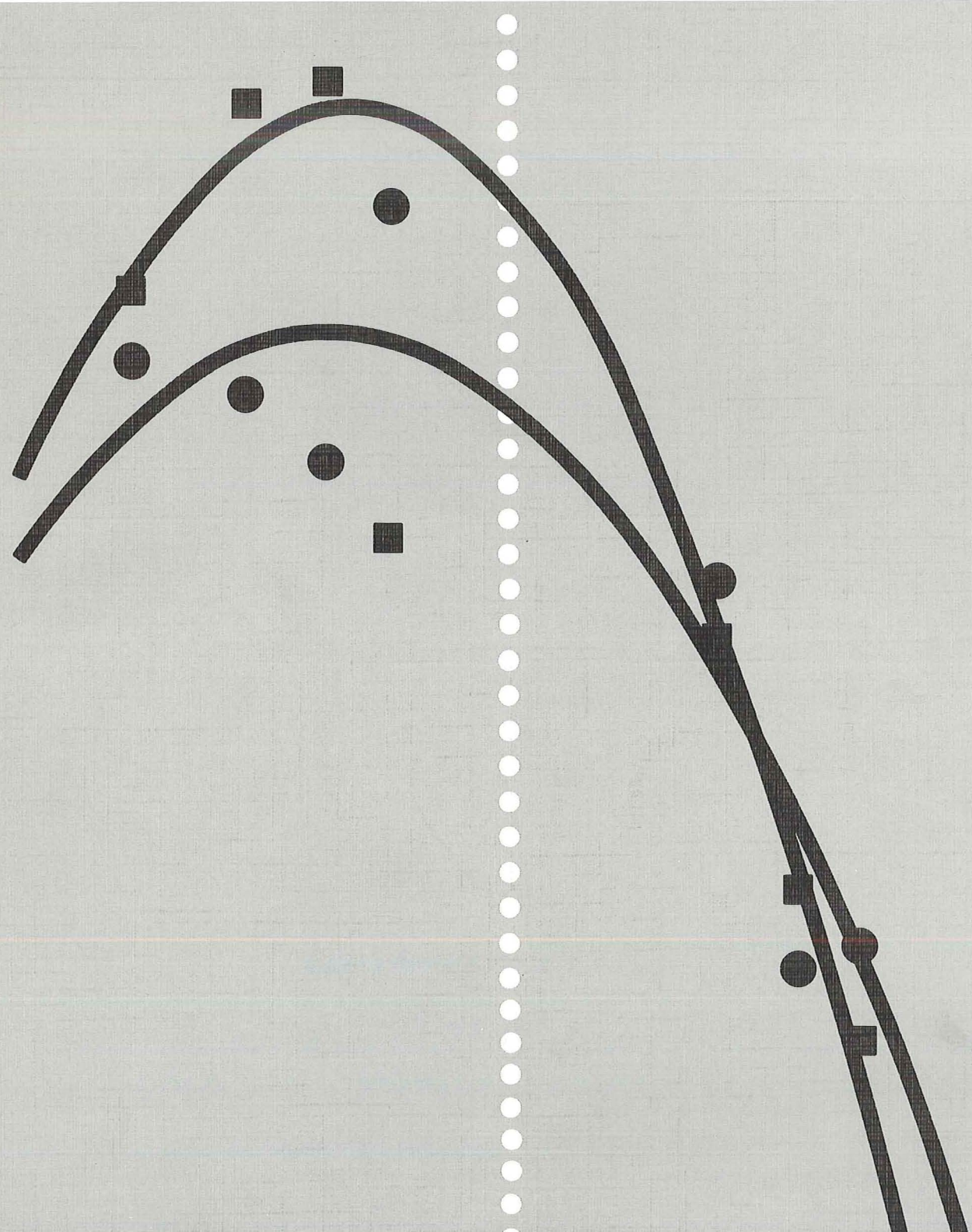


SBI - rapport

# Fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialers levetid



SBI-RAPPORT 231 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1993



# Fiberarmedede, cementbaserede kompositmaterialers levetid

ERIK STOKLUND LARSEN

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

00444 P

EX-1

10 AUG. 1993



**SBI-rapporter** er beretninger om afsluttede forskningsprojekter.

**SBI-publikationer** udgives i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Byplanlægning og Beton. Publikationerne fås gennem boghandelen eller ved at tegne et SBI-abonnement. Institutets årsberetning og publikationskatalog er gratis og kan rekvireres fra SBI.

**SBI-abonnement** er en rabatordning med mange fordele for dem, der vil sikre sig løbende orientering om væsentlige udgivelser inden for byggeforskningsområdet. Ring til SBI og hør nærmere.

ISBN 87-563-0842-6.  
ISSN 0573-9985.  
Pris: Kr. 170,00 inkl. 25 pct. moms.  
Oplag: 500.  
Renskrivning: Mona L. Jantzen.  
Tegninger: Børge Holmen.  
Omslag: Henning Holmsted.  
Tryk: Dyva Bogtryk, Glostrup.

Statens Byggeforskningsinstitut,  
Postboks 119, 2970 Hørsholm.  
Telefon 42 86 55 33.

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen:  
*SBI-rapport 231: Fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialers levetid. 1993.*

# Indhold

Forord .....	4
Sammenfatning og konklusion .....	5
Summary .....	9
Indledning .....	12
Karakteristik af kompositmaterialet .....	14
Fibre .....	15
Matrix .....	21
Modenhed .....	23
Svind .....	26
Permeabilitet .....	27
Fremstilling og udførelse .....	29
Vejrligspåvirkninger .....	30
Strålingseffekter .....	30
Temperaturer .....	30
Vand .....	34
Opfugtning og udtørring .....	35
Frost-tø .....	38
Kemiske påvirkninger .....	42
Lastpåvirkninger .....	43
Krybning .....	43
Træthedsbrud .....	46
Spændingskorrosion .....	46
Slid .....	48
Termiske påvirkninger (brand) .....	50
Referencer .....	51
Appendix: Prøvningsmetoder - bestandighed, ydeevne .....	56
Tyndpladeprodukter .....	56
Fiberarmeret beton .....	64
Ældning med vejrsimulatorer .....	70

# Forord

I denne rapport gennemgås en række forhold af betydning for fiberarmerede, cementbundne kompositmaterialers levetid. Udgangspunktet for rapporten er et ph.d.-studium på SBI, som blev gennemført i perioden 1988-1991. I løbet af ph.d.-studiet blev der igangsat langtidsforsøg, som ikke blev afrapporteret i ph.d.-afhandlingen. Disse forsøgsresultater er med i denne rapport, ligesom der også præsenteres et omfattende materiale fra en gennemgang af inden- og udenlandsk litteratur. Endelig omtales en række prøvningsstandarder, som kan anvendes til vurdering af ydeevne og holdbarhed.

Rapporten kan ses som en opsummering af de væsentligste resultater fra ph.d.-studiet, samt som en state-of-the-art rapport på området levetid for fiberarmerede, cementbundne kompositmaterialer.

Det skal betones, at de enkelte afsnits omfang ikke afspejler deres betydning, men kun kan ses som et udtryk for, hvilken forskningsaktivitet der har været på de enkelte områder i ind- og udland. Eksempelvis er afsnittet om fremstilling og udførelse ganske kort til trods for, at det efter forfatterens mening frembyder et af de mest betydningsfulde problemer i forbindelse med holdbarhed, og som derfor kræver en yderligere forskningsindsats.

Statens Byggeforskningsinstitut  
Afdelingen for Materialer og Konstruktioner, juni 1993  
Georg Christensen, forskningschef

# Sammenfatning og konklusion

Levetiden af et fiberarmeret, cementbaseret kompositmateriale afhænger af mange forhold, f.eks. iboende faktorer som karakteristikkene af fibre og matrix. Endvidere er fremstilling og udførelse vigtige faktorer. Ydre forhold som vejrtilspåvirkninger, kemiske-, biologiske-, spændings-, slid-, termiske- og brugerfaktorer er også faktorer, der vil kunne influere på levetiden.

Ofte vil der være synergieffekter imellem de enkelte faktorer. Nogle som virker sådan, at nedbrydningen af kompositmaterialet forværres mere end summen af de enkelte faktorer ville have gjort. Andre modvirker hinanden. Selve synergieffekten imellem de ældende faktorer er kun ganske lidt belyst i nærværende fremstilling, og det er stadig et meget uafklaret område, hvor der er behov for yderligere forskning.

Generelt set er levetiden af de fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer mindst lige så god som tilsvarende uarmerede materialer. Ved indblanding af fibre opnår man på mange områder en række fordele i forhold til det uarmerede materiale. Et klassisk eksempel er asbestcement, der i vort klima har vist fortrinlige langtidsegenskaber, hvor den tilsvarende matrix uden fiberarmering ville nedbrydes på ganske kort tid.

Når en betonblanding tilsættes fibre, viser der sig også ulemper i form af reduceret bearbejdelse og problemer ved udstøbningen/fremstillingen. Fibre som revnevisere, fibre der leder fugt ind i materialet, fibre der er ekstremt fugtfølsomme, hvilket medfører fugtfølsomt materiale, samt fibre der ødelægger luftboblestrukturen, er eksempler på nogle af de ulemper, der er observeret.

I nærværende rapport vises, hvordan de enkelte egenskaber hos de cementbaserede kompositmaterialer påvirkes ved fiberindblanding. Eksempelvis vises, at med naturlig eksponering er frostbestandigheden af cementbaserede kompositmaterialer afhængig af mængden af frysbar vand samt lagringshistorien, før frysning indtræder. Endvidere kan det sluttes, at et velfordelt poresystem øger frostbestandigheden af cementbaserede kompositmaterialer, hvorimod fiberindblanding ikke giver nogen forbedring af frostbestandigheden. Ved fiberbeton ( $v/c \sim 0,4 - 0,5$ ) er det nødvendigt at iblande ca. 6 % velfordelt luft (målt på den friske beton) for at opnå tilfredsstillende frostbestandighed.

Målinger af kompositmaterialernes mekaniske egenskaber viser forskellige styrke- og sejhedsudviklinger afhængig af komposittypen.

Natur- og glasfiberarmerede cementbundne kompositmaterialer mister styrke og sejhed, når de ældes, hvorimod stål- og polypropylenfiberarmerede kompositmaterialer viser voksende styrker og sejheder.

Stål og polypropylenfiberarmeret beton viser en tendens til ca. 20-40 % forøgelse af styrke og sejhed efter 10 års ældning. Dette forhold er gældende for ubelastede prøver, men den samme tendens har vist sig for belastede prøver. Materialerne var belastede op til 65 % af 28-døgnsstyrken i bøjning i ca. 1 år og var eksponerede ved forskellige klimafor-

hold, herunder bl.a. udendørs klima. Generelt er disse meget tætte materialer ganske ufølsomme over for klimapåvirkninger, og betonens hydratisering forløber kun afhængig af modenhedsalderen.

Reduktionen i styrke og sejhed af glasfiberarmerede (Portland)cementbundne materialer kan accelereres, når prøveemnerne konditioneres i varmt vand. En sådan konditionering viser, at 28-døgnssejheden nedsættes til ca. 1/3 svarende til at prøvelegemerne havde været udsat for 35-45 års naturlig eksponering.

Autoklaverede cementbundne cellulosearmerede tyndplade kompositmaterialer viser reduktioner i de mekaniske egenskaber med tiden i udendørs klima. En reduktion af sejheden på 1/3 kan forventes efter ca. 40 år.

Tabel 1. Iboende og ydre faktorer der har indflydelse på levetiden af fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer.

Iboende faktorer	Karakteristik af kompositmaterialet	Typen af fiber, matrix og tilslag (størrelse og fordeling)
	Fremstillingsproces	Fremstillingsmetode og udførelse
	Mekaniske og kemiske egenskaber	Styrke, stivhed, sejhed, pH-værdi, osv.
Ydre faktorer	Vejrligspåvirkninger	Stråling, temperaturer, vand, CO <sub>2</sub> , opfugtning og udtørring, frost-tø, osv.
	Specifikke kemiske faktorer	Påvirkninger af faste, flydende og/eller gasformige kemikalier
	Biologiske påvirkninger	Påvirkninger fra mikroorganismer, svampe og bakterier
	Lastpåvirkninger	Vedvarende belastning (krybning), periodiske belastninger (udmattelse) eller tilfældige belastninger
	Slid	Påvirkninger af trafik, vand, osv.
	Termiske påvirkninger	Høje temperaturer samt brandpåvirkninger iøvrigt.
	Brugerfaktorer	Design af produktet/systemet, installation og vedligeholdelsesprocedurer, misbrug

Tabel 2. Valget af fibertype har stor indflydelse på levetiden, da der til hver enkelt fibertype knytter sig forskellige nedbrydningsfaktorer og mekanismer som angivet nedenfor.

Stålfibre	Korrosion af fibre
Glasfibre	Alkalikorrosion på fibre Indlejring af reaktionsprodukter mellem glasfibre i bundter
Kulfibre	Modstand imod høje temperaturer (Indlejring af reaktionsprodukter i fibre)
Asbestfibre	(Indlejring af reaktionsprodukter i fibre)
Polymere fibre	Termisk modstand (Følsomme overfor sollys) (Alkalisk nedbrydning af aramidfibre)
Naturfibre	Alkalikorrosion af fibre Indlejring af reaktionsprodukter i fibre (Biologisk nedbrydning)
Cellulosefibre	Indlejring af reaktionsprodukter i fibre (for normalt lagrede produkter)

Der findes et stort antal fibertyper, og der er til den enkelte fiber knyttet en eller flere nedbrydningsmekanismer, der ofte ikke ses hos andre typer af fibre. Nedenfor kommenteres de vigtigste nedbrydningsfaktorer hos de enkelte fibertyper.

For *stålfibre* er korrosion den vigtigste faktor. Fibre på overflader og i større revner korroderer, men uden skader til følge. Undersøgelser har vist, at stålfibre i revner med revnevidder under 0,13 mm ikke korroderer. Et Cl/OH<sup>-</sup> forhold på 0,61 kan godt overskrides, uden at der opstår korrosion af stålfibre i beton. Ved korrosion af fibre ændrer brudmekanikken sig fra fiberudtrækning til fiberbrud, med markant reduktion i sejhed af selve kompositmaterialet.

*Glasfibres* holdbarhedsproblem i den alkaliske matrix kræver kun våd eksponering for at manifestere sig. Det har vist sig, at der er to hovednedbrydningsmekanismer, der virker:

- i) Alkalisk korrosion (kemisk nedbrydning)
- ii) Udfældning af hydratiseringsprodukter i glasfiberbundterne (glas-fibre leveres i såkaldte "strands" = bundter, med ca. 200 fibre i et enkelt bundt).

Effekten af de to nedbrydningsmekanismer viser sig ved tab i styrke og sejhed af kompositmaterialet.

Langtidsegenskaberne af *kulfibre* er kun meget lidt undersøgt, men i laboratorieforsøg har fibrene udvist god resistens over for alkali. De nyeste forskningsresultater i udlandet har vist en tilsvarende effekt som hos glasfibre, nemlig at der sker en indlejring af hydratiseringsprodukter i fibrene med tab af styrke og sejhed til følge.

Mange års praktiske erfaringer har bevist *asbestfibrens* gode langtidsegenskaber. Desværre har det vist sig, at asbestfibren er meget sundhedsskadelig, og den må derfor ikke anvendes herhjemme. Den ældning, der trods alt sker i asbestcement, er ikke klarlagt, men to mekanismer er foreslået:

- i) Delvis kemisk ændring af fibrens overflade ved karbonatisering.
- ii) Udfældning af reaktionsprodukter i fibren (imellem parallelle planer i fibren).

På langt sigt er der ikke konstateret nogen styrkereduktion, men kun en reduktion af sejheden under naturlige klimaeksponeringer af asbestcement.

De *polymere* fibre er mange, og her kan kort nævnes: polypropylen-, polyvinylalkohol-, nylon-, aramid-, akryl-, og polyethylenfibre som nogle af de typer, der har været anvendt som armering af cementbaserede materialer. De polymere fibres holdbarhedsproblem er, at de mister deres virkning ved højere temperaturer. Temperaturer højere end 100 °C (200 °C for aramidfibre) medfører, at trækstyrken reduceres kraftigt, hvilket skyldes blødgøring af fibren. Ved indblanding i en cementbaseret matrix er fibre beskyttet mod den for polymere materialer skadelige UV-stråling fra sollys. Med undtagelse af aramidfibre, der har vist en reduktion af styrken (ca. 50 % efter 20 år), har polymere fibre vist sig at være særdeles alkaliresistente.

Nedbrydningsmekanismerne for *naturfibre*, f.eks. sisalfibre, i cement har vist sig at være følgende:

- i) Kemisk nedbrydning af hemicellulose og lignin (vedstof) i den midterste lamel af fibre, dvs. nedbrydning af forbindelsesleddet mellem de enkelte celler.
- ii) Ændringer af matrix kan forårsage mineralisering (forstening) af naturfibre, f.eks. kan hydratiseringsprodukter "imprægnerer" fibren og gøre den sprød.

Erstatning af Portland-cement med silica (ca. 45 %) reducerer alkaliniteten af matrix og eliminerer den kemiske nedbrydning af fibren. Biologiske angreb af naturfiberarmede kompositmaterialer har hidtil vist sig at være overfladeproblemer.

*Cellulosefibre* skulle være mere holdbare i alkaliske omgivelser end naturfibre, da man på forhånd, ad kemisk vej, har fjernet den midterste lamel inklusive lignin og hemicellulose. Naturlig hærdning af cellulosefiberarmede cementbaserede produkter kan medføre forstening af fibre, idet fiberhulrummet udfyldes med reaktionsprodukter (hydratisering eller karbonatisering), og cellevæggen imprægneres. Autoklaverede produkter af cellulosecement får kun meget små mikrostrukturelle ændringer ved ældning, og man kan sige, at strukturen fra start er låst fast.

## Summary

### SBI Report 231: Service life of fibre reinforced cementitious composites

The service life of a fibre reinforced cementitious composite depends on many factors, e.g. inherent factors such as the characteristics of fibre and matrix, and the manufacturing process are very important. Environmental factors such as weathering-, chemical-, biological-, stress-, abrasion-, thermal- and user factors all influence the service life.

Often there will be synergistic effects between the different factors, some will reduce each other, others will be increased to a very limited extent. The synergistic effects are still investigated.

Generally the service life of fibre reinforced cementitious composites is the same as that of the unreinforced cementitious composites. With the fibre reinforcement there are some problems such as reduced manufacturing, durability etc.

The purpose of the present report is to show some of the benefits and problems which exist in the properties of the fibre reinforced cementitious composites. One example is the freeze-thaw resistance, which is not affected by fibre reinforcement. Tests on quality concretes (v/c 0.4 - 0.5) indicate that a proper air entrainment and an air content of approximately 4-6 % measured in the fresh concrete result in good freeze-thaw resistance.

### Durability of fibre

Steel fibres	Corrosion attack
Glass fibres	Alkali corrosion Growth of hydration products between glass filaments
Carbon fibres	Thermal and fire resistance
Asbestos fibres	(In natural weathering no strength reduction but sometimes loss in toughness occurs)
Polymer fibres	Thermal and fire resistance (Sensitive to sunlight) (Alkali attack on aramid fibres)
Natural fibres	Alkali corrosion Petrification of fibres (Biological attack)
Cellulose fibres	Petrification of fibres (normally cured composites)

## Durability of composite

Characteristics of the composite	Type of binder, fibre and aggregate (max size and distribution)
Manufacturing processes	Applications and workmanship
Mechanical and chemical properties	Strength, stiffness, fracture energy, pH-value, etc.
Weathering factors	Effects of radiation, temperature, water, air constituents and contaminants, wetting and drying, freeze-thaw, etc.
Specific chemical factors	Action of solid, liquid and/or gas chemicals
Biological factors	Actions of microorganisms, fungi or bacteria
Load factors	Effects of sustained stress (creep), periodic stress (fatigue) or random stress (physical action of wind, water, traffic, etc.)
Abrasion or wear factors	Action of traffic, water, etc.
Thermal or fire factors	High temperatures and fire action
User factors	Design of system, installation and maintenance procedures, abuse by the users

Many fibres of different mechanical, physical and chemical properties have been considered for reinforcement of cementitious materials. The basic requirements of fibres, when improvements in strength and crack resistance are required, are high tensile strength and elastic modulus, adequate extensibility, reasonable bond at the interface and good chemical stability. Additionally, fibres should have the ability to bear stress for a long period of time.

*Steel fibres* in concretes show no sign of corrosion and submerged steel fibre reinforced concrete has no durability problems. Only surface fibres and fibres situated in cracks have corroded (crack widths larger than 0.13 mm), and the corrosion did not lead to surface spalling or adverse effect on the structural integrity of the concrete. Neither the activation level of 0.41 % Cl<sup>-</sup> (by weight of cement), nor the value of 0.61 for the Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> ratio for the initiation of corrosion apply to steel fibre reinforced concrete.

The *glass fibre* reinforced composite durability problem is built into the internal structure of conventional glass fibre Portland cement composites and requires only wet exposure to manifest itself. The problem is shown by loss in tensile strength and toughness of the composite. There are two main degradation mechanisms:

- i) chemical attack of the glass fibres;
- ii) Growth of hydration products between the glass filaments.

Only few short term test results are available for the assessment of *carbon fibres*. However, short term accelerated tests have shown that it seems to be the same degradation mechanism as for glass fibres; growth of hydration products on/in fibres.

Many years of practical experience with asbestos-cement have shown that this composite has excellent long-term performance. Field experience studies suggest that no strength reduction is expected in natural weathering, although a loss in toughness may sometimes occur. The ageing mechanism of asbestos-cement is not clear. Two stages of carbonation effects have been proposed.

Firstly, partial carbonation of asbestos fibres on the surface of the fibres takes place. Secondly, crystallization of reaction products in the interface along the cleavage planes between the fibres.

Great many types of *polymer fibres* have been used as reinforcement in cementitious composites, fibres used are polypropylene, polyvinylalcohol, nylon, aramid, acrylic, polyethylene etc. The main problem is high temperatures. At temperatures higher than 100° C the fibres show reductions in strength and toughness due to the softening of the fibres. Polymer fibres become degraded by prolonged exposure to UV-radiation if the fibres are not protected by the matrix.

Proposed degradation mechanisms of *natural fibres* in cement are

- i) Degradation of fibres due to alkaline attack;
- ii) Changes in the matrix-fibre interface and petrification (mineralization) of the fibre.

It is suggested that the main degradation mechanism is dissolution and decomposition of the hemicellulose and lignin in the middle lamella, thus breaking the link between individual fibre cells. The breakdown of the long fibre into small unit cells would lead to the loss of its reinforcing efficiency. The degradation of the fibres leads to loss in strength and toughness. The rate of embrittlement is dependent on humidity and temperature, factors which control the transport and concentration of alkaline pore water to the fibre. Replacement of Portland cement with silica fume (approximately 45 %) reduced the loss in toughness.

*Cellulose fibres* are more durable in alkaline environment than natural fibres because the chemical treatment removes the weakest part of the natural fibre, namely the middle lamella, including the lignin and hemicellulose. Naturally cured composites lead to petrification of the fibre (due to carbonation and hydration) filling the fibre cavity with reaction products and probably impregnating the fibre cell wall, which can lead to an increase of the bond between the fibres and the matrix. Petrification of the fibre apparently increases its strength and rigidity and leads to increase in strength and modulus of elasticity of the composite. The increase in strength was accompanied by decrease in toughness.

# Indledning

Ved levetid forstås i denne sammenhæng et materiales, en konstruktions eller et systems evne til i et bestemt miljø at fungere som tilsigtet i et givet tidsrum.

Levetidsproblemet er yderst komplekst og meget ringe belyst. Materialvalg, konstruktionsudformning og arbejdsudførelse er ligesom drift og vedligeholdelse eksempler på faktorer, der har indflydelse på levetiden. Endelig vil det ofte være sådan, at faktorerne virker med en vis synergi-effekt, her kan man f.eks. tænke på frost-tø-påvirkning af beton med svindrevner, som kan resultere i en dramatisk hurtig nedbrydning.

Ved udvikling af nye recepter er det søgt at forbedre bestandigheden af de cementbaserede kompositmaterialer. De nye recepter opnås f.eks. ved tilsætning af fillermaterialer, som giver en tættere matrix samt fiberindblanding, der eksempelvis i små doseringer er med til at forhindre revnedannelser ved plastisk- og udtørringssvind.

Formålet med nærværende rapport er:

- At fremhæve de vigtigste iboende og ydre faktorer og mekanismer, der har indflydelse på levetiden af fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer.
- At give så specifik information som muligt om levetiden af fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer baseret på egne undersøgelser [Larsen, 92] og den tilgængelige litteratur.

Materialernes nedbrydning viser sig som regel efter en meget lang periode, og da erfaringerne med at forudsige nedbrydning på basis af accelererede forsøg ikke er gode, er langtidsforsøg anvendt i stor udstrækning. Ideen er her at anvende meget følsomme prøvningsmetoder, der registrerer ganske små tidsafhængige ændringer og ekstrapolere på grundlag heraf. Som indikator for nedbrydningen er ændringen i brudenergi en god størrelse, da det er en egenskab, der er meget følsom over for ændringer.

Accelererede prøvninger kan dog også anvendes, eksempelvis til vurdering af materialernes frostbestandighed.

En række vigtige iboende og ydre faktorer har indflydelse på de cementbaserede kompositmaterialers levetid. Her kan kort nævnes:

## Kompositmaterialets sammensætning

Typen af binder, fibertype og tilslag (maks. størrelse og størrelsesfordeling)

## Udførelsen

Produktionsmetoder og konditioneringsforhold

## Mekaniske og kemiske egenskaber

Styrke, stivhed, brudenergi, pH-værdi, osv.

## Klimapåvirkninger

Stråling, temperatur, vand, luftforureninger, opfugtning og udtørring, frost-tø, osv.

## Kemiske påvirkninger

Faste, flydende eller gasformige kemikalier

## Biologiske påvirkninger

Mikroorganismer, svampe og bakterier

## Lastpåvirkninger

Vedvarende (krybning), dynamisk (udmattelse) og/eller tilfældige lastpåvirkninger

## Slid

Påvirkninger fra trafik, vand, is, osv.

## Termiske påvirkninger

Høje temperaturer

## Brugerfaktorer

Design, installation, vedligeholdelse, misbrug, osv.

Nærværende rapport er baseret på litteraturstudier samt egne forsøg (både publicerede og ikke publicerede) og er gennemført på SBI i perioden 1988-92. Litteraturstudiet og de fleste af forsøgene er nærmere beskrevet med henvisninger i *SBI Report 222: Service life prediction and fibre reinforced cementitious composites, 1992* [Larsen, 92].

Vægtningen af de enkelte afsnit vil ikke afspejle vigtigheden af afsnittet, men vil mere være et udtryk for hvor viden er tilgængelig.



# Karakteristik af kompositmaterialet

I det følgende beskrives indflydelsen af kompositmaterialets hovedbestandele på materialeegenskaberne med vægt på de hovedbestandele, der har betydning for levetiden. Hovedbestandelene er fibre og matrix, men herudover er det også nødvendigt at se på alderen af materialet, kendetegnet ved modenheden. Ligeledes nævnes hvorledes svind, selvudtørring og permeabilitet kan have indflydelse på levetiden.

I rapporten gives resultater fra undersøgelser af to typer fiberarmeret beton (v/c ~ 0,45). De to typer benævnes SF og F og er armeret med henholdsvis 1 vol% polypropylenfibre plus 1 vol% stålfibre og 2 vol% polypropylenfibre. Begge typer beton er fabriksfremstillede, udstøbte i forme og vibrerede på vibratorbord.

Tabel 3. Sammensætningen af de to typer fiberarmeret beton, SF og F (kg/m<sup>3</sup>).

	SF	F
Cement	390	470
Flyveaske	100	100
Mikrosilika (slurry)	70	70
Vand	135	180
Søsand 0/4 mm	630	410
Granit 2/16 mm	790	790
Polypropylenfibre	10	20
Stålfibre	75	---

Tabel 4. Udvikling i trykstyrken af fiberarmeret beton. Middelværdi og spredning.

Alder (døgn)	Trykstyrke (MPa)			
	F-serien		SF-serien	
	Vandlagring 20 °C	Lagring ved 65 % RF, 23 °C	Vandlagring 20 °C	Lagring ved 65 % RF, 23 °C
2	14,2 (,44)	14,2 (1,5)	22,2 (,95)	21,0 (,47)
7	22,9 (,99)	23,4 (2,0)	32,6 (1,2)	32,5 (1,6)
28	35,1 (2,4)	30,0 (1,6)	45,6 (2,0)	42,5 (,32)
91	40,9 (---)	----- (---)	53,6 (---)	45,2 (---)

Trykstyrkeudviklingen af de to typer fiberarmeret beton er angivet i tabel 4. Almindeligvis er trykstyrken meget lidt følsom over for fiberindblanding i beton. Årsagen til at SF-serien har højere trykstyrke kan bl.a. skyldes et lavere vand-pulver-forhold, forskelle i luftindholdet i den friske beton (10 % i SF-serien modsat 12 % i F-serien) og/eller et lavere polypropylenfiberindhold.

Ligeledes præsenteres resultater fra undersøgelser af alkaliresistente (AR) glasfiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer, med og uden polymere tilsætningsstoffer. Disse produkter er opsprøjtede i en proces, hvor fibre tilsættes mørtlen umiddelbart før kompositmaterialet

forlader sprøjtemundstykket med stor hastighed. Fiberindholdet er her ca. 5 vægt% og v/c ca. 0,3.

Endelig præsenteres resultater fra undersøgelser fra et autoklaveret tyndpladeprodukt armeret med ca. 10 vægt% cellulosefibre.

## Fibre

Materialeegenskaberne af et fiberarmeret, cementbaseret kompositmateriale afhænger først og fremmest af fibertypen, fiber materialet, fiberlængden, fiber diameteren, fiberorienteringen og fiber mængden. Fiberbinding i matrixen og forholdene i overgangszonen imellem fiberen og matrix vil influere på materialeegenskaberne. Forholdene i overgangszonen er afhængig af fibertypen og fremstillingsmetoden. Undersøgelser har vist, at mikrostrukturen i denne zone er mere porøs end den omkringliggende matrix, hvilket kan skyldes følgende effekter:

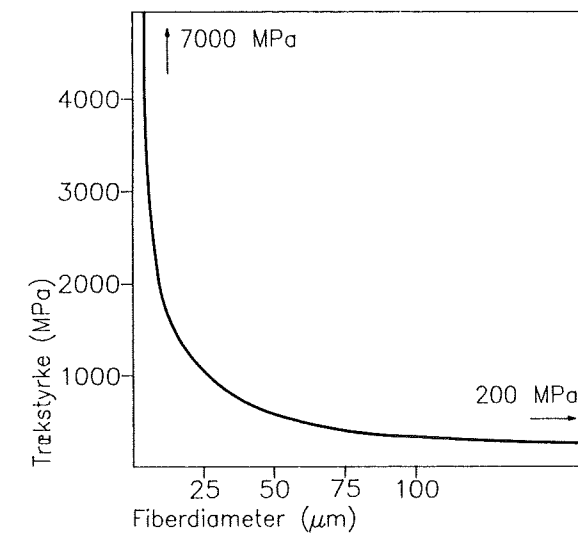
- i) Bleeding og indkapsling af vand omkring den armerende fiber.
- ii) Ringe pakning af cementkornene i en zone 20 - 40 μm fra fiberoverfladen.

Mikrostrukturen i overgangszonen vil afhænge af, om der er tale om enkeltfibre (f.eks. stålfibre) eller bundtede fibre (f.eks. glasfibre). Ved enkeltfibre vil hele overfladen være i kontakt med matrix, hvorimod det kun er de yderste fibre, der er i kontakt med matrix, når der er tale om bundtede fibre.

## Fiber diameter

Glasfibres styrke har vist sig at være afhængig af fiber diameteren, idet der opnås større styrke ved mindre fiber diameter (jf. figur 1). Dette forhold skyldes, at det er nemmere at fremstille tynde fibre med få overfladefejl og skader. Af samme årsag er fibre meget følsomme over for en hård behandling, før de er støbt ind i matrix.

Som det ses af det følgende, har diameteren også indflydelse på fibrens virkning og på den såkaldte *kritiske længde*, dvs. den længde, hvorunder en fiber trækkes ud og over den kritiske længde, hvor der sker fiberbrud.



Figur 1. Trækstyrke af glasfibre som funktion af fiber diameteren [Nordforsk, 77].

### Fiberlængde

Effekten af fibrenes længde defineres gennem den såkaldte kritiske længde. Ved den kritiske længde forstås den længde, ved hvilken der starter en udtrækning af fibren eller en forskydning af planer, uden at der sker brud i fibren. Dette sker, når [Krenchel, 64]:

$$l < l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{2\tau}$$

hvor  $d$  er fiberdiametere,  $\sigma_f$  er trækstyrken af fibren, og  $\tau$  er forskydningsstyrken. Overføringslængden er defineret som den halve kritiske længde,  $l_c/2$ .

### Fibervolumen

I fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer er fibrenes brudtøjning almindeligvis større end matrixens brudtøjning (dvs  $\epsilon_{f,u} > \epsilon_{m,u}$ ). Når matrix revner, kan fibre enten optage større kræfter, eller kompositmaterialet revner i mindre stykker. Det minimale eller kritiske fibervolumen, der skal til for at modstå en mekanisk statisk last efter at matrix er begyndt at revne, er givet ved [Beaudoin, 90]:

$$V_{CR} = \frac{\sigma_{m,u}}{\sigma_{m,u} + (\sigma_{f,u} - \sigma'_f)}$$

hvor  $\sigma'_f$  er spændingen på fibren, når matrix bryder.  $\sigma_{m,u}$  og  $\sigma_{f,u}$  er maksimal styrke af henholdsvis matrix og fiber.

Det kritiske fibervolumen i beton er beregnet til ca 0,31; 0,40 og 0,75 for stål-, glas- og polypropylenfibre [Beaudoin, 90].

### Afstandsfaktor

En geometrisk størrelse, der har stor betydning for kompositens ydeevne, er afstanden imellem fibre. Ved at antage en homogen fordeling af fibre kan den statistiske middelfiberafstand beregnes. For cylindriske fibre er fiberafstandsfaktoren  $S$  givet ved [Krenchel, 75]:

$$S = K \cdot \frac{d}{\sqrt{V_f}}$$

hvor  $d$  er fiberdiameter, og  $V_f$  er fibervolumen.  $K$  er en konstant og varierer imellem 0,8 og 1,2 afhængig af fiberorienteringen [Krenchel, 75].

### Fiberorientering

Fibrenes effekt er afhængig af fiberorienteringen (jf. tabel 1). Fibrene kan orienteres i matrixen i én retning, i et plan eller fordeles tilfældigt i tre dimensioner (3D). Fordelingen er produktionsafhængig, ligesom den er afhængig af, om der anvendes enkeltfibre, kontinuerlige fibre, net eller ark.

Tabel 5. Effekten af fiberorienteringen på kompositstyrken [Fördös, 79].

Fiberorientering	Effektivitet
1D parallelle	100%
2D retvinklet i planet	25% - 50%
2D tilfældigt i planet	25% - 40%
3D tilfældigt i rummet	15% - 20%

### Fibertype

Mange fibre med forskellige fysiske og kemiske egenskaber er blevet anvendt som armering af cementbaserede materialer. Valget af fibertype har stor indflydelse på levetiden, da der til hver enkelt fibertype knytter sig forskellige nedbrydningsfaktorer og -mekanismer.

For *stålfibre* er korrosion den vigtigste faktor. Fibre på overflader og i større revner korroderer, men uden skader til følge. Undersøgelser har vist, at stålfibre i revner med revnevidder under 0,13 mm ikke korroderer. Et Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup> forhold på 0,61 kan godt overskrides, uden at der opstår korrosion af stålfibre i beton. Dvs. det niveau for kloridinitieret korrosion i normalt armeret beton gælder ikke for stålfiberarmeret beton. Ved korrosion af fibre ændrer brudmekanikken sig fra fiber "pullout" til fiberbrud med markant reduktion i sejhed af selve kompositten.

*Glasfibre* holdbarhedsproblem i den alkaliske matrix kræver kun våd eksponering for at manifestere sig. Kemisk nedbrydning af E-glasfibre i cementmatrixens alkaliske miljø er den dominerende nedbrydningsmekanisme. Af den årsag blev der udviklet såkaldte alkaliresistente glasfibre (AR-glasfibre) for at undgå kemisk nedbrydning af fibre. Dog har det vist sig, at der stadig er holdbarhedsproblemer med glasfibre, som antydtes i tabel 8, hvor de mekaniske egenskabs udvikling er vist som funktion af tiden udendørs i engelsk klima. Det har vist sig, at der er to hovednedbrydningsmekanismer, der virker for AR-glasfibre:

- i) Alkalisk korrosion (kemisk nedbrydning)
- ii) Udfældning af hydratiseringsprodukter i glasfiberbundterne (glas-fibre leveres i såkaldte "strands" = bundter, dvs. med ca. 200 fibre i et enkelt bundt).

Effekten viser sig ved tab i styrke og sejhed af kompositmaterialet.

Bestandigheden af glasfiberarmerede produkter er søgt bedret ved at modificere matrix med polymere tilsætningsstoffer. Ideen er at reducere indlejringen af reaktionsprodukter imellem glasfibre. Ligeledes skulle fugtoptagelsen i plastmodificerede produkter være reduceret, hvilket også skulle forbedre produkternes holdbarhed.

Tabel 6. Reduktionen af de mekaniske egenskaber hos glasfiberarmerede cementbaserede kompositmaterialer.

Fiber	Ældningsperiode	Effekten af nedbrydningsmekanisme på reduktionen af de mekaniske egenskaber	
		Kemisk nedbrydning af fibre	Indlejring af reaktionsprodukter
E-glas	Kort (< 1 år)	Stor effekt	Lidt effekt
AR-glas	Kort (< 1 år)	Ingen effekt	Ingen effekt
AR-glas	Mellem (5 - 40 år)	Mærkbar effekt	Stor effekt
AR-glas	Lang (> 30 - 50 år)	Stor effekt	Stor effekt

Langtidsegenskaberne af *kulfibre* er kun meget lidt undersøgt, men resultaterne fra enkelte forsøg har vist, at fiberne har god kemisk bestandighed i en matrix med alkalisk miljø. Accelererede ældningsforsøg har dog vist en udvikling i styrke og sejhed som ved glasfibre, dvs. på kort sigt en forøgelse af de mekaniske egenskaber, formentlig på grund af forbedret fiberbinding i matrix. Men på lang sigt vil der optræde reduktion i styrke og sejhed pga. fiberbrud og i mindre grad fiberudtrækning. Mekanismen er her den samme som for glasfibre, idet der vil ske indlejring af reaktionsprodukter i fibre [Katz og Bentur, 92].

Mange års praktiske erfaringer har bevist *asbestfibre*s gode langtidsegenskaber i cementprodukter. Desværre har det vist sig, at asbestfiberen er meget sundhedsfarlig, og den må derfor ikke anvendes i cementbaserede kompositmaterialer. Ældningsmekanismerne for asbestcement er ikke klarlagt, men to mekanismer er foreslået:

- i) Delvis kemisk ændring af fiberens overflade ved karbonatisering.
- ii) Udfældning af reaktionsprodukter i fiberen (imellem parallelle planer i fiberen).

På lang sigt er der ikke konstateret nogen styrkereduktion af asbestcement, men en reduktion af sejheden under naturlige klimaeksponeringer.

Der anvendes mange forskellige typer *polymere* fibre. Her kan kort nævnes: polypropylen-, polyvinylalkohol-, nylon-, aramid-, acryl- og polyethylenfibre. Alle disse typer har været anvendt som armering af cementbaserede materialer. De polymere fibres holdbarhedsproblem er, at de mister deres virkning ved høje temperaturer. Temperaturer højere end 100°C (200°C for aramidfibre) medfører, at trækstyrken reduceres kraftigt, hvilket skyldes blødgøring af fibre. Ved indblanding i en cementbaseret matrix er fibre beskyttet mod den for polymere materialer skadelige UV-stråling fra sollys, hvorfor denne nedbrydningsfaktor ikke vil være virksom. Med undtagelse af aramidfibre, der har vist en reduktion af styrken (undersøgelser har forudsagt ca. 50% styrkereduktion efter 20 år), har polymere fibre vist sig at være særdeles alkaliresistente (alkalibestandigheden er eftervist ved mange accelererede laboratorieforsøg). Udendørs eksponering i 10 år af mørtler armeret med polypropylenfibre viser da også fuldstændig intakte fibre.

Nedbrydningsmekanismerne for *naturfibre* i cement kan være følgende:

- i) Kemisk nedbrydning af hemicellulose og lignin (vedstof) i den midterste lamel af fiberne, dvs. nedbrydning af forbindelsesleddet mellem de enkelte celler.
- ii) Ændringer af matrix kan forårsage mineralisering (forstening) af naturfiberen, f.eks. kan hydratiseringsprodukter "imprægner" fiberen.

Erstatning af Portland-cement med silica (ca. 45 %) reducerer alkaliniteten af matrix og vil i nogen grad kunne eliminere den kemiske nedbrydning af fibren.

Biologiske angreb af naturfiberarmede kompositmaterialer har vist sig at være overfladeproblemer uden betydning for styrke og stivhedsegenskaber.

Vegetabiliske fibre har en ringe alkalibestandighed. Med undtagelse af kokosfibre, har andre fibre som banan, bhabar, hamp, jute, munja og sisal vist styrkereduktioner ved opfugtning og udtørring i mættet kalkopløsning eller 0,1 N natriumhydroxyd (jf. tabel 7).

Tabel 7. Forskellige vegetabiliske fibres trækstyrker ( $\text{kg/mm}^2$ ) før og efter accelereret ældning i kalk- og natriumhydroxydopløsninger [Singh, 85].

Fiber	Før afprøvning	Efter 60 cykler opfugtning og udtørring i	
		Mættet kalkopløsning	0,1 N natriumhydroxyd opløsning
Banan	110 - 130	60 - 120	21 - 46
Bhabar	5 - 70	5 - 20	8 - 65
Kokos	9 - 14	7 - 20	10 - 17
Hamp	40 - 200	12 - 28	30 - 55
Jute	400 - 450	brud	42 - 110
Munja	20 - 150	15 - 40	22 - 58
Sisal	100 - 200	10 - 20	23 - 82

*Cellulosefibre* skulle være mere holdbare i alkaliske omgivelser end naturfibre, når man på forhånd kemisk har fjernet den midterste lamel inklusive lignin og hemicellulose.

Naturlighærdning af cellulosefiberarmede, cementbaserede materialer kan medføre forstening af fibre, fordi fiberhulrummet udfyldes med reaktionsprodukter (hydratisering eller karbonatisering), og cellevæggen imprægneres med reaktionsprodukter. Forsteningen af fibre kan medføre en øget kompositstyrke men reduceret sejhed. Autoklaverede produkter af cellulosecement viser ganske små mikrostrukturelle ændringer ved ældning, hvilket viser sig ved ganske små ændringer i styrke og sejhed.

Tabel 8. AR-glasfiberarmede cementbaserede kompositmaterialers udvikling af forskellige mekaniske egenskaber målt ved langtidsforsøg [Majumdar og Laws, 91].

Alder	28 døgn	1 år	5 år	10 år	17 år	20 år
Luftlagring ved 40 % RF og 20 °C						
MOR (MPa)	35-50	35-40	30-35	31-39		30-32
LOP (MPa)	14-17	9-13	10-12	14-16		10-14
UTS (MPa)	14-17	14-16	13-15	11-15		10-14
BOP (MPa)	9-10	7-8	7-8	9-10		~5
E-modul (GPa)	20-25	20-25	20-25	25-33		24
Slagstyrke ( $\text{KJ/m}^2$ )	17-31	18-25	18-21	15-22		17-22
Vandlagring ved 18-20 °C						
MOR (MPa)	35-50	22-25	21-25	17-18		13-15
LOP (MPa)	14-17	16-19	16-19	16-17		13-14
UTS (MPa)	14-17	9-12	9-12	6-8		
BOP (MPa)	9-10	9-11	7-9	6-8		
E-modul (GPa)	20-25	28-34	28-34	25-31		
Slagstyrke ( $\text{KJ/m}^2$ )	17-31	8-10	4-6	2-3		~2
Udendørs lagring						
MOR (MPa)		30-36	21-23	15-19	13-18	
LOP (MPa)		14-17	15-18	13-16	11-14	
UTS (MPa)		11-14	7-8	7-8	4-7	
BOP (MPa)		9-10	7-8			
E-modul (GPa)		20-25	25-32	27-30	25-36	
Slagstyrke ( $\text{KJ/m}^2$ )		13-16	4-7	2-6	2-5	

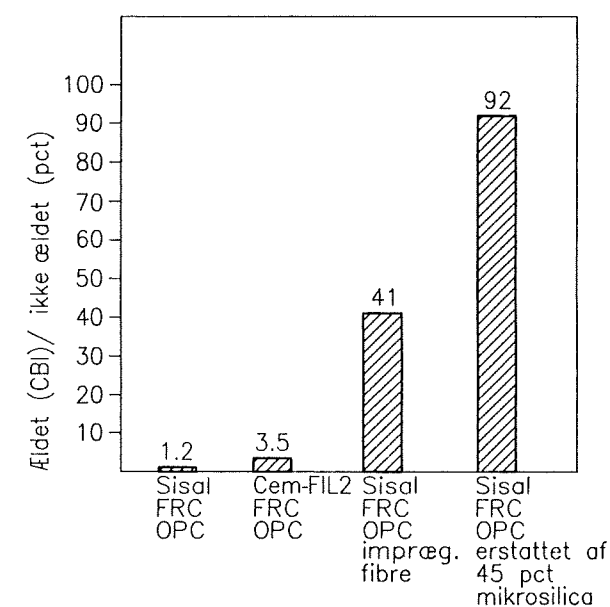
MOR = Modulus of rupture, LOP = Limit of proportionality, UTS = Ultimate tensile strength, BOP = Bend over point

Tabel 9. Egenskaber af forskellige fibertyper anvendt som armering af cementbaserede kompositmaterialer.

Fibertype	Diameter (µm)	Længde (mm)	Densitet (x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	E-modul (GPa)	σ <sub>Træk</sub> (MPa)	ε <sub>Brud</sub> (%)
<i>Metal</i>						
Amorf	100		7,52	153	3400	1,3
Titanium	300		4,51	182	720	6,0
Blødt stål	300		7,8	200	690	0,2
Stålwire	5-500	Kont.	7,8	210	400-3000	3
<i>Glas</i>						
E-glas	5-20	Kont.	2,5	74	2000	2-5
Alkali resistent	10-13	Kont	2,7	63-74	2000	2-4
<i>Keramiske</i>						
Silicon carbid	15		2,55	200	2950	1,3
Tyrano	9		2,4	196	2450	1,5
Boron-tangusten	140		2,6	393	3450	1,0
Alumina	17		3,2	205	1770	1,0
Rockwool	2-10	2-20	2,9	70-120	1-150	1-2
<i>Asbest</i>						
Chrysotil	0,02-20	1-80	2,55	164	3100	2,3
Crocidotil	0,1-20	< 5	3,37	196	3500	2,3
<i>Polymere</i>						
Polypropylen	20-200	Kont.	0,91	5-8	350-500	8-20
Polyvinylalkohol	10-16	4-6	1,30	12-28	800-1300	7-12
Akryl	12-100	6-24	1,18	15,3-17,7	765-805	6-11
Polyethylen (pulp)	1-20	1	0,96	0,3	700	10
Aramid	10-12	Kont.	1,36-1,45	69-133	2900-3150	2,6-4
Nylon	5-25	Kont.	1,14	4-8	800-900	15
Polyarylate	22-300		1,41	83,5	3200	3,9
<i>Kul</i>						
Graphite, type I	3	< 1000	1,9	380	1800	0,5
Graphite, type II	9		1,9	230	2600	1
PAN-kul	6		1,78	196	2050	1,4
<i>Natur</i>						
Træ (tør)	15-40	0,5-4	1,5	8-10	300-500	2,1
Sisal	10-50	1000	1,5	30	800	3
Bomuld	10-30	60	1,5	10	300-900	3-9
Bambus	30	2,5-3,5	1,16	4,6-28,8	38-575	3,2
Jute	20-100	> 1000	0,30	26-32	250-350	1,5-1,9
Piassava		500-600	0,47-0,86	5,6	143	6
Kokosnød	300	10-200		19-26	95-118	25-50
Henequin	125-500	> 600	1,4		91-307	2,3-7,6
Malva		> 1000				
Banan			1,3	20-51	110-130	1,8-3,5
Ananas			1,44	24,3-35,1	370-740	2,0-2,8
<i>Cellulose</i>						
Ubleget (Pinus)	15-60	1,2-2,7	1,5	40	200-1500	
Bleget (Pinus)	15-60	1,0-2,7	1,5	40		
Bleget (Birk)	18-60	1,0-1,2	1,5	5-40	200-1000	
Bleget (Eucalyptus)	12-30	0,9-1,2	1,5	45	200-1300	
Termomekanisk pulp	20-70	1,5-2,5	1-1,5		200-800	

## Matrix

Den hydrauliske porøse matrix består normalt af cement, vand, tilslag og additiver. Sammensætningen af en matrix vælges efter, hvilken fiber der ønskes anvendt, produktionsprocessen og produktet. Matrix afviger ikke meget fra andre cementbaserede materialer. I tyndplader består matrix af cementpasta eller cementmørtel og i mere massive produkter består matrix af beton. Standard Portlandcement er den normale anvendte cementtype og de typer af tilslag, der anvendes i traditionel beton, kan også anvendes til fiberbeton. Ved at ændre cementtypen til en lavalkaltype kan levetiden af produkter armeret med ikke-alkaliresistente fibre, som f.eks. glas- og sisalfibre, forlænges. Modificering af en matrix kan f.eks. gøres ved at substituere en del af cementen med fillermaterialer som f.eks. naturlige puzzolaner, flyveaske og mikrosilika, hvilket også reducerer alkaliniteten og indholdet af CaOH. Denne form for modifikation af matrix har en god effekt på langtidsegenskaberne for natur- og glasfiberarmerede kompositmaterialer. Der er en direkte sammenhæng mellem styrken af glasfiberbundter og alkaliniteten af matrix som vist i tabel 10. I figur 2 og tabel 10 og tabel 11 er der givet eksempler på effekten når matrixen modificeres med silikastøv, flyveaske, højvovsslagge, osv.



Figur 2. Proportionalitetsstyrken af ældede prøver (120 cykler i vejsimulator, CBI) sat i forhold til proportionalitetsstyrken af ikke ældede prøver af forskellige kompositmaterialer [Bergström og Gram, 84].

Tabel 10. Effekten af cementens pH-værdi på reststyrken af glasfibre (type cemFIL 1). De samme tendenser er observeret for glasfiberarmeret kompositmaterialer [Proctor, Oakley og Litherland, 82].

Cement	pH	SIC <sup>1</sup>
Rapid Portland cement	13,0	500 MPa
Rapid Portland cement + 20 % dansk diatomit	12,6	700 MPa
Supersulfat cement	12,0	800 MPa
Rapid Portland cement + 40 % mikrosilika	11,0	950 MPa

1) Strand-in-cement (SIC) styrken efter accelereret ældning i 2 måneder i vand ved 50 °C.

Tabel 11. Egenskaber hos glasfiberarmerede kompositmaterialer indeholdende forskellige mængder af almindelig Portlandcement (OPC), flyveaske (pfa), formalet højovns slagge (ggbs) og sand. Eksponeret udendørs i England [Majumdar og Laws, 91].

Kompositmateriale, sammensætning og fibertype	Alder	MOR (MPa)	LOP (MPa)	Slagstyrke (kJ/m <sup>2</sup> )
OPC	28 døgn <sup>1</sup>	35-50	14-17	17-31
CemFIL 1	5 år	21-23	15-18	4-7
	10 år	15-19	13-16	2-6
	17 år	13-18	11-14	2-5
85 % OPC	28 døgn	29	11	22
15 % pfa	5 år	14	11	4
CemFIL 1	10 år	6	6	2
75 % OPC	28 døgn	29	10	20
25 % pfa	5 år	17	11	6
CemFIL 1	10 år	10	8	3
60 % OPC	28 døgn <sup>1</sup>	28-31	7-8	16-19
40 % pfa	5 år	17	10	5
CemFIL 1	10 år	14	10	4
50 % OPC	28 døgn <sup>1</sup>	17-24	7-7	18-23
50 % pfa	5 år	19	11	9
CemFIL 1	10 år	13	10	10
60 % OPC	28 døgn <sup>2</sup>	32,5	10,2	22,6
40 % pfa	4 år	30,8	11,2	16,2
CemFIL 2	9 år	25	10	12
30 % OPC	28 døgn <sup>2</sup>	35	11	21
70 % ggbs	4,25 år	32	11	18
CemFIL 2				
70 % OPC	28 døgn <sup>2</sup>	36	18	19
30 % sand	4 år	22	15	5 <sup>3</sup>
CemFIL 1	9 år	18	16	6 <sup>4</sup>
70 % OPC	28 døgn <sup>2</sup>	38	12	21
30 % sand	4 år	33	15	14
CemFIL 2	9 år	30	14	13

<sup>1</sup> Område for luft- og vandlagrede prøver.

<sup>2</sup> Fugtlagring.

<sup>3</sup> 5 år.

<sup>4</sup> 10 år.

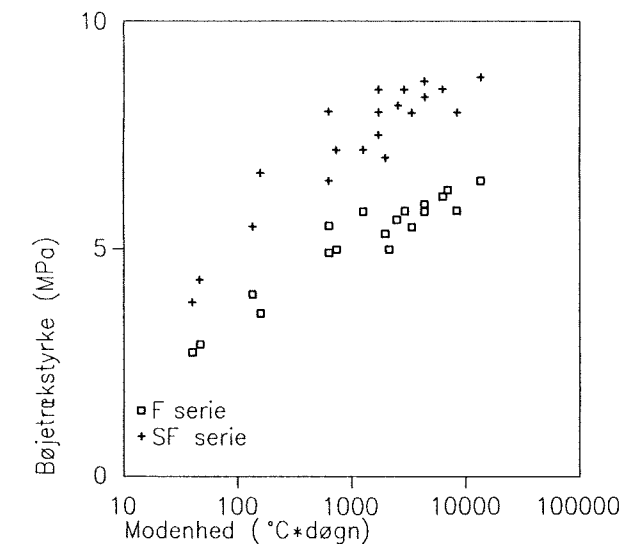
## Modenhed

Efter afbinding, ved den såkaldte hydratiseringsproces, udgør cement og vand den hærtnede cementpasta. Hydratiseringen kan iøvrigt fortsætte i mange år med bl.a. en forøgelse af pastaens styrke som resultat. Hydratiseringsforløbet afhænger af den anvendte cementtype og mængden af vand, der er til stede. Temperaturen spiller en afgørende rolle for, hvor hurtigt hydratiseringen forløber. Dette betyder for eksempel, at styrken er afhængig af tiden fra hærtningsens begyndelse og den temperatur, hvorunder processen forløber; summen af temperatur og alder kaldes *modenheden*.

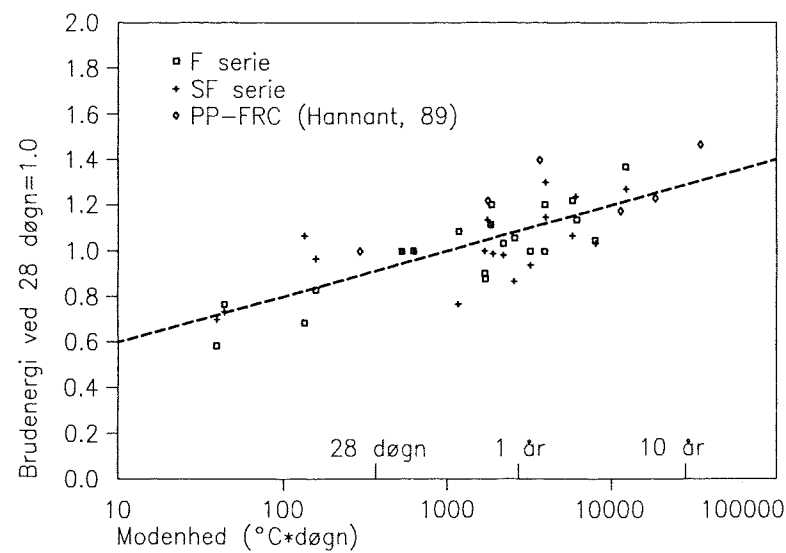
I figur 3 er afbildet bøjetrækstyrken (MOR) af to fiberarmerede betontyper,  $D_{MAX} = 16$  mm, henholdsvis en beton armeret med 1 vol% polypropylenfibre samt 1 vol% stålfibre (SF-serien) og en betontype armeret med 2 vol% polypropylenfibre (F-serien).

De to typer beton har været udsat for forskellige typer af ældning, henholdsvis "de fire årstider" (SBI's vejr-simulator), opfugtning og udtørring, konstant klima (65 % RF, 23 °C) og udendørs klima i ca. 1,5 år. Det har ikke været muligt at se markante forskelle i udviklingen af de mekaniske egenskaber for de to typer beton (både styrke og sejhed), selv om ældningsmetoderne har været meget forskellige. Uanset ældningsmetoden sker der en forøgelse af styrke og sejhed som funktion af modenheden, dvs. de mekaniske egenskaber er kun afhængig af betons alder og betonnens temperatur.

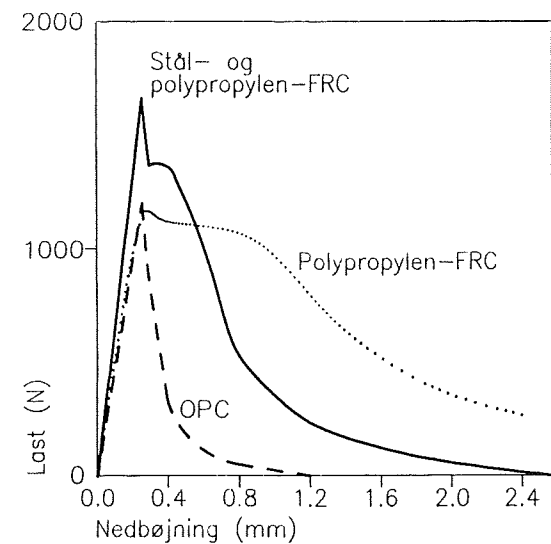
Tendenserne bliver mere klare, hvis udviklingen i de mekaniske egenskaber vises relativt i forhold til 28-døgns-værdien af den målte egenskab. Hvis f.eks. udviklingen i brudenergi normaliseres således, at brudenergien ved 28 døgn sættes til 1,0, er det muligt at få en opfattelse af, hvordan og hvor hurtigt betonen udvikler sejhed (figur 4).



Figur 3. Udvikling i bøjetrækstyrken af beton armeret med henholdsvis 2 vol% polypropylenfibre (F-serien) og 1 vol% polypropylenfibre plus 1 vol% stålfibre (SF-serien). I de to typer fiberbeton er vand-cement-forholdet ca. 0,43 og  $D_{MAX} = 16$  mm. Styrkeudviklingen er uafhængig af ældningsbetingelserne, henholdsvis stabilt klima, "de fire årstider" og udendørs eksponering.



Figur 4. Udvikling i normaliseret brudenergi af fiberarmeret beton armeret med henholdsvis 1 vol% polypropylenfibre plus 1 vol% stål fibre (SF-serien) og 2 vol% polypropylenfibre (F-serien), samt en serie polypropylenfiberarmeret plademateriale (engelske forsøg [Hannant, 89]).



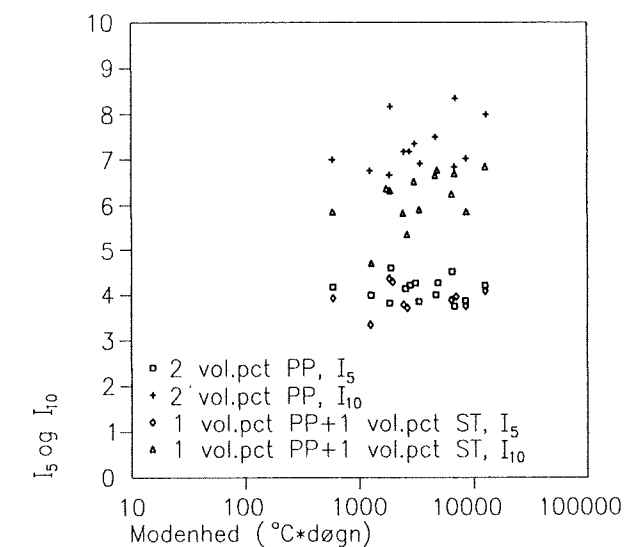
Figur 5. Kraft-nedbøjningskurverne for henholdsvis uarmeret og fiberarmeret beton (3-punkts-bøjning).

Engelske forsøgsresultater for polypropylenfiberarmede plader opbevaret udendørs i ti år har vist samme udvikling i brudenergi som de to typer fiberarmeret beton vist i figur 4. De to typer fiberarmede beton vil efter ti år i naturlige omgivelser have udviklet ca. 40 % mere brudenergi end ved 28 døgns, forudsat det skitserede udviklingsforløb er gældende. Det er på nuværende tidspunkt ikke muligt at forudsige hvornår den positive udvikling stopper og materialerne begynder at miste styrke og sejhed.

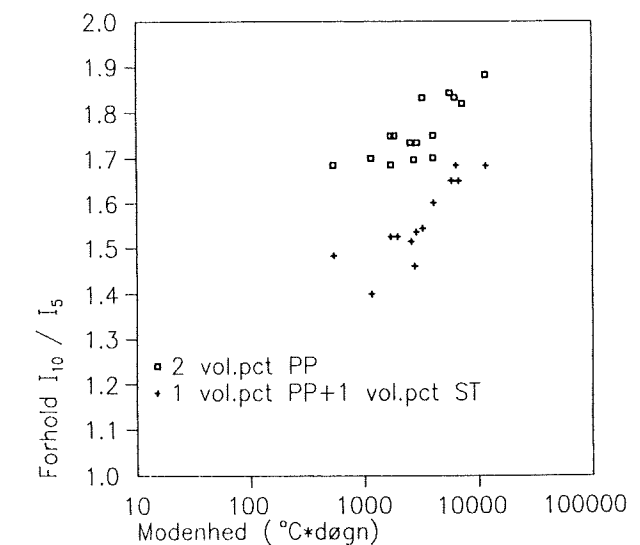
Brudenergien er her defineret som arealet under kraft-nedbøjningskurven (figur 5) for materialerne i bøjning. Selve formen af kraft-nedbøjningskurven, samt udviklingen af denne kan beskrives ved hjælp af det

såkaldte sejhedsindex, som er beskrevet i ASTM C1018. Her kan man ved arealbetrægtninger bestemme dette index. I forsøgene med de to typer fiberarmeret beton var det muligt at bestemme index  $I_5$  og index  $I_{10}$ . På figur 6 er de to sejhedsindices afbildet som funktion af modenhedsalderen. Her ses at begge typer fiberarmeret beton er tæt på det lineær-elastiske-plastiske materiale på den første del af arbejdskurven ( $I_5$  er nær værdien 5), og at betonen armeret med 2 vol% polypropylenfibre har den evne længst (dvs.  $I_{10}$  ligger tæt ved værdien 10). Ligeledes ses med tiden en tendens til øget sejhed, specielt vokser index  $I_{10}$ , hvorimod  $I_5$  (naturligvis) er stabilt. Af figur 7 ses en tydelig stigende tendens imod værdien 2 for forholdet  $I_{10}/I_5$ , der er karakteristisk for det lineære-elastiske-plastiske materiale.

Konklusionen fra forsøgene med de to typer fiberarmeret beton er kort sagt, at en forsat hydratisering resulterer i en bedre fiberbinding (af både stål- og polypropylenfibre) og derved en stigning i både styrke og sejhed af produkterne. At hydratiseringen fortsætter er også vist ved en forøgelse af betonens indre overfladeareal bestemt ved vanddampadsorption, vist i tabel 12.



Figur 6. Udvikling i sejhedsindices  $I_5$  og  $I_{10}$  for de to typer fiberarmeret beton.



Figur 7. Udvikling i forholdet  $I_{10}/I_5$  for de to typer fiberarmeret beton.

Tabel 12. Det indre overfladeareal af fiberarmeret beton, bestemt ved vanddampadsorption, før og efter ældning i "de fire årstider" (SBI's vejrsimulator).

	Beton armeret med 2 vol% polypropylenfibre (F-serien).			Beton armeret med 1 vol% polypropylenfibre plus 1 vol% stålfibre (F-serien).		
	0	300	500	0	300	500
Antal perioder i "de fire årstider"	0	300	500	0	300	500
Indre overfladeareal (m <sup>2</sup> /g)	55	138	149	47	55	62

I tabel 13 er vist udviklingen i bøjetrækstyrkerne af beton armeret med 2 vol% polypropylenfibre (F-serien) eksponeret ved forskellige klimabetingelser, henholdsvis, konstant (23 °C, 65 % RF), variabelt (skiftende luftfugtighed ved 23 °C, henholdsvis 6 uger ved 65 % RF efterfulgt af 6 uger ved 95 % RF osv) og udendørs klima (perioden juli 91 til juli 92). Betonen har i ældningsperioden været belastet ved forskellige belastningsniveauer i en opstilling med 4-punkt-belastning.

Igen sker udviklingen af betonens mekaniske egenskaber ganske uafhængigt af klimatypen. Ligeledes har de forskellige belastningsniveauer ikke nogen markant indflydelse på, hvorledes bøjetrækstyrken udvikler sig.

Tabel 13. Udvikling af bøjetrækstyrken i MPa af 2 vol% polypropylenfiberarmeret beton. Betonen er ældet ved forskellige klimabetingelser og belastningsniveauer. Midelværdi og standardafvigelse.

Klima	Belastningsniveau i pct af 28-døgnsstyrken (%)	Alder (døgn)		
		28	182	365
Vandlagring ved 20 °C	0	4,8 (,58)		
Konstant klima 23 °C, 65 % RF	0		5,8 (,93)	5,9 (1,0)
	50		5,6 (,31)	5,5
Variabelt klima 23 °C, 65 % RF	0		5,2 (,88)	6,3 (,50)
	35		5,7 (,43)	5,7 (1,1)
	50		5,8 (,68)	6,0 (,64)
	65		5,1 (,43)	6,4 (,71)
Udendørs klima Juli 91 - juli 92	0		4,9 (,56)	5,1 (,44)
	50		5,1 (,62)	5,8 (,75)

## Svind

Cementbaserede materialer svinder når de udtørres. Der er tale om et plastisk svind i form af volumenformindskelse medens betonen endnu er plastisk, samt et udtørringssvind af den hærdnede beton. Svindet angives at blive reduceret ved at indblende fibre, ca. 5-10 % for hver vol% stålfibre eller glasfibre der indblandes i betonen [Nordforsk, 77].

Anvendelsen af fibre, specielt fibre med lavt E-modul i små mængder (mindre end 0,3 vol%), er specielt rettet imod at hindre revnedannelse forårsaget af plastisk svind.

Tendenserne til revnedannelse kan reduceres ved at indblende fibre i matrix. Både det frie svind og revnevidderne bliver reduceret ved indblanding af fibre, som vist i tabel 14. Her ses at den gennemsnitlige revnevidde formindskes ved større fiberindhold. Det er typisk at få og store svindrevner i den uarmerede matrix kan ændres til flere men meget mindre svindrevner i den fiberarmerede matrix.

Tabel 14. Indblanding af fibre reducerer vidden af svindrevner. Den gennemsnitlige revnevidde er markant reduceret med øget fibervolumen (efter 6 uger udtørring, 20 °C, 40 % RF). Blandingsforholdet er 1:2:2:0,5 (cement:sand:tilslag:vand). Maksimal stenstørrelse er 9 mm. Fibrene, der er anvendt, er 19 mm lange parallelle og fibrillerede polypropylenfibre og 25 mm lange stålfibre med 0,4 mm i diameter [Grzybowski og Shah, 90].

Fibervolumen (vol%)	Middel revnevidde (mm)	
	Polypropylenfibre	Stålfibre
0	0,900	0,900
0,1	0,875	---
0,25	0,480	0,173
0,5	0,230	0,072
1,0	0,108	0,075
1,5	---	0,010

Hydratisering af forsejlet Portlandcement pasta med lave v/c-tal kan resultere i såkaldt *selvudtørring*. Hydratisering resulterer i sænkning af den indre relative fugtighed i cementpastaen med volumensvind af pastaen som resultat. F.eks. er det endelige selvudtørringssvind af en fiberarmeret mørtel (v/c = 0,26; V<sub>f</sub> = 0,6 vol% polypropylenfibre) målt til ca. 900-1100x10<sup>-6</sup> efter 14 dages lagring. Dette målte svind er 5 til 10 gange den endelige træktøjning af mørtlen [Hansen og Jensen, 89].

## Permeabilitet

Som nævnt vil indblanding af fibre i et cementbaseret kompositmateriale kunne mindske revnernes vidde, hvorved der også vil ske en reduktion af permeabiliteten. Permeabiliteten er meget følsom over for ændringer i en matrix' vand-cement-forhold, komprimeringen og hærdningen. Ved fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer anvendes normalt større cementindhold end i tilsvarende uarmerede materialer, hvilket kan formindske permeabiliteten. Modsat kan vanskeligheder ved indblandingen af fibre medføre fejl langs fibre hvilket kan forøge permeabiliteten.

I tabel 15 er vist resultater fra en permeabilitetsundersøgelse, hvor der ses en tydelig reduceret vandindtrængning med forøget fiberindhold.

Tabel 15. Resultaterne fra en vand-permeabilitetsundersøgelse (såkaldt Von Test) viser reduktion af permeabiliteten med øget indhold af polypropylenfibre. Alle tre blandinger er med samme v/c-tal (dog ikke opgivet). Maksimal stenstørrelse er 19 mm og cementindholdet er 395 kg/m<sup>3</sup> [Vondran og Webster, 88].

Alder	Indtrængt vand i mm		
	Polypropylen-fibervolumen (vol%)		
	0	0,07	0,13
2 døgn	11,5	11,5	8,5
7 døgn	3,5	3,0	2,5
14 døgn	3,5	2,0	1,5
21 døgn	4,0	1,5	2,5
28 døgn	5,0	2,5	1,0
Total mængde indtrængt vand (mm)	27,5	20,4	16,0
% reduktion	0	34	43

## Fremstilling og udførelse

Fiberarmerede kompositmaterialer fremstilles ved metoder som oftest er hentet fra konventionel betonfremstilling. Valg af fremstillingsmetode skal ske efter hensyntagen til typen og mængden af fibre og andre delmaterialer, samt til produktets form og funktion. Det hærdnede materiales levetid vil nemlig i høj grad afhænge af den anvendte fremstillingsmetode.

Det er især ved indblandingen af fibre der kan opstå problemer. Ofte vil man ved fremstilling af fiberarmet beton blande fibre, cement, sand (og flyveaske) før der tilsættes vand (og silikaslurry). Fremgangsmåden afhænger af blandemesteren og baseres i høj grad på det enkelte betonværks opnåede praktiske erfaringer.

Sætmålet anvendes normalt til beskrivelse af fiberbetonens bearbejdelighed, men kan dog ikke umiddelbart sammenlignes med beton uden fibre, idet fibrene vil hæmme betonens flydning.

Generelt set vil betonens bearbejdelighed forringes med øget fiberindhold eller øget aspektforhold (dvs. øget overfladeareal af fibre). En fiberarmet beton vil ofte skulle vibreres og bearbejdes i længere tid og med større intensitet for at opnå en tilfredsstillende komprimering.

Det skal her understreges, at der er forskel på *betons bestandighed* og *betonkonstruktioners bestandighed* mod ydre påvirkninger.

Man bør ved udformningen af en betonkonstruktion være opmærksom på at udforme støbeskel, samlinger og fuger således at vandgennemsvininger undgås. Fuger skal kunne vedligeholdes, og vandlunker (bagfald) skal undgås.

DS 411 omfatter armeret beton og stiller krav til vand-cement forholdet og dæklagstykkelse. Yderligere stiller Basisbetonbeskrivelsen (BBB) krav til:

- delmaterialer
- betonsammensætningen
- ensartetheden
- arbejdsudførelsen
- beskyttelse i hærdeperioden
- kontrollens omfang og udførelse

for at sikre at den forventede levetid kan opfyldes.

De samme tanker der ligger bag BBB bør også kunne danne basis for de fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer for at sikre, at den forventede levetid af disse produkter kan opfyldes.



# Vejrligspåvirkninger

Vejrliget har stor indflydelse på holdbarheden af de fiberarmede cementbaserede kompositmaterialer. Temperaturen og tilstedeværelsen af vand kan betragtes som de to vigtigste faktorer. Derudover indvirker stråling, kemiske stoffer i luften osv. til at nedbryde materialerne.

## Strålingseffekter

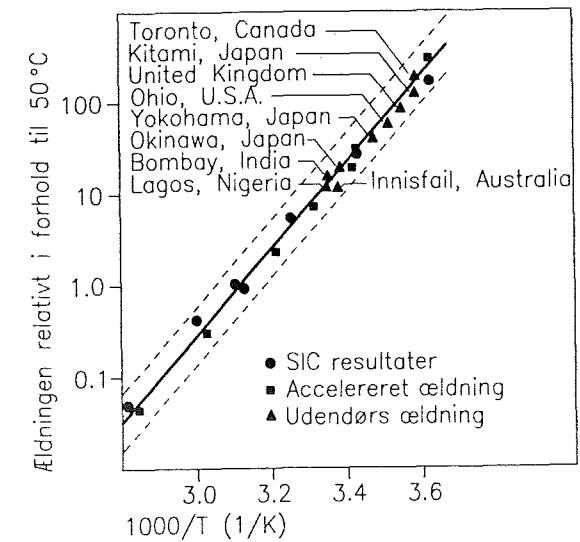
Sollysets intensitet ved jordens overflade er ca.  $760 \text{ W/m}^2$  (solvinkel på  $30^\circ$  og luftmassefaktor på 2). Strålingen består af ca. 4 % ultraviolet (UV), 43 % synligt og 53 % infrarødt lys. De polymere fibre nedbrydes når de udsættes for UV stråling fra sollys hvis de ikke er beskyttet af matricen. Undersøgelser har vist at polypropylenfibre udsat for 13 ugers UV-stråling, vil resultere i en lille reduktion af fibrenes E-modul og 25 % reduktion i fibrenes trækstyrke. De 13 ugers eksponering ansås for ekvivalent til ca. 17 års udendørs eksponering i det sydlige England [Galloway, Williams og Raithby, 81].

## Temperaturer

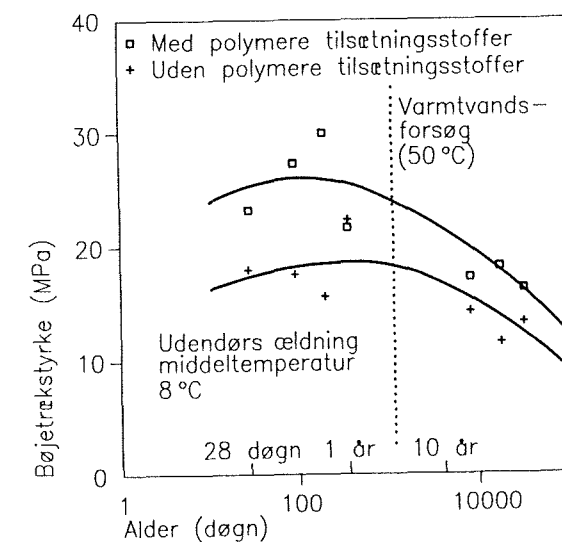
Kemiske reaktioner accelereres normalt ved stigende temperatur og specielt nedbrydningen af glasfiberarmede produkter vil blive forøget ved højt temperatur. Engelske laboratorie- og langtidsforsøg har vist, at vandlagring af glasfiberarmede produkter ved høje temperaturer er en udmærket måde at accelerere nedbrydningen af produkterne. Denne fremgangsmådes relevans er baseret på mange antagelser, bl.a. at styrketabet er direkte relateret til hastigheden af en kemisk reaktion, og at samme reaktion er af betydning i temperaturområdet  $20^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}$ . Pålideligheden af disse antagelser er opnået indirekte ved udførelsen af laboratorieforsøg og langtidsforsøg ved udendørs eksponering [Litherland, Oakley og Proctor, 81]. Selve nedbrydningsmekanismen er senere anfægtet af [Bentur, Ben-Bassat og Schneider, 85] der antyder, at det er udfældning af hydratiseringsprodukter i glasfiberbundterne der er årsag til styrkereduktionen. Dette rækker imidlertid ikke ved det rimelige i at anvende varmtvandsforsøg som accelereret prøvningsmetode til ældning af glasfiberarmede produkter.

I figur 8 er vist det normaliserede plot af glasfiberarmede produkters styrke ved forskellige temperaturer relativt i forhold til styrken i vand ved  $50^\circ\text{C}$ . Figuren viser hvad styrken ved forskellige lokaliteters middeltemperatur svarer til i forhold til lagring i vand ved  $50^\circ\text{C}$ . I Danmark, med årlig middeltemperatur på ca.  $8^\circ\text{C}$ , vil 1 dag i varmt vand, ved  $50^\circ\text{C}$ , svare til ca. 100 dages naturlig eksponering for de glasfiberarmede produkter. I figur 9 er bøjetrækstyrken af AR-glasfiberarmede produkter afbildet som funktion af tiden i dansk udendørs klima. Her ses polymermodifika-

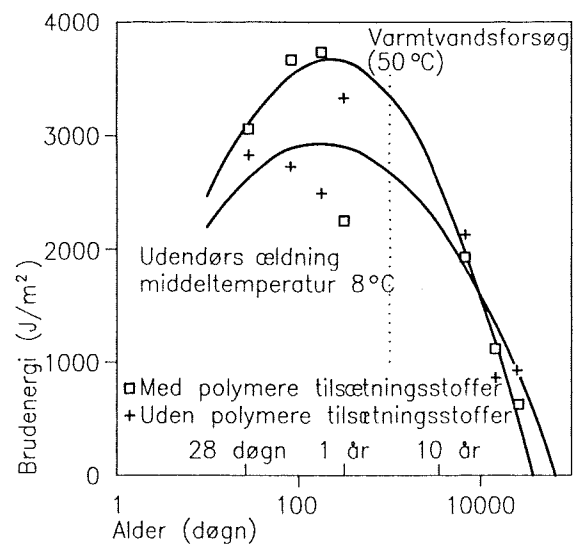
tionen af en matrix at resultere i et højere styrkeniveau (og sejhedsniveau, figur 10), men reduktionen af produkternes mekaniske egenskaber forløber med samme hastighed. Reduktionen i sejhed er mellem 30-50 % af den oprindelige sejhed efter 35-45 års naturlig klimaeksponering i Danmark, som antydnet i figur 11.



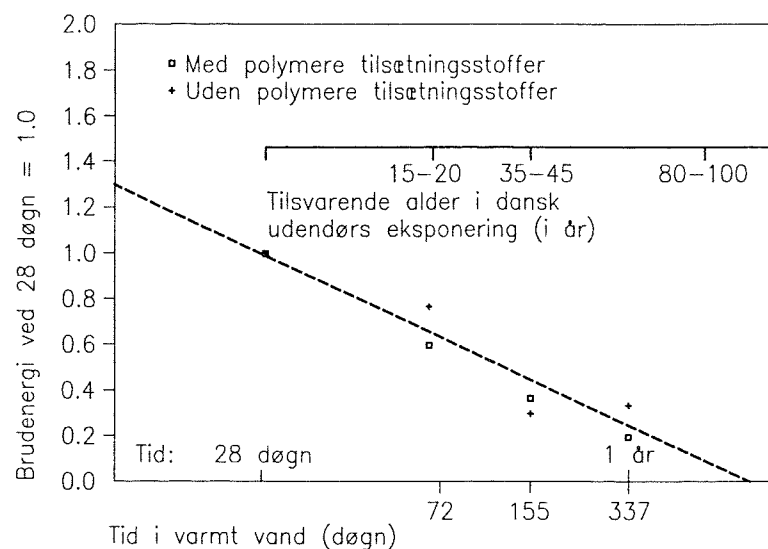
Figur 8. Normaliseret Arrhenius plot af reststyrken (SIC test og bøjetrækstyrke) for prøvelegemer udsat for henholdsvis accelereret og naturlig eksponering [Litherland og Proctor, 86].



Figur 9. Brudstyrkeudvikling af glasfiberarmeret mørtel.



Figur 10. Brudenergiudvikling af glasfiberarmeret mørtel.



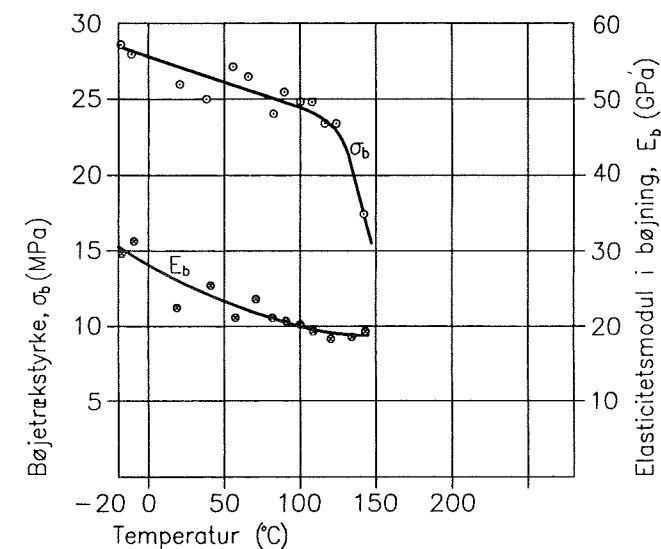
Figur 11. Udvikling i normaliseret brudenergi af glasfiberarmeret mørtel, henholdsvis med og uden polymere tilsætningsstoffer. Prøverne er lagret i 50 °C varmt vand indtil brudenergien er bestemt.

Forskellige fibres resistens over for termiske påvirkninger er vist i tabel 16. Stål- og glasfiberarmeret beton viser kun ganske små ændringer i de mekaniske egenskaber ved temperaturer op til 250 °C. Stål- og glasfiberarmerede produkter viser bedre ydeevne end tilsvarende uarmerede produkter ved temperaturer op til ca. 600 °C.

Polymere fibre er mere følsomme over for høje og lave temperaturer end stål- og glasfibre. Ved meget lave temperaturer bliver de fleste polymere materialer sprøde og ved meget høje temperaturer reduceres E-modulet ganske dramatisk for alle termoplasterne. Generelt har de polymere fibre en blødgøringsstemperatur på ca. 120 °C - 240 °C. Polypropylenfiberarmerede kompositmaterialer viser en markant reduktion i bøjetrækstyrken, når temperaturen når op på ca. 120 °C, polyvinylalkoholfiber cementer viser kun små ændringer i styrke op til ca. 140 °C, og aramid-

fiberarmeret cement viser noget tab i styrke og forøget brudforlængelse ved afprøvning i luft ved 150 °C.

Polymeriseringen af sisalcellulose bliver markant ved temperaturer højere end 75 °C. Den alkaliske nedbrydning af cellulose er kraftig ved temperaturer større end 100 °C. Nedbrydningen af hemicellulosen i det alkaliske miljø er den samme som for cellulosen, samt lignin, der består af aromatiske substanser. Disse bestanddele blødgøres ved 70 °C - 80 °C og er delvist flydende ved 120 °C.



Figur 12. Maksimal styrke og elasticitetsmodul i bøjning af polypropylenfiberarmeret plademateriale ( $V_f \approx 10 \text{ vol\%}$ ). Den markante reduktion i bøjetrækstyrken ved ca. 120 °C tilskrives blødgøring af fibre [Krenchel og Hansen, 87].

Tabel 16. Resistens over for termiske påvirkninger for forskellige fibre [RILEM, 77].

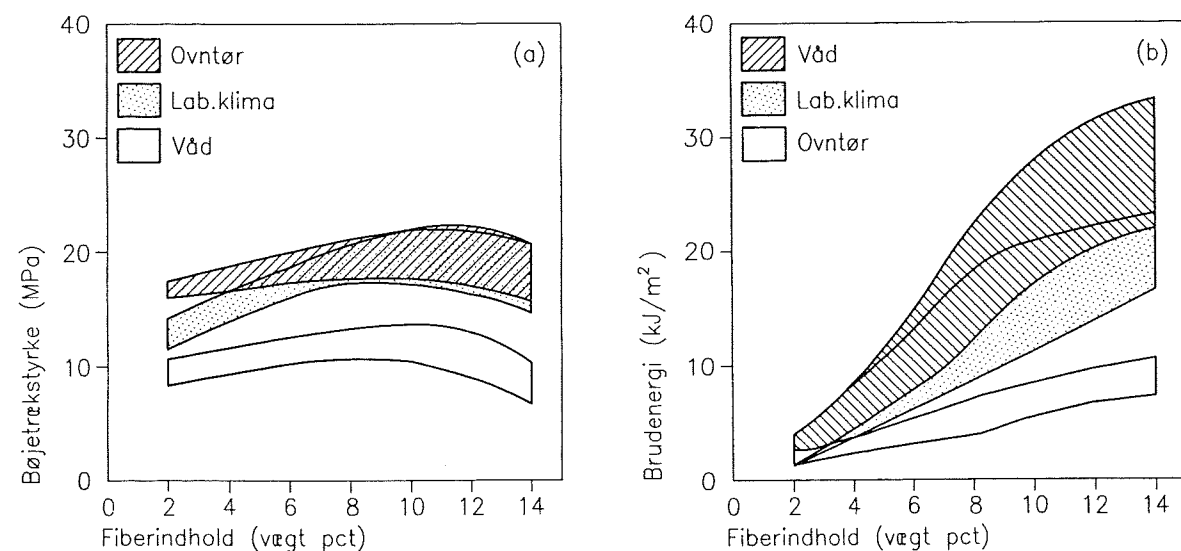
Fibertype	Opførsel ved høje temperaturer	Temperatur hvor styrken er tabt
Stålfibre	Gradvis nedgang i trækstyrke ved 300 °C - 750 °C	1400 °C - 1500 °C
Rustfast stålfibre	Hurtigt fald i trækstyrke ved 650 °C eller højere	1450 °C
AR-glasfibre	Gradvis fald i trækstyrke omkring 450 °C	860 °C
E-glasfibre	Gradvis fald i trækstyrke omkring 400 °C	840 °C
Kulfibre (Pitch)	Gradvis nedgang i trækstyrke ved 300 °C - 350 °C	500 °C - 600 °C
Kulfibre (PAN)	Gradvis nedgang i trækstyrke ved 300 °C - 350 °C	500 °C - 600 °C
Polypropylenfibre	Progressiv tab af trækstyrke ved 100 °C eller højere	120 °C - 150 °C
PVAfibre	Progressiv tab af trækstyrke ved 100 °C eller højere	140 °C - 240 °C
Nylonfibre	Progressiv tab af trækstyrke ved 100 °C eller højere	180 °C - 200 °C
Aramidfibre	Progressiv tab af trækstyrke ved 200 °C eller højere	400 °C - 500 °C
Polyethylenfibre	Progressiv tab af trækstyrke ved 100 °C eller højere	100 °C - 130 °C
Bomuldfibre	Gradvis nedgang i trækstyrke ved 120 °C	150 °C
Sisalfibre	35 % styrketab efter 30 dage ved 105 °C	150 °C
Hampfibre	54 % styrketab efter 30 dage ved 105 °C	150 °C

## Vand

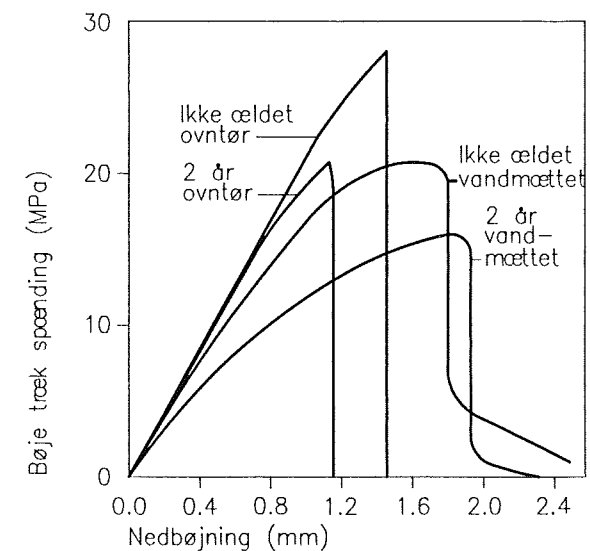
Hvis der kan trænge vand og vandopløselige stoffer ind i de porøse kompositmaterialer er der en betydelig risiko for at holdbarheden forringes. Mange nedbrydningsmekanismer kræver tilstedeværelsen af vand. Frosttø, korrosion, kemisk angreb, osv. er således alle afhængige af fugt eller vand i materialet.

Vand har en dramatisk modsat rettet effekt på elasticitetsmodulet og bøjetrækstyrken af cellulosefibre, uanset om fibre er forarbejdede eller ej. Den ukollapsede, lignificerede cellulosefiber bevarer styrken i fugtige omgivelser bedre end den forarbejdede fiber. Våde vårvedfibre viser markant højere styrker end de tilsvarende tørre fibre, hvilket mærkeligt nok ikke er tilfældet ved høstvedfibre [Fördös, 88].

I figur 13 er vist de mekaniske egenskaber (styrke og sejhed) af papirpulpcellulosearmerede kompositmaterialer. Her ses tydeligt fugtindholdets indflydelse, idet en våd komposit har lav styrke og høj sejhed, modsat end tør komposit der har høj styrke og lav sejhed. Dette forhold bevares selv under lang tids udendørs eksponering, hvilket fremgår af figur 14. Der bemærkes dog en lille reduktion i de mekaniske egenskaber med tiden.



Figur 13. Effekten af fiberindhold og fugtlagring på (a) bøjetrækstyrken og (b) sejheden af cellulosepulparmerede cementbaserede kompositmaterialer. Bøjetrækstyrken reduceres og sejheden øges med stigende fugtindhold [Coutts, 84].



Figur 14. Effekten på arbejdskurven af udendørs eksponering og fugtlagring bestemt ved 3-punkts-bøjning af autoklaverede, cellulosearmerede kompositmaterialer.

## Opfugtning og udtørring

Plastisk svind optræder inden for de første to til fire timer efter blanding og er forårsaget af trækspændingerne i porevandet ved kapillardannelsen. En sænkning af fugtigheden vil til enhver tid forårsage svind der kan medføre revnedannelse (udtørringssvind).

Det frie svind af beton kan reduceres ved fiberindblanding og reduktionen øges ved stigende fiberindhold. Revner forbundet med svind kan ligeledes reduceres ved indblanding af fibre som antydnet i tabel 14.

Mangat og Azari (1988) målte op til 40 % reduktion af svindet i deres eksperimenter og foreslår følgende ligning til at forudsige svindet af stål-fiberarmeret beton:

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{os} (1 - 2,45\mu V_f \frac{l}{d})$$

Hvor  $\epsilon_{fs}$  er det frie svind af stål-fiberarmeret beton,

$\epsilon_{os}$  er det frie svind af den uarmerede beton,

$\mu$  er friktionskoefficienten mellem fibre og beton (med værdien 0,04 for almindelige fibre til 0,12 for deformerede fibre),

$V_f$  er fibervolumenindholdet i pct.,

$l/d$  er aspektforholdet (fiberlængde/fiberdiameter).

Teorien har også vist sig at gælde for kompositmaterialer armeret med andre typer af fibre som f.eks. glasfibre, basaltfibre og polypropylenfibre [Mangat, Manarakis og Azari, 89]. Ligningen skal blot modificeres til følgende udtryk:

$$\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{os}} = 1 - 0,306\mu V_f \frac{l}{d} \cdot \frac{S-d}{d}$$

hvor  $S$  er en funktion af  $V_p$ ,  $l$  og  $d$  og kan beregnes af

$$S^3 + 0,41lS^2 - \frac{\pi d^2 l}{4V_f} = 0$$

Sarja (1988) beskriver det endelige svind af træfiberarmeret beton ud fra følgende empiriske formel:

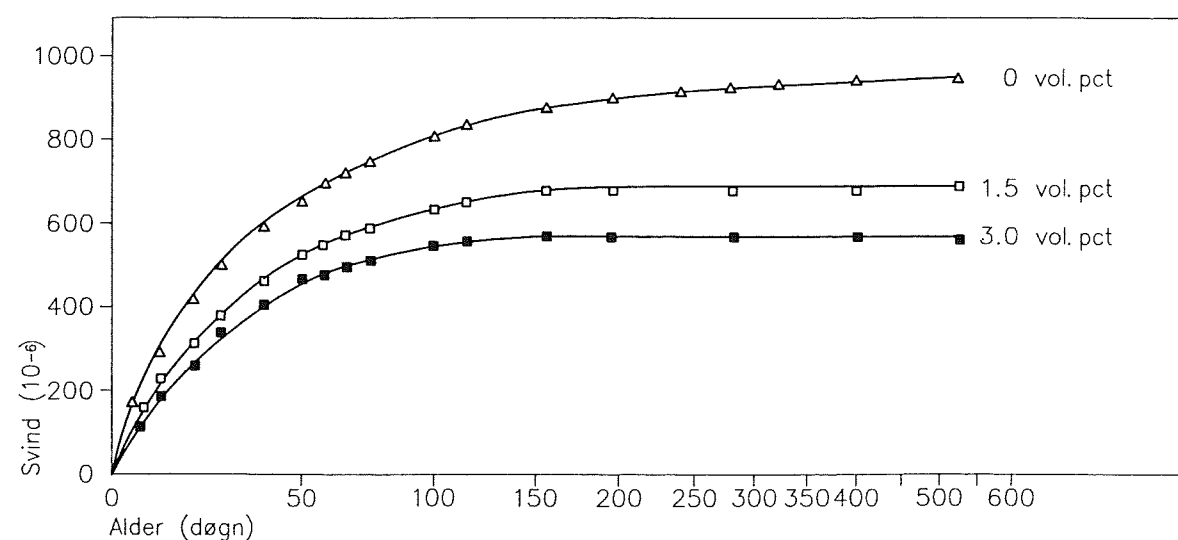
$$\epsilon_{sh} = 12 \left( \frac{2800 - \rho}{2400} \right)^2 \left( \frac{200 - RF}{200} \right) \cdot 10^{-3}$$

hvor  $\epsilon_{sh}$  er svindet i promille,

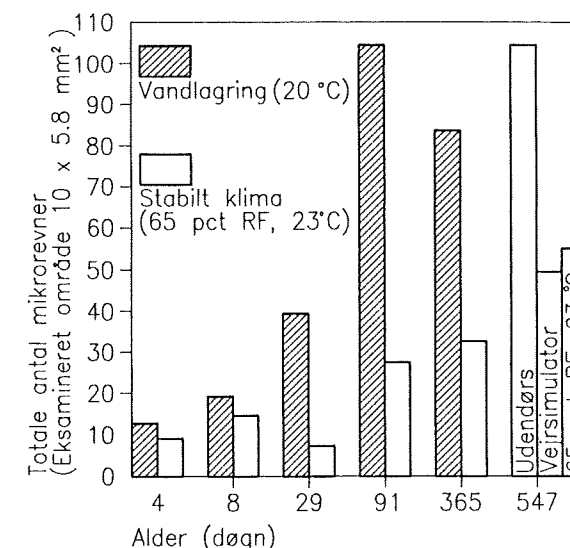
$\rho$  er densiteten af betonen udtørret ved 40 % relativ fugtighed,

$RF$  er den relative fugtighed i %.

Der er observeret en revnedannelse i polypropylenfiberarmeret beton lagret i vand ved 20 °C, i luft ved 65 % RF og 23 °C samt ved udendørs eksponering, hvilket er angivet i figur 16, hvor udviklingen af det totale antal mikrorevner er angivet som funktion af betonalderen. Der er ikke nogen umiddelbar forklaring på revnedannelsen, et gæt kunne være selvudtørringssvind. Det er heller ikke muligt at give en forklaring på forskellen i revneforløbet mellem tør og våd lagring af betonen.



Figur 15. Effekten af smelteekstrakt stålfibre (længde 22,5 mm, diameter 0,4 mm) på det frie svind af beton [Mangat og Azari, 88].



Figur 16. Det totale antal mikrorevner i polypropylenfiberarmeret beton på et eksamineret areal med størrelsen 10 x 5,8 mm. Resultaterne er fra vandlagring, luftlagring, "de fire årstider" (SBI vejrsimulator) og naturlig eksponering.

Gentagne perioder med opfugtning og udtørring af stålfiberarmeret beton øger styrke- og deformationmodstandsevnen i begyndelsen af eksponeringsperioden, men på lang sigt sker der en reduktion af disse egenskaber. Reduktionerne er større med øget fiberindhold [Kamal og El-Rafai, 87].

Glas-, natur- (sisal) og naturlig lagrede cellulose-fiberarmede cementbaserede kompositmaterialer udsat for opfugtning og udtørring bliver sprøde med tiden [Bergström og Gram, 84; Gram og Larsén, 85; Gram, 86]. Effekten af at modificere en matrix med mikrosilica er vist i tabel 17, hvor der er vist resultater fra forskellige kompositmaterialer udsat for opfugtning og udtørring.

Effekten af gentagen udtørring og opfugtning på styrke og svind af asbestcement indikerer, at svindrevner dannes allerede ved den første udtørring. Udtørring og opfugtning af prøver, der ikke var indspændte, viste ingen synlige revnedannelser [Becker og Laks, 85].

Varme-fugt påvirkninger for polymere fiberarmede, cementbaserede kompositmaterialer viser ingen eller kun ganske lille effekt på de mekaniske egenskaber men der kan observeres en del mikrorevnedannelse [Strabo, Clauson-Kaas, Chatterji og Thaulow, 86, 87]. Gentagne varme-fugt påvirkninger af de to fiberarmede beton (SF- og F-serierne) har ikke påvirket de mekaniske egenskaber, hvilket tilskrives at fugtbevægelserne er ganske små i de meget tætte betontyper.

Sarja (1989) har observeret at den maksimale fugtudvidelse er 0,2% af træfiberarmeret beton med densitet på 1500 kg/m<sup>3</sup>.

Perioder med udtørring ved 40 °C og vandopfugtning ved 20 °C af træfiberarmeret cement resulterede i længdeændringer, der bestod af en reversibel og irreversibel del. Efter 4 perioder stabiliserede fugtbevægelserne sig til 0,185 % og 0,125 % for henholdsvis den reversible og den irreversibile komponent [Bentur og Mindess, 83].

[Akers og Studinka, 89] studerede effekten af opfugtning og udtørring af cellulosepulpfiberarmeret kompositmaterialer (autoklaveret og natur-

lig lagret), og i forbindelse med karbonatisering. Resultaterne viste, at naturlig vejringspåvirkning forbedrede nogle af de mekaniske egenskaber, hvilket tilskrives karbonatisering af kompositmaterialerne. Autoklaveret cellulose-pulpfiberarmerede kompositmaterialers mekaniske egenskaber ser ikke ud til at være påvirket af gentagen opfugtning og udtørring.

Tabel 17. Resultater fra bøjetrækforsøg af materialer ældet efter en CBI ældningsmetode, dvs. opfugtning og udtørring. Prøverne er testet i tør tilstand og parameter B er en såkaldt "efterrevnestyrke", dvs. en styrke til en bestemt nedbøjning når brud er indtruffet [Bergström og Gram, 84].

Matrix	Fiber	Antal af perioder og parameter B (MPa)					
		0	12	60	72	120	152
OPC	CemFIL 2	28,2	---	---	1,2	---	0,9
OPC + 20 % SiO <sub>2</sub>	CemFIL 2	18,4	---	---	10,2	---	1,1
OPC + 35 % SiO <sub>2</sub>	CemFIL 2	22,9	---	---	10,9	---	2,1
OPC	Sisal	32,8	2,8	0,9	---	0,4	---
OPC	Sisal, impr.	13,6	9,7	9,5	---	5,6	---
OPC + 20 % SiO <sub>2</sub>	Sisal	28,7	21,4	7,8	---	5,3	---
OPC + 35 % SiO <sub>2</sub>	Sisal	36,7	33,8	21,7	---	19,6	---
OPC + 45 % SiO <sub>2</sub>	Sisal	33,8	31,0	29,9	---	31,1	---

Tabel 18. Effekten af naturlig og accelereret ældning på de mekaniske egenskaber af cellulosepulpfiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer [Akers og Studinka, 89]. Middelværdi og standardafvigelse.

	Naturlig lagret cellulosearmert cement				Autoklaveret cellulosearmert cement			
	$\sigma_b$ MPa	$\sigma_t$ MPa	E GPa	$\epsilon_{brud}$ %	$\sigma_b$ MPa	$\sigma_t$ MPa	E GPa	$\epsilon_{brud}$ %
Ikke ældet	16,4 (0,9)	7,0 (0,2)	10,9 (1,3)	2,80 (,70)	23,0 (1,3)	10,1 (1,3)	12,2 (1,6)	0,07 (,02)
3 måneders opfugtning og udtørring i normalt klima	12,3 (1,1)	2,6 (0,9)	14,8 (1,2)	0,04 (,01)	20,2 (1,8)	7,8 (1,2)	13,5 (1,8)	0,05 (,02)
3 måneders opfugtning og udtørring i CO <sub>2</sub> rigt miljø	23,9 (2,2)	7,2 (1,3)	18,9 (1,4)	0,05 (,01)	25,6 (1,3)	11,2 (1,3)	13,1 (1,1)	0,05 (,02)
Naturlig eksponering i 5 år	25,1 (1,6)	7,4 (0,9)	18,0 (0,9)	0,05 (,01)	27,2 (1,4)	12,2 (1,1)	18,6 (0,3)	0,04 (,01)

$\sigma_b$  er bøjetrækstyrken,  $\sigma_t$  er trækstyrken, E er elasticitetsmodul,  $\epsilon_{brud}$  er brudforlængelsen.

### Frost-tø

Under naturlig eksponering er frostbestandigheden af cementbaserede materialer afhængig af mængden af frysbar vand samt lagringshistorien før frysning indtræder. Her tænkes især på initialforholdene ved udstøbningen samt de omstændigheder, der bestemmer vandindholdet og fordelingen af vand i kompositmaterialet.

Et velfordelt poresystem øger frostbestandigheden af cementbaserede materialer, eksempelvis kvalitetsbeton (v/c ca. 0,4-0,5). Indblanding af

fibre yder ikke nogen signifikant indflydelse på frostbestandigheden af de cementbaserede materialer. Forsøg i udlandet og herhjemme tyder på at der skal være iblandet ca. 6 % velfordelt luft målt på den friske beton for at opnå tilfredsstillende frostbestandighed. Dette luftindhold svarer til et luftindhold på ca. 10 % målt på den hærdede kitmasse.

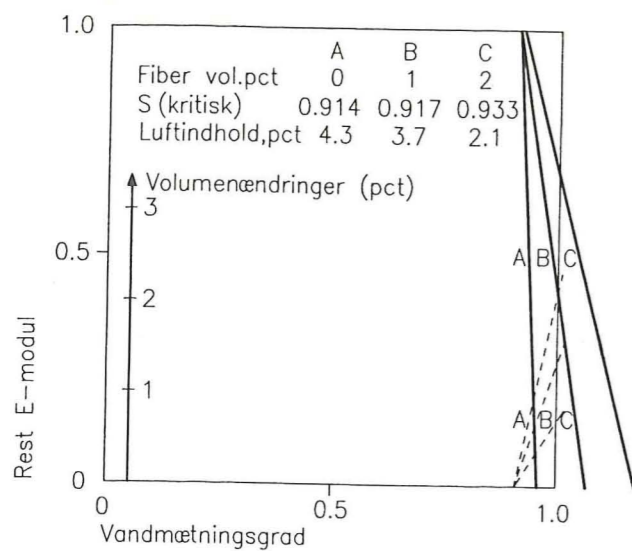
Gram, Fagerlund og Skarendahl (1978) anvendte bestemmelse af den kritiske vandmætningsgrad til bedømmelse af stålfiberarmert betons frostbestandighed. Konklusionen var, at initialfrostbestandigheden, her karakteriseret ved den kritiske vandmætningsgrad, ikke ændrede sig ved at indblande stålfibre i betonen. Nedbrydningen, når den kritiske vandmætningsgrad blev nået, skete langsommere for en armeret matrix i sammenligning med en uarmeret. Nedbrydningshastigheden faldt med øget fiberindhold, hvilket tillagdes fibrenes revnestandsende virkning (se figur 17). Ligeledes blev det konstateret, at fiberindblanding reducerede luftindholdet fra 4,3 % ved uarmeret beton til 2,1 % ved 2 vol% stålfiberarmert beton, hvilket har indflydelse på den aktuelle vandmætningsgrad.

På basis af data fra laboratorieforsøg og feltundersøgelser over 20 år har Hoff (1987) beskrevet bestandigheden af fiberarmert beton i marine miljøpåvirkninger. Hoff fremhæver luftindblanding som en nødvendighed for at opnå en rimelig frostbestandighed af fiberarmert beton. Fiberindblanding kan kun i ringe grad forlænge levetiden af ikke-luftindblandet beton. Frostbestandighedens afhængighed af matrixkompositionen understøttes f.eks. af Balaguru og Ramakrishnan (1986), for stålfiberarmert beton. I et forsøgsprogram blev frostbestandigheden bestemt efter ASTM C666, og følgende konklusioner kunne drages af forsøgsprogrammet:

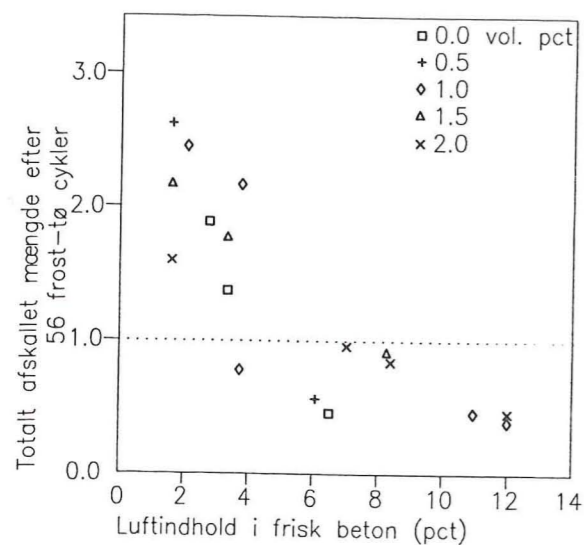
- Luftindholdet har stor betydning for frostbestandigheden af både uarmeret og fiberarmert beton.
- Ved samme luftindblanding opnås samme frostbestandighed for uarmeret og fiberarmert beton.
- Beton med større v/c-tal end 0,4 og et cementindhold på mindre end 415 kg/m<sup>3</sup> skal indeholde minimum 6 %, helst 8 %, luft for at undgå frost-tø-nedbrydning efter ASTM C666.
- Reduceret v/c-tal og/eller øget cementindhold ved et fast luftindhold forbedrer frostbestandigheden.
- Den specifikke overflade af luftporerne i fiberbeton er mindre end for uarmeret beton, hvilket betyder et mere grovfordelt luftboblesystem.

Frostbestandigheden af beton med varierende indhold af luft og polypropylenfibre er blevet undersøgt efter Svensk Standard SS 137244: "Betongprovning - Hårdnad betong - Frostresistens" (den såkaldte Borås metode).

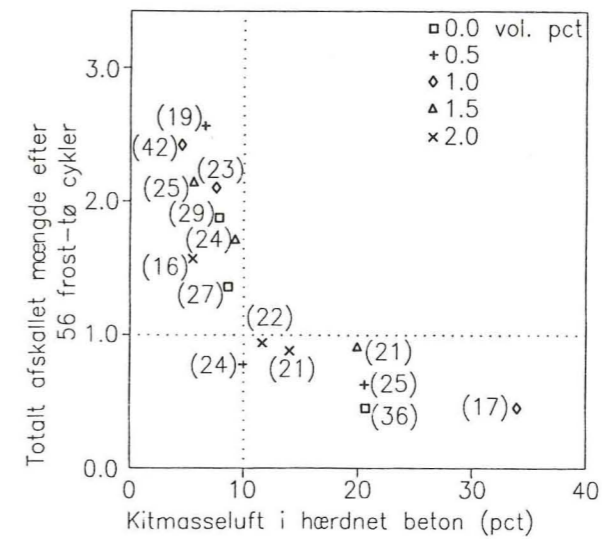
Polypropylenfiberarmert kvalitetsbeton (v/c ca. 0,4-0,5) udviser acceptabel frostbestandighed, når luftindholdet målt på den friske beton er højere end ca. 6 %, hvilket er vist i figur 18. I figur 19 peger resultaterne i retning af, at et velfordelt luftindhold på ca. 10 % målt på den hærdede kitmasse er nødvendig for at opnå en god frostbestandighed. I figur 20 er søgt tydeliggjort fiberindholdets indflydelse på frostbestandigheden ved forskellige luftindhold. Her ses, at for beton uden luftindblanding øges afskalningen ved stigende, små fiberindhold. Afskalningen aftager igen gradvis ved større fiberindhold, således at totalafskalningen efter 56 frost-tø perioder for en 2 vol% polypropylenfiberarmert beton bliver omtrent den samme som for en uarmeret beton, vel at mærke når der ikke er luftindblanding. Ved normale luftindhold for frostbestandig beton er der ingen signifikant effekt af fiberindholdet.



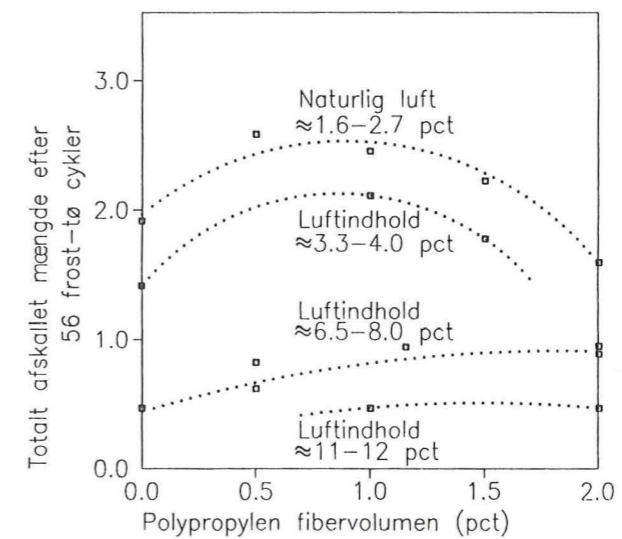
Figur 17. Rest E-modul (fuldt optrukne linier) og volumenændringer (stiplede linier) som funktion af vandmætningsgraden for tre forsøgsserier med stålfiberarmet beton ( $v/c = 0,5$ ) [Gram, Fagerlund og Skarendahl, 78].



Figur 18. Den totale afskalning efter 56 frost-tø cykler (SS 137244) som funktion af luftindholdet i den friske beton. Total afskalning mindre end  $1,0 \text{ kg/m}^2$  regnes for at give en acceptabel frostbestandighed. Betonen er armeret med forskellige vol% polypropylenfibre.



Figur 19. Den totale afskalning efter 56 frost-tø cykler (SS 137244) som funktion af kitmasseluftindholdet i den hærdnede beton. Luftboblernes specifikke overflade er angivet i parentes.



Figur 20. Den totale afskalning efter 56 frost-tø cykler (SS 137244) som funktion af polypropylenfibervolumenet og forskellige luftindhold målt i den friske beton.

Proctor (1980) rapporterer forsøg med bestemmelse af frostbestandigheden for glasfiberarmet cement.

Undersøgt efter BS 4624, dvs. 25 cykler og 50 cykler af våde emner mellem  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  og  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  i luft viste ikke nogen form for styrketab. Disse forsøg blev udført på både nystøbte og ældede emner. Selv med frysning ned til  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  gav ingen markante ændringer i de mekaniske egenskaber. ASTM C666 (procedure A) viser dog nogen nedbrydning af glasfiberarmet cement. Proctors konklusioner er, at frost-tø påvirkninger ikke er noget signifikant problem ved anvendelsen af glasfiberarmet cement.

Dinwoodie og Paxton (1989) og Sarja (1989) fremhæver, at frostbestandigheden af naturfiberarmede cementbaserede materialer er afhængig af matrixkompositionen.

Harper (1982) har undersøgt cellulosearmede produkter efter BS 690. Der kunne hverken konstateres skader eller nedgang i styrke efter 25 frost-tø perioder mellem - 20 °C og + 20 °C. Ved vacuum vandmætning viste de fleste produkter store reduktioner i styrke og stivhed efter 100 perioder med frost-tø. På SBI er der ligeledes udført frost-tø afprøvninger af cellulosearmede produkter. I disse forsøg blev emnerne nedsænket i vand i 3 døgn for derefter at blive udsat for frost og tø efter SS 137244 stadig nedsænket i vand. Efter 112 perioder viste prøverne nogen reduktion i styrke, stivhed og brudenergi [Larsen, 92]. Erfaringsmæssigt er frostbestandigheden af cellulosearmede produkter normalt ikke noget problem.

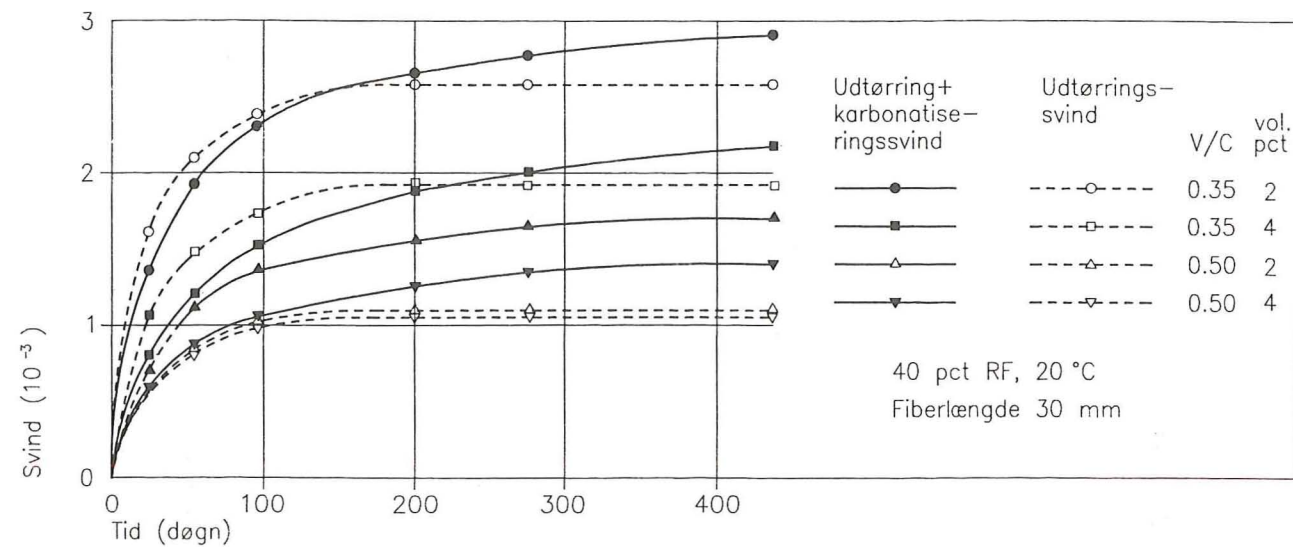
### Kemiske påvirkninger

Eksponering af beton mod CO<sub>2</sub> resulterer ikke i skadelige ekspansioner eller let opløselige produkter. Den største ulempe eller fordel af karbonatiseringen skal ses i lyset af at betonporevandets pH-værdi sænkes.

I forbindelse med karbonatisering af tyndpladeprodukter er der observeret et svind i samme størrelsesorden som udtørringssvind [Pihlajavaara, 77; Gram, 88].

Ændringen af porevandets Ph-værdi i karbonatiseret beton har en positiv effekt på korrosionen af glasfibre i tyndpladeprodukter. Reduktionen af alkaliteten ved CO<sub>2</sub>-lagring løser ikke holdbarhedsproblemet med glasfibre, men nedsætter kun nedbrydningshastigheden. Det betyder at E-glas-kompositmaterialer nedbrydes, når de er karbonatiseret, med samme hastighed som AR-glas-kompositmaterialer [Bentur, 83].

Karbonatisering af cellulosefiberarmede kompositmaterialer ændrer mikrostrukturen af matrix i nærheden af fibre og selve fibren. Fibren bliver "forstenet" med reaktionsprodukter, der fylder fiberhulrummet og imprægnerer fibercellevæggen [Bentur og Akers, 89]. Forstening af fibren forøger dens styrke og stivhed, hvilket leder til øget kompositmaterialestyrke og stivhed, men med reduktion af sejhed som resultat.



Figur 21. Udtørrings- og karbonatiseringssvind af glasfiberarmede tyndpladeprodukter [Pihlajavaara, 77].

## Lastpåvirkninger

### Krybning

Forøgelsen af tøjningen, medens et cementbaseret kompositmateriale er lastpåvirket, kaldes materialets krybning. Krybningen er af delvis reversibel karakter, dvs. deformationen består af en delvis reversibel visko-elastisk bevægelse (ren visko-elastisk fase og ren elastisk fase) samt en ikke reversibel plastik deformation. De fiberarmede, cementbaserede kompositmaterialer kryber ved belastning, tilsvarende de uarmede, cementbaserede kompositmaterialer.

På SBI er udført langtidsforsøg med en beton armeret med 2 vol% polypropylenfibre. Forsøget er udført i stabilt klima (65 % RF, 23 °C), ved varierende klima (65 % RF <-> 95 % RF) og udendørs naturligt klima. Belastningen er 4-punkts-bøjningsbelastning ved forskellige belastningsniveauer. I figur 22 og figur 23 er vist eksempler på krybningsforløb ved forskellige belastningsniveauer og klimaforhold.

Krybningen kan beskrives med et såkaldt Clouser-udtryk modificeret til følgende normerede krybningsfunktion:

$$C(t) = 1 + \left(\frac{t}{\tau}\right)^b$$

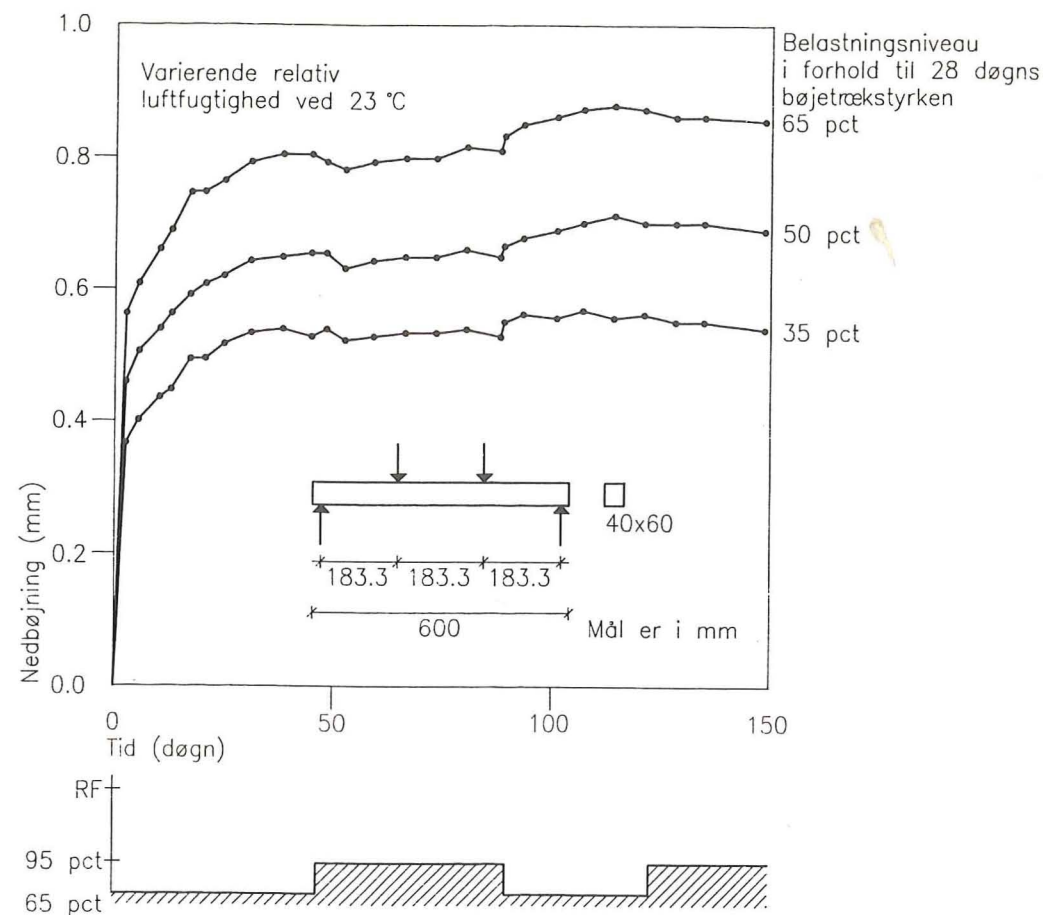
hvor  $t$  betegner tid, og konstanterne  $\tau$  og  $b$  er materialets relaksationstid og krybningsekspont.

Anvendelse af Niensens (1991) teorier for krybningsfunktionen har vist lovende resultater for fiberarmeret beton, men der skal nøjere studier til før diverse materialekonstanter er bestemt. Niensens krybningsfunktion har følgende udtryk:

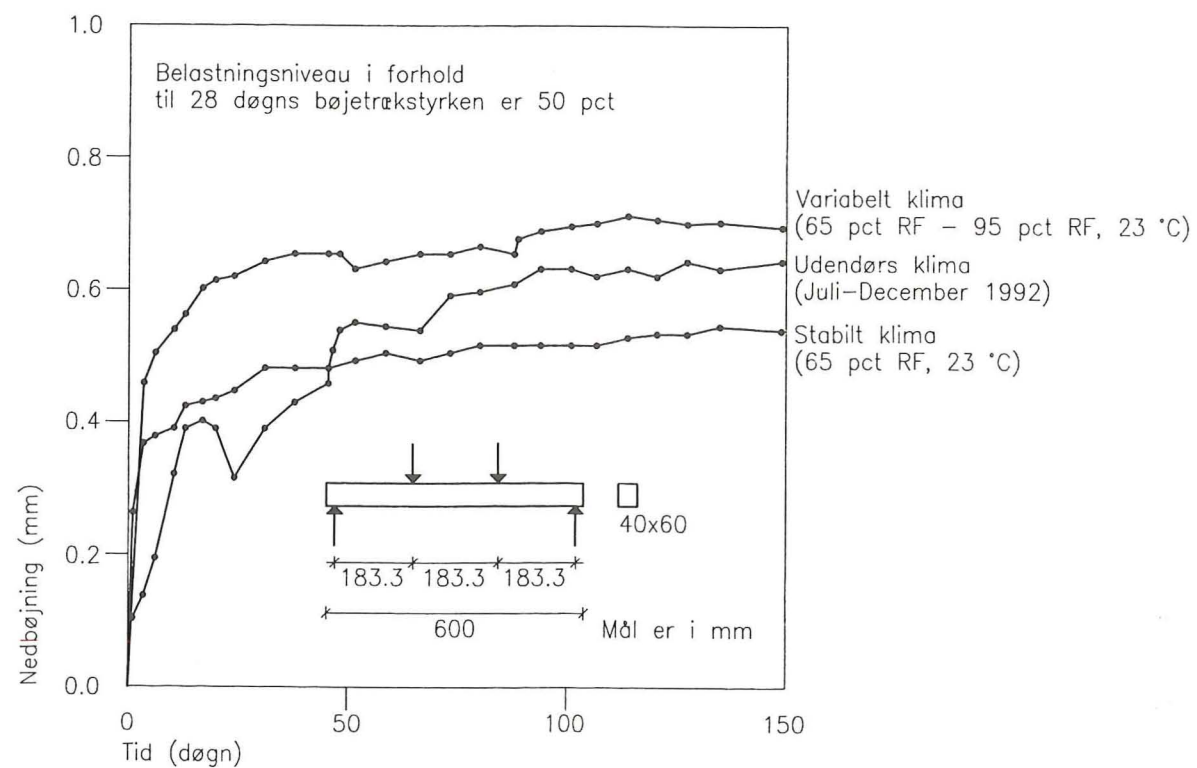
$$C(t, \tau) = \frac{1}{E_C(\tau)} \left[ 1 + \alpha_C \left[ 1 - \left( \frac{\langle \tau \rangle}{\langle t \rangle} \right)^P \right] \right] + \frac{1}{K} \left[ \log_E \left[ \frac{\langle t \rangle}{\langle \tau \rangle} \right] + \left[ \frac{C}{\langle \tau \rangle} \right]^Q \left[ 1 - \left( \frac{\langle \tau \rangle}{\langle t \rangle} \right)^P \right] \right]$$

hvor  $E_C(\tau)$  er det beregningsmæssige (statiske) Youngs modul,  $\langle t \rangle$  er modenhedsfunktionen,  $\langle \tau \rangle$  er modenheden ved lastpåførselen, samt materialekonstanterne er  $\alpha_C$  (elasticitetsfaktor),  $P$  (hastighedsekspont for forsinket elastisk tøjning),  $K$  (flow-modul),  $Q$  (konsoliderings-eksponet), og  $C$  (konsolideringstid).

I figur 22 og 23 er vist nogle krybningsresultater fra en fiberbeton armeret med 2 vol% polypropylenfibre (F-serien). Her ses med alt tydelighed belastningsniveauets indflydelse på krybningen (henholdsvis 35 %, 50 % og 65 % af 28-døgnstyrken). Men også varierende klima har en



Figur 22. Krybning af polypropylenfiberarmeret beton ved forskellige belastningsniveauer og varierende fugtighed.



Figur 23. Krybning af polypropylenfiberarmeret beton eksponeret udendørs, varierende fugtighed og stabilt klima, ved 50 % belastningsniveau af 28-døgnsstyrken.

ganske stor indflydelse på krybningen. I figur 22 er klimaet med fast temperatur, ca. 23 °C, og varierende fugtighed, mellem 65 % og 95 % RF, i et seks ugers interval. Der ses en ganske tydelig effekt af fugtighedsvariationerne. I figur 23 er afbildet den samme fiberbeton i fast/stabilt klima (65 % RF, 23 °C), varierende klima (65 % RF  $\leftrightarrow$  95 % RF, 23 °C) og udendørs eksponering (perioden juli - december 1992, startende med en meget lang og varm udtørningsperiode).

Stålfiberarmeret beton udviser en tendens til mindre krybning end tilsvarende uarmeret beton. Mangat og Azari (1985) giver følgende model til beskrivelse af stålfiberarmeret betons krybning,  $\epsilon_{fc}$ , i trykpåvirket tilstand:

$$\epsilon_{fc} = \epsilon_{oc} - \frac{0,34 \tau d l^2}{S^2 E_C (0,41 l + S)}$$

hvor  $\epsilon_{oc}$  er krybningen af den uarmerede beton,  $E_C$  er stivheden af en matrix mod krybningen givet ved  $E_C = E \epsilon_E / \epsilon_{op}$ , hvor  $\epsilon_{op} = \epsilon_{oc} - \epsilon_{od}$  og  $E$  er elasticitetsmodulet,  $\epsilon_{op}$  er flydekrybningen,  $\epsilon_{oc}$  er den totale krybning,  $\epsilon_{od}$  er den forsinkede elastiske krybning der er ekvivalent med tilbagekrybningen ved aflastning,  $d$  er fiberdiameter,  $\tau$  er den gennemsnitlige bindingsstyrke,  $S$  er fiberafstands faktoren, og  $l$  er fiberlængden.

Pihlajavaara og Pihlman (1977) konkluderede på basis af eksperimenter, at for hver vol% glasfibre reduceres den "endelige" trykbelastede krybning med 5-10 %. En forsøgsvis model er som følger:

$$\epsilon_{FRC} = C V_f^{(vol\%)} \frac{\epsilon_m}{\sigma}$$

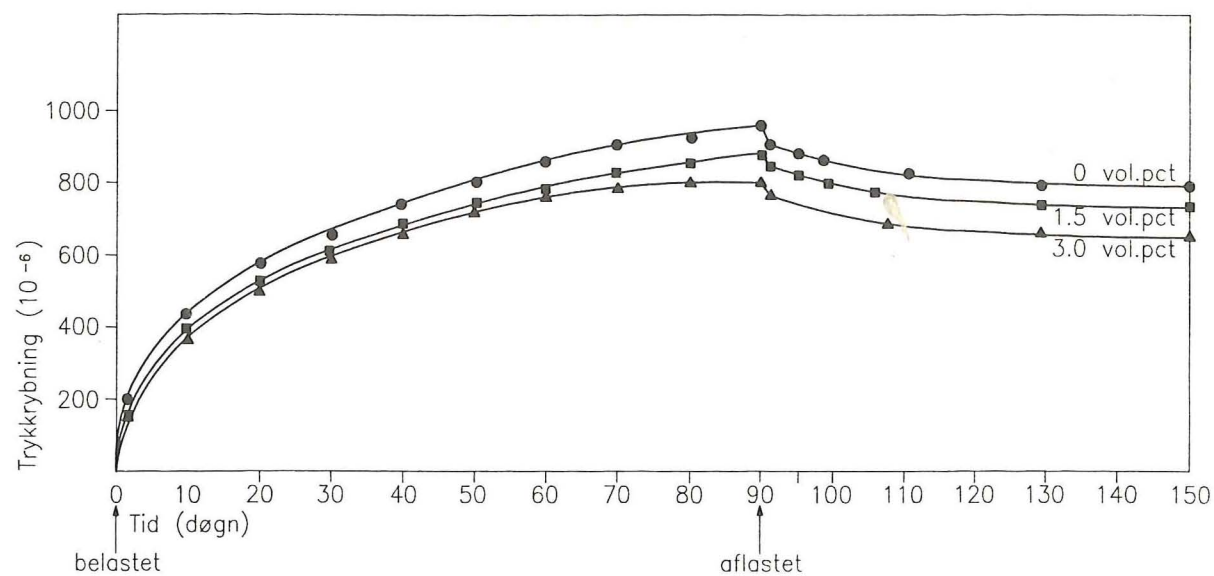
hvor middelværdien af  $C$  er 0,92;  $\epsilon_{FRC}$  er krybningen ved trykbelastningen af glasfiberarmeret beton,  $\epsilon_m$  er krybningen af den uarmerede beton ( $V_f = 0$  %), og  $V_f$  er fibervolumen i pct.

Krybekoefficienten,  $\phi$ , af træfiberarmeret beton øges med faldende densitet af betonen. Sarja (1988) har ved forsøg bestemt følgende sammenhæng:

$$\phi = 3 \cdot \frac{2400}{\rho}$$

hvor  $\rho$  er densiteten (kg/m<sup>3</sup>) af træfiberarmeret beton tørret ved 40 % RF.





Figur 24. Krybningen af trykbelastet stålfiberarmeret beton ved et belastningsniveau på 0,3 (smelte ekstrakt fibre  $l/d = 0,56$ ) [Mangot og Azari, 85].

### Træthedsbrud

Når et materiale bryder under gentagne belastninger, der ikke overskrider den statiske (korttids-) styrke, kaldes det træthedsbrud eller fatiguebrud. Generelt består processen af to dele; en initieringsfase, hvor små lokale fejl udvikler sig, til starten af en revne under stadig udvikling; dernæst en udviklingsfase hvor revnen vokser til sådan en størrelse, at der er mulighed for strukturbrud.

Træthedsstyrken af stålfiberarmeret beton afprøvet i enakset træk er højere end for den tilsvarende uarmerede beton, selv afprøvet ved ekvivalente procentdele af maksimal trækstyrke. Forøgelsen af træthedsstyrken kan forklares ved fibrenes revnestandsende effekt, samt deres evne til at optage lastpåvirkninger [Morris og Garret, 81].

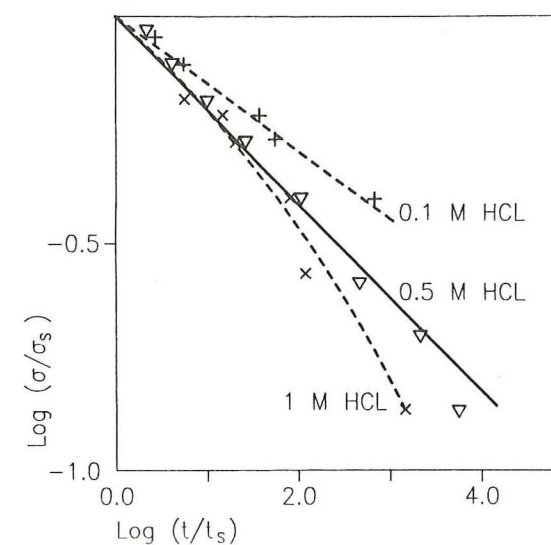
Ramakrishnan, Oberling og Tatnall (1987) rapporterer, at indblanding af stålfibre med ombukkede ender (hooked-end) har forøget bøjetrækfatiguestyrken af beton. Sammenlignet med uarmeret beton er bøjetrækfatiguestyrken forøget med 200-250 % og varighedsgrænsen (for 2 millioner cykler) var øget til ca. 90-95 %. Generelt er fatiguestyrken øget med øget stålfiberindhold.

Endelig skal kort nævnes, at vandlagring af AR-glasfiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer i seks år har vist et fald i bøjetrækfatiguestyrken [West og Walton, 81].

### Spændingskorrosion

Spændingskorrosion af fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer optræder som resultat af en kombination af trækbelastninger og eksponering i aggressivt miljø. Det aggressive miljø forårsager skader på fibre ved laste der er mindre end hvad der normalt forårsager tilsvarende skader. Det aggressive miljø antages at nå fibre gennem mikro-

revner, porøse områder og lignende i matrix der optræder som konsekvens af spændingspåvirkninger. I figur 25 er givet et eksempel på spændingskorrosion.



Figur 25. Dobbelt logaritmisk afbildning af brudspændingen af E-glasfiberbundter som funktion af brudtidspunktet i syrer med forskellige koncentrationer.  $t_s$  er tidspunktet for fiberbrud ved spændingen  $\sigma_s$  og  $t$  er tidspunktet for fiberbrud ved spændingen  $\sigma$  ( $\sigma < \sigma_s$ ) [Caddock, Evans og Hull, 90].

# Slid

Slid bevirker en nedbrydning af den overflade der påvirkes. Kort kan nævnes tre former for slid (Mindess og Young, 1981):

- (i) Slid ved gentagne gnidninger og glidninger mod overfladen.
- (ii) Erosion fra vand eller sand partikler der hvirvles ind mod overfladen.
- (iii) Kavitation fra luftbobler i strømmende væsker med stor hastighed.

Den første type, (i), er almindeligvis trafikpåvirkede overflader som f.eks. gulve eller veje. (ii) og (iii) er konstruktioner påvirket af strømmende vand og slitagen vil i dette tilfælde være afhængig af strømnings-hastigheden og sedimenttransporten.

Nedbrydningen af en trafikpåvirket betonoverflade foregår på forskellige måder (jf. Schaumann og Justesen, 1988). Ved friktion mellem overfladen og hjul samt intens gangtrafik fra mennesker og dyr vil der forekomme en vis slibeeffekt på overfladen. Herved vil cementpastaen over og mellem sandkornene først slides bort. De opragende sandkorn hæmmer derefter sliddet, indtil de rives løs. Såfremt sandkornene er bløde, vil de også slides selv. Når mørtellaget over stenpartiklerne er væk, fortsætter slidet på og mellem stenene, indtil de eventuelt også løsrives fra overfladen. Der kan også forekomme knusninger i overfladen, ved stødpåvirkninger eller når opragende tilslag og ujævnheder i overfladen udsættes for koncentrerede laster, f.eks. fra hårde små hjul.

Slidprøvninger af betonoverflader har vist at følgende faktorer har indflydelse på slidmodstandsevnen:

- Betonens trykstyrke (dermed også v/c-tal)
- Tilslagets kornstørrelsesfordeling og hårdhed
- Arbejdsudførelse og efterbehandling
- Overfladefærdiggørelse
- Overfladebehandlingsprodukter.

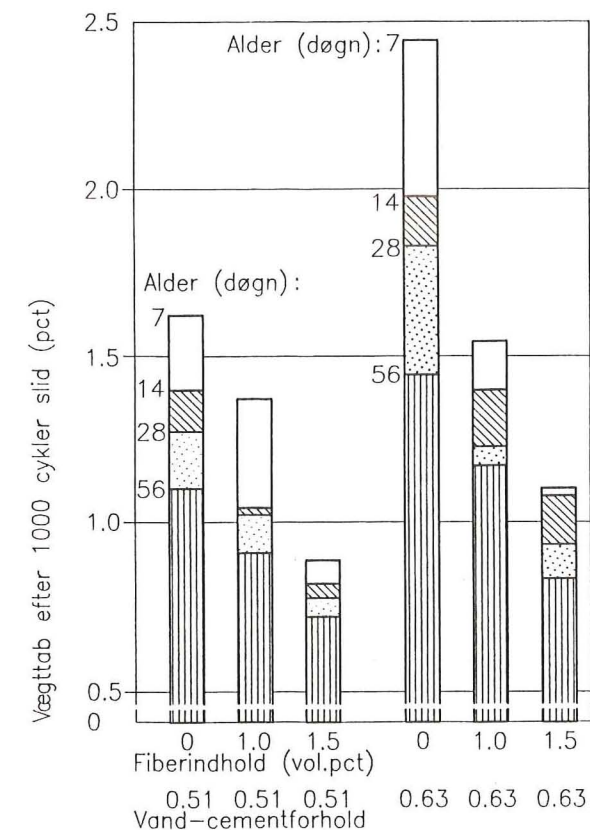
Yuan og Chen (1978) afprøvede slidmodstanden af *glasfiberarmeret beton* ( $D_{\max} = 9.5$  mm). Resultaterne viste at slidmodstanden var proportional med trykstyrken og dermed med v/c-tal. Ligeledes havde færdiggørelsen af overfladen stor indflydelse på slidmodstanden. Ved ca. 0,2 vol % glasfiberarmering og med en fiberlængde på både 12,7 mm og 25,4 mm blev der opnået den stærkeste slidmodstand af produktet.

Matala (1988) sammenlignede *stålfiberarmeret betons* ( $D_{\max} = 32$  mm, v/c = 0,47) slidmodstandsevne med en tilsvarende uarmeret referencebeton, og resultaterne viste 20-30% forøget slidmodstand ved beton armeret med 1 vol% stålfibre. Erfaringer fra en trafikbrobelægning viste god slidmodstand efter 3 år. Nishi, Oshio og Sone's (1978) resultater viser ligledes øget slidmodstand ved stigende fiberindhold og faldende vand-cement forhold (jf. figur 26).

Stålfiberarmeret beton udviser også god slidstyrke over for kavitation/erosion forårsaget af vand ved store hastigheder. Et eksempel hvor også

overfladeimprægnering viser sig at have stor indflydelse på erosionsdybden er påvist af Houghton et al (1978).

Der er flere steder udført slidprøvninger af *polypropylenfiberarmeret beton*. Ved en slidprøvning udført af NORCEM, Norge med en såkaldt vejslitagemaskine ("veisliter") på 0,1 vol % polypropylenfiberarmeret beton ( $D_{\max} = 22$  mm) viste resultaterne 34% og 17% forbedring af slidmodstanden for vand-cement tal på henholdsvis 0,42 og 0,50. Tilsvarende resultater er opnået i USA (Army Corps of Engineers) med 0,1 vol% polypropylenfibre og i Sverige (Statens Provninganstalt) med 0,2 vol%, der begge viste en fordobling af slidmodstandsevnen [Krågå, 87].

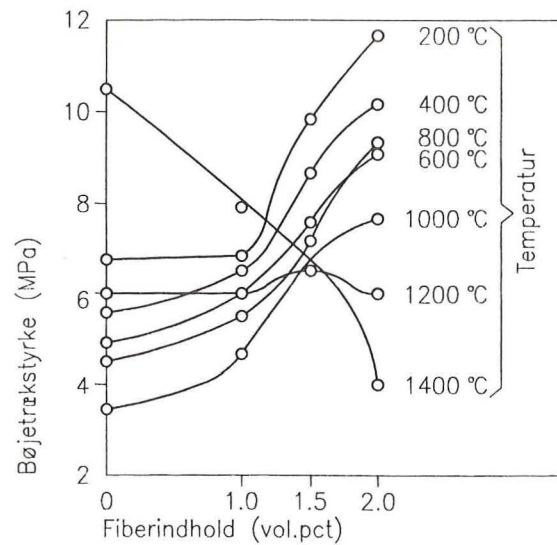


Figur 26. Slidmodstand af stålfiberarmeret beton [Nishi, Oshio og Sone, 78].

# Termiske påvirkninger (brand)

Undersøgelser af den termiske modstandsevne af fiberarmerede, cementbaserede kompositmaterialer udføres normalt kun på stål- og glasfiberarmerede materialer pga. fibrenes relativt gode termiske ydeevne.

Trykstyrken af både stål- og glasfiberarmeret beton er markant reduceret ved stigende temperaturer op til 800 °C, ganske som ved uarmeret beton. Dog udvikler de fiberarmerede kompositmaterialer større reststyrker end de tilsvarende uarmerede produkter.



Figur 27. Ændringer i bøjetrækstyrken som funktion af temperaturen af (rustfast) stålfiberarmeret beton ved forskellige fiberindhold [Lankard og Sheets, 71].

# Referencer

Akers, S. A. S.; Studinka, J. B.; Meier, P.; Johnson, D. J. og Hikasa, J.: "Long term durability of PVA reinforcing fibres in a cement matrix". The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. Vol. 11, No. 2. 1989. pp. 79-91.

Akers, S. A. S. og Studinka, J. B.: "Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests". The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. Vol. 11, No. 2. 1989. pp. 93-97.

Balaguru, P. N. og Ramakrishnan, V.: "Freeze-thaw durability of fibre reinforced concrete". ACI-journal. May-June 1986. pp. 374-382.

Beaudoin, J. J.: "Handbook of fibre reinforced concrete". New Jersey, Noyes Publications, 1990. 332 p.

Becker, R. og Laks, J.: "Cracking resistance of asbestos - cement panels subjected to drying". Durability of Building Materials. No. 3. 1985. pp. 35-49.

Bentur, A. og Mindess, S.: "Effect of drying and wetting cycles on length and strength changes of wood fibre reinforced cement". Durability of Building Materials. No. 2. 1983. pp. 37-43.

Bentur, A. og Akers, S. A. S.: "The microstructure and ageing of cellulose fibre reinforced cement composites cured in normal environment". The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. Vol. 11, No. 2. 1989. pp. 99-109.

Bentur, A.: "Durability of carbonated glass fibre reinforced cement composites". Durability of Building Materials. No. 1. 1983. pp. 313-326.

Bentur, A.; Ben-Bassat, M. og Schneider, D.: "Durability of glass-fibre-reinforced cements with different alkali-resistant glass fibres". Journal of American Ceramic Society. Vol. 62. 1985. pp. 203-208.

Bergström, S. G. og Gram, H.-E.: "Durability of alkali-sensitive fibres in concrete". International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. Vol. 6, No. 2. 1984. pp. 75-80.

Caddock, B. D.; Evans, K. E. og Hull, D.: "Stress-corrosion failure envelopes for E-glass fibre bundles". Journal of Materials Science. Vol. 25. 1990. pp. 2498-2502.

Coutts, R. S. P.: "Autoclaved beaten wood fibre reinforced cement composites". Composites. Vol. 15. 1984. pp. 139-143.

- Dinwoodie, J. M. og Paxton, B. H.: "A Technical assessment - cement bonded wood particle board". *Construction and Building Materials*. Vol. 3, No. 1. 1989. pp. 14-21.
- Fördös, Z.: "Natural or modified cellulose fibres as reinforcement in cement composites". *Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete* (Ed. Swamy). Glasgow, Blackie. 1988. pp. 173-207.
- Fördös, Z.: "Fiberarmed cementbaserede materialer". *Betontechnik* 08/02. 1979. 16 p.
- Galloway, J. W.; Williams, R. I. T. og Raithby, K. D.: "Mechanical properties of polyolefin-reinforced cement sheet for crack control in reinforced concrete". *Transport and Road Research Laboratory Supplementary Report 658*. Crowthorne. 1981. 43 p.
- Gram, H.-E.: "Durability of natural fibres in concrete". *CBI Forskning*, nr. 1.83. Stockholm. 1983. 255 p.
- Gram, H.-E.; Fagerlund, G. og Skarendahl, Å.: "Testing frost resistance of fibre concrete". *Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites* (Ed. Swamy). RILEM Symposium, England, 1978. Lancaster, Construction Press. 1978. pp. 503-509.
- Gram, H.-E. og Larsén, A.: "Cellulosafiberförstärks betong. Delprojekt beständighet". *Cement- och Betonginstitutet*. Stockholm. 1985. 36 p.
- Gram, H.-E.: "Durability studies of natural organic fibres in concrete, mortar and cement". *Development in Fibre Reinforced Cement and Concrete* (Ed. Swamy, Wagstaffe and Oakley). Vol. 2. RILEM Symposium, England, 1986. Cachem, RILEM, 1986. pp. 53-57.
- Gram, H.-E.: "Durability of natural fibres in concrete". *Concrete Technology and Design*, Vol. 5. *Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete* (Ed. Swamy). Glasgow, Blackie. 1988. pp. 143-172.
- Grzybowski, M. og Shah, S. P.: "Shrinkage cracking of fibre reinforced concrete". *ACI Materials Journal*. Marts-April 1990. pp. 138-148.
- Hannant, D. J.: "Ten-year flexural durability tests on cement sheet reinforced with fibrillated polypropylene networks". *Fibre Reinforced Cements and Concretes - Recent Developments*. London, Elsevier 1989. pp. 563-572.
- Hansen, P. F. og Jensen, O. M.: "Selfdesiccation shrinkage in low porosity cement-silica mortar". *Nordic Concrete Research*. Publ. No. 9. Oslo, The Nordic Concrete Federation. 1989. pp. 89-102.
- Harper, S.: "Developing asbestos-free calcium silicate building boards". *Composites*. Vol. 13. 1982. pp. 123-138.

- Hoff, G.: "Durability of fiber reinforced concrete in a severe marine environment (SP100-55)". *ACI SP-100*. Vol. 1. (Ed Scanlon). Detroit, American Concrete Institute. 1987. pp. 997-1041.
- Houghton, D. L.; Borge, O. E. og Paxton, J. A.: "Cavitation Resistance of Some Special Concretes". *ACI Journal* December 1978. pp. 664-667.
- Kamal, M. M. og El-Rafai, F. E.: "Durability of steel fibre reinforced concrete". *Durability of Building Materials and Components*. Singapore 1987. Oxford, Pergamon, 1987. pp. 235-247.
- Katz, A. og Bentur, A.: *Personlig og skriftlig kontakt*, 1992.
- Krenchel, H.: "Mekaniske egenskaber ved korttidsbelastning. FRC-materialer med anden armering end stålfibre". *Delrapport M i NORDFORSK Fiberbetong*. Stockholm, NORDFORSK. 1977. 19 p.
- Krenchel, H.: "Fibre spacing and specific fibre surface". *Fibre Reinforced Cement and Concrete*, RILEM Symposium 1975. Lancaster, The Construction Press. 1975. pp. 69-79.
- Krenchel, H.: "Fibre reinforcement". København, Akademisk Forlag. 1964. 159 p.
- Krenchel, H. og Hansen, A. S.: "Durability of polypropylene fibres in concrete". *Nordic Concrete Research*. Publ. No. 6. Oslo, The Nordic Concrete Federation, 1987. pp. 143-153.
- Krågå, M.: "Bruk av polypropylenfibre i betong". *Ingeniør-nytt* 23. nr. 36. 1987. pp. 32-34.
- Lankard, D. R. og Sheets, H. D.: "Use of steel wire fibers in refractory castables". *American Ceramic Society Bulletin*. Vol. 50, No. 5. 1971. pp. 497-500.
- Larsen, E. S.: "Service life prediction and fibre reinforced cementitious composites". *SBI report 222*. 1992. 160 p.
- Larsen, E. S.: "Development of fracture energy of FRC materials - Freezethaw resistance of FRC materials". *SBI Bulletin* 95. 1992. 39 p.
- Litherland, K. L.; Oakley, D. R. og Proctor, B. A.: "The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites". *Cement and Concrete Research*. Vol. 11, No. 3. 1981. pp. 455-466.
- Litherland, K. L. og Proctor, B. A.: "Predicting the long term strength of glassfibre cement composites". *Developments in Fibre Reinforced Cement and Concrete*. Vol. 2. RILEM Symposium, England, 1986. Cachem, RILEM, 1986. pp. 91-95.
- Majumdar, A. J. og Laws, V.: "Glass Fibre Reinforced Cement". London, BSP Professional Books, 1991. 197 p.

Mangat, P. S.; Manarakis, G. og Azari, M. M.: "Theory for early age shrinkage of fibre reinforced cement composites". *Fibre Reinforced Cements and Concretes - Recent Developments* (ed. Swamy og Barr). London, Elsevier, 1989. pp. 188-199.

Mangat, P. S. og Azari, M. M.: "Shrinkage of steel fibre reinforced cement composites". *Materials and Structures*. Vol. 21. 1988. pp. 163-171.

Mangat, P. S. og Azari, M. M.: "A theory for the creep of steel of steel fibre reinforced cement matrices under compression". *Journal of Materials Science*. Vol. 20. 1985. pp. 1119-1133.

Matala, S.: "SUMAK-project. Bridge overlay of steel fiber concrete". *Concrete and Silicate Laboratory. Technical Research Centre of Finland*. 1988. 14 pp.

Mindess, S. and Young, J. F.: "Concrete". Prentice-Hall Inc. London. 1981.

Morris, A. D. og Garrett, G. G.: "A comparative study of the static and fatigue behavior of plain and steel fibre reinforced mortar in compression and direct tension". *International Journal of Cementitious Composites*. Vol. 3, No. 2. 1981. pp. 73-91.

Nielsen, L. F.: "Betons krybning og stivhed - en rationel prediktionsmetode". FYM-DIA rapport. Fysik og Materialesektionen. Danmarks Ingeniør Akademi. 1991.

Nishi, S.; Oshio, A. og Sone, T.; *Journal of Research of the Onoda Cement Company*. Vol. 30. No. 100. 1978. pp. 100-146.

NORCEM: "Prøvning av Fibermesh i vegbetong". "Slitetest utført i USA ved the Army Corps of Engineers". Fibermesh salgsmateriale/dokumentationsmateriale.

NORDFORSK: "Fiberbetong - huvudrapport". Stockholm. 1977.

Pihlajavaara, S. E.: "Carbonation effects on concrete and on fibre reinforced concrete". Delrapport B i NORDFORSK Fiberbetong. Stockholm, NORDFORSK. 1977. 15 p.

Pihlajavaara, S. E. og Pihlman, E.: "Results of long-term deformation tests of glass fibre reinforced concrete". Delrapport O i NORDFORSK Fiberbetong. Stockholm, NORDFORSK. 1977. 31 p.

Proctor, B. A.: "Properties and performance of GRC". CI 80, Fibrous Concrete. London, The Construction Press. 1980. pp. 69-86.

Proctor, B. A.; Oakley, D. R. og Litherland, K. L.: "Developments in the assessment and performance of GRC over 10 years". *Composites*. April. 1982. pp. 173-179.

Ramakrishnan, V.; Oberling, G. og Tatnall, P.: "Flexural fatigue strength of steel fiber reinforced concrete". ACI SP 105. Detroit, American Concrete Institute. 1987. pp. 225-245.

RILEM Technical Committee 19-FRC: "Fibre Concrete Materials". *Materials and Structures*. Vol. 10. No. 56. 1977. pp. 103-120.

Sarja, A.: "Structural wood fibre concrete technology". VTT Symposium 105. Helsinki, Technical Research Centre of Finland. 1989. pp. 49-59.

Sarja, A.: "Wood fibre reinforced concrete". *Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete* (ed. Swamy). Glasgow and London, Blackie. 1988. pp. 63-91.

Schaumann, J. og Justesen, C. F.: "Slid på betonoverflader". *Beton-Teknik* 6/13. 1988. 8 pp.

Singh, S. M.: "Alkali resistance of some vegetable fibres and their adhesion with Portland cement". *Research and Industry*. Vol. 15. 1985. pp. 121-126.

Strabo, F.; Chatterji, S.; Clauson-Kaas, N. og Thaulow, N.: "Plastfiberbetoners holdbarhed". *Byggeteknik*. Tåstrup. Teknologisk Institut. 1987. 132 p.

Strabo, F.; Chatterji, S.; Clauson-Kaas, N. og Thaulow, N.: "Fiberbetontechnologi". Tåstrup. Teknologisk Institut. 1986. 78 p.

Vondran, G. og Webster, T.: "The relationship of polypropylene fibre reinforced concrete to permeability". ACI SP-108 Permeability of Concrete (ed. Whiting og Walitt). Detroit, American Concrete Institute. 1988. pp. 85-97.

West, J. M. og Walton, P. L. *Journal of Materials Science*. Vol. 16. 1981. pp. 2398.

Yuan, R. L. og Chen, W. F.: "Abrasion test for fibre reinforced concrete". *Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites, RILEM Symposium* (Ed. Swamy). The Construction Press. 1978. pp. 531-536.

# Appendix: Prøvningsmetoder - bestandighed, ydeevne

## Tyndpladeprodukter

Tyndpladeprodukter i byggeindustrien omfatter produkter der anvendes som f.eks. bølgeplader til tage, plane plader til vægge m.m.

UEAtc (European Union of Agrément) (1991) behandler prøvning og vurdering af holdbarheden af tynde, fiberarmerede produkter (4-30 mm) med cementbaseret binder armeret med organiske og/eller uorganiske fibre. Produkterne er tænkt anvendt til erstatning for asbestcementprodukter.

Herhjemme eksisterer en del danske standarder der vedrører denne type af produkter. De danske standarder bygger i stor udstrækning på ydeevnetankegangen (f.eks. SBI ydeevnebeskrivelser YEB nr. 3: "Ikke-bærende ydervægge", 1978).

I det følgende vil de mest almindelige ydeevneprøvningsmetoder med tilhørende krav blive gennemgået. Iøvrigt henvises til tabellerne A1 - A6 der giver et overblik over de danske standarder og UEAtc-arbejdet. Ligeledes vil almindeligt anvendte prøvningsmetoder beskrevet i litteraturen blive omtalt.

### Temperatureffekter

Temperaturen har indflydelse på reaktionshastigheden af forskellige ældningsforløb.

Afprøvning for såkaldt alkalisk ældning kan udføres efter **DS 1112**. Her udsættes prøvelegemerne for 60 dages eksponering i varmt vand, der er mættet med hydratkalk, ved 60 °C.

Efter denne påvirkning må der ikke forekomme synlige revner, afskalninger eller spaltninger i materialet. Ved prøvning af styrken ved fladelast, **DS 1114-4**, skal de eksponerede pladers modstandsevne være mindst 75% af værdien for ueksponerede vandmættede plader.

Specielt for glasfiberarmerede produkter kan der anvendes en metode udviklet af **Litherland et al** (1986), hvor der anvendes accelereret ældning i varmt vand. Metoden kan anvendes til alle typer af glasfibre i en cementmatrice men er specielt udviklet til forsøg, hvor det er SIC (strand-in-cement) styrken der bestemmes. Efter eksponeringen kan også trækstyrker og bøjetrækstyrker bestemmes. Metoden baserer sig i korthed på følgende antagelse. Tabet af glasfiberstyrken i cement er direkte afhængig af en kemisk reaktion og tiden det tager for styrken reduceret til en given værdi er omvendt proportional med den absolutte temperatur, og den initiale glasfiberstyrke. Følgende accelerationsfaktorer er bestemt ved sammenligninger med det engelske klima, hvilket ikke er særligt forskelligt fra det danske klima:

*1 dag i 80 °C varmt vand svarer til 1672 dage (4.6 år) i naturligt klima.*  
*1 dag i 70 °C varmt vand svarer til 693 dage (1.9 år) i naturligt klima.*  
*1 dag i 60 °C varmt vand svarer til 272 dage (9 måneder) i naturligt klima.*  
*1 dag i 50 °C varmt vand svarer til 101 dage (3.5 måneder) i naturligt klima.*  
Det engelske klima har en middeltemperatur på ca. 10 °C, hvor den danske årsmiddeltemperatur er ca. 8 °C.

Oxidation af polymere fibre kan forekomme, og til at belyse omfanget heraf angiver **UEAtc** en prøvningsmetode. Metoden kræver at bøjetrækstyrken ikke reduceres med mere end 10 % efter 56 døgn ved 80 °C i en ventileret ovn. Der må ikke forekomme synlige revner, spaltninger eller ændringer af udseende efter 56 døgn.

### Effekt af vandindtrængning og udtørring

Evnen til at modstå indtrængning af vand er en meget vigtig egenskab, da mange nedbrydningsmekanismer kun virker ved tilstedeværelse af vand, eksempelvis kan nævnes frost-tø nedbrydninger, der skal omtales senere.

Opfugtning og udtørring er en særdeles vigtig nedbrydningsmekanisme især for naturfiberarmerede produkter. **DS 1112** stiller krav om, at der for produkter monteret svarende til brugstilstanden ikke må forekomme synlige revner, afskalning eller spaltninger i materialet efter 25 perioder med følgende påvirkning:

*Varme ved 75 °C (målt ved bølgetop) i 2 timer og 55 minutter*

*Pause i 5 minutter*

*Vandpåsprøjtning 10 l/m<sup>2</sup>/minut i 2 timer og 55 minutter*

*Pause i 5 minutter.*

Denne prøvning svarer stort set til en **UEAtc**-metode, men her stilles også krav om at bøjetrækstyrken kun må reduceres med højst 10 % efter 50 perioder.

Specielt for naturfiberarmerede produkter har **Gram** (1983) udviklet en prøvningsmetode, hvor der anvendes en meget lang udtørringstid.

Metoden er udviklet ved Cement og Betonginstituttet i Stockholm (CBI) og baserer sig på den antagelse, at nedbrydningen af naturfibre i cement sker ved en såkaldt "peeling-off" effekt. Ved denne effekt bliver hemicellulose og lignin opløst kemisk i det alkaliske miljø, hvorved fibren mister sin effekt. Metoden anvendes til at forudsige hvorvidt et naturfiberarmert produkt vil blive sprødt i naturligt klima. Metoden kan dog ikke på nuværende tidspunkt sige noget om, hvad en cyklus svarer til i tid i naturligt klima. CBI-metodens cyklus er:

*Vandpåsprøjtning 1.5 l/prøvelegeme/minut i 30 minutter*

*Udtørring ved 105 °C i 5 timer og 30 minutter.*

### Frostbestandighed

**DS 1112** og **DS 1130** stiller krav om, at der efter 25 frost-tø perioder ikke må være synlige revner, afskalninger eller spaltninger. Frost-tø påvirkningerne fortsættes til og med 100 perioder med inspektion efter 25, 50 og 100 perioder. En periode består af følgende:

*Optøning ved vandpåsprøjtning i 1 time,*

*Nedkøling i luft ved -10 °C i 3 timer.*

Nedkøling til -10 °C er en ikke særlig voldsom påvirkning, men den er ganske realistisk for det danske klima. Forsøg har vist at frostbestandigheden af porøse materialer er mere følsom over for den laveste temperatur end for temperaturgradienten. **UEAtc** foreskriver nedkøling til -20 °C i luft og optøning i vand, med 1-3 timer i hver position. Optøning i

vand virker til gengæld også voldsom, så et kompromis kunne være nedkøling til -20 °C i luft og optøning ved vandpåsprøjtning.

### Lastpåvirkninger

Påvirkninger som følger af *snelast* udføres efter **DS 1114-4** der simulerer en fladelast ved brug af en jævnt fordelt linielast. Efter afprøvning skal pladerne stadig være vandtætte.

Modstandsevnen over for *vindsug* både på vandrette og lodrette emner udføres efter **ASTME 72**, den såkaldte Champer metode. Normalt må det kræves, at producenten deklarerer modstandsevnen mod vindsug og snelast ved anvendelses- og brudgrænsen.

*Personlast* på vandrette bølgeplader simuleres ved en statisk last på 1.0 kN, med en trykfladediameter 100 mm, som beskrevet i **DS 1114-5**. Efter lasten har været påført op til anvendelsesgrænsen, skal pladen stadig være vandtæt.

Mindre mekaniske *påvirkninger fra f.eks. en stige, cykel* på lodrette plader simuleres, som angivet i **DS 1132-2**, ved at påføre 0.6 kN på en cylindrisk 25 mm ståldorn. Kravet er at der ikke må forekomme gennemgående revner eller gennemlokning af pladen.

*Bestemmelse af modstandsevne over for bløde stød* sker på basis af **DS 1133**. Her udsættes tagkomponenter for ét stød fra en 30 kg lædersæk indeholdende glaskugler, der i et frit fald rammer et såkaldt dæmper-element anbragt oven på tagpladen. Ved stødflediameter 250 mm anvendes dæmperelement C og faldhøjde 0.45 m, og ved stødflediameter 100 mm (1 bølge) anvendes dæmperelement A og faldhøjde 0.20 m. Kravet ved begge forsøg er, at sækken ikke må falde gennem pladen, og at pladen bagefter skal kunne modstå en statisk punktlast på 1.0 kN i 30 sekunder. **DS 1132-3**: Vægkomponenter udsættes for ét stød med en 50 kg kanvassæk, der i en pendulbevægelse rammer væggen vandret. Sækken skal have faldhøjden 0.25 m. Stødet må ikke frembringe mindre skader, som f.eks. revner der er skadelige for væggen funktion i anvendelsestilstanden. Ved yderligere ét stød med sækken fra den højde, som af producenten er deklareret som højden ved brudgrænsen, må der ikke opstå brud, f.eks. gennemgående revner eller afslåede stykker.

*Brand*. Brandprøvning af plane og bølgede plader udføres efter **DS 1058.1** og kravet er at materialet skal kunne klassificeres som klasse A materiale efter **DS 1065-1**.

Tabel A1. Frostbestandighed.

Standard	Metode	Krav
DS 1112, DS 1130, DS 1114-3, DS 1131-3	DS 1114-3 og DS 1131-3: 1 cyklus: 1 times vandpåsprøjtning 3 timer ved -10 °C. Inspektion efter 25, 50 og 100 cykler.	DS 1112 og DS 1130: Efter 35 frosttø perioder må der ikke være synlige revner, afskalninger eller spaltninger i materialet.
UEAtc	1 periodes varighed er 4-6 timer. Først nedkøles i luft til -20 °C indenfor 1-2 timer, derefter stabiliseres ved -20 °C i 1 time. Optøning i vand til +20 °C inden for 1-2 timer, derefter i vand ved +20 °C i 1 time. Visuel inspektion og bestemmelse af bøjetrækstyrken efter 0, 25, 50 perioder.	Der må ikke forekomme synlige revner, spaltninger eller ændringer af udseende. Bøjetrækstyrken må ikke reduceres med mere end 10 % efter 50 perioder.

Tabel A2. Varmt vand.

Standard	Metode	Krav
DS 1112	60 dage i varmt vand, ved 60 °C, der er mættet med hydratkalk.	Der må efter eksponeringen ikke forekomme synlige revner, afskalninger eller spaltninger i materialet. Ved prøvning af modstand over for fladelast skal de eksponerede pladers modstandsevne være mindst 75 % af værdien for ueksponerede vandmættede plader.
UEAtc	Varmt vand ved 60 °C. Bøjetrækstyrken måles efter 14, 28 og 56 døgn.	Der må ikke forekomme synlige revner, spaltninger eller ændringer af udseende. Bøjetrækstyrken må ikke reduceres med mere end 10 % efter 56 døgn.

Tabel A3. Varme-fugtpåvirkninger.

Standard	Metode	Krav
DS 1112	Bølgepladerne monteres i brugstilstanden og eksponeres for 25 perioder hvor en periode er følgende: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Varme ved 75 °C i 2 timer og 55 minutter.</li> <li>• Pause i 5 minutter.</li> <li>• Vandpåsprøjtning 10 l/m<sup>2</sup>/minut i 2 timer og 55 minutter.</li> <li>• Pause i 5 minutter.</li> </ul>	Der må ikke forekomme synlige revner, afskalninger eller spaltninger i materialet efter 25 perioder.
UEAtc	Monteret i brugstilstanden eksponeres pladerne på følgende måde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Varme, ved 60 °C (bølgeplade), 70 °C (plan plade), 80 °C (isoleret produkt), i 2 timer og 50 minutter.</li> <li>• Pause i 10 minutter.</li> <li>• Vandpåsprøjtning 2.5 l/m<sup>2</sup>/minut i 2 timer og 50 minutter.</li> <li>• Pause i 10 minutter.</li> </ul>	<p>Visuel inspektion efter 5, 25 og 50 perioder. Der må ikke forekomme synlige revner, spaltninger eller ændringer af udseende.</p> <p>Pladerne må maksimalt krumme med en pilhøjde på 3 mm efter afprøvningen.</p>
UEAtc	Inspektion og bestemmelse af bøjetrækstyrken efter 0, 25 og 50 perioder, på følgende måde: <ul style="list-style-type: none"> <li>• I vand (<math>\geq 5</math> °C) i 17 timer og 55 minutter.</li> <li>• Pause i 5 minutter.</li> <li>• I ventileret ovn ved 60 °C i 5 timer og 55 minutter.</li> <li>• Pause i 5 minutter.</li> </ul>	<p>Der må ikke forekomme synlige revner, spaltninger eller ændringer af udseende.</p> <p>Bøjetrækstyrken må maksimalt reduceres med 10 %.</p>

Tabel A4. Laste, statiske, dynamiske.

Standard	Metode	Krav
DS 1112, DS 1114-4, ASTM E 72	Sne- og vindlast. DS 1114-4 simulerer en fladelast ved brug af en jævnt fordelt linielast. ASTM E 72 (chamber method) bestemmes, når modstandsevnen over for vindsug skal bestemmes.	Modstandsevnen over for sne- og vindlast deklarerer ved anvendelses- og brudgrænsen. Ved den i DS 1114-4 deklarerede anvendelsesgrænselast skal pladen stadig være vandtæt.
DS 1130, ASTM E 72	Bestemmelse af modstandsevnen over for vindsug. (jf. SBI-meddelelse 29)	Modstandsevnen deklarerer ved anvendelses- og brudgrænsen.
DS 1112, DS 1114-5	Personlast, statisk punktlast på bølgeplader. Påføring af 1.0 kN på en trykflade med diameteren 100 mm.	Efter at last har været påført op til anvendelsesgrænsen, skal pladen stadig være vandtæt (DS 1114-2).
DS 1130, DS 1132-2	Vægge udsat for statisk punktlast. Vægkonstruktionen, der er vandret monteret, påføres 0.6 kN på en cylindrisk ståldorn.	Der må ikke forekomme gennemgående revner eller gennemlokning af pladen.
DS 1113, DS 1133, DS 1114-4	Bestemmelse af tagkomponenters modstandsevne over for bløde stød. En lædersæk fyldt med glaskugler (diameter 3 mm) og massen 30 kg (eller 50 kg) udfører et frit fald mod et såkaldt dæmpelement. Dette element har forskellig udformning afhængig af støddiameteren.	<p>Stødflediameter 250 mm: Ved prøvning med ét stød fra en 30 kg sæk må sækken ikke falde gennem pladen, når der anvendes 0.45 m faldhøjde og dæmpelement C. Herefter skal pladen kunne modstå en statisk punktlast på 1.0 kN i 30 sekunder (DS 1114-4).</p> <p>Stødflediameter 100 mm (1 bølge): Ved prøvning med ét stød fra en 30 kg sæk må sækken ikke falde gennem pladen, når der anvendes 0.20 m faldhøjde og dæmpelement A. Herefter skal pladen kunne modstå en statisk punktlast på 1.0 kN i 30 sekunder (DS 1114-4).</p>
DS 1130, DS 1132-3	Bestemmelse af vægkomponenters modstandsevne over for bløde stød. En canvassæk fyldt med glaskugler (diameter 3 mm) og massen 50 kg rammer i en pendulbevægelse vægkomponenten. Sækken frigøres fra en bestemt faldhøjde.	<p>Tre stød med den specificerede sæk, fra en faldhøjde på 0.25 m, må ikke frembringe mindre skader i pladen, som f.eks. revner, der er skadelige for væggen funktion i anvendelsestilstanden.</p> <p>Ved yderligere ét stød med sækken fra den højde, som af producenten er deklareret som højden ved brudgrænsen, må der ikke opstå brud, f.eks. i form af gennemgående revner eller afslåede stykker.</p>



Tabel A5. Varm luft.

Standard	Metode	Krav
UEAtc	Ventileret ovn ved 80°C.	<p>Visuel inspektion og bestemmelse af bøjestrækstyrken efter 14, 28 og 56 døgn.</p> <p>Der må ikke forekomme synlige revner, spaltninger eller ændringer i udseende efter afprøvningen.</p> <p>Bøjestrækstyrken må ikke reduceres med mere end 10% efter afprøvningen.</p>

Tabel A6. Brand.

Standard	Metode	Krav
DS 1112, DS 1130	DS 1058.1 Brandteknisk prøvning af materialer, beklædninger og overflader over for antændelighed.	Materialet skal kunne klassificeres som klasse A materiale efter DS 1065-1.
DS 1112	ISO 1716-1973.	Pladematerialet skal udvise en øvre brændværdi på højst 2.5 MJ/kg.
DS 1112	DS 1056-1 Brandprøvning af byggematerialer over for ubrændbarhed.	Klassificeres som ubrændbart efter DS 1057.1

#### Referencer til tyndpladeprodukter

European Union of Agrément (UEAtc): "UEAtc Technical Guide for the Assessment of the Durability of Thin Fibre Reinforced Cement Products (without Asbestos) for External Use". 1991 pp 44.

DS 1112: "Bølgeplader af fiberarmeret cement til tagbeklædning - Krav". Dansk Standard 1. udg. 1989. pp 10.

DS 1113: "Bølgeplader af fiberarmeret cement til tagbeklædning - Krav, også til punktlast og stødlast". Dansk Standard 1. udg. 1989. pp 10.

DS 1114-1: "Bølgeformede tagplader - Måling af dimensioner". Dansk Standard 1. udg. 1989. pp 7.

DS 1114-2: "Bølgeformede tagplader - Prøvning af vandtæthed". Dansk Standard 1. udg. 1989. pp 4.

DS 1114-3: "Bølgeformede tagplader - Prøvning af frostbestandighed". Dansk Standard 1. udg. 1989. pp 4.

DS 1114-4: "Bølgeformede tagplader - Prøvning af modstand over for fladelast (sne- og vindtryk)". Dansk Standard 1. udg. 1989. pp 5.

DS 1114-5: "Gulv- og tagplader - Modstandsevne over for koncentreret statisk punktlast". Dansk Standard 1. udg. 1989. pp 11.

DS 1130: "Plane plader af fiberarmeret cement til udvendig bygningsbeklædning - Krav". Dansk Standard 1. udg. 1988. pp 14.

DS 1131-1: "Plane plader af fiberarmeret cement til udvendig bygningsbeklædning. Prøvning af fugtbetingede dimensionsændringer". Dansk Standard 1. udg. 1988. 4 p.

DS 1131-2: "Plane plader af fiberarmeret cement til udvendig bygningsbeklædning. Prøvning af vandtæthed". Dansk Standard 1. udg. 1988. 3 p.

DS 1131-3: "plane plader af fiberarmeret cement til udvendig bygningsbeklædning. Prøvning af frostbestandighed". Dansk Standard 1. udg. 1988. 3 p.

DS 1132-1: "Vægge - Prøvning af modstandsevne over for hårde stød". Dansk Standard 1. udg. 1988. 7 p.

DS 1132-2: "Vægge - Prøvning af styrke ved statisk punktlast". Dansk Standard 1. udg. 1988. 4 p.

DS 1132-3: "Vægkomponenter - Bestemmelse af modstandsevne over for bløde stød". Dansk Standard 1. udg. 1987. 7 p.

DS 1133: "Tagkomponenter - Bestemmelse af modstandsevne over for bløde stød". Dansk Standard 1. udg. 1987. 11 p.

DS 1056.1: "Brandprøvning - Byggematerialer - Ubrændbarhed". Dansk Standard 1. udg. 1981. 10 p.

DS 1057.1: "Brandteknisk klassifikation - Byggematerialer - Ubrændbarhed". Dansk Standard 1. udg. 1981. 1 p.

DS 1058.1: "Brandteknisk prøvning - Materialer. Beklædninger og overflader - Antændelighed". Dansk Standard 1. udg. 1976. 3 p.

DS 1058.2: "Brandteknisk prøvning - Materialer. Beklædninger og overflader - Brandudbredelse og røgudvikling". Dansk Standard 1. udg. 1976. 4 p.

DS 1058.3: "Brandteknisk prøvning - Materialer. Beklædninger og overflader - Antændelsestemperatur og flammespredning". Dansk Standard 1. udg. 1977. 5 p.

DS 1063.1: "Brandteknisk klassifikation - Tagdækninger - Klasse T tagdækninger". Dansk Standard 2. udg. 1989. 3 p.

DS 1063.2: "Brandteknisk klassifikation - Gulvbelægninger - Klasse A og klasse B materialer". Dansk Standard 1. udg. 1982. 3 p.

DS 1056.1: "Brandteknisk klassifikation - Byggematerialer - klasse A og klasse B materialer". Dansk Standard 1. udg. 1982. 3 p.

ASTM E 72-80: "Standard Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction". ASTM annual Book of ASTM standards vol. 04.07: Building Seals and sealants; Fire standard, Building Constructions. 1991. p 284-294.

## Fiberarmeret beton

### Frostbestandighed

Frostbestandigheden af fiberarmeret beton adskiller sig almindeligvis ikke fra frostbestandigheden af uarmeret beton.

En fiberarmeret beton, der opfylder kravene der stilles til en uarmeret beton, vil være frostbestandig. Frostbestandighed kan bestemmes efter **Svensk Standard SS 137244**, en metode udviklet til brug for uarmeret beton, men som også kan anvendes på fiberarmeret beton.

Beton, der udsættes for frost, kan ødelægges, hvis betonen samtidig befinder sig i tilstrækkelig fugtigt miljø, dvs. miljø hvor der er risiko for stor vandtilførsel.

Hvis der blandes luft i den friske beton, reduceres risikoen for frostska-der. **DS 411-84** og Basisbetonbeskrivelsen, **BBB**, stiller krav om, at der skal indblandes luft i al beton i aggressiv miljøklasse, samt i beton i moderat miljøklasse, som vil kunne blive udsat for frost-tø påvirkninger.

Tabel A7 angiver de maksimalt tilladelige karakteristiske vand-cement forhold, som det er tilladt at foreskrive for beton i de tre miljøklasser, der optræder i **DS 411-84** og **BBB**. Ligeledes er anført kravene i **BBB** til luftindholdet i den friske og hærdnede beton, samt kravet til specifik overflade af de indblandede luftbobler.

Tabel A7. Krav til frostbestandig beton efter DS 411-84 og BBB.

Miljøklasse	Maks. fore- skreven karakteristisk værdi af v/c	Min. værdi af foreskreven $f_{ck}$ (MPa)	Frisk beton		Hærdnet beton	
			Min. luft- indhold i % af kitmasse- volumen <sup>1)</sup>	Min. luftindhold i % af kitmasse- volumen <sup>1)</sup>	Luftboblernes specifikke overflade skal være	
Aggressiv	0.45	35	15	10	> 25 mm <sup>-1</sup>	
Moderat	0.55	30	15	10	> 25 mm <sup>-1</sup>	
Passiv	Intet krav	15	Intet krav	Intet krav	Intet krav	

1) Som kitmassevolumen regnes totalt betonvolumen minus volumen af tilslagsmaterialer.

I det følgende vil der blive refereret tre forskellige metoder til bestemmelse af fiberbetons frostbestandighed. Metoderne stammer henholdsvis fra to standarder og et eksempel hentet fra litteraturen.

### Prøvning efter Svensk Standard SS 13 72 44

Prøvetilberedning: Første døgn efter udstøbning lagres prøverne i formene, ved 20 °C, og beskyttes mod udtørring. Derefter afformes og prøverne vandlagres, ved 20 °C, i 4-6 døgn, hvorefter de opbevares ved 50 % RF og 20 °C. Når prøverne er ca. 21 døgn gamle, saves prøveemnerne til foreskrevet størrelse, hvorefter de fugt- og varmeisoleres. Når prøverne er 28 døgn gamle, eksponeres de med 3 mm vand på fryseoverfladen i et døgn, hvorefter vandet udskiftes med 3 % saltvand (metode A) eller rent vand (metode B) og frostforsøget kan startes.

Temperaturforløb: Prøverne eksponeres ensidet. Der anvendes normalt kubus (15 cm x 15 cm x 5 cm), hvor de 5 sider fugt- og varmeisoleres og den sidste side anvendes til eksponering med vand eller saltvand. Der anvendes normalt 3 stk. i en prøveserie. En enkelt temperaturperiode tager 24 timer og temperaturen skal beskrive et bestemt forløb hvor temperaturen i væskeopløsningen skal være større end 0 °C i mindst 7 og højst 9 timer. Temperaturen varieres imellem -20 °C og +20 °C.

Krav: Efter 7, 14, 28, 42 og 56 perioder bestemmes vægten af det materiale der er skallet af frysefladen. Følgende krav stilles til mængden af afskallet materiale,  $M_n$  (kg/m<sup>2</sup>) efter n perioder:

Meget god: Ingen prøvelegemer har større afskalninger end 0.1 kg/m<sup>2</sup> efter 56 perioder.

God: Afskalningens middelværdi efter 56 perioder ( $M_{56}$ ) er mindre end 0.5 kg/m<sup>2</sup> samtidigt med at  $M_{56}/M_{28}$  er mindre end 2.

Acceptabel: Afskalningens middelværdi efter 56 perioder ( $M_{56}$ ) er mindre end 1.0 kg/m<sup>2</sup> samtidigt med at  $M_{56}/M_{28}$  er mindre end 2.

Ikke acceptabel: Hvis kravene til acceptabel frostbestandighed ikke opfyldes.

### Prøvning efter ASTM C 666

Prøvetilberedning: I de første 20-48 timer lagres prøvelegemerne i formene og beskyttes imod udtørring. Derefter lagres prøverne ved 23 °C og RF > 95 %.

Frostprøvningerne startes når prøverne er 14 døgn gamle.

Procedure A: Prøvelegemerne er under frost-tø påvirkninger omgivet af 1 til 3 mm vand på alle sider.

Procedure B: Prøverne udsættes for frost i luft og tø i vand.

Temperaturforløb: En frost-tø periode består af følgende:

Først sænkes temperaturen fra 4,4 °C til -17,8 °C, og derefter hæves den igen til udgangsniveau inden for 2-5 timer.

For procedure A må der ikke bruges mere end 25 % af tiden på optøning, og for procedure B må der ikke bruges mere end 20 % af tiden på optøning.

Ændringer i relativ dynamisk E-modul, længde og vægt bestemmes og benyttes som indikatorer for frostbestandighed.

### Prøvning efter S<sub>CR</sub>-metode

Prøvetilberedning: Frostprøvningen påbegyndes, når prøvelegemerne er 14 døgn gamle og efter konstant fugtlagring.

Temperaturforløb: Prøvelegemerne udsættes for 6 frost-tø perioder inden for 5 døgn, hvor temperaturen varieres imellem +10 °C og -20 °C.

Temperaturændringen er ca. 3 °C/time i intervallet +5 °C til -12 °C. Bestemmelse af den kritiske vandmætningsgrad,  $S_{CR}$ , sker ved måling af ændringer i det relative dynamiske E-modul.

Krav:  $F = S_{CR} - S_{ACT} > 0$ , hvor  $S_{ACT}$  er den aktuelle vandmætningsgrad.

Prøvemethoden er nærmere beskrevet i [Fagerlund, 77].

### Alkalikiselreaktioner

Tilslagsmaterialer, der indeholder kiselminerale ( $SiO_2$ ), kan reagere med de alkalier der tilføres betonens porevæske når Portland cement hydratiserer. Alkalierne kan også blive tilført som tilsætningsstoffer, eller de kan trænge ind i betonen udefra som følge af f.eks. tørsaltning.

Ved tilførsel af vand kan den reaktive kisel reagere med alkalierne og danne en ekspanderende gel der kan udøve et indre tryk på den omgivende betonstruktur. I værste tilfælde kan denne ekspansion medføre en revnedannelse, der fuldstændig kan ødelægge sammenhængen i betonen.

**Basisbetonbeskrivelsen (BBB)** stiller krav til både sten- og sandtilslagsmaterialerne med henblik på at begrænse omfanget af skadelige alkalikiselreaktioner (jf. tabel A10 og tabel A11).

Miljøklasserne i **BBB** begrænser visse parametre der har indflydelse på alkalikiselreaktionerne, jf. **Skov- og Naturstyrelsen** (1989):

*Passiv miljøklasse:* For tørt miljø til at skadelige alkalikiselreaktioner kan forekomme.

*Moderat miljøklasse:* Der tilføres ikke alkalier fra omgivelserne, og en langvarig fugtophopning er ikke mulig. Hvis alkaliindholdet er tilstrækkeligt lavt til skadelige alkalikiselreaktioner, vil betonen være sikret herimod i hele sin levetid.

*Aggressiv miljøklasse:* Hvor der er mulighed for stadig alkali- og vandtilførsel tilstræbes skadelige alkalikiselreaktioner hindret ved at begrænse:

- Kiselmængden gennem krav til sand og sten.
- Alkalimængden ved at stille krav om anvendelse af lavalkalicerement.
- Udførelse af en tæt beton, dvs. alkalitilførsel fra omgivelserne hindres.
- Sikre lavt fugtindhold ved at stille krav om lavt v/c-forhold og luftindblanding.

### Armeringskorrosion

Armeringsjern indstøbt i beton er normalt beskyttet mod korrosion fordi jernet er passiveret i det alkaliske miljø i betonen. Passivering af jernet kan forstyrres/ødelægges ved bl.a. to nedbrydningsmekanismer:

- Karbonatisering af betonen
- Kloridindtrængning

#### Karbonatiseringsinitieret korrosion

Karbonatiseringen af betonen foregår ved at atmosfærens kuldioxid diffunderer ind i betonen og reagerer med calciumdioxid. Ved denne kemiske proces reduceres betonens alkalinitet, hvorved passiveringen af armeringsjernene forsvinder. Hvis der nu er ilt og vand tilstede, er der mulighed for, at korrosionsprocessen kan forløbe.

Karbonatiseringshastigheden er størst ved beton der befinder sig i luft med fugtigheder mellem 40 og 70 % RF.

Karbonatiseringen af konstruktionsbeton er en meget langsom proces jf. tabel A8.

Tabel A8. Eksempler på initieringsperioder for karbonatiseringsinitieret korrosion i ikke-fiberarmeret beton (jf. [Tuutti, 82]).

Portlandcementbeton lagret udendørs	Dæklags-tykkelse (mm)	Initieringsperiode (år)		
		v/c-forhold		
		0,55	0,65	0,75
Ikke beskyttet mod nedbør	30	> 100	> 100	100
	20	> 100	70	50
Beskyttet mod nedbør	30	80	35	15
	20	35	15	7

#### Kloridinitieret korrosion

Tilstedeværelsen af klorider kan medvirke til korrosion af armeringsjern i beton. Når tilstrækkelig store mængder af kloridioner når frem til armeringen, vil den beskyttende oxidfilm på jernenes overflader nedbrydes, og der opstår lokalt områder på armeringsjernene overflader, hvor korrosionshastigheden kan blive meget høj, såkaldt grubetæring. Kloriderne i betonen kan stamme fra selve betonen eller de kan være tilført fra omgivelserne i form af tørsalte, havvand o.l.

Betonens eget indhold af klorider stammer som regel fra de delmaterialer og tilsætningsstoffer, der er anvendt ved betonfremstillingen.

**DS 411-84** stiller følgende krav:

*Det totale indhold af opløselige chlorider, beregnet som vandfrit calciumchlorid, må ikke overstige følgende andele af cementvægten:*

*0,5 pct. i slapt armeret beton i aggressivt miljø og i spændbeton, 1,5 pct. i anden slapt armeret beton og 2,5 pct. i uarmeret beton. Bestemmelse af kloridindhold skal udføres iht. DS 423.19.*

#### Krav til dæklagstykkelse

For at hindre korrosion skal armeringsjern dækkes af et betonlag, hvis foreskrevne tykkelse mindst skal være som angivet i **DS 411-84** (jf. tabel A9).

Ved lempet kontrol skal den foreskrevne dæklagstykkelse dog forøges med 5 mm.

Tabel A9. DS 411-84, Dæklag for slapt og forspændt ikke bundtet armering ved skærpet og normal kontrol.

Miljøklasse	Dæklag	
	Minimal tykkelse	Foreskrevet tykkelse
Aggressiv	30 mm	30 mm + tolerancetillæg
Moderat	20 mm	20 mm + tolerancetillæg
Passiv	10 mm	10 mm + tolerancetillæg

Når der støbes mod jord, bør det foreskrevne dæklag forøges med mindst 50 mm, og samtidig bør jorden afdækkes, f.eks. med plastfolie. Dette ekstra dæklag kan erstattes med et 50 mm tykt renselag, som må være afbundet, før armeringen udlægges.

Tabel A10. BBB, Klassifikation af sand

Egenskab/prøveudfald	Klasse P	Klasse M	Klasse A	Prøvningsmetode
Humusindhold	Lysere	Lysere	Lysere	DS 405.3
Chloridindhold	1	1	1	DS 423.19
Indhold af reaktive korn	Ingen krav	Maks. 2,0%	Maks. 2,0%	TI-B 52
Mørtelprisme-ekspansion	Ingen krav	Maks. 0,1% efter 8 uger	Maks. 0,1% efter 8 uger	TI-B 51
Densitet, absorption	1	1	1	DS 405.2
Kornkorve	1	1	1	DS 405.9

1. Der er ingen kravgrænser til disse egenskaber, men bestemmelse skal foretages.

Tabel 11: BBB, Klassifikation af sten.

Egenskab/prøveudfald	Klasse P	Klasse M	Klasse A	Prøvningsmetode
Chloridindhold	1	1	1	DS 423.19
Lette korn under 2400 kg/m <sup>3</sup>	Ingen krav	Maks. 5,0%	Maks. 1,0%	DS 405.4
Densitet	1	1	1	DS 405.2
Det samlede materiales absorption	1	1	1	DS 405.2
Absorption for de 10% af materialet, der er flint med kornvægtfylde over 2400 kg/m <sup>3</sup> , og som har den største absorption	Ingen	Maks. 2,5%	Maks. 1,1%	DS 405.2
Kornkurve	1	1	1	DS 405.9

1. Der er ingen kravgrænser til disse egenskaber, men bestemmelse skal foretages.

Tabel 12: BBB, krav til frisk beton.

	Passiv miljøklasse	Moderat Miljøklasse	Aggressiv miljøklasse
v/c-forhold maks. <sup>1)</sup>	Ingen krav	0,55	0,45
Cementtype alkalibetegnelse efter DS-certifikat	EA LA MA HA	EA <sup>2)</sup> LA MA <sup>8)</sup>	EA LA MA <sup>8)</sup>
Fillerindhold min. kg pr. m <sup>3</sup> -mørtel (C+FA+MS+filler)	Ingen krav	Ingen krav	650
Maks. indhold af flyveaske (inkl. bidrag fra cement) og mikrosilica i vægt-% af C+FA+MS	Flyveaske + mikrosilica 35%. Mikrosilica 10%	Flyveaske + mikrosilica 35%. Mikrosilica 10% <sup>3)</sup>	Flyveaske + mikrosilica 35%. Mikrosilica 10% <sup>3)</sup>
Max. indhold ækv. NaO kg/m <sup>3</sup> (excl. bidrag fra FA og MS)	Ingen krav	3,0 <sup>2) 8)</sup>	3,0 <sup>8)</sup>
Sand, klasse	P	M <sup>2)</sup>	A
Sten, klasse	P	M <sup>4)</sup>	A
Max. indhold af syreopl. Cl i vægt-% af C+FA+MS <sup>5)</sup>	1,0	0,2	0,2
Min. luftindhold i % af kitmassevolumen <sup>6)</sup>	Ingen krav	15 <sup>7)</sup>	15
Plastificeringsstoffer	Skal anv. hvis MS anv.	Skal anv. hvis MS anv.	Skal anv.

1. Ved bestemmelse af v/c-forholdet medregnes mikrosilica med aktivitetsfaktoren 2,0. Flyveaske medregnes med en aktivitetsfaktor der, enten uden nærmere dokumentation kan sættes til 0,5, eller kan baseres på formelen i punkt 2.3.2 i DIF's anvisning om anvendelse af flyveaske og mikrosilica. Denne formel giver, baseret på en afprøvning af den aktuelle bindemiddelkombination, en aktivitetsfaktor på mellem 0,5 og 1. Formlen medfører, at aktivitetsfaktoren for flyveaske i Portlandflyveaskecement bliver 1.

2. Der kan anvendes klasse P sand i moderat miljøklasse, såfremt der anvendes lavalkaliceret type EA eller LA, og det totale indhold af ækv. Na<sub>2</sub>O i beton er mindre end 1,8 kg/m<sup>3</sup>.

3. Der må ikke anvendes mikrosilica sammen med Portlandflyveaskecement i moderat og aggressiv miljøklasse.

4. Projekt materialet kan indeholde krav om, at stenmaterialet højst må indeholde 1,0 vægt-% korn under 2200 kg/m<sup>3</sup> for at reducere antallet af springere.

5. Der må ikke direkte tilsættes chlorid til armeret beton. For uarmeret beton er grænseværdien 1,5%.

6. Som kitmassevolumen regnes totalt betonvolumen minus volumen af tilslagsmaterialer. Kravet til luftindholdet kan fraviges for bygningsdele, der ifølge projekt materialet ikke udsættes for frost.

7. Kravet til luftindholdet kan fraviges for beton til frilagte facader.

8. I moderat og aggressiv miljøklasse kan der anvendes HA-cement, og kravet til maks. indhold af ækv. Na<sub>2</sub>O kan fraviges. I så fald skal sandmaterialet opfylde følgende krav ud over de for klasse A gældende:

- indhold af reaktive korn: maks. 1,0%

- mørtelprismeeekspansion efter 20 uger: maks. 0,1%

og stenmaterialet skal overholde følgende krav ud over de for klasse A gældende:

- indhold af lette korn under 2500 kg/m<sup>3</sup>: maks. 1,0%.

## Referencer til fiberarmeret beton

"Betongprovning - Hårdnad betong - Frostresistens". Svensk Standard SS 13 72 44, 1. udg. 1988. 6 p.

"Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing And Thawing". ASTM C 666-84, ASTM annual book of standards vol. 04.02. Concrete and Mineral Aggregates. 1986. pp 406-413.

Fagerlund, G.: "The critical degree of saturation method of assessing the freeze-thaw resistance of concrete". Materials and Structures. Vol. 10. No. 58. 1977. pp. 217-253.

BBB: "Basisbetonbeskrivelse for bygningskonstruktioner - af maj 1986 - ændret december 1986". Byggestyrelsen, Marts 1987. 45 p.

"Dansk Ingeniørforeningsnorm for betonkonstruktioner". Dansk Standard DS 411, 3. udg. 1984. 98 p.

"Alkalikiselreaktioner i beton". Skov- og Naturstyrelsen, Miljøministeriet. 1989. 106 p.

Tuutti, K.: "Corrosion of steel in concrete". CBI Research Fo 4:82. 1982. 468 p.

## Ældning med vejr simulatorer

Der findes et stort antal af apparattyper til simulering af naturlig ekspone- ring under accelererede eller normale forhold.

De forskellige apparater kan f.eks. opdeles efter om materialerne eller komponenterne monteres vertikalt eller horisontalt. I de nyere typer er det muligt, via computer, at programmere klimapåvirkningerne frit efter eget ønske.

I tabel A10 er kort summeret nogle af de forskellige vejr simulatorer der eksisterer. I det følgende beskrives to forskellige, henholdsvis en simpel type med lodret monterede prøveemner og en mere avanceret type med vandret monterede prøveemner.

"Metode til at udsætte bygningskomponenter og byggematerialer for accelereret klimapåvirkning i vertikal stilling" **DS 1127**. Apparatet til simulering efter denne metode kaldes i daglig tale for "de fire årstider". Apparatet er en firesidet karrusel hvorpå prøveemnerne kan monteres. På hver side påføres et bestemt klima i bestemte tidsintervaller. I DS 1127 er opholdstiden givet som en time, dvs. en cyklus tager fire timer. En cyklus består af følgende påvirkninger:

1) UV-lys 1900 W/m<sup>2</sup> ved 75 °C. 2) Befugtning med vand 15 l/m<sup>2</sup>/time. 3) Nedkøling i luft ved -20 °C. 4) Optøning i laboratorieklima.

Eksempelvis er accelerationsfaktoren for autoklaverede cellulosefiber- armerede produkter i "de fire årstider" bestemt til at være 4-5.

**BCA metoden** er udviklet til ældningsforsøg på belægningssten. Ap- paratet kan programmeres til at veksle mellem forskellige klimaer. Tem- peraturen under prøveemnerne kan varieres mellem -10 °C og +10 °C, og luften over prøveemnerne kan varieres mellem -20 °C og +30 °C.

Ligeledes kan den relative luftfugtighed varieres i intervallet fra tør luft til regn. Endelig kan der eksponeres med UV lys.

Tabel A13. Ældning med vejr simulator.

Metode	Påvirkning	Kommentarer
DS 1127, apparater	Cyklus: • UV-lys 1900 W/m <sup>2</sup> ved 75 °C i 1 time. • Befugtning med vand 15 l/m <sup>2</sup> /time i 1 time. • Nedkøling i luft ved -20 °C i 1 time. • Optøning i laboratorieklima i 1 time.	Lodret monterede prøver
DS 1103.13	Cyklus: • Vandlagring ved 23 °C i 72 timer. • Frostpåvirkning i luft ved -12 °C i 24 timer. • Udtørring i ventileret ovn ved 70 °C i 72 timer.	Lodret monterede prøver. På referenceprøver og prøver udsat for 3 cykler måles følgende: - Bøje- og tværtrækstyrken - Tykkelsen - Synlige forandringer.
NBI mach 3	Apparatet kan programmeres til enten Simuleret ældning: • Forår/efterår, temperaturvariationer mel- lem -10 °C og +40 °C. • Sommer, temperaturvariationer mellem 0 °C og 90 °C. • Vinter, temperaturvariationer mellem +5 °C og -20 °C. eller accelereret ældning: • 3 lange perioder med høje temperaturer (70 °C) hvor hver periode afbrydes af vand- påsprøjtning, efterfulgt af en periode med nedkøling til -10 °C.	Vandret monterede prøver. Apparatet kan programmeres til at eksponere med UV-lys, varme, vand og vind, tryk/sug og forskel- lige temperaturer.
BCA	Apparatet kan programmeres til at variere temperaturen imellem -10 °C og +10 °C under prøveemnerne, og luften over prøve- emnerne mellem -20 °C og +30 °C. Luftfug- tigheden kan varieres og der kan vandpå- sprøjtes. Endelig kan der eksponeres med UV-lys.	Udviklet til vandret monterede betonvarer (belægningssten).

## Referencer til vejr simulatorer

DS 1127: "Metode til at udsætte bygningskomponenter og byggematerialer for accelereret klimapåvirkning i vertikal stilling". Dansk Standard 1. udg. 1985. 4 p.

DS 1103.13: "Plane plader. Prøvningsmetoder - Accelereret prøvning til bestemmelse af bestan- dighed mod vand, kulde og varme". Dansk Standard 1. udg. 1982. 3 p.

NBI: Gjelsvik, T.: "Large Scale Test Facilities for Durability Studies in Trondheim". Project Report No. 6. Norwegian Building Research Institute. 1985. 16 p.

BCA: British Cement Association: "Environmental chamber constructed at BCA". BCA Bulletin No. 8. 1990. pp 1.

I denne SBI-rapport gennemgås en række forhold af betydning for fiberarmerede, cementbundne kompositmaterialers levetid, og der vises resultater fra en række langtidsforsøg gennemført hos SBI. – Endelig gennemgås den væsentligste inden- og udenlandske litteratur på området, og der afsluttes med en gennemgang af de prøvningsmetoder, som i dag anvendes i ind- og udland til bedømmelse af kompositmaterialers ydeevne og levetid.