



ERFARENHETER FRÅN 10 ÅRS FÄLTEXPONERING AV SPRUCKEN STÅLFIBERARMERAD SPRUTBETONG

Per-Erik Thorsell
Erik Nordström

Omslagsbild:
Fältexponeringsplats vid Riksväg 40, mellan Borås och Göteborg.
Bilden är tagen strax innan de sista provkropparna hämtades in
efter 10 års exponering.

**ERFARENHETER FRÅN 10 ÅRS
FÄLTEXPONERING AV SPRUCKEN
STÅLFIBERARMERAD SPRUTBETONG**

**CRACKED STEEL FIBRE REINFORCED
SHOTCONCRETE:
a Ten-Year Perspective of Field Exposure**

Per-Erik Thorsell

Vattenfall Research & Development

Erik Nordström

Vattenfall Vattenkraft

BeFo Rapport 88

Stockholm 2009

ISSN 1104 – 1773

ISRN BEFO-R—88—SE

Förord

Armering av sprutbetong med stålfiberarmering har varit praxis i mer än 25 år. Idag finns en stor mängd stålfiberarmerade sprutbetongförstärkningar i t.ex. väg- och järnvägstunnlar eller kraftindustrins undermarksanläggningar. Kunskap om vilka parametrar som påverkar en anläggnings livslängd är avgörande för att kunna göra rätt bedömningar i ett förvaltningsskede.

För att studera sprickors inverkan på stålfiberarmerad sprutbetong, med särskilt fokus på risken för korrosion, startades 1997 ett doktorandprojekt. Projektet omfattade bl.a. fältexponeringar. Erik Nordström, Vattenfall Vattenkraft, har sedan dess följt exponeringarna av spruckna stålfiberarmerade sprutbetongprover i miljöer som efterliknar vanligen förekommande miljöer. Huvuddelen av allt laboratoriearbete i samband med utvärderingarna har genomförts vid Vattenfall Research & Development under ledning av Per-Erik Thorsell. Arbetet har finansierats av Elforsk, SveBeFo, Banverket, Vägverket och Vattenfall Vattenkraft. Resultaten efter fem års exponering har tidigare presenterats i SveBeFo-rapport 69.

Rapporten presenterar resultaten efter 10 års fältexponeringar i de tre miljöerna. Vid exponeringsplatsen längs Rv40 är nu samtliga prover inhämtade, men det finns provkroppar kvar för eventuella framtida utvärderingar i Eugeniattunneln och Dalälven.

Till projektets stöd har funnits en referensgrupp bestående av Jan Alemo, Vattenfall Utveckling; Hans Bohman, Vägverket; Tommy Ellison, Besab; Lars Hammar, Elforsk; Tomas Franzén SveBeFo och Bo Malmberg WSP.

Stockholm i augusti 2009

Mikael Hellsten

Sammanfattning

Beständigheten mot korrosionsangrepp hos stålfiberarmering har tidigare visat sig vara god. Speciellt för betong utan sprickor. När det gäller sprucken betong är resultaten begränsade, särskilt i icke marin miljö. Det har konstaterats att stålfiber är mer beständiga vid förhållanden där konventionell armering uppvisar kraftiga korrosionsangrepp. Ingen heltäckande förklaring av de aktiva mekanismerna finns dock.

Sedan 1997 har forskning vid Vattenfall sökt att definiera de aktiva mekanismerna för initiering och propagering av stålfiberkorrosion i sprucken betong. Ytterligare en målsättning har varit att bestämma effekten på bärförmågan när korrosion pågår. Kunskap om detta skulle möjliggöra uppskattningar av livslängden på stålfiberarmerad sprutbetong.

I föreliggande rapport redovisas resultaten från fältförsök efter 10 års exponering utomhus. Mer än 300 spruckna stålfiberarmerade sprutbetongbalkar har exponerats vid tre olika platser. Sprickvidd, fiberlängd, blandningstyp, olika acceleratorer och sprutteknik (våt/torr) är parametrar som provats.

Efter 10 års fältexponeringar kan följande slutsatser dras:

- Fortsatt hydratation och därigenom förbättrad förankring av stålfiber i betongen ger en initiell ökning av residualbärförmågan vid små deformationer. Ökningen är tillfällig eftersom förlust av fiberdiameter genom korrosion eller minskad vidhäftningshållfasthet mellan fiber och betong, p.g.a. frostpåverkan, sänker duktiliteten och reducerar effekten. Självläkning av tunna sprickor ($w=0.1$ mm) kan också vara en bidragande effekt för små sprickvidder. När prover utsätts för högre deformationer vid återbelastning efter exponering ger inverkan av såväl korrosion (Rv40, Eugeniattunneln) som frostpåverkan (Dalälven) en reducerad residualbärförmåga.
- Kloridinhållet längs sprickyrtorna ökar närmare spricköppningen. Generellt sker en ökning med ökad exponeringstid. Ackumuleringen verkar vara beroende av om proverna utsätts för nederbörd eftersom prover i tunnelmiljö (skyddat från direkt nederbörd) visar en högre kloridkoncentration än prover exponerade längs motorvägen (utsatta för direkt nederbörd)

Kraftig exponering från tösaltning under vinterperioden längs Rv40 och Eugeniattunneln ger ett betydligt större korrosionsangrepp än vid Dalälven. Proverna vid motorvägen (Rv40) uppvisar omfattande korrosion redan efter fem års exponering och på ett liknande sätt efter tio år i Eugeniattunneln. Inverkan av sprickvidden verkar minska med tiden efter att korrosion initierats. Längre fiber korroderar mer än korta vid samma sprickvidd. Fiberlängden verkar också vara mer avgörande än sprickvidden om sprickvidden är större än 0.5 mm.

Summary

Durability against corrosion of steel fibre reinforcement has been proved to be good, especially in concrete without cracks. However, results from research on cracked concrete are limited, especially in non-marine environments. It has been stated that steel fibres are more resistant under conditions in which conventional reinforcement exhibits extensive corrosion. No full explanation of the active mechanisms exists.

Since 1997 research at Vattenfall tries to define the active mechanisms for initiation and propagation of steel fibre corrosion in cracked concrete. Another objective is to determine the effect on load bearing capacity, assuming corrosion is ongoing. This knowledge will make it possible to estimate the service life of Steel Fibre Reinforced Shotcrete SFRS.

In the report, results from ongoing field exposure tests after 10 years of exposure are presented. More than 300 cracked beams of SFRS 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 10 years of field exposure tests the following conclusions can be drawn:

- Possible continued hydration and therefore increased anchorage strength for the steel fibres gives an initial increase in residual strength at small deflections. The increase is temporary since loss of fibre diameter by corrosion or lowered bond strength between fibre and concrete, due to frost action, will lower the ductility and reduce this effect. Self-healing of thin cracks ($w=0.1$ mm) can also be a contributing effect for small crack widths. At higher deflections, in the re-load after exposure, the influence from both corrosion (Rv40, Eugenia tunnel) and frost action (Dalälven river) give rise to reduced load bearing capacity.
- The chloride content along the crack surface increases closer to the crack mouth. Generally there is an accumulation with increasing exposure time. The accumulation seems to be dependent on the access to precipitations, since the tunnel samples (sheltered from rain) have a larger increase of the chloride concentration than the motorway samples (not sheltered from rain).

A high degree of exposure to de-icing-salts during the wintertime at Rv40 and Eugenia tunnel gives a larger corrosive attack than at the Dalälven River. Samples along the motorway (Rv40) show quite extensive corrosion after only five years of exposure and in a similar way after 10 years in the Eugenia tunnel. The importance of crack width seems to decrease with time after initiation. Longer fibres corrode more than shorter ones at the same crack width. Fibre length seems therefore to be more important than crack width, when $w > 0.5$ mm.

Innehållsförteckning

	Sida	
1	INLEDNING	1
2	FÄLTEXPONERINGAR	1
2.1	Betongsammansättning	1
2.2	Provkroppstillverkning	3
2.3	Exponeringsmiljöer	3
3	UTVÄRDERING EFTER EXPONERING	4
3.1	Allmänt	4
3.2	Residualbärförmåga	5
3.3	Friläggning av fibrer	6
3.4	Korrosionsangrepp	6
3.5	Kloridinhåll och karbonatiseringsdjup	7
4	RESULTAT	7
4.1	Klimatuppföljning	7
4.2	Residualhållfasthet	8
	4.2.1 Direkt jämförelse	8
	4.2.2 Statistisk jämförelse	10
4.3	Kloridinhåll	13
4.4	Karbonatisering	14
4.5	Fiberkorrosion	14
5	DISKUSSION	17
5.1	Residualbärförmåga	17
5.2	Kloridinhåll	18
5.3	Fiberkorrosion	19
6	SLUTSATSER	19
7	FORTSATT ARBETE	20
8	REFERENSER	20

1 INLEDNING

På slutet av 80-talet började tekniken med att stålfiberarmera sprutbetong användas regelmässigt i Sverige. Idag är stålfiberarmerad sprutbetong mycket vanligt förekommande i bergförstärkningssammanhang i Skandinavien och Nordamerika. Det förekommer också vid reparation och förstärkning av betongkonstruktioner.

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 regelverk Tunnel 2004 (2004) 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.

Hur mycket stålfibererna korroderar i olika miljöer och i olika betongsammansättningar är till en viss del oklart. Det är även något oklart hur korrosion på fibererna påverkar bärförmågan. I denna rapport presenteras resultat från utvärderingen efter tio års fältexponering av sprutbetongprover. En mer detaljerad beskrivning av projektet finns i Nordström (2005a) eller Nordström (2005b).

2 FÄLTEXPONERINGAR

Fältexponeringarna med sprucken sprutbetong påbörjades i september 1997 och utvärdering av försöken har gjorts 1998, 2000, 2002 och 2007 (efter 1; 2,5; 5 och 10år). 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.

2.1 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 2.1 och tabell 2.2 samt i figur 2.1 ses hela försöksprogrammet.

Tabell 2.1 Betongmixer använda i fältexponeringar. *Mix types used in field exposure tests.*

MIX ¹	VÄT- 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).

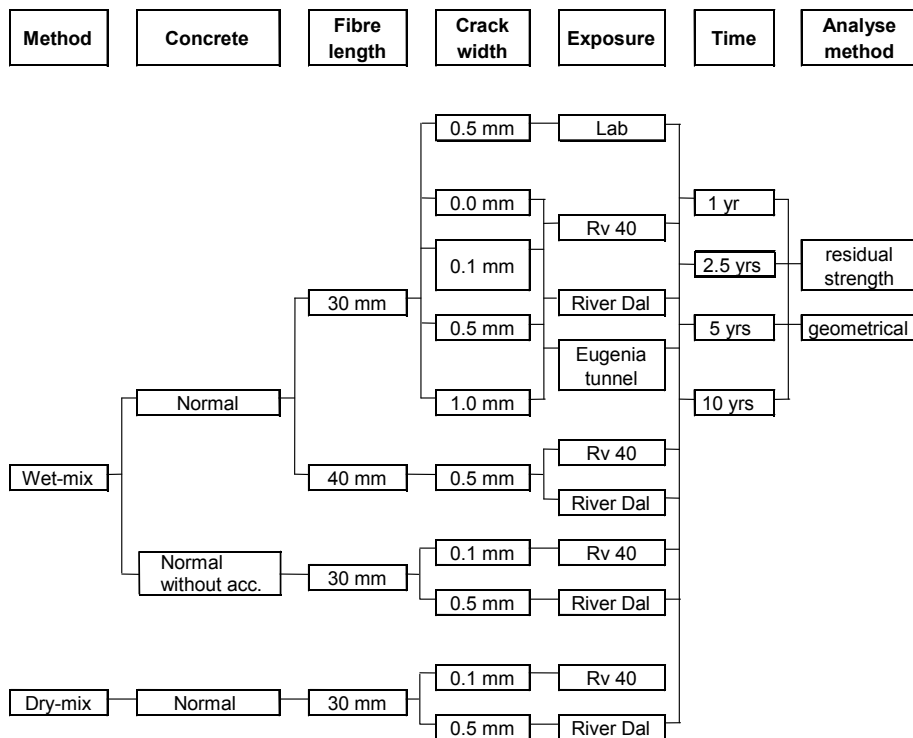
En vattenglasbaserad accelerator användes vid tillverkningen av mixerna WA30 och WA40. Vattenglas var vid tiden för tillverkning den vanligaste acceleratortypen i Sverige. Effekterna av vattenglas på färsk och hårdnad betong är också relativt väldokumenterade (t.ex. reduktion av hållfasthet, ökad krympning m.m.) av t.ex. Burge (1984). Under 2000-talets början ökade användningen av s.k. alkali-fria 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 2.2 **Recept för betongmixer använda i fältexponeringar.**
Concrete mix design used in the field exposure tests.

		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. *Field exposure test program.*

2.2 Provkropsstillverkning

För att minska andelen spill och få en jämnare betongkvalitet sprutades stora betongplattor (2*1,2*0,15m). Totalt tillverkades 11 plattor. Efter lagring under 28-50 dygn med kontinuerlig bevattning, sågades balkar med dimensionen 75*125*500mm ut. Balkarna utsattes efter ca. 56 dygn för spräckning genom böjning så att önskad sprickvidd uppnåddes.

För att kombinera alla parametrar presenterade i figur 2.1 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 Exponeringsmiljöer

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 laboriemiljön (20°C och 65% RH):

Rv40: Borås – utomhus längs motorväg.

DAL: Dalälven, Älvkarleby – utomhus, provkroppar delvis nedsänkta.

EUG: Eugenia tunneln, Stockholm - vägtunnel.

En sammanfattande beskrivning av miljön vid de olika exponeringsplatserna återfinns i tabell 2.1.

Tabell 2.3 Exponeringsmiljöer. *Exposure environments.*

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

3 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. För platserna där korrosion påbörjats fördubblades nästa provuttag av provbalkar.

3.1 Allmänt

Under perioden från 2002 då utvärderingen efter fem års exponering gjordes har intressanta händelser inträffat. I samband med ett referensgruppsmöte konstaterades att proverna i Eugeniatunneln nog inte fanns monterade längre. Efter ett visst detektivarbete kunde det konstateras att proverna hade nedmonterats p.g.a. att skötselentreprenören ansåg ställningarna trafikfarliga. Eftersökningar gav att proverna ”dumpats” på Vägverket Produktions bakgård i Tumba (se figur 3.1). Vid syn av ställningarna kunde konstateras att det galvaniserade skiktet hade förbrukats och viss ytrost fanns, men ingen som helst risk för nedfall förelåg. Beslutet från Vägverket Produktion var alltså felaktigt. Beslut om att tillverka nya ramar för återmontering fattades och denna gång med en tydlig skylt kontaktuppgifter till engagerade i projektet.



Figur 3.1 Vägstation i Tumba. Återfunna prover från Eugeniattunneln.
Storagearea in Tumba. Recovered beams from Eugenia tunnel.

I samband med utvärderingen noterades även en avvikelse för proverna vid Rv40 som kunde konstateras ha flyttats 0,5-1 m längre ifrån vägen vid något tillfälle. Uppställningarna hade flyttats bort för att möjliggöra rensning och installation av fiberduk och grus för enklare underhåll. Därefter hade proverna inte återställts på samma avstånd från vägen som tidigare.

3.2 Residualbärförmåga

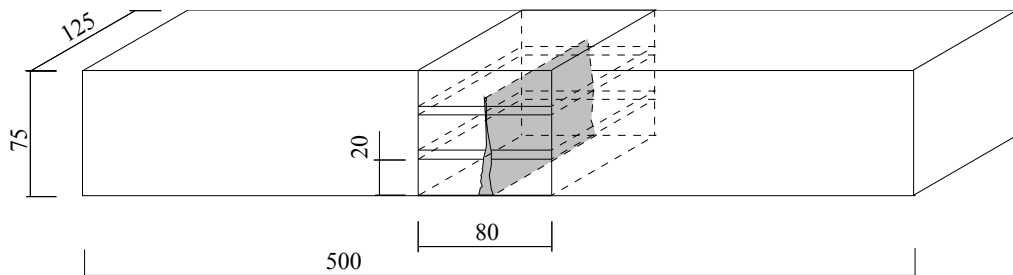
Stålfibrer används i konstruktionsskedet för t.ex. tunnelförstärkningar för att skapa ett tillräckligt duktilt (segt) beteende efter uppsprickning. Funktionen i ett system med stålfiberarmerad betong och bultar är helt beroende på residualbärförmågan i sprucket tillstånd. Det är också det som gör eventuell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

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.

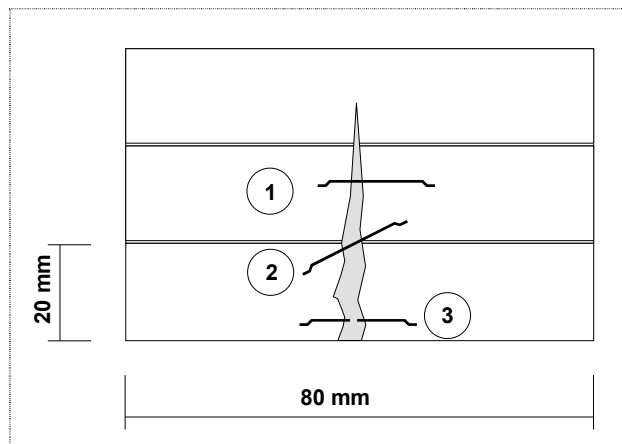
Genom att jämföra residualhållfastheten vid den första uppspräckningen med nivån efter olika lång tids exponering kan denna möjliga förändring undersökas. Återbelastning av samma balk sker därför efter exponering genom fortsatt nedböjning till ca. 5mm. Två varianter på utvärdering har provats. Dels en direkt jämförelse, men också en jämförelse baserad på en statistisk utvärdering av standardiserad provning av fiberarmerad sprutbetong. I grova drag kan den direkta jämförelsen ge en indikation på beteendet vid små deformationer (direkt efter uppsprickning). Den statistiska jämförelsen ger mer en uppfattning om beteendet vid större deformationer (t.ex. > 2 mm).

3.3 Friläggning av fibrer

För att kontrollera om fiberkorrosion har initierats (eller graden av korrosion) måste fibrerna friläggas från betongmatrisen. Friläggningen gjordes genom att plattor sågades ut på olika nivå från spricköppningen (se figur 3.2) i de balkar som inte användes för återbelastning. Därefter frilades de enskilda fibrerna genom sönderfrysning av betongen. Fibrer samlades 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 3.3.



Figur 3.2 Sönderdelning av balk, (5mm tappas mellan varje platta vid sågning).
Dismembering of beams (measurements in mm).



Figur 3.3 Utvärderingsproblem: 1. Normalt – 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.

3.4 Korrosionsangrepp

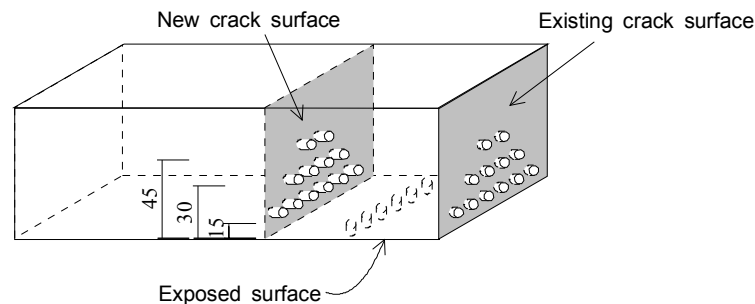
När fibrer frilagts betas korrosionsprodukter bort genom att använda en s.k. Clarks lösning Efter betning mäts fiberdiametern i det korroderade området med en spärmikrometer. Angreppet relateras till diametern på det opåverkade området av fibern

(delar som varit ingjuten på sidan om sprickan hela tiden) och presenteras som en procentsats av den ursprungliga diametern.

I tidigare utvärderingar sammanställdes mätningarna av de fibrer där fiberkorrosion hittades och resultatet medelvärdesbildades. På ett sätt ger det en missvisande, för hög bild av resultatet då opåverkade fibrer inte tas med. Till utvärderingen efter 10 år har istället en modell där ett medelvärde om 27 fibrer antas korsa sprickan (medelvärde från uppmätningar). Fibrer med konstaterat korrosionsangrepp mäts och sedan antas resterande fibrer upp till 27 st vara opåverkade och ha 0% angrepp. Även de tidigare årens utvärderingar har omarbetats för att kunna jämföras med de nya resultaten. Antalet korroderade fibrer har ökat betydligt i senaste utvärderingen och därför antas det vara ett rimligt sätt att hantera även de gamla resultaten.

3.5 Kloridinnehåll och karbonatiseringsdjup

Kloridhalterna mäts 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 3.4 visas de olika provställena. Mätmetoden som användes var uppsamling av borrhax och mätning med den s.k. RCT-metoden (Rapid Chloride Test).



Figur 3.4 Skiss över borrhning för kloridhaltsmätning. *Plan for collection of drilling debris.*

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

4 RESULTAT

4.1 Klimatuppföljning

Inga större förändringar jämfört med tidigare års mätningar kan konstateras. 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.

4.2 Residualhållfasthet

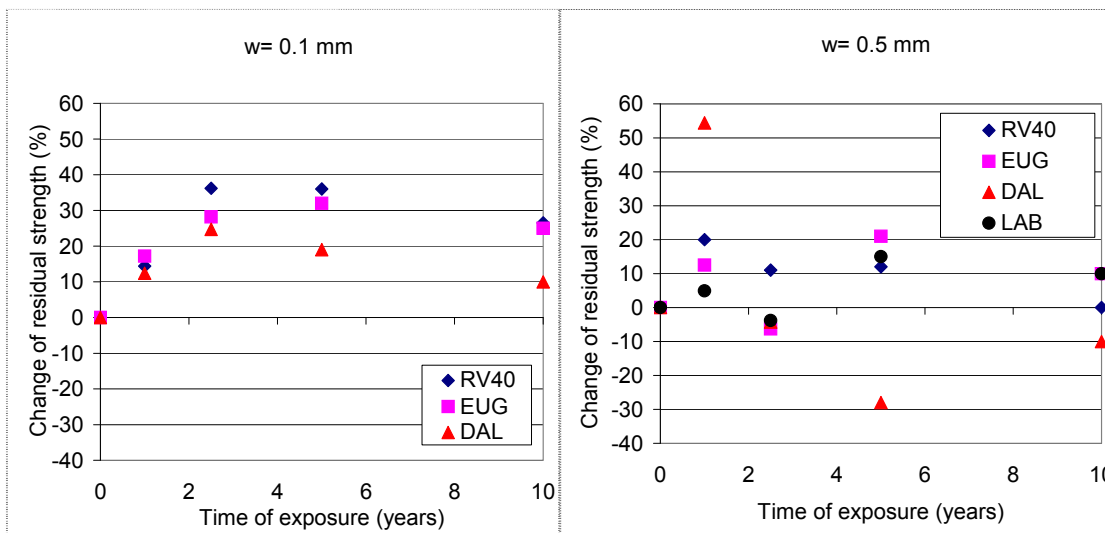
Nedan beskrivs principen för, och resultaten av, de två olika utvärderingsprinciperna: *Direkt jämförelse* och *Statistisk jämförelse*

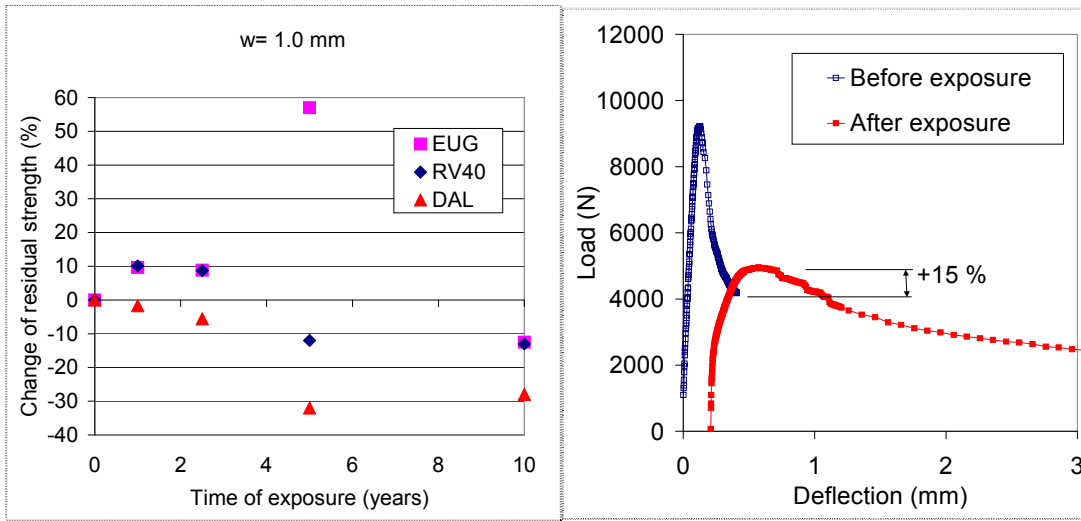
4.2.1 Direkt jämförelse

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 4.1 (Nedre, höger) visas ett exempel med en balk som spräckts till $w = 0,1 \text{ mm}$. Förändringen i residualbärförmåga efter 1; 2,5; 5 och 10 års exponering enligt den direkta jämförelsen kan ses i figur 4.1. 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

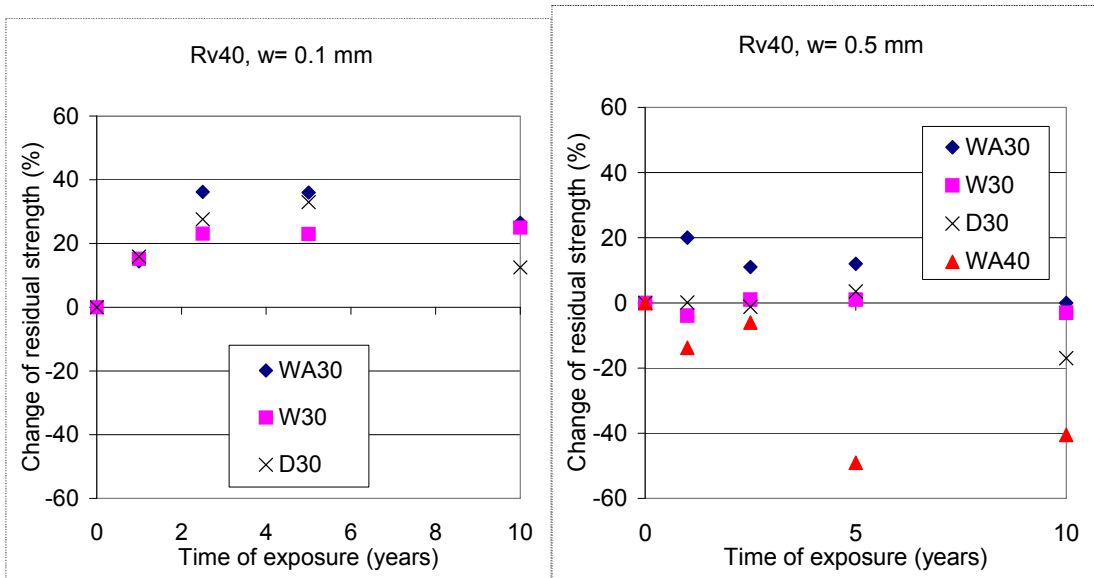
efter 10 år är större än för övriga exponeringsplatser. Efter 10 års exponering är minskningen ca. 10% för sprickvidd $w = 0,5 \text{ mm}$ och 30% för $w = 1,0 \text{ mm}$ för Dalälvsproverna. Som visas senare finns dock i princip ingen korrosion i prover från Dalälven. På generell nivå ger större sprickvidd sämre prestanda för samtliga prover. I medeltal har bärförmågan reducerats med ca. 20% efter 10 års exponering oavsett exponeringsmiljö.

I figur 4.2 och 4.3 kan inverkan av blandningstyp studeras. Våtsprutade prover med 40 mm fibrer och accelerator (WA40) erhöll ingen tydlig ökning av residualhållfastheten. Istället erhålls en reduktion om ca. 40% efter 10 års exponering i kloridmiljö. För våtsprutade prover med 30 mm fibrer och accelerator (WA30) var ökningen något större än andra blandningstyper. Ingen inverkan av sprutmetod kunde noteras.

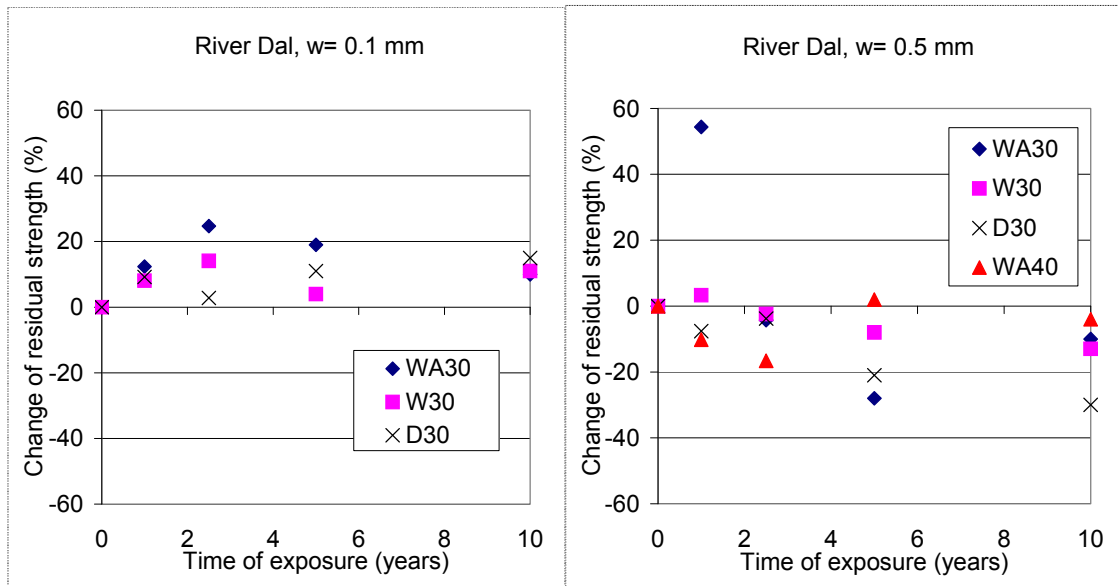




Figur 4.1 Förändring residualbärförmåga – direkt jämförelse. Mix WA30. Inverkan av exponeringsplats. (Över, vänster) $w = 0.1$ mm. (Över, höger) $w = 0.5$ mm. (Nedre, vänster) $w = 1.0$ mm. (Nedre, höger) Principexempel för utvärdering. *Change of residual strength – direct approach.*



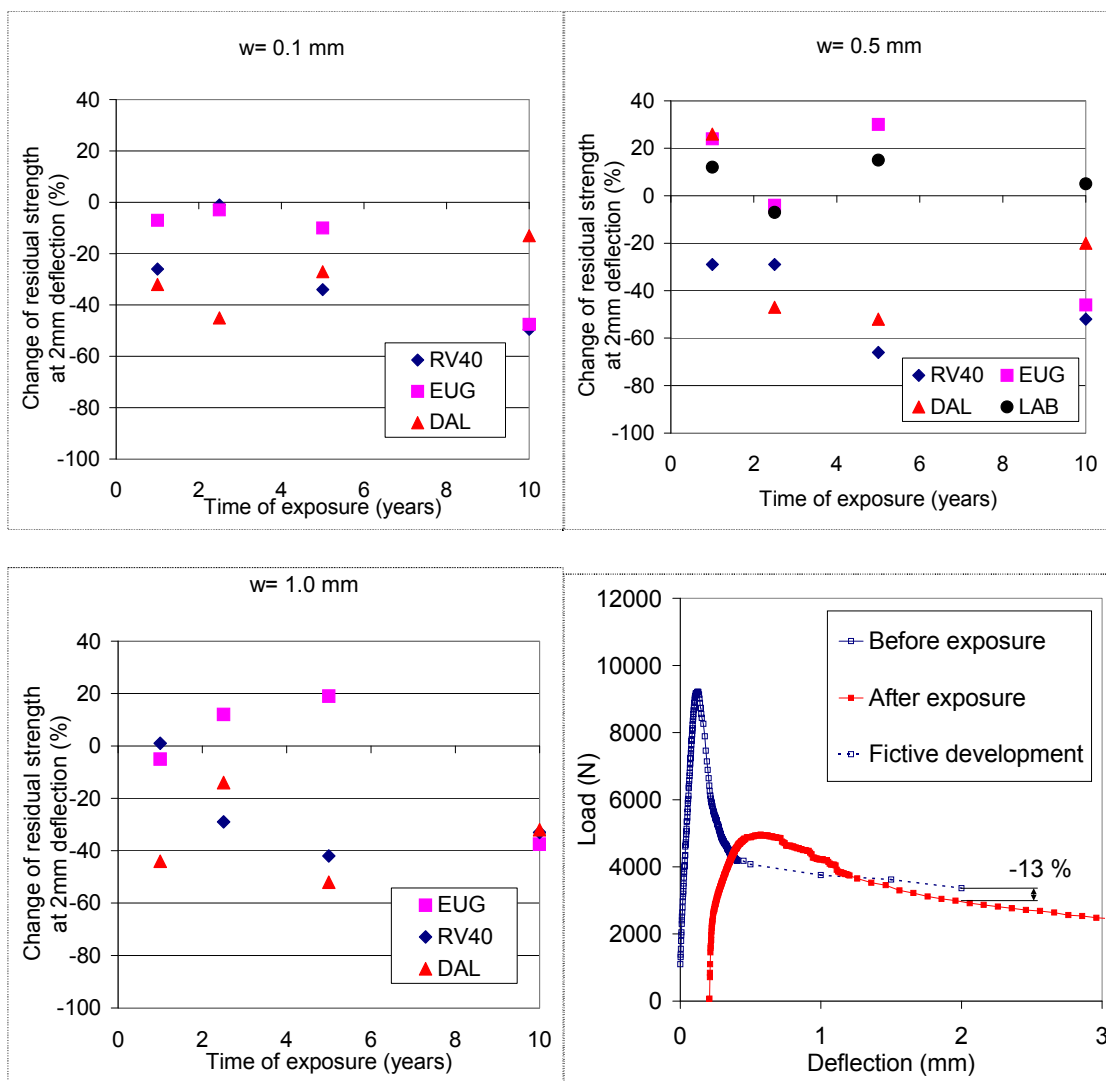
Figur 4.2 Förändring residualbärförmåga – direkt jämförelse. Inverkan av mixtyp. Rv40. (Vänster) $w = 0.1$ mm. (Höger) $w = 0.5$ mm. *Change of residual strength – direct approach.*



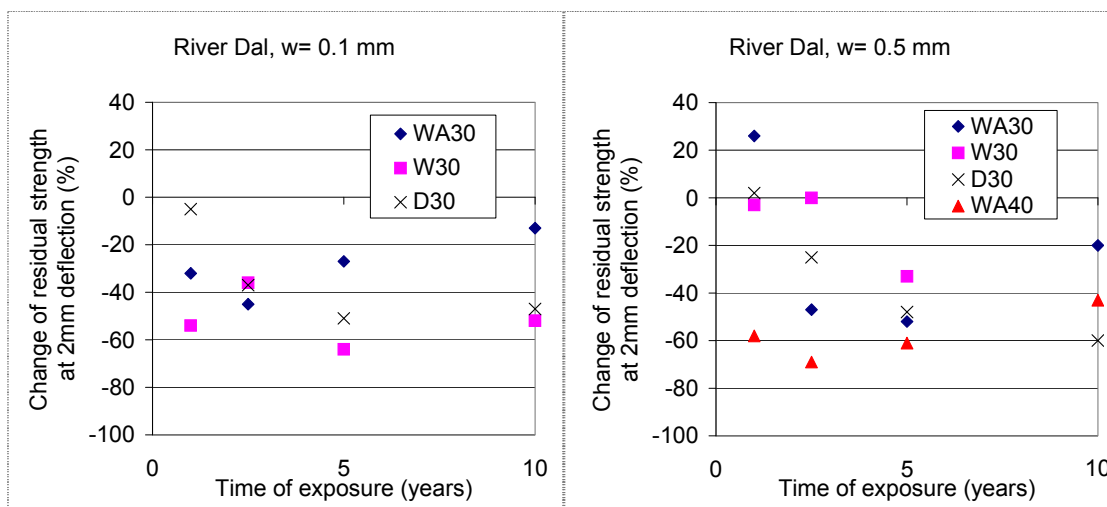
Figur 4.3 Förändring residualbärförmåga – direkt jämförelse. Inverkan av mixtyp. Dalälven. (Vänster) $w= 0.1$ mm. (Höger) $w= 0.5$ mm. *Change of residual strength – direct approach.*

4.2.2 Statistisk jämförelse

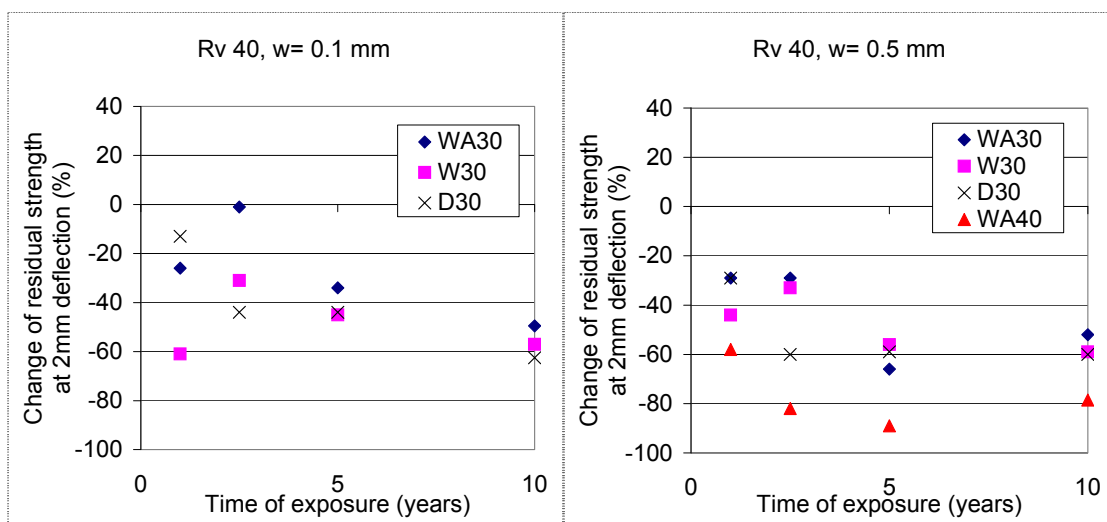
En svaghet med den direkta jämförelsen är att lastnivåerna inte jämförs vid samma nedböjning. Nivån då den första nedböjningen avbryts före exponering jämförs med maxlasten som uppnås vid belastning efter exponering. Dessa uppstår inte vid samma nedböjning. I den statistiska jämförelsen har en sammanställning 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 4.4. visas principen för utvärdering av residualbärförmågans förändring enligt den statistiska jämförelsen.



Figur 4.4 Förändring residualbärförmåga – statistisk jämförelse. Mix WA30. Inverkan av exponeringsplats. (Över, vänster) $w = 0.1$ mm. (Över, höger) $w = 0.5$ mm. (Nedre, vänster) $w = 1.0$ mm. (Nedre, höger) Principexempel för utvärdering. *Change of residual strength – statistical approach. Development of residual strength at 2 mm deflection for samples from mix WA30.*



Figur 4.5 Förändring residualbärförmåga – statistisk jämförelse. Inverkan av mixtyp. Dalälven. (Vänster) $w = 0.1$ mm. (Höger) $w = 0.5$ mm. *Change of residual strength – statistical approach.*



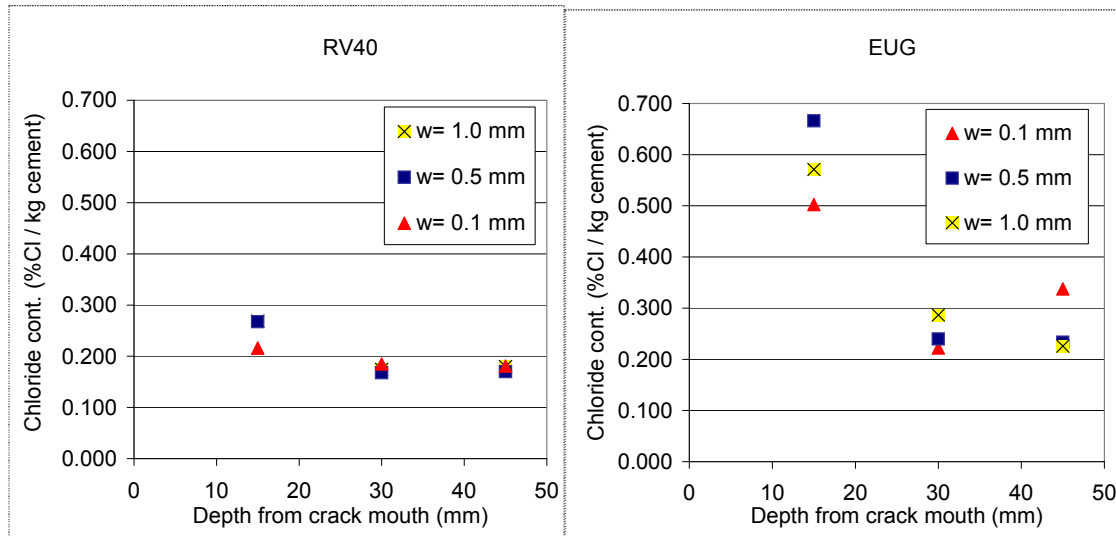
Figur 4.6 Förändring residualbärförmåga – statistisk jämförelse. Inverkan av mixtyp. Rv40. (Vänster) $w = 0.1$ mm. (Höger) $w = 0.5$ mm. *Change of residual strength – statistical approach.*

Resultaten m.a.p. sprickvidd och exponeringsplats visas i figur 4.4 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 fram till ca. 5 års exponering. Därefter tappar Eugeniaproverna kraftigt. Eugeniaproverna har en lägre minskning ($w = 0,1$ mm) och en högre ökning ($w = 0,5$ mm, $w = 1,0$ mm) av residualbärförmågan fram till 5 år. Inverkan av blandningstypen kan studeras i figur 4.5 och 4.6. Även i den statistiska jämförelsen visar prover med 40 mm fibrer en kraftigare reduktion av

bärförmågan. Efter 10 år är minskningen av residualbärförmåga ca. 80% av förväntat i kloridmiljön. Ingen skillnad mellan de övriga blandningstyperna kan ses.

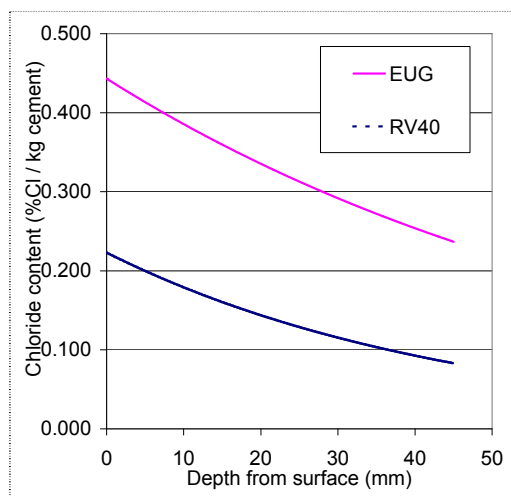
4.3 Kloridinnehåll

Efter 10 års exponering är halterna längs sprickplanet relativt höga. Ingen tydlig korrelation mellan de olika sprickvidderna och uppmätt kloridkoncentration går att se. Däremot är det tydligt att halterna är högre i den regnskyddade miljön inne i Eugeniattunneln, med nästan dubbelt så höga nivåer som vid Rv40.



Figur 4.7 Kloridhalter längs sprickplanet. (Vänster) Rv40. (Höger) Eug.
Chloride content at crack surface.

En traditionell kloridprofil i osprucken betong ger att proverna i Eugeniattunneln visar de högsta koncentrationerna. En succesiv ackumulering och skydd mot nederbörd är den troliga förklaringen.

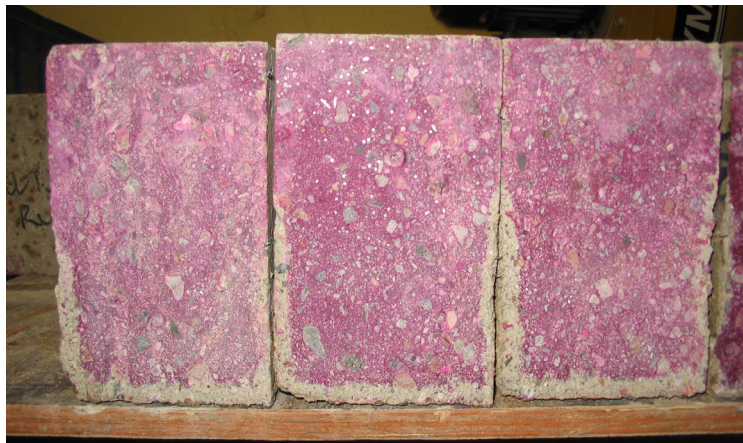


Figur 4.8 Kloridprofil taget i homogen betong.
Average chloride profile from homogenous samples.

4.4 Karbonatisering

Karbonatiseringsmätningar har tidigare bara gjorts för prover exponerade i Eugeniattunneln och vid Rv40 då Dalälvsproverna ligger till hälften nedsänkt i vatten. Resultaten från provningen gav bara ett karbonatiseringsdjup om ett fåtal 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.

Vid utvärderingen efter 10 år var resultaten för Eugenia och Rv40 oförändrade, men av misstag provades också Dalälvsproverna. I figur 4.9 kan ett fotografi ses som visar resultatet av mätningen. Den del som legat till hälften nedsänkt i vatten färgas inte och skulle alltså vara karbonatiserad. Nu är det förstås inte möjligt och istället är det en indikation på urlakning där pH har sänkts p.g.a. att strömmande mjukt älvvatten runnit längs med ytan i 10 års tid. Urlakning ger sänkt hållfasthet och kan vara förklaringen till att Dalälvsproverna tappat i residualhållfasthet, särskilt i den direkta jämförelsen där betongmatrisens inverkan är större.

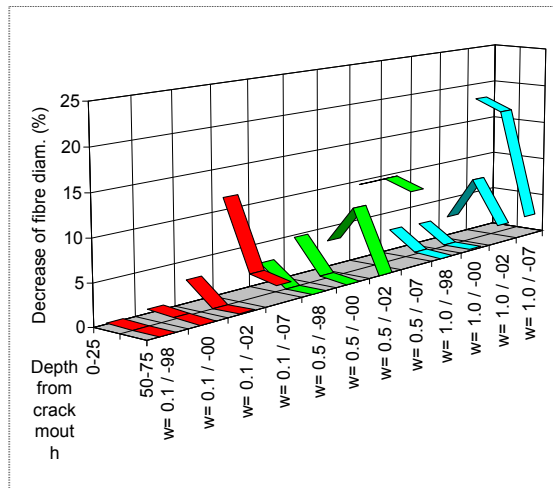


Figur 4.9 Foto från "karbonatiseringsmätning" på balkar exponerade i Dalälven. Mixtyp WA30. *Photo from "carbonationmeasuring" on beams exposed in Dalälven. Mixtype WA30.*

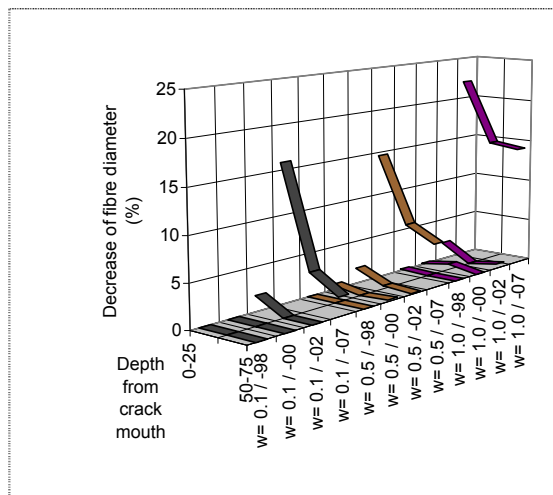
4.5 Fiberkorrosion

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 4.10-4.12. Vid Rv40 korroderar 1,0 mm sprickor mer än 0,5 mm och 0,1 mm sprickor. I medel har ett prov med 1,0 mm spricka tappat ca. 18% av sin diameter efter 10 år. För prover exponerade i Eugeniattunneln har angreppet ökat mycket kraftigt mellan utvärderingstillfällena vid 5 resp. 10 år. Förklaringen finns sannolikt i att prover blivit exponerade utanför tunneln, ej skyddade för nederbörd, ca. 1 sommarsäsong. Korrosionsangreppet för Dalälvsproverna är fortfarande mycket begränsat efter 10 år.

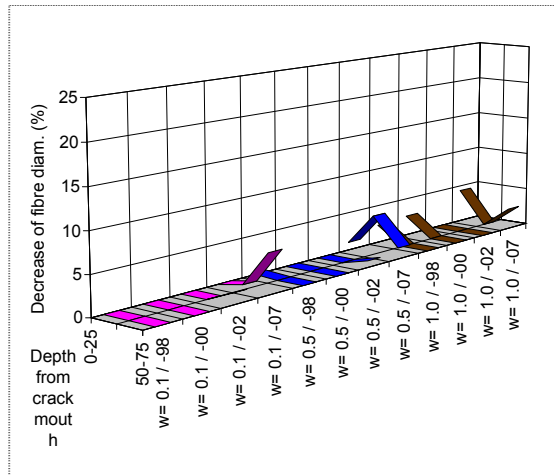
I figur 4.13-4.14 ses inverkan av blandningstyp vid Rv40 och Dalälven och det framgår där att 40 mm fibrer har en större förlust på diametern redan efter 1 års exponering vid Rv40. Efter 10 års exponering är angreppet i medeltal ca. 8% större än provet med 10 mm kortare fibrer vid samma sprickvidd i miljö med tillgång till klorider. För Dalälvsproverna korroderar inte 40 mm fibrer mer än andra prov. Noterbart är också att den torrstrutade betongen (D30) uppvisar ett lika stort angrepp som prover med långa fibrer vid exponering längs Rv40.



Figur 4.10 Minskning av fiberdiameter för prov vid Rv40 efter olika tids exponering. Olika sprickvidd, Mix= WA30. *Decrease of fibre diameter for samples at different time of exposure.*

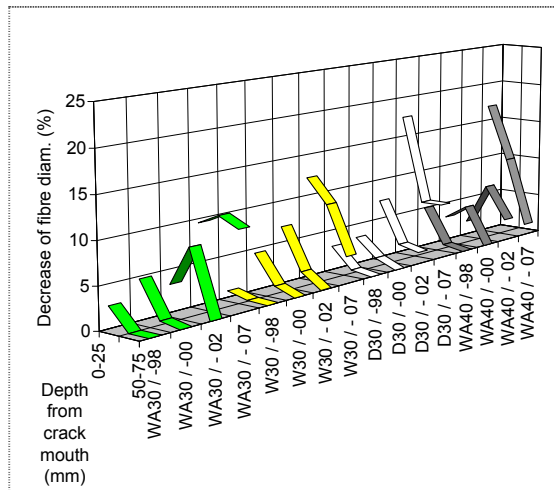


Figur 4.11 Minskning av fiberdiameter för prov vid Eugenia efter olika tids exponering. Olika sprickvidd, Mix= WA30. *Decrease of fibre diameter for samples at different time of exposure.*



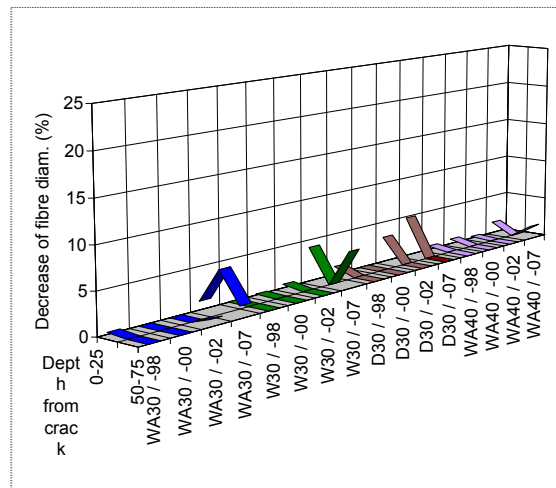
Figur 4.12

Minskning av fiberdiameter för prov vid Dalälven efter olika tids exponering. Olika sprickvidd, Mix= WA30. *Decrease of fibre diameter for samples at different time of exposure.*



Figur 4.13

Minskning av fiberdiameter för prov vid Rv40 efter olika tids exponering. Olika mix, Sprickvidd, $w=0.5$ mm. *Decrease of fibre diameter for samples at different time of exposure.*



Figur 4.14 Minskning av fiberdiameter för prov vid Dalälven efter olika tids exponering. Olika mix, Sprickvidd, $w=0.5$ mm. *Decrease of fibre diameter for samples at different time of exposure.*

5 DISKUSSION

Allmänt kan sägas att inverkan av förändringarna under den andra halvan av försöksperioden m.a.p. period med ändrad exponering i Eugeniattunneln och flytt av prover längs Rv40 är svår att bedöma. Värdet av jämförelsen mellan provplatserna har sjunkit, medan värdet av de inbördes resultaten för prov exponerade vid samma plats kvarstår.

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. Dubbleringen 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 inverka något på mikroklimatet genom olika fuktbelastning (lägre prover ev. utsatt för högre fuktighet och högre halter klorider).

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 10 års exponering är att ökningen av bärförmågan har stannat av eller istället 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. Förklaringen är troligen att proverna har legat till hälften nedsänkta i strömmande mjukt vatten hela tiden och därför urlakats. I den statistiska jämförelsen uppvisar Dalälvs- och Rv40-proverna ett liknande beteende. 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 är anledningen urlakning och lokal sänkning av betongmatrisens hållfasthet i ytan och i sprickzonen (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 vid den direkta och den statistiska jämförelsen visar prov från Eugenia tunneln, fram till 5 års exponering, en mindre påverkan på residualbärförmågan. Begränsat korrosionsangrepp är den mest troliga förklaringen. Kloridhalterna i tunnelproverna är höga, men den begränsande faktorn är fuktillgången. Den kraftiga korrosionen som uppstod under perioden 5-10 år förklaras därför med att de förvarades utan skydd mot nederbörd vilket initierade korrosionen. Tolkningen och värdet av resultaten från tunnelproverna har tyvärr sjunkit p.g.a. de varierande klimatförhållandena.

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.

5.2 Kloridinnehåll

I medel är kloridhalterna vid Rv40 och Eugenia ganska höga (>0.20 %/kg cement resp. >0.4 %/kg cement) i de övre 10 mm av betongen. I Vägverkets Bro 2002 (2002) anges den övre gränsen till $0,3$ %/kg cement. Proverna i Eugeniatunneln har de högsta nivåerna. De är placerade högre ovanför vägbanan än vid Rv40 och borde därför ha en lägre kloridbelastning. Förklaringen är troligen att proverna vid Rv40 utsätts för regn och att en viss urtvättning sker under sommarhalvåret, medan det i Eugenia sker en kontinuerlig ackumulering.

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 10 år verkar sprickviddens betydelse ha minskat något då alla prov uppvisar korrosion med som mest ca.8% skillnad mellan prov med 0,1 mm och 1,0 mm sprickvidd.

Från det begränsade antalet prover verkar det som om 40 mm fibrer erhåller ett allvarligare korrosionsangrepp än 30 mm fibrer. Det stärker hypotesen om att kvoten mellan anod- och katodarea är en viktig parameter.

Vad gäller blandningstyp, verkar inte det vara en viktig parameter för korrosionsprocessen i en spricka. Prover sprutade med torrsprutning uppvisar dock ett kraftigt angrepp efter 10 års exponering. Förklaringen är inte känd, men en hypotes är att tiden till initiering är längre p.g.a. lägre vct och högre cementhalt, men att hastigheten är hög även för dessa prover när väl korrosion initierats.

Generellt är korrosionshastigheterna mycket högre än förväntat i Rv40-miljön. I den typen av miljö kan därför inga sprickor accepteras om fibrerna skall tillgodoräknas som konstruktiv armering.

6 SLUTSATSER

Efter 10 års fältexponeringar kan följande slutsatser dras:

- Fortsatt hydrataion av betongen och därför förbättrad förankringshållfasthet av stålfibrerna kan ge en initiell ökning av residualbärförmågan vid små deformationer. Ökningen är tillfällig eftersom minskad fiberdiameter p.g.a. korrosion eller sänkt matrishållfasthet p.g.a. urlakning, 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 tölsalt vintertid vid Rv40 ger ett kraftigare korrosionsangrepp än för prover exponerade i Dalälven och Eugeniattunneln. Proverna vid Rv40 uppvisar ett kraftigt korrosionsangrepp efter 10 års exponering. Sprickviddens betydelse verkar minska med tiden efter att korrosion har initierats. Längre fibrer korroderar snabbare än korta vid samma sprickvidd.

7 FORTSATT ARBETE

Exponeringarna vid Rv40 är avslutade och samtliga provkroppar är inhämtade. I Eugeniattunneln finns ett mindre antal kvar som räcker för ytterligare ett utvärderingstillfälle. Vid provplatsen i Dalälven finns provkroppar kvar till minst ett utvärderingstillfälle till. Förslagsvis underhålls kvarvarande provplatser till 2012 då beslut om omfattning av ny utvärdering fattas.

8 REFERENSER

Tunnel 2004, (2004). *Allmän teknisk beskrivning för tunnlar*. Vägverket. publ. 2004:124.

Nordström, Erik. (2005a). *Durability of Sprayed Concrete – Steel fibre corrosion in cracks*. Luleå Tekniska Universitet. Publ. nr. 2005:02.

Nordström, Erik. (2005b). *Stålfiberkorrosion i sprutbetong*. SveBeFo. Publ. nr. 69.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befonline.org · www.befonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

tbk.

ISSN 1104-1773