \quad (3.38)$$

där  $\Delta \epsilon$  är spricktillväxten under tiden  $\Delta t$  för en påkänning som varierar mellan  $\sigma_{\max}$  och  $\sigma_{\min}$  och  $n$  och  $\eta$  är materialparametrar. Detta uttryck beskriver en spricktillväxt på samma sätt som Nortons kryplag. Men denna spricktillväxt är accelererad jämfört med den viskösa töjning som sker för en konstant påkänning. Detta förmodligen på grund av en tröghet i systemet som gör att elastisk töjning kan transformeras till viskös töjning.

För fiberkompositer kan inte spricktillväxten mätas på något enkelt sätt. Dessutom föregår den på många ställen samtidigt. Men på grund av en fiberkomposit's uppbyggnad med en viskös matris är trögheten i systemet liten och utmattningsegenskaperna blir i allmänhet goda. I stället tycks det som om det är den effektiva tiden på en hög påkänningsnivå som ofta är väsentligare. Om detta är fallet kan detta beskrivas direkt med ekv 3.35. Om en snabbare skadeackumulering sker under utmattning kan ekv 3.35 också användas men med en reducerad tidsparameter. Denna reduktion blir primärt beroende på spänningsvidden men också töjningshastigheten.

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. Detta ger en linjär skadesummering, något som strider mot Paris–Erdogans lag, men som är allmänt accepterad.

### 3.6 MILJÖPÅVERKAN HOS FIBERKOMPOSITER

En samtidig påverkan av påkänningar och en aggressiv miljö har mest markant inverkan på långtidshållfastheten. Detta är naturligt eftersom inverkan oftast är att förstärka spricktillväxten mellan fibrer och matris. Effekten är att den viskösa töjningshastigheten ökar och ett brott uppstår fortare än vad som annars skulle varit fallet.

Den kombinationseffekt som kan uppstå vid samtidig last och miljöpåverkan kan beaktas med ekv 3.35 genom att primärt tidsparametern ges ett lägre värde. Men även storleksparametrarna kan påverkas. De förändringar som uppstår behöver bestämmas genom experiment.

# FIBERMATERIAL

## 4.1 ALLMÄNT

Möjligheten att tillverka fibermaterial med mycket goda egenskaper har accelererat mycket snabbt framåt under de senaste decennierna. Detta har gäller dels tillverkningsmetodiken för traditionella fibermaterial som glasfibrer och kolfibrer dels utvecklingen av helt nya typer av fibrer som aramid. Resultatet är att det finns ett stort urval av fibrer där egenskaper varierar inom ett stort område.

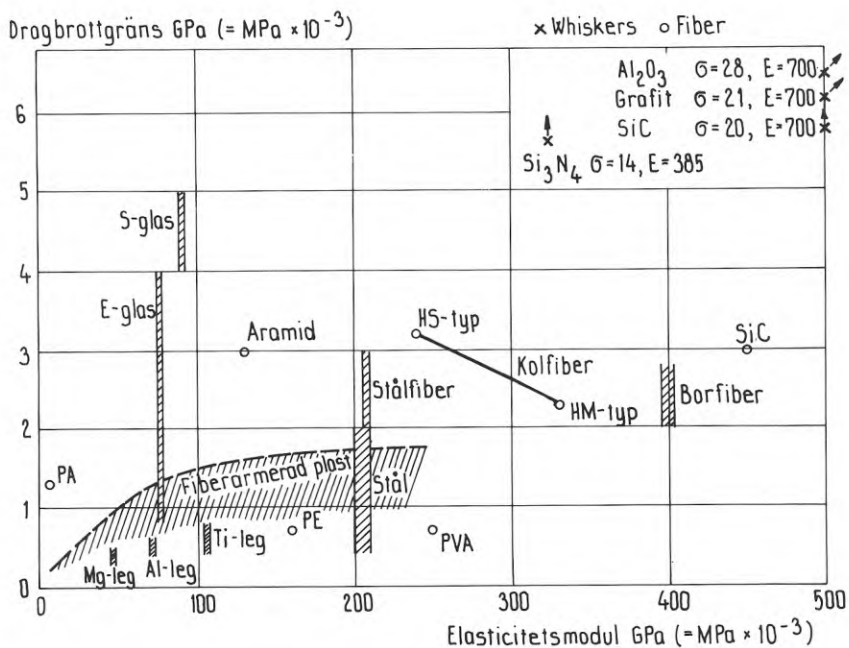
Utvecklingen mot nya och bättre fibrer har till stor del styrts av krav från tillämpningar där höga hållfastheter är önskvärda för att materialåtgången ska kunna minimeras, speciellt flygindustrin. Eftersom dessutom prisbilden har underordnad betydelse i dessa tillämpningar har det funnits goda incitament för utvecklingen. Men detta har också inneburit att fibrer som var bland de bästa för 10 år sedan inte är det längre. Detta avspeglar sig i priset på dessa fibrer som börjar bli rimligt. Detta gör det intressant i tillämpningar där priset ska sättas i relation till andra mer normala konstruktionsmaterial. Dessa tillämpningsområden avspeglar stora delar av den konventionella industrin men kanske speciellt byggnadsindustrin. Inom detta användarsegment finns en potential för användning av fibrer i verkligt stor skala vilket kommer att leda till ännu lägre priser i framtiden.

Inom byggnadsområdet är det för närvarande enbart vissa fibrer som är av primärt intresse. Detta beror i första hand på kostnadsbilden men också på att det inte bara är hållfastheten som är intressant utan också andra egenskaper som elasticitetsmodulen och beständighetsaspekter som behöver vara tillfredställande. Vad som kan anses tillfredställande beror på tillämpningen och därmed de krav som kan ställas.

En stor mängd olika fibermaterial finns tillgängliga på marknaden. I Tabell 4.1 redovisas dessa material översiktligt. För användning i stänger som armering i betong är bara vissa av dessa fibrer intressanta. Begränsningen utgörs främst av att fibrerna ska vara kontinuerliga men också av att hållfasthetsegenskaper som brottpåkänning, brottöjning och elasticitetsmodul ska vara lämpliga. Men även tillgängligheten på den civila marknaden och prisnivån är viktiga faktorer. Därför begränsas den mer detaljerade utvärderingen främst till de fibermaterial som är uppräknade i Tabell 4.2. I Tabell 4.2 redovisas ytterligare materialegenskaper i den mån de finns tillgängliga. Dessutom redovisas data för spännstål som en jämförelse.

Tabell 4.1 Allmänna egenskaper hos fibermaterial.

Material	Fiber-diam $\mu\text{m}$	Dens. $\text{kN/m}^3$	Brottpåk. MPa	E-mod. GPa
Polyamid	10–40	11,7	1300	6,3
Polyester	10–30	14,0	550	0,8
Sisal	25–500	14,5	850	—
Kvarts	9	22,0	1000–4000	71
E-glas	3–24	25,9	1000–4000	75
S-glas	3–20	24,8	4000–5000	90
Cellulosa	—	10,0	300	130
Aramid	12	14,5	3000	130
Asbest	<0,2	25,5	1300–3000	160
Stål wire	5–250	78,0	2000–3000	200
Polyeten	—	9,6	700	160
Polyvinylalkohol	—	10,0	700	250
Kolfiber HS	5–10	17,5	3200	240
Kolfiber HM	5–10	19,5	2300	330
Grafit whisker	—	22,5	21000	700
Bor	100	26,5	2000–3000	400
Kiselkarbid	100	34,0	3000	450
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> whisker	1–10	32,0	14000	385
SiC whisker	1–10	32,0	20000	500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> whisker	1–10	40,0	28000	700



Figur 4.1 Dragbrottgräns och elasticitetsmodul hos några fiber-material.

Tabell 4.2 Sammanställning av materialegenskaper för vissa fibrer som är lämpliga för armeringsanvändning.

Egenskap	Glas E	Ara- mid	Kol HT	Kol HM	Kisel	Poly- ester	Poly- eten	Stål högh.
$\rho$ kN/m <sup>3</sup>	27	14	19	18	22	14	9,7	78
$\sigma_{tu}$ MPa	2500	3200	3400	2300	600	1100	3000	1750
$\epsilon_{tu}$ %	2,5	2,5	1,5	0,6	—	14,5	0,7	>3,5
$E_t$ GPa	70	130	230	360	70	14	172	200
Max anv. temp. °C	300	200	400	400	900	120	100	300
Fiberdiam. $\mu\text{m}$	12–24		12	7	7	10	27	—
Längdvtv. $10^{-6}/\text{K}$ längsrikt	5,4	–2,0	–0,1 –0,5	–0,5 –1,5	—	—	—	9
tvärrikt	5,4	59	—	—	—	—	—	9
Värmekond. W/m/°K	1,0	0,05	17	60	—	—	—	—
Värmekap. kJ/kg/°K	0,8	1,4	0,7	0,7	—	—	—	—

De materialdata som finns publicerade och som är sammanställda i Tabell 4.1 och Tabell 4.2 avspeglar huvudsakligen elastiska materialegenskaper som erhållits vid korttidsprovning. I den mån långtidsprovning har utförts på enbart fibrer så finns detta normalt inte publicerat i offentligt material. Det är rimligt att anta att mycket provning har skett i samband med militära tillämpningar men all sådan information är mycket svårtillgänglig i den mån den över huvud taget går att få fram.

De storleksberoenden och tidsberoenden som alla material uppvisar och som oftast är mycket markant för fibrer med mycket hög hållfasthet finns inte dokumenterad i normala sammanställningar av fiberegenskaper. Detta är beklagligt eftersom detta skulle ha gett en bättre bild av fibrers egenskaper samtidigt som det skulle ha förklarat de stora skillnader som finns mellan olika provningsresultat. Men det bör också poängteras att storleks- och tidsberoendet blir annorlunda då fibrerna befinner i en matris. Normalt sett blir det mindre och det är dessa beroenden som är av praktiskt intresse.

Av de nya materialen är det främst polyeten, under beteckningen Spectra 1000, och polyvinylalkohol som har intressanta egenskaper. Men dessa material finns ännu så länge i utvecklingskedet.

Det är egentligen inte meningsfullt att jämföra enbart fiberegenskaper

med varandra eller med andra material eftersom de inte används för sig själva utan i mindre eller större mängd i en matris. Men angivna värden ger i varje fall en antydning om vad som kan förväntas. Mer detaljerad information om de fibrer som kan vara aktuella som armering i betongkonstruktioner redovisas nedan.

## 4.2 GLASFIBRER

### 4.2.1 Materialsammansättning

Utgångsmaterialet vid tillverkning av glasfibrer är huvudsakligen silikater i form av kiselsand på samma sätt som för vanligt fönsterglas. Men genom att ersätta en del av silikaterna med annat material kan glas ges förändrade egenskaper. I Tabell 4.3 visas de varianter som tillverkas kommersiellt och den ungefärliga sammansättningen.

Tabell 4.3 Sammansättningen hos några vanliga glasfiberalternativ.

Typ	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>
A	72	1	8	3	14	<1			
AR	61	<1	5	<1	14	3		7	10
C	65	4	13	3	8	2	5		
E	54	15	17	5	<1	<1	8		
S	65	25		10					
R	60	25	9	6					

De olika bokstäver som används för att beskriva olika glassorter refererar till användning eller någon speciell egenskap på följande sätt:

A average

AR alkali resistant

C chemical corrosion resistant

E electrical composition

S high strength,

R resistance (fransk utvecklingsprodukt som motsvarar S)

A-glas motsvarar vanligt glas som används för fönsterrutor och annan glastillverkning. De andra glassorterna avspeglar en naturlig utveckling mot olika egenskaper som behövs i olika tillämpningar. Till exempel så innebär det låga NaO innehållet i E-glas speciellt att den elektriska ledningsförmågan blir mycket liten, något som är önskvärt vid elektriska tillämpningar. Dessutom är beständigheten god på grund av tillsatsen av boroxid. För att förbättra hållfasthetsegenskaper används manganoxid.

Det finns uppgifter om att det varit möjligt att höja dragbrotthållfastheten till 5900 MPa samtidigt som elasticitetsmodulen har höjts till 130 GPa. Detta glas kallas med avseende på den relativt höga elasticitetsmodulen M-glas. Förutom de ovan nämnda uppgifterna finns inget mer publicerat om detta material.

Tillverkning av fibrer sker huvudsakligen som E- S- eller R-glas. Fram till helt nyligen fanns inte S-glas eller R-glas på den kommersiella marknaden utan det som producerades användes uteslutande till militära tillämpningar. Detta har förändrats och R-glas finns att köpa. Både S-glas och R-glas är dyrare än E-glas vilket gör att det enbart kan förväntas bli använt i vissa tillämpningar där merkostnaden är motiverad i förhållande till de fördelar som kan uppnås. Detta gäller speciellt S-glas som är en produkt som efterfrågas i militära tillämpningar.

Vid tillverkning av fibrer krävs en mycket noggrann sammansättning och blandning av råvarorna. Efter smältningen rinner glaset ut genom hål i en platinadegel. Trådarna som kommer ut, oftast cirka 2000 stycken, dras ut för att få avsedd diameter, kyls snabbt så att molekylstrukturen som råder i flytande form bibehålls. Genom att styra temperaturen i platinadeglarna och draghastigheten kan önskad fiberdiametern erhållas. Enskilda tråders diameter varierar normalt mellan 3 – 24  $\mu\text{m}$ .

Innan trådarna rullas upp på en trumma beläggs ytan med ett lager av silaner som dels skyddar ytan mot skador dels ger bättre vidhäftning till matriser vid senare användning.

Tillverkningsmetodikerna har vissa likheter med tillverkningen av spännstål där stålet snabbkyls för att atomstrukturen vid hög temperatur ska bibehållas och en efterföljande patinering med någon blyförening för att minska inverkan av defekter.

#### 4.2.2 E-glas

Det först utvecklade glaset för kontinuerliga fibrer var E-glas där beteckningen avspeglar användning inom elområdet som isolering med mera. E-glas har låg alkalihalt och god beständighet mot fukt och kemiska angrepp. Det är det enda fiber materialet för vilken mer omfattande hållfasthetsegenskaper finns tillgängliga.

För ett dragbrott för ett fiberkippe med 2000 fibrer och längden 10 mm gäller för E-glas av kvaliteten 2000 tex och diametern 24  $\mu\text{m}$  följande relation för medelvärde

$$R = 1098 \left[ \frac{L_o}{L_x} \right]^{1/k_1} \left[ \frac{A_o}{\Sigma A_{yz}} \right]^{1/k_a} \left[ \frac{D_o}{D} \right]^{1/h}$$

där  $k_1 \approx 4$ ,  $k_a \approx 7$  och  $h \approx 38$ . Baserat på denna information kan reduk-

tionen i medelbrottlast för ett godtyckligt fiberantal och fiberlängd beräknas.

### 4.2.3 S-glas

Fibrer av S-glas eller R-glas är den efter E-glas mest använda glasfibern. Den har 30% högre dragbrottgräns och 20% högre elasticitetsmodul än E-glas. Dessutom är utmattningsegenskaperna mycket goda. Även andra egenskaper som värmebeständigheten är mycket god.

## 4.3 SYNTETFIBRER

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

Tilverkningsmetodiken som används påminner mycket om den som används för glasfibrer. En lämplig termoplast värms upp till flytande form eller löses upp i något lösningsmedel. Detta 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 kristalliter som medför bra hållfasthetsegenskaper.

### 4.3.1 Aramidfibrer

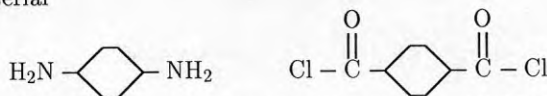
Aramid är ett organiskt fibermaterial baserat på aromatisk polyamid. Materialet utvecklades ursprungligen av DuPont och säljs då under beteckningen Kevlar. Andra tillverkaren i världen är Akzo som valt namnet Twaron och en Japansk tillverkare kallar det Technora.

Kommersiellt tillgängliga fibrer har en diameter på 12  $\mu\text{m}$  och med en hög kristallineringsgrad. Molekylkedjor är sammanhållna och uppstyvade med hjälp av aromatiska ringar som är kopplade med kvävebindningar på det sätt som visas i Figur 4.2.

Den strukturella uppbyggnaden av aramidfibrer medför inte bara bra hållfasthetsegenskaper utan också en hög beständighet i olika kemiska miljöer. Undantagen är för mycket sura eller basiska miljöer. Aramidfibrer kan användas i temperaturer upp till 200 °C utan att hållfasthetsegenskaperna förändras i någon större grad. Fibrerna uppvisar också en mycket god nötningsbeständighet vilket innebär att det inte är direkt nödvändigt att skydda fibrerna. Det mest negativa är en viss känslighet för fuktig luft som reducerar brotthållfastheten.



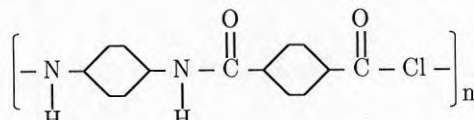
## Utgångsmaterial



Phenylenediamine (PPD)

Terephthaloyldichloride (TDC)

## Kedjor



Figur 4.2 Den strukturella uppbyggnaden av aramidfibrer.

Aramid tillverkas med olika styvheter vilket avspeglar olika nivåer av orienteringen av molekylkedjorna. Ursprungstillverkaren DuPont saluför tre kvaliteter vars egenskaper redovisas i Tabell 4.4. Av störst praktiskt intresse är kvaliteter motsvarande Kevlar 49. Twaron från Akzo liknar denna kvalitet men har en något högre elasticitetsmodul, i storleksordningen 125 – 130 GPa. Technora har egenskaper som ligger mellan Kevlar 29 och Kevlar 49.

Tabell 4.4 Materialegenskaper för aramid (Kevlar).

Namn	E-modul GPa	Brotthållfasthet MPa	Brottöjn %
Kevlar 29	83		4,0
Kevlar 49	131	2800	2,8
Kevlar 149	186		2,0
Twaron HM	125	3000	2,4

## 4.3.2 Polyvinylalkoholfiber

Polyvinylalkohol är ett material som också kan användas för produktion av fibrer som oftast kallas PVAL-fibrer. Publicerad information om denna fiber är mycket begränsad med den information som finns tillgänglig är desto intressantare.

Som framgår av Tabell 4.1 är hållfasthetsegenskaper som brottpåkänning och elasticitetsmodul mycket intressanta. Detta gäller inte minst elasticitetsmodulen som är 250 GPa och brottpåkänningen på 700 MPa. Även andra egenskaper som slaghållfastheten är god.

Då det gäller andra egenskaper som beständighet i olika miljöer finns inget publicerat.

### 4.3.3 Polyetenfibrer

Genom att orientera molekylerna polyeten på ett optimalt sätt erhålls en fiber med mycket goda egenskaper. Fibern framställdes ursprungligen genom ett misstag. Idag sker framställning genom högtrycksextrudering (250 MPa) med efterföljande sträckning till mer än 10 gånger ursprungslängden. Svårigheter med att få god bindning till olika matrismaterial gjorde att intresset för vidareutveckling blev begränsat. Dessa problem tycks dock vara lösta och fibern används för speciella ändamål idag.

Hållfasthetsegenskaperna får anses vara goda. Brottpåkänningen är 700 MPa och elasticitetsmodulen 160 GPa.

Polyetenfibrer har en mycket god kemisk beständighet. Den största begränsningen är att användningstemperaturen är begränsad till 100 °C.

## 4.4 KOLFIBRER

Bindningarna mellan kol och kol kan vara mycket starka. Ett bra exempel på detta är en diamant som har en elasticitetsmodul på cirka 1000 GPa. Beroende på denna förutsättning fanns det anledning att försöka tillverka fibrer med kolatomer i väl strukturerad orientering. Detta lyckades i slutet på 1950-talet med textilmaterialet rayon som utgångsmaterial. Men elasticitetsmodulen var bara 55 GPa vilket är långt från vad som skulle kunna vara möjligt. Andra egenskaper som stor värmetålighet medförde att detta material användes i raketdysor och i värmesköldar.

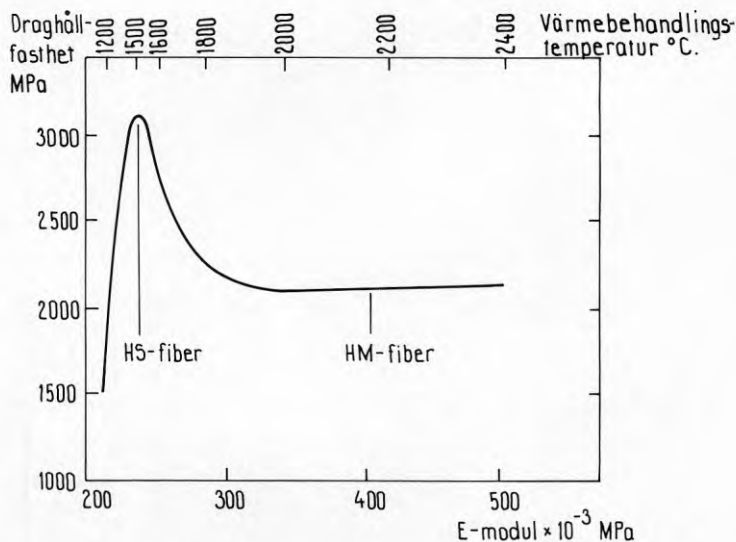
Genom att sträcka fibern under den slutliga värmebehandlingen blev det på mitten på 60-talet möjligt att förbättra egenskaper för rayonbase- rade kolfibrer högst påtagligt. Dragbrotthållfastheter på 2900 MPa och elasticitetsmoduler på 400 GPa blev nu möjliga. Ett stort problem med denna typ av fiber har varit dess oregelbundna tvärsnitt. Detta medför en stor spridning i brotthållfasthetsegenskaperna vilket inte är önskvärt. En del av dessa problem tycks idag vara bemästrade.

Först då kolfibrer började produceras genom pyrolys av akrylnitrilfibrer (PAN) blev det möjligt att höja kvaliteten högst påtagligt. Tillverkningen går i princip till på så sätt att knippen med cirka 1000 PAN fibrer oxideras genom uppvärmning i luft till cirka 220 °C under flera timmar som medför att en stegpolymer bildas. Under denna process hålls fibrerna sträckta så att de inte kan krympa. Fibrer värms därefter upp till cirka 1000 °C under kontrollerad temperaturhöjning i en inert atmosfär. Under denna process avges vatten, cyanväte och syrgas och endast kolkedjor återstår. Värmebehandlingen fortsätter sedan vid temperaturer över 2000 °C som medför att en grafitstruktur skapas. Resultatet är en fiber med cirkulär eller oval form

med en diameter som ligger mellan 6 – 10  $\mu\text{m}$ .

Kolfibrer baserade på PAN metoden kan tillverkas med olika elasticitetsmoduler och brotthållfastheter. Detta åstadkoms genom att styra värmebehandlingen både med avseende på temperatur och varaktighet. I Figur 4.3 visas temperaturens inverkan på elasticitetsmodulen där det framgår att det inte är möjligt att få både extremt hög hållfasthet och elasticitetsmodul samtidigt.

Kolfibrer producerade som PAN fibrer har av naturliga skäl varit dyra att producera. Dessutom har efterfrågan fram till senare år varit större än tillgången. Detta har begränsat användningen till områden där priset är av underordnad betydelse. Av denna anledning har en ny produktionsmetod utvecklats som är baserad på petroleumbaserat beck (PITCH). I mitten på 70-talet började kontinuerliga fibrer baserade på denna metodik att saluföras. Eftersom detta är en enklare tillverkningsmetodik så har detta medfört att prisnivån sjunkit drastiskt. För korta fibrer producerade med PITCH tekniken till en nivå som gör att dessa fibrer kan användas för inbladning i betong, något som förekommer i Japan.



Figur 4.3 Draghållfasthetens och elasticitetsmodulen beroende på härdningstemperaturen för kolfibrer.



# MATRISMATERIAL

## 5.1 ALLMÄNT

Möjligheten att tillverka matrismaterial med goda egenskaper har funnits under relativt lång tid. Med goda egenskaper avses här främst material som har en bra funktion tillsammans med fibrer av något slag. För att en god funktion ska kunna uppnås ska matrismaterialet kunna samverka med fibrerna och kunna omfördela lasten mellan fibrer. Två sådana matrismaterial har funnits på marknaden under lång tid, nämligen materialen polyester och epoxi. Även om dessa matrismaterial oftast bara karakteriseras med sina huvudnamn kan uppbyggnaden varieras kraftigt för att förbättra olika egenskaper som beständighet och motstånd mot brandpåverkan. Den exakta uppbyggnaden av kommersiella matrismaterial redovisas nästan aldrig explicit.

Utöver dessa etablerade matrismaterial finns nyare material som också tycks ha goda egenskaper. Ett sådant material som kanske kan ha ett stort intresse i framtiden är baserat på modifierad akrylat. Detta material har introducerats för att undvika användningen av styren som anses cancerframkallande i större koncentrationer.

Följande matrismaterial finns tillgängliga för att användas tillsammans med fiberkompositer då en god beständighet eftersträvas

Polyester

Epoxi

Modifierad akryl

För dessa material redovisas en sammanställning av allmänna egenskaper i Tabell 5.1. Det framgår klart att tillgången på information om hållfasthetsegenskaper är omvänt proportionell mot hur länge ett material funnits på marknaden. Detta avspeglar att tillverkare av olika matrismaterial inte haft anledning att utvärdera hållfasthetsegenskaper tidigare eftersom ingen efterfrågat dessa egenskaper. Det är till och med så att äldre uppgifter kan vara missvisande. Detta gäller elasticitetsmodulen för polyester och epoxi som ofta anges vara 6,9 GPa. Men data som publicerats av olika tillverkare anger numera att elasticitetsmodulen är 3,3 GPa, det vill säga bara hälften av vad som tidigare angetts.

Information om matrismaterials egenskaper ger en viss möjlighet för jämförelse men det är egenskaperna tillsammans med något fibermaterial

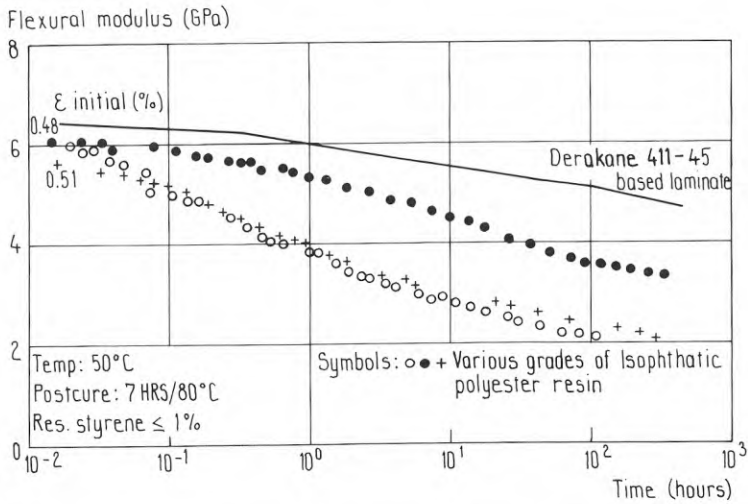
Tabell 5.1 Allmänna egenskaper hos matrismaterial

Egenskap	Iso- polyester	Epxi	Epxivi- nylester <sup>1</sup>	Mod. akrylat <sup>2</sup>
Densitet	—	—	1,12	1,12
$E_t$ GPa	3,3	3,3	3,3	3,2
$\sigma_{tf}$ MPa	62	60	81	62
$\epsilon_{tf}$ %	2,1	—	5	2,6
$E_c$ GPa	—	—	2,4	2,4
$\sigma_{cf}$ MPa	—	—	114	160
$\epsilon_{cf}$ %	—	—	6	6
$E_b$ GPa	3,0	—	3,1	3,1
$\sigma_{bf}$ MPa	—	—	124	124
$\tau_f$ MPa	—	—	—	—
Brottseghet $K_c$ MPa $\sqrt{m}$	0,84	—	1,6	—
Slagseghet kJ/m <sup>2</sup>	—	—	—	16,9
Temp. utv. k. 10 <sup>-6</sup> °K <sup>-1</sup>	—	—	65	65

1 Derakane 411-45 från Dow Chemicals

2 Modar 826 HT från ICI

som är verkligt intressant. De skillnader som redovisas i Tabell 5.1 behöver därför inte medföra samma skillnader i en fiberkomposit.

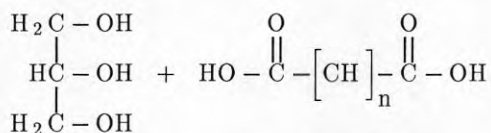


Figur 5.1 Krypprovning av polyester och vinylester.

Långtidsegenskaper utvärderas genom böjprovning av något slag, förmodligen som en enkel tre punkts böjprovning. Från sådana böjprovningar bestäms en effektiv elasticitetsmodul för hela sektionen baserat på elasticitetsteorin. Efter hand som krypning sker och deformationen ökar avspeglas detta i en reducerad elasticitetsmodul. En jämförande provning av detta slag visas i Figur 5.1 mellan olika typer av polyester och epoxivinyleter.

## 5.2 ESTER

Omättad esterplast utvecklades i USA på 1930-talet men det dröjde fram till 1950-talet innan materialet användes i större omfattning tillsammans med fibermaterial. Det lösningsfria omättade esterhartset är en polyester som vanligtvis tillverkas genom en polymerisation av dikarbonsyror och glykoler. Den upprepade enheten i en polyester är således en ester bestående av en syra och en alkohol på det sätt som visas i Figur 5.2.



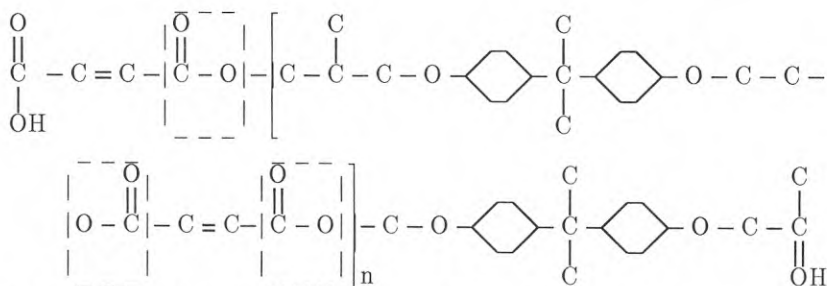
Figur 5.2 Den principiella uppbyggnaden av polyestrar.

Polyester är ett samlingsnamn för en mycket stor familj hårdplaster med mycket olika egenskaper. Ofta klassificeras de efter sin mest karakteristiska beståndsdel. En sådan sammanställning visas i Tabell 5.2 för de vanligaste esterplasterna.

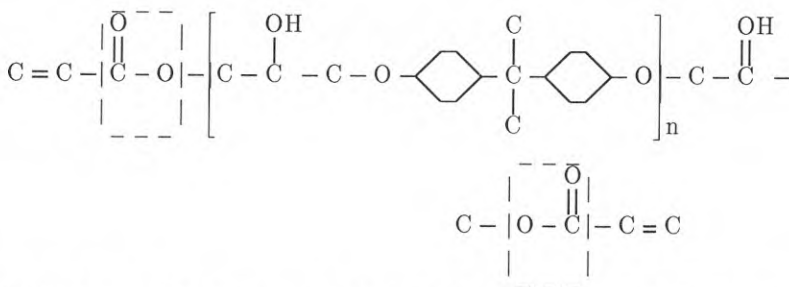
Tabell 5.2 Några vanliga esterplaster och deras användning.

Benämning	Karakteristisk beståndsdel	Beständighet
Orto-polyester	Ortoftalsyre-anhydrid	Begränsad
Iso-polyester	Isoftalsyra	Vissa krav
Vinyl-ester	Vinylpolyester	Höga krav
Bisfenol-polyester	Bisfenol A-polyest.	Höga krav
Hetsyra-polyester	Hexaklormetylen-tetrahydroftalsyra	Ersätter orto-polyester vid högre temp.
Imid-polyester	Polyimidmodifierad	För höga temp.

För användning som matrismaterial i den basiska miljön i betongkonstruktioner används två speciella polyestrar, bisfenolpolyester och epoxi baserad vinylester. För dessa två matrismaterial framgår det av Tabell 5.1 att den epoxibaserade vinylestern genomgående har bättre mekaniska egenskaper än bisfenolestern. För den kemiskt intresserade visas även den speciella kemiska uppbyggnaden för dessa material i Figur 5.3 och Figur 5.4.



Figur 5.3 Den kemiska uppbyggnaden hos bisfenol A polyester. Estergrupper inom streckade boxar är 3-5.



Figur 5.4 Den kemiska uppbyggnaden hos epoxibaserad vinylester. Estergrupper inom streckade boxar är 1-2.

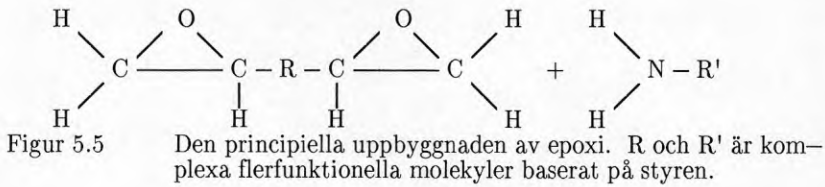
### 5.3 EPOXI

Epoxiplasterna utvecklades under andra världskriget i USA och Europa. Liksom för esterplast är epoxiplast ett samlingsnamn för stor grupp material med liknande egenskaper. Det mest använda epoxihartset tillverkas ur epiklorhydrin och bisfenol A. Bättre formbeständighet i värme kan uppnås om bisfenol A ersätts med bisfenol PA eller resorcin. Önskas hög brandtålighet ersätts bisfenol med tetrabrombisfenol. Epoxihartser kan också tillverkas genom epoxidering av polybutadien och andra polyolefiner till flexibla gummiliknande material.

Variationsmöjligheterna för framställning av epoxihartser är många



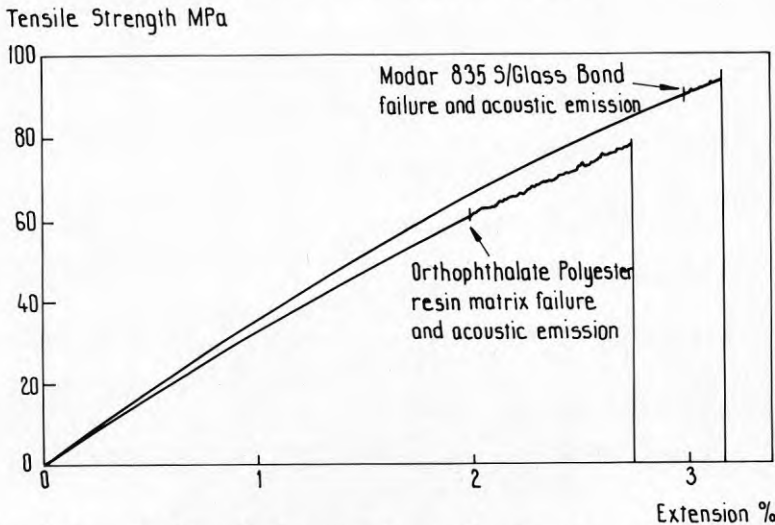
vilket också medför att egenskaper kan styras i den riktning som är önskvärd. Allmänt är uppbyggnaden den som visas i Figur 5.5.



#### 5.4 MODIFIERAT AKRYLAT

Akrylater har funnits under en längre tid men har inte varit direkt intressanta för fiberkompositerna. Det är först då akrylater modifieras som egenskaperna blir lämpliga både med avseende på funktionen som matrismaterial och beständighet.

Erfarenheterna av modifierat akrylat är ännu så länge goda både då det gäller mekaniska och kemiska egenskaper. Ett exempel på förbättringen som kan uppnås visas i Figur 5.6. Men eftersom det är ett nytt material är informationen mycket begränsad liksom de praktiska erfarenheterna och det är svårt att göra några generella omdömen för närvarande.



Figur 5.6 Jämförande dragprovning mellan laminat av ortopolyester och modifierad akrylat.



# ARMERINGSPRODUKTER

## 6.1 ALLMÄNT

Tillverkning av fiberkompositer för praktisk användning som armering i betongkonstruktioner startade på 1980-talet. Primärt var avsikten att få fram ett material med hög beständighet för användning i krävande miljöer. Men möjligheten att erhålla extremt goda hållfasthetsegenskaper insågs redan från början. Extremt goda egenskaper kräver ett lämpligt val av fibrer och matrismaterial men speciellt ett riktigt utförande vid tillverkningen. Tillverkningstekniken är som i alla andra tillämpningar där extremt goda egenskaper eftersträvas mycket viktig. Vid tillverkning av fiberkompositer i form av stänger finns primärt två metoder men som kan modifieras.

Det mest effektiva sättet är ett förfarande som kallas profildragning eller "pulltrusion" vilket innebär att fibrer dras genom ett bad med matrismaterial och därefter genom ett formverktyg där härdningen sker. Detta medför att fibrerna packas nära varandra vilket gör att lastomfördelningen mellan fibrer kan bli optimal. Det negativa med metoden är att en del av töjningskapaciteten hos fibermaterialet går förlorad på grund av att egen-spänningar introduceras över ett tvärsnitt. En annan nackdel är svårigheten att ge ytan på en stång en strävhet som kan vara nödvändig för förankring i betong.

En modifiering till normal profildragning är att fiberkompositen bara härdas delvis eller inte alls vid det första formverktyget. Det senare utförandet kräver att fibrerna hålls samman med fibrer som rullas i spiral runt stången. Resultatet är en stång med lätt varierande diameter som enligt Bayer har kvar hela sin töjningskapacitet. Dessutom kan den variabla diametern vara en fördel ur förankringssynpunkt. Men samtidigt finns risken för en försämrad möjlighet för omfördelning av påkänningar mellan fibrer.

Stänger kan också tillverkas genom gjutning i en form. Detta är en komplicerad men nödvändig metodik om färdiga armeringsnät ska tillverkas. Med detta förfarande kommer fibrer i två riktningar att ligga i stort sett i samma plan vilket gör att ett armeringsnät får samma tjocklek som en stång. Samtidigt kan förankringen klaras av på samma sätt som för vanliga armeringsnät.

Under slutet på 80-talet har en dramatisk förändring skett genom att nya fiberkompositmaterial har utvecklats samtidigt som priset på fibrer har

Tabell 6.1 Kommersiellt tillgänglig fiberkompositarmering.

Armeringsnamn	Typ av fiber	Fibernamn	Matrismaterial	Tillverkare
Arapree	aramid	Twaron	epoxi	Akzo, Holland
Bri-ten	aramid kolfibrer	Kevlar HM-kol	—	Bridon, England
Fibra bar	aramid	Kevlar 49	epoxi	Mitsui, Japan
Jitec	glas aramid kol	E-glas Kevlar 49 HM-kol	polyester vinylest. epoxi	Cousin Frere, Frankrike
Kodiak	glas	E-glas	epoxi	Int.Grating, USA
Parafil	aramid	Kevlar 49	—	ICI, England
Polystal	glas	E-glas	polyester	Bayer, Tyskland
Nefmac	glas kolfibrer	E-glas HM-kol	vinylest.	Nefcom, Japan

sjunkit kraftigt. Detta har medfört att det idag finns flera tillverkare av fiberkompositarmering baserat på olika material. I Tabell 6.1 visas en sammanställning av olika kommersiellt tillgängliga fiberkompositer, vilken typ av fiber och matris som använts av tillverkare. Listan är baserad på lättillgänglig information och det kan finnas fler tillverkare.

De flesta producenterna av fiberkompositarmering för betongkonstruktioner redovisar inte uppgifter om sin armering i den omfattning som skulle varit önskvärd. Detta beror förmodligen primärt på att det är mycket kostbart att utföra provningar i större skala men också på att kunskapen om hur materialegenskaper kan redovisas är begränsad. Ett generellt sätt att beskriva ett materials hållfasthetsgenskaper redovisades kortfattat i Kapitel 3 och mer detaljerat i Bilaga B. Det framgår där att brotthållfastheten hos ett material är relativ och direkt beroende på den effektiva volymen under påkänning och den effektiva varaktigheten på påkänningen. Dessa effekter är väsentliga för material som utsätts för höga påkänningar under lång tid som till exempel spännarmering. För vanlig armering som normalt inte utsätts för några högre påkänningar under lång tid är dessa beroenden av mindre intresse. Men det är inte desto mindre intressant att redovisa dessa beroenden om så är möjligt.

Andra egenskaper som är väsentliga är funktionen vid miljöpåverkan. Detta gäller temperatur och fuktberoenden men inte minst funktionen i en aggressiv miljö. En av anledningarna till att använda fiberkompositer som armering är en bättre beständighet. Men denna beständighet ska vara dokumenterad och helst på ett konkret sätt.

För vanliga konstruktionsmaterial presenteras hållfasthetsdata från någon standardiserad provningsmetod. Sådana metoder finns inte för fiberkompositarmering ännu och det är därför inte alltid uppenbart hur provningar har utförts. Nedan följer information om armeringsmaterial som har blivit tillgänglig på olika sätt.

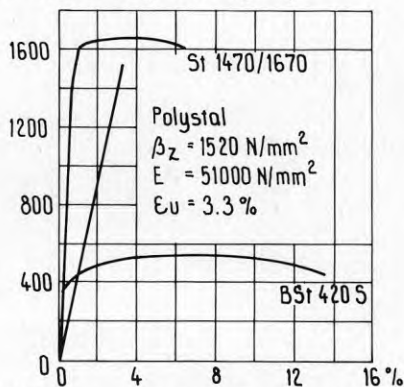
## 6.2 POLYSTAL

Polystal började utvecklas i slutet på 1970-talet genom ett samarbete mellan Bayer AG, Strabag bau AG och tekniska högskolor i Stuttgart (Prof. Rehm), Braunschweig (Prof. Rostacy och Prof. Kordina) och Darmstadt (Prof. König). Polystal är i första hand avsedd för användning som efterspänd spännarmering i broar men används också i andra sammanhang. De första tillämpningarna utfördes 1980 som stagning av en mast och en liten bro med 7 meters spännvidd. Senare har flera andra tillämpningar utförts, speciellt inom broområdet.

### 6.2.1 Materialegenskaper

En normal stång av Polystal tillverkas med en diameter på 7,5 mm och innehåller cirka 60 000 glasfibrer av E-glas. Detta innebär att fiberinnehållet i en stång är 68% och övriga 32% utgörs av mättad polyester. Som skydd mot omgivningen finns en 0,5 mm tjock film av polyamid med hög motståndskraft mot kemisk påverkan som hög alkalitet, salter eller syror men som också utgör ett mekaniskt skydd.

Tillverkningen sker genom att fibrer dras genom ett munstycke utan härdning. Därefter rullas glasfibertrådar kring stången så att den hålls samman senare under härdningen. Denna metodik har enligt Bayer den fördelen att hela töjningskapaciteten hos glasfibrerna finns kvar vilket inte skulle vara fallet vid normal profildragning.



Figur 6.1 Påkännings - töjningssamband för polystal.

Hållfasthetsegenskaperna hos Polystal presenteras ofta på det sätt som visas i Figur 6.1 som medger en jämförelse med normalt armeringsstål och spännstål av kvaliteter som är vanliga inom EG. Korttidsegenskaperna anges som

Medeldraghållfasthet:	$f_u = 1670 \text{ MPa}$
Medelbrottöjning	$\epsilon_u = 3,3 \%$
Elasticitetsmodul	$E = 51 \text{ GPa}$

### 6.2.2 Generella hållfasthetsegenskaper

Omfattande hållfasthetsprovningar har utförts på Polystal. Detta gäller speciellt korttidsprovningar men också långtidsprovning med krypning till brott för olika påkänningsnivåer och relaxationstester för de påkänningsnivåer som är aktuella vid förspända produkter har utförts.

En intressant provserie av korttidsprovningar visas i Tabell 6.2 där provlängden har varierats mellan 50 mm och 5000 mm. Dessutom har olika produktionsrullar av glasfiber använts. Det mest uppenbara är att brottlasten sjunker som funktion av den fria längden på en stång vilket kan förväntas. Men det finns också klara skillnader mellan olika produktionsrullar av glasfiber. Det senare märks tydligast i form av en variationskoefficient som också beror på produktionsrullen.

Storleksberoendet bestäms enklast genom att utnyttja reduktionen av brotthållfastheten som funktion av längden. Detta ger en storleksparametern som kan skattas till cirka 40.

Krypprovningar vid konstant påkänning till brott har utförts och resultatet av detta visas i Figur 6.2. Från detta resultat kan tidsparametern skattas till cirka 47 vilket stämmer bra med andra liknande försök.

Mer generellt kan brotthållfastheten som funktion av längden och varaktigheten skrivas som

$$\sigma_i = 1420 \left( 0 + 1 \left[ \frac{L_0}{L_x} \right]^{1/40} \left[ \frac{D_0}{D_x} \right]^{1/47} \right)$$

där  $L_0 = 0,3 \text{ m}$  och  $D_0 = 1 \text{ timme}$ .

Enbart längseffekten och tidseffekten är inkluderade eftersom bara en dimension används kommersiellt för spännarmering. Referensbrottpåkänningen är här reducerat till 85% av det som gäller vid korttidsprovning eftersom referenstiden är 1 timme.

Den andra brottmoden tycks inte uppstå för de belastningshastigheter som redovisas. Enligt muntlig information uppstår den dock vid mycket snabba belastningshastigheter då tidsberoendet är påtagligt mindre. Den kan också tänkas uppstå vid låga temperaturer.

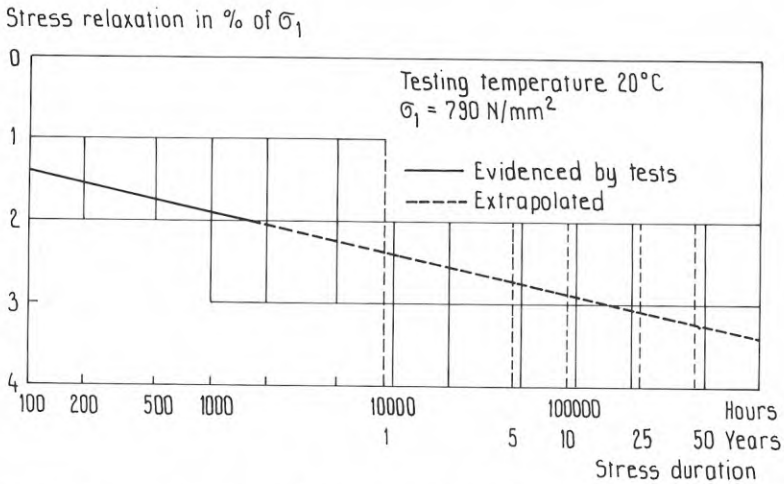
Tabell 6.2 Sammanställning av korttidsprovning av Polystal med olika längder.

Fri längd mm	Rulle nr	Antal	$\sigma_{med}$ MPa	$\sigma/\sigma_{300}$	St.av. MPa	var.cof.
50	30	5	1642	103,6	14,1	0,9
	4778	5	1657	103,8	13,1	0,8
100	8	4	1559	98,2	27,9	1,8
	9	10	1616	100,9	19,6	1,2
300	8	5	1587	100,0	47,2	3,0
	9	10	1602	100,0	8,8	0,6
	30	5	1585	100,0	22,7	1,4
	38	6	1505	100,0	15,3	1,0
	4778	5	1596	100,0	19,3	1,2
500	9	10	1587	99,1	18,6	1,2
700	9	9	1571	98,1	13,8	0,9
800	30	5	1528	96,4	35,4	2,3
900	9	5	1550	96,8	12,8	0,8
1000	4778	5	1533	96,1	17,4	1,1
1100	9	5	1532	95,6	37,7	2,5
1300	9	5	1521	94,9	33,3	2,2
1500	9	5	1563	97,6	16,9	1,1
	30	5	1507	95,1	24,9	1,7
2000	8	5	1504	94,8	60,8	4,0
	38	10	1421	94,4	23,6	1,7
	4778	5	1497	93,8	15,8	1,1
3000	8	5	1511	95,2	36,5	2,4
	30	5	1495	94,3	55,1	3,7
3500	38	5	1425	94,7	39,2	2,8
	4778	5	1478	92,6	33,5	2,3
4000	8	5	1454	91,6	93,1	6,4
5000	30	5	1464	92,4	22,8	1,6
	38	5	1409	93,6	35,7	2,5
	4778	5	1489	93,3	18,0	1,2

För en stång på 10 m som utsätts för en konstant påkänning under 50 år reduceras brottpåkänningen till

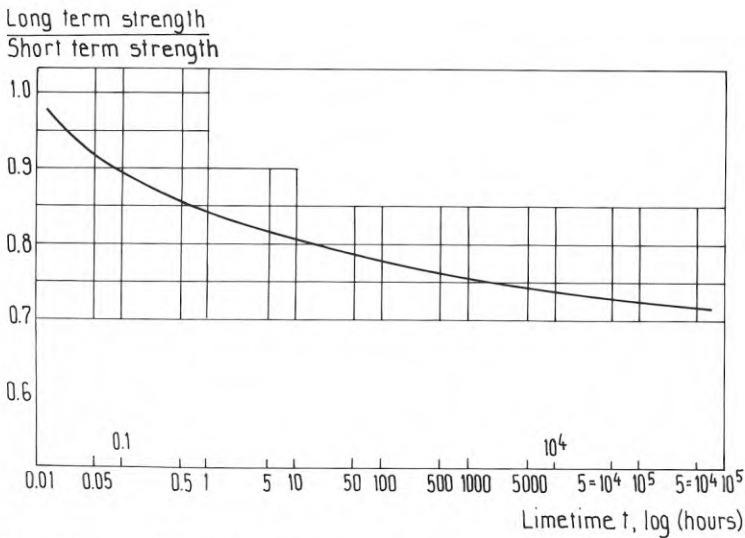
$$\sigma = 1420 \left[ \frac{0,3}{10} \right]^{1/40} \left[ \frac{1}{438000} \right]^{1/47} = 1420 \cdot 0,92 \cdot 0,76 = 992 \text{ MPa}$$

vilket innebär att brottlasten reduceras ungefär till cirka 60 % av brottlasten vid korttidsprovning. I verkligheten är emellertid krypning vid konstant hög belastning mycket ovanlig. I stället är relaxation vid konstant deformation betydligt vanligare. Detta innebär att påkänningen sjunker efter hand som krypning sker vilket i sig reducerar krypningen.



Figur 6.2 Brottkurva för krypning till brott vid olika påkänningsnivåer.

Relaxationen redovisas normalt i form av procentuell förlust av uppspanningskraften på grund av krypning. För Polystal är denna relaxationsförlust relativt liten vilket framgår av Figur 6.3. Men provning har bara gjorts för en begränsad tid, cirka 1000 – 2000 timmar vilket är i minsta laget. En säker bestämning av relaxationen kräver längre tidsintervall. Men det är troligt att relaxationen är liten.

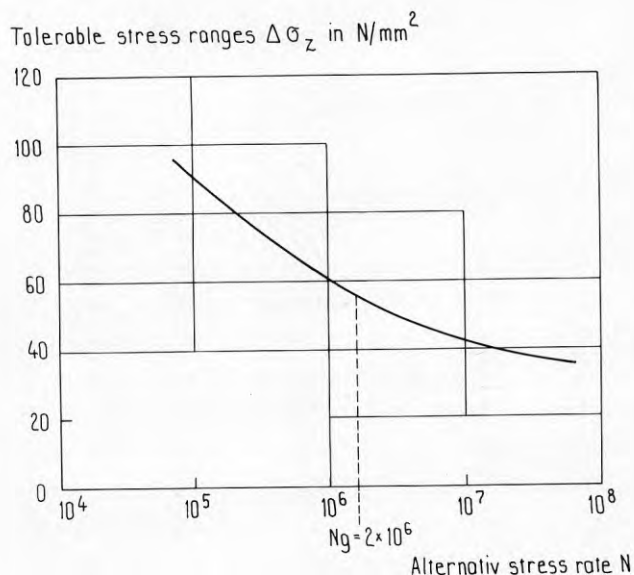


Figur 6.3 Relaxation för Polystal



Vid en uppspanning av efterspända produkter bör både storleksberoendet (längsberoendet) och tidsberoendet beaktas på det sätt som illustreras ovan. Det bör dock beaktas att relaxation i armeringen och krypning och krympning av betongen reducerar verklig påkänning.

Utmattningsegenskaperna hos Polystal har bestämts och redovisas på samma sätt som är vanligt för spännstålsarmering. Detta innebär enbart som funktion av spänningsvidden och inte också som funktion av maximal påkänning. För det resultat som visas i Figur 6.4 har maximal påkänning varit 736 MPa och spänningsvidden har varierats. Vid utmattninglast sänks dimensionerande maximal påkänning till cirka 50% av korttidshållfastheten. Maximal spänningsvidd för att uppnå 2 miljoner cykler med 90%:s sannolikhet är då 55 MPa.

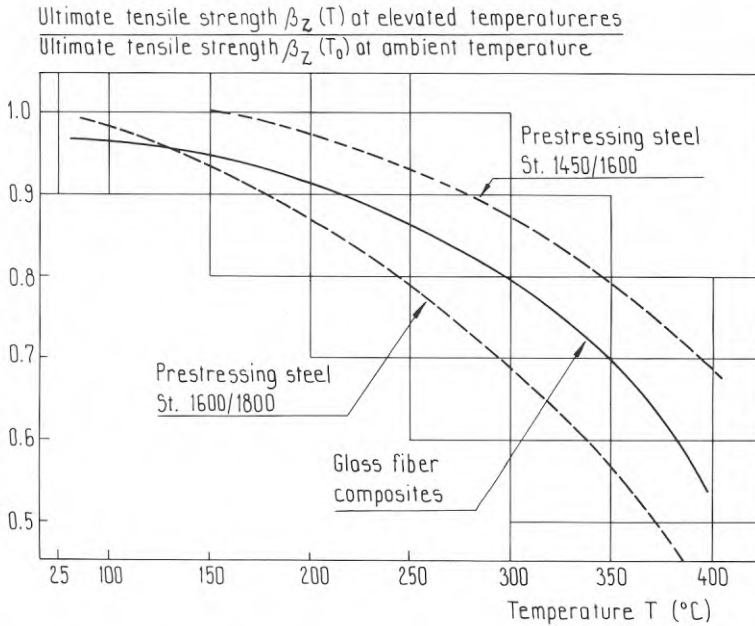


Figur 6.4 Utmattningskurva för Polystal. Maximal påkänning är 736 MPa och spänningsvidden har varierats.

### 6.2.3 Beständighetsegenskaper

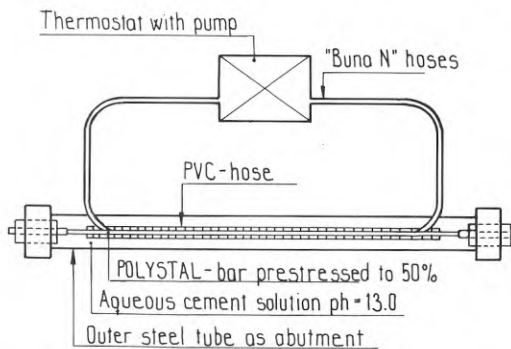
Beständighetsegenskaper som draghållfasthetens temperaturberoende och inverkan av främst kraftigt basisk miljö har provats ingående.

Temperaturberoendet hos brottdraghållfastheten hos Polystal visas i Figur 6.5. Som framgår av resultatet är temperaturberoendet likartat det som gäller för spännarmering av stål. I praktiken kan inte temperaturer som överstiger 200 °C accepteras under någon längre tidsperiod eftersom matricmaterialet påverkas och förlorar sina sammanhållande egenskaper.



Figur 6.5 Brottdraghållfasthetens temperaturberoende.

En god beständighet erhålls genom att en stång omges av en tunn film av polyamid 6 som är ett mycket beständigt material. Denna film utsätts inte direkt för påkänningar även om den töjs ut då den följer med den deformation som en stång får då den deformeras. Detta innebär att någon kombinerad effekt av lastpåverkan och miljöpåverkan inte sker för den del av stången där fibrerna finns. För att dokumentera detta har provningar utförts på det sätt som visas i Figur 6.6. En stång har varit uppspänd till 50% av brottlasten samtidigt som en betonglösning omger stången. För att accelerera provningen har temperaturen ökat till 50 – 70 °C. Provningsarna har pågått i flera år utan att några förändringar har kunnat observeras.



Figur 6.6 Metodiken för utvärdering av miljöpåverkan.

### 6.3 ARAPREE

Arapree började att utvecklas i mitten på 1980-talet gemensamt av kemi-koncernen Akzo och HBG (Hollandsche Beton Groep). Flera universitet, TU Delft, RU Gent och TH Aachen, och forskningsinstitut som Apeldoorn och TNO i Delft har medverkat vid utprovningen. Arapree är i första hand avsedd att användas i förespända konstruktioner. Första tillämpningen utfördes 1988 där en ljudbarriär längs en mototväg utfördes som spännar-merad med Arapree.

#### 6.3.1 Materialegenskaper

Arapree tillverkas både som rund och rektangulär stång med olika dimen-sioner. En stång fylls inte med maximalt möjligt antal aramidfibrer utan fibermängden ligger mellan 35 – 40% av Twaron, Akzo's benämning på sin aramid. Matrismaterialet är i detta fall epoxi. För närvarande finns de dimensioner som anges i Tabell 6.3 att köpa.

Tabell 6.3 Kommersiellt tillgänglig Arapree armering.

Mängd fibrer	Sektion mm	Fiberarea mm <sup>2</sup>	Brottlast kN	Ytegenskaper
f 100 000	d = 5,7	11,1	33,3	sandad yta
f 200 000	d = 7,9	22,2	66,6	sandad yta
f 100 000	1,5 x 20	11,1	33,3	mönstrad yta
f 200 000	2,6 x 20	22,2	66,6	mönstrad yta
f 400 000	5,0 x 20	44,4	133,2	mönstrad yta

Tillverkningen sker genom någon modifierat pulltrusion förfarande där ytan kan behandlas innan härdningen så att önskade egenskaper kan upp-nås. Någon mer detaljerad information om hur detta går till finns inte till-gänglig.

Materialegenskaper anges inte för en stång som helhet utan enbart för fibrerna i en stång oavsett dimension. Dessa egenskaper är:

Medeldraghållfasthet:	$f_u = 3000 \text{ MPa}$
Medelbrottöjning	$\epsilon_u = 2,3 \%$
Elasticitetsmodul	$E = 125 \text{ GPa}$

Eftersom fibermängden bara är mellan 35 – 40 % erhålls för en arme-ringsstång som helhet egenskaper som till stora delar överensstämmer med aramid. Den förbättring som är möjlig med en högre fibertäthet utnyttjas inte, förmodligen av ekonomiska skäl men kanske också av tillverknings-tekniska skäl.

### 6.3.2 Generella hållfasthetsegenskaper

Omfattande hållfasthetsprovning har också utförts på Arapree. Till skillnad mot Polystal finns det däremot inte lika mycket publicerat i fråga om de grundläggande provningar som ägt rum utan bara de slutliga resultaten.

För den storlekseffekt som kan förväntas finns ingenting redovisat. Aramidfibrer har i sig en storlekseffekt i längsriktningen som är lite mindre än vad som gäller för glasfibrer men detta säger ingenting direkt om längsberoendet och tvärsnittsberoendet för Arapree.

För alla normala material är storleksparametern  $k$  lägre än tidsparameter  $h$ . Baserat på de resultat som redovisas nedan för tidsparametern indikerar detta att storleksparametern i längsled är mindre än 42. Ett något osäkert sätt att uppskatta storleksparameter är att utnyttja att karakteristiskt värde motsvarande den undre 5%:s fraktilen som anges till 2800 MPa. Med en antagen normalfördelning, vilket är vanligt i dessa sammanhang, kan en variationskoefficient på cirka 4% uppskattas. Detta motsvarar en storleksparameter i längsriktningen på cirka 32. De skillnader som finns mellan olika dimensioner går inte att bestämma men de kan förväntas att vara små.

Krypning vid konstant last har däremot studerats i detalj. En sammanställning av resultatet från sådana provningar visas i Figur 6.7. Från dessa resultat kan tidsparametern bestämmas till cirka 42. Detta innebär att en generell beskrivning av Araprees brotthållfasthet kan skrivas som

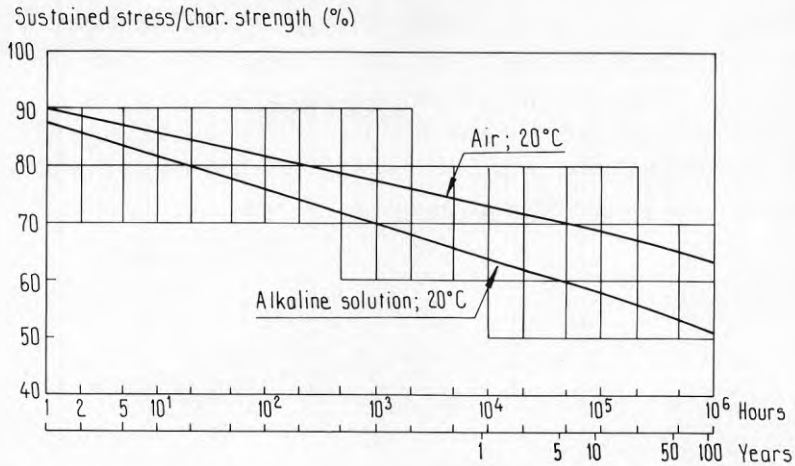
$$\sigma_i = 2500 \left( a + b \left[ \frac{L_0}{L_x} \right]^{1/32} \left[ \frac{A_0}{A_{yz}} \right]^{1/k_{yz}} \left[ \frac{D_0}{D_x} \right]^{1/42} \right)$$

där  $L_0$  är 300 mm och  $D_0$  är 1 timme. Vid de flesta normala belastningssituationer uppstår skjvsprickor mellan fibrer och matris och ett fiberbrott genereras. För denna brottform är  $a = 0$  och  $b = 1$ . Under mycket snabba belastningsförlopp hinner inte detta ske och tidsberoendet reduceras. För denna brottform är  $a \approx 0,3 - 0,5$  och  $b \approx 0,7 - 0,5$ .

För en stång på 10 meter som utsätts för en konstant påkänning under 50 år reduceras brottlasten till

$$\sigma_i = 2500 \left[ \frac{0,3}{10} \right]^{1/32} \left[ \frac{1}{438000} \right]^{1/42} = 2500 \cdot 0,90 \cdot 0,73 = 1644 \text{ MPa}$$

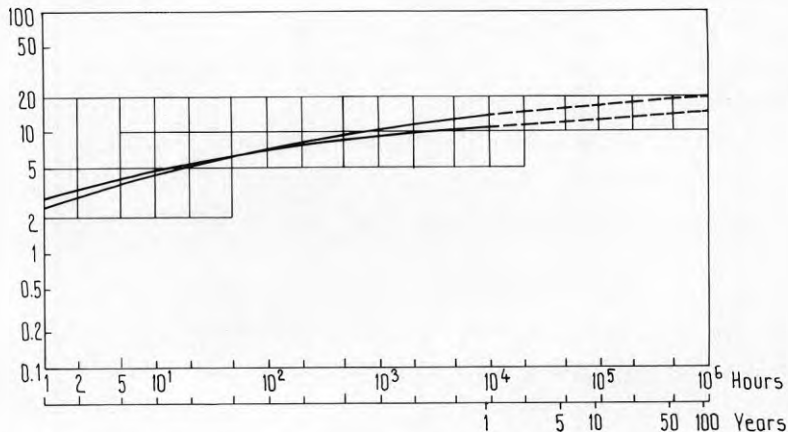
vilket innebär att brottlasten reduceras till cirka 55 % av brottlasten vid korttidsprovning. Även här gäller att krypning under konstant last är relativt ovanligt medan däremot relaxation är intressantare.



Figur 6.7 Krypning vid en konstant påkänning av 50 % av brott-  
påkänningen i luft och i alkalisk miljö.

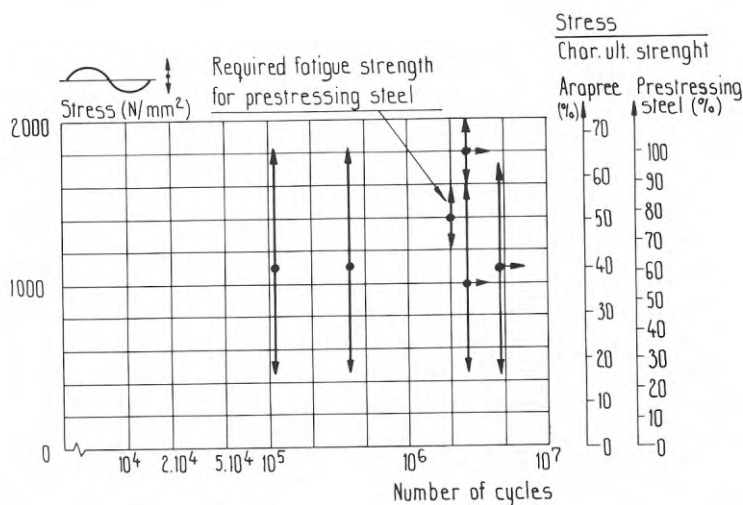
Relaxationen hos Arapree redovisas i Figur 6.8 där den initiella påkänningen förmodligen varit 50 % av brottlasten vid korttidsprovning. Både resultat från provning i luft och i en basisk miljö motsvarande den miljö som råder i betong redovisas. För extrapolationen görs antagandet att primärkrypning efterföljs av sekundärkrypning vid relaxation i luft (rak streckad kurva) medan enbart sekundärkrypning sker vid relaxation i betongmiljö. Detta är långt ifrån säkert och den totala relaxationen i en betongmiljö kan kanske närma sig 25 % efter 100 år. Ett antagande om enbart primärkrypning görs oftast också för spännarmering av stål vilket inte alltid stämmer med verkligheten.

(%)



Figur 6.8 Relaxation för Arapree vid 50 % förspänning i en miljö  
motsvarar 20 °C och 60 % RH i luft (under) och i en basisk  
miljö med pH 13 (överst).

Utmattningsegenskaperna hos Arapree är utomordentliga. En sammanställning av de spänningsvidder som kontrollerats presenteras i Figur 6.9. Vid en jämförelse med spännarmering är utmattningsegenskaperna betydligt bättre. Begränsningen är oftast förankringsbrott som precis som för stål tycks uppstå då den maximala påkänningen överstiger cirka 60 % av maximal dragbrottpåkänning hos armeringen.



Figur 6.9 Utmattningsegenskaper för Arapree.

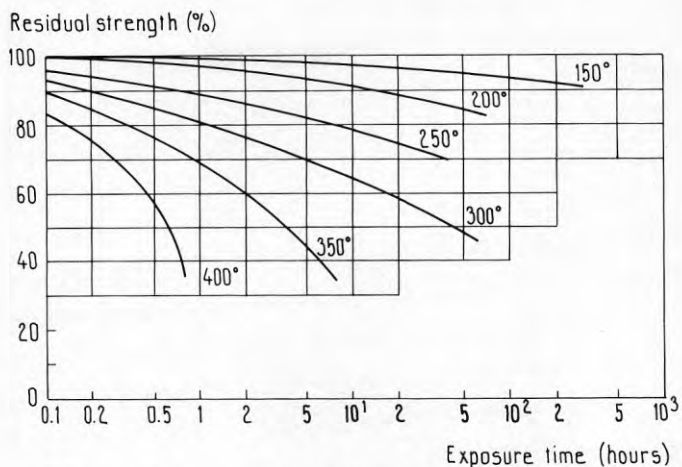
### 6.3.3 Beständighetsegenskaper

Beständighetsegenskaper som inverkan av temperaturen och en kraftigt basisk miljö på brottdraghållfastheten har utvärderats.

Vid förhöjd temperatur kommer brottdraghållfastheten hos arapree fibrerna att avta på det sätt som visas i Figur 6.10. Detta gäller inte för epoximaterialet i matrisen som får markant försämrade egenskaper vid temperaturer över 200 °C. Så även om aramid fibrerna i sig tål relativt höga temperaturer under långa tidsperioder så är 200 °C den praktiska övre gränsen.

Inverkan av en starkt basisk miljö har främst studerats för krypning och vid relaxation. Resultatet från dessa provningar redovisas i Figur 6.7 och Figur 6.8. Från krypning till brott framgår det att detta går fortare i basisk miljö än i luft. Omräknat i brotthållfasthet kan detta uttryckas som

$$\sigma_i = 2500 \left( a + b \left[ \frac{L_0}{L_x} \right]^{1/32} \left[ \frac{A_0}{A_{yz}} \right]^{1/k_{yz}} \left[ \frac{D_0}{D_x} \right]^{1/36} \right)$$



Figur 6.10 Temperaturberoendet hos aramidfibrer.

där det är möjligt att även storleksparametern i längsled blir reducerad. Om detta finns inget redovisat.

## 6.4 NEFMAC

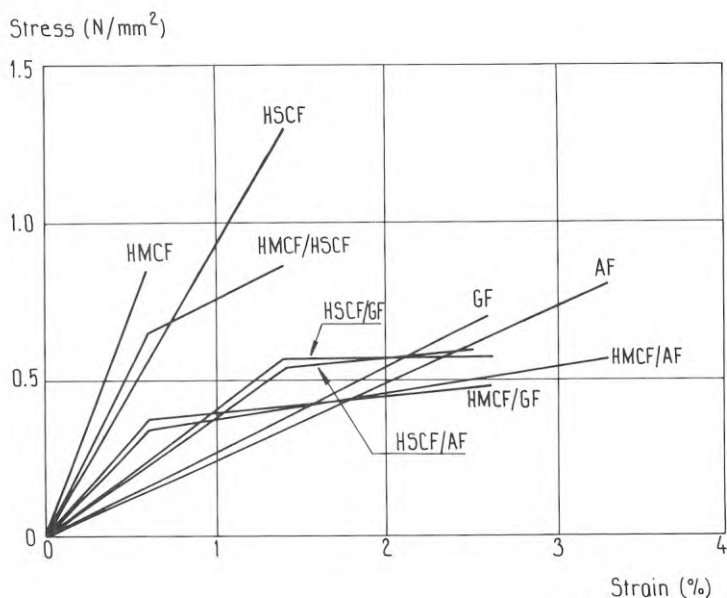
Nefmac är en produkt som utvecklats av Dai Nihonglass Industry Co och Shimizu Construction Co. med hjälp från Tokyo Institute of Technology. Nefmac är i första hand avsedd att användas som slakarmering och tillverkas i armeringsnät och armeringskorgar.

### 6.4.1 Materialegenskaper

Nefmac tillverkas med fibrer av enbart glasfibrer eller kolfibrer eller en kombination. Kommersiellt finns bara glasfibrer och en kombination av glasfibrer och kolfibrer. Normalt är fibermängden 40 % och resterande 60 % utgörs av en vinylester.

Tillverkningen sker på ett speciellt sätt som innebär att det är möjligt att direkt tillverka armeringsnät eller armeringskorgar. Inte ens vid en analys av patenthandlingar för denna metodik är det möjligt att säga hur detta går till i detalj men mycket tyder på att fibrer läggs ut i olika lager i två riktningar i en form. Sedan gjuts dessa fibrer in i en vinylester och får härda vid en relativt hög temperatur. Denna teknik förklarar varför det inte är möjligt med högre fibermängd än cirka 40 %. Men resultatet är att fibrerna ligger i stort sett i samma plan.

Hållfasthetsegenskaperna för Nefmac kan varieras inom ett relativt



Figur 6.11 Påkännings – töjnings samband för armeringsstänger med olika typer och blandningar av fibrer.

stort område vilket framgår av Figur 6.11. Med enbart HM kolfibrer kan elasticitetsmodulen komma upp i över 150 GPa även om en stång bara innehåller 40 % fibrer. En intressant aspekt av att blanda kolfibrer med glasfibrer är att en påkännings – töjningskurva med en "flytplatå" erhålls. I praktiken avspeglar detta att initieellt tar kolfibrer den största påkänningen på grund av en hög elasticitetsmodul men att mängden kolfibrer är sådan att dessa går sönder vid 400 MPa eller 600 MPa och då lasten förs över till glasfibrerna med sin lägre elasticitetsmodul uppstår en ökad töjning utan någon egentlig påkänningsökning.

Kommersiellt finns dock bara de dimensioner och kvaliteter som presenteras i Tabell 6.4. Det innebär att en stång bara innehåller glasfibrer (G) eller en blandning av glasfibrer och kolfibrer (H). Resultatet är en elasticitetsmodul som är enbart omkring 30 GPa för de flesta dimensioner med enbart glasfibrer och 40 – 45 GPa då även kolfibrer finns närvarande. Även brotthållfastheten reduceras till nivåer som överensstämmer med slak-armering av stål.



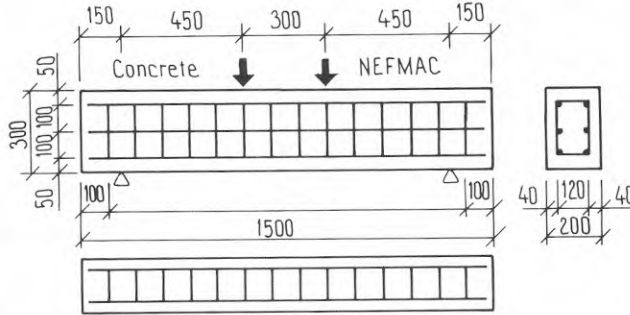
Tabell 6.4 Kommersiellt tillgänglig Nefmac armering.

Typ	Brottlast kN	Brottpåk. MPa	E-modul GPa	Vikt g/m
G 2	2,6	828	41	7
G 4	7,8	620	31	22
G 6	21	743	36	60
G 10	47	598	30	130
G 13	78	588	29	220
G 16	120	597	29	340
G 19	177	624	31	510
G 22	234	616	31	670
H 6	21	742	52	66
H 10	46	586	42	150
H 13	77	580	42	250
H 16	118	587	42	380
H 19	175	617	44	560
H 22	231	608	43	740

#### 6.4.2 Generella hållfasthetsegenskaper

Ingenring finns tillgängligt som gör det möjligt att göra en avancerad beskrivning av Nefmacs materialegenskaper. Detta är inte i heller lika nödvändigt eftersom Nefmac enbart används som slakarmering. Men det är uppenbart att det finns ett storleksberoende och ett tidsberoende. Om fibermängden har varit cirka 40 % för alla de dimensioner som redovisas i Tabell 6.2, vilket inte är helt rimligt för diametrar under 6 mm, så framgår det att brottnlasten sjunker med ökande diameter vilket avspeglar ett storleksberoende i tvärlängd. Då enbart glasfibrer har använts är det möjligt att storleksberoendet i längsled och tidsberoendet är i samma storleksordning som för Polystal.

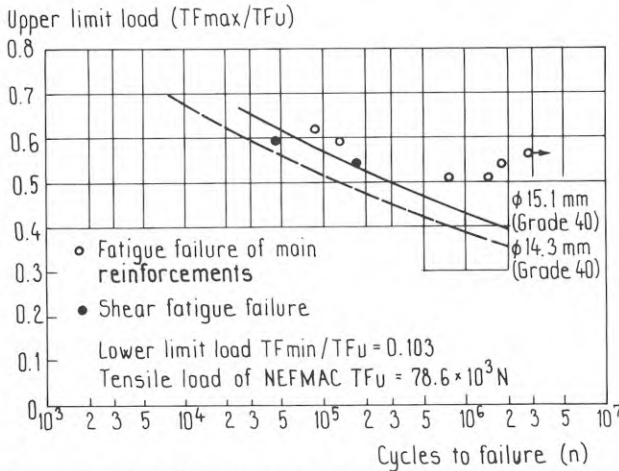
Utmattningshållfastheten har provats på små balkar som har armerats med armeringskorgar som förtillverkats. Materialet har varit en kombination av HS kolfibrer och glasfibrer. Utseendet på armeringskorg och dimensioner på balk framgår av Figur 6.12. Vid utmattningsprovning erhöles både brott i huvudarmeringen och skjuvarmeringen. Men någon större skillnad i antalet cykler till brott mellan de två brottformerna finns inte. Detta innebär att en böjd fiberkompositstång har lika bra utmattningshållfasthet som en rak stång. Detta antyder att även brotthållfastheten vid statisk belastning inte påverkas i någon större omfattning om en stång är böjd.



Properties of NEFMAC

NEFMAC	Fiber	Sectional area (mm <sup>2</sup> )	Vf (%)	Tensile load (N)	Modulus (N/mm <sup>2</sup> )
Main	HSCF/GF	207.1	25.2	$78.6 \times 10^3$	$27.1 \times 10^3$
Stirrup	HSCF/GF	112.2	25.2	—	—

Figur 6.12 Utseende på armeringskorg och dimensioner och belastningsförutsättningar för de balkar som utmattningsprovats.



Figur 6.13 Resultat från utmattningsprovning av Nefmac.

### 6.4.3 Beständighetsegenskaper

Ingenting finns publicerat i form av provningsresultat. Det anges dock att beständigheten är utomordentlig i reklaminformation. Men det är rimligt att anta att provningar utförts för att dessa påståenden ska kunna styrkas. I Japan är det vanligt att upphandling sker för både byggkostnader och underhåll i 10 – 20 år vilket gör det nödvändigt att enbart utprovade material, materialkombinationer och utföranden används. Dessutom är det känt att matrismaterialet vinylester har goda beständighetsegenskaper.

## 6.5 STÅL

Stålarmering har tillverkats under lång tid vilket inneburit att det funnits tid för att utveckla produkten till olika användningsområden. Denna utveckling sker fortfarande och berör både markanta förändringar som förfiningar av produkten.

En markant förändring är att det typiska flytområdet för mjukt kolstål håller på att elimineras för kommersiella produkter genom att stålet kalldras. Resultatet är att  $\sigma_{0.2}$  gränsen höjs med 20 – 25 % jämfört med den gamla flytgränsen. Detta är ekonomiskt attraktivt men innebär också att brotтеgenskaperna en armerad betongbalk förändras. Denna utveckling har kommit långt på kontinenten och kommer snart att förändra situationen i Skandinavien också.

Förfining av tillverkningen sker främst för spännarmering där lågrelexationsstål har introducerats. Men även kvaliteten överlag höjs kontinuerligt vilket märks i en minskad spridning av hållfasthetsegenskaperna.

### 6.5.1 Materialegenskaper

Stål kan tillverkas i en stor mängd olika kvaliteter genom legering och speciell behandling vid produktionen. Det enklaste sättet att påverka hållfastheten är genom mängden kol som tillsätts. Denna metodik används för att påverka hållfastheten för mjukt kolstål. Ytterligare höjning av brott-hållfastheten kräver legering med mangan, vanadin eller andra legeringsmetaller och speciell behandling.

I Tabell 6.5 visas vanligt förekommande stålqualiteter och de krav som gäller enligt de SS normer som finns.

Tabell 6.5 Kommersiellt vanliga stålqualiteter.

Typ	Diameter mm	$\sigma_u ; \sigma_{0.2}$ MPa	$\sigma_b$ MPa	E-modul GPa
Ks 40	6 – 16	390		200
	16 – 25	370		200
	25 – 32	350		200
Ks 60	6 – 16	590		200
Spännlina	6,4	1550	1820	200
	7,9	1570	1840	200
	9,3	1520	1790	200
	10,9	1500	1760	200
	12,5	1490	1750	200
	15,2	1390	1640	200

### 6.5.2 Generella hållfasthetsegenskaper

Kunskapen om ståls egenskaper är mycket stor. Men mycket av denna

information är inte tillgänglig eftersom provningsresultat inte redovisas offentligt.

Då det gäller storleksberoendet för vanligt mjukt kolstål kan effekten av ökad diameter dokumenteras från provningar som utförts. Ett sådant resultat redovisas i Tabell 6.6. Om alla resultat räknas om till samma ekvivalenta kolhalt kommer reduktionen i flytpåkänning och brottpåkänning att framstå mycket klart. Baserat på brottpåkänningens förändring med diameter kan detta storleksberoende karakteriseras med en storleksparameter  $k_{yz} \approx 30$ . Under förutsättning att variationskoefficienten avspeglar ett storleksberoende i längsled kan detta karakteriseras med en storleksparameter som är i samma storleksordning. Tidsparametern tycks däremot inte finnas dokumenterad men den bör vara större än 40.

Tabell 6.6 Testdata för armeringsstål motsvarande K 40.

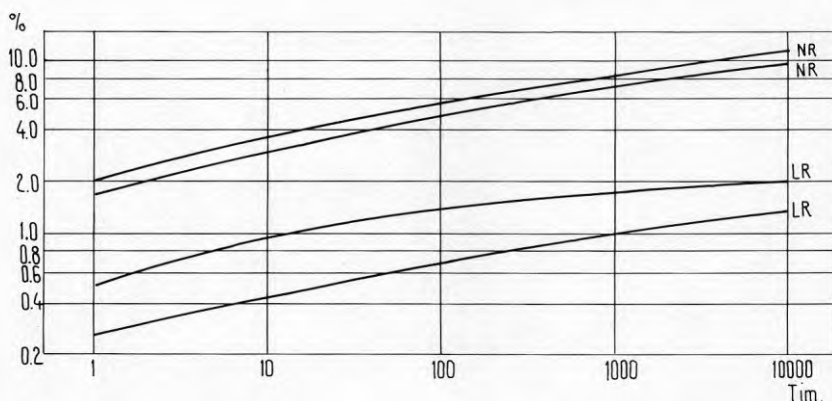
Typ mm	Prov storl.	$\sigma_u$ med MPa	std MPa	$\sigma_b$ med MPa	std MPa	Töjn. %	C %
8	116	505	22,2	630	20,5	31,6	0,16
10	232	501	20,7	620	21,9	30,8	0,17
12	616	497	21,7	613	22,9	29,9	0,17
16	448	487	19,1	610	19,5	28,0	0,17
20	248	489	21,2	612	21,6	26,3	0,18
25	180	470	21,0	596	21,7	23,6	0,17
32	88	464	20,3	594	22,4	22,1	0,18

Tröskelvärdet under vilket ingen skadeackumulering sker ligger på 150 200 MPa och verkar vara oberoende eller möjligen svagt beroende på brotthållfastheten.

Spännarmering tillverkas med hög kvalitetsstyrning. Detta innebär att spridningen i hållfasthet blir mindre än för vanligt kolstål. Resultat som visar detta finns i Tabell 6.7 för material från samma charge. Den fria provlängden för spännarmering är 1200 mm och mätlängden 600 mm. Baserat på brottpåkänningen kan en variationskoefficient på 1 % bestämmas. Om detta avspeglar ett storleksberoende i längsled så kan en storleksparameter bestämmas till  $k_x = 125$ . Om detta är den riktiga storleksparametern i längsled så är denna storlekseffekt liten. Tidsberoendet vid krypning under konstant påkänning för spännarmering har inte kunnat gå att få tag i eftersom det inte är av primärt intresse. Däremot finns relaxationsprovning som varit av mer direkt intresse. Sådana resultat visas i Figur 6.14 för normal tråd och lina och för lågrelaxationsstål.

Tabell 6.7 Testdata för spännlina o 6,3.

Ring	$\sigma_u$ MPa	$\sigma$ 1% $\epsilon$ MPa	$\epsilon_u$ %	E-modul GPa
285	42,6	38,1	5,8	199
286	41,6	37,4	5,8	199
287	42,0	37,6	5,3	199
288	41,8	37,1	5,8	199
289	41,9	36,7	5,3	199
290	42,4	37,6	5,3	199
291	41,7	37,4	4,6	199
292	42,4	37,7	5,8	199
293	41,7	37,5	5,8	199
294	41,2	37,0	4,8	199



Figur 6.14 Relaxationsdata för spänntråd och spännlina.

För en lågrelaxationstråd eller lina har en så kallad åldring av materialet skett. Detta innebär att en lina sträcks upp samtidigt som temperaturen höjs. Detta reducerar egenspanningarna över ett tvärsnitt och medför att speciellt primärkrypningen blir avsevärt mindre.

Typiskt för stål är att relaxation bara mäts under en relativt kort tid, oftast 1000 timmar. Under denna tidsperiod dominerar primärkrypningen och det är mycket svårt att säga något om den verkliga relaxationen under längre tidsperioder.

### 6.5.3 Beständighetsegenskaper

Stål är ett förädlad material som strävar efter att återgå till en kemiskt mer stabil förening, oftast en järnoxid. Detta innebär att stål behöver skyddas så att denna process inte uppstår för tidigt. En låg fukthalt i omgivningen till stål är normalt den bästa åtgärden för att korrosion inte ska uppstå.

Även den starkt basiska miljön i betong utgör normalt ett utomordentligt skydd mot korrosion. Men nedbrytning av stål kan ske kemiskt på många sätt. Mest påtagligt för armering är kloridjonsinducerad korrosion. Men även andra former av korrosion förekommer.

Möjliga sätt att skydda stålarmring är antingen att galvanisera den eller att omsluta den med ett yttre skydd av till exempel epoxi. Detta fördyrar armeringen men är en möjlig lösning.

För spännarmering finns också andra former av nedbrytningsprocesser. Detta beror till stor del på det effektiva utnyttjandet som medger att andra negativa förändringar lättare kan ske.

## PRAKTISKA ERFARENHETER

### 7.1 ALLMÄNT

Utvecklingen av armering baserad på fiberkompositer för användning i betong startade i slutet på 1950-talet i USA. Ursprungligen utfördes detta mest för att undersöka hur armering med fiberkompositer fungerar praktiskt och konstruktivt. Erfarenheterna var initieilt inte goda på grund av att det var svårt att åstadkomma bra förankring av fiberkompositarmering i betong. Men utvecklingen fortsatte i liten skala, främst på universitet men också inom militära utvecklingscentra. Vid alla dessa försök användes glasfibrer vilket var den enda fibertypen som initieilt fanns tillgänglig. Efter hand som förankringsproblematiken löstes blev erfarenherna i allmänhet bättre, speciellt då glasfiberkompositarmering används som spännarmering. Vid användning som slakarmering fick den låga elasticitetsmodulen för glasfibrer jämfört med stål ett påtagligt inflytande. Men även om detta innebär en kraftig begränsning för användningen så ansågs glasfibrer vara ett intressant alternativ för framtiden.

Det är först på 1980-talet som det skett en dramatisk förändring av utvecklingen av fiberkompositer. Förutom glasfiber har aramidfibrer och kolfibrer börjat användas och olika förankringssystem har utvecklats. Detta har medfört att det har börjat och bli kommersiellt intressant att tillverka armering baserat på fiberkompositer. Två sådana utvecklingslinjer kan urskiljas, användning i före- eller efterspända konstruktioner och användning i slakarmerade konstruktioner.

Vid användning av fiberkompositarmering i före- eller efterspända konstruktioner är elasticitetsmodulen hos spännarmeringen inte av primärt intresse. En lägre elasticitetsmodul än för stål kan till och med vara gynnsamt. Detta gör att glasfibrer är ett möjligt alternativ.

Vid användning av fiberkompositer i slakarmerade konstruktioner som huvudarmering har elasticitetsmodulen stor betydelse. I princip bör E-modulen vara så hög som möjligt eftersom detta förbättrar funktionen. För att åstadkomma detta med tillgängliga fibermaterial är kolfibrer det enda alternativet.

I Tabell 7.1 redovisas materialdata som olika tillverkare har presenterat om sina armeringsmaterial med avseende på brotthållfasthet, elasticitetsmodul och förankringssystem. Eftersom det inte finns några standardiserade provningsmetoder är hållfasthetsvärden inte direkt jämförbara.

Tabell 7.1 Kommersiellt tillgänglig fiberkompositarmering.

Armerings- namn	Brottlast MPa	Brottöjn. %	E-modul GPa	Förankring
Arapree	2800	2,2	125	präglad yta sandad yta
Bri-ten	2800	2,2	125	Fiberarea
Fibra bar	2800	2,2	125	präglad yta
Parafil	2800	2,2	125	ändankare
Polystal	1670	3,3	51	ändankare
Nefmac glas	615 – 828	3,0	31 – 41	nätarmering
Nefmac hyb	600 – 743		43 – 52	

Erfarenheter från användningen av fiberkompositar i olika konstruktioner är ännu så länge begränsad. Det är huvudsakligen Polystal och Nefmac som använts i större skala

## 7.2 POLYSTAL

### 7.2.1 Förankring

Polystal är avsedd att användas i efterspända konstruktioner. Det är därför viktigt att ändankare som används har sådana egenskaper att lasten kan föras över till en mothållsplatta på ett säkert sätt. Detta gäller inte bara vid uppspänningen utan även under konstruktionens användningstid. Detta gäller speciellt för friliggande armering men förmodligen också till en viss del för armering som ligger i rör som efterinjekterats. Den glatta yta som polyamidbeläggningen utgör kan knappast överföra hela förankringskraften.

Utvecklingen av ett lämpligt förankringssystem har tagit lång tid. Flera olika förankringssystem har provats både för primärt statisk last och de bästa också för dynamisk last. Det slutligt valda systemet, vars utformning inte är känd i detalj, innebär att ett antal kablar gjuts in i en stålhylsa med ett lämpligt injekteringsbruk. För att detta ska fungera behöver stålhylsans innerväggar vara koniska och tillräckligt långa, kablarna spridas ut i detta koniska utrymme och injekteringsbruket ha lämpliga egenskaper. Lämpliga egenskaper gäller både korttidsegenskaper och långtidsegenskaper. Vid uppspänningen behöver spänningskoncentrationer undvikas vilket innebär att det ska vara en snabb responsförändring från den initiala elastiska responsen till en viskös respons som jämnar ut påkänningarna. Men den viskösa responsen som avspeglas i sekundärkrypning får inte vara stor



senare vid användningen. Det behöver alltså skapas ett tredimensionellt påkänningsstillstånd som höjer tröskelvärdet över vilket sekundärkrypning sker. Enligt uppgift används något epoximaterial med sandinblandning.

Det är uppenbarligen inte lätt att tillverka en förankring av det slag som beskrivits i förenklade termer ovan. Liknande försök i USA har inte varit lika framgångsrika. Förankringsbrott har då skett innan armeringsstänger gått sönder även om detta skett vid påkänningsnivåer som är nära förväntade brottpåkänningar för armeringen.

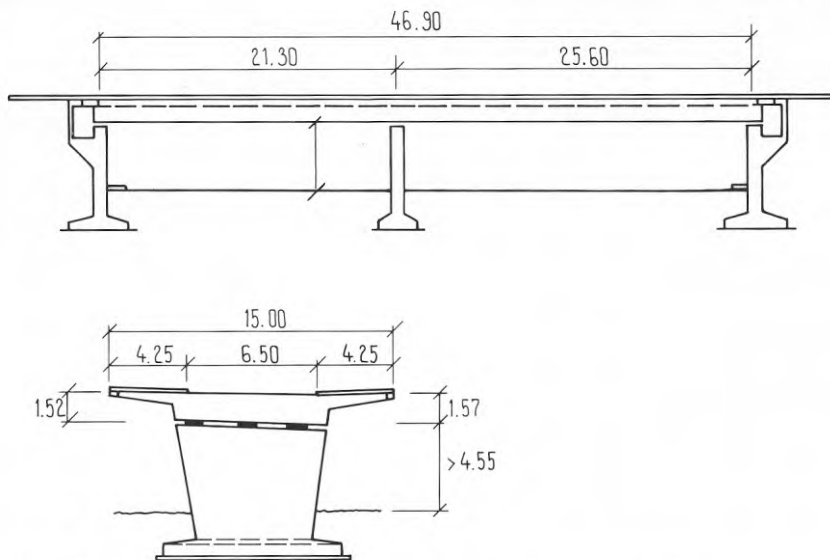
Den yttre delen av en förankring har stora likheter med det som gäller för konventionell efterspänd armering. Den största skillnaden är att en förankringshylsa för Polystal är längre.

### 7.2.2 Praktiska erfarenheter

Den första praktiska tillämpningen av Polystal utfördes på en liten parkbro med 7 meters spännvidd i Dusseldorf 1980. Detta var ett typiskt provobjekt och bron försågs med 12 kablar som inte spändes upp till full möjlig förspänning. Detta berodde på att bra ändankare ännu inte var färdigutvecklade och att de som användes då inte kunde belastas alltför mycket (jmf amerikanska erfarenheter). Ingen efterinjektering utfördes därför att kablarna skulle tas ut fem år senare för en analys. Vid denna analys upptäcktes inga oväntade förändringar. De gamla kablarna ersattes med nya där den nuvarande typen av ändankare användes.

Vid en annan tillämpning från 1980 användes kablarna för att stabilisera en antennmast. Den främsta anledningen till materialvalet var Polystals icke magnetiska egenskaper. I denna tillämpning kommer kablar och ändankare bara att utsättas för höga påkänningar i samband med höga vindhastigheter och några speciella problem kan inte förväntas.

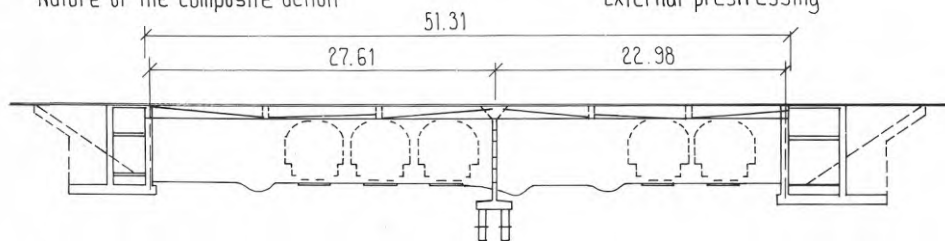
Efter utvecklingen av bra ändankare för spännkablarna och de positiva erfarenheter som erhållits från undersökningen av spännkablarna i den lilla bron som beskrivits ovan startade projekteringen av en bilbro för den högsta broklassen (60/30), Ulenberg Strasse bron i Dusseldorf. Denna bro färdigställdes 1986 och tekniska data kring denna bro framgår av Figur 7.1. Bron är uppspänd med 59 kablar som vardera innehåller 19 stänger. Varje kabel är uppspänd med 600 kN viket innebär att varje stång utsätts för en påkänning av 715 MPa. Denna bro innehåller också två olika mätsystem som gör det möjligt att kontinuerligt följa eventuella förändringar i förspänningen. Ett av systemen utnyttjar glasfibrer i kablarna genom att laserljus sänds genom en tråd. Vid förändringar av töjningen ändras reflektionen och därmed mängden ljus som kommer igenom.



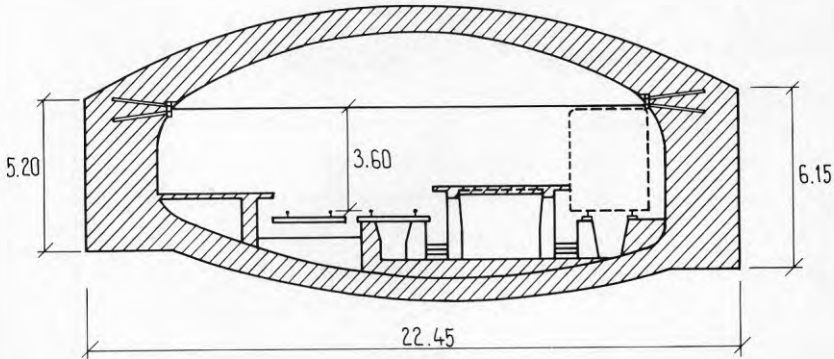
Figur 7.1 Tekniska specifikationer för Ulenberg Strasse bron.

En annan intressant tillämpning är Marienfelde bron i ett rekreationsområde i Berlin som utfördes 1988. Bron har utförts som en TT-kassett med helt friliggande armering i två fack vilket visas i Figur 7.2. I detta fall har 7 kablar använts som också i detta fall har spänts upp till 600 kN vardera. Detta utförande är mycket intressant ur flera synpunkter: externt liggande spännarmering medför lägre utförandekostnader, kablar kan lätt bytas ut vid behov och detta är en metodik som kan användas vid förstärkning av existerande broar under vissa förutsättningar. Även denna bro innehåller optisk mätutrustning som gör att den kan övervakas kontinuerligt. Vid en lasttest till dubbla dimensioneringslasten kunde detta registreras direkt i denna mätutrustning.

Spans	L1:L2 = 27.63:22.95 m
Width of TT-beam	5.00 m
Thickness of TT-beam	1.10 m
Clear height	4.95 m
Degree of prestressing	Partiel
Nature of the composite action	External prestressing

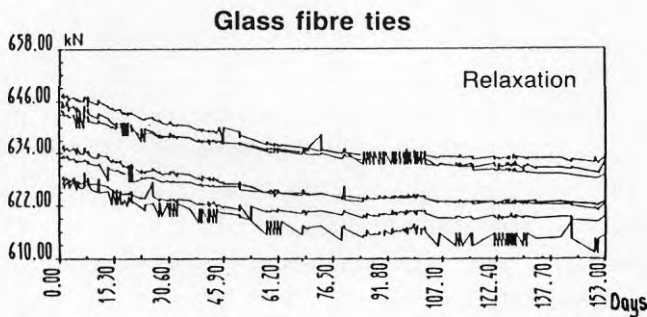


Figur 7.2 Tvärsnitt av bron



Figur 7.3 Metrostationen Mairi D'Ivry med förstärkningsstag.

En annan intressant tillämpning är förstärkningen av en tunnelbanestation, Mairi D'Ivry, i Paris 1989. På grund av sättningar höll taket på att rasa in i den murade konstruktionen från slutet på 1930-talet. Genom att sätta in dragstag på det sätt som visas i Figur 7.3 kunde detta undvikas. Totalt användes 38 kablar som i detta fall spändes upp till 650 kN vardera. Förutom dessa 38 kablar användes också 3 stycken kabelenheter av Arapree som jämförelse. För att en jämförelse skulle kunna ske försågs 7 stycken Polystal enheter och 3 Arapree enheter med trådtöjningsgivare för registrering av relaxationen men också påkänningsvariationer på grund av tunnelbanetågens rörelser. Resultatet för Polystal visas i Figur 7.4.



Figur 7.4 Relaxationsmätning från tunnelbanestationen Mairi D'Ivry.

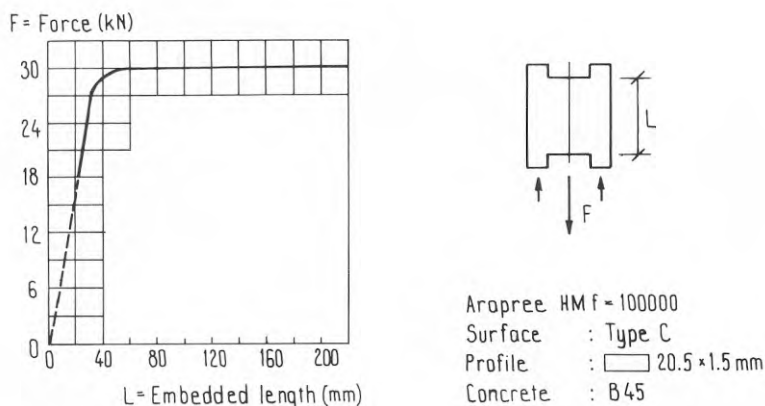
Sammanfattningsvis så tycks erfarenheterna genomgående vara goda än så länge. Av ändförankringarna finns 6 års erfarenhet baserad på kontinuerlig mätning av eventuella töjningar och dessa mätningar ger möjlighet för uppföljning i framtiden.

### 7.3 ARAPREE

#### 7.3.1 Förankring

Arapree är avsedd att primärt användas i förespända konstruktioner men det går också att använda i efterspända konstruktioner. Detta innebär två olika krav på ändförankringar.

Vid förespända konstruktioner ska ändankare kunna överföra aktuell last under uppspänningen och helst också kunna återanvändas. För arapree har detta lösts med speciella ändankare där nylonhylsor överför påkänningar från armeringen till en yttre hållare av stål. Samma metodik används för både platt och rund armering. Armeringens förankringsegenskaper erhålls genom profilering för den platta armeringen och en sandbegrädd yta för den runda armeringen. Förankringssträckor för att ta upp armeringens möjliga brottpåkänning visas i Figur 7.5. För den platta armeringen innebär den exceptionellt goda förankringsförmågan att stora dragkrafter uppstår vinkelrätt armeringsriktningen.

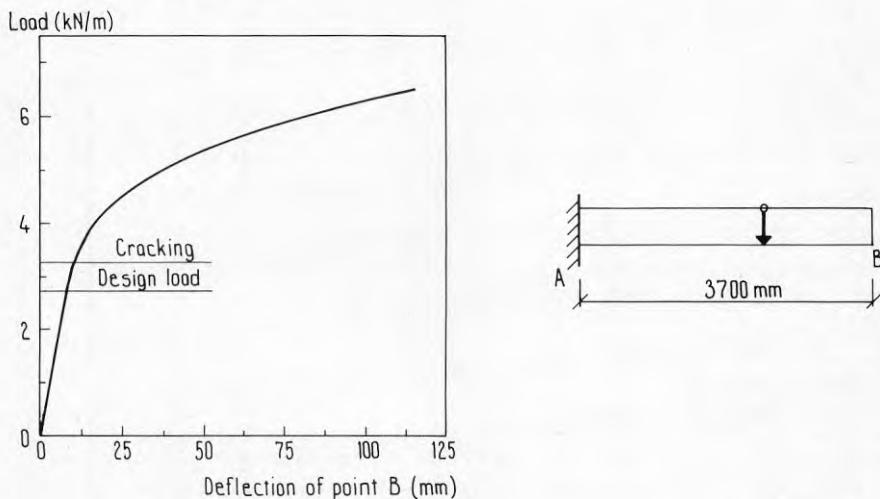


Figur 7.5 Förankringssträckor för arapree armering

Vid efterspända konstruktioner är det viktigt att ändankare som används har sådana egenskaper att lasten kan föras över till en mothållsplatta på ett säkert sätt. Detta gäller inte bara vid uppspänningen utan även under konstruktionens användningstid. Detta är mest markant för friliggande armering men inte lika påtagligt för armering som ligger i rör som efterinjekterats eftersom arapree armering har mycket goda förankringsegenskaper. Det finns speciella ändankare utvecklade för användning i efterspända konstruktioner. Hur dessa ser ut finns inte redovisat men de bör ha stora likheter med det som tagits fram för Polystal. Förmodligen är erfarenheterna för dessa ändankare fortfarande begränsade.

### 7.3.2 Tillämpningar

Arapree har bara funnits på marknaden i några få år och det finns därför inte så många kommersiella tillämpningar. Däremot har Arapree provats i laboriemiljö för olika typer av betongelement. Ett intressant sådant exempel är balkongplattor. Resultatet från en provning av ett sådant element visas i Figur 7.6



Figur 7.6 Momentkapacitet — deformationskurva för ett belastat balkongelement.

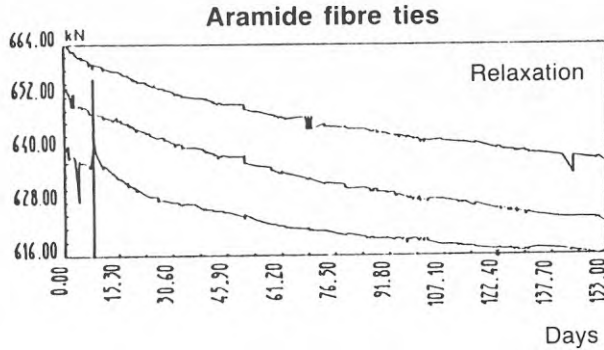
Första gången Arapree användes i kommersiella sammanhang var i en ljudbarriär för Rijkwaterstaat nära Rotterdam under 1988. Ingen mer konkret information om detta projekt finns tillgänglig.

Det andra projektet var i samband med ett framtidshus i en utställning, Autotron vid Rosmalen, 1989. I denna tillämpning blev betongelement förspända med Arapree och spännarmerade tegelbalkar.

Ytterligare ett projekt som utfördes 1989 är vattentrappor för fisk där Arapree användes för att det skulle vara möjligt att minska täcksikten och därmed vikten på elementen.

Den första mer spektakulära tillämpningen var som efterspänd armering vid förstärkningen av tunnelbanestationen Mairi D'Ivry. Visserligen är bara ett fåtal av stagen utförda med Arapree men det är ett intressant demonstrationsprojekt. Relaxationen för Arapree har också registrerats och visas i Figur 7.7. Vid en jämförelse med Polystal så är det uppenbart att relaxationen är betydligt mer påtaglig.

Ett japanskt företag har köpt in en stor mängd Arapree armering som



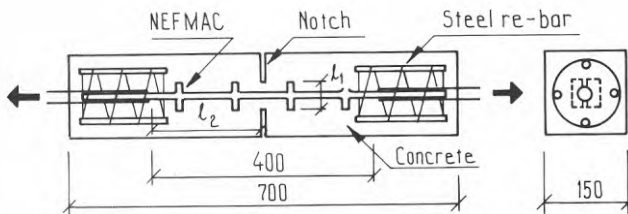
Figur 7.7 Relaxation för Arapree i tunnelbanestationen Mairi D'Ivry.

sedan använts för att spänna samman brobaneplattan i en hängbro. Ingen detaljerad information finns tillgänglig eftersom Akzo inte medverkat.

## 7.4 NEFMAC

### 7.4.1 Förangringsegenskaper

Nefmac är enbart avsedd att användas i slakarmerade konstruktioner. Detta innebär att kraven på förankring inte är lika extrema som för spännarmering. Dessutom har tillverkarna av Nefmac valt att inte ge materialet speciellt höga brottpåkänningar.



Parameters of specimens

Specimen	$l_1$ (mm)	$l_2$ (mm)
T1 - 1.2	30	200
T2 - 1.2	50	200
T3 - 1.2	70	200

Properties of NEFMAC

Fiber	Sectional area (mm <sup>2</sup> )	$V_f$ (%)	Tensile load (N)	Modulus (N/mm <sup>2</sup> )
HSCF	84.1	42.2	$49.9 \times 10^3$	$39.6 \times 10^3$

Figur 7.8 Förankringsprovning av Nefmac.

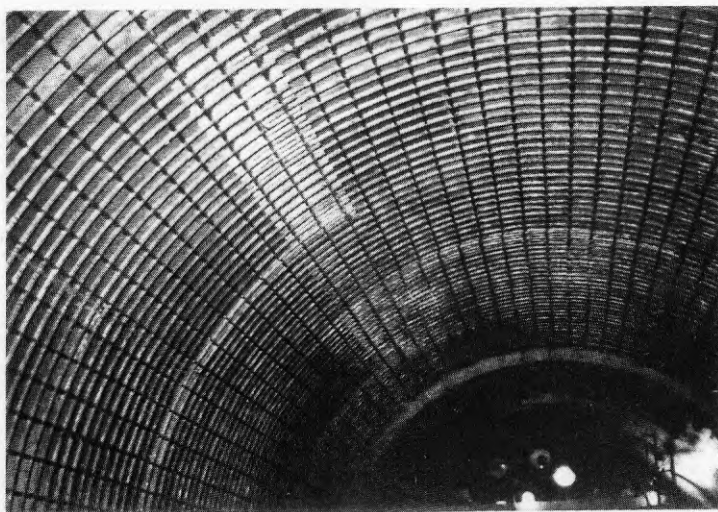
Nefmac tillverkas som armeringsmattor eller armeringskorgar. Ytan är för övrigt slät. Detta innebär att förankringskrafter i en riktning tas upp av tvärgående armeringsstänger och överförs i korsningar. Resultatet från förankringsprovningar av sådan korsningar visas i Figur 7.8. Som synes är förankringsförmågan tillfredställande.

De lokala spänningskoncentrationer som uppstår där två armeringsstänger möts skulle kunna ha betydelse vid utmattningsslaster. En viss betydelse har det förmodligen men inte mer än att utmattningsegenskaperna totalt sett är tillfredställande.

#### 7.4.2 Praktiska erfarenheter

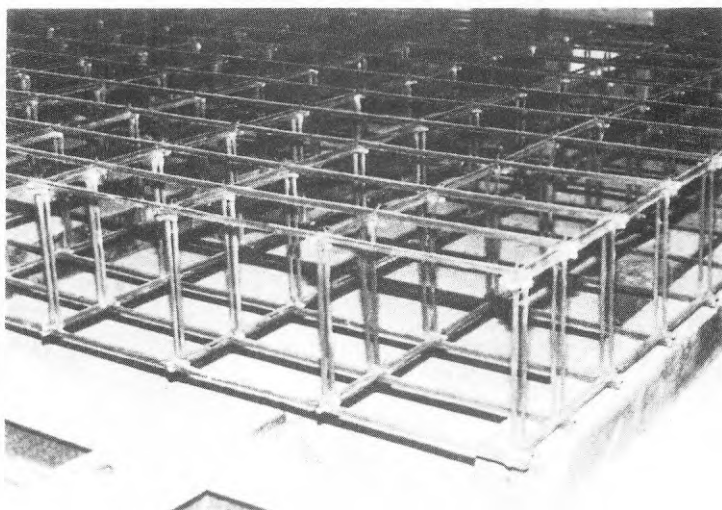
Användningen av Nefmac är omfattande. Från en rapport om verkliga tillämpningar framgår det att Nefmac använts i en mängd olika projekt fram till mars 1990. Totalt 36 stycken olika projekt där cirka 800 000 m<sup>2</sup> av Nefmacs armeringsmattor har använts. Någon detaljerad beskrivning av de olika projekten finns däremot inte. Men det är uppenbart att det är i första hand tillämpningar där en låg elasticitetsmodul har mindre betydelse. Detta gäller i tryckta valv och som sprickarmering.

Exempel på konstruktioner visas i Figur 7.9 och på de följande sidorna.

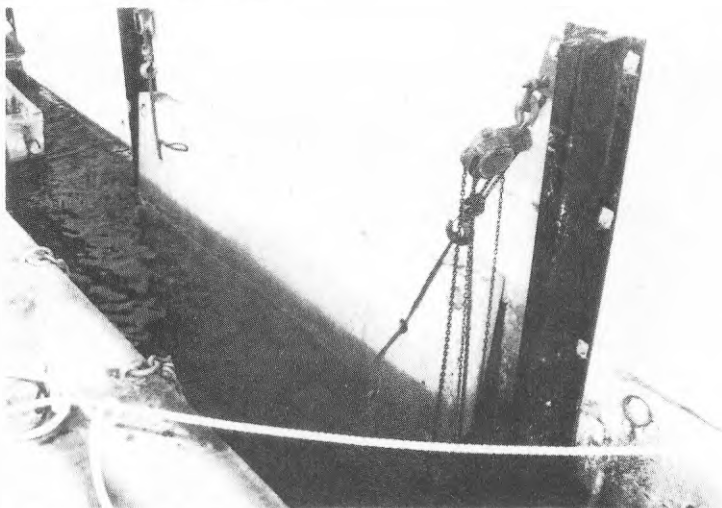


Figur 7.9 Armering med Nefmac i en tunnel.

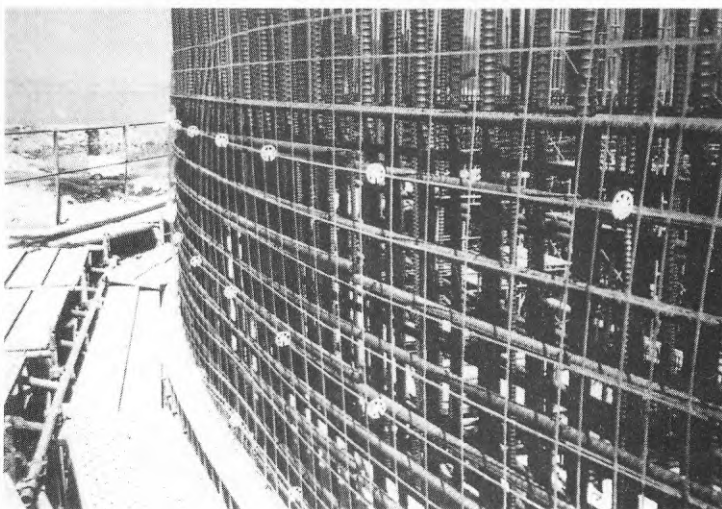
Vattenintags-  
skydd för kyl-  
anläggning.



Betong-  
fändrar för  
små båtar.

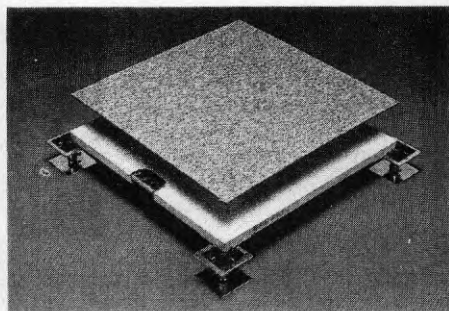
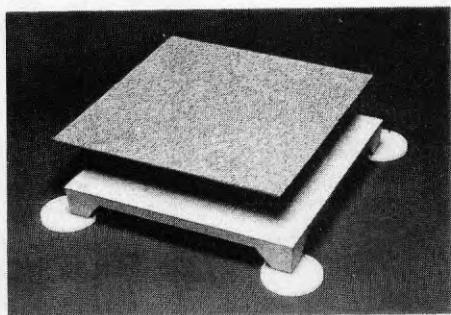
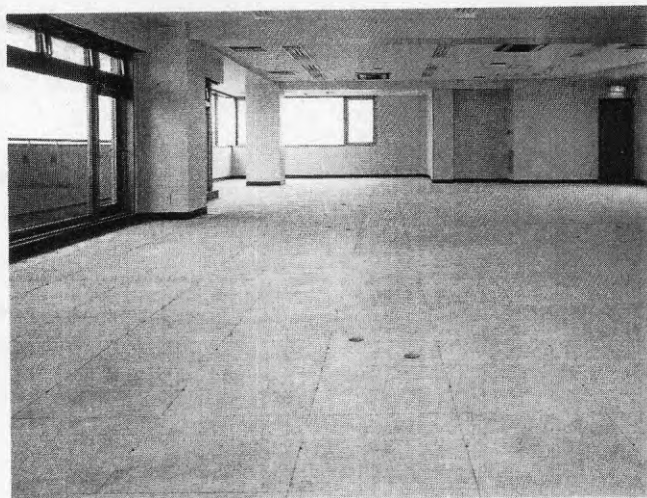


Betongsilo  
nära kusten.



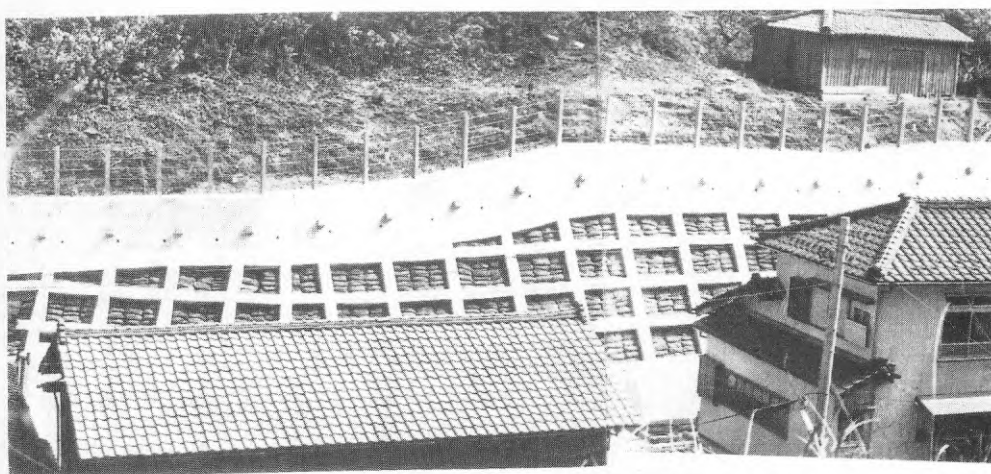


Icke magnetiskt  
golv för rönt-  
genanläggning.

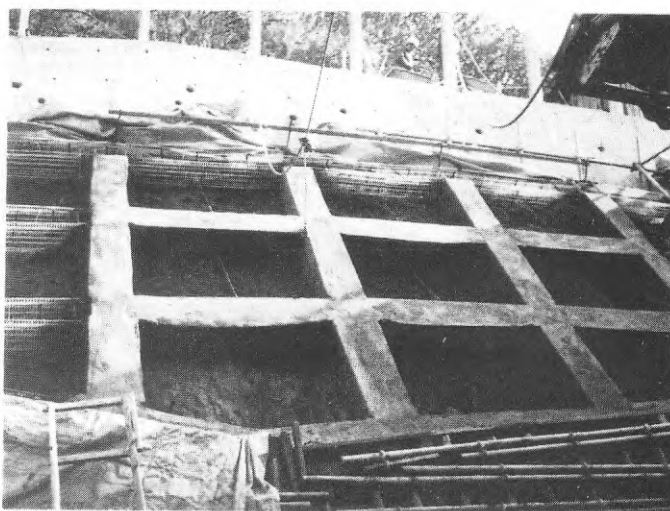


Grundläggning av  
observatorium för  
jordmagnetism.





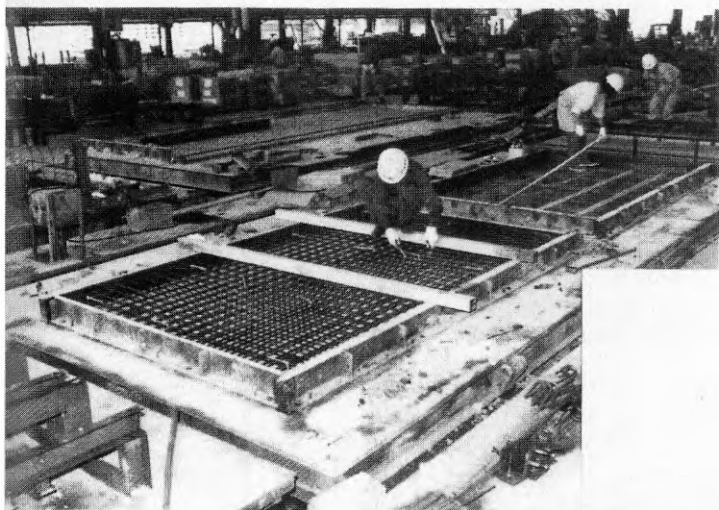
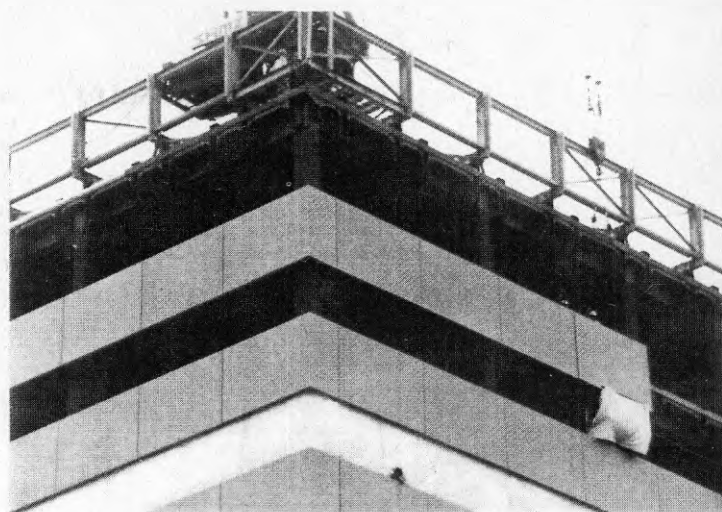
Släntförstärkning med betongramar.



Utförande av släntförstärkning.



Utfacknings-  
väggar av  
lättbetong.





## REFERENSER

### ALLMÄNT

Andersson, E., Netzell, L. och Nilsson, T., Fiberkompositarmering — en teoretisk och experimentell analys av biberkompositarmering som böjarmring i balkar, TVBK-5044, BK, LTH, 1990.

ASM International, Composites, Metals Park, Ohio, 1989.

Cardon, A.H. and Verchery, G. (eds), Durability of polymer based composite systems for structural applications, Elsevier Applied Science, 1990.

Carlsson, S. och Thomasson, A., Glasfiberkomposers hållfasthetsgenskaper, TVBK-5048, BK, LTH, 1990.

Chu, C.S., Simple and Generalized Residual Strength Model for Damaged Composites, ASCE A1 1988.

Dolan, C.W., Developments in Non-Metallic Prestressing Tendons, PCI J. Sept.—Oct. 1990.

Dutta, P.K., Structural Fiber Composite Materials for Cold Regions, ASCE CR 2 1988.

Gerritse, A., Maatjes, E. and Schurhoff, H.J., Prestressed Concrete Structures with High Strength Fibers, IABSE

Nawy, E.G. and Neuwerth, G.E., Behaviour of Fiber Glass Reinforced Concrete Beams, ASCE ST9 1971.

Nawy, E.G. and Neuwerth G.E., Fiberglass Reinforced Concrete Slabs and Beams, ASCE ST2 1977.

Nilsson, G., Glasfiberarmerade betongbalkar, TVBK-5020, BK, LTH, 1984.

Overbeck, E., Zur Bruchfestigkeit und Zeitstandfestigkeit von Glasfasern und unidirektionalen GFK-Stäben, VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 5, Nr. 127, VDI-Verlag.

Penny, R.K., Design for creep, McGraw-Hill, 1971.

Pomeroy, C.D. (ed), Creep of engineering materials, Mech. Eng. Publ. Ltd., 1978.

Rehm, G. und Franke, L., Kunstharzgebundene Glasfaserstäbe als Bewehrung im Betonbau, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 304, 1979.

Rehm, G., Franke, L. und Patzak, M., Zur Frage der Krafteinleitung in kunsthartzgebundene Glasfaserstäbe, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 304, 1979.

Rubinsky, I.A. and Rubinsky A., A Preliminary Investigation of the use of Fiber Glass for Prestressed Concrete, Mag.Con.Res., Sept. 1959.

Sentler, L., A strength theory for viscoelastic materials, D9:1987, Swedish Council for Building Research.

Sentler, L., A stability theory for orthotropic viscoelastic structural members, D5:1988, Swedish Council for Building Research.

Sentler, L., Fiberkompositarmering, Bygg & Teknik 7, 1990.

Shackelford, J.F., Introduction to materials science for engineers, Mac-Millan Book Co., 1985.

Watson, A.S. and Smith, R.L., An examination of statistical theories for fibrous materials in the light of experimental data, J.Mat.Sc. 20, 1985.

Weibull, W., A statistical theory of strength of materials, Kungl. Vetenskapsakademins Handlingar 151, 1039.

Zweben, C., Tensile Failure of Fiber Composites, AIAA J.6, 1968.

## POLYSTAL

The Pedestrian Bridge to Marienfelde Leisure Park (Adolf Kiepert Bridge) in Berlin, Information from Strabag Bau-AG.

Franke, L., Overbeck, E. und Meyer, H.-J., Vorhersage der Zugfestigkeit von GFK-Stäben, Bautechnik 67, H.10, 1990.

König, G. und Wolff, R., Hochleistungs-Verbundwerkstoff Polystal für die Vorspannung von Betonbauwerken,

Mießeler, H.-J., Vorspannung mit Glasfaser-Verbundwerkstoffen, Grundlagen und Anwendungen, IBK-Bau-Fachtagung 100, 18/19 April 1989.

Mießeler, H.-J. und Preis, L., High Performance Glass Fiber Composite Bars as Reinforcement in Concrete and Foundation Structures, Strabag Bau-AG und Bayer

Rehm, G. und Schlottke, B., Übertragbarkeit der an herkömmlichen Proben ermittelten Werkstoffkennwerte von Glasfaser-Hartz-Verbundstäben auf das Verhalten der Stäbe in Bauteilen, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, 3/1987, Universität Stuttgart.

Weiser, M. und Preis, L., Kunsthartzgebundene Glasfaserstäbe – eine korrosionsbeständige Alternative zum Spannstahl, in Gallus Rehm zum 60. Geburtstag, Ernst & Sohn, 1984.

Wolff, R. und Mieβeler, H.-J., New materials for Pressing and monitoring heavy structures, Concrete International, September 1989.

#### **ARAPREE**

Arapree, The prestressing element for concrete, Produktinformation från Akzo, Wuppertal, Tyskland.

Gerritse, A., Prestressing with Arapree, the artificial tendon, in les matériaux nouveaux pour la précontrainte et le renforcement d'ouvrages d'art, école nationale des ponts et chaussées, Paris, 25–26 octobre 1988.

#### **NEFMAC**

Nefmac, Produktinformation från Nefcom Corporation, Tokyo, Japan.

Actual applications of Nefmac, Photographs, March 1990, Nefcom Corporation.

Fujisaki, T., Matsuzaki, Y., Sekijima, K. and Okamura, H., New material for Reinforced Concrete in Place of Reinforcing Steel Bars, IABSE Conf.

#### **MATRISMATERIAL**

Derakane, Vinyl Ester Resins, Chemical Resistance Guide, Produktinformation från Dow Chemicals.

Modar, Modified Acrylic Resins, Produktinformation från ICI.





# MATERIALEGENSKAPER

## A.1 ALLMÄNT

Ett materials egenskaper kan beskrivas på flera olika sätt. Vad som är lämpligt beror på sammanhanget i form av förutsättningar och målsättning. Det finns två principiellt olika inriktningar, dels en metodik som utgår från ett idealiserat material dels en metodik som beaktar verkliga materials egenskaper. För att öka förståelsen för den senare metodiken redovisas här bakgrunden till vissa allmänna materialegenskaper och speciellt hållfasthetsgenskaper.

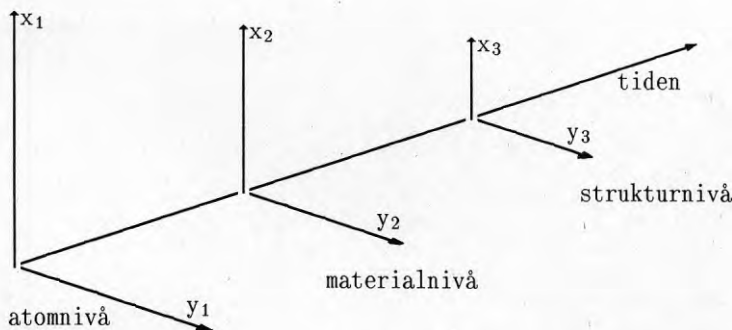
Ett materials allmänna egenskaper bestäms primärt av vad det är uppbyggt av och de bindningar som finns mellan dessa komponenter. Av speciellt intresse är de bindningar som finns mellan de olika komponenterna i ett material eftersom de bestämmer förutsättningarna för många materialegenskaper. Sådana bindningar är metalliska, joniska, kovalenta eller sekundära som kan förekomma var för sig eller i kombination i ett material.

De fyra bindningsformer som kan förekomma i material skiljer sig markant åt och förklarar också många grundläggande egenskaper hos material. Men det är inte möjligt att bygga upp ett material så att de bindningar som ska hålla ihop ett material blir optimala eller perfekta. Detta gör att det alltid finns felaktigheter i material. Så även om material är uppbyggda av helt olika komponenter och har väsentligt olika bindningsformer så har de en sak gemensamt, nämligen existensen av felaktigheter.

Felaktigheter som finns i ett material bestämmer i praktiken många viktiga egenskaper helt enkelt för att de orsakar störningar i bindningarna mellan de olika delkomponenterna. Effekten är att materialegenskaper blir betydligt mer komplexa än vad som annars skulle ha varit fallet.

## A.2 MATERIALSTRUKTURER

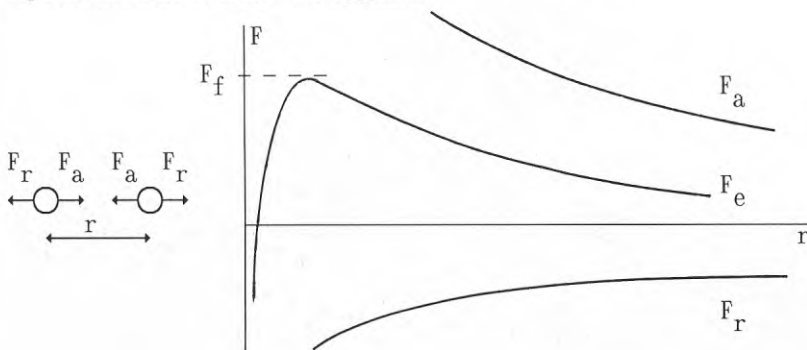
Den struktur som råder i ett material kan beaktas på olika nivåer på det sätt som är visat i Figur A.1. Normalt är det inte intressant att beskriva materialegenskaper på atomnivån. Men den grundläggande orsaken till varför material har de egenskaper de har finns att finna på atomnivån vilket gör det önskvärt att identifiera vissa egenskaper. På nivån över finns materialegenskaper som dels beror på egenskaper på atomnivån dels på egenskaper som introducerats då ett material skapats. På ytterligare en högre nivå finns strukturegenskaper som skiljer sig från materialegenskaperna. För varje nivå i denna hierarki finns en speciell struktur som framhäver vissa egenskaper.



Figur A.1 Ett system kan beaktas på olika nivåer eller i olika dimensioner där egenskaper förändras från en nivå till nästa.

### A.2.1 Egenskaper på atomnivån

För ett metalliskt material kan de bindningskrafter som finns inne i materialet i sin enklaste form illustreras som i Figur A.2. Mellan två atomer verkar attraktionskrafter  $F_a$  och repulsionskrafter  $F_r$ . Resultatet av dessa krafter avspeglas i en effektiv bindningskraft  $F_e$  som får det principiella utseende som visas i figuren. För en given temperatur och ingen yttre kraftpåverkan kommer de två atomerna att inta ett jämviktsläge. Då en yttre dragkraft verkar på de två atomerna kommer de att separeras alltmer från varandra. Denna kraft – deformationskurva är inte linjär beroende på att de initiella krafterna, attraktions- och repulsionskrafter inte är linjärt proportionella mot deformationen. För en tillräckligt stor dragkraft kommer avståndet mellan de två atomerna att vara så stort att en separation eller ett brott sker. Från atomfysiken är de krafter som är involverade väl kända och det är möjligt att beräkna en teoretisk brottlast inte bara för det enkla fall som visas i Figur A.2 utan generellt för ett tredimensionellt system. Denna brottlast  $F_f$  är normalt mycket hög och reflekterar att en separation mellan atomer har uppnåtts.



Figur A.2 Attraktions- och repulsionskrafter som verkar mellan två atomer.

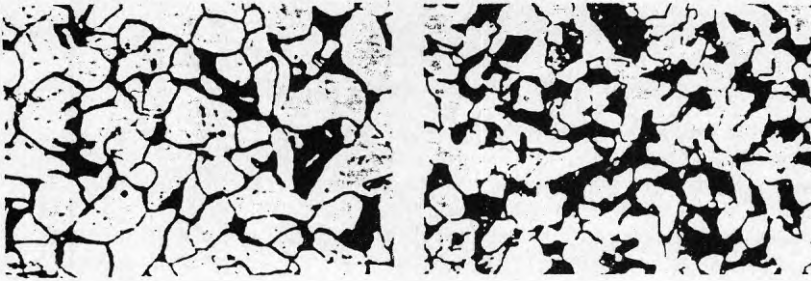
Den brottlast som kan uppnås vid dragbelastning av ett verkligt material är emellertid flera tiopotenser mindre än vad som är teoretiskt möjligt. Uppenbarligen bestäms inte ett materials draghållfasthet av de relationer som gäller mellan atomer utan andra faktorer är väsentligare nämligen störningar i bindningar mellan atomer.

Det enda som egentligen överensstämmer med verkligheten i Figur A.2 är den initiella lutningen på kurvan. Det innebär att kurvans tangent vid små deformationer överensstämmer med verkliga elasticitetsmoduler. Men kurvan är inte linjär och en linjär approximation har därför vissa begränsningar.

### A.2.2 Egenskaper på materialnivån

Förutsättningarna för ett materials egenskaper bestäms av de komponenter som finns i materialet och de krafter som verkar mellan dem. Av speciell vikt är de sammanhållande krafter som verkar mellan olika komponenter. Då ett material byggs upp av atomer uppstår inte den perfekta symmetri som skulle kunna förväntas. Strukturen kan lokalt vara symmetrisk och regelbunden men mellan dessa delar med regelbundenhet finns markanta avvikelser som avspeglar ett kaos i strukturen. Denna struktur är lätt att studera för metalliska material i elektronmikroskop. Exempel på detta visas i Figur A.3 som är typiska för kolstål. Andra metalliska material bildar strukturer som är karakteristiska för detta material och ibland också tillverkningsättet.

För material som är uppbyggda av molekyler kan varje molekyl eller molekylkedja ses som en välorganiserad enhet medan sammanhållningen



Figur A.3 Strukturen hos normaliserat stål med 0.1% och 0.3% kol.

mellan enheterna är mer eller mindre kaosartad. Dessa molekylykedor har ibland också en riktningberoende struktur. Oberoende av typen av material så finns en struktur som påminner mycket om det som visas i Figur A.3. Det finns delar som är välorganiserade och mellan dessa delar finns en struktur som är mer eller mindre kaotisk.

Det kaos som finns i ett material avspeglar att störningar finns mellan de olika komponenterna i materialet. Dessa störningar, som kan vara av högst varierande karaktär, kan ses som oberoende eftersom deras inverkan är lokal. Resultatet är att avståndet mellan olika komponenter kommer att variera vilket innebär att mer eller mindre av den möjliga töjningskapaciteten är utnyttjad lokalt.

Det kan förväntas att vissa övergripande egenskaper ska vara av liknande karaktär hos olika material. Detta är också fallet eftersom det kaos som finns i ett material kommer att introducera liknande effekter i materialbetendet oavsett vilket material det är. Dessa effekter är mest markanta för materials hållfasthet men de påverkar också andra egenskaper som diffusionsegenskaper.

### A.2.3 Strukturegenskaper

Vid tillverkningen av konstruktionselement kommer nya felaktigheter att introduceras som påverkar de egenskaper som kan registreras. Detta är direkt uppenbart för vissa material som till exempel konstruktionsvirke som har synliga defekter i form av kvistar och torksprickor vilket inte är fallet för små provbitar av kvistfritt virke. Även andra material som till exempel stål och betong uppvisar liknande effekter men av andra orsaker. För stål är det i första hand egenspanningar som påverkar konstruktionsegenskaper medan det för betong är en variation av materialegenskaper som funktion av vibrering och härdningsförhållanden. Effekten av detta är att material-egenskaper blir dels ortotropa dels försämrade. Detta innebär att egenskaper blir riktningberoende, oftast i relation till tillverkningsriktningen, och att egenskaperna i någon riktning kan vara markant försämrade.

Konstruktionselements beteende påverkas också av det som karakteriseras som imperfektioner, eller avvikelser från ett perfekt utseende. Det är i praktiken omöjligt att producera en konstruktiv enhet som är helt perfekt. Det uppstår alltid krokigheter, skevheter, välvningar och tvärsnittets form avviker i ett eller flera avseenden. Effekten av detta är att sekundära lasteffekter i form av moment introduceras som reducerar bärformågan. Ur strukturell synvinkel uppstår brottfenomen som knäckning och vippning.

## A.3 MATERIALS BROTTGENSKAPER

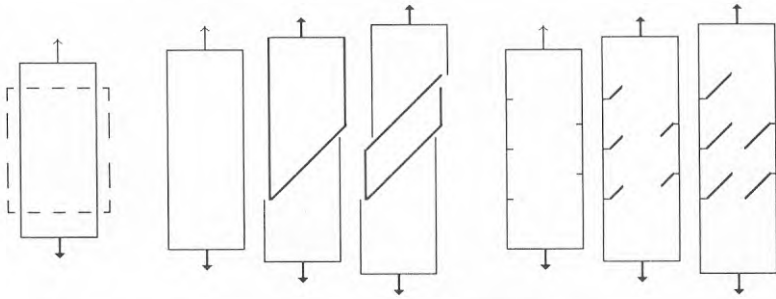
Ett materials hållfasthet är inget väldefinierat. På grund av de inre störningarna mellan komponenterna uppstår speciella egenskaper. Primärt introduceras en ny brottmod, skjuvbrott. Sekundärt kommer både ett dragbrott och ett skjuvbrott att bli storleks- och tidsberoende, men på olika sätt.

**A.3.1 Deformationsegenskaper**

Då en kropp utsätts för en påkänning kommer det att uppstå en respons i form av en deformation. Denna deformation eller töjning hos en kropp är, till skillnad mot den deformation som uppstår mellan atomer, mer komplicerad. Förutom en elastiska töjningsförmåga kommer också en viskös töjningsförmåga att introduceras. Detta avspeglar det inflytande som felaktigheter har på bindningarna inne i ett material. Men det gör också töjningsresponsen mer komplicerad än vad som annars skulle ha varit fallet.

Töjningsresponsen hos en kropp som utsätts för en konstant yttre dragpåverkan är inte begränsad till den initiella töjningen. För påkänningar som är under ett visst tröskelvärde kommer den initiella töjningen att efterföljas av primärkrypning. Denna primärkrypning avspeglar att en ny inre jämvikt eftersträvas i materialet och resulterar i en mindre töjning, något som kan återgå i fördröjd form vid en avlastning. För en högre påkänning kommer primärkrypningen att efterföljas av sekundärkrypning. Denna sekundärkrypning avspeglar att en inre jämvikt i materialet inte är möjlig. I stället kommer deformationen att öka kontinuerligt. Slutligen kan även tertiärkrypning ske under vissa betingelser vilket avspeglar en upplösning av materialet. Dessa olika former av töjning och hur de kan beaktas finns redovisat i Kapitel 2.2.

Töjningens effekt på ett material beror på typen av material och belastningens karaktär. Denna respons kan ske på två sätt i ett material, som ett töjningshårdnande eller som ett töjningsmjuknande. I Figur A.4 visas vad detta innebär principiellt för ett material.



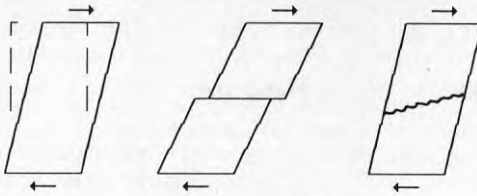
Figur A.4 Materialrespons vid primär- och sekundärkrypning för töjningshårdnande och töjningsmjuknande beteende.

Ett töjningshårdnande kan bara ske för vissa metalliska material då de påverkas av en relativt konstant påkänning inom vissa temperaturområden. De speciella bindningar som finns hos metalliska material medger då att atomplan kan glida som en inre skjuvning i materialet. Bindningar mellan atomer som bryts på ett ställe kan återskapas på ett annat ställe.

Ett töjningsmjuknande sker då bindningar som bryts inte kan återskapas. Detta gäller de flesta material som inte är metalliska. Men även metalliska material kan bete sig töjningsmjuknande, speciellt gäller detta vid snabba påkänningsvariationer men också vid låga temperaturer. För ett töjningsmjuknande materialbeteende avspeglar primärkrypningen en sprickinitiering och sekundärkrypningen en spricktillväxt.

För skjuvpåkänningar uppstår initieellt en skjuvdeformation på det sätt som också visas i Figur A.5. Om skjuvpåkänningen är låg är detta den enda deformation som uppstår. Om skjuvpåkänningen däremot är över en viss nivå kommer skjuvning att ske. Detta kan ske som en glidning mellan atomplan eller som en sprickbildning på ett liknande sätt som vid enaxiell dragbelastning men där sekundärkrypning troligtvis uppstår direkt.

Sprickbildningen behöver inte nödvändigtvis påverka ett material som helhet utan den kan också ske lokalt där spänningskoncentrationer finns.



Figur A.5 Deformationsbeteende vid skjuvning. Till vänster en deformation motsvarande en låg skjuvbelastningen och till höger en glidning eller sprickbildning som uppstår vid högre skjuvbelastning.

Responserna inne i ett material, elastisk eller viskös, avspeglar två olika töjningstillstånd. För alla material gäller att de har en viss elastisk och viskös töjningskapacitet. Men på grund av att det finns felaktigheter i ett material blir dessa töjningskapaciteter initieellt storleksberoende. Men felaktigheter kan också tillväxa under inverkan av en påkänning vilket också gör töjningskapaciteten tidsberoende. Begränsningen i töjningskapaciteter utgörs av två brottytor vars läge inte bara beror på materiallegenskaperna utan också på belastnings sättet.

### A.3.2 Hållfasthetsegenskaper

Redan Leonardo da Vinci visade på 1500-talet att brottlasten för stål har ett storleksberoende. Detta formaliserades i slutet på 1930 talet av Weibull till hållfasthetskaraktariseringen

$$R = R_0 \left[ \frac{V_0}{V} \right]^{1/k} \tag{A.1}$$

där  $R$  är brotthållfastheten för en volym  $V$  under påkänning i relation till brotthållfastheten  $R_0$  för en referensvolym  $V_0$  under påkänning. Parametern  $k$  beskriver storleksberoendet och den är en materialegenskap.

Brottlasten hos ett material har inte bara ett storleksberoende utan den är också tidsberoende, eller mer korrekt, beroende på varaktigheten av en hög påkänningsnivå. Experimentellt har det visats att detta tidsberoende är av samma slag som storleksberoendet och det kan uttryckas som

$$R = R_0 \left[ \frac{D_0}{D} \right]^{1/h} \tag{A.2}$$

där  $R$  är brotthållfastheten för en effektiv varaktighet  $D$  i relation till brotthållfastheten  $R_0$  för en referensvaraktighet  $D_0$ . Parametern  $h$  beskriver tidsberoendet och den är en materialegenskap.

Alla material uppvisar också ett temperaturberoende. En förhöjd temperatur innebär att atomer rör sig mer kring ett jämviktsläge och utnyttjar därmed mer av den möjliga töjningskapaciteten. Vid en sänkt temperatur uppstår det motsatta. Temperaturens inverkan på ett materials hållfasthet är därför likartat det som uppstår vid en yttre belastning och temperaturens inverkan på materialets brotthållfasthet kan därför skrivas

$$R = R_0 \left[ \frac{T_0}{T} \right]^{1/p} \tag{A.3}$$

där  $R$  är brotthållfastheten för en temperatur  $T$  i relation till brotthållfastheten  $R_0$  för en referenstemperatur  $T_0$ . Parametern  $p$  beskriver temperaturberoendet och den är en materialegenskap. Detta uttryck för temperaturberoendet är inte i motsats till de vanligare använda Arrhenius

uttrycken som är av exponentialform vilket motiveras nedan.

För hygroskopiska material som trä kommer även fukthalten i materialet att påverka hållfastheten. En ökad fukthalt innebär ett ökat avstånd mellan vissa delar av materialet, något som ofta avspeglas i en svällning. Resultatet är att hållfastheten sjunker med en ökad fukthalt. Inom vissa fukthaltsvariationer kan detta beskrivas på ett liknande sätt som temperaturberoendet. Ofta fungerar vatten också som ett glidmedel inne i ett material vilket medför att även tidsberoendet kan öka med ökande fukthalt.

Orsaken till att hyperboliska egenskaper uppstår går att förklara relativt enkelt. Om något inträffar helt slumpmässigt i tiden brukar detta beskrivas med en Poisson process. Tiden mellan händelser blir då exponentialfördelad. Om det slumpmässiga i tiden däremot inte styrs av en process utan många olika processer som resulterar i en blandning av ett stort antal exponentialfördelade intervall så blir resultatet en hyperbolisk fördelning. Detta visas enklast från definitionen av gamma funktionen som kan skrivas som

$$t^{-\Theta} = [\Gamma(\Theta)]^{-1} \int_0^{\infty} \tau^{-(\Theta+1)} \exp(-t/\tau) d\tau \quad (\text{A.4})$$

Denna definition säger att för en blandning av exponentialfördelningar där medelvärdet varierar som  $\tau^{\Theta-1}$  så kommer blandningen att bli hyperbolisk. Hyperboliska egenskaper uppstår alltså utifrån mycket generella förutsättningar. Det enda som egentligen krävs är att det inte är en enda bakomliggande orsak utan ett antal orsaker som blandas. Denna blandning behöver inte vara så omfattande som ekv A.4 förutsätter utan hyperboliska egenskaper uppstår redan då ett måttligt antal olika slumpmässiga orsaker blandas, något som är lätt att visa genom simulering.

# HÅLLFASTHETSKARAKTERISERING

## B.1 ALLMÄNT

Ett materials hållfasthetsegenskaper är komplexa. Då en kropp utsätts för påkänningar uppstår en respons som inte bara beror på materialegenskaperna utan också på karaktären hos påkänningen. För små påkänningar uppstår oftast en elastisk respons som följs av primärkrypning. Då påkänningen överskrider ett visst tröskelvärde kan responsen förändras till en viskös respons om varaktigheten på påkänningen är tillräckligt lång. Vad som är en tillräckligt lång varaktighet beror på materialet men också på temperaturen. De flesta material uppvisar dessa två responser, en elastisk och en viskös respons, och kan därför karakteriseras som viskoelastiska material.

Orsaken till att material beter sig viskoelastiskt beror på de störningar som finns på atomnivån mellan olika delar i materialet och som beskrivs kortfattat i föregående avsnitt. Effekten av dessa störningar är att töjningskapaciteten blir påverkad. Primärt blir brotthållfastheten betydligt lägre än den annars skulle ha varit. Men brotthållfastheten blir också storleks- och tidsberoende utöver temperaturberoende.

Viskoelastiska egenskaper beaktas lämpligast i form av de töjningar som kan uppstå, elastiska och viskösa töjningar. I brottstadiet blir töjningskapaciteterna storleks- och tidsberoende.

## B.2 Påkänningar

Det påkänningstillstånd som uppstår i en kropp då den utsätts för normalpåkänningar och skjuvpåkänningar kan definieras som

$$\sigma_v = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (\text{B.1})$$

$$\sigma_d = 1/3 \left( (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right)^{1/2} \quad (\text{B.2})$$

där  $\sigma_v$  är en volymspåkänning bestående av enbart de tre normalpåkänningarna och  $\sigma_d$  är en distortionspåkänning bestående av en godtycklig kombination av normalpåkänningar och skjuvpåkänningar. Alla påkänningar är definierade i ett x-y-z koordinatsystem.

Ekvation B.1 och ekv. B.2 kan utnyttjas som brottkriterier. Detta gäller speciellt ekv B.2 som är grunden för von Mises brottkriterium. Men ett sådant brottkriterium förutsätter indirekt ett perfekt material. I detta sammanhang söks i stället ett brottkriterium för ett material där inverkan av felaktigheter beaktas.

## B.3 MATERIALRESPONS

### B.3.1 Brotttöjningskaraktisering

Ett materials brottgenskaper bestäms av töjningsegenskaperna. Eftersom det finns två responser finns det också två töjningsmöjligheter, elastiska töjningar och viskösa töjningar. Men närvaron av felaktigheter i ett material kommer att påverka dessa töjningar på flera sätt. Primärt blir töjningskapaciteterna storleks- och tidsberoende. För ett isotropt material kan detta uttryckas som

$$\epsilon_u = g_e(\sigma_v; V_v, D_v) + g_v(\sigma_d; V_d, D_d) \quad (\text{B.3})$$

där  $\epsilon_u$  är brotttöjningen,  $g_e(\cdot)$  är en funktion av den elastiska töjningen och

$g_v(\cdot)$  är en funktion av den viskösa töjningen. Det förutsätts här att volymspåkänningar ger upphov till elastiska töjningar och distortionspåkänningar medför viskösa töjningar om de överstiger ett tröskelvärde. Brottöjningarna kommer också att vara en funktion av den volym som påverkas och dess varaktighet för respektive påkänning.

För generella påkänningstillstånd kan volymspåkänningar delas upp i tre komponenter enligt ekv B.1. Ekvation B.3 kan därför skrivas som

$$\epsilon_u = g_x(\sigma_x; V_x, D_x) + g_y(\sigma_y; V_y, D_y) + g_z(\sigma_z; V_z, D_z) + g_v(\sigma_d; V_d, D_d)$$

där  $g_x(\cdot)$ ,  $g_y(\cdot)$  och  $g_z(\cdot)$  töjningsfunktioner för respektive volymspåkänningskomponent och  $g_d(\cdot)$  är samma som ovan. För de flesta tillämpningar kan ekv B.4 reduceras till ekv B.3.

För ortotropa material kommer töjningskapaciteten att bli riktningberoende. Detta innebär att brottöjningen behöver definieras i olika riktningar. Dessutom behöver storleksberoendet delas upp i tre komponenter. För fallet med brottöjning i x-riktningen och påkänningsresponsen i denna riktning som den dominanta kan detta skrivas som

$$\epsilon_{ux} = g_{xx}(\sigma_x; L_{xx}, L_{yx}, L_{zx}, D_{xx}) + g_{vx}(\sigma_{dx}; L_{dx}, L_{dy}, L_{dz}, D_{dx}) \quad (B.5)$$

som är en direkt utvidgning av ekv B.3.

### B.3.2 Endimensionellt påkänningstillstånd

Vid ett endimensionellt påkänningstillstånd med enbart en dragpåkänning gäller ekv B.3. Var och en av de två termerna motsvarar olika brottformer, dels ett elastiskt brott eller normaldragbrott dels ett visköst brott eller skjuvbrott. Dessa behandlas först var för sig.

För ett elastiskt brott är existerande felaktigheter av direkt inflytande vilket introducerar ett primärt storleksberoende. Därför antas att  $F_x(\sigma_x; D_x)$  är den statistiska fördelningsfunktionen för den elastiska töjningen vid brott hos en liten volym  $V_x$  med varaktigheten  $D_x$ . Den statistiska fördelningen för hållfastheten hos en stor volym med  $n$  delvolymmer, där varje delvolym  $V_x$  är oberoende av andra volymer, kan då delvolymen med den minsta elastiska töjningskapaciteten bestämmer brotts sannolikheten uttryckas som

$$F(\sigma_x) = 1 - \left[1 - F_x(\sigma_x; D_x)\right]^{nV_x} \quad (B.6)$$

För ett visköst brott är det tillväxten av existerande felaktigheter i tiden som är avgörande. Därför antas att  $F_d(\sigma_d; V_d)$  är den statistiska fördelningsfunktionen för den viskösa töjningen vid brott för en liten tidsperiod  $D_d$  och volymen  $V_d$ . Den statistiska fördelningen för hållfastheten hos en lång varaktighet med  $m$  deltidsintervall, där varje intervall  $D_d$  är oberoende av andra intervall, kan då intervallet med den minsta viskösa töjningskapaciteten bestämmer brotts sannolikheten uttryckas som

$$F(\sigma_d) = 1 - \left[1 - F_d(\sigma_d; V_d)\right]^{nD_d} \quad (B.7)$$

Ett materialbrott kan antingen uppträda som ett elastiskt töjningsbrott eller som ett visköst töjningsbrott. Om de två olika brottformerna antas oberoende av varandra kan den statistiska fördelningen för den minsta hållfastheten för någon av brottformerna uttryckas som

$$F(\sigma) = 1 - (1 - F(\sigma_x))(1 - F(\sigma_d)) \quad (B.8)$$

som med ekv B.6 och ekv B.7 insatta ger

$$F(\sigma) = 1 - \left[1 - F_x(\sigma_x; D_x)\right]^{nV_x} \left[1 - F_d(\sigma_d; V_d)\right]^{nD_d} \quad (B.9)$$



De två funktionerna  $F_x(\cdot)$  och  $F_d(\cdot)$  uttrycker ett funktionellt samband mellan påkänning och töjning i uttryckt i statistiska termer. Eftersom denna funktion är icke avtagande upp till brottpåkänningen kan ett normaliserat samband mellan töjning och påkänning utnyttjas. Enklast möjliga samband är ett linjärt samband mellan påkänning och töjning vilket innebär

$$g_x(\cdot) = c_1 \sigma_x \varphi(D_x) \quad (\text{B.10})$$

$$g_d(\cdot) = c_2 \sigma_d \psi(V_d) \quad (\text{B.11})$$

där  $c_1$  och  $c_2$  är konstanter och  $\varphi(D_x)$  och  $\psi(V_d)$  är funktioner som beaktar tids- och storleksberoendet för respektive töjningsfunktion. I princip kan vilket godtyckligt samband ansättas så länge det är en icke avtagande funktion. Med detta antagande och en omskrivning av ekv B.9 i form av dess asymptotiska extremvärdesfördelning av typ II erhålles

$$F(\sigma) = 1 - \exp(-c_1 n V_x (\varphi(D_x) \sigma_x)^k - c_2 m D_d (\psi(V_d) \sigma_d)^h) \quad (\text{B.12})$$

där en storleksparameter  $k$  och en tidsparameter  $h$  är introducerade. Dessa parametrar avspeglar graden av kaos inne i materialet. Värderna nära 0 motsvarar totalt kaos medan värdena nära  $\infty$  avspeglar perfekt ordning. Relationen mellan storleksparametern och tidsparametern är för normala konstruktionsmaterial  $2 < h/k < 4$ .

Med en normalisering av ekv B.12 med avseende på en referensvolym  $V_0$  och en referensvaraktighet  $D_0$  erhålls

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{V_x}{V_0} \left[\varphi(D_x) \frac{\sigma_x}{c_v}\right]^k - \frac{D_d}{D_0} \left[\psi(V_d) \frac{\sigma_d}{c_d}\right]^h\right) \quad (\text{B.13})$$

där  $c_v$  och  $c_d$  är nya normaliseringskonstanter. I ekv B.13 finns de två olika brottmoderna som kan uppstå, ett elastiskt töjningsbrott eller ett visköst töjningsbrott. Ett brott kan naturligtvis också vara en kombination av dessa två möjligheter. Eftersom båda dessa brottmoder beror på samma attraktions- och repulsionskrafter på atom- eller molekylnivån är det rimligt att anta att det bör finnas en kontinuitet i storleksberoendet och tidsberoendet mellan de två brottmoderna. Detta kommer att innebära speciella krav på funktionerna  $\varphi$  och  $\psi$ . Dessa kontinuitetsvillkor kan beaktas på olika sätt där den mest stringenta metoden är att analysera medelvärdesegenskaperna av ekv B.13 med avseende på  $\sigma_x$  och  $\sigma_d$  vilket visas i följande avsnitt. Ett enklare och mer direkt sätt är att konstatera att kontinuitetsvilkoren avspeglar sig i en hyperbolisk skalning med  $h/k$  från ett elastiskt töjningsbrott till ett visköst töjningsbrott. Denna skalning innebär

$$\varphi(D_x) = \left[\frac{D_x}{D_0}\right]^{1/h} \quad (\text{B.14})$$

$$\psi(V_d) = \left[\frac{V_d}{V_0}\right]^{1/k} \quad (\text{B.15})$$

vilket medför att ekv. B.13 kan skrivas som

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{V_x}{V_0} \left[\left[\frac{D_x}{D_0}\right]^{1/h} \frac{\sigma_x}{c_v}\right]^k - \frac{D_d}{D_0} \left[\left[\frac{V_d}{V_0}\right]^{1/k} \frac{\sigma_d}{c_d}\right]^h\right) \quad (\text{B.16})$$

En förändring från en elastisk töjningsrespons till en viskös töjningsrespons sker inte vid vilken påkänningsnivå som helst. Det framgår vid krypning att påkänningen behöver överskrida ett tröskelvärde för att

sekundärkrypning, eller en viskös respons, ska uppstå. Detta innebär att ett tröskelvärde behöver introduceras för den viskösa töjningskomponenten i ekv B.16. Detta tröskelvärde är egentligen en variabel som också beror på temperaturen men skrivs här som en konstant. Det kan också vara lämpligt att introducera ett liknande tröskelvärde för den elastiska töjningen av symmetriskäl. Detta innebär att tre ekvationer erhålls motsvarande olika påkänningstillstånd och materialresponser.

$$F(\sigma) = 0 \quad \sigma_x < r_v, \sigma_d < r_d \quad (\text{B.17})$$

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{V_x}{V_o} \left[\frac{D_x}{D_o}\right]^{k/h} \left[\frac{\sigma_x - r_v}{c_v}\right]^k\right) \quad \sigma_x \geq r_v, \sigma_d < r_d \quad (\text{B.18})$$

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{V_x}{V_o} \left[\frac{D_x}{D_o}\right]^{k/h} \left[\frac{\sigma_x - r_v}{c_v}\right]^k - \frac{D_d}{D_o} \left[\frac{V_d}{V_o}\right]^{h/k} \left[\frac{\sigma_d - r_d}{c_d}\right]^h\right) \quad \sigma_x \geq r_v \text{ eller } \sigma_d \geq r_d \quad (\text{B.19})$$

vilket är de statistiska fördelningarna för att ett brott ska uppstå under olika påkänningstillstånd. Praktiskt är ekv B.18 och ekv B.19 av primärt intresse. Ekvation B.18 representerar ett elastiskt töjningsbrott som är ett sprött brott. Den är av samma form som det som ges av Weibull teorin men kompletterat med ett tidsberoende som avspeglar effekten av primärkrypning. Ekvation B.19 inkluderar både ett elastiskt töjningsbrott och ett visköst töjningsbrott och är därför ett mer generellt brottkriterium. Detta innebär att både ett sprött brott och ett segt brott kan beaktas.

Den töjningskaraktisering som är gjord ovan är också giltig för andra påkänningstillstånd. Då enbart enaxiella tryckpåkänningar verkar erhålls samma ekvations samband men det kan inte förväntas att normaliseringsparametrarna  $c_v$  och  $c_d$  är samma. För skjuvpåkänningar är enbart den sista delen av ekv B.19 tillämpbar men den är enbart giltig för påkänningar som är högre än tröskelvärdet  $r_d$ . För lägre påkänningar sker enbart en skjuvdeformation.

Den effektiva volymen under påkänning och motsvarande varaktighet ska ta hänsyn till den effekt som felaktigheter har i relation till påkänningstillståndet. För generella påkänningsvariationer innebär detta att ekv B.19 kan skrivas som en integration över volymen under påkänning och motsvarande varaktighet som

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\int_{V_x} \frac{1}{V_o} \int_{D_x} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{t}{D_o}\right]^{k/h} \left[\frac{\sigma_x(x,y,z,t) - r_v}{c_v}\right]^k dx dy dz dt - \int_{D_d} \frac{1}{D_o} \int_{V_d} \frac{\partial^3}{\partial x \partial y \partial z} \left[\frac{xyz}{V_o}\right]^{h/k} \left[\frac{\sigma_d(t,x,y,z) - r_d}{c_d}\right]^h dt dx dy dz\right) \quad (\text{B.20})$$

Ekvation B.20 kan alltid utvärdras numeriskt men det kan vara lämpligt att göra vissa förenklingar. Tröskelvärdet  $r_v$  är normalt noll men även tröskelvärdet  $r_d$  kan oftast antas vara noll utan att allvarligare fel uppstår. Påkänningsvariationen blir då oberoende av den maximala påkänningen och integralerna i ekv B.20 kan skrivas som

$$V_x = \int_{V_x} \left[\frac{s_x(x,y,z)}{c_v}\right]^k dx dy dz = V_x^* \quad (\text{B.21})$$

$$D_x = \int_{D_x} \frac{\partial}{\partial t} \left[t\right]^{k/h} \left[\frac{s_x(t)}{c_v}\right]^h dt = D_x^* \quad (\text{B.22})$$

$$V_d = \int V_d \frac{\partial^3}{\partial x \partial y \partial z} [xyz]^{h/k} \left[ \frac{s_d(x,y,z)}{c_d} \right]^h dx dy dz = V_d^* \quad (\text{B.23})$$

$$D_d = \int D_x \left[ \frac{s_d(t)}{c_d} \right]^h dt = D_d^* \quad (\text{B.24})$$

där  $s_x(x,y,z)$  och  $s_x(t)$  är normaliserade och separerade påkänningar av  $\sigma_x(x,y,z,t)$  och  $s_d(x,y,z)$  och  $s_d(t)$  är normaliserade och separerade påkänningar av  $\sigma_d(x,y,z,t)$ . Den effektiva volymen under påkänning och motsvarande varaktighet kan på detta sätt uttryckas som en reducerad effektiv volym och en reducerad effektiv varaktighet vilket avspglas i index \*.

### B.3.4 Brottpåkänning

Ett generellt brottkriterium kan bara bestämmas i form av töjningar där storlekseffekter och tidseffekter kan beaktas godtyckligt i en statistisk extremvärdesfördelning. Motsvarande brottpåkänning kan enbart utvärderas då medelvärde och varians bestäms. Medelvärdet erhålls på normalt sätt från

$$E[\sigma] = \int_r^\infty \sigma f(\sigma) d\sigma = r + \int_r^\infty (1 - F(\sigma)) d\sigma \quad (\text{B.25})$$

där  $r$  är ett påkänningströskelvärde. Eftersom det finns två möjliga brottmoder så kan också ett medelvärde uttryckas på två sätt. En utvärdering av medelvärdet sker här med förutsättningen att påkänningsfördelningen är jämnt fördelad över ett tvärsnitt och konstant i tiden.

Vid en bestämning av medelvärdet kan också de två funktionerna  $\varphi(D_x)$  och  $\psi(V_d)$  analyseras mer i detalj. Introducera följande variabeltransformationer

$$u_x = \left[ \frac{V_x}{V_o} \right]^{1/k} \varphi(D_x) \frac{\sigma_x}{c_v} \quad (\text{B.26})$$

$$u_d = \left[ \frac{D_d}{D_o} \right]^{1/h} \psi(V_d) \frac{\sigma_d}{c_d} \quad (\text{B.27})$$

för en elastisk hållfasthet respektive en viskös hållfasthet. Då denna variabeltransformation görs introduceras derivatorna  $|\partial\sigma_x/\partial u_x|$  och  $|\partial\sigma_d/\partial u_d|$  utanför respektive integraler. Dessa derivator blir

$$\frac{\partial\sigma_x}{\partial u_x} = c_v \left[ \frac{V_o}{V_x} \right]^{1/k} \frac{1}{\varphi(D_x)} \quad (\text{B.28})$$

$$\frac{\partial\sigma_d}{\partial u_d} = c_d \left[ \frac{D_o}{D_d} \right]^{1/h} \frac{1}{\psi(V_d)} \quad (\text{B.29})$$

vilka beskriver storleks- och tidsberoendet. Eftersom det måste finnas en mjuk övergång från ett volymstöjningsbrott till ett distortionstöjningsbrott därför att de två brottmoderna är kopplade till varandra på atomnivån så kommer de två funktionerna  $\varphi(D_x)$  och  $\psi(V_d)$  att ha formen

$$\varphi(D_x) = \left[ \frac{D_x}{D_o} \right]^{1/h} \quad (\text{B.30})$$

$$\psi(V_d) = \left[ \frac{V_d}{V_o} \right]^{1/k} \quad (\text{B.31})$$

De två brottmoderna är nu kopplade till varandra och det är möjligt att få en mjuk övergång från en brottform till en annan. För att beakta detta införs ytterligare en variabeltransformation

$$\mu = \frac{c_v \sigma_d}{c_d \sigma_x} \quad (\text{B.32})$$

Medelvärden för påkänningshållfastheten uttryckt för ett elastiskt brott kan nu skrivas som

$$E[\sigma_x] = r_v + c_v \left[ \frac{V_o}{V_x} \right]^{1/k} \left[ \frac{D_o}{D_x} \right]^{1/h} \int_0^\infty \exp(-u_x^k - \mu^h u_x^h) du_x \quad (\text{B.33})$$

och medelvärdet för hållfastheten uttryckt i ett visköst brott är

$$E[\sigma_d] = r_d + c_d \left[ \frac{V_o}{V_d} \right]^{1/k} \left[ \frac{D_o}{D_d} \right]^{1/h} \int_0^\infty \exp(-u_d^h - u_d^k / \mu^k) du_d \quad (\text{B.34})$$

Tidsberoendet och storleksberoendet för hållfasthetens medelvärde är samma i de två uttrycken och skillnaden ligger huvudsakligen i de två integralerna. För  $\mu = 0$ , vilket innebär att  $\sigma_d = 0$ , kan integralen i ekv B.33 skrivas i form av en gamma funktion. Medelvärdet på hållfastheten för ett elastiskt brott blir

$$E[\sigma_x] = r_v + c_v \left[ \frac{V_o}{V_x} \right]^{1/k} \left[ \frac{D_o}{D_x} \right]^{1/h} \Gamma(1 + \frac{1}{k}) \quad (\text{B.35})$$

Då  $\mu$  växer från 0 till  $\infty$  kommer integralen i ekv B.33 att avta och för  $\mu = \infty$  blir integralen lika med noll. Samtidigt sker en omvänd förändring för integralen i ekv B.34 vars värde är 0 för  $\mu = 0$  men där integralens värde ökar med ökande  $\mu$ . För  $\mu = \infty$ , vilket innebär att  $\sigma_x = 0$ , kan integralen i ekv B.33 också förenklas och uttryckas i form av en gamma funktion. Medelvärdet av hållfastheten för ett visköst brott blir

$$E[\sigma_d] = r_d + c_d \left[ \frac{V_o}{V_d} \right]^{1/k} \left[ \frac{D_o}{D_d} \right]^{1/h} \Gamma(1 + \frac{1}{h}) \quad (\text{B.36})$$

Hållfasthetens spridning uttrycks primärt i form av variansen. Variansen erhålls genom att först bestämma andra momentet kring medelvärdet och därefter

$$V[\sigma] = E[\sigma^2] - E[\sigma]^2 \quad (\text{B.37})$$

För ett elastiskt brott resulterar detta i

$$V[\sigma_x] = c_v^2 \left[ \frac{V_o}{V_x} \right]^{2/k} \left[ \frac{D_o}{D_x} \right]^{2/h} \left[ \Gamma(1 + \frac{2}{k}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{k}) \right] \quad (\text{B.37})$$

och motsvarande för ett visköst brott blir

$$V[\sigma_d] = c_d^2 \left[ \frac{V_o}{V_d} \right]^{2/k} \left[ \frac{D_o}{D_d} \right]^{2/h} \left[ \Gamma(1 + \frac{2}{h}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{h}) \right] \quad (\text{B.38})$$

Variansen beter sig på ett liknande sätt som medelvärdet vilket innebär att spridningen i hållfasthet minskar med ökande volym under påkänning och med ökande varaktighet av en påkänning.

En generalisering av uttrycken för hållfasthet erhålls genom att göra

ytterligare en variabeltransformation och introducera en referenshållfasthet  $\sigma_0$ . Då kan uttrycken för medelvärden skrivas som

$$\sigma_i = \sigma_{0i} \left( a + b \left[ \frac{V_0}{V_i} \right]^{1/k} \left[ \frac{D_0}{D_i} \right]^{1/h} \right) \quad (\text{B.39})$$

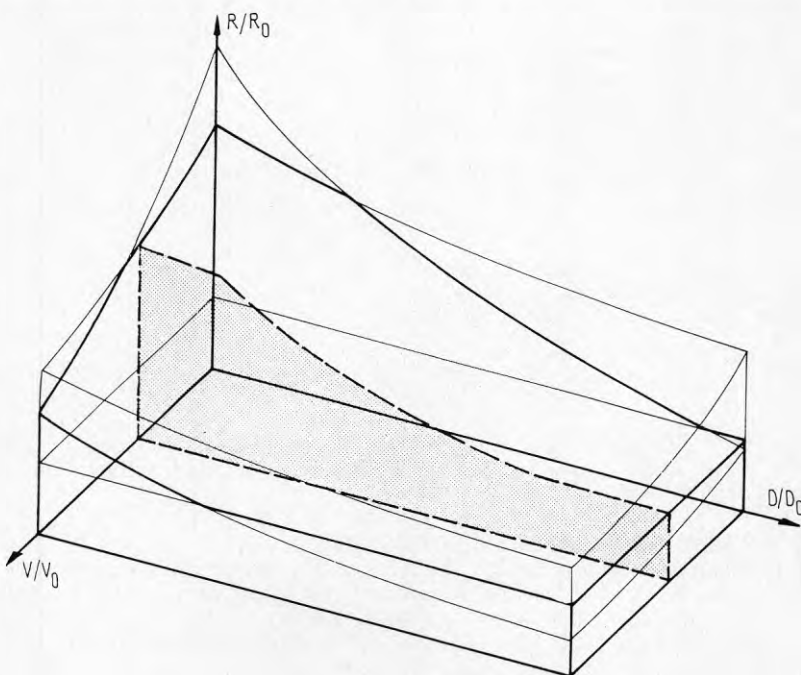
där index  $i$  står för  $x$  eller  $d$  motsvarande ett en volymspåkänning i  $x$ -led respektive en distortionspåkänning ger upphov till brott. Genom samma variabeltransformationer kan en variationskoefficient, standardavvikelsen/medelvärdet, uttryckas som

$$\text{c.o.v.} = \frac{b \left[ \frac{V_0}{V_i} \right]^{1/k} \left[ \frac{D_0}{D_i} \right]^{1/h}}{a + b \left[ \frac{V_0}{V_i} \right]^{1/k} \left[ \frac{D_0}{D_i} \right]^{1/h}} G(k,h) \quad (\text{B.40})$$

Funktionen  $G(k,h)$  innehåller gamma funktioner med avseende på  $k$  eller  $h$ . Den första termen i en serieutveckling kan skrivas som

$$G(\gamma) = \frac{\pi}{\gamma\sqrt{6}} \quad (\text{B.41})$$

vilket är en acceptabel approximation för  $\gamma$  ( $k$  eller  $h$ ) > cirka 6. Då  $\gamma$  går mot 0, vilket avspeglar totalt kaos, blir spridningen i brotthållfastheten oändlig och då  $\gamma$  går mot  $\infty$  blir spridningen försumbar. Ekvationerna B.39 och B.40 kan användas för att skatta parametrarna  $k$  och  $h$  och därmed också effekten av storleks- och tidsberoenden.



Figur B.1 De två brottytorna som avspeglar brottmoderna volymstörningsbrott och distortionstörningsbrott uttryckta i relativ form.

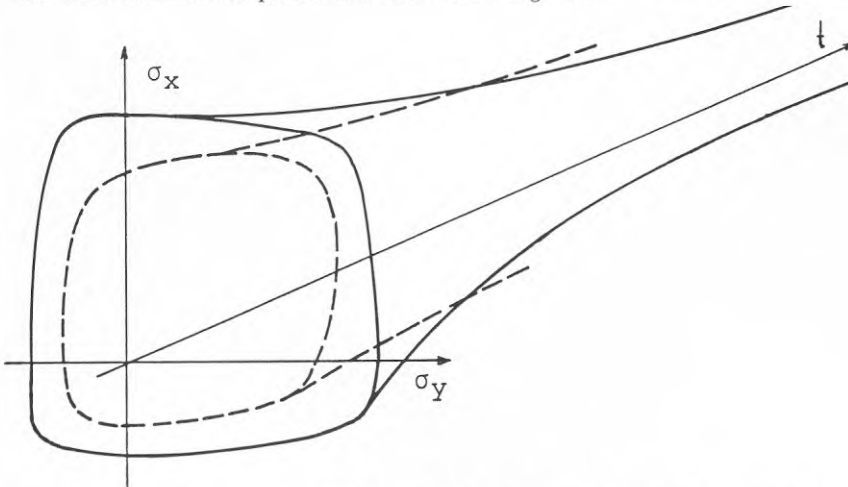
Ekvation B.39 motsvarar två brottytor som kan åskådliggöras på det sätt som visas i Fig. B.1. För ett elastiskt brott är  $a \approx 0$  och  $b \approx 1$  medan  $a > 0$  och  $b < 1$  för ett visköst brott. För en given volym under påkänning reduceras brottytan till två brottlinjer på det sätt som visas. Dessa brottlinjer avspeglar töjningskapacitetens tidsberoende.

### B.3.5 Flerdimensionellt påkänningstillstånd

En utvidgning till ett flerdimensionellt påkänningstillstånd innebär att tre normalpåkänningstermer och en effektiv distortionspåkänning ska beaktas. Detta motsvaras av en respons i materialet som kan beskrivas med ekv B.4. Genom att utnyttja samma metodik som i föregående avsnitt kan följande statistiska fördelning för brottsannolikheten bestämmas

$$F(\sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{V_x}{V_o}\left[\frac{D_x}{D_o}\right]^{k/h}\left[\frac{\sigma_x - r_v}{c_v}\right]^k - \frac{V_y}{V_o}\left[\frac{D_y}{D_o}\right]^{k/h}\left[\frac{\sigma_y - r_v}{c_v}\right]^k - \frac{V_z}{V_o}\left[\frac{D_z}{D_o}\right]^{k/h}\left[\frac{\sigma_z - r_v}{c_v}\right]^k - \frac{D_d}{D_o}\left[\frac{V_d}{V_o}\right]^{h/k}\left[\frac{\sigma_d - r_d}{c_d}\right]^h\right) \quad (\text{B.42})$$

där beteckningarna är en logisk utveckling från en till tre dimensioner. Genom att göra en lämplig variabeltransformation och uttrycka volympåkänningarna som funktion av den största påkänningen kan medelvärdet och variansen för ett flerdimensionellt påkänningstillstånd beräknas. Effekten av detta kan åskådliggöras som brottytor i två rumsdimensioner och en tidsdimension på det sätt som visas i Fig B.2.



Figur B.2 Brottytor för volymstöjningsbrott och distortionstöjningsbrott uttryckta i två rumsdimensioner och en tidsdimension.

### B.4 ORTOTROPA MATERIALEGENSKAPER

Inverkan av felaktigheter är av olika anledningar inte alltid slumpmässig i alla riktningar. Då ett riktningensberoende uppstår blir också töjningskapaciteten riktningensberoende och materialegenskaperna karakteriseras som ortotropa. Detta innebär att sannolikheten för att ett brott ska uppstå blir beroende på hur påkänningar introduceras i en kropp.

Ortotropa töjningsegenskaper kan beaktas på ett liknande sätt som för isotropa töjningsegenskaper då det gäller brotthållfastheten. Skillnaden ligger i att brotttöjningen blir riktningensberoende vilket innebär att storleks-effekten behöver delas upp i tre längseffekter. Olika brotttöjning i olika rikt-

ningar beaktas genom att definiera ett valt koordinatsystem så att det överensstämmer med materialegenskapens ortotropi. Mellan axlar kommer brotttöjningen att beskrivas med en superellips.

Med dessa förutsättningar kan en liknande härledning som för ett isotropt material göras av den statistiska fördelningen för brotttöjningen. Den väsentliga skillnaden för ett ortotropt material jämfört med ett isotropt material är att det ofta är nödvändigt att beakta ett tredimensionellt påkänningstillstånd. Detta på grund av att töjningskapaciteten i någon riktning som inte överensstämmer med huvudpåkänningsriktningen kan vara kraftigt reducerad. För ett ortotropt material kan ett brott mycket väl initieras i den riktning som har den lägsta töjningskapaciteten utan att påkänningarna är stora.

Nedan visas bara resultatet för ett endimensionellt påkänningstillstånd där det förutsätts att töjningskapaciteten i övriga riktningar inte är avgörande.

#### B.4.1 Endimensionellt påkänningstillstånd

För ett endimensionellt påkänningstillstånd där brotttöjningen i en riktning är avgörande, kan med utgångspunkt från ekv B.5, följande statistiska fördelning för brotttillståndet härledas

$$F_x(\sigma) = 1 - \exp\left(-\frac{L_{xx}}{L_o} \left[\frac{L_{xy}}{L_o}\right]^{k_x/k_y} \left[\frac{L_{xz}}{L_o}\right]^{k_x/k_z} \left[\frac{D_{xx}}{D_o}\right]^{k_x/h_x} \left[\frac{\sigma_x - r_x}{c_x}\right]^{k_x} - \frac{D_{dx}}{D_o} \left[\frac{L_{dx}}{L_o}\right]^{h_x/k_x} \left[\frac{L_{dy}}{L_o}\right]^{h_x/k_y} \left[\frac{L_{dz}}{L_o}\right]^{h_x/k_z} \left[\frac{\sigma_d - r_d}{c_d}\right]^{h_x}\right) \quad (\text{B.43})$$

där index  $i$  och  $j$  i  $L_{ij}$  står för respektive påkänningens riktning och dimensionens riktning. En jämförelse mellan ekv B.43 och B.19 som beskriver ett isotropt material visar att skillnaden huvudsakligen ligger i storleks-effekten. Då storleksparametrarna är identiska förenklas ekv. B.43 till samma uttryck som för ett isotropt material.

En utvärdering av volymen under påkänning och motsvarande varaktighet utförs på i princip samma sätt som för ett isotropt material. Ekvation B.43 differentieras och integreras över aktuella områden. Medelvärde på hållfastheten kan utvärderas med avseende på ett elastiskt brott eller visköst brott på samma sätt som för ett isotropt material. För ett elastiskt brott erhålls

$$E[\sigma_x] = r_x + c_x \left[\frac{L_o}{L_{xx}}\right]^{1/k_x} \left[\frac{L_o}{L_{xx}}\right]^{1/k_y} \left[\frac{L_o}{L_{xx}}\right]^{1/k_z} \left[\frac{D_o}{D_{xx}}\right]^{1/h_x} \Gamma\left(1 + \frac{1}{k_x}\right) \quad (\text{B.44})$$

och motsvarande uttryck för ett visköst brott blir

$$E[\sigma_d] = r_d + c_d \left[\frac{L_o}{L_{dx}}\right]^{1/k_x} \left[\frac{L_o}{L_{dy}}\right]^{1/k_y} \left[\frac{L_o}{L_{dz}}\right]^{1/k_z} \left[\frac{D_o}{D_{dx}}\right]^{1/h_x} \Gamma\left(1 + \frac{1}{h_x}\right) \quad (\text{B.45})$$

Variansen kan också beräknas på ett liknande sätt som för ett isotropt material vilket leder till uttryck där volymseffekten är separerad i tre delar. I allt väsentligt är brottbeteendet för ortotropa material likartat det som gäller för isotropa material.









R10:1992

ISBN 91-540-5418-4

Byggforskningsrådet, Stockholm

Art.nr: 6812010

Abonnemangsgrupp:  
V. Anläggningsteknik  
Z. Konstruktioner och material

Distribution:  
Svensk Byggtjänst  
171 88 Solna

Cirka pris: 70 kr exkl moms