

FÖRORD

Stora krav på anläggningars livslängd, med tidshorisonter på mer än 100 år, innebär att man måste behärska nedbrytningsmekanismer för att bedöma beständigheten hos förstärkningar, som exempelvis sprutbetong. Stålfiberarmering används rutinmässigt i sprutbetong, och en central fråga är i vilken grad fibrerna korroderar och vad det kan betyda för förstärkningens bärförmåga. Erik Nordström har följt korrosionsförloppen hos fibrer i provelement under fem års exponering i olika miljöer, där de blivit utsatta för frysning och för stänk från vägsalt. Arbetet har utförts som uppdrag inom SveBeFos forskningsprogram med delfinansiering från Elforsk, Banverket och Vägverket, och samordnats med Erik Nordströms doktorsarbete vid LTU inom ramen för konsortiet Väg-Bro-Tunnel.

I denna slutrapport redovisas resultaten från fältförsöken inklusive jämförelser med accelererade laboratorieprov och analyser av vilka effekter korrosionen kan ha på bärförmågan i olika situationer. Vid de mindre sprickvidder som förekommer vid normal användning av fibersprutbetong som bergförstärkning har korrosionen i de flesta fall visat sig vara begränsad under den aktuella exponeringstiden, dock kan kraftig påverkan av stänk från vägsalt ge betydande korrosion. För att göra det möjligt att stärka undersökningens slutsatser kommer provpanelerna att sitta kvar på de tre platserna så att prov kan tas efter ytterligare några års exponering.

Arbetet har följts av en referensgrupp bestående av Jan Alemo, Vattenfall Utveckling, Hans Bohman, Vägverket, Tommy Ellison, Besab, Lars Hammar Elforsk och Bo Malmberg, WSP.

Stockholm i februari 2005

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Genom att kombinera sprutbetongtekniken med stålfiberarmering erhålls uppenbara fördelar genom inbesparat armeringsarbete. Detta blir särskilt tydligt i bergförstärkningssammanhang.

Sprutbetong i allmänhet, tillverkad av kunniga hantverkare, får hög kvalitet och god beständighet. Krav på beständighet finns också i dagens normer med krav på över 100 års livslängd. Eftersom stålfiberarmerad, våtsprutad betong bara använts sedan början av 80-talet finns frågetecken kring beständigheten mot fiberkorrosion.

Det har tidigare visats att stålfibrer uppvisar utmärkt beständighet mot korrosion i homogen betong. Vid förhållanden som ger höga korrosionshastigheter på konventionell armering kan stålfibrer fortfarande vara opåverkade. Fibrer är små jämfört med konventionell armering och skyddas därför bättre i betongens alkaliska miljö. Mindre katodyta i förhållande till anodytan är ett annat argument till varför fibrer uppvisar bättre korrosionsbeständighet.

Den höga kvaliteten kombinerat med att sprutbetong appliceras i relativt tunna skikt ger upphov till tvångsdeformationer av t.ex. krympning, som är en vanlig anledning till uppsprickning. Vid dimensionering av en bergförstärkning med stålfiberarmerad sprutbetong används fibrer både till att minska sprickvidder från krympning och att skapa en acceptabel duktilitet efter uppsprickning. I ett system med bultar och stålfiberarmerad sprutbetong är man beroende av vidmakthållen residualbärförmåga under lång tid.

Syftet med föreliggande arbete är bl.a. att undersöka mekanismerna som styr initiering och propagering av korrosion.

I besiktningar av gammal, sprucken stålfiberarmerad sprutbetong kan endast begränsad korrosion ses efter 5-15 års exponering. Även vid höga kloridhalter verkar angreppet vara begränsat. I alla de undersökta objekten var dock antalet fibrer som korsade sprickan mycket litet.

Två olika angreppssätt har använts för att studera korrosion av stålfibrer i sprickor. Spruckna stålfiberarmerade sprutbetongbalkar har exponerats i fält vid tre olika platser. Sprickvidd, fiberlängd, blandningstyp, acceleratorer och sprutmetod (våt/torr) är parametrar som testats. Efter 5 års exponering uppvisas korrosion på fibrer som korsar sprickor, huvudsakligen i prover exponerade längs en motorväg med direktstänk av vatten innehållande tösalt. Förlust av 15-20 % av fiberdiametern i betongens yttre 25 mm är vanligt där. Prover med längre fibrer (+10 mm) uppvisar nästan ett dubbelt så kraftigt angrepp. Prover exponerade på de andra platserna visar också korrosion men i betydligt mindre omfattning. Förutom vid proverna i tunnelmiljö ses också frostsador. I älvmiljö verkar också residualbärförmågan bli påverkad negativt och en reduktion skulle där kunna förklaras med minskad hållfasthet hos själva betongmatrisen. En

skillnad i frostbeständighet har också kunnat ses när prover med och utan vattenglasaccelerator jämförs. Enligt en analys av luftporsystemet visar prover med vattenglastillsats att de får ett grövre luftporsystem och därför en försämrad frostbeständighet.

Laboratorieförsök med accelererad exponering har också genomförts. Syftet var att utveckla en teknik för att på ett bättre sätt, och snabbare, kunna undersöka olika parametrars inverkan på korrosionsbeständigheten i ett mer kontrollerbart klimat. De accelererade försöken måste genomföras på ett sätt som möjliggör en korrelation med fältförsöken. Därmed kan längre tids verklig exponering efterliknas på kortare tid och på så sätt möjliggörs en bedömning av långtidseffekter av korrosion. Huvudsakligen uppvisas samma beteende som i fältexponeringarna med ökat angrepp vid ökande sprickvidd och ökad fiberlängd. Inverkan av fiberlängd betonar vikten av anod-/katodförhållandet för korrosionshastigheten vilket också påvisats för konventionell armering. Utöver parametrar som också provas i fält har inverkan av olika stålqualität testats. Ett rostfritt stål verkar ge ett fullvärdigt skydd (i alla fall i ca. 50 år), medan de galvaniserade fibrerna endast ger ett tillfälligt skydd. En mycket grov uppskattning är att laboratorieexponeringarna ger ca. 50 gånger acceleration jämfört med normal exponering i motorvägsmiljö (1 år i labb motsvarar 50 år i fält).

Som nämnts tidigare förväntas stålfibrerna kunna bära last under hela konstruktionens livslängd. Fiberarmerad betongs duktilitet uppnås genom utdragsmotståndet som uppkommer genom interaktionen mellan fiber och betong genom vidhäftning, friktion och deformation av fibern. Om fiberkorrosion initieras ger de korroderade fibrerna fortsatt duktilitet så länge som fiberhållfastheten är större än utdragsmotståndet. En analytisk modell som utvecklats visar att fiberarmerad betong uppvisar en betydande residualbärförmåga en lång tid efter det att korrosion har initierats.

Traditionella livslängdskriterier för armerade betong är inte giltiga för stålfiberkorrosion i sprickor. En livslängdsmodell borde baseras på en acceptabel reduktion av bärförmågan. För att motverka förlust av lastbärande förmåga p.g.a. fiberkorrosion skulle t.ex. extra mängd fibrer, ökad skiktjocklek eller val av mer korrosionsbeständiga fibermaterial kunna föreskrivas vid proportionering.

En parameter som inverkar på den ursprungliga residualbärförmågan hos stålfiberarmerad betong är fiberfördelningen i betongen. De vanligaste metoderna som brukar användas (t.ex. manuell räkning av fibrer i tvärsnittet) för att uppskatta fibermängden i sprutbetong kan ifrågasättas. Resultat från standardiserade tester och den inventering av gamla konstruktioner som gjorts pekar mot att sprickor uppkommer där fibermängden är minst.

Nyckelord: sprutbetong, fibrer, beständighet, korrosion, frost, livslängd, bärförmåga

SUMMARY

A combination of sprayed concrete technique and steel fibre technology gives obvious advantages when saving the work needed to place conventional reinforcement. In rock strengthening applications this is most accentuated.

Sprayed concrete in general, made by skilled workmen, will generally be of high quality and good durability. Durability requirements can also be found in today's regulations with demands on service-life of more than 100 years. Since steel fibre reinforcement in wet-mix sprayed concrete has been common practice only since the early 1980s questions could be raised regarding its resistance to corrosion.

It has previously been proved that steel fibres show an excellent durability against corrosion in homogenous concrete. In conditions where conventional reinforcement shows high rates of corrosion the steel fibres may still be unaffected. Fibres have a smaller size than conventional reinforcement and they seem therefore to be better protected by the alkaline environment provided by the concrete. A smaller cathode area compared to the anode area is another argument for better resistance to corrosion.

However, the high quality combined with relatively thin layers applied in sprayed concrete structures give rise to deformations imposed by shrinkage, which is a common cause of cracks. In the design of steel fibre reinforced sprayed concrete (SFRSC) for e.g. rock strengthening purposes the fibres are used both to minimize crack widths from shrinkage and to obtain a sufficient post-crack behaviour. A system with bolts and SFRSC is dependent on a long-term residual strength capacity.

Therefore, the purpose of this work is to investigate the mechanisms governing initiation and propagation of corrosion for cracked sprayed concrete.

Field inspections performed on old, cracked, SFRSC show that the amount of corrosion is limited after 5-15 years of exposure. Even in the presence of high chloride concentrations the attack seemed limited. Moreover, it was noticeable that the amount of fibres crossing the cracks was very small in all the inspected structures.

Two different approaches to studying the corrosion of steel fibres in cracks have been tested. Cracked beams of SFRSC have been exposed in field at three different sites. Crack width, fibre length, mix-composition, accelerators and spraying technique (wet-/dry-mix) are parameters that have been tested. After 5 years of exposure the samples exposed along a motorway with direct splashing of water containing de-icing salts show heavy corrosion on fibres crossing the crack. A loss of 15-20% of the fibre diameter in the outer 25 mm of concrete is common. Samples with longer fibres (+10 mm) show almost a doubled attack. Samples on the other sites start to show corrosion, but to a much more reduced extent. Except for the samples exposed in a tunnel environment, freeze-thaw damages may also be seen. In the river environment there seems to be an effect on the residual strength with reduction due to decreased concrete matrix strength. Differences in frost resistance could also be seen between samples with and without

addition of water glass accelerator. According to an air void analysis the samples with water glass addition receive a more coarse air void system and therefore lowered frost resistance.

Laboratory studies with accelerated exposure tests have also been performed. The purpose is to develop a technique for isolating parameters in a better way than in field and to perform exposure tests in a more controllable environment. In addition a useful technique combined with a correlation to the field exposures could make it possible to imitate longer real exposures in a shorter period of time and in this way estimate the long-time behaviour. Mainly the same behaviour as in field, with increased corrosive attack with increased crack width and fibre length, could be seen in the laboratory exposures. The influence of fibre length accentuates the importance of the anode-/cathode ratio for the rate of corrosion which has also been noticed for conventional reinforcement. In addition to the parameters tested in field exposures, different steel qualities are also tested in the laboratory exposures. Stainless steels seem to give full protection (at least for approximately 50 years), whilst galvanized fibres give temporary protection. A very rough estimation is that the laboratory exposures accelerate the exposure by about 50 times compared to the motorway environment (1 year in lab. corresponds to 50 years in field).

As mentioned the steel fibres are supposed to be able to carry load during their entire service-life. The ductility of fibre reinforced concrete is given from the pullout strength achieved by the interaction between fibre and concrete matrix via bond-strength, friction and fibre deformation. If corrosion is initiated, the corroded fibres give ductility as long as the fibre strength is greater than the pullout resistance. An analytical model developed indicates that the fibre reinforced concrete shows substantial residual strength a long time after corrosion is initiated.

Traditional service-life criteria are not valid for steel fibre corrosion in cracks. Instead, the service-life prediction should be based on an acceptable reduction of load bearing capacity. Measures taken at the design stage to ensure the load bearing capacity can be addition of extra amount of fibres, increased thickness of the structure or change of fibre material to a more corrosion resistant materials.

A parameter influencing the residual strength of steel fibre reinforced sprayed concrete is the fibre distribution in the concrete. Commonly used methods (e.g. manual counting in a cross-section) for estimating the fibre amount in sprayed samples could be questioned and should be further investigated. Homogenous fibre distribution is important as results from standardised tests and the inventory of old structures point in the direction that cracks occur where the amount of fibres is smallest.

Keywords: sprayed concrete, fibres, durability, corrosion, frost, service-life, load-bearing capacity

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Krav på livslängd	1
1.3	Fibrer och sprutbetongtekniken.....	1
1.4	Stålfiberkorrosion.....	2
1.5	Forskningssignifikans.....	2
2.	FÄLTEXPONERINGAR.....	3
2.1	Bakgrund	3
2.2	Målsättning.....	3
2.3	Metodik.....	3
2.3.1	Betongsammansättning.....	4
2.3.2	Provkroppstillverkning	5
2.3.3	Exponeringsmiljö	6
2.3.4	Utvärdering efter exponering.....	8
2.4	Resultat	11
2.4.1	Klimatuppföljning	11
2.4.2	Residualhållfasthet	13
2.4.3	Kloridinnehåll.....	18
2.4.4	Karbonatisering	20
2.4.5	Fiberkorrosion	20
2.4.6	Frostbeständighet.....	24
2.5	Diskussion	25
2.5.1	Residualbärförmåga.....	25
2.5.2	Kloridinnehåll.....	26
2.5.3	Fiberkorrosion	26

2.5.4	Frostbeständighet.....	27
2.6	Slutsatser	27
3.	LABORATORIEFÖRSÖK	29
3.1	Syfte.....	29
3.2	Provningsmetodik.....	29
3.2.1	Materialsammansättning.....	29
3.2.2	Provkroppstillverkning.....	30
3.2.3	Spräckning.....	30
3.2.4	Elektrokemiska mätningar.....	31
3.2.5	Exponeringsmiljö	31
3.2.6	Utvärdering efter exponering.....	32
3.3	Resultat	32
3.3.1	Fiberkorrosion	32
3.3.2	Exponeringsmiljö	35
3.4	Korrelation med fältexponeringar	36
3.5	Diskussion	38
3.6	Slutsatser	39
4.	BÄRFÖRMÅGA.....	41
4.1	Introduktion	41
4.2	Utdragmotstånd.....	41
4.3	Fiberfördelning	44
4.4	Inverkan av korrosion.....	45
4.5	Analytisk modell	46
4.6	Livslängdsmodellering	47
4.6.1	Definition av gränstillstånd	47
4.6.2	Livslängd	48

4.7	Diskussion	50
4.8	Slutsatser	51
5.	FRAMTIDA FORSKNINGSBEHOV	53
6.	REFERENSER	55

1 INLEDNING

1.1 Bakgrund

På slutet av 80-talet började tekniken med att stålfiberarmera sprutbetong användas regelmässigt i Sverige. Byggandet av SFR (Slutförvar För Reaktoravfall) i Forsmark och Grödingebanans tunnlar vid Södertälje var några av de första riktigt stora projekten. Framst i bergförstärkningssammanhang kunde man se vinster i form av att arbetet med att montera armering kunde elimineras. Idag är stålfiberarmerad sprutbetong mycket vanligt förekommande i bergförstärkningssammanhang i Skandinavien och Nordamerika. Det förekommer också vid reparation och förstärkning av betongkonstruktioner.

1.2 Krav på livslängd

Kunskap om potentiell, eller återstående livslängd hos en konstruktion bör vara i fokus under hela processen från konstruktionsfasen via uppförande till underhåll av konstruktionen. I t.ex. Vägverkets TUNNEL 99 (1999) ställs kravet att underjordstunnlar i berg ska ha en förväntad teknisk livslängd motsvarande 120 år (för bärande huvudsystem i tunnel längre än 1 km) med normalt underhåll.

Livslängden anses vara uppnådd när konstruktionen inte längre uppvisar erforderlig funktionsduglighet. Normalt underhåll torde inte innebära nykonstruktion var 15-25 år, med alla de kostnader och trafikstörningar som detta skulle innebära. Ursprungskonstruktionen bör därför ha en innebyggd säkerhet för att klara av mer än 120 års exponering i aktuell miljö. I t.ex. Nordström (1996), som beskriver en fältinventering av befintliga sprutbetongkonstruktioner, finns dock tveksamheter kring vilken beständighet stålfiberarmerade konstruktioner kan förväntas ha. Detta främst när sprickor uppträder. I vissa miljöer uppvisar prover betydligt mindre omfattande korrosion än man kunnat förvänta. Å andra sidan är fibrer tunna och en aktiv korrosion torde på relativt kort tid kunna ge att fibrer korroderar av. Vilken inverkan det i sin tur har på bärförmågan är också delvis oklart.

1.3 Fibrer och sprutbetongtekniken

Förutom fördelar under byggnadsfasen används fibrer för två huvudsyften. Både begränsning av sprickvidder och för att skapa tillräcklig residualbärförmåga i sprucket tillstånd. Dimensioneringskriterier för bärförmåga återfinns i t.ex. Holmgren (1992). Eftersom sprutbetong oftast har hög kvalitet (hög cementhalt, lågt vct) och vanligen appliceras i relativt tunna skikt (50-100 mm) får betongen hög uttorkningskrympning. Ventilation i tunnelmiljöer ökar också uttorkningen och i tillägg till detta ger vissa typer av accelerators en ökad krympning (Manns & Neubert, 1992). Allt detta ger en ökad risk för krympsprickor. En fördel med att sprutbetong appliceras i tunna skikt är att det vanligen appliceras på ett annat fast underlag. Det ger ett betydande tvång från underlaget som i sig är sprickfördelande.

1.4 Stålfiberkorrosion

Man kunde förvänta sig att relativt tunna stålfibrer skulle få en snabb reduktion av bärförmågan vid uppträdande korrosion. Speciellt i sprucken betong. Den utmärkta beständigheten mot korrosion i osprucken betong har visats så tidigt som 1966 av Shroff (1966). En sammanställning av tidigare undersökningar av stålfiberkorrosion och grundläggande begrepp återfinns i Nordström (2000). Det verkar som om stålfibrer korroderar långsammare än konventionell armering vid samma förhållanden. De parametrar som ger denna positiva egenskap är inte väl kända. Det är också möjligt att hastigheten inte är linjär. En ökning av korrosionshastigheten kan ge en snabb nedbrytning av de tunna fibrerna och ge en minskad bärförmåga.

1.5 Forskningssignifikans

Med kunskap som gör livslängdsbedömningar möjliga, kan förtroendet för och användningen av stålfiberarmerad betong ökas. Kunskap om viktiga parametrar som styr initiering och propagering av sprucken stålfiberarmerad betong kan också användas vid konstruktion. Några alternativ kan t.ex. vara att välja andra fibertyper eller ökad mängd fibrer eller kanske rekommendation av tjockare sprutbetongskikt. Skillnaden i kostnad mellan användning av rostfria fibrer redan från start kanske är små om det sätts i relation till vilken ökning av livslängden det ger. Å andra sidan kanske användning av vanliga lågkolstålsfibrer är fullt tillräckligt i fler miljöer än förväntat. Bättre kunskap på området kan också användas för att säkerställa en återstående livslängd på en befintlig konstruktion när det gäller att definiera acceptabla sprickvidder eller kloridnivåer i olika miljöer.

2 FÄLTEXPONERINGAR

2.1 Bakgrund

När föreliggande arbete påbörjades fanns det mycket lite data kring beständighet hos konstruktioner med stålfiberarmerad sprutbetong. Därför var det tydligt att relevanta experiment var nödvändiga för att skapa en kunskapsbas för bedömning av livslängd med hänsyn till korrosion av stålfibrer i sprickor.

Vanligen brukar två olika angreppssätt användas för beständighetsförsök. Antingen sker exponering under normal hastighet, vilket tar tid och dessutom kan utvärderingen av det aktuella klimatet vara svårt. En annan variant är att accelerera exponeringen under kontrollerade former, vilket ger resultat på kortare tid men här blir istället kopplingen till verkliga förhållanden svårare att göra. Därför har i föreliggande projekt en kombination av de båda valts. Genom att variera samma parametrar i fält (normalhast.) och i laboratorium (accelererat) kan en koppling mellan de båda göras vilket stärker möjligheterna till relevanta slutsatser av de uppnådda resultaten.

2.2 Målsättning

Syftet med fältexponeringarna är att studera stålfiberkorrosion i vanligen förekommande miljöer med kontrollerade materialegenskaper. Målet med fältexponeringarna är:

- Definiera tid till initiering och korrosionshastighet
- Undersök inverkan av relevanta materialparametrar på korrosionsprocessen
- Samla referensdata för definiering av kritisk sprickvidd när korrosion initieras
- Skapa en referensmiljö för de accelererade provningarna i laboratorium

2.3 Metodik

Fältexponeringarna med sprucken sprutbetong påbörjades i september 1997 och utvärdering av försöken har gjorts 1998, 2000 och 2002 (efter 1; 2,5 och 5 år). Den första och sista utvärderingen har gjorts under hösten och den andra gjordes på vintern. Syftet med utvärderingarna var att undersöka statusen för provkropparna med fibrer som korsar sprickor efter olika lång tids exponering. Ytterligare en parameter är att studera inverkan på bärförmågan och kloridinträngningen (om tillämpligt) i de exponerade sprutbetongproverna. Många faktorer skulle vara intressanta att studera, men ett urval var nödvändigt av ekonomiska skäl. I Tabell 2.1 redovisas ett antal faktorer som skulle kunna tänkas påverka korrosionsprocessen.

Tabell 2.1 Möjliga parametrar som inverkar på stålfiberkorrosion i sprickor.
Potential parameters influencing steel fibre corrosion in cracks.

METOD	PROVKROPP	BETONG				YTTRE
		Mix	Fibrer	Accelerator	Tillsatser	
Våtsprutn.	Sprickvidd	vct	Längd	Vattenglas	Silika	Fukt
Torrspurt.	Sprickdjup	Cement (mängd, typ)	Diameter	Alkalifritt	Kalkstensfiller	Temperatur
	Storlek		Dosering	Dosering	Dosering	Klorider
			Ståltyp			Lasttyp (statisk / dynamisk)
			Tillverkning (kalldraget, klippt, hugget)			Luftföreningar (NOx, SOx)
			Beläggning			

2.3.1 Betongsammansättning

I försöken har fyra olika betongmixer använts. Den våtsprutade betongen med 30 mm fibrer och vattenglasaccelerator (WA30) är huvudmixen som återfinns i alla kombinationer av exponeringsmiljö och sprickvidd. Alla mixer och förkortningar återfinns i Tabell 2.2 och i Figur 2.1 ses hela försöksprogrammet.

Tabell 2.2 Betongmixer använda i fältexponeringar.
Concrete mix-types used in the field exposures.

MIX ¹	VÅT- SPRUTNING	TORR- SPRUTNING	ACCELERATOR	DRAMIX 30/0.5 ²	DRAMIX 40/0.5
WA30	X		X	X	
W30	X			X	
WA40	X		X		X
D30		X		X	

¹ W= våtsprutning, D= torrsprutning, A= accelerator, 30 & 40= fiberlängd (mm)

² Nomenklaturen vid tiden var fiberlängd/diameter i mm.

De längre fibrerna (Dramix 40/0.5) provas för att studera inverkan av förhållandet mellan anod- och katodarea (d.v.s. längd och diameter på fibern) på korrosionshastigheten. Cementet som används är vanligt anläggningscement (Degerhamn, Std P, CEM I 42,5 N NV/SR/LA).

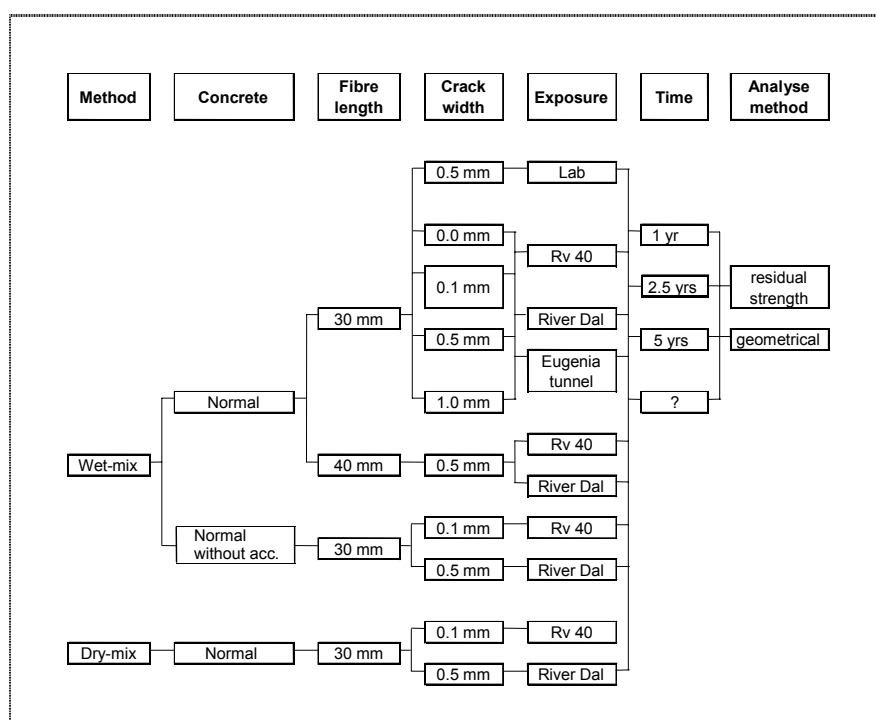
En vattenglasbaserad accelerator användes vid tillverkningen av mixerna WA30 och WA40. Vattenglas var vid tiden för tillverkning den vanligaste acceleratortypen i Sverige. Effekterna av vattenglas på färsk och hårdnad betong är också relativt väldokumenterade (t.ex. reduktion av hållfasthet, ökad krympning m.m.) av t.ex. Burge (1984). Under 2000-talets början ökade användningen av s.k. alkalifria accelerators. Många av dessa har ett mycket lågt pH (2,5-3) och det skulle möjligen kunna påverka beständigheten mot korrosion negativt genom ett surare porvatten. Å andra sidan är doseringarna små vilket pekar i motsatt riktning.

Tabell 2.3 Recept för betongmixer använda i fältexponeringar.
Mix design for concrete mixes used in the field exposures.

		WA30	WA40	W30	D30
vct		0,42	0,42	0,42	0,3 ¹
cement	kg/m ³	510	510	510	500
0-8	kg/m ³	1202	1202	1202	815
4-8	kg/m ³	-	-	-	286
2-5	kg/m ³	-	-	-	260
0-1	kg/m ³	298	298	298	138
flytmedel ²	%/kg C	1,4	1,4	1,4	-
accelerator	%/kg C	3,5	3,5	-	-
fibrer	kg/m ³	70	70	70	65

¹ Uppskattning från mätning av vattenåtgång vid sprutning

² Melaminbaserat



Figur 2.1 Försöksprogram för fältexponeringar.
Test program for field exposures.

2.3.2 Provkroppstillverkning

För att minska andelen spill och få en jämnare betongkvalitet sprutades stora betongplattor (2*1,2*0,15 m). Totalt tillverkades 11 plattor. All betong sprutades med en rotorspruta av typen ALIVA 262 för både torr- och våtsprutning. Acceleratorn tillsattes med hjälp av en pump av typen ALIVA 403. Alla data från sprutningen återfinns i bilaga A. Vid några tillfällen uppstod problem med tillsatsen av accelerator under sprutning p.g.a. stopp i ringmunstycket och variationer i fyllnadsgrad i rotorn

(medelvärde 56% och std.avvikelse 11%). Dessa problem har möjligen gett upphov till skillnader i acceleratorkoncentration i slutprodukten.

Efter lagring under 28-50 dygn med kontinuerlig bevattning, sågades balkar med dimensionen 75*125*500 mm ut. Balkarna utsattes efter ca. 56 dygn för spräckning genom böjning så att önskad sprickvidd uppnåddes. Spräckningen gjordes genom att använda en variant av ASTM C1018-testet, fast med större balkdimensioner och högre belastningshastighet (0,25 mm/min). För att nå önskad sprickvidd efter avlastning måste hänsyn till elastiska deformationer tas genom att överskrida sprickvidden före avlastning. T.ex. så måste ett prov belastas till en nedböjning av 0,4 mm för att erhålla en sprickvidd (w) på 0,1 mm. Motsvarande värden för sprickvidder 0,5 och 1,0 är 1,0 respektive 1,7 mm.

För att kombinera alla parametrar presenterade i Figur 2.2 tillverkades 276 balkar för exponering i fält. Genom att göra ett slumpvis urval av provkroppar (olika betongtyper, sprickvidd och exponeringsplats) minskas risken för systematiska fel.

2.3.3 Exponeringsmiljö

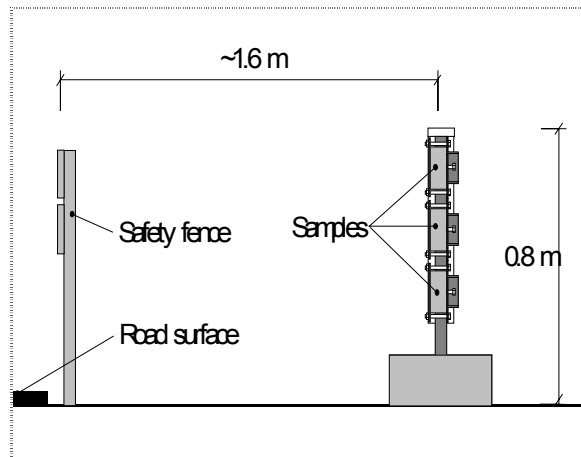
De två huvudsakliga klimatfaktorerna som styr korrosionshastigheten är relativ fuktighet och närvaro av klorider. Valet av exponeringsplatser gjordes därför omsorgsfullt för att göra fältexponeringarna relevanta för verkliga miljöer där stålfiberarmerad sprutbetong vanligen används. I fältexponeringarna valdes därför tre platser tillsammans med laboratoriemiljön (20°C and 65% RH):

- Rv40:** Borås – utomhus längs motorväg (24.000 fordon/dag).
- DAL:** Dalälven, Älvkarleby – utomhus, provkroppar delvis nedsänkta.
- EUG:** Eugeniattunneln, Stockholm - vägtunnel (79.500 fordon/dag).

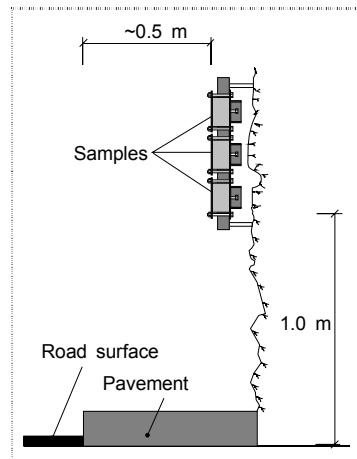
En sammanfattande beskrivning av miljön vid de olika exponeringsplatserna återfinns i Tabell 2.4. Skisser och bilder på uppställningarna visas i Figur 2.2 till Figur 2.4.

Tabell 2.4 Exponeringsmiljöer.
Exposure environments.

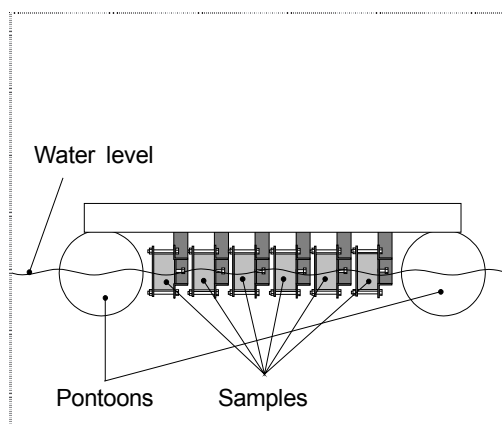
Placering	Exponeringstyp	Motsvarande konstruktionstyp
Eugeniattunneln Stockholm	Fuktigt Klorider Regnskyddat Sura gaser	Bergförstärkning i tunnlar
Riksväg 40 Borås	Fuktigt Klorider (direktstänk) Regn	Bergskärningar Betongreparationer
Dalälven Älvkarleby	Fuktigt Regn	Intagskanal Intagstunnel



Figur 2.2 Uppställning för fältexponeringar, Rv40.
Frame for field exposures, Rv40.



Figur 2.3 Uppställning för fältexponeringar, Eugenia.
Frame for field exposures, Eugenia.



Figur 2.4 Uppställning för fältexponeringar, Dalälven. Foto (vän) och detaljer (hö).
Frame for field exposures, Dalälven. Photo (left) and details (right).

För att kunna använda data från fältexponeringarna krävs noggrann uppföljning av vilket klimat proverna utsatts för. Huvudsakligen är temperatur och luftfuktighet av intresse, men vid Rv40 mäts även andra parametrar eftersom Vägverket har en provplats med flera pågående betongexponeringar där.

2.3.4 Utvärdering efter exponering

I början, innan korrosion initierats valdes att inhämta två balkar av varje kombination av parametrar (sprickvidd, exponeringsplats etc.) för utvärdering. En balk användes för att studera förändringen av bärförmågan och kloridnivåer efter exponering. Den andra användes för att studera korrosionen på enstaka fibrer. Utvärderingar har gjorts efter exponering 1, 2,5 och 5 år. Vid den sista utvärderingen dubblerades antalet provkroppar vid Rv40 eftersom aktiv korrosion hade detekterats i tidigare utvärderingar.

□ *Residualbärförmåga*

Stålfibrer används i konstruktionsskedet för t.ex. tunnelförstärkningar för att skapa ett tillräckligt duktilt (segt) beteende efter uppspräckning. Funktionen i ett system med stålfiberarmerad betong och bultar är helt beroende på residualbärförmågan i sprucket tillstånd. Det är också det som gör eventuell inverkan av korrosion på residualhållfastheten intressant.

Utdragsmotståndet för en fiber skapas av interaktionen mellan fiber och betong och ger också betongen sin duktilitet. Krafter som ger denna egenskap är vidhäftning och för de flesta fibrer också friktion mellan stål och betong. Fibrer med ändkrokar eller korrugerad form får ett extra bidrag från dess förankring. Stålfibrer har vanligen hög draghållfasthet (>1000 MPa) för att kunna nyttiggöra utdragsmotståndet från samverkan mellan fiber och betong. Om korrosion initieras minskar fiberdiametern lokalt i en sprickzon. Det gör att brottypen förändras från ett segt utdragsbrott till ett sprött fiberbrott när fiberdiametern blir för liten.

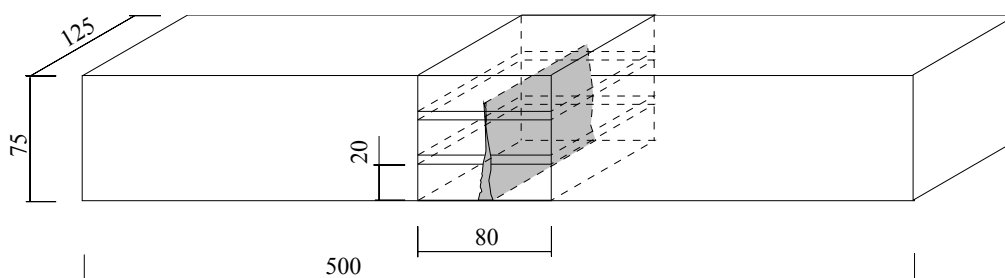
Genom att jämföra residualhållfastheten vid den första uppspräckningen med nivån efter olika lång tids exponering kan denna möjliga förändring undersökas. Återbelastning av samma balk sker därför efter exponering genom fortsatt nedböjning till ca. 5 mm. Två varianter på utvärdering har provats. Dels en direkt jämförelse men också en jämförelse baserad på en statistisk utvärdering av standardiserad provning av fiberarmerad sprutbetong. Båda varianterna presenteras i avsnitt 2.4.2.

□ *Friläggning av fibrer*

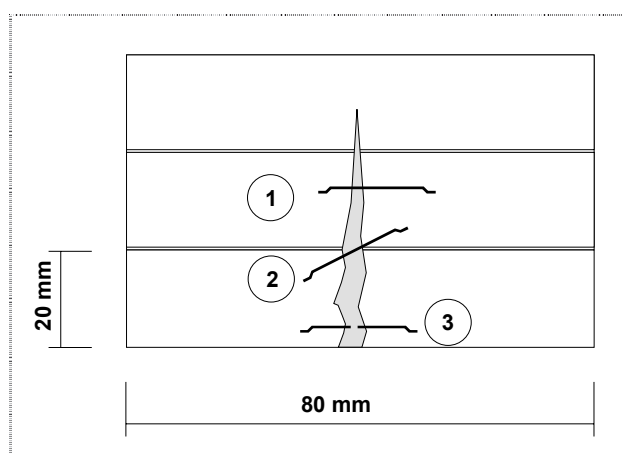
För att kontrollera om fiberkorrosion har initierats (eller graden av korrosion) måste fibrerna friläggas från betongmatrisen. Krossning av betongen skulle ge en risk för att fibrerna går av och därmed ödelägga möjligheterna till utvärdering efter exponering. Därför valdes en metod där plattor sågades ut på olika nivå från spricköppningen (se Figur 2.5) i de balkar som inte användes för återbelastning.

För att minimera risken för att fibrer går av har plattorna utsatts för upprepad frysning. Nedbrytning säkerställdes genom att plattorna först torkades i 200°C under 24 timmar.

Efter torkning så vakuumbehandlades proverna i 3 dygn under 98% vakuum. Före normalt atmosfärstryck återställdes så fylldes vakuumkärlet med vatten. När luft åter släpptes in i behållaren gör undertrycksgradienten i plattan att den i princip vattenfylld fullständigt (hög vattenmättnadsgrad). Eftersom hela luftporsystemet är vattenfyllt blir plattorna känslig för frostbelastning. Exponering under 3 veckor i en cykel från +20°C till -30°C och tillbaka till +20°C på 24 timmar gör att provet fryser sönder fullständigt till en grushög med fibrer. Sen kan fibrer samlas upp med en magnet. Endast hela fibrer med friskt stål på båda sidor om ett korroderat område plockas ut (endast de som säkert korsat sprickan). Det gör tyvärr att fibrer som korroderat av inte hittas. Se en illustration av möjliga utvärderingsproblem i Figur 2.6.



Figur 2.5 Sönderdelning av balk, (5 mm tappas mellan varje platta vid sågning).
Dismembering of beam, (5 mm is lost between every plate due to sawing).



Figur 2.6 Utvärderingsproblem: 1. Normal – fiber hittas, 2. Fiber korsar sprickan på två nivåer – fiber hittas inte, 3. Fiber helt av – fiber hittas inte.
Evaluation problem: 1. Normal – fibre found, 2. Fibre crossing crack at two levels – fibre not found, 3. Fibre completely broken by corrosion – fibre not found.

□ **Korrosionsangrepp**

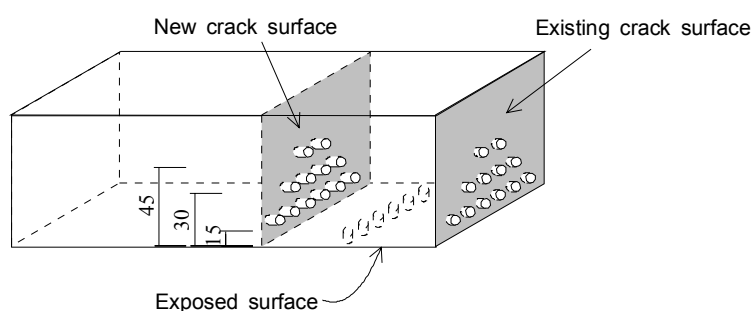
När fibrer frilagts betas korrosionsprodukter bort genom att använda en s.k. Clarks lösning som består av 20 g/ml antimontrioxid (Sb₂O₃) och 50 g/ml tennklorid (SnCl₂) som lösts upp i koncentrerad saltsyra. Efter betning mäts fiberdiametern i det

korroderade området med en spårmikrometer. Angreppet relateras till diametern på det opåverkade området av fibern (delar som varit ingjuten på sidan om sprickan hela tiden) och presenteras som en procentsats av den ursprungliga diametern.

□ *Kloridinhåll och karbonatiseringsdjup*

Kloridhalterna mättes längs sprickväggen på olika avstånd från spricköppningen och som en traditionell kloridprofil längs en ny brottyta på olika djup från den exponerade sprutbetongytan. I Figur 2.7 visas de olika provställena. Mätmetoden som användes var uppsamling av borrhax och mätning med den s.k. RCT-metoden (Rapid Chloride Test).

Karbonatiseringsdjupet mättes genom att spräcka betongen och infärga den med fenoftalinlösning (områden som inte färgas röda är karbonatiserade).

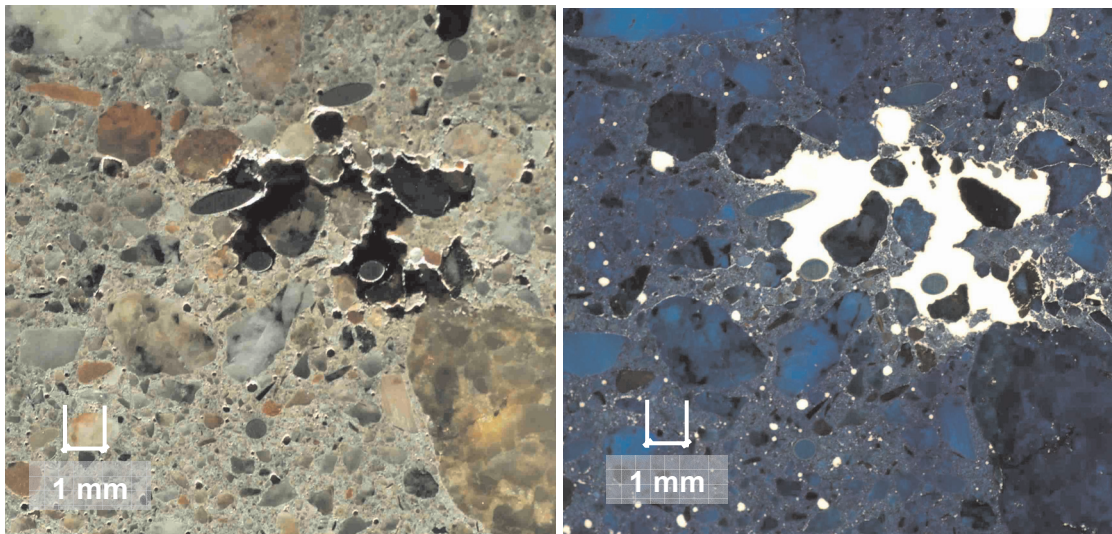


**Figur 2.7 Skiss över borrhning för kloridhaltsmätning.
Sketch over drilling for chloride measurements.**

□ *Frostbeständighet*

En undersökning av luftporstrukturen i betongen gjordes genom bildanalys av planslipade betongtytor som sågats ut från exponerade balkar. Analysen genomfördes av Lunds Tekniska Högskola, avdelningen för Byggnadsmaterial. Syftet med analysen var att studera skillnader mellan olika betongmixer och att härleda deras beständighet mot frostbelastning till skillnader i luftporsystem. Upprinnelsen till analysen vara att frostsador noterats vid Rv40, men att skillnader mellan sprutbetong med och utan vattenglas kunde konstateras. Utöver detta verkade också torrsprutade prover klara frostbelastning bättre än våtsprutade prover.

Provytan (125*75*50 mm) infärgas och analyseras med en teknik beskriven av Lindmark (2000). I Figur 2.8. visas ett exempel på hur provet ser ut före och efter infärgningen. Resultaten från analysen redovisas som total luftporvolym, luftporstorleksfördelning, avståndsfaktor och mängd luftporer med rundad form. Luftporer med för oregelbunden form tas bort automatiskt eftersom detta är andra typer av porer. T.ex. Dålig komprimering/dålig sprutning som gett porer som inte bidrar till frostbeständigheten.



Figur 2.8 Exempel på prov för bildanalys före (vä) och efter infärgning (hö).
Example of sample for image analyses before (left) and after colouring (right).

2.4 Resultat

2.4.1 Klimatuppföljning

I Figur 2.9 till Figur 2.11 kan resultaten från klimatuppföljningen vid de olika exponeringsplatserna ses. En något förhöjd temperatur ses i Eugeniattunneln, vilket torde härröra från trafiken. Den högre luftfuktigheten vid Dalälven måste förklaras med närheten till vattenytan. I Eugeniattunneln är fuktigheten istället lägre och detta måste bero på att proverna är regnskyddade. Variationerna kan troligen härledas till att trafiken ändå drar in fuktig luft i tunneln och att vägytan ändå blir fuktig vid regn.

För att beskriva variationerna över en längre tidsperiod har en modell utvecklats och variationen av luftfuktigheten (RH) beskrivs som:

$$t_n = \Delta t + t_{n-1} \quad (2.1)$$

$$RH = RH_m - \frac{RH_d}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{182,5} \cdot t_n\right) \quad (2.2)$$

där

RH_m = medelvärde av RH (%)

RH_d = variationsintervall (%)

t_n = tid från start (dagar)

Värden på RH_m , RH_d och t_n för de olika exponeringsplatserna bestäms genom regressionsanalys och återfinns i Tabell 2.5. På samma sätt kan också temperaturens variationer beskrivas som:

$$T = T_m - \frac{T_d}{2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{182,5} \cdot (t_n + 182,5)\right) \quad (2.3)$$

där

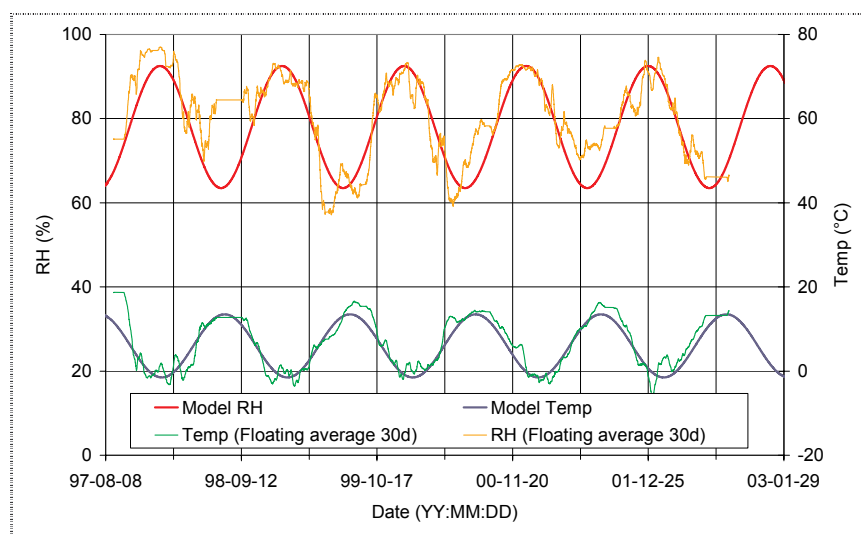
T_m = medelvärde av RH (%)
 t_n = tid från start (dagar)

T_d = variationsintervall (%)

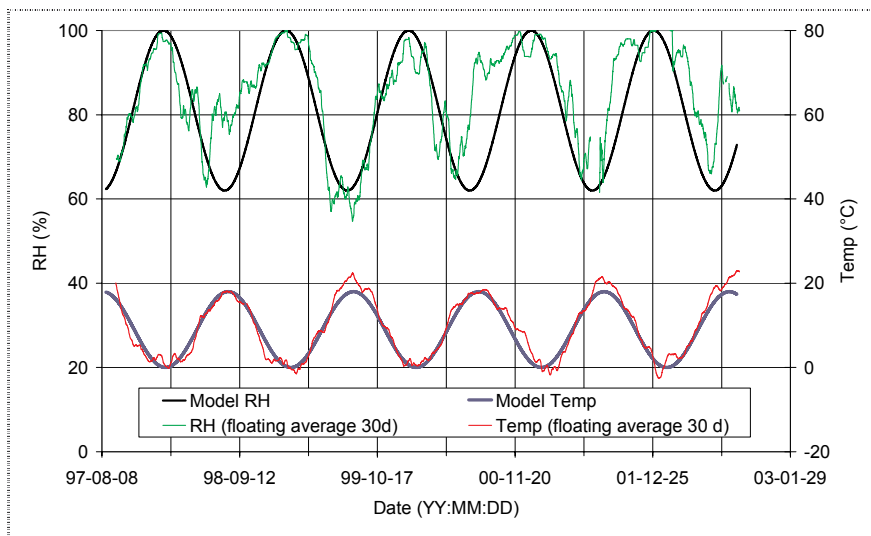
Tabell 2.5 Koefficienter för beräkning av klimatvariationer enl. ekv. (2.1 - 2.3)
Coefficients for calculation of climatic variations according to. eqs (2.1 - 2.3).

RH	Rv40	Eugenia	Dalälven	Temp	Rv40	Eugenia	Dalälven
RH_m	78	81	84.5	T_m	6	9	6
RH_d	29	38	31	T_d	15	18	30

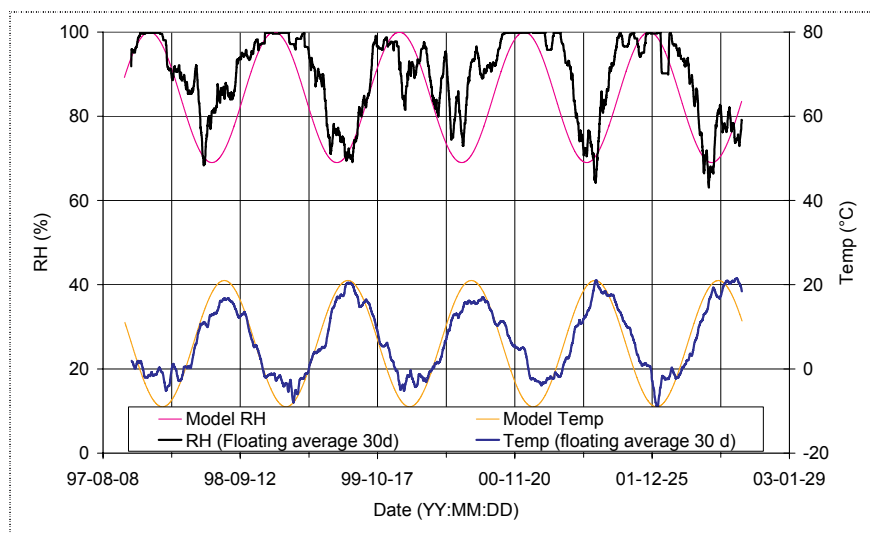
Som det framgår av tabell 2.5 är temperaturamplituden (T_d) vid Dalälven hög jämfört med andra platser. En förklaring kan vara att mätutrustningen är skyddad från nederbörd med en plåt vilket kan ge ökad temperatur p.g.a. solinstrålning.



Figur 2.9 Temperatur- och fuktighetsvariationer vid Rv40.
Temperature and humidity variations at Rv40.



Figur 2.10 Temperatur- och fuktighetsvariationer i Eugeniatunneln.
Temperature and humidity variations in the Eugenia tunnel.



Figur 2.11 Temperatur- och fuktighetsvariationer vid Dalälven.
Temperature and humidity variations in the river Dalälven.

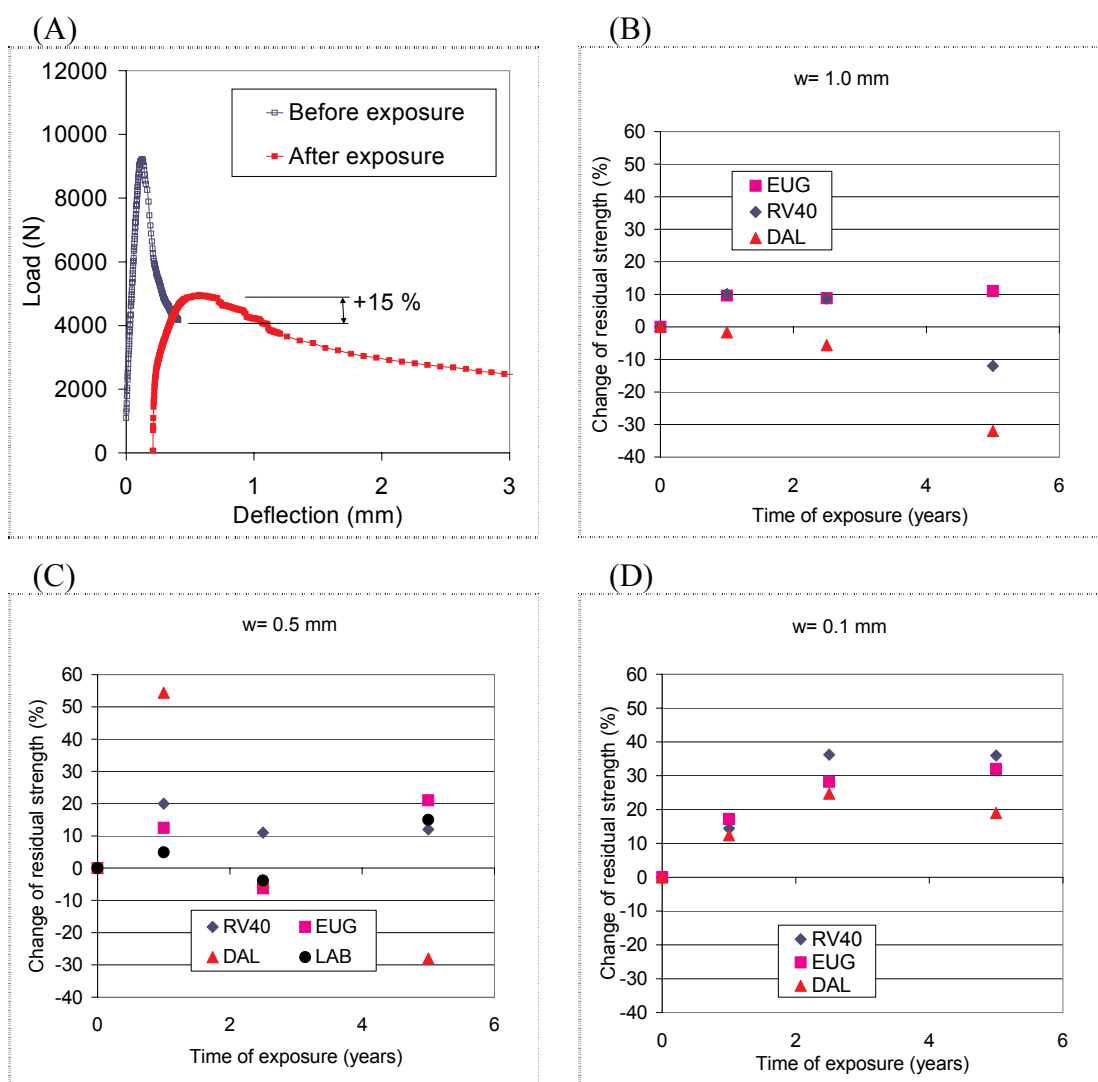
2.4.2 Residualhållfasthet

Nedan beskrivs principen för, och resultaten av, de två olika utvärderingsprinciperna: *Direkt jämförelse* och *statistisk jämförelse*.

□ *Direkt jämförelse*

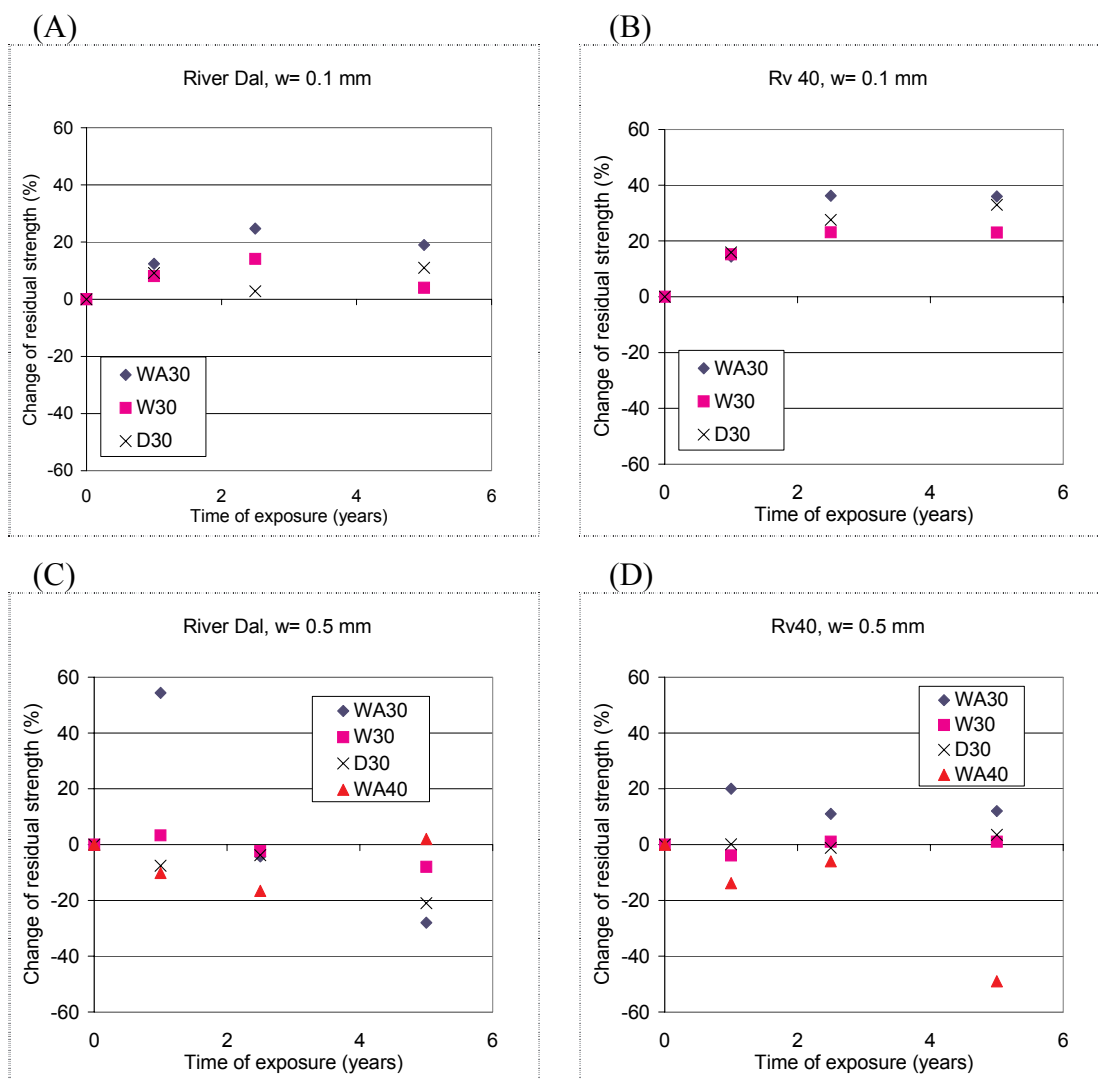
Principen för direkt jämförelse är att lasten när böjbelastningen avbryts första gången jämförs med den maxnivå som uppnås vid det andra belastningstillfället efter exponering. I Figur 2.12 (A) visas ett exempel med en balk som spräckts till

$w = 0,1$ mm. Förändringen i residualbärförmåga efter 1, 2,5 och 5 års exponering enligt den direkta jämförelsen kan ses i Figur 2.12 (B-D) En något högre ökning av bärförmågan kan ses vid de första utvärderingstillfällena för sprickvidd 0,1 mm. Efter utvärderingen vid 5 år verkar ökningen ha ebbat ut eller börjat reduceras. För Dalälvsproverna är ökningen inte lika stor och sänkningen efter 5 år är tydligare. Efter 5 års exponering är minskningen ca. 30% för sprickvidd $w = 0,5$ mm och $w = 1,0$ mm.



Figur 2.12 Ändring av residualhållfasthet för WA30 prover - direkt jämförelse. Exempel $w = 0.1$ mm (A). Inverkan av exponeringsplats, $w = 1.0$ mm (B), $w = 0.5$ mm (C), $w = 0.1$ mm (D).

Change of residual strength for WA30 samples - direct approach. Example $w = 0.1$ mm (A). Influence of exposure site, $w = 1.0$ mm (B), $w = 0.5$ mm (C), $w = 0.1$ mm (D).



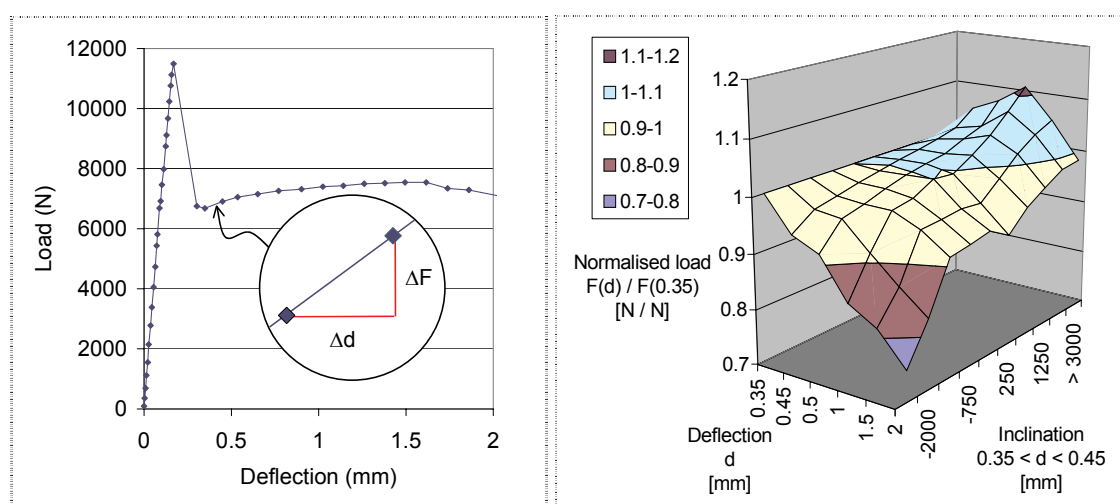
Figur 2.13 Ändring av residualhållfasthet - alla blandningstyper. Dalälven w=0.1 mm (A), Rv40 w=0.1 mm (B), Dalälven w=0.1 mm (C), Rv40 w=0.5 mm (D).
Development of residual strength - all mix types. Dalälven w=0.1 mm (A), Rv40 w=0.1 mm (B), Dalälven w=0.1 mm (C), Rv40 w=0.5 mm (D).

I Figur 2.13 kan inverkan av blandningstyp studeras. Våtsprutade prover med 40 mm fibrer och accelerator (WA40) erhöill ingen tydlig ökning av residualhållfastheten. För våtsprutade prover med 30 mm fibrer och accelerator (WA30) var ökningen något större än andra blandningstyper. Ingen inverkan av sprutmetod kunde noteras.

□ Statistisk jämförelse

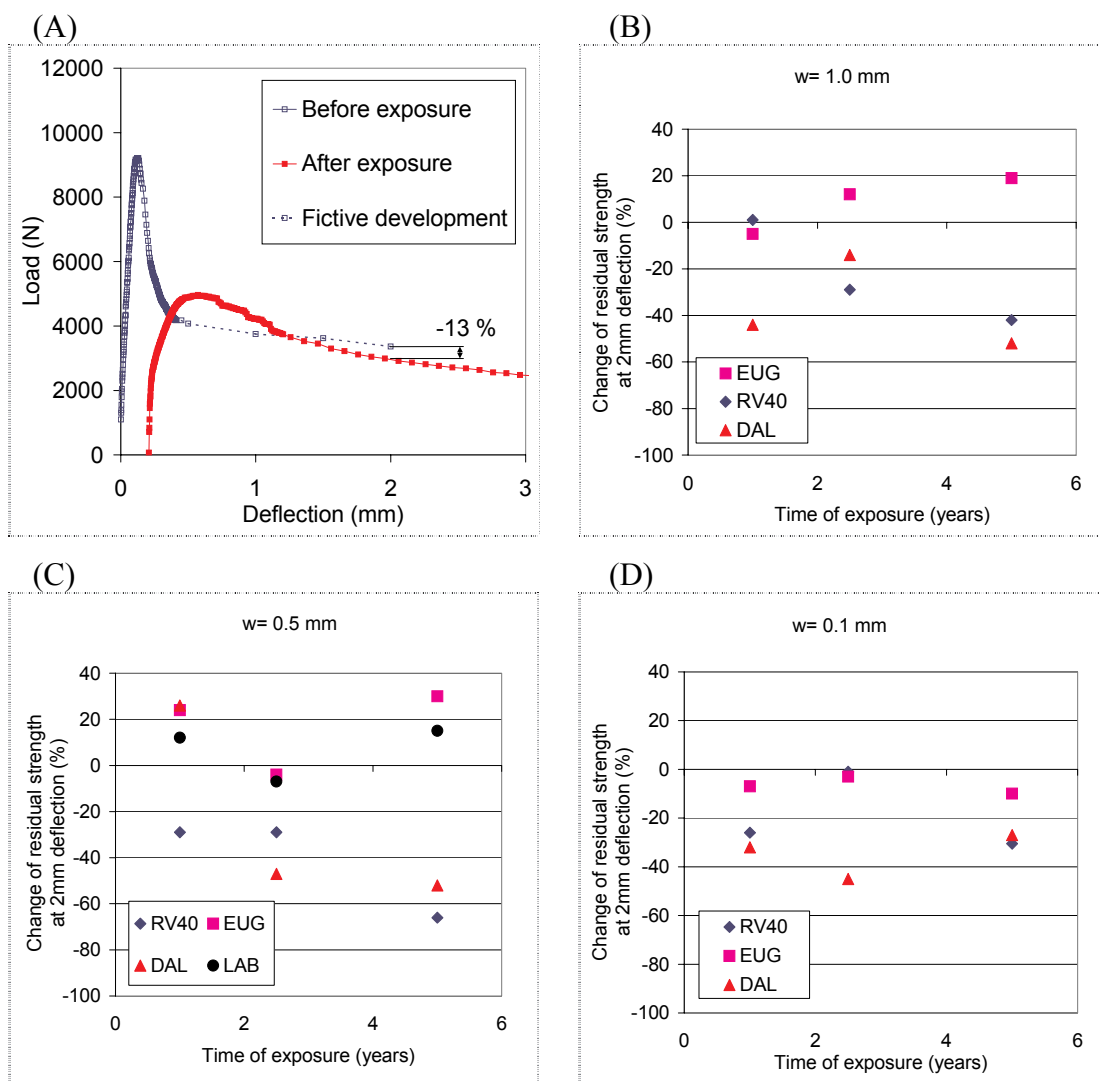
En svaghet med den direkta jämförelsen är att lastnivåerna inte jämförs vid samma nedböjning. Nivån då den första nedböjningen avbryts före exponering jämförs med maxlasten som uppnås vid belastning efter exponering. Dessa uppstår inte vid samma nedböjning. I den statistiska jämförelsen har en sammanställning av 111 standardprover

på balkar legat till grund för en bedömning av den förväntade arbetskurvan om böjförsoket hade fortsatt längre redan vid det första tillfället. För att uppskatta den förväntade last-nedböjningskurvan har lutningen i ett nedböjningsintervall från 0,35 till 0,45 använts (ett intervall där det finns resultat från det första lasttillfället). Sedan har en korrelation mellan lutningen och den förväntade utvecklingen upp till 2 mm deformation gjorts. I Figur 2.14 visas definitionen av lutningen ($\Delta F/\Delta d$) och också en sammanställning av medelbeteendet upp till 2 mm i relation till lutningen i det ovan beskrivna intervallet. I Figur 2.15 (A) visas principen för utvärdering av residualbärförmågans förändring enligt den statistiska jämförelsen.

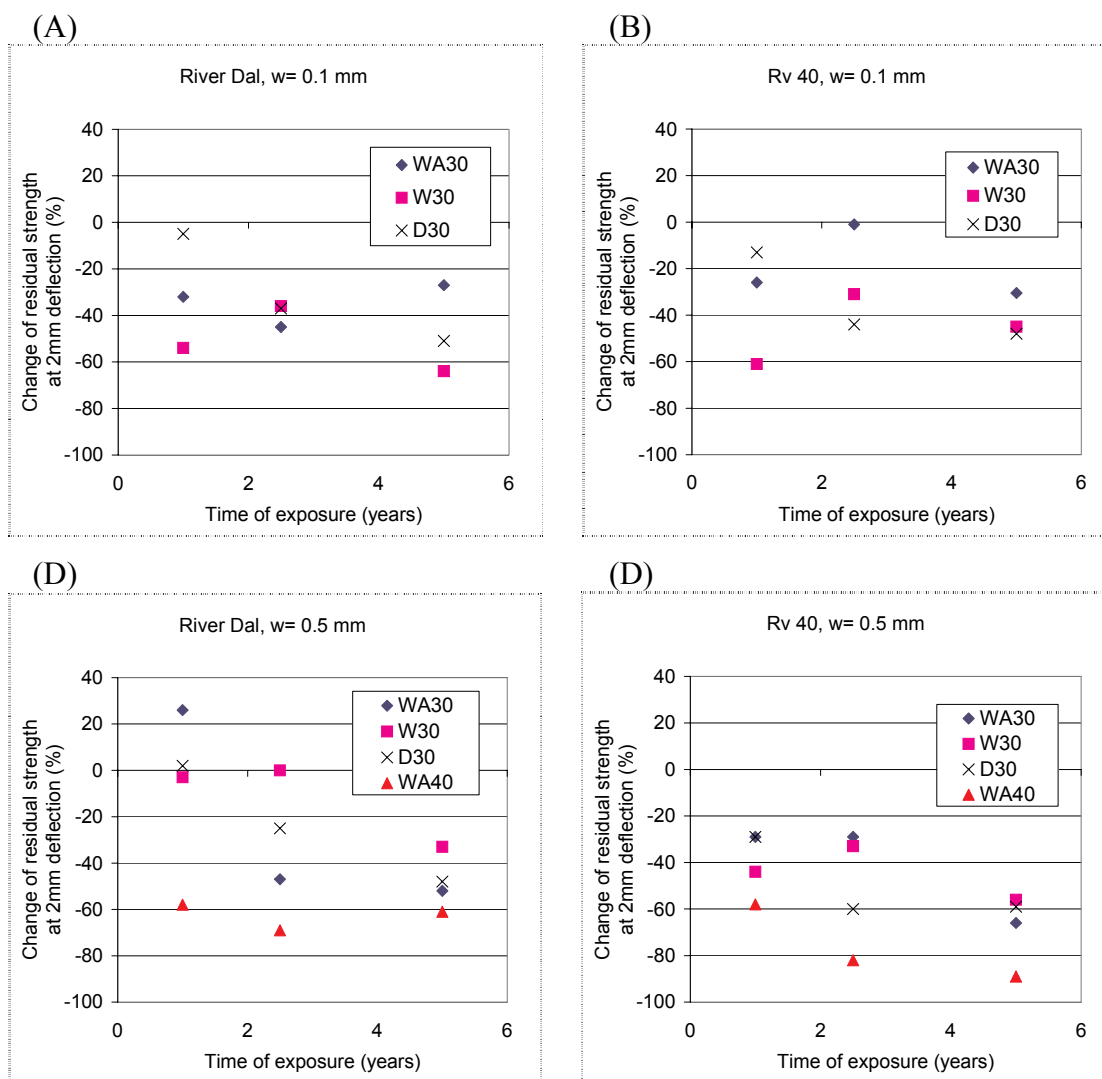


Figur 2.14 Definition av lutning i intervallet $0,35 < d < 0,45$ (vä). Medellastutveckling upp till 2 mm nedböjning beroende på lutning (hö).
Definition of the inclination in the interval $0.35 < d < 0.45$ (Left). Average load development up to $d=2$ mm deflection due to inclination (Right).

Resultaten m.a.p. sprickvidd och exponeringsplats visas i Figur 2.15 och som framgår är spridningen väldigt stor. Det ger svårigheter att dra slutsatser gällande sprickviddens inverkan. I vilket fall är tendensen att proverna från Eugeniattunneln verkar uppvisa ett bättre beteende än proverna exponerade vid andra platser. Eugeniaproverna har en lägre minskning ($w=0,1$ mm) och en högre ökning ($w=0,5$ mm, $w=1,0$ mm) av residualbärförmågan. Inverkan av blandningstypen kan studeras i Figur 2.16. Även i den statistiska jämförelsen visar prover med 40 mm fibrer en kraftigare reduktion av bärförmågan. Ingen skillnad mellan de övriga blandningstyperna kan ses.



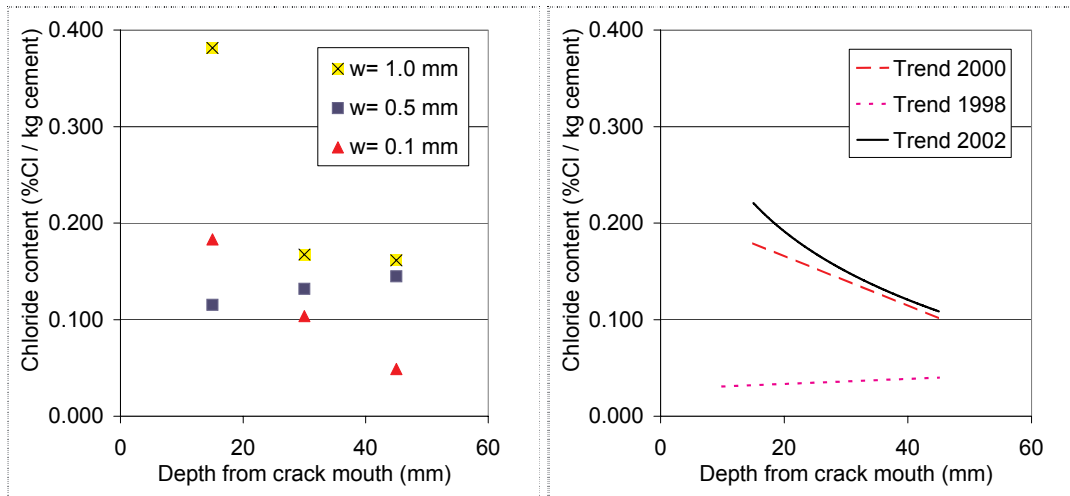
Figur 2.15 Ändring av residualhållfasthet vid 2 mm nedböjning– statistisk jämförelse, WA30. Exempel (A). Inverkan av exponeringsplats, $w=1.0$ mm (B), $w=0.5$ mm (C), $w=0.1$ mm (D). (Jämförelse med fiktiva värden !)
Change of residual strength at 2 mm deflection - statistical approach, WA30. Example (A). Influence from exposure site, $w=1.0$ mm (B), $w=0.5$ mm (C), $w=0.1$ mm (D). (Comparison with fictive values !)



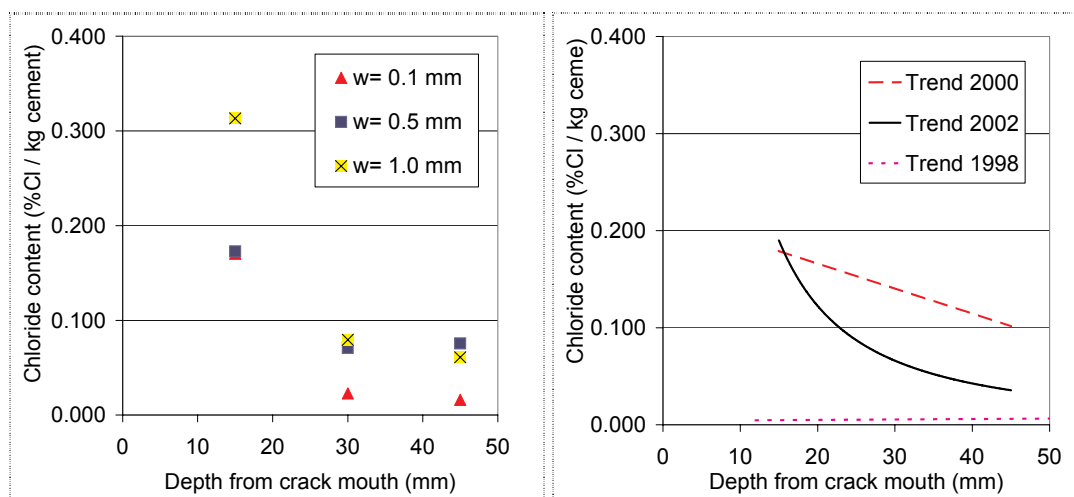
Figur 2.16 Ändring av residualhållfasthet vid 2 mm nedböjning– alla blandningstyper. Dalälven, w=0.1 mm (A), Rv40, w=0.1 mm (B), Dalälven, w=0.5 mm (C), Rv40, w=0.5 mm (D). (Jämförelse med fiktiva värden !)
Change of residual strength at 2 mm deflection - all mix types. Dalälven, w= 0.1 mm (A). Rv40, w= 0.1 mm (B), Dalälven, w= 0.5 mm (C), Rv40, w= 0.5 mm (D). (Comparison with fictive values !)

2.4.3 Kloridinnehåll

Huvudsakligen (förutom några enstaka värden), är kloridkoncentrationerna relativt små (<0.1% Cl/kg cement) efter 1 års exponering (se Figur 2.17 & Figur 2.18). Efter 5 års exponering är halterna högre än efter 1 år. Det är också tydligt att 1 mm sprickor har en högre koncentration längs sprickväggarna än 0,5 och 0,1 mm sprickor. Det är mest tydligt vid mätningar nära spricköppningen. Trenden verkar vara att kloridkoncentrationen längs sprickytan stiger med tiden. Resultaten från Eugeniattunneln är inte helt överensstämmande med detta då koncentrationen vid utvärderingen 2000 var högre än senare.



Figur 2.17 Kloridkoncentration vid sprickytan för WA30-prover vid Rv40. Inverkan av sprickvidd efter 5 års exponering (vän). Årliga trender (hö).
Chloride content at crack surface for WA30-samples at Rv40. Influence from crack width after 5 years of exposure (left). Yearly trends (right).



Figur 2.18 Kloridkoncentration vid sprickytan för WA30-prover i Eugenia. Inverkan av sprickvidd efter 5 års exponering (vän). Årliga trender (hö).
Chloride content at crack surface for WA30-samples at Eugenia tunnel. Influence from crack width after 5 years of exposure (left). Yearly trends (right).

Kloridprofilerna i osprucken betong ger att proverna i Eugeniatunneln visar de högsta koncentrationerna. Det är främst tydligt vid utvärderingen 2002. Man kan också se att det verkar ske en ackumulering av klorider med tiden (mer för Eugenia)

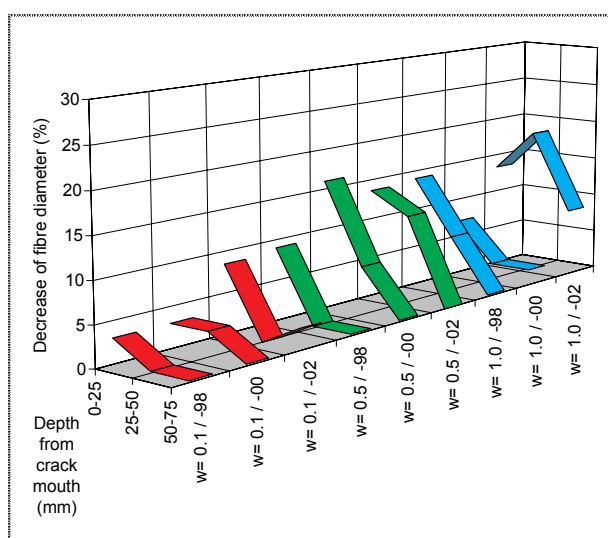
2.4.4 Karbonatisering

Alla betonger som provats uppvisade bara ett karbonatiseringsdjup om ett fatal millimeter. Utomhusförhållanden och relativt kort exponeringstid är den troliga anledningen. Hög betongkvalitet är ytterligare en faktor som ger låg permeabilitet för koldioxid och därigenom långsam karbonatisering.

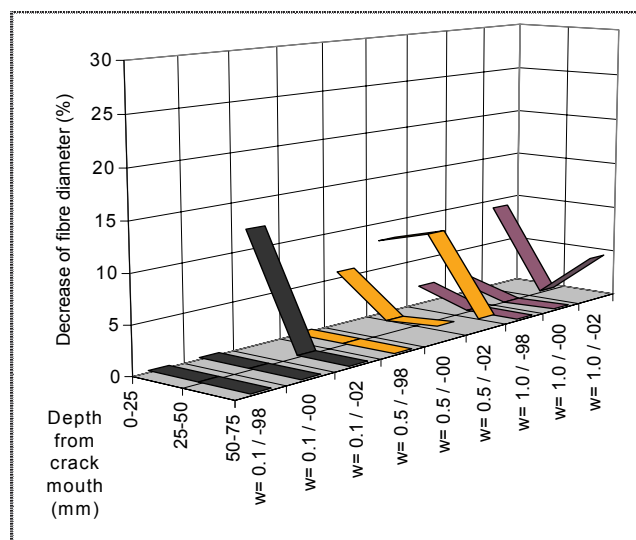
2.4.5 Fiberkorrosion

Mätningar av förlusten av fiberdiameter ger en indikation om korrosionshastigheten när utvärderingen sker efter olika lång tids exponering. Inverkan från sprickvidd och exponeringsplats på korrosionsangreppet kan ses i Figur 2.19-Figur 2.21. Notera att resultaten från Eugeniattunneln och Dalälven är baserat på väldigt få fibrer (1-4st) eftersom angreppet var väldigt begränsat. Vid Rv40 korroderar 0,5 mm och 1,0 mm sprickor mer än 0,1 mm. Skillnaden mellan de två större sprickvidderna är liten efter 5 år.

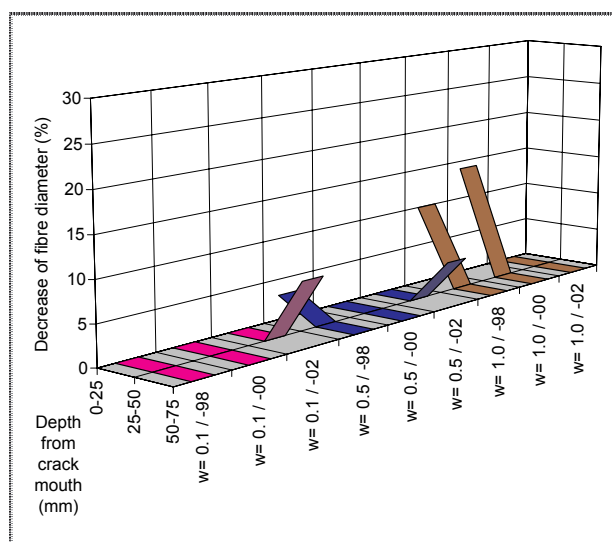
I Figur 2.22-Figur 2.25 ses inverkan av blandningstyp och det framgår där att 40 mm fibrer har en större förlust på diametern redan efter 1 års exponering. Angreppet är dubbelt så stort jämfört med 30 mm fibrer. Vid utvärderingen 2002 ser det ut som om angreppet är mindre än vid utvärderingen 2000 (se vidare under diskussion i avsnitt 2.5.3). Även om Dalälvsproverna är baserade på väldigt få fibrer är det intressant att notera att 40 mm fibrer inte korroderar mer än andra prov. Däremot uppvisar den torrspjutade betongen (D30) ett stort angrepp.



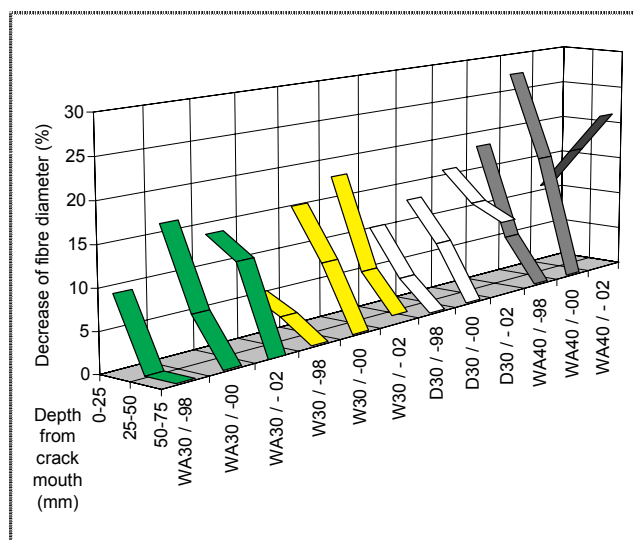
Figur 2.19 Minskning av fiberdiameter för prover vid Rv40 efter olika exponeringstid. Sprickvidd, Mix= WA30.
Decrease of fibre diameter for samples at Rv40 at different time of exposure. Crack widths, Mix= WA30.



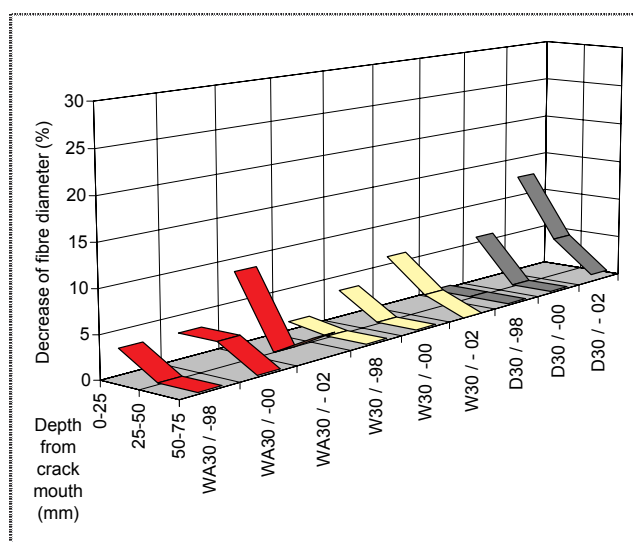
Figur 2.20 Minskning av fiberdiameter för prover i Eugeniattunneln efter olika exponeringstid. Sprickvidd, Mix= WA30.
Decrease of fibre diameter for samples at Eugenia tunnel at different time of exposure. Crack widths, Mix= WA30.



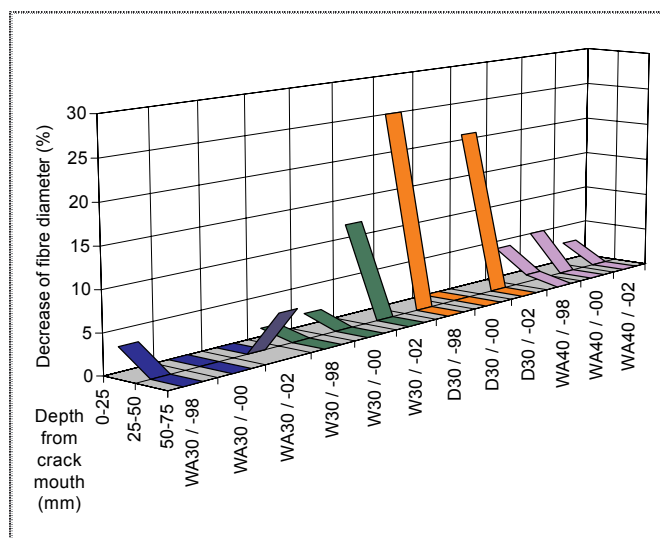
Figur 2.21 Minskning av fiberdiameter för prover i Dalälven efter olika exponeringstid. Sprickvidd, Mix= WA30. (Notera att endast få fibrer var tillgängliga!)
Decrease of fibre diameter for samples at Eugenia tunnel at different time of exposure. Crack widths, Mix= WA30. (Note that only few fibres were available!)



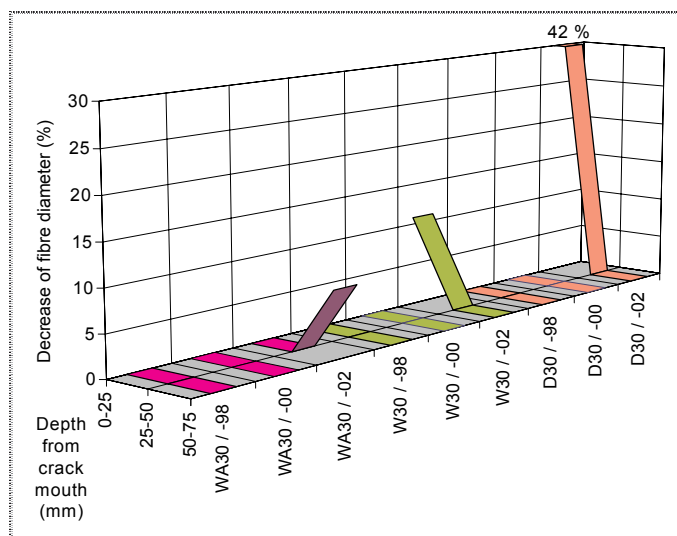
Figur 2.22 Minskning av fiberdiameter för prover vid Rv40 efter olika exponeringstid. Mix typ, sprickvidd $w = 0,5$ mm.
Decrease of fibre diameter for samples at Rv40 at different time of exposure. Mix types, Crack width $w = 0.5$ mm.



Figur 2.23 Minskning av fiberdiameter för prover vid Rv40 <här>
Decrease of fibre diameter for samples at Rv40 at different time of exposure. Mix types, Crack width $w = 0.1$ mm.



Figur 2.24 Minskning av fiberdiameter för prover vid Dalälven vid olika tids exponering. Blandningstyper, sprickvidd $w = 0.5$ mm. (Notera att endast få fibrer var tillgängliga).
Decrease of fibre diameter for samples at Dalälven at different time of exposure. Mix types, Crack width $w = 0.5$ mm. (Note that only few fibres were available!).



Figur 2.25 Minskning av fiberdiameter för prover vid Dalälven vid olika tids exponering. Blandningstyper, sprickvidd $w = 0.1$ mm. (Notera att endast få fibrer var tillgängliga).
Decrease of fibre diameter for samples at Dalälven at different time of exposure. Mix types, Crack width $w = 0.1$ mm. (Note that only few fibres were available!).

2.4.6 Frostbeständighet

Prover exponerade vid Rv40 uppvisar frostsador och vid okulärbesiktning verkar det som om att prover utan accelerator (W30) är beständigare mot frost än prover med accelerator (WA30). Dessutom verkar de torrsprutade proverna (D30) också klara sig bra med avseende på frostbelastning. Vid Dalälvsuppställningen där proverna är till hälften nedsänkta ses också avflagnings p.g.a. frostbelastning. Det är speciellt tydligt på lägre delar av balkarna, som hela tiden är nedsänkta i vatten. Proverna i Eugeniattunneln verkar påverkade av frost.

I Tabell 2.6 visas en jämförelse av resultaten från planslipsanalysen. Noterbart är att inget av proven uppfyller kraven på specifik yta, total luftporvolym och avståndsfaktor enl. Powers. Det borde innebära att inget av proven skulle accepteras som frostbeständigt. I fältexponeringarna har beteendet, som beskrivet ovan, varierat. Det torrsprutade provet verkar dock vara beständigt efter 5 års exponering. Ett annat noterbart resultat är att antalet objekt med rundhet större än 2 (innebär mycket oregelbunden form, cirkel= 1, kvadrat= 1,57). Det är tydligt att W30 och D30 proverna har en högre andel av objekt med rundhet <2 vilket pekar mot högre andel luftporer istället för komprimeringsporer eller andra fel i sprutbetongen (insprutat spill, dålig fiberdispgering etc.).

Tabell 2.6 Resultat från planslipsanalys på prover exponerade vid Rv40
Results from image analysis on face ground samples exposed at Rv40.

Prov	6:11A	7:4B	E:9A	Gräns- värden*
Mix typ	WA30	W30	D30	
Cementpastainnehåll [%]	37.7 %	37.7 %	31.0 %	
Mätt yta [mm ²]	671.3	671.3	671.3	
Totalt antal objekt	1329	1355	1867	
Klassbredd [µm]	25	25	25	
Maximal rundhetsfaktor	2	2	2	
Objekt med rundhet >2	294	196	262	
Total luftvolym [%]	2.18	1.93	4.15	5
Total luftvolym enligt vit yta **[%]	2.72	2.08	4.47	
Specifik yta [mm ² /mm ³] (total yta/total volym)	23.79	28.21	20.79	> 30
Powers avståndsfaktor [mm]	0.34	0.30	0.26	< 0.18

*) Kravvärde vid exponering för tösalt, enligt Fagerlund (1992)

**) Alla vita områden utan reduktion för rundhet och form, se Lindmark (2000)

Det torrsprutade provet har den högsta totala luftporvolymen och den lägsta avståndsfaktorn, men å andra sidan är också den specifika ytan lägst. Detta borde innebära att storleken på luftporerna generellt är större än för andra prover. För D30 proverna återfinns en stor andel (~30 %) av volymen i luftpordiameterkategorin 1775 µm. Om den här kategorin utesluts ur analysen är andelen små luftporer fortfarande högre jämfört med de andra proverna. Sammanfattningsvis ger det att skillnaden mellan

WA30 proverna och de övriga att WA30 proverna har en större avståndsfaktor, troligen lägre specifik yta och ungefär samma totala lufthalt. Detta kan vara en förklaring till den lägre frostbeständigheten.

2.5 Diskussion

Förväntningarna efter ett års exponering var främst att verifiera att inget av proven hade börjat korrodera och testmetoden för utvärdering var lämplig. Antalet prover som hämtades in till laboratoriet begränsades för att möjliggöra fler framtida utvärderingar. Vid utvärderingen efter fem års exponering dubblerades antalet prover som inhämtades från Rv40 eftersom aktiv korrosion hade detekterats. Fortfarande är dock antalet prover för litet för att göra en regelrätt statistisk behandling av resultaten. Dubblingen av proverna stärker dock i viss mån validiteten av resultaten. En faktor som inte beaktats i utvärderingen är att proverna är placerade på något olika nivåer (+/- 250 mm) ovanför marken (förutom Dalälvsproverna). Detta skulle kunna inverkan något på mikroklimatet genom olika fuktbelastning (lägre prover ev. utsatt för högre fuktighet och högre halter klorider).

2.5.1 Residualbärförmåga

Den inledande ökningen av bärförmågan efter exponering som framkom i den direkta jämförelsen orsakades troligen av fortsatt hydratation av betongen. Detta resulterade i förbättrad förankringshållfasthet mellan fiber och betong. Det borde ge en ökad residualhållfasthet, speciellt vid låga nedböjningsnivåer där jämförelsen enligt den direkta metoden görs. Ökningen av bärförmåga är större för små sprickvidder och effekten av självläkning kan här ha bidragit positivt. Om man studerar resultaten från analysen enligt den statistiska metoden och förändringen av residualbärförmågan, vid högre deformationer än det är möjligt att göra med den direkta metoden, ses ingen ökning för små sprickvidder. Ökningen måste därför vara giltig enbart för mycket små utdragslängder av fibern.

För prover med pågående korrosion måste en eventuell ökning av bärförmågan förväntas vara temporär. Istället borde fibrerna börja uppvisa ett sprött dragbrott istället för ett duktilt utdragsbrott vid något kritiskt korrosionsangrepp. Trenden efter 5 års exponering är att ökningen av bärförmågan redan har stannat av eller börjat minska för alla prover enligt den direkta jämförelsen.

Inverkan av exponeringsmiljö är tydlig för prover i Dalälven, som i den direkta analysen uppvisar en större förlust av residualhållfastheten än prover vid Rv40 och i Eugenia. En förklaring skulle kunna vara att proverna har legat till hälften nedsänkta i vatten hela tiden och därför erhållit en högre vattenmättnadsgrad. Det gör betongen mer känslig för frostpåverkan. I den statistiska jämförelsen uppvisar Dalälvs- och Rv40-proverna ett liknande beteende. Anledningen till minskningen av residualhållfasthet kan dock vara olika. För att sammanfatta diskussionen kan sägas att de två utvärderingsmetoderna visar residualbärförmågan vid olika nedböjning. Därför är det möjligt att se en skillnad i vilken mekanism som ger reduktionen. För Dalälvsproverna

kan anledningen vara frostpåverkan (ger sämre förankring av fibrerna) och för Rv40-proverna är orsaken fiberkorrosion (ger fiberbrott). Anledningen till denna tolkning är att betongkvaliteten är mer avgörande vid små deformationer och fibrernas betydelse styr vid höga deformationer.

Både den direkta och den statistiska jämförelsen visar prov från Eugenia tunneln en mindre påverkan på residualbärförmågan. Begränsat korrosionsangrepp och inga tecken på frostsador är den mest troliga förklaringen.

Inverkan av fiberlängd ses på den minskade bärförmågan enligt den statistiska jämförelsen där prover med 40 mm fibrer visar en större reduktion än prover med 30 mm fibrer.

2.5.2 Kloridinnehåll

Vid utvärderingen efter 1 år erhöles mycket låga kloridkoncentrationer i proverna. Vid den andra (2000) och tredje (2002) utvärderingen hade nivåerna stigit. I medel är kloridhalterna vid Rv40 och Eugenia ganska höga (>0.20 %/kg cement) i de övre 10 mm av betongen. I Vägverkets Bro 2002 (2002) anges den övre gränsen till 0,3 %/kg cement. Något överraskande visar sig proverna i Eugeniattunneln ha de högsta nivåerna. De är placerade högre ovanför vägbanan än vid Rv40 och borde därför ha en lägre kloridbelastning. En möjlig förklaring kan vara att proverna vid Rv40 utsätts för regn och att en viss urtvättning sker under sommarhalvåret.

2.5.3 Fiberkorrosion

Korrosion hade initierats redan efter ett års exponering vid Rv40. Efter 2,5 år återfanns viss korrosion även vid de andra platserna i prover med stor sprickvidd. Vid utvärderingen efter 5 år verkade sprickviddens betydelse ha minskat då liten skillnad kunde ses mellan 0,5 mm och 1,0 mm sprickvidd. I prover med den tunnaste sprickvidden uppvisas ingen eller mycket begränsad korrosion. Troliga förklaringar kan vara viss självläkning och begränsad fuktillgång i sprickan.

Från det begränsade antalet prover verkar det som om 40 mm fibrer erhåller ett allvarligare korrosionsangrepp än 30 mm fibrer. Minskningen av fiberdiameter är nästan dubbelt så stor. Det stärker hypotesen om att kvoten mellan anod- och katodarea är en viktig parameter. Vid den senaste utvärderingen ser det ut som om 40 mm proverna har ett mindre angrepp än tidigare. Det skulle kunna vara en effekt av den valda metoden att hitta fibrer med korrosion. Om fibrerna rostas av går de inte att hitta med den valda metoden. En vidareutveckling vid framtida utvärderingar vore kanske att injektera sprickorna med epoxi före frysning för att återfinna alla fibrer som korsat sprickan.

Vad gäller blandningstyp, verkar inte det vara en viktig parameter för korrosionsprocessen i en spricka.

Generellt är korrosionshastigheterna mycket högre än förväntat i Rv40-miljön. Om den hastigheten är konstant kan man förvänta en kraftig reduktion av bärförmågan om ett par år, för prover med sprickvidder större än 0,1 mm. I den typen av miljö kan därför inga sprickor accepteras om fibrerna skall tillgodoräknas som konstruktiv armering.

2.5.4 Frostbeständighet

När man studerar resultaten från planslipsanalysen av de tre betongtyperna, måste man ha i åtanke att det är ett stickprov från ett enskilt prov. Tekniken att spruta betong kan ge upphov till skillnader i ett större prov. För att få en heltäckande bild måste flera prover analyseras. I vilket fall som helst så ger analysen stöd till teorin att tillsats av vattenglasaccelerator ger ett grövre luftporsystem. Skillnaderna är inte stora men den lägre specifika yta och högre avståndsfaktor pekar i den riktningen. Frostskador återfinns på prover både vid Rv40 och i Dalälven.

2.6 Slutsatser

Efter 5 års fältexponeringar kan följande slutsatser dras:

- Fortsatt hydratering av betongen och därför förbättrad förankringshållfasthet av stålfibrerna kan ge en initiell ökning av residualbärförmågan vid små deformationer. Ökningen kan förväntas vara tillfällig eftersom minskad fiberdiameter p.g.a. korrosion eller sänkt vidhäftningshållfasthet p.g.a. frostpåverkan, sänker duktiliteten och minskar denna effekt. Vid högre deformationer ger båda mekanismerna en sänkt bärförmåga vid återbelastning efter exponering.
- Kloridinnehållet längs sprickytan ökar närmare spricköppningen. I allmänhet sker en ackumulering med ökad exponeringstid. Ackumuleringen verkar vara beroende av tillgången till fukt eftersom prover som regnskyddats i tunnelmiljö har en högre ökning än prover utsatta för nederbörd längs motorväg
- En hög exponering för tösalt vintertid vid Rv40 ger ett kraftigare korrosionsangrepp än för prover exponerade i Dalälven och Eugeniattunneln. Proverna vid Rv40 uppvisar ett mycket kraftigt korrosionsangrepp efter 5 års exponering. Sprickviddens betydelse verkar minska med tiden efter att korrosion har initierats. Längre fibrer korroderar snabbare än korta vid samma sprickvidd. Fiberlängden verkar därför med viktiga än sprickvidden, om den är större än 0,1 mm.
- Användning av vattenglasaccelerator verkar ge ett grövre luftporsystem, men sänkt frostbeständighet som följd. Torr-sprutade prover har ett mer fördelaktigt luftporsystem med hänsyn till frostpåverkan, jämfört med våtsprutad betong.

3 LABORATORIEFÖRSÖK

3.1 Syfte

Huvudsyftet med laboratorieförsöken är att kunna göra relative jämförelser mellan olika parametrar under kontrollerade klimatförhållanden. För att få resultaten på kortare tid har s.k. accelererade försök genomförts. När resultaten jämförs med fältexponeringarna kan möjligen en prediktion av beteendet i fält göras med laboratorieförsöken som grund. Sprickvidd, fiberlängd, inblandning av accelerator och stålqualität är parametrar som provats.

3.2 Provningsmetodik

3.2.1 Materialsammansättning

Tre fiberlängder (35, 70 and 105 mm) och tre sprickvidder (0.1 , 0.5 , 1.0 mm) provades i första omgången. I andra provomgången hölls fiberlängd och sprickvidd konstant medan stålqualität (lågkol, galvade, rostfria) och acceleratortillsats (vattenglas, alkalifritt) provades.

Tabell 3.1 Kombination av parametrar vid accelererade försök – del I.
Combination of parameters in accelerated experiments – set I.

		Fiberlängd (mm)		
		35	70	105
Sprickvidd (mm)	0.1	-	x	-
	0.5	x	x	x
	1.0	-	x	-

Tabell 3.2 Kombination av parametrar vid accelererade försök – del II.
Combination of parameters in accelerated experiments – set II.

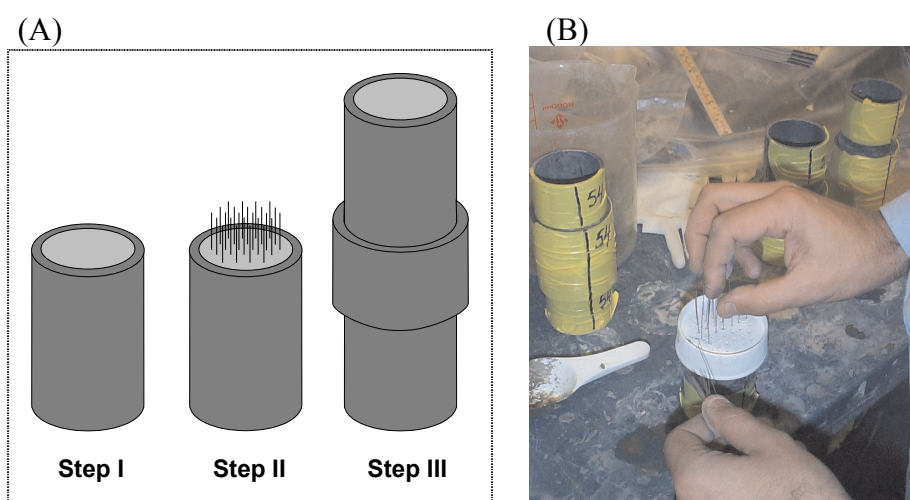
		Stålqualität		
		Lågkol	Zinkbelagda	Rostfria
Accelerator	Ingen	x	x	x
	Vattenglas	x	-	-
	Alkalifri	x	-	-

Betongsammansättningen var identisk med den i fältexponeringarna så när som på stenmax som var 4 mm i laboratorieförsöken. För att möjliggöra gjutning så att fibrerna i den undre delen inte flyttade sig gjöts den undre delen med relativt styv konsistens.

Den övre delen gjöts med mycket lättflytande konsistens (förhöjd tillsatsmedelsmängd). Accelerator tillsatsen var 4 respektive 7 % av cementvikten.

3.2.2 Provkroppstillverkning

Cylindrar ($l=170$ mm, $\phi=57$ mm) för varje kombination av parametrar tillverkades. Första omgången bestod av 90 provkroppar (3 prov per kombination) och andra av 60 (2 per kombination). I varje prov placerades 37 st raka fibrer med ca. 8 mm mellanrum för hand i den färska betongen. I Figur 3.1 visas gjutsekvensen och placeringen av fibrer. Gjutningen utfördes i rumstemperatur (+20 C) för alla prover i den första omgången. Proverna i den andra omgången tillverkades i + 2C temperatur för att möjliggöra acceleratortillsats vid blandning av betongen i omrörarblandare. Det gör reaktionen långsam och för vattenglasaccelerator fungerade det utmärkt. För alkalifri accelerator var gjutning möjlig, men hållfasthetsutvecklingen var mycket långsam även då proverna flyttades till rumstemperatur efter 1 dygn. Det gjorde att de alkalifria proverna uteslöts från provningsprogrammet.



Figur 3.1 Formar och gjutsekvens (A). Placering av fibrer (B).
Moulds and sequence for pouring (A). Placing of fibres (B).

3.2.3 Spräckning

Proverna spräcktes efter 5-7 dagar efter gjutning till avsedd sprickvidd genom att de utsattes för enaxiellt drag under deformationsstyrd (konstant ökning av deformationen oavsett last) belastning. Proverna hade försetts med en s.k. notch (spår med mindre diameter än övriga provet) för att styra uppspräckningen till det område som bedöms hamna mitt på fibrernas längd.

3.2.4 Elektrokemiska mätningar

I den andra provomgången provades också en teknik för att göra elektrokemiska mätningar på prover lagrade i kloridmiljö. För mer detaljer hänvisas till <avhandlingen>

3.2.5 Exponeringsmiljö

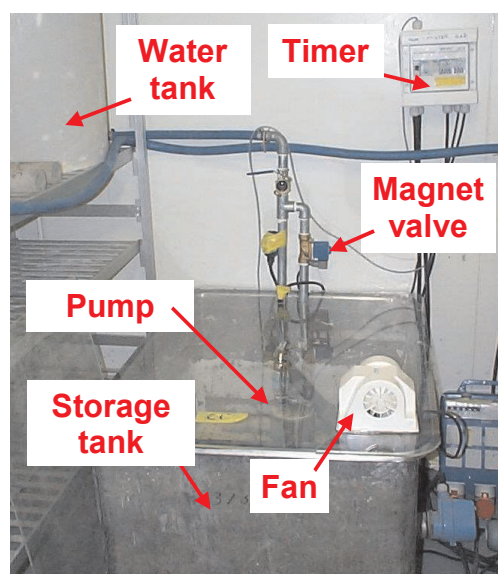
De accelererade provningarna startades ca. 30 dagar efter gjutning. Två exponeringsmiljöer skapades:

KLORIDER – Nedsänkt i vatten, 3.5% NaCl (3 dygn) + Luft, RH 50% (4 dygn)

SÖTVATTEN – Nedsänkt i vatten (3 dygn) + Luft med RH 50% (4 dygn)

För båda miljöerna var temperaturen ca. 20 C. Den kloridhaltiga miljön skall efterlikna förhållande med direktstänk av vatten innehållande tölsalter, men som är skyddade från nederbörd. När det gäller kloridkoncentration är syftet att skapa så höga kloridhalter som möjligt utan att riskera att korrosionsprocessen förvanskas. T.ex. finns det en risk att kloridkristaller skulle kunna bildas om för höga halter uppnås. Sötvattensmiljön motsvarar en situation där konstruktionen inte är skyddad för nederbörd eller där stora variationer i vattennivåer kan förväntas (t.ex. intagstunnlar till en vattenkraftsstation).

Vid valet av luftfuktighet fanns två alternativ beroende på tillgången till klimatrum där 50 resp. 65% luftfuktighet råder. Den lägre nivån valdes för att möjliggöra att tillräcklig uttorkning mellan perioderna då proverna är helt nedsänkta i vatten. Det är dock oklart vilken fuktnivå som kan förväntas inne i sprickan. Kapillärtransport, avdunstning och vattentillgång i betongprovets närhet är faktorer som försvårar bedömningen.



Figur 3.2 Utrustning för accelererad laboratorieexponering.
Equipment for accelerated laboratory exposure.

I Figur 3.2 visas utrustningen för accelererad provning av korrosion. Principen är att proverna lagras i lagringskärlet hela tiden. Temperaturen hålls konstant till +20C. För att skapa det önskade klimatet används en sekvens som är följande:

1. Nedsänkt i vatten (klorider eller sötvatten) – 3 dagar.
2. Tömning av vatten genom pumpning till vattenbehållare
3. Luft (RH 50%) fläktas ner i lagringskärlet – 4 dagar.
4. Vatten släpps tillbaka i lagringskärlet genom att en magnetventil öppnas. I del två passerade vattnet också en låda där referenselektroden sitter.

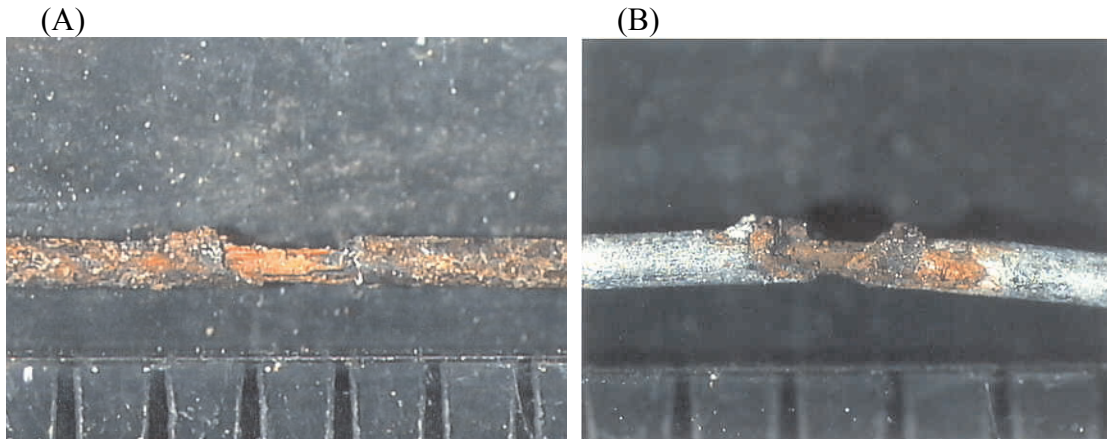
3.2.6 Utvärdering efter exponering

Utvärderingen gjordes på samma sätt som efter fältexponeringarna. Torkning, vakuumbehandling, vattenmättnad och frysning gjorde det enkelt att frilägga fibrerna från betongmatrisen. För detaljer kring sönderfrysning och mätning hänvisas till avsnittet om fältexponeringarna. Enda skillnaden var att fibrer som var helt av i de accelererade försöken betraktades som om de förlorat 100% av fiberdiametern.

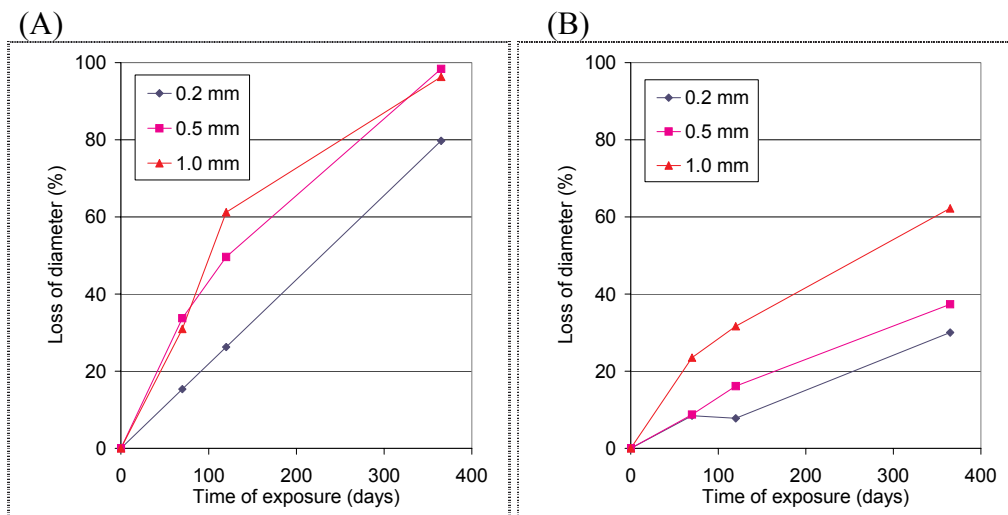
3.3 Resultat

3.3.1 Fiberkorrosion

Generellt hade korrosion initierats på alla prover med lågkolstål redan efter 70 dagar (oberoende av sprickvidd, fiberlängd och acceleratortyp). I Figur 3.4 och Figur 3.5 visas diameterförlusten i sprickområdet korrelerat med sprickvidd, fiberlängd och exponeringsmiljö. Ur figuren kan man se att prover som lagrats i kloridmiljö korroderat mer än de som lagrats i sötvatten. En annan skillnad är att man, för de längsta fibrerna (105 mm), kan se korrosion även på delar som inte exponerats i sprickan (se Figur 3.3). Angreppet var mycket begränsat och kan sannolikt hänföras till gjuttekniken som kan ha gett kloridinträngning i gränsskiktet mellan fiber och betong. Skillnaden mellan 0.5 och 1.0 mm är dock liten för prover exponerade i kloridmiljö. I sötvattensmiljö korroderar prover med 1.0 mm spricka mycket mer än 0.2 och 0.5 mm. I Tabell 3.3 och Tabell 3.4 framgår att standardavvikelseerna är relativt stora, vilket härrör från att alla fibrer i sprickan är inkluderade. Detta oavsett läge.

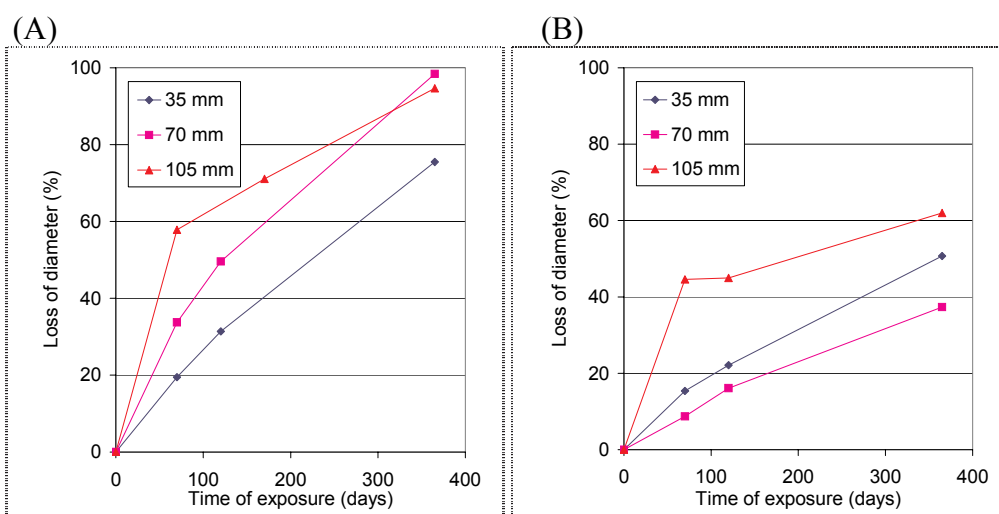


Figur 3.3 Korroderat område i spricka från accelererade provningar i KLOORID-miljö (A) och SÖTVATTENS-miljö (B), (L= 70 mm, w= 1.0 mm, 70 dagars exponering). *Corroded area in crack from accelerated exposure tests in CHLORIDE (A) and TAP WATER (B) environment (L= 70 mm, w= 1.0 mm, 70 days of exposure).*



Figur 3.4 Medelförlust av fiberdiameter – inverkan av sprickvidd (L=70 mm). KLOORID-miljö (A) och SÖTVATTENS-miljö (B) *Average loss of fibre diameter – influence of crack width (L= 70 mm). CHLORIDE environment (A) and TAP WATER environment (B)*

När inverkan av fiberlängd studeras i Figur 3.5 kan man se ett kraftigare angrepp med ökad fiberlängd för prover i KLOORID-miljö, medan det i SÖTVATTENS-miljö är tvärt om för 35 resp. 70 mm prover.



Figur 3.5 Medelförlust av fiberdiameter – inverkan av fiberlängd ($w=0.5$ mm). Klorid-miljö (A) och SÖTVATTENS-miljö (B)
Average loss of fibre diameter – influence of fibre length ($w= 0.5$ mm). CHLORIDE environment (A) and TAP WATER environment (B)

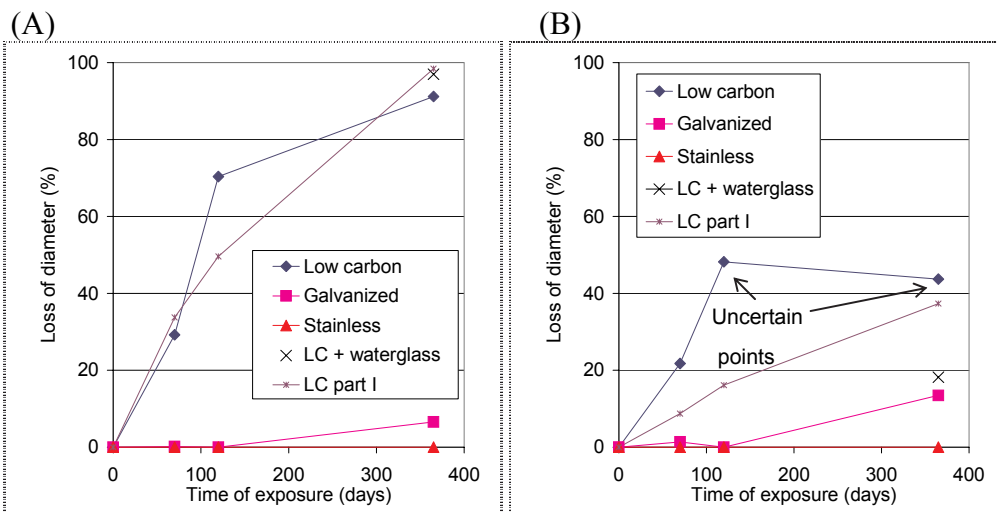
Tabell 3.3 Standardavvikelse (förlust i procent av orginaldiameter), på diameterförlust vid accelererade exponeringar i Klorid-miljö – Del I.
Standard deviation (loss in percent of original diameter), on loss of fibre diameter from accelerated exposure tests in CHLORIDE environment – Set I.

Sprickvidd (mm)	Fiberlängd: exponeringstid (dagar)								
	35:70	35:120	35:365	70:70	70:120	70:365	105:70	105:120	105:365
0.2	-	-	-	14.5	21.4	31.0	-	-	-
0.5	6.9	13.9	26.5	17.2	21.3	5.9	30.7	26.7	9.4
1.0	-	-	-	20.3	25.8	16.9	-	-	-

Tabell 3.4 Standardavvikelse (förlust i procent av orginaldiameter), på diameterförlust vid accelererade exponeringar i SÖTVATTENS-miljö – Del I.
Standard deviation (loss in percent of original diameter), on loss of fibre diameter from accelerated exposure tests in TAP WATER environment – Set I.

Sprickvidd (mm)	Fiberlängd: exponeringstid (dagar)								
	35:70	35:120	35:365	70:70	70:120	70:365	105:70	105:120	105:365
0.2	-	-	-	13.4	13.6	20.6	-	-	-
0.5	15.2	26.4	33.0	12.4	15.8	26.7	30.6	24.5	28.9
1.0	-	-	-	13.4	19.2	30.7	-	-	-

Resultaten från den andra delen av de accelererade exponeringarna kan ses i Figur 3.6. Det är tydligt att både rostfria och galvaniserade fibrer uppvisar ett bättre motstånd mot korrosion än lågkolstål. Vid den sista utvärderingen efter ett år har dock även de galvaniserade fibrerna börjat uppvisa korrosion, och det skyddande zink-skiktet får därför anses vara förbrukat i sprickzonen. I SÖTVATTENS-miljön har ett större angrepp noterats vid 120 dygn än efter 365 dygn för lågkolstålsfibrerna. Det råder dock vissa osäkerheter kring märkningen av dessa och de kan därför ha sammanblandats.



Figur 3.6 Medelförlust av fiberdiameter i KLORID-miljö (A) och SÖTVATTENS-miljö (B). Inverkan av ståltyp och vattenglasaccelerator. (LC= lågkolstål). Average loss of fibre diameter in CHLORIDE environment (A) and TAP WATER environment (B). Influence of steel type and water glass accelerator (LC= Low Carbon).

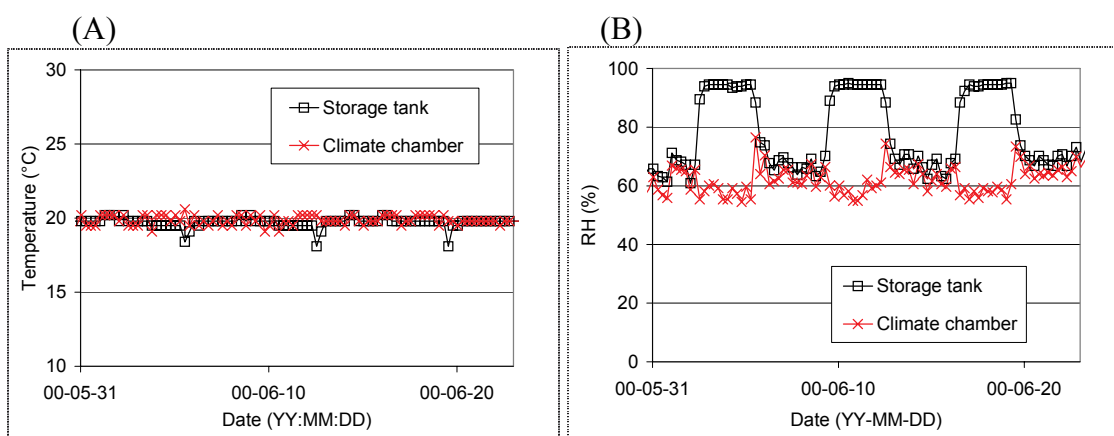
Tabell 3.5 Standardavvikelse (förlust i procent av originaldiameter), på diameterförlust vid accelererade exponeringar– Del II. Standard deviation (loss in percent of original diameter), on loss of fibre diameter from accelerated exposure tests– Set II.

		Ståltyp / accelerator:exponeringstid (dagar)						
		LC:70	LC:120	LC:365	GS:70	GS:120	GS:365	LC/WG:365
Exponerings- miljö	Klorider	24.0	29.5	26.8	0.6	0	10.5	16.5
	Sötvatten	20.0	17.1	29.1	1.4	0	18.8	21.2

LC= lågkolstål; GS= galvaniserat stål; WG= vattenglas

3.3.2 Exponeringsmiljö

Ett exempel på uppmätta värden för relativ fuktighet kan ses i Figur 3.7. Det framgår att förhållandena ser ut att variera en del. I genomsnitt verkar RH-nivån dock ligga på 65-70% inne i lagringskärlet under torrperioderna. En minskande trend till 50% RH kan ses beroende på att klimatrummets luft (som håller denna nivå) blåses ner i lagringskärlet. Luften runt kärlet kan dock ha påverkats av den fuktiga luften som pressar ur lagringskärlet.



Figur 3.7 Mätning av temperatur (A) och relativ fuktighet (B) i lagringskärl och klimatrum under del I av exponeringarna.
Measurements of temperature (A) and relative humidity (B) in storage tank and climate chamber during set I of the exposures.

3.4 Korrelation med fältexponeringar

Med resultat både från fältexponeringar och de accelererade laboratorieprovningarna är det möjligt att skapa en korrelation mellan dem för att definiera graden av acceleration i lab. Nedan visas ett försök att etablera en korrelation mellan fält och laboratorieprovningar.

Först kan det noteras att det är skillnader mellan parametrar för prover exponerade i fält och i lab. Den kortaste fibern som används i laborietesterna är 35 mm, medan den i fält är 30 mm. Om den vänstra delen av Figur 3.5 studeras kan man se att en ökning från 35 till 70 mm ger en ökning av angreppet från 31 till 49% förlust av diameter efter 120 dagars exponering i kloridmiljö. En grov approximering ger att en 30 mm fiber som exponerats i laboriemiljö skulle ha förlorat diameter enligt följande beräkning:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{l,e}(t_i) &= \Delta\phi_{30,Cl}(120) = \Delta\phi_{35,Cl}(120) - \frac{\Delta\phi_{70,Cl}(120) - \Delta\phi_{35,Cl}(120)}{l_{70} - l_{35}} * (l_{35} - l_{30}) \\ &= 31 - \frac{49 - 31}{70 - 35} * 5 = 29\% \end{aligned} \quad (5.1)$$

där:

$\Delta\phi_{l,e}(t_i)$: Förlust av fiberdiameter, fiberlängd l , miljö e efter tid t_i (%)

l : Fiberlängd (mm)

e : Accelererad exponeringsmiljö (Cl = Kloridmiljö / Tap = Sötvattensmiljö)

t_i : Exponeringstid i exponeringstyp i (dagar)

i : Exponeringstyp i (f = fält / a = accelererad)

Om linjär extrapolation används skulle en 30 mm fiber enligt ekvation 5.1 ha korroderat 29% i den accelererade miljön. I Figur 3.8 visas utvecklingen av hur diametern förändras beroende på olika korrosionshastigheter fält och lab. Om en linjär trend med korrosionshastigheter som mellan 2.5 och 5 år antas skulle tiden att nå samma korrosionsangrepp i fält som efter 1 år i lab. kunna beräknas som:

$$r_j = \frac{\Delta\phi_i(t_i)}{\Delta t_i} \quad (5.2)$$

$$r_{RV40} = \frac{\phi_f(2.5 \cdot 365) - \phi_f(5 \cdot 365)}{\Delta t_i} = \frac{0.426 - 0.412}{(5 - 2.5) \cdot 365} = 1.534 \cdot 10^{-5} \text{ mm / dag} \quad (5.3)$$

där:

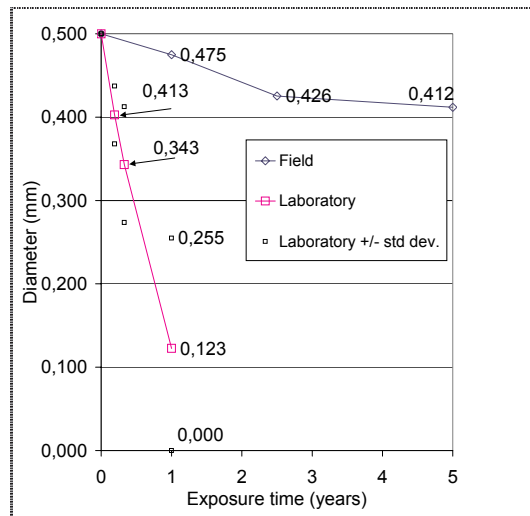
$\phi_i(t_i)$: Fiberdiameter för fiber exponerad i exponeringstyp i efter tid t_i (mm)

r_j : Korrosionshastighet i fältexponeringar vid exponering i miljö j (mm/dag)

j : Fältexponeringsmiljö ($RV40$ / EUG / DAL)

$$\begin{aligned} t_{i+5} &= t_i + \frac{\phi_f(5 \cdot 365) - \phi_a(1 \cdot 365)}{r_{RV40}} \\ &= 5 \cdot 365 + \frac{0.412 - 0.123}{1.534 \cdot 10^{-5}} = 20664 \text{ dagar} = 56 \text{ år} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Extrapoleringen visar att det skulle ta ytterligare 50 års fältexponering innan samma diameterförlust skulle uppnås som efter 1 års laboratorieexponering. Om standardavvikelsen i resultaten tas i beaktande från de accelererade exponeringarna kan resultatet ur ekvation 5.4 variera mellan 28 och 73 år.



**Figur 3.8 Utveckling av diameterförlusten i laborrietester (Klorid, L= 35 mm, w= 0.5 mm) och fältexponeringar (Rv40, L= 30 mm, w= 0.5 mm).
Development of diameter loss in laboratory (Chloride, L= 35 mm, w= 0.5 mm) and field (Rv40, L= 30 mm, w= 0.5 mm) exposures.**

Eftersom nästan ingen korrosion kunde ses vid Dalälven och Eugeniattunneln (mycket få fibrer) kan ingen signifikant korrelation mellan lab. och fält göras. Ett problem med korrelationen mellan lab. och fält är att kurvformen som beskriver ändringen av fiberdiameter är olika. I fältexponeringarna ses en mer tydlig trend med hög korrosionshastighet under de första 2.5 åren och nästan ingen skillnad mellan 2.5 och 5 år. I laborrietesterna minskar korrosionshastigheten bara något med tiden. Framtida utvärderingar av fältproverna stärker möjligheten till att koppla de olika exponeringstyperna.

3.5 Diskussion

En fråga som kan ställas med anledning av gjuttekniken är risken för att fibrerna ska komma i kontakt med varandra. Det är troligt, speciellt för längre fibrer. Eftersom makrocellskorrosion dominerar i sprucken betong är denna situation inte nödvändigtvis ett problem. Summan av anod och katodarea är ändå samma.

I föreliggande studie har inga mätningar av kloridhalter i proverna gjorts. Fokus var istället att finna vilken korrosionsgrad fibrerna uppvisade.

När standardavvikelse studeras måste det beaktas att alla fibrer i tvärsnittet är inkluderade. Det leder till att både fibrer exponerade nära spricköppningen och i mitten såväl som både fibrer med och utan korrosion medtas i standardavvikelsen. Resultaten är beräknade som ett medel för alla fibrer i provet. Skillnader i sprickvidd och hur framgångsrikt fibrerna lyckats bli ingjutna är andra potentiella källor till spridning. Några fibrer kan också ha gått av vid processen för friläggning. I beräkningarna har alla fibrer som gått till brott behandlats som om de förlorat 100% av sin diameter, vilket kan vara en överskattning.

De accelererade proverna visar att det sker en ökning av korrosionsangreppet när sprickvidden överskrider 0.2 mm i KLORID-miljö och 0.5 mm i SÖTVATTENS-miljö. Det är därför tydligt att korrosion kan initieras även i relativt tunna sprickor när klorider finns närvarande. Inverkan av fiberlängd är också tydlig i kloridmiljön, där längre fibrer ger ökat angrepp. I sötvattensmiljön verkar 35 mm fibrer korrodera fortare än 70 mm fibrer vid alla utvärderingstillfällen. Ingen förklaring till detta har gått att finna.

Inverkan av ståltyp visar att de rostfria fibrerna verkar ge ett mycket gott skydd utan korrosion efter 1 år i KLORID-miljö (ca. 50 år i fält). Det skyddande zinklagret på galvaniserade fibrer verkar å andra sidan ha blivit förbrukat efter 1 år. Under svåra förhållanden kan rostfria fibrer alltså vara motiverade för att bibehålla önskad bärformåga under lång tid.

Användning av vattenglas har inte påverkat beteenden för lågkolstålsfibrer i kloridmiljö, men i sötvattensmiljö verkar den ha haft en skyddande effekt.

Det är svårt att bedöma fukttillståndet i en betongspricka. Fuktförhållandena är också mycket viktiga för att försöka förstå vilka mekanismer som styr initiering och propagering av korrosion i en spricka. Å andra sidan har korttidsvariationer troligen mindre betydelse när en livslängdsmodell i ett 100-årsperspektiv. Någon slags medelklimat är troligen mer intressant för att skapa en modell för prediktering av beständighet.

Om den grova uppskattningen av korrelationen mellan fält- och laboratorieexponeringar används för att extrapolera det framtida beteendet, kommer prover med 30 mm fibrer och 0.5 mm sprickvidd att behöva exponeras ca. 50 år i en miljö som Rv40 för att uppvisa samma angrepp som vid laboratorieexponeringarna.

3.6 Slutsatser

Om man beaktar de stora osäkerheterna, beroende på begränsad mängd testdata, kan följande slutsatser dras från utvärderingen av accelererade laboratorieexponeringar:

- Den valda metodiken verkar användbar för att exponera sprucken stålfiberarmerad betong under accelererade förhållanden. Accelerationen är grovt beräknad så att 1 års exponering i lab. motsvarar 50 år i en miljö som vid Rv40.
- I kloridmiljön korroderar längre fibrer fortare än korta. En uppskattning ger att en förändring av fiberlängden med 10 mm leder till en förändring av förlusten av fiberdiameter med ca. 5%. I sötvattensmiljön är resultaten mer motsägelsefulla.
- En ökad sprickvidd ger en större förlust av fiberdiameter

- Användning av rostfria fibrer ger ett mycket beständigt beteende mot korrosion medan galvaniserade fibrer bara ger en förlängd tid till initiering, men inget fullgott skydd.
- Korrosionshastigheten minskar med tiden i de accelererade exponeringarna.

4 BÄRFÖRMÅGA

4.1 Introduktion

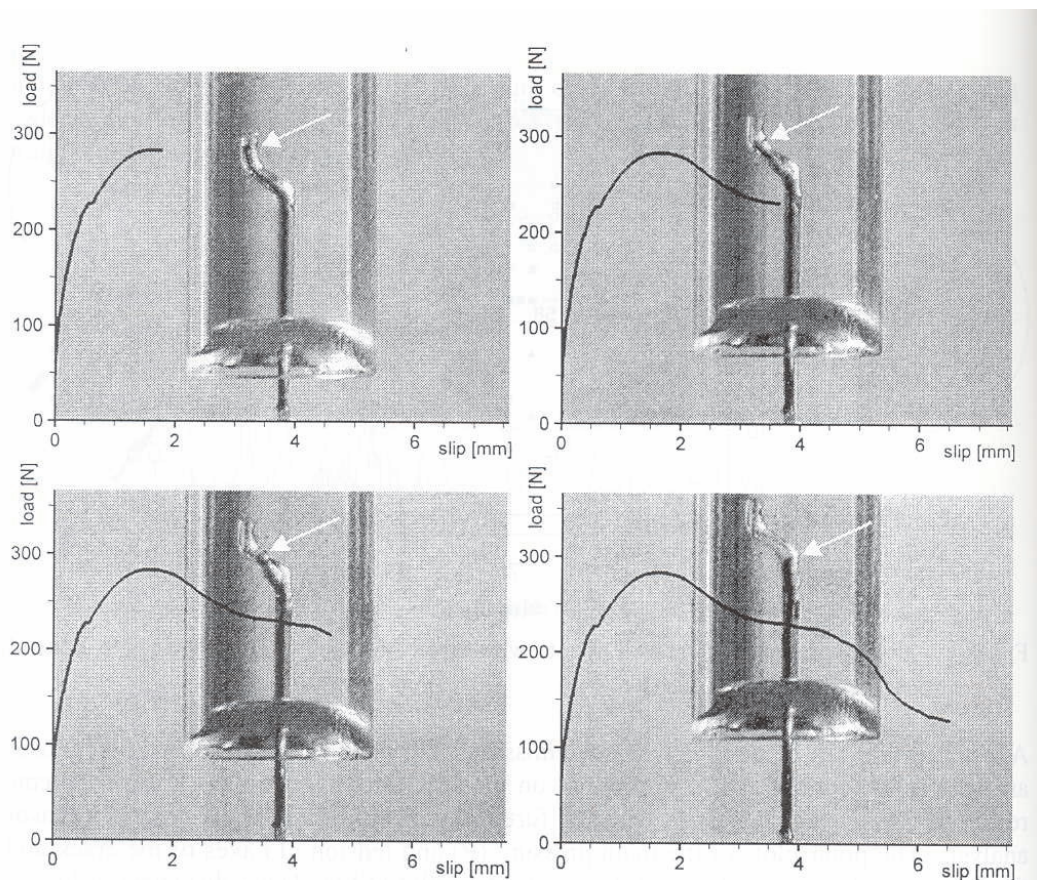
Ett stort antal modeller finns tillgängliga för att beskriva bidraget från fibrer till hållfastheten hos fiberarmerad betong. Huvudsakligen finns två olika filosofier för modellering. Antingen anses betongen med fibrer som ett ”nytt” material eller mer korrekt som en komposit med andra brottmekaniska egenskaper än den rena betongen, eller så ses fibrerna som armering i betongen.

För att bedöma inverkan av förlusten av fiberdiameter har det här ansetts att ”armeringsmodellen” är lämpligast. Därför kommer bärförmågan att studeras genom att modellera inverkan av korrosion på stålfiberarmeringen separat.

4.2 Utdragsmotstånd

När fibrer betraktas som armering, baseras bidraget till residualbärförmågan efter uppsprickning mycket på utdragsmotståndet. Duktiliteten hos materialet uppnås när fibrerna dras ur betongen. Fibrerna är anpassade så att längd, diameter, form och draghållfasthet optimeras för att fibrerna inte ska gå av (sprött brott som följd), se t.ex. Li & Stang (1997) där en sammanställning av olika aktiva mekanismer för att beskriva utdragsmotståndet presenteras. En senare presenterad komplett utdragsmodell återfinns i van Gysel (1999). Utöver detta kan man i en illustrativ artikel av Weiler & al. (1999) se effekten av ändkrok hos en fiber som ger upphov till två lasttoppar som sammanfaller med fasen då fibern passerar hörnen i det avtryck fibern gjort i betongen. Effekten har också studerats av andra forskare i direkta utdragsförsök på enstaka fibrer som i t.ex. Groth (2004). Sammanfattningsvis finns det tre olika mekanismer under utdragsfasen av en fiber som bidrar till duktiliteten:

- Upphävning av vidhäftningen i kontakten mellan fiber och betongmatrisen. Vidhäftningen börjar upphävas vid sprickytan och propagerar sedan längs gränsskiktet mellan fiber och betong
- Friktion mellan fiber och betong i de raka partierna, i krökar (för fibrer med ändkrok) och ett tillägg av fiberns kvarvarande krokighet efter att stora glidningar har uppstått (för fibrer med ändkrok).
- Deformation av fibern under utdraget eller om fibern inte är vinkelrät mot sprickplanet.



Figur 4.1 Last- / glidkurva från utdrag ur epoxi och foton från olika skeden, Weiler & al (1999).
Load-slip curve of pull-out from epoxy resin and photos from different stages, Weiler & al. (1999).

När en betong är sprucken kommer vidhäftningen mellan fiber och betong att vara helt upphävd vid en viss glidning. Därefter bidrar endast friktion och fiberdeformation till utdragsmotståndet. Li & Stang (1997) föreslår följande förhållande för att beskriva utdragsbeteendet efter att vidhäftningen har blivit upphävd.

$$\tau = \tau_0 + \Delta\tau(s) = \tau_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 \quad (6.1)$$

där τ_0 är den maximala friktionsspänningen för gränsskiktet mellan betong och fiber före fibern börjar glida (glidavstånd $s = 0$). Koefficienterna a_1 och a_2 är empiriska konstanter från direkta utdragsförsök på enstaka fibrer. Med tillräcklig mängd experimentella data kan ekvationen användas för vilken fiber och betongtyp som helst. Ekvation (6.1) används i modelleringen av bärförmåga som presenteras i avsnitt 4.5.

Värden på parametrarna i ekvation (6.1) och blandningens sammansättning vid försöken med utdrag av enstaka fibrer av Li & Stang (1997) återfinns i Tabell 4.1 och Tabell 4.2. Fibrerna och blandningens komposition är i stort sett densamma som den i de tidigare presenterade fältexponeringarna, endast med skillnaden att en mindre mängd

polypropylenfibrer tillsatts av Li & Stang, samt att vct är 0.47 istället för 0.42 som använts i fältexponeringarna.

**Tabell 4.1 Blandnings sammansättning [kg/m³] (Li & Stang, 1997).
Mix proportions [kg/m³] (Li & Stang, 1997).**

Komponent	
Cement	500
Sand	810
Grus	810
Flytmedel	20
Vatten	238
Polypropylenfibrer	10
Stålfibrer* (30/0.5)	75

* med ändkrok

**Tabell 4.2 Parametrar från utdragsprov av enstaka fiber gjorda av Li & Stang (1997).
Parameters from single fibre pull-out tests by Li & Stang (1997).**

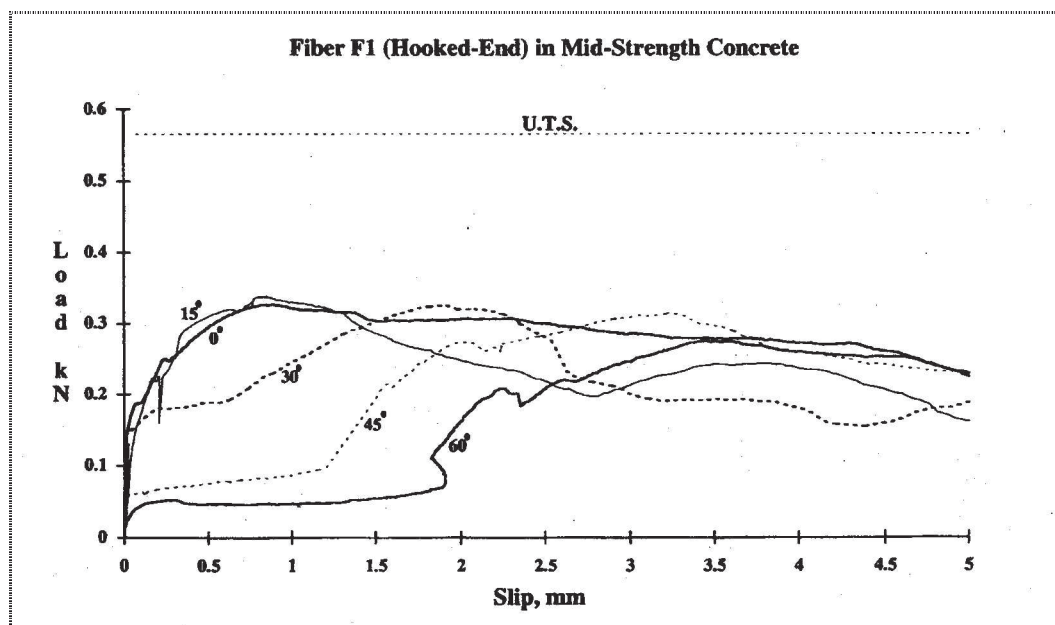
Parameter		
τ_0	[MPa]	4.5
a_1	[MPa/mm]	-2.0
a_2	[MPa/mm ²]	0
s= glidavstånd	[mm]	0.3

* område testat i experiment

Eftersom utdragstester visar det faktiska beteendet oavsett vilket bidrag som ges från olika mekanismer, kan det användas för bedömning av bärförmågan. I testerna av Li & Stang är intervallet för provning endast upp till 0.3 mm glidning. Glidningen är definierad som fiberns rörelse efter upphävd vidhäftning i gränsskiktet mellan stål och betong. För sprickvidder större än $w=0.3$ mm uppstår en viss osäkerhet kring det faktiska beteendet eftersom det inte har verifierats genom experiment. Eftersom det råder en brist på tillgängliga data för större värden på glidning används det ändå.

En parameter som inte provats i testerna av Li & Stang (1997) är vilken ändring som fås om fibrerna inte är vinkelräta mot sprickplanet, vilket förstås har betydelse och också är studerat av Banthia och Trottier (1994). Om fibervinkeln avviker från vinkelrätt till sprickplanet sänks maxlasten något (se t.ex. Figur 4.2) från referensen. Mest tydligt är det att maxnivån uppstår vid ett större utdrag och att minskningen inte är så stor som man kunnat förvänta sig. Tolkningen av detta är att brottmoden förändras med ökande vinkel på fibern. Med ökad vinkel börjar fibern, istället för att ge ökat utdragsmotstånd genom friktion, spjälka betongen vilket inte ger något bidrag till duktiliteten enligt Banthia och Trottier (1994). Om betongmatrisens hållfasthet ökas kan en högre utdragshållfasthet erhållas, men å andra sidan ökar också risken för fiberbrott.

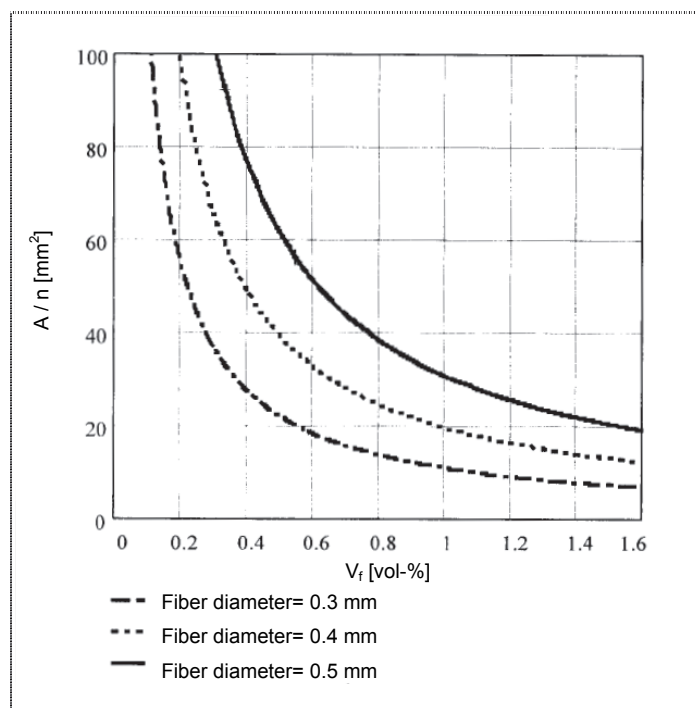
En annan parameter av betydelse som inte beaktats är att fibrerna kan vara olika långt ingjutna på sidan om sprickan. Ingjutningslängder mindre än 1/2 sänker utdragsmotståndet eftersom utdraget kommer att börja i den del som har kortast ingjutningslängd.



Figur 4.2 Exempel på inverkan av olika lutningsvinkel mellan utdragsriktning och fiber (Banthia & Trottier, 1994).
Example of influence from different inclination angles between pull-out direction and fibre (Banthia & Trottier, 1994).

4.3 Fiberfördelning

En parameter av stor betydelse är fiberfördelningen i betongen. Det är viktigt när man studerar mekanismerna för uppsprickning, d.v.s. hur och var sprickan lokaliseras och propagerar genom betongen. I den tidigare presenterade inventeringen av gamla sprutbetongkonstruktioner (Nordström, 1996) noterades det att det var få fibrer i sprickzonen. Det skulle kunna härröra från att sprickan propagerat i ett område med lite fibrer. Fiberfördelningen är också av stor betydelse vid en bedömning av residualbärförmågan i ett livslängdsperspektiv. Antalet fibrer som korsar en spricka avgör bärförmågan och hur många fibrer som kan påverkas av korrosion. Det är väl känt att fibrer i sprutbetong fördelar sig i två dimensioner beroende på sättet att applicera sprutbetong (se t.ex. Ramakrishnan, 1981). Detta måste också beaktas vid en beräkning av antalet fibrer som korsar en spricka.



Figur 4.3 Uppskattning av fiberfördelning i ett tvärsnitt av en fiberarmerad betong (Holmgren & al. 1997).

Estimation of fibre distribution in a cross-section of a fibre reinforced concrete sample. (Holmgren & al., 1997).

I Holmgren & al. (1997) presenteras en metod för att bedöma fördelningen av fibrer i betong. Metoden baseras på tester och utvärderingsmetoder som rapporterats av Kasperkiewicz & al. (1978). I Figur 4.3 visas ett diagram, för 2D fördelning, hur förhållandet A/n [tvärsnittsarea / antal fibrer] korrelerar mot fibermängden V_f [volym-% fibrer]. Förhållandet kan också uttryckas som:

$$\alpha = \frac{A}{n} \tag{6.2}$$

där A är tvärsnittsarean och n är antalet fibrer som korsar en spricka. I Nordström (2005) visas en genomgång av ett antal standardprover och vilken skillnad som kan uppvisas i till synes lika prover. Där visas också att metoden innehåller osäkerheter och att den troligen ger en överskattning av fibermängden i själva sprickregionen.

4.4 Inverkan av korrosion

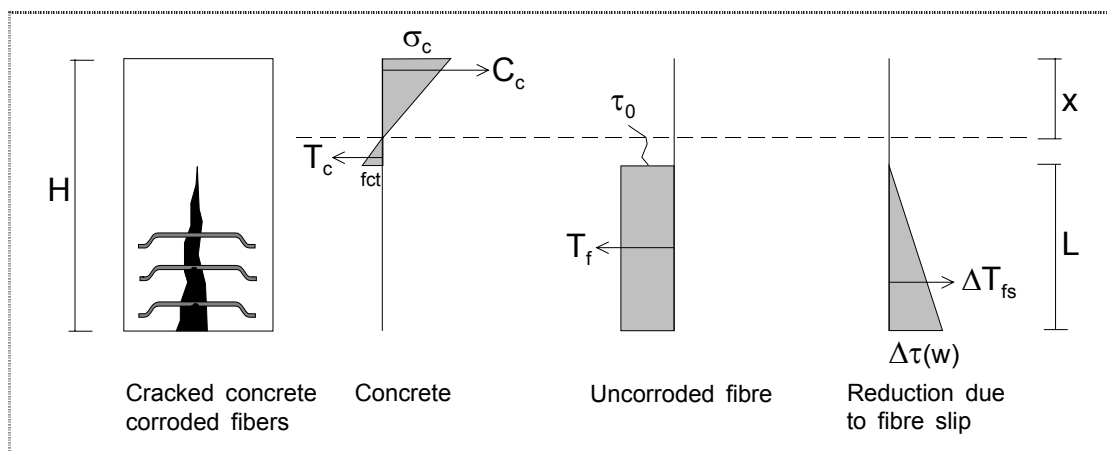
Om ett korrosionsangrepp initieras kan det enkelt förstås att diametern på fibrerna som korsar sprickan reduceras. Förlusten av diameter och den följande reduktionen av kapaciteten att överföra draglaster begränsar bärförmågan för den fiberarmerade betongen. Till slut kommer reduktionen av dragkapaciteten sammanträffa med nivån för

utdragsmotståndet som ges av den ingjutna delen av fibern. Då kommer fibrerna att gå av istället för att dras ut betongen. Processen är kontinuerlig med fiberbrott på fibrer närmast spricköppningen först och sedan successivt på fibrer djupare ner i sprickan med ökad tid.

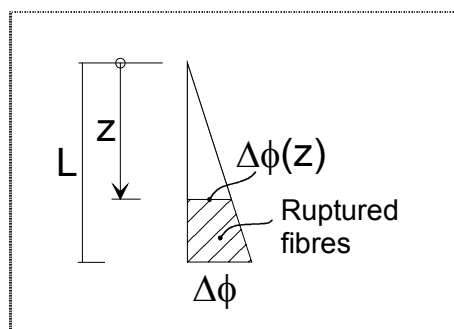
4.5 Analytisk modell

Vid design av förstärkning med sprutbetong i kombination med bultar, som vid bergförstärkning, är böjdragkapaciteten en viktig faktor. Nedan visas en modellering av inverkan från korrosion på fibrer i sprickregionen på residualbärförmågan.

Utdragsmodellen presenterad av Li & Stang (1997) används nedan. Det antas i beräkningarna att huvuddelen av fibrerna har börjat glida vid sprickvidder större än 0.5 mm. Djupare ner i sprickan kanske inte så är fallet, men å andra sidan är hävarmen för dessa fibrer mycket mindre vid böjning. Därför bidrar de inte till kapaciteten i någon större omfattning i en sprutbetongkonstruktion med typiska dimensioner för skandinavisk förstärkningsfilosofi (tjocklek 35-150 mm). I Nordström (2005) visas ett försök att skapa en analytisk modell för bedömning av inverkan på bärförmågan med ökad förlust av fiberdiameter med tiden. I Figur 4.4 och Figur 4.5 nedan visas en schematisk sammanfattning av modellen.



Figur 4.4 Illustration av analytisk modell för bärförmåga under böjdrag på ett sprucket fiberarmerat prov.
Illustration of analytical model for flexural load-bearing capacity on a cracked fibre reinforced specimen..



Figur 4.5 Analytisk modell för förlust av fiberdiameter vid olika nivå beroende på korrosion i en spricka.
Analytical model for loss of fibre diameter at different levels due to corrosion in a crack.

Om momentjämvikt antas under pågående korrosion och krafter och mått ansätts enligt Figur 4.4 och Figur 4.5 kan momentkapacitetens förändring beroende på frontens läge där fibrerna går till brott beräknas enligt:

$$M(z) = T_c \cdot \frac{2}{3} \cdot (H - L) + T_f \cdot (H - L - \frac{x}{3} + \frac{z}{2}) - \Delta T_{fs} \cdot (H - L - \frac{x}{3} + \frac{2z}{3}) \quad (6.3)$$

För härledning och detaljer bakom formeln hänvisas till Nordström (2005).

4.6 Livslängdsmodellering

4.6.1 Definition av gränstillstånd

För konventionellt armerad betong sätts gränstillståndet för när livslängden är uppnådd enligt Sarja & Vesikari (1996) till:

- 1 Stålet depassiveras
- 2 Korrosion på stänger leder till uppsprickning och spjälkning.

För stålfibrer är dessa två kriterier väldigt ofördelaktiga. Det första kriteriet är inte lämpligt eftersom propageringen av korrosion är mycket långsammare än för konventionell armering, även med klorider närvarande. Därför måste korrosionshastigheten tas i beaktande. Fibrer är också fördelade över hela sprickplanet. Därför är effekten av reducerad fiberdiameter i en del av sprickan inte lika dramatisk som korrosion på armeringsjärn som alla ligger på samma nivå. Fram till fiberdiametern är tillräckligt stor för att ge utdrag ger ett litet korrosionsangrepp inte så stor inverkan på residualbärförmågan. Kriterium nr. 2 är inte alls giltigt eftersom mängden korrosionsprodukter är för liten för att överskrida draghållfastheten på betongen och orsaka spjälkning.

4.6.2 Livslängd

Som tidigare nämnts kan initiering av korrosion vara mer eller mindre direkt för en sprucken stålfiberarmerad betong. Livslängden (tiden för att nå gränstillståndet) borde därför vara en funktion av korrosionshastigheten och den aktuella hållfastheten som ges av fibrer med ingen eller bara ett korrosionsangrepp under gränsen för fiberbrott. Om hänsyn till propageringsperioden tas kan ett lämpligt gränstillstånd definieras som t.ex. en acceptabel sänkning av bärförmågan. Kriteriet för när fibrerna inte längre kan användas för att ge bärförmåga borde vara när fiberdiametern är för liten för att ge ett duktilt utdrag av en fiber. Inga spröda brott kan accepteras.

Om värden och beräkningsprinciper som redovisas i avsnitt 4.5, samt i tabellerna Tabell 4.2 och Tabell 4.3 används kan en bedömning av livslängden m.a.p. förändringen i bärförmåga, uttryckt som momentkapacitet, beräknas. Använda data i beräkningen baseras på att en betongkvalitet motsvarande C35/45 och Dramix-fibrer (lågkolstål) 30/0.5 används. Fiberglidningen antas vara samma som sprickvidden. Korrosionshastigheterna är hämtade ur fältexponeringarna och finns redovisade i Tabell 4.4.

Tabell 4.3 Indata för fibrer och betong, använt i analytiska beräkningar.
Input data on fibres and concrete used in analytical calculations.

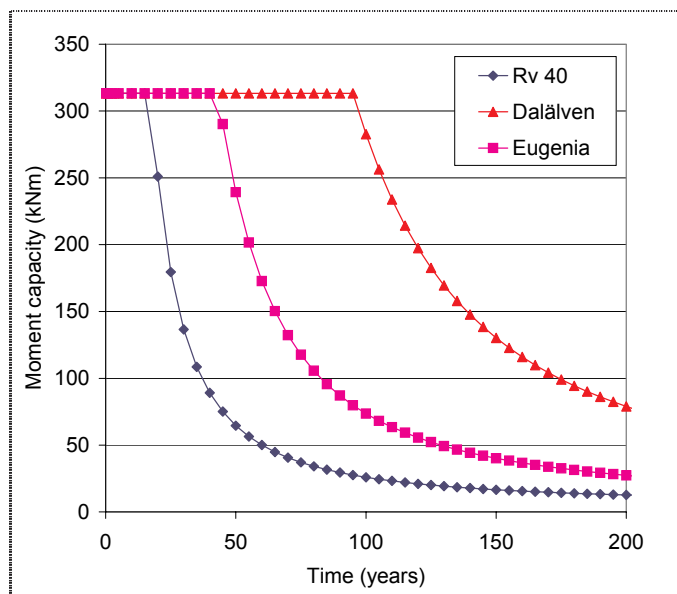
Parameter	Värde
H [mm]	75
B [mm]	125
L [mm]	65
w [mm]	0.5
fct [MPa]	2.1
f [mm]	0.5
n [pcs]	100
l [mm]	30
fst [MPa]	1250

Tabell 4.4 Korrosionshastigheter (för fibrer i spricköppning) för Dramix 30/0.5 fibrer som exponeras i mix W30-prover med sprickvidd $w=0.5$ mm (Nordström, 2005).
Corrosion rates (for fibres in the crack mouth) for Dramix 30/0.5 fibres exposed in mix W30 samples with crack width $w=0.5$ mm (Nordström, 2005).

	Tidsperiod			
	0-1 år	1-2.5 år	2.5-5 år	>5 år
Korrosionshastighet (mm/år)	0.030	0.041	0.008	0.008

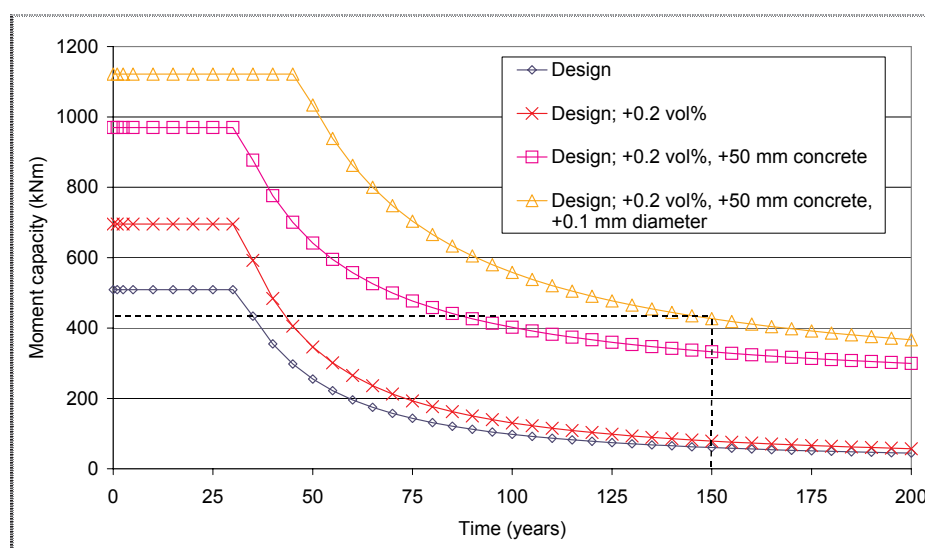
I Figur 4.6 visas beteendet för ett prov exponerat i en miljö som liknar Rv40-miljön. Eftersom den uppmätta mängden korrosion vid Dalälven och i Eugeniattunneln är mycket begränsade har en mycket grov uppskattning gjorts vad gäller dessa två exponeringsplatser. Det har antagits att prover i Eugeniamiljön har en

korrosionshastighet som motsvarar 50% av den vid Rv40. På samma sätt har det antagits att Dalälvsproverna har en hastighet som är 25% av Rv40:s.



Figur 4.6 Förändring av bärförmåga enligt analytisk modell. Fibrer= Dramix 30/0.5, lågkolstål, Betong= WA30. Normal korrosionshast. (Rv40). Fiktiva värden för Eugenia (0,5*normal) och Dalälven (0,25*normal).
*Change of load-bearing capacity according to analytical model. Fibre= Dramix 30/0.5, low carbon steel, Concrete= WA30. Normal corrosion rate (Rv40). Fictive values for Eugenia (0,5*normal) and Dalälven (0,25*normal).*

När en konventionellt armerad konstruktion dimensioneras, tas hänsyn till beständighet genom att definiera ett minsta täcksikt över armeringen. På en stålfiberarmerad betongkonstruktion måste konstruktören uppskatta vilka sprickvidder som kan förväntas från dimensionerande last (i bruksgränstillstånd). Med kunskap om sprickvidd, förväntad exponeringsmiljö och önskad livslängd kan konstruktören kompensera en förlust av bärförmåga genom att t.ex. öka mängden fibrer. Andra åtgärder kan vara ökad tjocklek (ger längre avstånd till spricköppning och därigenom långsammare korrosion) eller att använda mer beständiga fibrer (när mycket aggressiva miljöer förväntas). Nedan visas ett exempel på hur olika åtgärder, för att förlänga livslängden, inverkar på bärförmågan. Beräkningen är hämtad ur Nordström (2005).



Figur 4.7 Inverkan på bärförmågan efter åtgärder för att förlänga livslängden, beräknat enligt analytisk modell (Nordström, 2005).
Effect on load-bearing capacity from measures to increase the service-life calculated with analytical model (Nordström, 2005).

4.7 Diskussion

Eftersom fibrer med ändkrok är den vanligaste fibertypen i Skandinaviska sprutbetongtillämpningar, krävs det att man inkluderar friktion mellan fiber och betong i en modell för bedömning av utdragsmotståndet. Den presenterade modellen ovan tar inte hänsyn till inverkan av fortsatt hydrattation och därigenom ökad hållfasthet, eller inverkan av självläkning. Mer information från framtida utvärderingar av fältexponeringarna kan ge input till att beakta detta.

De använda experimentella data för att bedöma utdragsmotståndet kommer inte från egna tester med exakt samma blandningssammansättning som i fältexponeringarna. Huvudsakligen är allt detsamma, men tillsats av polypropylenfibrer (PP) och högre vct i försöken presenterade av Li & Stang (1997) är två skillnader. Tillsatsen av PP-fibrer är sannolikt av underordnad betydelse vid större deformationer då främst stålfibrerna är verksamma och skillnaden i vct kan möjligen ge ett sprödare beteende i fältexponeringarna.

När data från de refererade försöken används måste hänsyn tas till att ingjutningslängden för varje fiber är 1/2. Det skiljer sig från det verkliga fallet där ingjutningslängden varierar över hela intervallet från 0 till 1. Att använda en modell som den presenterad ovan utgör inte något försök att göra exakta beräkningar av livslängden. Den används istället främst för att belysa behovet att väga in korrosion i sprickor redan vid dimensionering. Om fibrerna korroderar kommer bärförmågan att minska med tiden. En positiv effekt är förstås att den spruckna fiberarmerade betongen har en betydande bärförmåga kvar en lång tid efter att korrosion initierats. Det är viktig

information när man gör en bedömning av en befintlig konstruktion med sprickor och huruvida åtgärder är nödvändiga.

Åtgärder för att förlänga livslängden har olika effekt. Av de testade varianterna verkar ökad konstruktionstjocklek ha störst inverkan i ett långtidsperspektiv. Kostnaderna för att öka tjockleken måste, i ett verkligt fall, jämföras med t.ex. kostnaden för att använda mer beständiga fibrer.

4.8 Slutsatser

- Duktiliteten hos fiberarmerad betong ges av samverkan mellan fiber och betong via vidhäftningshållfasthet, friktion och fiberdeformation.
- Korroderade fibrer ger duktilitet så länge som fiberhållfastheten är större än utdragsmotståndet. Därför är bärförmågan opåverkad så länge som detta villkor är uppfyllt.
- Traditionella livslängdskriterier är inte giltiga för stålfiberkorrosion i sprickor. Livslängden bör istället baseras på en acceptabel minskning av bärförmågan.

5 FRAMTIDA FORSKNINGSBEHOV

Den föreslagna korrelationen mellan laborietester och fältexponeringar bör uppdateras i framtiden med mer data från fältexponeringarna. Bedömningen att ett års exponering i lab. motsvarar 50 år i fält skulle vara intressant att följa upp efter nya utvärderingar i framtiden. En utvärdering efter 10 år är planerad, men det finns också prover för ytterligare utvärderingar efter detta. Med en starkt korrelation kan en extrapolering för att prediktera faktiskt framtida långtidsbeteende göras.

Sprickor kan uppkomma p.g.a. tvångsdeformationer från t.ex. krympning. Sprutbetong appliceras i relativt tunna skikt och utsätts därför för en snabbare krympning än konventionell betong. Den faktiska sprickfördelningen från krympning p.g.a. tvång från underlaget som sprutbetongen appliceras på kan vara av avgörande betydelse.

Den föreslagna analytiska modellen är fortfarande ett embryo till en livslängdsmodell och behöver fortsatt förbättring. Inverkan från olika fibervinkel och olika ingjutningslängder borde inkluderas för att förbättra modellen. Modellen tar inte hänsyn till fortsatt hydratation och därav ökad hållfasthet eller effekten av självläkning. En analytisk modell borde också kombineras med en numerisk FEM-modell där inverkan i mesoskala på en större struktur kan simuleras.

På alla de undersökta konstruktionerna korsade bara en liten mängd fibrer sprickområdet vid kärnbörning över sprickan. En kort bit från sprickan var dock fibermängden tillräcklig. Detta pekar mot att sprickorna i de undersökta konstruktionerna har uppstått där minsta fibermängden finns. Det accentuerar också behovet av homogen fiberfördelning vid sprutbetonering. Om sprickor ändå uppstår där det finns minst fibrer är funktionen inte alltid den önskade om ojämn fiberfördelning inte beaktats. Detta område kräver fortsatt arbete och utveckling för att erhålla önskade egenskaper på stålfiberarmerad sprutbetong.

Skillnaderna i frostbeständighet mellan blandningar med och utan vattenglasaccelerator samt torr- och våtsprutad betong skulle kunna studeras mer ingående. En fråga som ofta ställs är hur man ska uppnå frostbeständighet hos våtsprutad betong som klarar de vanliga standardproverna. En utveckling av beständiga blandningar i kombination med provningsmetoder som är relevanta för material och vanliga exponeringsförhållanden är önskvärt.

6 REFERENSER

- Banthia, N & Trottier, J-F.** (1994). *Concrete reinforced with deformed steel fibres, Part I: Bond-slip mechanisms*. ACI Materials journal, September-October, pp. 435-446.
- Burge, T.** (1984). *Bindetidsaccelererande tillsatsmedel för sprutbetong*. (in Swedish) Nordic Concrete, no. 2.
- Groth, P.** (2000). *Fibre reinforced concrete – Fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders*. Ph.D. thesis, Luleå University of Technology, report 2000:04.
- van Gysel, K.** (1999). *A pullout model for hooked end steel fibres*. Proc. HPFRCC3 – High performance fiber reinforced cement composites, 3:rd international workshop, RILEM, Mainz, Germany, pp. 351-359.
- Holmgren, J.** (1992). *Bergförstärkning med sprutbetong*. (In Swedish). Vattenfall.
- Holmgren, J. & al** (1997). *Stålfiberbetong för bergförstärkning – provning och värdering*. (In Swedish). Swedish Cement and Concrete Institute, report no 3:97.
- Kasperkiewicz, J. & al** (1978) *Determination of fibre content, distribution and orientation in steel fibre concrete by x-ray technique*. Proc. Testing and test methods of fibre concrete, symposium, Sheffield, Great Britain, April 5-7, pp. 1-18.
- Li, V.C. & Stang, H.** (1997). *Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites*. Advanced cement based materials, no. 6, pp.1-20.
- Lindmark, S.** (2000). *Studier av samband mellan betongs luftporsystem och dess saltfrostbeständighet*. (In Swedish). SBUF-project 9010, Lund University of Technology, report no. TVBM-3089.
- Manns, W. & Neubert, B.** (1992). *Mechanical-technological properties of shotcrete with accelerating admixtures*. Otto Graf Journal, pp. 115-136.
- Nordström, E.** (1996). *Sprutbetongs beständighet - Inventering*. (In Swedish) SveBeFo, report no.26, Elforsk, 96:18.
- Nordström, E.** (2000). *Stålfiberkorrosion i sprucken sprutbetong - Literaturstudie*. (In Swedish) SveBeFo rapport no. 45.
- Nordström, E.** (2005). *Durability of sprayed concrete – Steel fibre corrosion in cracks*. Ph.D. thesis, Luleå University of Technology, report 2005:02.

Ramakrishnan, V & al. (1981). *Comparative evaluation of fibre shotcrete*. Concrete international, vol. 3, no 1.

Sarja, A. & Vesikari, E. (1996). *Durability design of concrete structures*. RILEM, Technical Committé 130-CSL.

Shroff, J.K. (1966). *The effect of a corrosive environment on the properties of steel fiber reinforced portland cement mortar*. M.S. Thesis, Clarkson College of Technology, Potsdam, NY. p. 130.

TUNNEL 99. (1999). *Allmän teknisk beskrivning för vägtunnlar*. (In Swedish). Swedish road authorities. publ. 1999:138, p. 190.

Weiler, B. & al (1999). *Debonding behaviour of steel fibres with hooked ends*. Proc. HPRCC3 – High performance fiber reinforced cement composites, 3:rd international workshop, RILEM, Mainz, Germany, pp. 423-433.