



## UTVÄRDERING EFTER 17 ÅRS FÄLT EXPONERING AV SPRUCKEN STÅLFIBERARMERAD SPRUTBETONG

Erik Nordström



# **UTVÄRDERING EFTER 17 ÅRS FÄLTEXPONERING AV SPRUCKEN STÅLFIBERARMERAD SPRUTBETONG**

**Evaluation after 17 years with field exposures of cracked  
steel fibre reinforced shotcrete**

Erik Nordström, KTH/Sweco

**BeFo Rapport 153**

Stockholm 2016

ISSN 1104-1773

ISRN BEFO-R—153—SE



## FÖRORD

Stålfiberarmerad sprutbetong är idag ett av de mest förekommande materialen vid bergförstärkning och reparation och har varit praxis i mer än 30 år. Materialet används i de allra flesta typer av berganläggningar som exempelvis transporttunnlar, vattenkraftsanläggningar, SKBs försvarsanläggningar för kärnavfall, VA-tunnlar mm. Anläggningar som projekteras och byggs för mycket lång hållbarhet – ofta med en planerad livslängd på över 100 år. Sprutbetongens bärighet, ofta i samverkan med bultar, är beroende av en god bärförmåga även i sprucket tillstånd. Här har en eventuell korrosion av fiber betydelse och för att bedöma anläggningars säkerhet.

Inverkan av sprickor på stålfiberarmerad sprutbetong, med särskilt fokus på risken för korrosion, startades 1997 genom ett doktorandprojekt och omfattade bl.a. fältexponeringar. Fältproverna placerades ut 1997 i vanligt förekommande miljöer och har placerats på tre olika platser; längs riksväg 40, i Eugeniattunneln i Stockholm och i Dalälven. Proverna har tidigare utvärderats efter 1, 2½, 5 och 10 år, vilket successivt rapporterats i BeFo-rapporter nr. 69 "Stålfiberkorrosion i sprutbetong" från 2005 och nr. 88 "Erfarenheter från 10 års fältexponering av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong" från 2009.

I föreliggande rapport redovisas en utvärdering efter totalt 17 års exponering för två av de tre miljöerna eftersom proverna från riksväg 40 avslutades redan efter 10 år på grund av omfattande korrosion. Det är en världsunik långtidsexponering av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong i olika miljöer. Resultaten och analysen från utvärderingen är viktiga för bedömning av lång livslängd av anläggningar, speciellt i en korrosiv miljö. Ett antal prover i Dalälven ligger kvar så det finns möjlighet att få en provserie som stäcker sig betydligt längre i tid, men det är i dagsläget inte bestämt hur dessa prover ska hanteras.

Utvecklingsprojektet leddes av Erik Nordström (KTH/Sweco) och medverkande med laboratorieförsök i Älvkarleby var Per-Erik Thorsell (Vattenfall) med personal. Under projektets olika delar har värdefulla synpunkter kommit från en referensgrupp som bestod av Arvid Taube (Trafikverket), Thomas Dalmalm (Trafikverket), Cristian Andersson (Energiforsk), Tommy Ellison (Besab), Bo Malmberg (BeToTech), Anders Ansell (KTH) och Per Tengborg (BeFo). Projektets har finansierats av Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo) tillsammans med Energiforsk.

Stockholm i december 2016

*Per Tengborg*



## SAMMANFATTNING

Rapporten redovisar resultaten från den senaste utvärderingen av en fältexponeringsserie som startades 1997 som en del av författarens doktorandprojekt. Föreliggande utvärdering har finansierats av BeFo och Energiforsk.

Stålfibrer har vanligen både syftet att vara sprickfördelande/sprickviddsbegränsande i bruksgränstillstånd och att ge residualbärförmåga och duktilitet i brottgränstillstånd. Studien har primärt inriktats på om, och under vilka förutsättningar, som stålfiberkorrosion riskerar uppstå i sprickzonen. Ett vanligt livslängdskrav för anläggningskonstruktioner är 100 år.

Fältproverna har exponerats i tre vanligen förekommande miljöer, nämligen vägmiljö (Rv40, Borås), tunnelmiljö (Eugeniattunneln, Stockholm) och älvmiljö (Älvkarleby). De materialparametrar som varierats är sprutbetongtyp (våt-/torrsprutad), fiberlängd, acceleratortillsats och sprickvidder.

Samtliga provplatserna uppvisar korrosion efter 17 års exponering, men i mycket begränsad omfattning i älvmiljön. Korrosionsangreppet är kraftigast vid Rv40 som utgör en miljö med kombinationen av hög fuktighet och relativt hög kloridbelastning. Tydligaste påverkan av mixtypen erhöles av prover med långa fibrer som korroderade betydligt fortare än de kortare fibrerna vilket fortsatt stärker vikten av förhållandet mellan anod och katod. Provernas sprickvidd hade mest betydelse för tiden till initiering av korrosion, men efter initiering utvecklas korrosionen i ungefär samma hastighet. Det finns en tydlig koppling mellan en mer utvecklad fiberkorrosion och förlust av bärförmåga vilket blir särskilt tydligt vid utvärdering av bärförmågan vid stora deformationer (brotsgräns). För små deformationer (bruksstadium) och små sprickvidder (0,1 mm) kunde en ökning av bärförmågan ses som verkar bestå även efter 17 års exponering.

I Dalälvsproverna noterades en urlakad zon på ca.10 mm efter 17 år. Det konstaterades också att den våtsprutade betongen utan accelerator visade ett något bättre motstånd mot urlakning och den torrsprutade bäst motstånd även om några mm urlakning kunde ses. Kloridmängderna i proverna vid Rv40 och Eugeniattunneln är höga efter exponeringen och i tunnelmiljön mycket höga vilket accelererat den initierade korrosionen kraftigt. Sannolikt sker en ackumulering eftersom betongen är regnskyddad inne i tunneln.

Det är tydligt att den förstörande utvärderingstekniken inte är optimal när korrosionsprocessen gått långt p.g.a. att "bevismaterialet" inte längre kan identifieras. De senare resultaten där korrosion pågått en längre tid riskerar att underskatta det verkliga angreppets omfattning.

Sammanfattningsvis kan konstateras att stålfiberkorrosion i sprucken sprutbetong exponerade för kloridutsatta miljöer måste förväntas uppträda med de vanligast förekommande fibertyperna. Det är inte rimligt att anta 100 års livslängd med bibehållen bärförmåga i de provade kloridutsatta miljöerna.

### *Nyckelord:*

sprutbetong, beständighet, livslängd, bärförmåga, stålfibrer, korrosion, urlakning

## SUMMARY

The report includes results from the latest evaluation of a field exposure test series started in 1997 as part of the authors PhD-project. The current evaluation has got financial support from BeFo and Energiforsk. Steel fibers commonly has the main purpose to limit crack widths and and distribute cracks in service limit state and to give residual strength and ductility in ultimate limit state. The study has primarily been focusing on if, and under what prerequisites, steel fiber corrosion can occur in the crack zone. A common service life requirement for civil structures is 100 years.

In the field exposures, samples have been exposed in three environments. Road environment (Rv40, Borås), tunnel environment (Eugenia tunnel, Stockholm) and river environment (Älvkarleby). The material parameters that has been tested are sprayed concrete type (wet-/dry-mix), fiber length, accelerator admixture (with/without) and crack width (0 / 0.1 / 0.5 / 1.0 mm).

All the samples shows steel fiber corrosion after 17 years of exposure, but to a very limited extent in the river environment. The corrosion attack is most severe at Rv40 that is an environment with the combination of high level of humidity and high exposure to thaw salts. Most accentuated influence from mix-type was given from the samples with longer steel fibers that corroded much faster than the shorter fibers. It supports the importance of the ratio between anode and cathode area. The impact from the crack width seem to be most obvious for the time to initiation of corrosion, but after initiation the corrosion develops at approximately the same rate. There is a clear correspondence between ongoing fiber corrosion and loss of residual strength especially on load-bearing capacity at large deformations (ultimate limit state). At small deformations (service limit state) and small crack widths (0.1 mm) an increase of the load-bearing capacity seem to remain even after 17 years of exposure.

In the river samples a zone with leached concrete down to 10 mm could be detected after 17 years. The wet-mix samples without accelerating admixtures seem to be more resistant to leaching and dry-mix samples even better with only a few mm of leaching. The chloride contents in the samples along Rv40 and in the Eugenia tunnel are high after exposure and in the tunnel environment extremely high which also accelerate the initiated corrosion heavily. Probably there is an accumulation of chlorides since the samples have been sheltered to precipitation in the tunnel.

It is clear that the destructive technique for evaluation is not optimal when the corrosion process is extensive. The samples that prove the amount of corrosion can no longer be identified. The later results where corrosion has been ongoing for a longer period of time might underestimate the real situation. To conclude it can be stated that steel fiber corrosion in cracked concrete exposed to an environment with chlorides from thaw salts must be expected to occur for the most commonly used fiber types. It is not realistic to expect a service-life of 100 years with remained load-bearing capacity in the tested chloride exposed environments.

### *Key words:*

sprayed concrete, shotcrete, durability, service-life, load-bearing capacity, steel fibers, corrosion, leaching



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

<b>FÖRORD</b>	<b>I</b>
<b>SAMMANFATTNING</b>	<b>III</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>IV</b>
<b>INNEHÅLLSFÖRTECKNING</b>	<b>V</b>
<b>1. INLEDNING</b>	<b>1</b>
<b>2. SYFTE OCH MÅL</b>	<b>1</b>
<b>3. FÖRSÖKSUPPLÄGG</b>	<b>3</b>
<b>3.1. Sprutbetongtyper</b>	<b>3</b>
<b>3.2. Exponeringsmiljöer</b>	<b>3</b>
<b>3.3. Tidigare utvärderingar</b>	<b>4</b>
<b>4. UTVÄRDERINGSMETODIK</b>	<b>5</b>
<b>4.1. Korrosionsangrepp</b>	<b>5</b>
<b>4.2. Residualbärförmåga</b>	<b>5</b>
<b>4.3. Kloridhalter</b>	<b>6</b>
<b>4.4. Karbonatisering</b>	<b>6</b>
<b>4.5. Frostangrepp</b>	<b>6</b>
<b>4.6. Urlakning</b>	<b>6</b>
<b>4.7. Klimatuppföljning vid exponeringsplatserna</b>	<b>7</b>
<b>5. RESULTAT</b>	<b>9</b>
<b>5.1. Korrosionsangrepp</b>	<b>9</b>
5.1.1. Rv40	9
5.1.2. Eugenia	11
5.1.3. Dalälven	13
<b>5.2. Residualbärförmåga</b>	<b>15</b>

5.2.1.	Direkt utvärdering	15
5.2.2.	Statistisk utvärdering	18
<b>5.3.</b>	<b>Kombinerad utvärdering fiberförlust och bärförmåga</b>	<b>19</b>
<b>5.4.</b>	<b>Kloridmätningar</b>	<b>20</b>
<b>5.5.</b>	<b>Klimatdata</b>	<b>22</b>
5.5.1.	Eugenia	22
5.5.2.	Dalälven	24
<b>5.6.</b>	<b>Urlakning / karbonatisering</b>	<b>25</b>
<b>6.</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>27</b>
<b>6.1.</b>	<b>Korrosionsangrepp</b>	<b>27</b>
<b>6.2.</b>	<b>Bärförmåga</b>	<b>27</b>
<b>6.3.</b>	<b>Korrelation fiberförlust och bärförmåga</b>	<b>29</b>
<b>6.4.</b>	<b>Kloridhalter</b>	<b>29</b>
<b>6.5.</b>	<b>Urlakning / karbonatisering</b>	<b>29</b>
<b>7.</b>	<b>SLUTSATSER</b>	<b>31</b>
<b>8.</b>	<b>FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE</b>	<b>33</b>
<b>9.</b>	<b>ERKÄNNANDEN</b>	<b>33</b>
<b>10.</b>	<b>REFERENSER</b>	<b>34</b>



## 1. INLEDNING

Föreliggande rapport är resultatet av en studie som påbörjades 1997 som del av ett doktorandprojekt inom ramen för industriprogrammet Väg, Bro, Tunnel (VBT). Arbetet har under resans gång haft olika finansiärer i form av BeFo/SveBeFo, Energiforsk/Elforsk, och dåvarande Vägverket resp. Banverket. I rapporten redovisas resultaten från den senaste utvärderingen av de fältexponeringar av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong som pågått (och delvis fortsatt pågår). Studien har primärt inriktats på om, och under vilka förutsättningar, som stålfiberkorrosion riskerar uppstå i sprickzonen om sprutbetongen spricker.

Allt sedan 1980-talet har armering av sprutbetong med stålfibrer varit standardförfarande vid bergförstärkning och ibland även vid betongreparationer. Stålfibrer har vanligen både syftet att vara sprickfördelande/sprickviddsbegränsande i bruksgränstillstånd och att ge residualbärförmåga och duktilitet i brottgränstillstånd. För anläggningskonstruktioner med livslängdskrav på mer än 100 år är det väsentligt att klarställa vilken risk det finns för, och effekten på sprutbetongens bärförmåga av, en uppträdande stålfiberkorrosion.

Projektet har tidigare rapporterats i olika omgångar och bl.a. kan en sammanfattning efter 10 års exponering studeras i Nordström & Thorsell (2009). En detaljerad beskrivning av bakgrundsstudier och själva försöksupplägget för fältexponeringarna tillsammans med accelererade exponeringar samt livslängdsmodell kan ses i en doktorsavhandling av Nordström (2005).

## 2. SYFTE OCH MÅL

Syftet med fältexponeringarna är att studera om, och i så fall under vilka omständigheter, stålfiberkorrosion initieras i sprucken sprutbetong i vanligen förekommande miljöer med kontrollerade materialegenskaper. Målet med fältexponeringarna är:

- Definiera tid till initiering och korrosionshastighet efter en ev. initiering
- Undersök inverkan av relevanta materialparametrar på korrosionsprocessen
- Studera långtidspåverkan på residualbärförmåga p.g.a. korrosion och ev. andra initierade nedbrytningsmekanismer.
- Skapa underlag för att definiera kritisk sprickvidd vid ev. initierad korrosion



### 3. FÖRSÖKSUPPLÄGG

#### 3.1. Sprutbetongtyper

För att simulera sprutbetongtyper som är vanligen förekommande i såväl bergförstärknings- som reparationsmanhang har både våt- och torrspjutade prover exponerats i försöken.

Vid tiden för uppstarten av fältexponeringarna (1997) hade s.k. alkalifria acceleratörer för våtsprutning börjat introduceras på den svenska marknaden. De traditionellt dominerande vattenglasacceleratorerna var dock fortfarande vanligast. I tillägg finns en ansevärd mängd konstruktioner uppförda de senaste 15-20 åren där just vattenglasacceleratorer använts. Med detta som bakgrund valdes att använda vattenglastillsats som accelerator i de våtsprutade proverna. Idag är alkalifria acceleratörer dock de vanligast förekommande. De har vanligen ett lågt pH och kan möjligen sänka betongens pH vilket i så fall skulle vara ogynnsamt vilket borde studeras vidare.

Den dominerande stålfibertypen på den svenska marknaden var vid den här tiden av lågkolstålstyp och 30 eller 40 mm långa med ändkrok. Idag finns enbart en 35 mm fiber av den typen som är vanlig vid betongsprutning.

#### 3.2. Exponeringsmiljöer

Exponeringarna av de spruckna sprutbetongproverna uppfördes i tre olika miljöer som anses vara typiska för var stålfiberarmerad sprutbetong används. Bergförstärkning av tunnlar och bergskärningar samt betongreparation.

Tabell 1 – Exponeringsmiljöer

Table 1 – Exposure environment

Plats	Exponeringstyp	Reprenterar konstruktionstyp
<b>Eugenia tunneln, Stockholm</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fuktigt</li> <li>– Klorider från tösaltning</li> <li>– Regnskyddat</li> <li>– Försurande avgaser</li> <li>– Frost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bergförstärkning i tunnlar</li> </ul>
<b>Riksväg 40, Borås</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fuktigt</li> <li>– Klorider (direktstänk)</li> <li>– Regnutsatt</li> <li>– Frost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bergförstärkning i förskärningar</li> <li>– Betongreparationer</li> </ul>
<b>Dalälven, Älvkarleby</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Fuktigt</li> <li>– Regnutsatt</li> <li>– Frost</li> <li>– Strömmande jonfattigt vatten</li> <li>– Is</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Intagskanaler och intagstunnlar (delvis vattenfyllda) till vattenkraftstationer</li> </ul>

### 3.3. Tidigare utvärderingar

Fältförsöken har tidigare utvärderats efter 1 år, 2,5 år, 5 år och 10 år. Första utvärderingen gjordes mest för att få en första indikation på om det initierats någon korrosion vid den mest aggressiva miljön vid Rv40. Eftersom resultaten från 1 årsutvärderingen gav tecken på korrosion vid Rv40 gjordes följande åter efter 2,5 år. De övriga provplatserna uppvisade dock inga tecken på ett initierat korrosionsangrepp. Eftersom fältexponeringarna initialt utgjorde del av ett doktorandprojekt genomfördes också en utvärdering efter 5 års exponering för att kunna inkorporera resultaten i avhandlingen. Fortfarande då kunde relativt begränsad korrosion ses i prover som exponerats i Dalälven och i Eugeniattunneln medan proverna vid Rv40 hade kraftiga angrepp. Provplatsen vid Rv40 avslutades efter 10-årsutvärderingen eftersom proverna var så angripna att det bedömdes svårt att göra någon fler framtida utvärdering.

Proverna i Eugeniattunneln har varit ute på turné vid två olika tillfällen där den första nedmonteringen gjordes under våren 2004 och återmonterades på hösten 2004. Nedmonteringen gjordes för att dåvarande Vägverkets underhållsavdelning bedömde installationen som trafikfarlig p.g.a. korrosionsangreppet på själva stålställningarna där provkropparna monterats. Bedömningen var en rejäl felbedömning då endast ytrostangrepp kunde ses och risken för att de skulle falla ner var i princip obefintlig. Efter återmonteringen med nya bättre korrosionskyddade ställningar försågs också provuppställningen med en skylt som angav kontaktuppgifter och vilka som finansierade försöken.

Proverna i Eugeniattunneln nedmonterades andra gången under sommaren 2006 då man kompletterade tunneln med nya dräner för bortledning av inläckande vatten. Den här nedmonteringen var dock kontrollerad med instruktioner kring hur provkropparna fick hanteras och förvaras under nedmonteringen. Slutligen nedmonterades försöksuppställningen för gott i mars 2014 i samband med ombyggnaden och anslutningen till Norra länken eftersom trafiken upphörde i den södergående tunneln där proverna satt monterade. Proverna förvarades sedan i torrhet vid Vattenfall Research & Developments laboratorium i Älvkarleby fram till utvärderingen 2015.

Även försöksuppställningen i Dalälven har varit på utflykt då en av flottarna efter wirebyte lossnade och flöt med strömmen fram till isgrinden på aggregat G6 vid Älvkarleby kraftstation. Proverna plockades dock upp med kranbil ganska direkt och återplacerades på sin ursprungliga plats. Händelsen inträffade i december 2013.

## **4. UTVÄRDERINGSMETODIK**

### **4.1. Korrosionsangrepp**

Metodiken för att utvärdera hur stort angreppet på varje enskild fiber är baseras på mekanisk kontroll av fiberdiametern i området som passerat den inducerade sprickan. Själva frilägningsprocessen av de korroderade fibrerna utförs genom en flerstegsbehandling där proverna vattenmätas fullständigt genom vakuumbehandling och sedan utsätts för fryscyklar, vilket pulveriserar betongen och frilägger fibrerna. För att identifiera de korroderade fibrerna görs ett okulärt urval där endast fibrer som uppvisar korrosion på någon del av fibern och har friskt stål på båda sidor om det korroderade området väljs ut. På så sätt kan det säkerställas att fibern passerat sprickan och inte exponerats mot en yta av sprutbetongbalken.

För att bedöma korrosionsangreppets omfattning görs mätningar med en spårmikrometer i det korroderade området och fiberdiametern där jämförs med den opåverkade delens diameter. Vid utvärderingen av försöksdata har denna gång ett nytt angreppssätt använts jämfört med tidigare utvärderingar. Tidigare har den faktiska förlusten av diametern på fibern använts som jämförelsevärde. I tillägg har det antagits att de korroderade fibrer som hittats i sprickzonen antagits vara en av 27 stycken och de andra har därför antagits opåverkade. Att just 27 stycken valdes baserades på ett medelvärde av det antal fibrer som korsade sprickzonen vid kontroll på de prover som utsatts för böjdragprovning. Vid föreliggande utvärdering har det faktiska korrosionsangreppet, uttryckt som en tvärsnittsareaförlust, på de fibrer som uppvisat korrosion räknats ut och jämförts med den tvärsnittsarea som dessa fibrer hade ursprungligen. På så sätt redovisas det verkliga angreppet på de fibrer som kunnat registreras.

Vid denna utvärdering har alla tidigare data gått igenom och utvärderats på samma sätt för en relevant och likvärdig jämförelse.

### **4.2. Residualbärförmåga**

När sprutbetongproverna 1997 spräcktes till olika sprickvidder före fältexponeringarna påbörjades användes det modifierade standardiserade testet enligt svensk praxis. I grunden är det ett test enl. ASTM C1018, men med provkroppsstorleken 500\*125\*75 mm och en högre belastningshastighet (0,25 mm/min). Arbetskurvan från den första belastningen/spräckningen av proverna sparades till framtida utvärderingar.

Efter exponeringarna avslutats hämtades prover in och återbelastades i samma försöksupställning. Arbetskurvan för återbelastningen lagrades och har sedan jämförts med den ursprungliga uppspräckningen. Två olika sätt att kontrollera påverkan av fältexponeringarna och en ev. korrosion har utvecklats. En modell som gör en direkt jämförelse mellan den faktiska nivån när provet avslutades första gången och den nivå som uppvisas vid återbelastning. Den direkta jämförelsen ger en uppfattning om förändringen vid små deformationer. Den andra modellen är en statistisk jämförelse där lutningen på arbetskurvan i ett intervall på nedböjningen från



0,35 till 0,45 mm ger en prognos om vilken lastkapacitet provet hade haft om provningen hade fortsatt till 2 mm deformation vid första belastningstillfället före exponering. Den faktiska lastkapaciteten jämförs sedan med den statistiskt prognosticerade vid 2 mm deformation. Den statistiska jämförelsen baseras på en sammanställning av dryga 100 provningar med samma uppställning.

#### **4.3. Kloridhalter**

Prover som exponerats i Eugeniattunneln och längs Rv40 har utsatts för stänk och dimma från vatten innehållande tölsalter. Eftersom klorider ökar ledningsförmågan i porlösningen och därigenom ökar elektronvandringen mellan anod och katod, vilket påskyndar korrosionsprocessen, så är det av intresse att följa upp detta. Mätning av kloridhalter har gjorts både som en traditionell kloridprofil från sprutbetongens yta och inåt och en kontroll av kloridhalternas variation längs sprickytan från mynningen och inåt. Kloridmätningarna har gjorts genom uppsamling av borrhax och användning av RCT-metoden.

#### **4.4. Karbonatisering**

Eftersom luftens koldioxid sakta tränger in i betongen och omvandlar den bildade kalciumhydroxiden till kalciumkarbonat så sänks pH från ca. 12,5 till 9 på den karbonatiserade betongen. Ett sänkt pH ger ett försämrat skydd mot korrosion och är därför intresse att följa upp. Kontrollen av karbonatiseringsfronten har gjorts med spräckning av betongbalken och infärgning med fenolftalein. Betong som inte karbonatiserats färgas röd, medan betong som har karbonatiserats förblir opåverkad. I tillägg har cementpastans kemiska sammansättning studerats genom kemisk analys med energidispersivt röntgenspektroskop (EDS) och svepelektronmikroskop (SEM) på färskas brottytor.

#### **4.5. Frostangrepp**

De prover som exponerats i Dalälven, Älvkarleby har under hela perioden utsatts för fri tillgång till fukt i kombination med frostpåverkan. För att studera hur strukturen i betongen har förändrats planerades en analys av tunnslip. I tidigare utvärderingar har det funnits indikationer på att acceleratortillsatsen gett en något grövre porstruktur och att torrsprutning gett mer luftinnehåll och generellt sett större luftporer. Tyvärr är resultaten från denna undersökning inte rapporterade vid skrivandet av denna rapport.

#### **4.6. Urlakning**

Vid kontroll av karbonatiseringsdjupet efter 10 års exponering konstaterades att proverna som exponerats i Dalälvmiljö inte erhöll någon infärgning av skiktet närmast ytan vid applicering av fenolftalein på de delar som hela tiden legat under

vatten. Rimligen har inte luftens koldioxid påverkat betongen utan någon annan mekanism har gett upphov till pH-sänkningen i betongen. Ingen infärgning vid applicering av fenolftalein innebär att betongen har ett pH lägre än ca. 8.

Förklaringen är sannolikt urlakning vilket undersökts genom en kemisk analys på ett utsågat prov. Analysen har gjorts olika djup från den exponerade ytan och i den zonen som visar ett lägre pH än 8. Ett referensprov har också tagits långt in i betongen som jämförelse. Även här kontrolleras urlakningsgraden genom analys med EDS/SEM på färskas brottytor.

#### 4.7. Klimatuppföljning vid exponeringsplatserna

Vid samtliga provplatser har klimatet följts upp för att kunna korrelera resultaten från utvärderingen av ev. korrosion med vilket klimat provet exponerats för. Utvärderingen av klimatet vid provplatsen längs Rv40 har rapporterats tidigare och baserades inledningsvis på den permanenta installation för klimatdatainsamling som fanns vid provplatsen. Omfattade data på temperatur, luftfuktighet, vind, nederbörd, solinstrålning, etc. registrerades. Under en period följdes även vilken kloridbelastning som uppstod på olika höjd över vägbana av Tang Luping vid SP och de har bl.a. rapporterats av Wirje & Offrell (1996).

Vid Dalälvsproverna har luftfuktighet och temperatur följts upp. Inledningsvis även vattnets temperatur, men den installationen skadades av isen redan första säsongen. I Eugeniattunneln har också lufttemperatur och luftfuktighet mätts. Klimatet har registrerats med s.k. TinyTag-loggrar som t.ex. den i figur 1 nedan. Loggern är vattentät enl. IP68-klassning och kan lagra 32000 mätvärden. Batteriet har bytts ca. 1 ggr/år.



Figur 1 – TinyTag-logger för lufttemperaturmätning (Mått 80 x 51 x 34 mm).

Figure 1 – TinyTag-logger for air temperature measurements (Size 80 x 51 x 34 mm).



## 5. RESULTAT

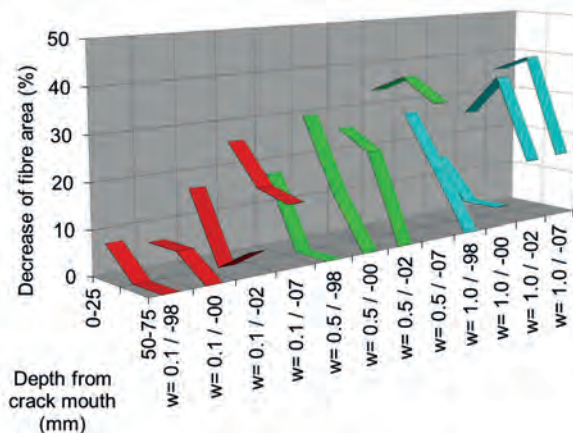
I avsnittet redovisas resultaten från utvärderingen av de under 17 år exponerade proverna vid Eugeniattunneln och Dalälven. Vid tidigare utvärderingar har resultaten också jämförts med referensprover som förvarats i konstant temperatur och luftfuktighet under hela tiden sedan 1997 (benämns Lab i figurerna). Tyvärr har dessa försvunnit någon gång efter utvärderingen vid 10 år och har trots efterforskningar inte gått att hitta. Därför finns inga referensprov ”Lab” vid denna utvärdering.

### 5.1. Korrosionsangrepp

Som angetts i avsnitt 4.1 redovisas vid denna utvärdering korrosionsangreppet som den faktiska uppmätta tvärsnittsförlusten i relation till ursprungsarean för de fibrer som detekterats uppvisa korrosion i sprickzonen. Detta gäller alltså även de tidigare resultaten som också utvärderats på samma sätt nu. Grunddatat för resultaten som presenteras för Rv40 är från 2007

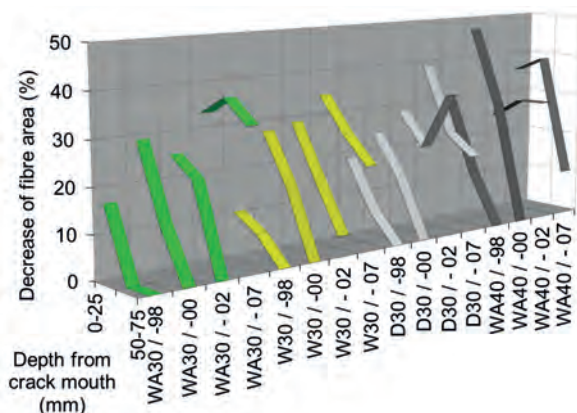
#### 5.1.1. Rv40

I figur 2 redovisas resultaten från utvärderingen av standardmixen WA30 (Våtsprutad med accelerator och 30 mm fiberlängd). För de senare utvärderingarna (2002 och 2007) ses för sprickvidderna 0,5 mm och 1,0 mm ett mindre korrosionsangrepp för den yttersta delen jämfört med de inre delarna. Sannolikt kan detta hänföras till utvärderingsmetodikens som baseras på att hela fibrer (ej helt av) är de enda som säkert kan antas ha passerat sprickzonen. Sannolikt har fibrer med en större areaförlust än ca. 50% inte klarat hanteringen vid sågning till skivor inför friläggningen av fibrer. Generellt ses annars ett ökat fiberangrepp med ökad sprickvidd



Figur 2 – Uppmått procentuell areaförlust på mix WA30 och olika sprickvidder, Rv40.

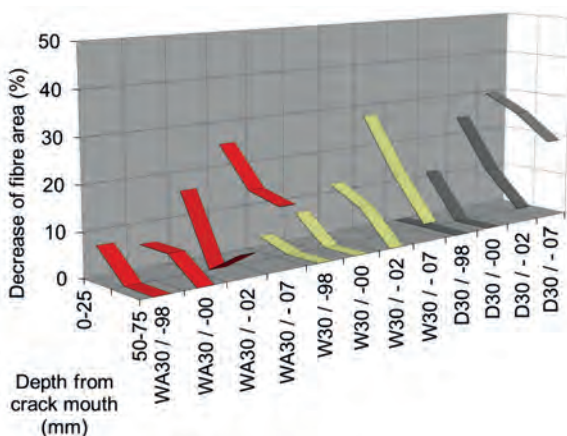
Figure 2 – Measured loss of area (percent) for mix WA30 and different crack width, Rv40.



Figur 3 – Uppmått procentuell areaförlust för alla mixer vid 0,5 mm sprickvidd, Rv40.

*Figure 3 – Measured loss of area (percent) for all mixes and 0.5 mm crack width, Rv40.*

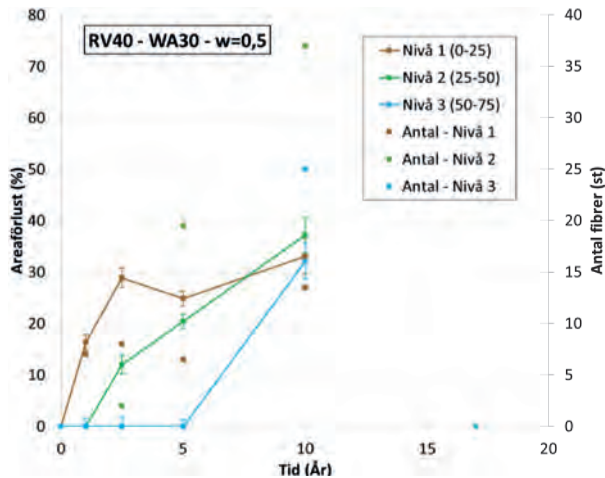
I figur 3 ovan ses inga större skillnader mellan våt- och torrsprutad betong eller mellan mix med eller utan accelerator. Den enda stora skillnaden är den mellan 30 mm och 40 mm fiberlängd, där de längre fibrerna uppvisar ett avsevärt större angrepp. På samma sätt som i figur 2 ses en trolig effekt av att de mest angripna fibrerna inte går att finna och därför ses en vikande trend för de yttersta delarna av WA40-proverna vid utvärderingen -02 och -07. I figur 4 nedan redovisas skillnader mellan olika mixer och sprickvidd 0,1 mm. Inga tydliga skillnader kan ses mellan de olika mixtyperna.



Figur 4 – Uppmått procentuell areaförlust för alla mixer vid 0,1 mm sprickvidd, Rv40.

*Figure 4 – Measured loss of area (percent) for all mixes and 0.1 mm crack width, Rv40.*

Antalet fibrer som ligger till underlag för bedömningen av areaförlusten har varierat med tiden och med djupet i sprickan. I figur 5 nedan redovisas ett exempel på fiberförlust med standardavvikelse och samtidigt antalet fibrer som ligger till grund för mätningen. Som framgår detekterades angreppet först i den yttersta delen av sprickan och efter tid djupare ner i sprickan. Antalet detekterade fibrer ökar också med tiden. Notervärt är också att både angreppsgraden och antalet detekterade fibrer inte ökar för den yttersta delen (0-25 mm) efter 2,5 år vilket kan vara ett tecken på att fibrer korroderat av och därigenom inte hittas.

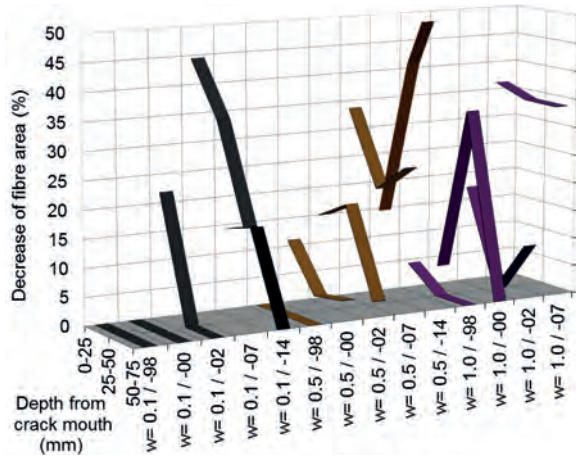


Figur 5 – Areaförlust och antal detekterade fibrer. Rv40, WA30, w= 0,5 mm.

Figure 5 – Loss of area and number of detected fibrers. Rv40, WA30, w= 0.5 mm.

### 5.1.2. Eugenia

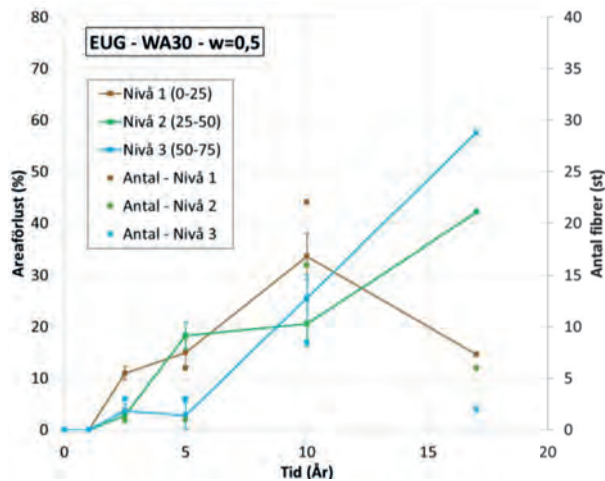
I figur 6 redovisas resultaten från utvärderingen av standardmixen WA30 efter exponering i Eugeniattunneln.



Figur 6 – Uppmått procentuell areaförlust för mix WA30 och alla sprickvidder, EUG.

Figure 6 – Measured loss of area (percent) for mix WA30 and all crack widths, EUG.

Den största förändringen noterades vid utvärderingen 2002 (efter 5 år) då ett tydligt korrosionsangrepp kunde konstateras i proverna. Korrosionen initierades dock tidigare i prover med större sprickvidd. I figur 7 nedan så redovisas areaförlust i kombination med antalet detekterade fibrer för WA30 prover med sprickvidd 0,5 mm. Antalet detekterade fibrer ökar fram till 10-årsutvärderingen för att sedan minska. Angreppet för den yttersta delen är synbart också lägre vilket sannolikt beror på att de mest korroderade fibrerna inte identifierats.

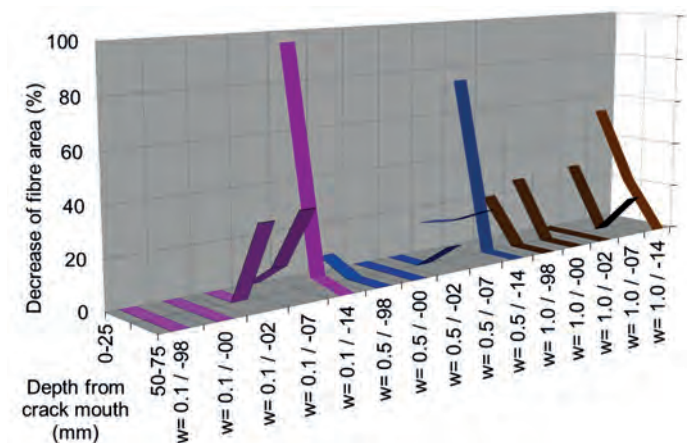


Figur 7 – Areaförlust och antal detekterade fibrer. EUG, WA30, w= 0,5 mm.

Figure 7 – Loss of area and number of detected fibers. EUG, WA30, w= 0.5 mm.

### 5.1.3. Dalälven

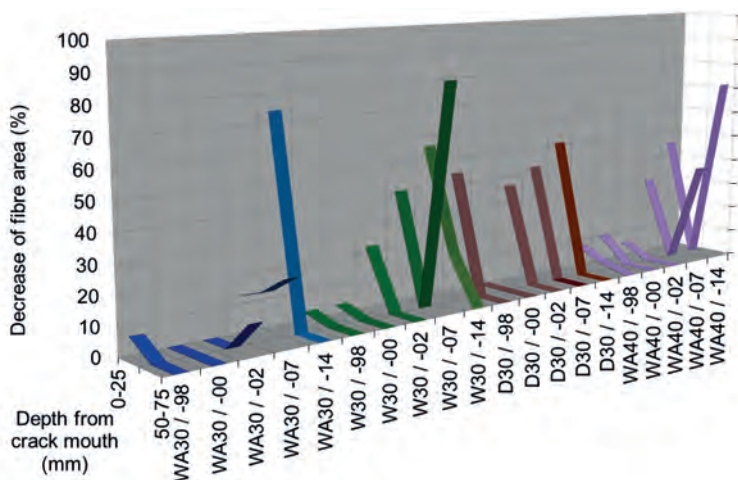
I figur 8-10 redovisas resultaten från utvärderingen av olika mixtyper och kombinationer av sprickvidder efter exponering i Dalälvmiljön. Notera att skalan på y-axeln är annorlunda än för de tidigare figurena. Märkligt nog har enstaka fibrer med mycket kraftigt angrepp hittats, även djupt nere i sprickzonen. En möjlig förklaring är att dessa enstaka fibrer befunnit sig i den zon som urlakats och på så sätt gett ett sämre skydd mot korrosion. P.g.a. dessa enstaka extremvärden är inte skillnaden mellan fiberlängderna 30 mm och 40 mm så tydlig som vid Rv40. Inga större skillnader mellan olika betongtyper kan heller ses. Däremot uppvisar prover med sprickvidd 1 mm ett tidigare angrepp än andra sprickvidder. Annars ingen tydlig korrelation mellan sprickvidd och angreppsgrad.



Figur 8 – Uppmått procentuell areaförlust för mix WA30 och alla sprickvidder, DAL (Observera skalan på Y-axeln).

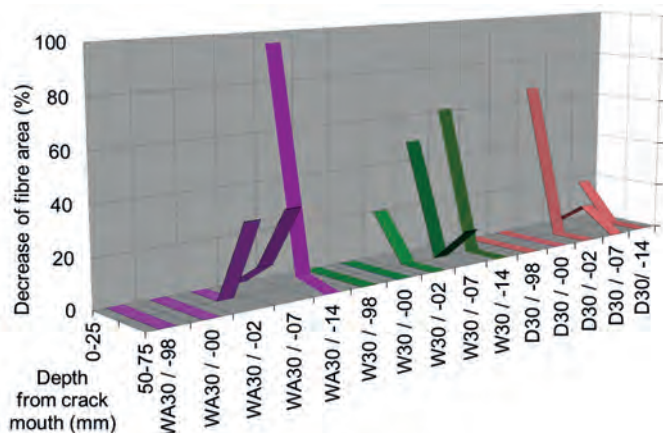
Figure 8 – Measured loss of area (percent) for mix WA30 and all crack widths, DAL. (Note scale on Y-axis)





Figur 9 – Uppmått procentuell areaförlust för alla mixer och sprickvidd 0,5 mm, DAL. (Observera skalan på Y-axeln).

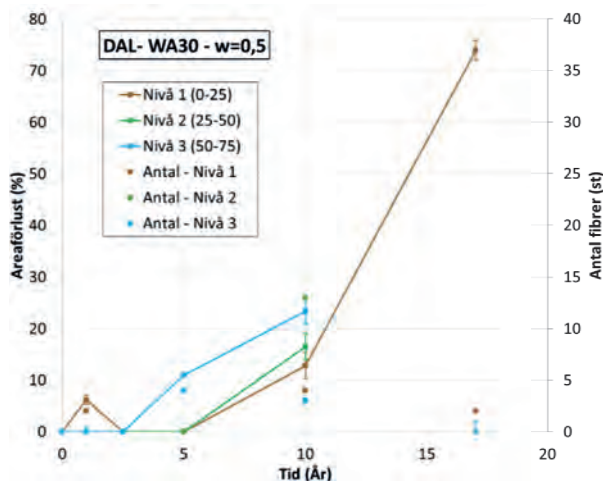
Figure 9 – Measured loss of area (percent) for all mixes and crack width 0.5 mm, DAL. (Note scale on Y-axis)



Figur 10 – Uppmått procentuell areaförlust för alla mixer och 0,1 mm sprickvidd, DAL (Observera skalan på Y-axeln).

Figure 10 – Measured loss of area (percent) for all mix types and 0.1 mm crack widths, DAL. (Note scale on Y-axis)

I figur 11 nedan redovisas areaförlusten i kombination med antalet detekterade fibrer för WA30 med sprickvidd 0,5 mm för prover från Dalälven. Noterbart är att antalet fibrer är väldigt begränsat genom hela serien och att det höga värdet vid sista utvärderingen baseras på någon enstaka fiber. Kopplingen mellan nivå och angrepp är inte heller urskiljbar.



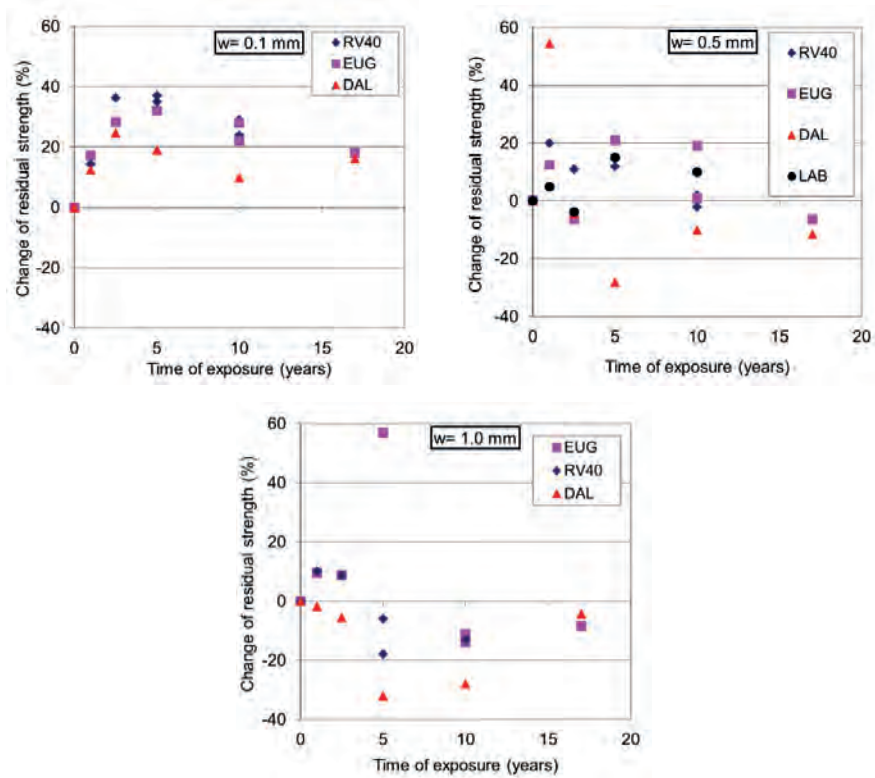
Figur 11 – Areförlust och antal detekterade fibrer. DAL, WA30, w= 0,5 mm.  
 Figure 11 – Loss of area and number of detected fibrers. Rv40, WA30, w= 0.5 mm.

## 5.2. Residualbärförmåga

I de tidigare utvärderingarna redovisades medelvärdet på bärförmågeförändringen om flera (två) provkroppar utvärderats. I utvärderingen efter 17 år redovisas alla enskilda värden. Två provkroppar för varje kombination av fiberlängd och mixtyp har inhämtats 2002 och 2007 för Rv40 och 2007 för Dalälvsproverna.

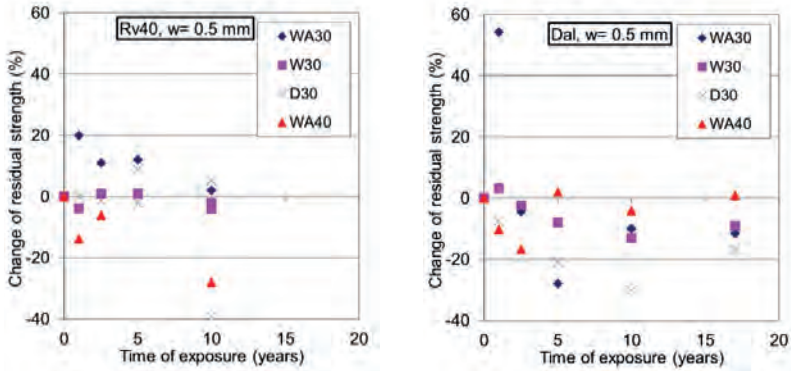
### 5.2.1. Direkt utvärdering

Resultatet av den direkta jämförelsen mellan den nivå som provet hade före exponering och den som provet uppvisar vid återbelastning efter exponering redovisas i figurerna nedan. I den första figuren (figur 12) redovisas inverkan av sprickvidden vid exponering vid de tre olika platserna och samma typ av mix. Vidare redovisas i figur 13 och 14 inverkan av 0,5 resp. 0,1 mm sprickvidd på bärförmågan vid små deformationer.



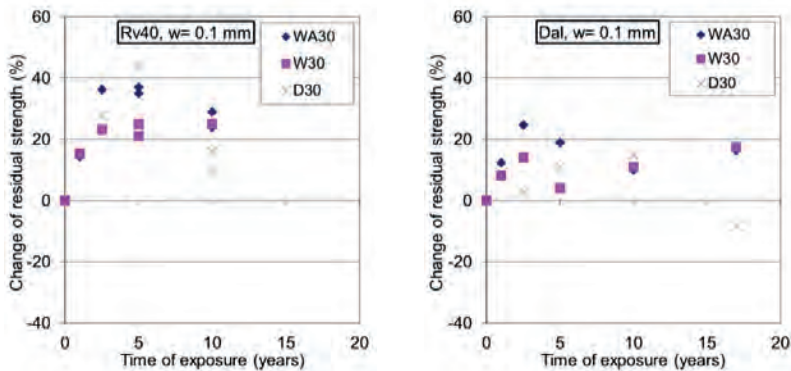
Figur 12 – Ändring av bärförmåga liten deformation för mix WA30,  $w = 0,1$  mm,  $w = 0,5$  mm och  $w = 1,0$  mm. Olika exponeringsplatser.

Figure 12 – Change of load-bearing capacity at small deflections for mix WA30,  $w = 0.1$  mm,  $w = 0.5$  mm och  $w = 1.0$  mm. Different exposure sites.



Figur 13 – Ändring av bärförmåga vid liten deformation för olika mixer,  $w = 0,5$  mm. Rv40 (vänster), Dal (höger).

Figure 13 – Change of load-bearing capacity at small deflections for various mixes,  $w = 0.5$  mm. Rv40 (left), Dal (right).

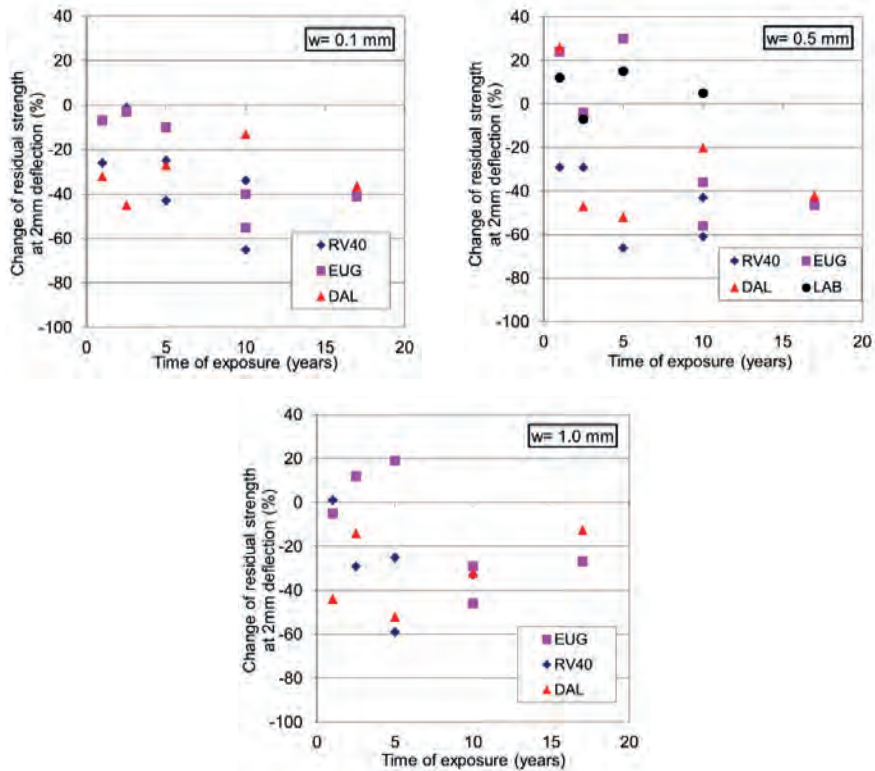


Figur 14 – Ändring av bärförmåga vid liten deformation för olika mixer,  $w = 0,1$  mm. Rv40 (vänster), Dal (höger).

Figure 14 – Change of load-bearing capacity at small deflections for various mixes,  $w = 0.1$  mm. Rv40 (left), Dal (right).

### 5.2.2. Statistisk utvärdering

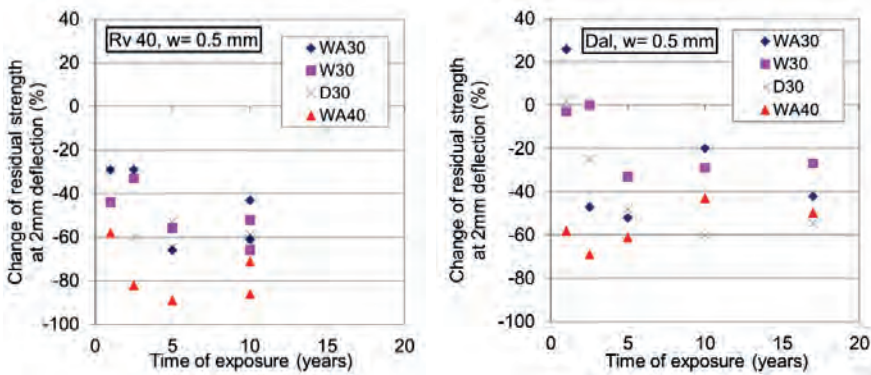
Jämförelsen av bärförmågan vid 2mm deformation med den det statistiskt sett borde varit redovisas i figurerna nedan. I figur 15 redovisas inverkan av sprickvidd för standardmixen WA30 vid exponering vid olika platser. Vidare ses inverkan av mixtyp och sprickvidd 0,5 resp. 0,1 mm i figur 16 och 17.



Figur 15 – Ändring av bärförmåga vid 2 mm deformation för mix WA30,  $w = 0,1$  mm,  $w = 0,5$  mm och  $w = 1,0$  mm. Olika exponeringsplatser.

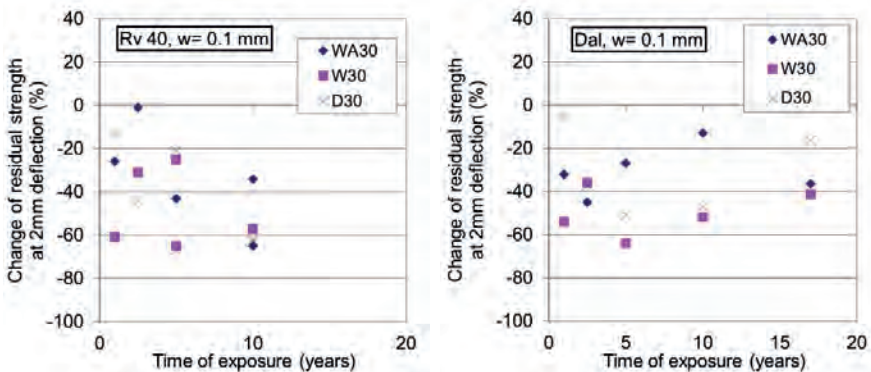
Figure 15 – Change of load-bearing capacity at 2 mm deflection for mix WA30,  $w = 0.1$  mm,  $w = 0.5$  mm och  $w = 1.0$  mm. Different exposure sites.

I figur 16 nedan redovisas inverkan på residualbärförmågan vid 2 mm deformation av de olika mixerna som exponerats utöver standardmixen vid Rv40 och vid Dalälven. Jämförelsen görs vid 0,5 mm sprickvidd.



Figur 16 – Ändring av bärförmåga vid 2 mm deformation för olika mixer,  $w=0,5$  mm. Rv40 (vänster), Dal (höger).

Figure 16 – Change of load-bearing capacity at 2 mm deflection for various mixes,  $w=0.5$  mm. Rv40 (left), Dal (right).



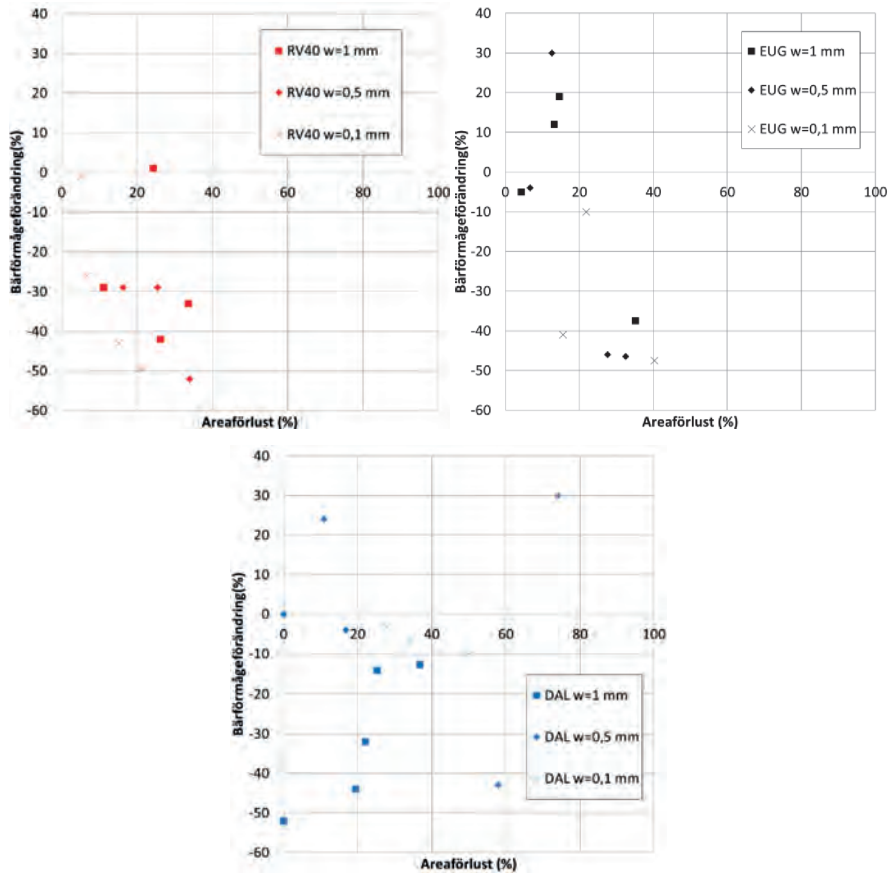
Figur 17 – Ändring av bärförmåga vid 2 mm deformation för olika mixer,  $w=0,1$  mm. Rv40 (vänster), Dal (höger).

Figure 17 – Change of load-bearing capacity at 2 mm deflection for various mixes,  $w=0.1$  mm. Rv40 (left), Dal (right).

### 5.3. Kombinerad utvärdering fiberförlust och bärförmåga

I figur 18 nedan redovisas korrelationen mellan reduktion av fiberarea och förändringen av residualbärförmågan vid 2 mm deformation. För Rv40 och Eugenia är korrelationen tydligare och främst för Rv40 där underlaget (antalet fibrer) är större till skillnad från Eugenia där antalet fibrer är litet. För Dalälvsproverna är korrelationen sämre och det har sannolikt att göra med annan påverkan på betongmatrisen av frost och urlakning vilket påverkat bärförmågan utan att fiberkorrosion är huvudorsaken.

Vid analys bör också det faktum att resultaten på fiberförlust och bärförmåga inte kommer från exakt samma provkropp utan bara samma typ beaktas.



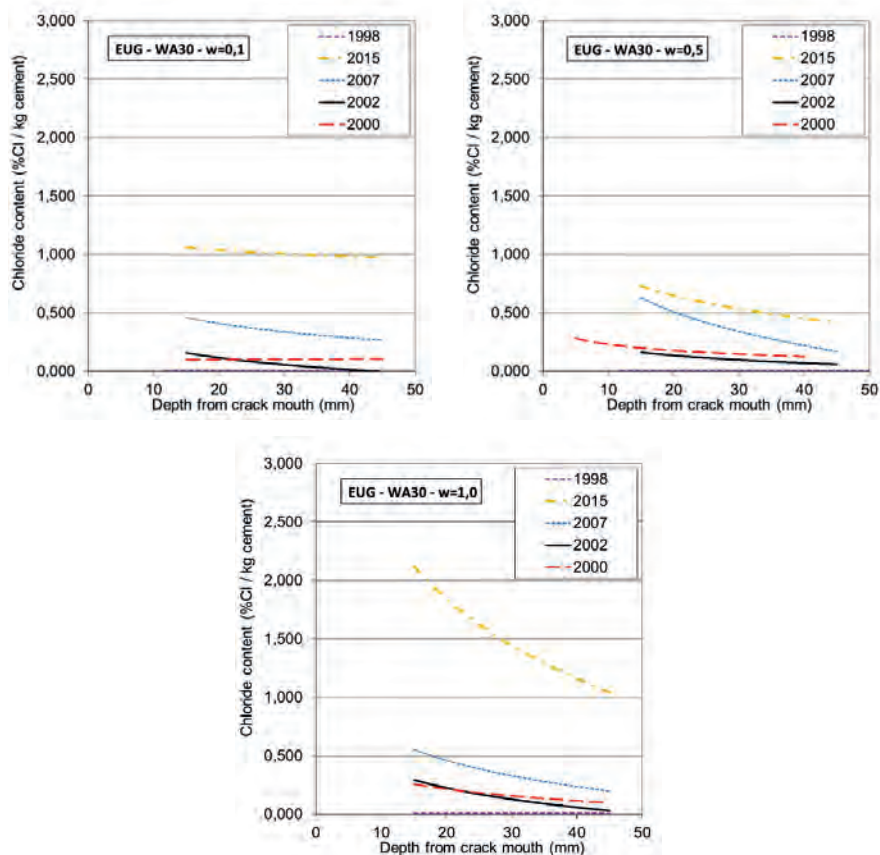
Figur 18 – Bärförmågeändring vid 2 mm deformation i relation till summerad areaförlust för mix WA30,  $w = 0,1$  mm,  $w = 0,5$  mm och  $w = 1,0$  mm. Olika exponeringsplatser.

Figure 18 – Change of load-bearing capacity at 2 mm deflection in relation to total loss of area for mix WA30,  $w = 0.1$  mm,  $w = 0.5$  mm och  $w = 1.0$  mm. Different exposure sites.

#### 5.4. Kloridmätningar

Kloridmätningarna har gjorts på prover från Eugeniattunneln vid föreliggande utvärdering. En kontroll längs sprickytan redovisas i figur 19 nedan. Det är tydligt att

en ackumulering sker med tiden och att mycket höga kloridhalter uppmäts på sprickytan.

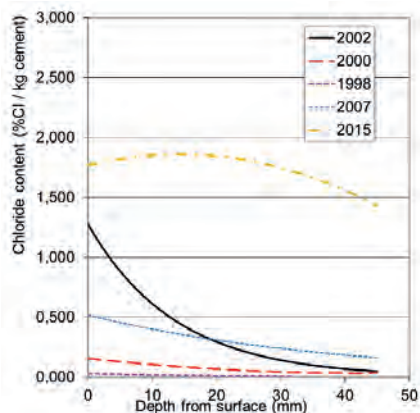


Figur 19 – Kloridkoncentration (trendade kurvor) längs sprickplan för mix WA30,  $w=0,1$  mm,  $w=0,5$  mm och  $w=1,0$  mm. Eugeniattunneln.

Figure 19 – Chloride concentration (trendlines) along crack plane for mix WA30,  $w=0.1$  mm,  $w=0.5$  mm och  $w=1.0$  mm. Eugeniattunneln.

I figur 20 nedan redovisas en traditionell kloridprofil för homogen betong. Provet uppvisar vid 2015 års utvärdering extremt höga kloridkoncentrationer även långt inne i betongen. Om resultaten är korrekta har en kraftig ökning av halterna skett sedan 2007, men det går inte heller att utesluta en ev. felmätning. I tidigare utvärderingar har dock en tydlig trend på successiv ackumulering kunnat ses. Proverna är också regnskyddade vilket förhindrar urtvättning.





Figur 20 – Kloridprofil för homogen betong (trendade kurvor) för mix WA30, EUG.  
 Figure 20 – Chloride profile for homogenous concrete (trend lines) for mix WA30, EUG.

## 5.5. Klimatdata

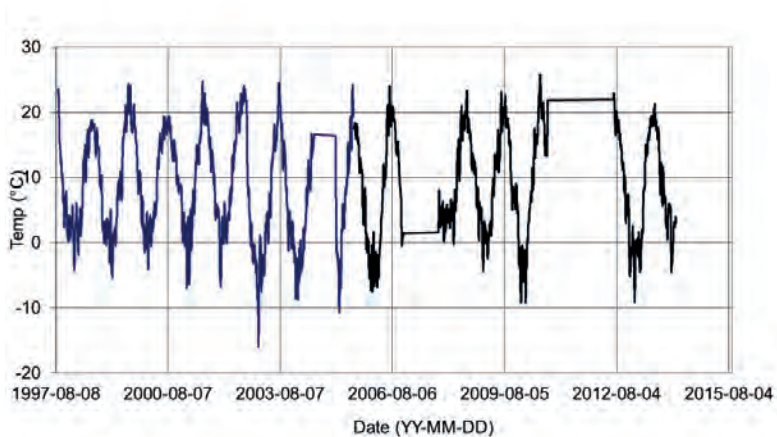
I figurerna nedan redovisas de uppmätta temperaturerna vid provplatsen i Dalälven ända från fältförsökens början. För att göra resultatpresentationen överskådlig och ge en indikation på de långsiktiga variationerna redovisas inte enskilda mätvärden. Istället redovisas resultaten som ett flytande medelvärde över en vecka för både lufttemperatur och luftfuktighet.

Vid genomgången av mätdata för luftfuktighet noterades ett mättekniskt problem vid växling av temperaturen främst vid området kring 0°C där orimligt låga värden ibland uppmättes. Förklaringen tros ligga i fenomenet att fukt frusit på givarens yta vid växlingen och därigenom har initieell uppmätts för låga RF. Efter ett tag har mätvärdet stabiliserats igen. Alla dessa data har plockats bort ur redovisningen. I några fall kan dock för låga RF uppmätts en längre period efter påfrysningen.

I både temperatur och luftfuktighetsmätningen kan horisontella partier av trendlinjen eller uppehåll ses och de motsvarar en period där mätdata saknas. Upphållen beror på att loggrar har stannat och inte ersatts förrän senare. Loggrarna har inte haft någon kontinuerlig övervakning utan endast tömms efter ett förutbestämt tidsintervall.

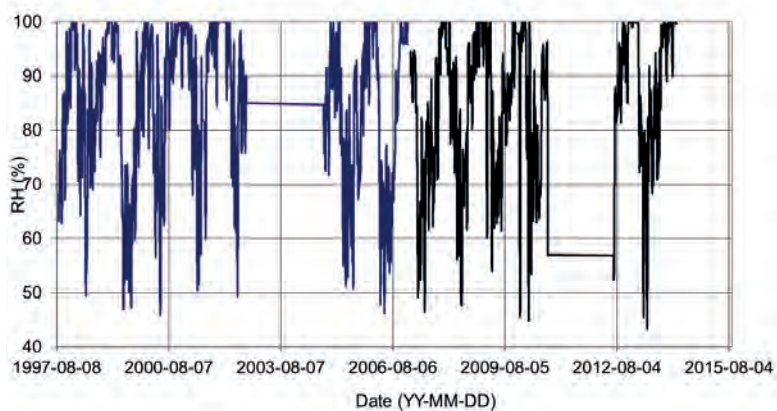
### 5.5.1. Eugenia

I figur 21 och 22 redovisas mätdata för provplatsen i Eugeniattunneln. Den beräknade medeltemperaturen för hela mätperioden är + 10,0°C och på motsvarande sätt är medelvärdet för den relativa luftfuktigheten 79,6 %. Klimatuppföljningen har gjorts på baksidan av ställningarna i mellanrummet mellan balkar och bergvägg.



Figur 21 – Uppmätta temperaturer i Eugeniattunneln, 1997-2015. Flytande veckomedel.

*Figure 21 – Measured temperatures in the Eugenia tunnel, 1997 -2015. Floating weekly average.*

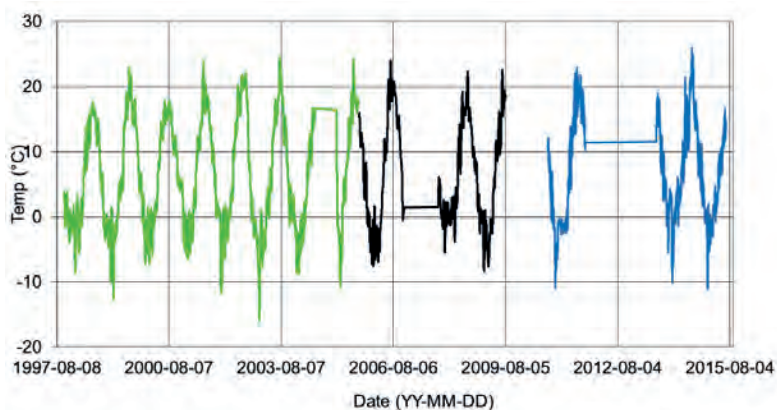


Figur 22 – Uppmätt relativ luftfuktighet i Eugeniattunneln, 1997-2015. Flytande veckomedel.

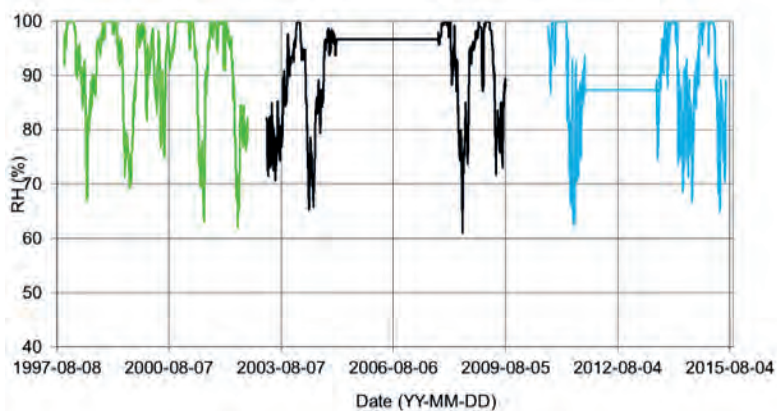
*Figure 22 – Measured relative humidity in the Eugenia tunnel, 1997 -2015. Floating weekly average.*

### 5.5.2. Dalälven

I figur 23 redovisas mätdata för Dalälven. Den beräknade medeltemperaturen för hela mätperioden är  $+6,5^{\circ}\text{C}$  och på motsvarande sätt är medelvärdet för den relativa luftfuktigheten 89 %. Klimatuppföljningen har gjort ett par decimeter över vatten- / isytan.



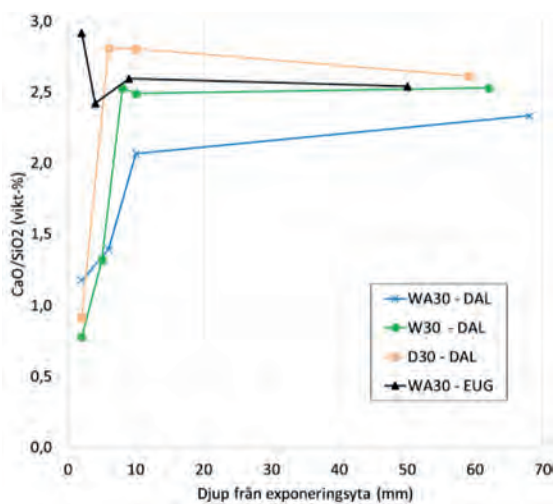
Figur 23 – Uppmätta temperaturer vid Dalälven, 1997-2015. Flytande veckomedel.  
 Figure 23 – Measured temperatures at Dalälven, 1997 -2015. Floating weekly average.



Figur 24 – Uppmätt relativ luftfuktighet vid Dalälven, 1997-2015. Flytande veckomedel.  
 Figure 24 – Measured relative humidity at Dalälven, 1997 -2015. Floating weekly average.

## 5.6. Urlakning / karbonatisering

Urlakning av betong kan ske i två olika processer där antingen betongens kalciumhydroxid urlakas ur cementpastan och sänker på så sätt halten kalciumoxid (kemanalysen redovisar alla ämnen i oxidform). Urlakningen kan också ske genom att kalcium lakas ut från den bildade kalciumsilikathydratgelen. Det går inte urskilja vilken av processerna som uppstått när de kemiska analyserna med SEM och EDS redovisar en sänkt kalciumoxidhalt. Som framgår av figur 25 nedan så har CaO/SiO<sub>2</sub>-kvoten sjunkit närmast exponeringsytan för alla prover som exponerats i Dalälven. För provet i Eugeniattunneln har närmast en ökning skett närmast ytan. För ett anläggningcement brukar kvoten vara ca. 3. Av proverna som exponerats i Dalälven har provet med våtsprutad betong och accelerator (WA30) urlakats till störst djup, medan den torrsprutade betongen har en mindre urlakning.



Figur 25 – Uppmätt CaO/SiO<sub>2</sub>-kvot på olika djup. Olika mixer, DAL och EUG.

*Figure 25 – Measured CaO/SiO<sub>2</sub>-quotient at different depths. Various mixes, DAL and EUG.*



## **6. DISKUSSION**

### **6.1. Korrosionsangrepp**

Korrosionsangreppet initierades redan efter ett år vid Rv40 där hög kloridbelastning råder. Efter 10 år var angreppet omfattande och exponeringarna avslutades då för Rv40. Utvärderingsmetodiken som använts ger att helt avrostade fibrer inte hittas vid utvärderingen, men för de som detekterats kunde en förlust om 25-40% av fiberarean ses. Sannolikt var angreppet för de större sprickvidderna betydligt större.

För prover exponerade i Eugeniattunneln var angreppet mycket begränsat fram till utvärderingen efter 2,5 år. Vid utvärderingen efter 5 år var angreppet tydligt med en förlust om 15-30% av fiberarean. Det var också före de under en kort period blev utsatt för nederbörd vid den felaktiga nedmonteringen. Vid sista utvärderingen efter 17 år ses korroderade fibrer i hela sprickzonen och för detekterade fibrer i de djupare delarna en angreppsgrad om 40-60% av fiberarean. Även här är angreppet troligen ännu större i de yttre delarna, men dessa fibrer kan ha rostet av eller gått sönder vid provprepareringen.

Prover exponerade i Dalälven uppvisar under hela perioden ett mycket begränsat korrosionsangrepp. Enstaka fibrer med stor areaförlust har detekterats, men antalet fibrer som detekterats på varje nivå är färre än 5 st. Efter 10 år ses en angreppsgrad om 10-25% för ett fåtal fibrer, och vid utvärderingen efter 17 år hittas ett par fibrer med mycket stor areaförlust (50-90%). Antalet korroderade fibrer är så litet att det bedöms ha väldigt liten inverkan på bärförmågan.

Det är tydligt att korrosionen initierades snabbast i motorvägsmiljön därefter i tunnelmiljön och i begränsad omfattning i älvmiljön. Inverkan av sprickvidden är tydlig både vid Rv40 och Eugenia men begränsad i Dalälvmiljön. Noterbart är ändå att prover med så tunna sprickor som 0,1 mm uppvisar en betydande korrosion efter 10 resp. 17 år i kloridutsatta miljöer. Fiberkorrosionen uppträder med tiden också långt ner i sprickan.

Inverkan av de olika exponerade betongmixerna är begränsad ur korrosionsangreppssynpunkt med ett undantag vilket är mixen med längre fibrer. Mixen med 40 mm fibrer korroderar betydligt mer än de med 30 mm fibrer. Vid utvärderingen efter t.ex. 5 år hade t.ex. 40 mm fibrer förlorat ca. 47% av fiberarean i de yttersta delarna medan 30 mm fibrer tappat ca. 29% av fiberarean vilket motsvarar ca. 60% större angrepp på de längre fiberna under samma tidsperiod. Det bör beaktas om man i dag studerar den vanligast förekommande fibertypen som är 35 mm långa.

### **6.2. Bärförmåga**

Bärförmågan vid små deformationer uppvisade en initial ökning för särskilt 0,1 mm sprickvidd och i något mindre omfattning för 0,5 mm sprickvidd. Detta kan ses oavsett provplats. Sannolikt berodde detta på självläkning av de tunna sprickorna. Efter 17 års exponering kvarstår en förhöjd nivå för prover med 0,1 mm sprickvidd vid små deformationer.

För alla sprickvidder uppvisade Dalälvsproverna genomgående en betydligt lägre bärförmåga vid små deformationer än övriga provplatser. Redan efter 5 år hade Dalälvsprover med sprickvidd 0,5 mm och 1 mm en bärförmågeförlust om 25-30% medan prov med sprickvidd 0,1 mm fortfarande uppvisade en ökning jämfört med startläget men nu en avtagande trend. En tidigare hypotes är att frost och urlakning påverkat förankringen av fibrer negativt och gett ett sämre beteende än de andra proverna. Märkligt nog har Dalälvsproverna senare (>5 år) legat konstant eller återhämtat sig jämfört med de andra provplatserna vid senaste utvärderingen efter 17 år, vid små deformationer. En möjlig förklaring kan vara att betongens fortsatta hydratation syns bättre i frånvaron av fiberkorrosion vilken sannolikt sänker bärförmågan vid de andra provplatserna. Att effekten av urlakning och frost skulle avta och uppvägas av hydratationsökningen är dock en faktor som talar emot förklaringsmodellen. Ytterligare en aspekt som påverkar resultatet av böjdragprovningsen är fuktillståndet i provet både under exponeringen och hur provet hanteras efter inhämtning fram till provningen. Generellt är hållfastheten lägre hos ett prov med hög fukthalt (troligt efter lång tids lagring i vatten), men för böjdragprovning har också luftlagringen ett par dagar före provningen en kraftigt reducerande effekt enl. Bonzel och Kadleček (1970). Fuktgradienten i provet skapar spänningar som sänker böjdraghållfastheten. Sannolikt har den tiden varierat mellan de olika provtillfällena vilket är en troligare förklaring till att Dalälvsproverna avviker nedåt och varierar.

Vad gäller mixtypernas inverkan på bärförmågan vid små deformationer ses vid 10 år en kraftigare sänkning för prov med 40 mm fibrer exponerade vid Rv40, men ej i Dalälven vilket kan förklaras med att fiberkorrosionen var kraftigt vid Rv40.

Vid utvärdering av bärförmågan vid större deformationer (2 mm) kan det konstateras att samtliga prover försämrat sin bärförmåga jämfört med det laboratorieexponerade provet (fram till utvärderingen vid 10 år). Efter mer än tio års exponering i de tre miljöerna har bärförmågan generellt minskat med ca. 20-60% vid 2 mm deformation och för prov med långa fibrer exponerade vid Rv40 så mycket som 80%. Minskningen har sannolikt flera anledningar där fiberkorrosion vid Rv40 och Eugenia dominerar, medan det vid Dalälven även kan härröra från frost och urlakningspåverkan på betongmatrisen även om ett mindre antal korroderade fibrer också hittats. Precis som för bärförmågan vid små deformationer har troligen fuktillståndet i provet stor betydelse för resultaten vid Dalälvsprovningen.

Initialt ska noteras att proverna i Eugeniattunneln hade en liten ökning av bärförmågan sannolikt p.g.a. fortsatt hydratation av betongen och ingen initierad korrosion. Vid Rv40 sjönk bärförmågan redan till första utvärderingstillfället efter ett år och fortsatte sedan nedåt p.g.a. kraftigt korrosionsangrepp. Dalälvsproverna är svårare att tolka eftersom en initieil sänkning av bärförmågan följts av en viss återhämtning fram till utvärderingen vid 17 år då prover med 0,1 resp. 0,5 mm sprickvidd åter sjunkit igen.

Generellt verkar sprickviddens betydelse minska med tiden och förlusten av bärförmåga är på ungefär samma nivå efter 10 resp. 17 år. Ingen annan tydlig inverkan av mixtyperna kan ses utöver prov med långa fibrer.

### 6.3. Korrelation fiberförlust och bärförmåga

Ansatsen till att korrelera förlust av fiberarea med bärförmågan vid större deformationer är tydlig där underlaget (antalet detekterade fibrer) är bättre (fler). När areaförlusten för prover exponerade vid Rv40 och Eugeniattunneln överstiger ca. 20% syns en tydlig inverkan på bärförmågan vid stora deformationer. Som en skattning ger t.ex. ca. 30% areaförlust en motsvarande bärförmågesänkning med ca.40%. Beteendet känns naturligt då fibrerna är mest aktiva vid stora deformationer. Resultaten för Dalälven är baserat på väldigt litet underlag (få detekterade fibrer) och korrelationen är också väldigt låg.

### 6.4. Kloridhalter

Redan vid utvärderingen efter 10 års exponering kunde konstateras att kloridhalterna på proverna i Eugeniattunneln ackumulerades p.g.a. den regnskyddade miljön med upprepad kloridbelastning från fordon. Längs sprickytan uppmättes i Eugeniattunneln 2007 en kloridhalt om ca. 0,57 % Cl / kg cement för en sprickvidd om 1,0 mm vilket var i storleksordningen dubbelt så mycket som vid Rv40. Vid nuvarande utvärdering efter 17 års exponering noteras en kloridkoncentration om 2,1 % Cl / kg cement för samma sprickvidd. Korrosionsangreppet är också väldigt kraftigt även för proverna i Eugeniattunneln. Frågan är också om man med den underhållstvättning som brukar genomföras lyckas reducera kloridhalterna även i sprickzonen.

Även i homogen betong har en tydlig ackumulering av klorider uppstått och mycket höga halter har uppmätts, möjligen är halterna orimligt höga för de djupare delarna av provet. Om man dessutom jämför resultaten från provet tagit på sprickytan och i homogen betong så är halterna högre för den homogena betongen vilket inte verkar rimligt. En potentiell förklaring skulle kunna vara att proverna förväxlat så att de redovisade nivåerna för homogen betong gäller för sprickytan och tvärtom.

### 6.5. Urlakning / karbonatisering

Proverna i Dalälvs miljön är tydligt påverkade av urlakning i de yttersta skiktet som legat i strömmande älvvatten. Genom den kemiska analysen ses att urlakningsfronten gått dryga 10 mm in i provet efter 17 års exponering för standardmixen (våtsprutad med accelerator), något mindre för provet utan accelerator och minst för det torrsprutade provet. En hypotes är att acceleratorn gett en grövre porstruktur och därigenom ökat urlakningen jämfört med betongen utan accelerator. Det torrsprutade provet har ett lägre vct och har därigenom en lägre permeabilitet vilket skyddat bättre mot urlakning jämfört med de våtsprutade proverna.





## 7. SLUTSATSER

Samtliga provplatserna uppvisar korrosion efter 17 års exponering, men i mycket begränsad omfattning i älvmiljön. Korrosionsangreppet är kraftigast vid Rv40 som utgör en miljö med kombinationen av hög fuktighet och relativt hög kloridbelastning. Korrosionen initierades också först vid Rv40 redan efter 1 år och sedan i Eugeniattunneln tydligt efter ca 5 år. Man kan också se att korrosionen tydligt initieras först i de yttre delarna av sprickan och senare i de djupare delarna. Tydligaste påverkan av mixtypen erhöles av prover med långa fibrer som korroderade betydligt fortare än de kortare fibrerna vilket fortsatt stärker vikten av förhållandet mellan anod och katod. Provernas sprickvidd hade mest betydelse för tiden till initiering av korrosion, men efter initiering utvecklas korrosionen i ungefär samma hastighet.

Det finns en tydlig koppling mellan en mer utvecklad fiberkorrosion och förlust av bärförmåga vilket blir särskilt tydligt vid utvärdering av bärförmågan vid stora deformationer (2 mm). Bärförmåga vid stora deformationer kan sägas huvudsakligen representera brottstadium. Samtliga prover uppvisar en försämrad bärförmåga efter exponering jämfört med laboratorieproverna som förvarats i ett konstant klimat. Bärförmågeförlusten vid stora deformationer ligger i spannet 20-60% jämfört med förväntad nivå och för längre fibrer (40 mm) är reduktionen upp till 80% på 10 år vid exponering i motorvägsmiljö. För små deformationer (representerar i någon mån bruksstadium) och små sprickvidder (0,1 mm) kunde en ökning av bärförmågan ses som verkar bestå även efter 17 års exponering. Även andra parametrar än fiberkorrosion har sannolikt påverkat resultaten från provning av bärförmågan. En av de viktigare orsakerna till lägre bärförmåga och varierande resultat på Dalälvsproverna är fuktillståndet i provkropparna. Fuktlagringen ger en generellt lägre hållfasthet än luftlagrade och en kort tids uttorkning före provning kan kraftigt reducera bärförmågan p.g.a. gradienten. Det går dock inte att utesluta att den konstaterade urlakningen och ev. frostpåverkan kan ha påverkat just Dalälvsproverna. I Dalälvsproverna noterades en urlakad zon på ca. 10 mm efter 17 år. Det konstaterades också att den vätsprutade betongen utan accelerator visade ett något bättre motstånd mot urlakning och den torrsprutade bäst motstånd även om några mm urlakning kunde ses.

Kloridmängderna i proverna vid Rv40 och Eugeniattunneln är höga efter exponeringen och i tunnelmiljön mycket höga vilket accelererat den initierade korrosionen kraftigt. Sannolikt sker en ackumulering eftersom betongen är regnskyddad inne i tunneln, men ändå utsatt för saltdimma från passerande fordon.

Det är tydligt att den förstörande utvärderingstekniken inte är optimal när korrosionsprocessen gått långt p.g.a. att "bevismaterialet" inte längre kan identifieras. De senare resultaten där korrosion pågått en längre tid riskerar att underskatta det verkliga angreppets omfattning.

Sammanfattningsvis kan konstateras att stålfiberkorrosion i sprucken sprutbetong exponerade för kloridutsatta miljöer måste förväntas uppträda med de vanligast förekommande fibertyperna. Det är inte rimligt att anta 100 års livslängd med bibehållen bärförmåga i de provade kloridutsatta miljöerna. På sikt kan urlakningen i sprutbetongen som befinner sig i vattenlinjen bli ett problem med nedsatt hållfasthet och sämre skydd för fibrer, men det är i dagsläget svårt att uttala sig om.



## **8. FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE**

Försöksuppställningen i Dalälven finns kvar för framtida utvärderingar. Det rekommenderas att hålla försöksuppställningarna ”vid liv” för framtida utvärderingar. Fokus för kommande utvärderingar kan inriktas på förnyad kontroll av ev. fiberkorrosion och framförallt förändringen av betongens sammansättning. Förslagsvis görs en ny utvärdering om först 2027 då proverna exponerats i 30 år. Eftersom klimatet varierar i mycket begränsad omfattning föreslås att de lokala mätningarna av temperatur och luftfuktighet utgår. Istället kan kommersiellt tillgängliga data på temperatur inhämtas vid framtida utvärderingar.

## **9. ERKÄNNANDEN**

Den förnyade utvärderingen av fältexponeringarna möjliggjordes genom en gemensam finansiering från BeFo och Energiforsk tillsammans för vilket jag är mycket tacksam.

Det praktiska arbetet med skötsel av försöksuppställningarna och utvärderingen av alla prover på olika sätt har genomförts genom gott samarbete med Per-Erik Thorsell och lab.personalen vid Vattenfall Research & Development i Älvkarleby. För detta riktas ett stort tack till alla inblandade.

Projektet har under alla år följts av en referensgrupp för att säkerställa relevans och kvalitet. I senaste omgången har jag tacksamt emottagit inspel och granskningssynpunkter på rapporten.



## 10. REFERENSER

**Bonzel och Kadleček (1970).** Einfluss der Nachbehandlung und des Feuchtigkeitszustands auf die Zugfestigkeit des Betons. *Beton*, 1970 (20):7 & 1970 (20):8.

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

**Nordström, E. & Thorsell, P-E. (2009).** *Erfarenheter från 10 års fältexponering av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong*. BeFo rapport nr. 88.

**Wirje, A. & Offrell, P. (1996).** *Kartering av miljölast, kloridpenetration vid Rv40*. Examensarbete, Lunds Tekniska Högskola, rapport nr. TVBM-7106.



# BeFo



Box 5501  
SE-114 85 Stockholm

[info@befoonline.org](mailto:info@befoonline.org) • [www.befoonline.org](http://www.befoonline.org)  
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773