



LÅNGTIDSEXPONERING AV SPRUCKEN STÅLFIBERARMERAD SPRUTBETONG

Erik Nordström

Omslagsfoto: Provplatsen i Dalälven.

STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

LÅNGTIDSEXPONERING AV SPRUCKEN STÅLFIBERARMERAD SPRUTBETONG

**Long-term exposure of cracked steel fibre
reinforced sprayed concrete**

Erik Nordström

BeFo Rapport 262
Stockholm 2024
ISSN 1104-1773
ISRN BEFO-R-262-SE

FÖRORD

Vilka sprickvidder som är acceptabla i stålfiberarmerad sprutbetong för att uppnå de långa livslängder som ofta krävs för anläggningskonstruktioner, har länge varit oklart. En serie studier, inklusive en långtidsexponering av spruckna stålfiberarmerade sprutbetongprover, initierades i mitten på 1990-talet. Denna rapport utgör den sista i den 25 år långa och världsunika provserien.

Denna avslutande rapport har finansierats i samverkan mellan BeFo, Energiforsk och Vattenfall R&D. Till stöd har Erik haft en referensgrupp bestående av Per Vedin, Carl-Oskar Nilsson, Tommy Ellison, Anders Ansell, Iad Saleh, Magnus Hansson och Patrik Vidstrand.

Stockholm

Patrik Vidstrand

SAMMANFATTNING

Vilka sprickvidder som är acceptabla i stålfiberarmerad sprutbetong för att uppnå de långa livslängder som ofta krävs för anläggningskonstruktioner, har länge varit oklart. En serie studier, inklusive en långtidsexponering av spruckna stålfiberarmerade sprutbetongprover, initierades i mitten på 1990-talet. Fokus har hela tiden varit att bygga kunskap kring långsiktig bärförmåga i sprucket tillstånd för stålfiberarmerad sprutbetong använd i olika miljöer och tillämpningar.

Fältexponeringarna vid Eugeniattunneln i Stockholm (EUG), RV40 utanför Borås och Dalälven, Älvkarleby (DAL) har utvärderats vid flera tillfällen tidigare under perioden 1997–2022. I föreliggande rapport sammanställs resultaten från den sista utvärderingen 2022 vid provplatsen i Dalälven efter 25 års exponering. Samtliga ca. 300 prover från de tre olika provplatserna har därmed hämtats in och fältexponeringarna är avslutade. Analys med fokus på den senaste utvärderingen sammanfattas i rapporten.

De parametrar som har studerats vid utvärderingen är erosionsdjup, spricklast vid böjdragprov, återstående residualbärförmåga vid fortsatt böjprovning, omfattning på ev. fiberkorrosion, strukturanalys i tunnslip och en kemisk profil för att detektera graden av urlakning. Prover som exponerats till hälften nedsänkta i Dalälven uppvisar några millimeters erosion av betongens yta. Tunnslipsanalyser och kemiska analyser visar att betongen urlakats succesivt ned till ca. 10–15 mm från ytan efter 25 år. Sannolikt har även frost bidragit till avskalningen/erosionen som del av en cykel med urlakning, frost och mekanisk påverkan av is.

Bärförmågan i sprucket tillstånd beror på en kombination av stålfiberernas och betongens prestanda. Resultaten från fältexponeringen visar att stålfiberkorrosion kan uppstå i sprickzonen, vilket reducerar tvärsnittsarean och därigenom bärförmågan. Vidare ses även att nedbrytning av betongen till exempel på grund av urlakning eller frost kan göra att fibrer är sämre förankrade vilket också kan sänka bärförmågan. Det är svårt att dra en gräns för vilken mekanism som är dominerande i det enskilda fallet. Men det är tydligt att det finns kvarstående forskningsbehov kring just detta.

Stålfiberkorrosion är identifierad vid alla provplatser och alla sprickvidder. Skillnaden består främst i tiden till initiering av korrosion och korrosionshastigheten där båda är starkt beroende på tillgång till klorider och fukt vilket stämmer bra med gängse principer för korrosion. Dalälvmiljön saknar klorider, men har god tillgång till fukt vilket gav lång tid till initiering och långsam korrosion. Prover vid RV40 hade god tillgång till klorider och oskyddade mot nederbörd vilket gav snabb initiering och snabb korrosion. I EUG blev tiden till initiering och hastigheten ett mellanting främst på grund av begränsad tillgång till fukt i tunnelmiljön

Vid små deformationer (bruksgränstillstånd) och tunna sprickvidder (0,1 mm) har den detekterade stålfiberkorrosionen relativt liten inverkan på bärförmågan. Sannolikt

beroende på att betongens prestanda har större betydelse än vid stora deformationer. En ökning kan t.om. ses med tiden.

Vid medelstora sprickvidder (0,5 mm) är bärförmågan i princip oförändrad vid små deformationer efter 5–10 års exponering vid EUG och RV40, trots pågående korrosion, medan den för Dalälvsproverna är reducerad. Vid stor sprickvidd (1,0 mm) är spridningen stor i resultaten, men generellt uppmäts en reducerad bärförmåga. Eftersom bärförmågan sjönk tidigt i Dalälvs miljön utan detekterad korrosion är försämrad prestanda på betongmaterialet den troliga förklaringen för de proverna. För EUG och RV40 kan det vara inverkan av korrosion, men även frostpåverkan på betongen som är orsaken.

Vid 2 mm deformation, vilket motsvarar större deformationer (brottgränstillstånd) i en verklig konstruktion, är bärförmågan oavsett sprickvidd och mix-typ ca. 30 - 50% lägre än förväntat efter 25 års exponering i Dalälvs miljön. Även exponerade prover utan sprickor uppvisar samma beteende. Orsaken är sannolikt en reduktion av betongens prestanda genom frostpåverkan kombinerat med urlakning. När korrosion initierats bidrar även det negativt till residualbärförmågan vid böjprovning. Samma tendenser kunde ses i tidigare utvärderingar av prover från RV40 och EUG, men med tydligare koppling till att fiberkorrosionen var en bidragande faktor. Troligen bidrar saltfrostnedbrytning ytterligare till degraderingen.

Studien visar att inte ens en så hårfin spricka som 0,1 mm ger fullgott motstånd mot stålfiberkorrosion, oavsett miljö. Tiden till initiering blir dock olika beroende på om miljön är korrosionsaggressiv eller inte. Vidare har studien tydligt pekat på det faktum att även andra nedbrytningsmekanismer, ofta i kombination, kan påverka sprutbetongens prestanda negativt. En generell rekommendation är därför att sträva mot goda materialval och högkvalitativt utförande för att få en sprickfri och beständig sprutbetong för lång livslängd.

Nyckelord: sprutbetong, stålfibrer, beständighet, bärförmåga, korrosion, frost

SUMMARY

For a long time, it has been uncertain if there are any acceptable crack widths for steel fibre reinforced sprayed concrete to reach the long service life that often is required for civil structures. A series of studies, including a long-term field exposure of cracked steel fibre reinforced sprayed concrete, was initiated in the mid-1990s. Focus has all the time been to create knowledge around long-term loadbearing capacity at cracked state for steel fibre reinforced sprayed concrete used in various environments and applications.

The field exposures in the Eugenia tunnel in Stockholm (EUG), along Roadway 40 outside of Borås (RV40) and the river Dalälven in Älvkarleby (DAL) has been evaluated on several occasions during the period 1997-2022. In the current report results are summarized from the last evaluation on the test site in Dalälven after 25 years of exposure. All 300 samples from the three exposure sites have now been collected and exposures are now completed. Analysis with focus on the last evaluation is summarized in this report.

Parameters evaluated are erosion depth, peak crack load in bending, remaining residual load-bearing capacity in continued flexural testing, extent of fibre corrosion, micro-structure analysis with thin sections and chemical profiling to detect degree of leaching.

Samples exposed partly submerged in the river Dalälven show a few millimeters erosion of the concrete surface. Thin sections and chemical analysis show that leaching has reached 10-15 mm into the sprayed concrete after 25 years of exposure. Freeze-thaw has likely contributed to the scaling/erosion as part of a cycle with leaching, freeze-thaw and mechanical erosion by ice.

The load-bearing capacity at cracked state is dependent on a combination of the performance of the steel fibres and the sprayed concrete. Results from the field exposures show that corrosion can occur in the crack zone which reduce the fibre area and thereby the load-bearing capacity. Further on it is shown that degradation due to e.g., leaching and freeze-thaw can reduce the anchoring of the fibres which also reduce the load-bearing capacity. It is difficult to evaluate if any of the two mechanisms are the dominant one for a single test. It is obvious that there are remaining research needs around this.

Steel fibre corrosion is initiated at all test sites for all crack widths. The differences is mostly related to the time to initiation of corrosion and the rate of corrosion where both are largely dependent on the presence, or access, to chlorides and humidity. That goes very much in line with the principles for corrosion in general. The environment in Dalälven has no presence of chlorides but has good access to humidity which gave a longer time to initiation of corrosion and low rate of corrosion. Samples along RV40 had high exposure to chlorides and was not sheltered from rain which gave a short time to initiation of corrosion and a high rate of corrosion. At the site EUG time for initiation and rate of corrosion was in between, mainly due to limited access to humidity in the tunnel.

At small deflections (service-limit state) and thin crack widths (0.1 mm) the detected steel fibre corrosion has a limited impact on the load-bearing capacity. Even a slight increase can be seen with time. Likely depending on the fact that the concrete properties are more important than for large deformations when the steel fibre properties are more important.

The load-bearing capacity for medium crack widths (0,5 mm) is in principle unaffected for small deflections after 5-10 years of exposure at EUG or RV40, despite ongoing corrosion. For the samples from Dalälven the capacity is reduced. At large crack widths (1,0 mm) the spread is large in the results, but generally a reduced load-bearing capacity is detected. Since the load-bearing capacity decreased early in the river Dalälven without detected corrosion, reduced concrete performance is the most probable explanation. For EUG and RV40 samples could be affected by corrosion, but also freeze-thaw degradation of the concrete can be the cause.

At 2 mm deflection, that corresponds to larger deflections in a real structure (ultimate limit strength), the load-bearing capacity is 30-50% lower than expected after 25 years of exposure. This is without connection to the crack width and mix-type. Also exposed samples without crack show the same behaviors. The reason is likely a reduction of the concrete properties via frost action combined with leaching.

When corrosion has been initiated it contributes negatively to the residual load-bearing capacity. Same tendency could be seen in previous evaluations of samples from RV40 and EUG, but with a stronger connection to that steel fibre corrosion was a contribution factor. Freeze-thaw degradation with presence of chlorides is also further contributing to the degradation.

The study shows that not even a hairline crack of 0.1 mm will give a full protection towards steel fibre corrosion, no matter exposure environment. The time to initiation will be different depending on how aggressive the environment is in terms of corrosion. The study further has pointed out the fact that also other degradation mechanisms, often in combination, can influence the performance of the sprayed concrete negatively. A general recommendation is to strive for good selection of material parameters and well performed construction works to get a crack free and durable sprayed concrete for long service-life.

Keywords: sprayed concrete, steel fibers, durability, load-bearing capacity, corrosion, freeze-thaw action

INNEHÅLL

1. INTRODUKTION	1
2. SYFTE OCH MÅL	3
3. METODIK	5
3.1 Fältexponeringar i Dalälven.....	5
3.2 Exponerad sprutbetong	5
3.3 Provning efter exponering	7
3.4 Analysmetoder	7
4. RESULTAT	13
4.1 Okulär inspektion och erosionsdjup.....	13
4.2 Spricklast	15
4.3 Residualbärförmåga vid böjdragprovning	16
4.4 Korrosionsangrepp.....	21
4.5 Strukturanalys	23
4.6 Kemisk analys.....	25
5. DISKUSSION	29
5.1 Bärförmåga	29
5.2 Korrosion	30
5.3 Betongstatus.....	31
6. REFERENSER.....	35

BILAGA A – Mätning erosionsdjup

BILAGA B – RISE rapport: Analys av sprutbetong

1. INTRODUKTION

I styrande dokument från till exempel Trafikverket och inom kraftindustrin finns generella krav på mycket långa livslängder (>100 år) för nya konstruktioner och kunskapen om exempelvis vilka sprickvidder som är acceptabla i fiberarmerad sprutbetong för att uppnå dessa livslängder är fortsatt osäkra. Det är bara delvis utrett hur fiberkorrosion påverkar bärförmågan och framför allt ev. förändring av brottförloppet om ett korrosionsangrepp pågår. Vid vilken omfattning av ett korrosionsangrepp övergår brottet från att vara ett duktilt till ett sprött brott vid överlast till exempel orsakat av ett blockutfall. Långvarig kontakt med vatten (med eller utan klorider) och påverkan på såväl stålfiberarmeringen som själva betongmatrisen ökar i första hand risken för korrosion. Det verkar också kunna ge upphov till beständighetsproblem i form av urlakning eller frostnedbrytning och därigenom en försvagad betong med sänkt bärförmåga vilket riskerar sänka hela förstärkningssystemets prestanda.

Inledande litteraturstudier och fältinventeringar av gamla sprutbetongförstärkningar finns rapporterade i Nordström (1995) och Nordström (1996). År 1997 startade ett fältexponeringsprojekt med stålfiberarmerad sprutbetong finansierat av dåvarande SveBeFo, Vägverket och Elforsk. Syftet med projektet är att skapa underlag för att värdera risken för korrosion och påföljande förändring av bärförmågan i stålfiberarmerad sprutbetong som spruckit. Exponering har genomförts vid Rv40 (RV40), Eugeniattunneln (EUG) och i Dalälven (DAL) för att simulera några vanligen förekommande miljöer. Uppställningarna vid Rv40 och Eugenia avslutades år 2007 resp. 2013. Prover i Dalälven har däremot fortsatt exponerats. Rapporteringar har gjorts i flera omgångar, bland annat i Nordström (2005) och Nordström (2016). Arbetet och försöken har refererats i ett flertal artiklar till exempel Thomas & Bernard (2021) och Aldrian et al (2020). Nyttiggörande av resultaten gällande inverkan på bärförmåga vid fiberkorrosion i sprickor har även gjorts av Ansell et al. (2020).

Utvärderingar av fältexponeringarna har tidigare genomförts efter 1, 2,5, 5, 10 och 17 år. Resultaten hittills pekar i korthet på att proverna som exponerats i en miljö med tillgång till klorider från tölsaltning uppvisar kraftigast korrosion. Mest aggressiv har miljön vid Rv40 varit med höga kloridexponeringar i kombination med exponering för nederbörd. Korrosionsangreppet efter 10 år var omfattande. Prover från Eugeniattunneln har tidigare visat begränsad korrosion, men vid sista utvärderingen uppvisades tydlig korrosion och hög ackumulering av klorider troligen på grund av avsaknad av nederbörd som tvättar bort en del av kloriderna. Prover i Dalälvmiljön hade vid 17-årsutvärderingen börjat uppvisa fiberkorrosion, och den höga tillgången till fukt sannolikt i kombination med frost och urlakning, har orsakat en nedbrytning av betongmatrisen vilket också påverkar sprutbetongens prestanda negativt.

De nu 25-åriga fältexponeringarna vid provplatsen i Dalälven vid Älvkarleby har avslutats och resultaten från undersökningarna redovisas i föreliggande rapport.

2. SYFTE OCH MÅL

Syftet med studien har allt sedan 1997 varit att nyttiggöra resultaten från de idag världsunika långtidsexponeringarna av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong i olika miljöer, för att skapa en bättre grund till livslängdsbedömningar på de konstruktionstyper som fältmiljöerna representerar. Långtidserfarenheterna efter så lång tid som 25 år med fältexponering bedöms ha ett stort värde för detta.

Syftet är vidare att skapa kunskapsunderlag gällande risken för försämrad prestanda hos stålfiberarmerad sprutbetong i samband med sprickbildning i miljöer med hög fuktbelastning och närvaro av frost. Framtagen kunskap kan användas vid bedömning av acceptabla sprickvidder vid kvalitetskontroll i entreprenadskedet eller vid inspektioner under driftstiden. Definition av acceptabla sprickvidder i olika miljöer syftar till att minimera risken för att stålfiberkorrosion blir ett hot mot konstruktionernas långsiktiga bärförmåga.

Därtill söker studien utröna om andra mekanismer än stålfiberkorrosion kan vara avgörande för konstruktionernas livslängd i miljöer där hög fuktighet, frost och strömmande vatten kombineras.

Målet med undersökningarna är primärt att dokumentera ev. förändringar av residualbärförmågan, och detektera ev. fiberkorrosion samt påverkan av frost och ev. kemiska förändringar så som urlakning av sprutbetongen. Fokus i arbetet är huvudsakligen utvärderingen av de kvarvarande fältproverna i Älvkarleby som nu hämtas in.

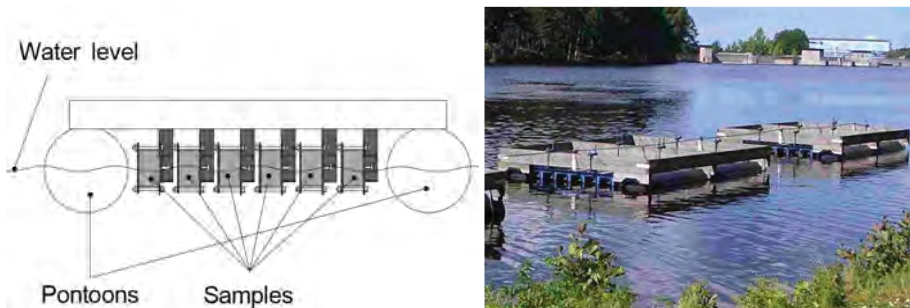
3. METODIK

En detaljerad beskrivning av försöksuppställning och metoder för utvärdering av fältexponeringarna ges i bland annat Nordström (2005) och (2016). Därför ges enbart en kort övergripande beskrivning av detta i föreliggande rapport.

3.1 Fältexponeringar i Dalälven

Proverna i Dalälven vid Älvkarleby exponeras ungefär till hälften nedsänkta i älvvatten och med uppstickande del i luft sedan starten 1997. Miljön kan kategoriseras i exponeringsklass XF3/XC4 enligt SS-EN 206-1 (2021) vilket motsvarar t.ex. bergskärningar vid intag/utlopp och tunnelmynningar till vattenkraftverk eller trafikutrymmet för järnvägstunnlar.

En schematisk tvärsnitt och ett foto över fältexponeringarna i Dalälven vid Älvkarleby redovisas i Figur 1.



Figur 1. Försöksuppställning Älvkarleby.
Figure 1. Exposure arrangement in Älvkarleby.

3.2 Exponerad sprutbetong

Vid exponeringsplatsen i Dalälven har fyra typer av sprutbetong använts och två typer av stålfibrer. Provkroppsformatet motsvarar, de vanligaste, balkarna för rutinprovning av sprutbetong genom böjdragprovning (500 x 75 x 125 mm). Balkarna har sågats ut ur större provkroppar. I Tabell 1 redovisas de olika sprutbetongtyperna som exponerats. Proverna förbelastades till tre olika sprickvidder (0,1; 0,5 och 1,0 mm) och det har även funnits ospräckta prover. Sprutbetongens beståndsdelar och sammansättning för de olika mixerna redovisas i Tabell 2 nedan. Totalt fanns 17 st provkroppar kvar vid exponeringsplatsen och samtliga inhämtades.

Tabell 1. Använda sprutbetongtyper.
Table 1. Used types of sprayed concrete.

Mix ¹	Våt-sprutning	Torr-sprutning	Accelerator	Dramix 30/0,5 ²	Dramix 40/0,5	Antal prover
WA30	x		x	x		8
W30	x			x		3
WA40	x		x		x	2
D30		x		x		4

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

² Nomenklaturen vid tiden var fiberlängd/diameter i mm

Tabell 2. Sammansättning på exponerad sprutbetong.
Table 2. Mix-design for exposed sprayed concrete.

		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	-	-	-	486
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

Tabell 3. Sprickvidder för de olika sprutbetongtyperna.
Table 3. Mix-design for exposed sprayed concrete.

Mix ¹	0 mm	0,1 mm	0,5 mm	1,0 mm
WA30	x	x	x	x
W30		x	x	
WA40			x	
D30		x	x	

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

² Nomenklaturen vid tiden var fiberlängd/diameter i mm

3.3 Provning efter exponering

I syfte att studera vilken påverkan som långtidsexponeringen haft på sprutbetongens egenskaper har ett antal parametrar studerats och jämförts vid de olika utvärderingstillfällena. Primärt har följande studerats för proverna i älvmiljö:

- Okulär syn av provkroppar
- Residualbärförmåga vid fortsatt böjdragprovning
- Korrosionsangrepp på frilagda fibrer från sprickzonen

Vid den senaste utvärderingen (Nordström, 2016) kompletterades utvärderingen med att studera även ev. påverkan på betongstrukturen genom kemisk analys för att kvantifiera urlakning i den del som legat nedsänkt i vattnet. I nuvarande utvärdering har nya kemiska analyser genomförts tillsammans med strukturanalys genom tunnslip för att detektera ev. andra långtidsförändringar och nedbrytningsfenomen i betongmatrisen. Jämförelsen görs med utvärderingen 2016 och med referensprov långt in i provkroppen som bedöms opåverkad.

Eftersom den del av provet som legat nersänkt i vatten också uppvisar erosion/nötning/avflagning har dess omfattning kvantifierats genom att mäta detta.

3.4 Analyismetoder

För att få en kontinuitet och jämförbarhet i hur prover har påverkats över tid sedan starten för 25 år sedan har samma metoder för att analysera förändringarna använts även vid detta utvärderingstillfälle. Metodikerna beskrivs övergripande i Nordström (2016) och mer i detalj i Nordström (2005).

3.4.1 Erosionsdjup

Uppmätningen av hur mycket som eroderats/avflagats från den vattenexponerade delen redovisas i millimeter för två valda snitt på vardera sida om sprickan. I Figur 2 visas läget för uppmätningen som valdes till tredjedelspunkterna av balkens längd. Djupet mäts relativt den opåverkade delen ovanför vattenlinjen. Resultaten redovisas sedan som ett medelvärde för respektive betongtyp.



Figur 2. Läge för mätning av erosionsgrad (röda streck).
Figure 2. Position for measuring degree of erosion (red lines).

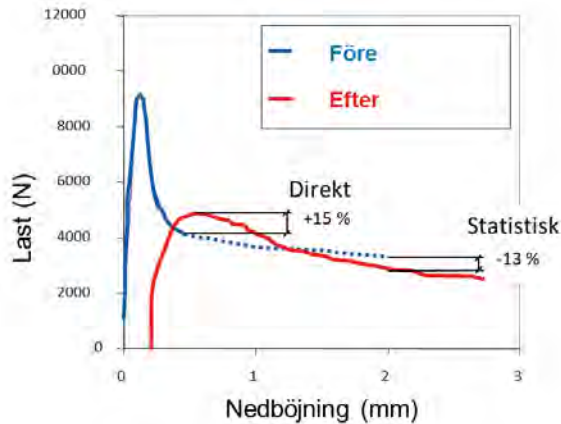
3.4.2 Spricklast

En genomgång av den ursprungliga spricklasten för proverna innan exponeringen startade 1997 har genomförts och sammanställts. Syftet har varit att bättre kunna relatera förändringar med tiden även till ev. själva betongens egenskaper. Effekten av exponering i fält på betongen har studerats genom en analys av spricklasten för de ospräckta balkarna efter olika lång tids exponering.

Underlaget från själva betongens eventuella förändringar över tiden har även använts för att bättre kunna tolka förändringen av residualbärförmågan efter exponering.

3.4.3 Residualbärförmåga vid böjdragprovning

På samma sätt som tidigare har utvärderingen av förändringen efter exponering, jämfört med när böjdragprovningen avslutades före exponeringen, genomförts på två olika sätt. Direkt jämförelse görs mellan den last som provet hade före avlastning och den maximala nivå som nås vid återbelastningen. Direkt utvärdering anses representera bärförmågeförändringen under böjdragprovning vid små deformationer (bruksgränstillstånd). Den statistiska jämförelsen innebär att lastkapaciteten vid 2 mm nedböjning efter exponering jämförs med den prognosticerade vid spräckningen av provet före exponering om belastningen hade fortsatt till 2 mm nedböjning vid första tillfället. Se Nordström (2005) för bakgrundsdetaljer kring den statistiska jämförelsen. Valet av just 2 mm nedböjning baseras på att det är vanligt med krav på bärförmåga/vid just den deformationen. Den statistiska utvärderingen antas motsvara bärförmågeförändringen under böjdrag vid större deformationer (brottgränstillstånd). I Figur 3 illustreras de två olika utvärderingssätten.



Figur 3. Princip för direkt och statistisk utvärdering av residual bärförmågeförändring vid böjdragprovning.

Figure 3. Principle for direct and statistical evaluation of residual loadbearing capacity at flexural testing.

3.4.4 Korrosionsangrepp

De fibrer som hittas med ett korrosionsangrepp omgivet av friskt stål är de som antas ha passerat sprickzonen. Antalet identifierade fibrer sammanställs för respektive nivå från sprickmyningen (tre nivåer). Fibrer som korroderat av eller gått av vid hantering av proverna kommer inte att hittas eftersom de även skulle kunna vara fibrer som exponerats vid en sågad yta.

Omfattningen av det eventuella korrosionsangreppet kvantifieras som en minskning av fiberns tvärsnittsarea i sprickzonen. På samma sätt som vid utvärderingen i Nordström (2016) så redovisas den uppmätta fiberareaförlusten, för de korroderade fibrer som identifierats, relativt deras ursprungliga area. Utvecklingen över tid och hur det skiljer sig mellan olika betongtyper, sprickvidder, fiberlängd och mellan de ursprungliga tre exponeringsplatserna utvärderas. En sammanställning över antalet fibrer som ligger till grund för skattningen av korrosionsangreppet görs också.

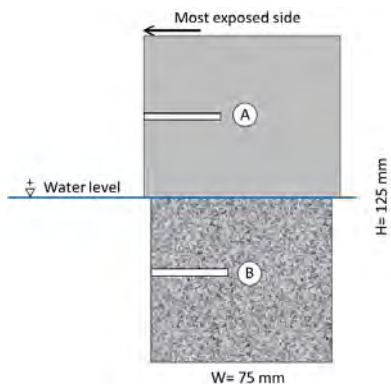
3.4.5 Strukturanalys och kemisk analys

Provuttag

Förberedelserna för strukturanalys och kemisk analys bestod i att göra provuttag ur balkar från de tre olika betongtyperna som exponerats. I Figur 4 visas ett exempel på prov som legat till hälften nedsänkt i vatten vid exponeringsplatsen i Dalälven sedan 1997 (balk för böjdragprovning, efter genomfört test). Uttagsområdet är indikerat genom den svarta rektangeln i bilden. I provområdet har analyserna gjorts både under och över vattenytan vilket illustreras i Figur 7 som position A och B. I Tabell 4 redovisas en sammanställning av vilka prover som tagits ut och för vilken typ av analys.



Figur 4. Område för provuttag till struktur- och kemanalys.
Figure 4. Area for sample to structure and chemical analysis.



Figur 5. Tvärsnitt på balk med position för provuttag (A+B).
Figure 5. Cross-section of beam with position for sampling (A+B).

Tabell 4. Tunnslips- och kemiska analyser.
Table 4. Thin sections and chemical analyses.

	Position	WA30	W30	D30
Prov		5:13A	7:5A	D:13B
Strukturanalys med tunnslip	A	x ¹		
	B	x	x	x
Kemisk analys	A	x		
	B	x	x	x

¹ Provet benämns 5:13A-ref

Strukturanalys via tunnslipsprover

Eftersom sprutbetongen redan vid förra utvärderingen uppvisade erosionsskador på den del av balken som legat nedsänkt i vatten är det av intresse att studera själva betongmatrisen och ev. långtidsförändringar som kan detekteras. Undersökningen gjordes genom strukturanalys på tunnslipsprover.

Tunnslipsproverna tillverkades av utsågad betong impregnerad med fluorescerande epoxi. Tunnslipens storlek är 45x25 mm² och består av områden orienterade vinkelrätt mot betongens yta och omfattar djup 0 till ca. 45 mm i betongen.

Strukturanalys av betongen i tunnslip gjordes med hjälp av polarisationsmikroskop (förstoring 1000 ggr). Ljuskällor för vanligt ljus och UV-ljus användes vid utvärdering av tunnslip.

Kemisk sammansättning

Ur analysen av sprutbetongens kemiska sammansättning på olika djup från den eroderade ytan har fokus lagts på att studera förhållandet mellan kalciumoxid och kiseloxid eftersom det ger en uppfattning om urlakningsgraden hos betongen. Resultaten kan jämföras med utvärderingen efter 17 års exponering.

Skivor med tjocklek ca 5 mm sågades ut från betongproverna enligt Figur 5 och de knäcktes sedan vinkelrätt mot betongens yta. Brottytorna analyserades därefter med avseende på kemisk sammansättning i svepelektronmikroskop (SEM) utrustat med sekundära elektrondetektor (SE-detektor) och energidispersivt röntgenspektroskop (EDS). Alla analysområden kontrollerades först med SE-detektor för att undvika inblandning av ballast i analyserna. Varje enskilt analysområde har storlek 0,2x0,1 mm, med längd 0,2 mm orienterad parallellt med betongens yta. EDS-analysen omfattar grundämnen från och med atomnummer 11, dvs natrium eller tyngre. Resultaten från EDS-analyserna är omräknade till oxider och normaliserade till 100 vikt%. Kvantifieringen av halterna kontrollerades mot ett referensprov som består av ett Portlandcement med känd kemisk sammansättning. Mätosäkerhet för halter av CaO och SiO₂ i varje enskild analys uppskattas till +/-1 vikt%.

4. RESULTAT

4.1 Okulär inspektion och erosionsdjup

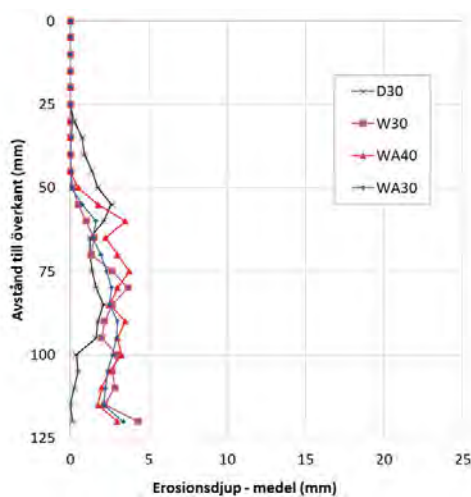
Samtliga inhämtade balkar inspekterades okulärt för att identifiera större avvikelser och det är tydligt att erosionen av betongen under vattenlinjen är påtaglig för alla prover. Det går inte vid den okulära synen se några tydliga skillnader mellan de olika typerna av sprutbetong. I Figur 6 visas del av ett prov där erosionen under vattenlinjen syns tydligt, och i figuren ses även att erosionen inte är lika tydlig i läget där plattstålet som använts för att skruva fast provet täckt ytan (vänster ände på balken). Tillgången till fukt och låg temperatur borde varit lika, men ytan har inte exponerats för skav från is och strömmande vatten på samma sätt.



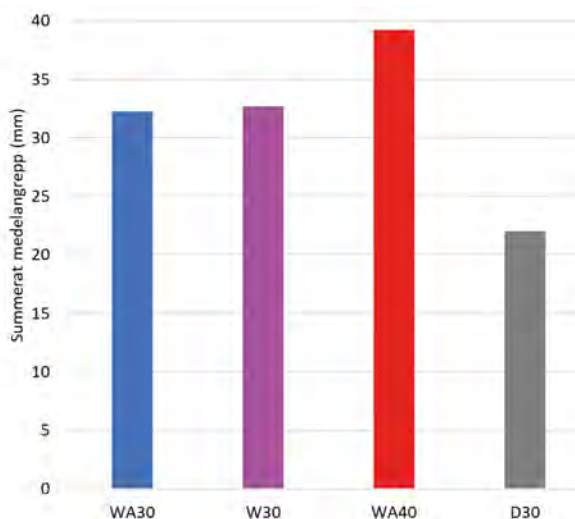
Figur 6. Eroderad och opåverkad yta (under fästplatta).
Figure 6. Eroded and unaffected surface (under mounting plate)

Någon mätning av erosionens omfattning har inte gjorts vid tidigare utvärderingar, och därför finns ingen dokumentation om hur utvecklingen har förändrats med tiden. Resultaten från den mer systematiska uppmätningen vid det här tillfället redovisas i Figur 7 som ett medelvärde för respektive betongtyp. Fullständiga resultat från mätningen återfinns i bilaga A. Tydligt att det är stor spridning i angreppet eftersom djupet exempelvis beror på hur långt gången ballastfriläggningen är vid varje enskild mätpunkt. I redovisningen har mätpunkten på 125 mm avstånd från balkens överkant tagits bort då erosionen på undersidan annars spelar in. För att ytterligare söka kvantifiera erosionsgraden och se skillnader mellan de olika mixtyperna har även en summering av medelavflagningen gjorts. Resultaten presenteras i Figur 8. Ur de båda diagrammen ses att den torrsprutade betongen uppvisar en mindre omfattning på erosionen än de

våtsprutade proverna. De våtsprutade proverna med 40 mm fibrer uppvisar det största medelangreppet i läget för mätningarna. För att kunna jämföra med dagens krav på t.ex. frostbeständighet hos sprutbetong har en skattning av avflagningen gjorts i enheten kg/m^2 på samma sätt som vid frostprovning enligt SS 137244 (2019). Resultaten pekar mot en ungefärlig avflagning på $5,2 - 6,3 \text{ kg/m}^2$ för våtsprutad betong och $3,1 \text{ kg/m}^2$ för torrsprutad betong. Det är en kraftig avflagning då det för acceptabel frostbeständighet krävs att värdet inte överstiger $1,0 \text{ kg/m}^2$. Jämförelsen är endast för att sätta avflagningen i relation till standardiserad provning, men i fältexponeringarna tillkommer också yturlakning och erosion vilket gör att en direkt jämförelse inte är möjlig.



Figur 7. Medeldjup för ensidig erosion per mix-typ.
Figure 7. Average erosion depth per mix-type.



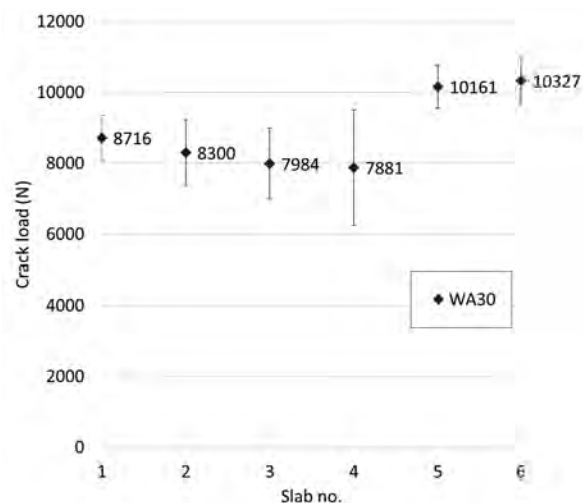
Figur 8. Summerad medelerosion per mix-typ.

Figure 8. Summed up average erosion per mix-type.

4.2 Spricklast

Det är ett känt faktum att den vanligast förekommande metoden med balkprovning av residualbärförmåga ger stora spridningar i resultat. Framst på grund av kort spricklängd vilket påverkas av lokala variationer i betongens egenskaper och vid uppsprickning huruvida stålfibrer fördelat sig väl eller inte enligt Östlund et al. (2023).

Varje balk som har exponerats har också sitt ursprung i ett antal stora plattor som balkarna sedan sågats ut ifrån. Eftersom betongen till respektive platta tillverkades i många separata satser går det inte att utesluta vissa skillnader vid blandningen av betong även om samma recept användes för respektive betongsort. Sprutprocessen var också manuell och intermittent, på grund av laboratorieskalan, vilket också kan ha gett variationer i kvalitet. En sammanställning av de spricklaster som uppnåddes vid första böjprov tillfället redovisas för mix WA30 i Figur 9 och resultaten är baserade på 98 balkprover. Proverna är hämtade ur sex olika plattor. I figuren visas även standardavvikelsen för respektive platta. Det är tydligt att det finns variationer i sprickspänningen för de olika plattorna även om avsikten var att de skulle bli lika. Framst påverkas spricklasten, men det går inte att utesluta att även residualbärförmågan påverkats, trots att den utvärderingen huvudsakligen baseras på beteendet efter uppsprickning. När balken har spruckit påverkas prestandan framst av fibrerna som ger residualbärförmåga genom att dras ur betongen.



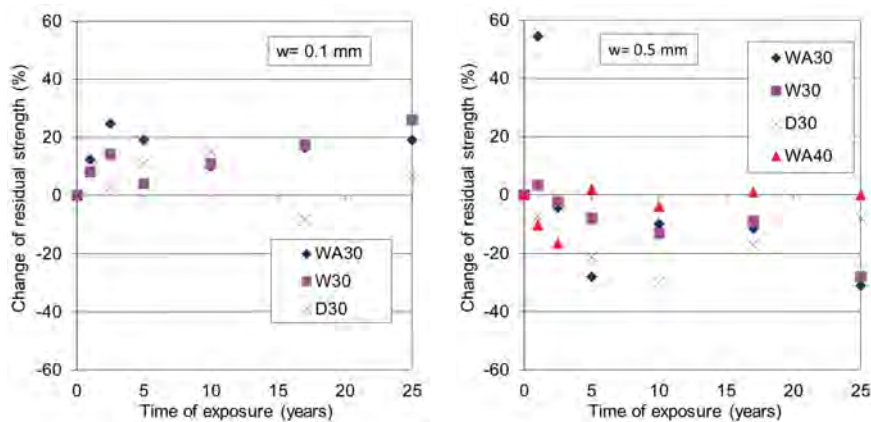
Figur 9. Spricklast vid uppspräckning före exponering, WA30.
Figure 9. Crack-load at cracking before exposure, WA30.

4.3 Residualbärförmåga vid böjdragprovning

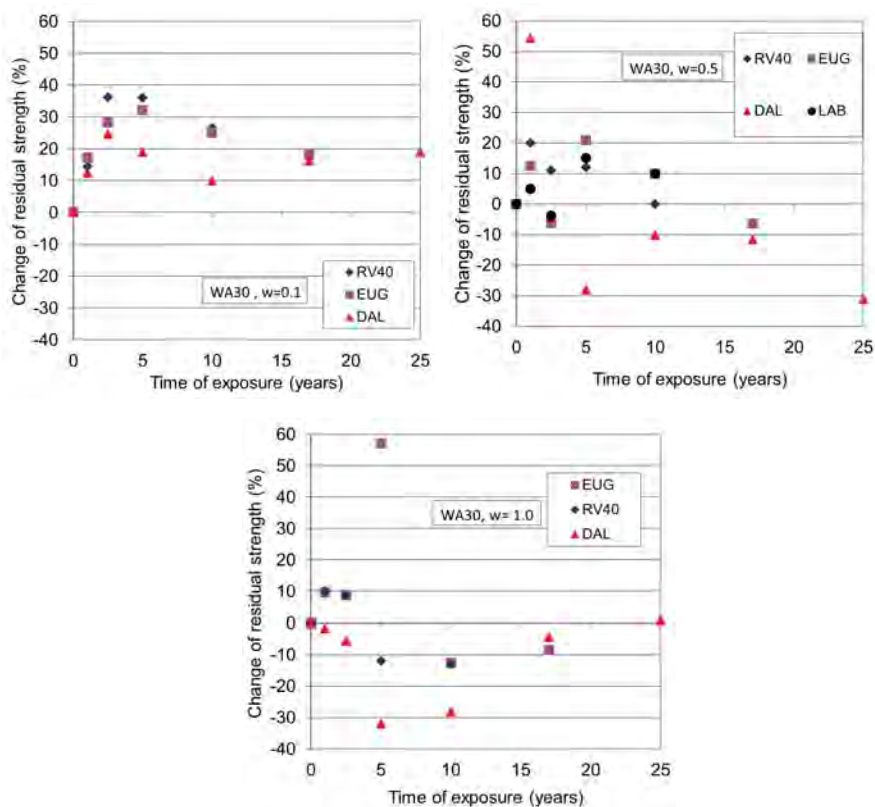
4.3.1 Direkt jämförelse

Den direkta jämförelsen uppvisar fortsatt stora spridningar i resultat och i Figur 10 visas inverkan av sprickvidd och typ av mix. Generellt verkar det dock fortsatt som att provet med tunnaste sprickvidden (0,1 mm) bibehåller den ökning av bärförmågan som erhöles i början av exponeringen. För sprickvidd 0,5 mm är det mer svårtolkat, men generellt är bärförmågan något sämre än för 0,1 mm.

I Figur 11 visas resultaten från de olika platserna med mix-typ WA30 och olika sprickvidder. Eftersom proverna är slut på de andra provplatserna finns inga jämförelsevärden från dessa efter 25 år, och resultaten för Dalälvsproverna spretar rejält. Det går inte att se någon korrelation mellan sprickvidd och bärförmåga för dessa efter 25 års exponering i den direkta jämförelsen.



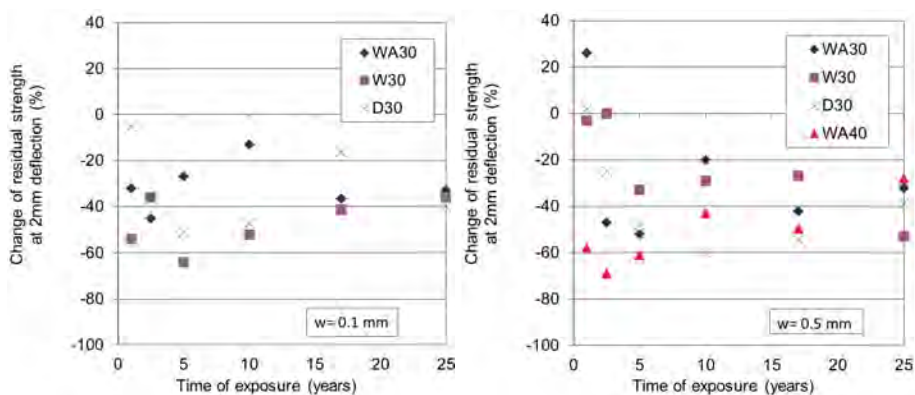
Figur 10. Förändring i residualbärförmåga – direkt jämförelse. Inverkan av sprickvidd och mix-typ för prover i Dalälven
Figure 10. Change of residual strength – direct comparison. Influence by crack width and mix-type for samples in the river Dalälven.



Figur 11. Förändring i residualbärförmåga – direkt jämförelse.
Inverkan av sprickvidd och exponeringsplats för WA30
Figure 11. Change of residual strength – direct comparison.
Influence by crack width and exposure site for WA30.

4.3.2 Statistisk jämförelse

Den statistiska jämförelsen redovisas i Figur 13 resultaten på inverkan av mix-typ på residualbärförmågan vid 2 mm deformation efter 25 års exponering. Stora spridningar i resultat och ingen tydlig korrelation mellan mix-typ och bärförmåga. Det är dock tydligt att en reduktion kan ses i storleksordningen 30–50% jämfört med förväntat om provet fortsatts till 2 mm deformation före exponering.

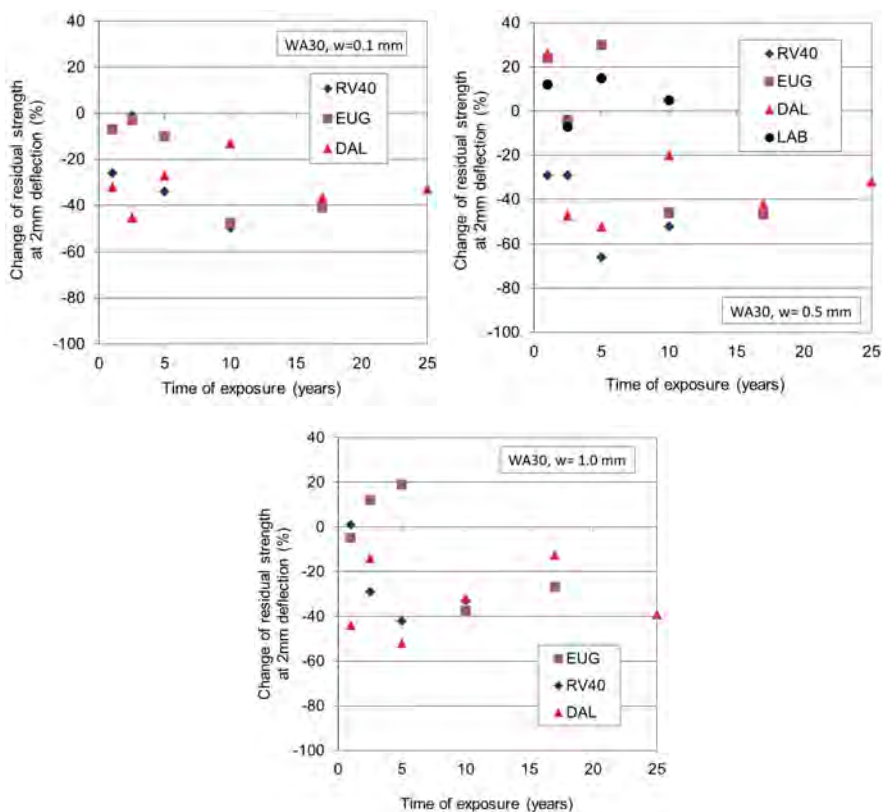


Figur 12. Förändring i residualbärförmåga – statistisk jämförelse.
Inverkan av sprickvidd och mixtyp
Figure 12. Change of residual strength – statistical comparison.
Influence by crack width and mix type.

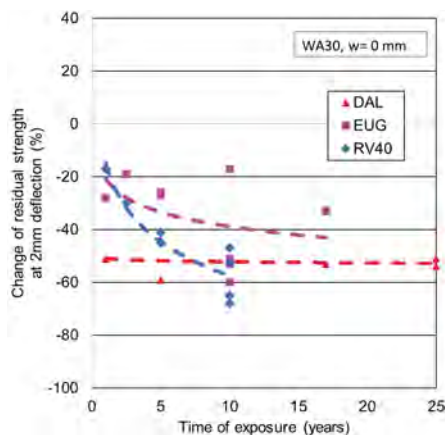
På samma sätt som för den direkta jämförelsen mellan de olika exponeringsplatserna saknas data efter 25 år för provplatserna vid Eugenia och RV40. Med hänsyn till den stora spridningen i resultat verkar det för Dalälvsproverna kvarstå en reduktion av bärförmågan med ca. 30 - 40% på samma sätt som för 8 år sedan och ingen tydlig koppling mellan sprickvidd och förändring. Resultaten framgår av Figur 13.

Resultaten från böjdragprovning efter exponering av de prover som inte spräcktes före utplaceringen i fält har analyserats. Syftet har varit att studera eventuella förändringar som kan härledas till enbart betongens egenskapsförändringar. Samtliga resultat för ospräckta prover från utvärderingen 1998 och framåt har analyserats. Analysen har baserats på samma sätt som i den statistiska jämförelsen vid 2 mm deformation. Eftersom resultat från fullvärdiga böjdragprover före exponering saknas måste jämförelsen göras på det här sättet för ospräckta prover. I Figur 14 redovisas utvecklingen över tid i relation till det förväntade värdet för ett standardprov. I samma figur redovisas även laboratorieprover (LAB) som lagrats i konstant klimat (20 C, RH 65%). Det är tydligt att

prov i Dalälvs miljön påverkats redan efter ett år av exponering, men sedan stannat på samma nivå för efterföljande prover. Prover exponerade vid RV40 resp. i Eugeniattunneln uppvisar en tydligare ökande förlust av prestanda efter exponering, alltså även för prover som inte varit spräckta. Förlusten är större för prover vid RV40 än prover exponerade i Eugeniattunneln.



Figur 13. Förändring i residualbärförmåga – statistisk jämförelse. Inverkan av sprickvidd och exponeringsplats för WA30
Figure 13. Change of residual strength – statistical comparison. Influence by crack width and exposure site for WA30.



Figur 14. Förändring i residualbärförmåga – statistisk jämförelse. Inverkan av exponeringsplats för ospräckta ($w = 0$ mm) prover av mix-typ WA30

Figure 14. Change of residual strength – statistical comparison. Influence by exposure site for uncracked samples ($w = 0$ mm) of mix-type WA30.

4.4 Korrosionsangrepp

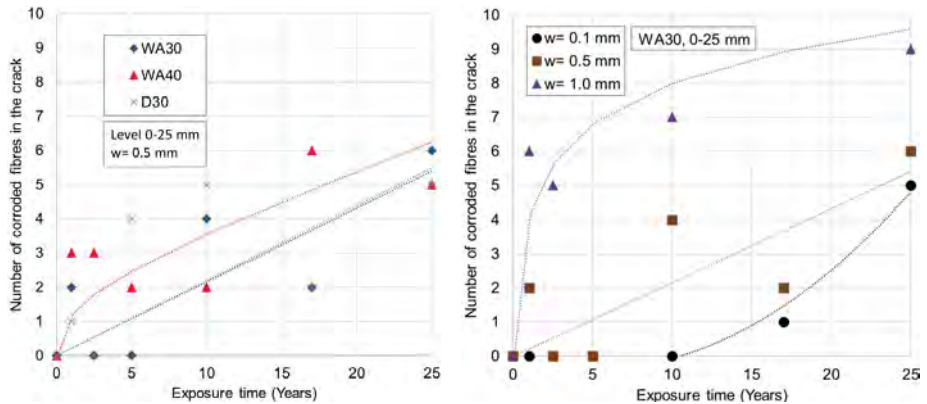
Till grund för bedömningen av korrosionsangreppet ligger de fibrer som identifierats genom den okulära genomsökningen. I Figur 15 redovisas hur många fibrer som identifierats i sprickans yttre 25 mm för de exponerade balkarna. Både resultaten från de olika mixtyperna med 30 och 40 mm fibrer och skillnaderna mellan olika sprickvidder framgår av figuren.

Det tydligaste resultatet är inverkan av sprickvidd där det framgår att initiering av korrosionen gick fortare samt att antalet fibrer som korroderat blev fler med ökad sprickvidd. De första korroderade fibrerna för tunnaste sprickvidden identifierades inte förrän vid utvärderingen efter 17 år för Dalälvsproverna.

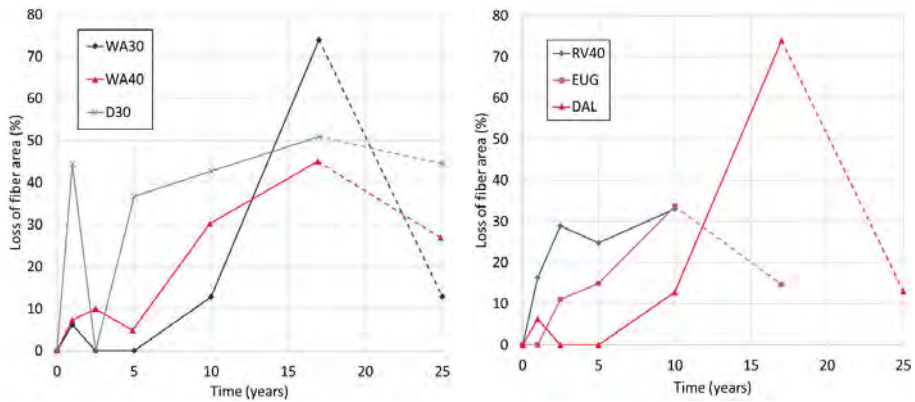
Inverkan av fiberlängden på antalet korroderade fibrer (oavsett angreppsgrad) är inte lika tydlig även om antalet korroderade 40 mm fibrer var något fler än för 30 mm, något tidigare i processen.

I Figur 16 presenteras resultaten gällande förlust av fiberarea på grund av korrosion. Som framgår av Figur 15 så är underlaget begränsat i form av antalet fibrer. Metodiken för att utvärdera angreppet ger också att kraftigt korroderade fibrer riskerar gå av vid hanteringen och därigenom förloras som underlag. Det är också förklaringen till varför utvecklingen efter 17 års exponering visas med en streckad linje (10 år för prover från

Eugeniattunneln). Det går alltså inte att utesluta, eller snarare det är troligt, att det funnits fibrer som korroderat av helt och därmed är utvecklingen osäker.



Figur 15. Antalet detekterade fibrer i yttersta 25 mm för proverna från Dalälven. Inverkan av fiberlängd (VÅ) och sprickvidd (HÖ)
Figure 15. Number of detected fibers in outer 25 mm for samples in Dalälven. Influence of fiber length (LEFT) and crack width (RIGHT).



Figur 16. Förlust av fiberarea i yttersta 25 mm. Jämfört med andra platser för WA30 och sprickvidd 0,5 mm (VÅ) Olika mixtyp vid sprickvidd 0.5 mm för Dalälven (HÖ)
Figure 16. Loss of area in outer 25 mm. Comparison between sites for WA30 and crack width 0.5 mm (LEFT). Different mixes at crack width for Dalälven samples (RIGHT).

4.5 Strukturanalys

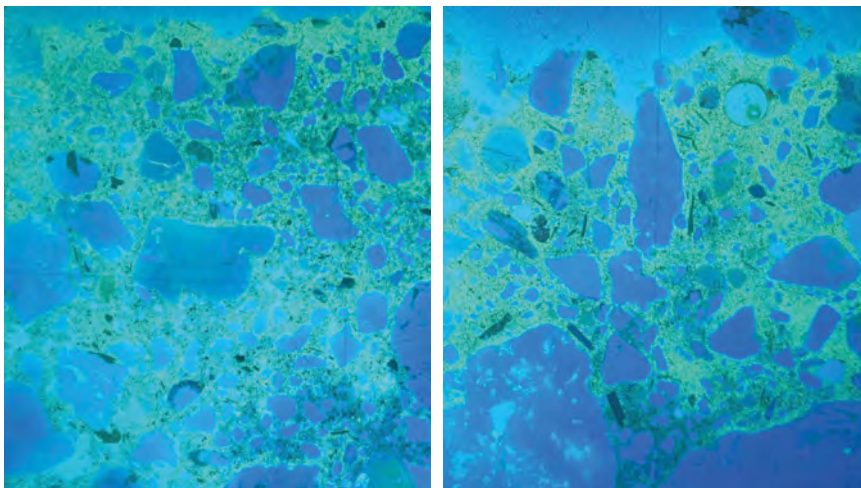
Resultaten från tunnslipsanalysen som sammanfattas i Tabell 5 visar ingen ökad sprickfrekvens men däremot en ökad kapillärporositet från den vittrade ytan och inåt. Det är väldigt tydligt att referensprovet ovanför vattenytan inte har någon större ökning, medan delen av proverna som exponerats under vattenytan har ett skikt med djup om ca. 6-11 mm där kapillärporositeten tydligt har ökat. Den torrsprutade betongen representerar det nedre värdet och de våtsprutade både med och utan accelerator är i den högre delen.

Enligt tunnslipsanalysen ses också en sänkt halt av portlandit / $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i de yttre delarna. Största djupet ses i våtsprutade prover, grundare i torrsprutat och minst i delen ovanför vattenytan. Det är tecken på urlakning och även där har den torrsprutade betongen klarat sig bättre än den våtsprutade. Notervärt är att det kan ses ca. 4 mm urlakning även i delen ovanför vattenytan. Den har dock varit utsatt för nederbörd.

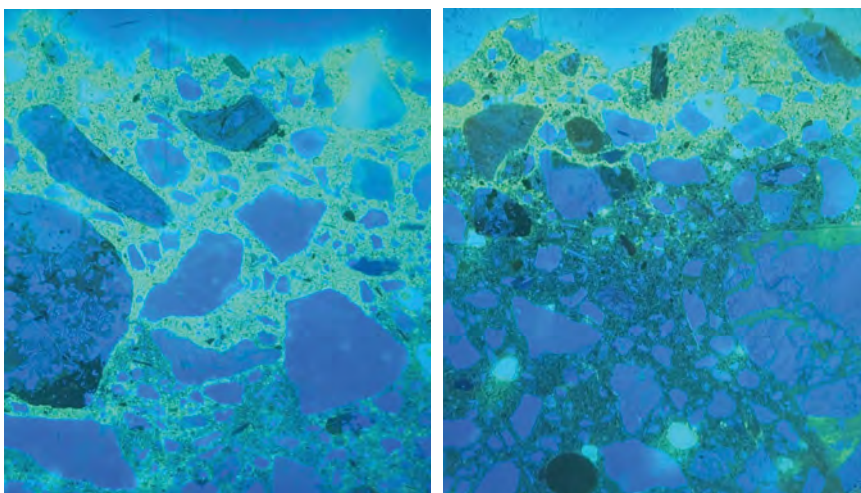
I den rapporterade utvärderingen av tunnslipsanalysen anges även en uppskattning av karbonatiseringsdjupet. De delar av provet som legat exponerade under vattenytan kan rimligen inte ha karboniserats. Delen ovanför vattenytan kan ha påverkats av luftens koldioxid även om fukthalten i betongen kan förväntas ha varit hög även där. Sannolikt är detta snarare främst en effekt av den förhöjda kapillärporositeten och urlakningen. I Figur 17 och Figur 18 redovisas exempel på tunnslipsproverna i UV-ljus där det i överkant ses den eroderade betongens yta och därefter en ljusare cementpasta som har den förhöjda porositeten. Längre in i provet blir cementpastan mörkare och bedöms där opåverkad. Det framgår visuellt att den torrsprutade betongen (Figur 18 - HÖ) har ett betydligt mindre påverkat område.

Tabell 5. Resultat från strukturanalys med tunnslip.
Table 5. Results from structural analysis with thin sections

	Provkroppsbenämning			
	5:13A-ref	5:13A	7:5A	D:13B
Mixtyp	WA30	WA30	W30	D30
Fördelning cementpasta	Jämn	Jämn	Jämn	Jämn
Homogenitet	God	God	God	God
Mikrosprickfrekvens	Låg	Låg	Låg	Låg
Ytans status	Vittrad	Vittrad	Vittrad	Vittrad
Förhöjd kapillärporositet (max djup i mm)	1	10	11	6
Låg halt $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (max djup i mm)	4	11	13	8
Karbonatisering (max djup i mm)	2	10	12	6,5



Figur 17. Tunnslip i UV-ljus. Området i bilden ca. 4,5 mm brett
(VÄ) 5:13A-ref, (HÖ) 5:13A
Figure 17. Thin sections in UV-light. Area in picture around 4.5 mm wide
(LEFT) 5:13A-ref, (RIGHT) 5:13A.



Figur 18. Tunnslip i UV-ljus. Området i bilden ca. 4,5 mm brett
(VÄ) 7:5A, (HÖ) D:13B
Figure 18. Thin sections in UV-light. Area in picture around 4.5 mm wide
(LEFT) 7:5A, (RIGHT) D:13B.

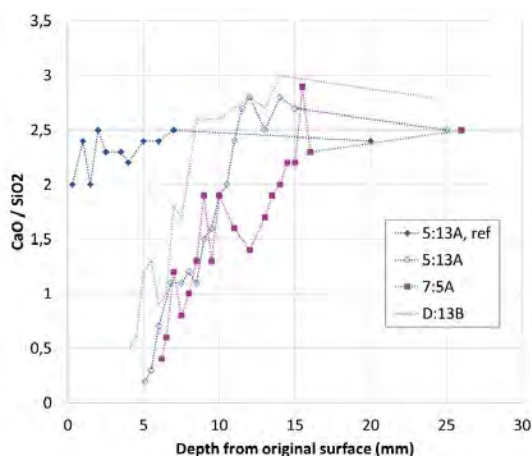
4.6 Kemisk analys

Kompleta resultat från EDS/SEM-analyser av kemisk sammansättning hos bindemedel gjordes på olika djup i betongen återfinns i bilaga B. I föreliggande avsnitt redovisas en delmängd av resultaten.

Ett användbart mått på betongens urlakningsgrad är kvoten mellan kalcium och kisel i cementpastan eftersom det är främst kalciumhydroxid som lakas ur. Mätningen ger samtliga komponenter i oxidform och därför presenteras kvoten mellan de två som CaO/SiO_2 . I Figur 19 redovisas profiler på hur medelkvoten varierar från betongens ursprungliga yta och inåt i provet. Medelvärdena representerar 4–18 mätningar per djupnivå. Mätosäkerheten för analysen anges till $\pm 0,2$.

På större djup kan opåverkad cementpasta utgöra referens vilket ger att den våtsprutade betongen (WA30, W30) har en medelkvot på ca. 2,5 medan det torrsprutade provet har en något högre nivå motsvarande 2,7. Eftersom samma cement användes vid tillverkningen av både våt- och torrsprutade prover är det oväntat att referenshalten blir olika. Som kriterium för urlakade betong sätts i det här fallet nivån 2,2 där prover som uppvisar en högre kvot bedöms vara urlakade. I Tabell 6 redovisas bedömt urlakningsdjup enligt det kriteriet.

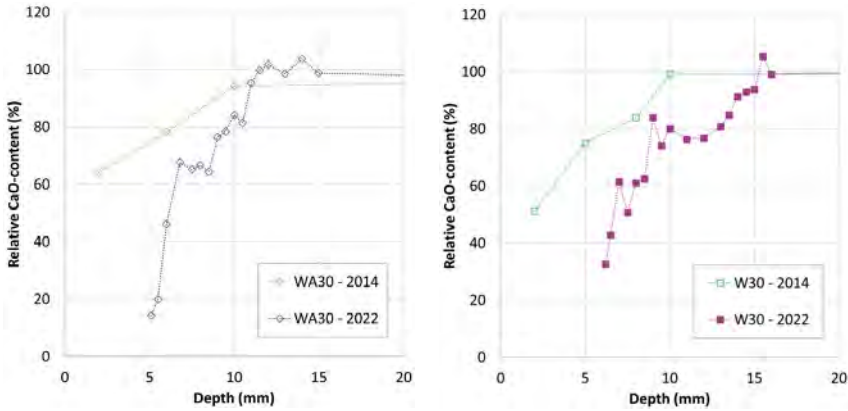
Vid förra utvärderingen efter 17 års exponering gjordes en liknande analys, men med betydligt färre mätpunkter (Nordström, 2016). För att studera hur urlakningen fortskridit redovisas i Figur 20 - Figur 21 en jämförelse av den relativa CaO -halten på olika djup i provet på samma sätt som vid det förra tillfället.



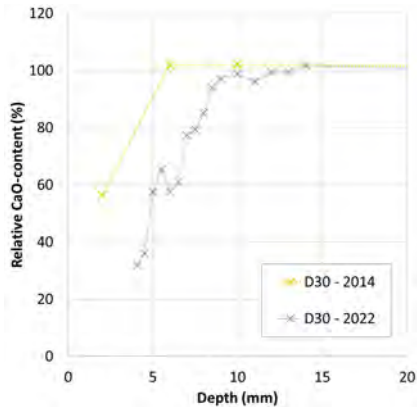
Figur 19. Urlakningsprofil angivet som kvoten CaO/SiO_2 (medel).
Figure 19. Leaching profile as the quotient CaO/SiO_2 (average).

Tabell 6. Bedömt urlakningsdjup med kriterium $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 2,2$.
Table 6. Estimated depth for leaching with criteria $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 2,2$.

	WA30	WA30	W30	D30
Prov	5:13A-ref	5:13A	7:5A	D:13B
Urlakningsdjup	2	11	14,5	8,5



Figur 20. Relativt CaO-innehåll (profil).
Figure 20. Relative CaO-content (profile).



Figur 21. Relativt CaO-innehåll (profil).
Figure 21. Relative CaO-content (profile).

Den samlade bilden av de kemiska analyserna ger att samtliga betongtyper har i ökande grad urlakad betong desto närmare den nuvarande ytan analysen görs. Det råder en samstämmighet mellan de olika typerna av analyser kring ungefärligt urlakningsdjup och rangordningen mellan de olika betongtyperna. Mest har våtsprutade prover utan accelerator urlakats, därefter våtsprutade prover med accelerator och minst har torrsprutade prover urlakats. Det är också tydligt att urlakningsgraden har ökat sedan förra utvärderingen. Avskalningen/erosionen från betongytan konstateras vara ungefär det dubbla. Både urlakning och avskalning har uppstått i delen som varit nedsänkt i vatten under hela provperioden.

5. DISKUSSION

5.1 Bärförmåga

På samma sätt som vid tidigare utvärderingar ger den direkta jämförelsen, som motsvarar små deformationer i en verklig konstruktion, att residualbärförmågan för små sprickvidder (0,1 mm) är likvärdigt eller något bättre än vid första utvärderingstillfället efter långtidsexponering. Det gäller i princip oavsett mixtyp eller exponeringsplats. För sprickvidd 0,5 mm och 1,0 mm sjunker bärförmågan efter 5–10 års exponering vid den direkta jämförelsen. Eftersom prover med minsta sprickvidden (0,1 mm) alltså ökar, och istället sjunker med sprickvidd 0,5 mm eller större, bör det rimligen kopplas till att fiberkorrosionen inverkat negativt på de senare. Proverna för sprickvidd lika med 1 mm uppvisar dock mycket stor spridning i resultaten.

I den statistiska utvärderingen vid 2 mm deformation, vilket motsvarar större deformationer i en verklig konstruktion, verkar bärförmågan vara ca. 30 - 50% lägre efter 25 års exponering i Dalälvs miljön. Detta oavsett sprickvidd och mix-typ. När jämförelsen mellan de olika exponeringsplatserna görs så kan man konstatera att proverna i Dalälvs miljön i medel legat ca. 30 - 40% under den förväntade bärförmågan redan från de första åren och sedan ökat ytterligare.

I syfte att ytterligare söka förklaring till den lägre bärförmågan, gjordes den statistiska utvärderingen av provkroppar utan sprickor som exponerats vid provplatserna. Särskilt intressant är det för Dalälvsproverna som inte uppvisade någon korrosion alls i de första utvärderingarna. Även det gav att proverna i Dalälvs miljön haft en relativt stor reduktion av bärförmågan redan efter några få års exponering i den statistiska utvärderingen. Storleksordningen på reduktionen är ca. 50% för de analyserade ospräckta proverna.

Vid tunna sprickvidder på balkens undersida är bärförmågan till stor del fortfarande beroende av betongens hållfasthet, och fibrer är bara i begränsad omfattning bidragande. Särskilt vid små deformationer som i den direkta jämförelsen. Vid större sprickvidder och större deformationer är fiberns bidrag till bärförmågan mer avgörande även om betongens prestanda också avgör hur väl förankrade varje enskild fiber är. Vid den statistiska utvärderingen, som är giltig för större deformationer, är därför både betongens hållfasthet och ev. fiberkorrosion inverkan. I den statistiska jämförelsen baseras utvärderingen på en större mängd standardprov tillverkade i full produktionskala.

Eftersom prover som exponerats, utan att vara förspräckta, uppvisar en lägre bärförmåga än förväntat redan efter enstaka års exponering, och inte uppvisar korrosion i homogen betong, skulle låga fibermängder i aktuella prover kunna vara en förklaring. Å andra sidan är resultaten från de prover som förvarades i klimatrum upp till tio år ungefär som förväntat enligt det statistiska utvärderingssättet, vilket talar emot det. Den mest troliga förklaringen är därför att betongmatrisen tagit skada av frostpåverkan. Dalälvsproverna har sannolikt fått en hög vattenmättnadsgrad med samtidigt rådande låga temperaturer vintertid och tidigt gett en reduktion av betongens prestanda. För prover som exponerats

vid RV40 verkar saltfrostexponeringen ha reducerat bärförmågan snabbare än vid Eugeniattunneln. Hur frostpåverkan på sprutbetongen påverkar förankringen av stålfibrer och därigenom dess bärförmåga i sprucket tillstånd borde undersökas vidare i fortsatt forskning på området.

För Dalälvsproverna har senare även urlakning succesivt tillkommit samtidigt som korrosion av fibrer börjat, först för grövre sprickor, och sedan även efter 10 år för den tunnaste sprickvidden (0,1 mm). Ytterligare en parameter för Dalälvsproverna är att tvärsnittet har reducerats på grund av processen med yterosion/avskalning för den del som legat under vattenytan, vilket ytterligare sänkt bärförmågan.

5.2 Korrosion

Mest intressant ur undersökningen kring graden av korrosion på stålfibrer exponerade i sprickor vid Dalälven är kanske att antalet korroderade fibrer fortsatt att öka även i de tunnaste sprickorna (0,1 mm). På samma sätt som vid tidigare utvärderingar ger metoden för utvärdering av angreppet att fibrer som korsat sprickan och korroderat av inte längre kan hittas. Den faktiska mängden korroderade fibrer i sprickzonen är därför okänd.

Det blir ändå tydligt att korrosionsangreppet fortsatt att utvecklas även i den relativt milda exponeringsmiljön och efter lång tid även för tunna sprickor. Kombinationen med att betongmatrisen urlakas och därmed får ett sänkt pH bidrar förstås även till depassivering. Sprickvidden verkar främst påverka tiden till initiering med kortare tid för grövre sprickor och längre tid med minskande sprickvidd. En sprickvidd om 0,1 mm brukar betraktas som väldigt tunn och vid kravställande oftast betraktad som försumbar och acceptabel. Långtidsexponeringarna visar dock att korrosionen ändå uppstår och för att undvika korrosion helt bör sprutbetongen vara sprickfri, eller innehålla fibrer som inte är känsliga för korrosion. Det gäller alltså även i en exponeringsmiljö som skulle kunna kategoriseras som exponeringsklass XC4 enligt SS-EN 206-1 (2021).

Vid utvärderingen efter 17 år (Nordström, 2016) var det tydligt att fiberlängden hade stor betydelse för korrosionshastigheten, särskilt för fibrer som exponerats i miljön med närvaro av klorider (RV40). Däremot var inverkan av fiberlängd inte lika tydlig i sötvattensmiljö, och den effekten kvarstår även vid utvärderingen av Dalälvsproverna efter 25 år. Det verkar tydligare att förhållandet mellan anod- och katodarea har störst betydelse om betongen är kloridbemängd. Det kan också vara en effekt av att korrosionen helt enkelt bara går långsammare och att inverkan inte hunnit bli lika tydlig i Dalälvsproverna.

5.3 Betongstatus

Vid tiden för start av fältexponeringarna (1997) fanns inte krav på frostbeständighet för sprutbetong, men idag tillämpas exponeringsklasser enligt SS-EN 206-1 (2021) och samma krav som för konventionell betong finns för fiberarmerad sprutbetong. Däremot så saknas detaljerad kunskap fortsatt kring hur mycket residualbärförmågan under böjning påverkas av eventuell frostnedbrytning eller andra nedbrytningsfenomen.

Det kontinuerligt strömmande vattnet kombinerat med frost och mekanisk nötning av is har sannolikt orsakat erosionen av den del av sprutbetongen som legat nedsänkt i vatten. Fenomenet går i linje med den förklaringsmodell som Rosenqvist (2016) ger. Den pekar mot att en cyklisk process mellan de tre nedbrytningsprocesserna urlakning, frost och mekanisk nötning är det som gradvis löser upp ytan på betongen. Sprutbetong med längre fibrer verkar uppvisa mest omfattande erosion, trots att betongreceptet är detsamma för 30 resp. 40 mm fibrer. En möjlig förklaring skulle kunna vara variationer i utförandet/sprutkvaliteten. Bäst erosionsmotstånd verkar de torrsprutade proverna uppvisa och troligen är det naturligt låga vattencementtalet (runt 0,38), som torrsprutning vanligtvis ger, som är förklaringen. Ett lågt vct ger god täthet och styrka vilket ger ett ökat motstånd mot den cykliska nedbrytningen. Som för flertalet parametrar baseras resultaten på enstaka prover, och tillförlitliga spridningsmått finns inte att tillgå.

Även vid analys av betongprovernas urlakningsgrad uppvisar den torrsprutade betongen bäst motstånd vilket också relaterar bra till lägre vct. Av det två våtsprutade proverna var den med acceleratorinblandning bara något sämre än den torrsprutade betongen. Intressant nog uppvisade den våtsprutade betongen där ingen accelerator använts störst påverkan av urlakningen. Ursprungligen hade det omvända kunnat förväntas då acceleratörer vanligtvis anses ge en förgrovd porstruktur i betongen och därigenom ökad porositet. Här uppvisades det omvända, men återigen för enstaka prov uppmätt i en provkropp. Generellt får ändå konstateras att ökningen av urlakningen på de åtta år som gått sedan senaste utvärderingen för anses vara stor. Efter 25 års exponering är urlakningen alltså ca. 10-15 mm vilket i sin tur öppnar upp för frostangrepp och försämrat erosionsmotstånd. Man kan också förvänta sig ett sämre korrosionskydd för ingjutna fibrer eftersom betongens pH har sjunkit. Idag används andra typer av acceleratörer (alkalifria) än vid tiden för uppstart av projektet. Hur de påverkar eventuella långtidsförändringar i betongmaterialet med hänsyn till frost, urlakning och nötning är oklart och borde studeras vidare.

Resultaten pekar mot att fiberarmerad sprutbetong med en sammansättning som i fältexponeringarna inte uppfyller prestandakraven för väldigt långa livslängder (> 50 år). Liknande miljöer kan uppstå t.ex. vid bergskärningar i vattenvägen till kraftverk, bropelare som reparerats, hamnanläggningar.

ERKÄNNANDEN

Studien med långtidsexponering har varit möjligt att initiera, genomföra och utvärdera med finansiering via olika konstellationer under 25 års tid. En lång resa startade 1997 som mitt industridoktorandprojekt vid Luleå Tekniska Universitet och associering till Väg-, Bro-, Tunnelkonsortiet med stöd av Vattenfall, Elforsk, SveBeFo, Vägverket och Banverket. Utvärderingar har efter doktorandprojektets avslut kunnat göras vid ytterligare tre tillfällen med stöd från Energiforsk och BeFo. För det stödet och engagemanget från många personer inom betong- och bergbranschen samt akademien är jag väldigt tacksam.

I denna sista utvärdering och avslut av fältexponeringarna vill jag också rikta ett stort tack till Lars-Elof Bryne, David Jäderberg och övrig personal vid betonglaboratoriet vid Vattenfall Research & Development för all hjälp vid utvärderingen av alla de sista provkropparna från exponeringsplatsen i Dalälven.

6. REFERENSER

- Aldrian, W., Thomas, A., Chittenden, N. & Holter, K.-G., 2020. *Permanent Sprayed Concrete Linings*, u.o.: ITA WG 12 and ITAtech, report no. 24..
- Ansell, A., Nordström, E. & Strömberg, L., 2020. *Durability of shotcrete tunnel linings due to steel fibre corrosion in cracks*. Kuala Lumpur, Malaysia, World Tunnel Congress.
- Nordström, E., 1995. *Beständighet hos sprutbetong - En litteraturstudie*, Stockholm: Elforsk, rapport nr. 95:11.
- Nordström, E., 1996. *Sprutbetongs beständighet - Inventering*, Stockholm: SveBeFo.
- Nordström, E., 2005. *Durability fo Sprayed Concrete - Steel fibre corrosion in cracks*. Luleå: Luleå Tekniska Universitet, Doktorsavhandling nr. 2005:02.
- Nordström, E., 2005. *Stålfiberkorrosion i sprutbetong*, Stockholm: SveBeFo.
- Nordström, E., 2016. *Utvärdering efter 17 års fältexponering av sprucken stålfiberarmerad sprutbetong*, Stockholm: BeFo, rapport nr. 153.
- Rosenqvist, M., 2016. *Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures - Interaction between water absorption, leaching and frost action*, Lund, Sweden: Lund University of Technology, report TVBM-1036.
- SS 137244, 2019. *Betongprovning – Hårdnad betong – Avflagning vid frysning*, Stockholm: SIS.
- SS-EN 206:2013, 2021. *Concrete – Specification, performance, production and conformity*, Stockholm: SIS.
- Thomas, A. & Bernard, E. S., 2021. Developments in fibre reinforced concrete in tunnelling.. *Geomechanics and Tunnelling*, 14 (No. 4).
- Östlund, L., Sjölander, A. & Brodd, E., 2023. Post-Cracking Behaviour of Fibre-Reinforced Shotcrete. *MDPI, Fibers*, Issue <https://doi.org/10.3390/fib11070059>.

BILAGA A – Mätning erosionsdjup

Sammanställning av uppmätta erosionsdjup vid de två mätlinjerna, redovisade för respektive mixtyp.

Mix WA30

		Erosionsdjup (mm)																	
		Balkmärkning																	
		5:5B		1:13A		2:14B		1:3B		3:3B		5:13A		6:14A		6:9A			
		V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	Medel	Std.avv
Avstånd från överkant (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0.1	0.5
	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0.1	0.2
	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0
	45	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2
	50	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2
	55	2	1	1	2	2	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0.8	0.8
	60	3	2	2	2	2	2	1	1	0	0	3	2	1	2	1	2	1.6	0.9
	65	3	4	2	0	1	1	2	2	0	0	2	2	0	0	1	3	1.4	1.2
	70	3	3	2	0	2	2	3	0	2	2	1	3	2	1	2	3	1.9	1.0
	75	3	3	3	3	1	1	1	1	3	2	1	6	3	1	1	4	2.3	1.4
	80	3	3	4	4	2	2	2	2	3	2	3	5	1	1	1	4	2.6	1.2
	85	3	2	3	5	2	1	3	3	2	3	2	4	2	0	2	3	2.5	1.1
	90	4	4	4	4	3	3	3	3	1	5	3	3	1	1	1	5	3.0	1.3
	95	3	4	2	5	4	2	2	2	4	3	4	2	2	2	2	4	2.9	1.0
100	3	3	2	5	4	1	2	3	5	2	4	2	1	1	1	4	2.7	1.4	
105	3	3	2	5	1	0	2	3	4	3	3	3	2	1	0	3	2.4	1.3	
110	3	3	2	5	1	1	3	3	4	3	0	2	1	1	0	4	2.3	1.4	
115	3	3	1	6	2	1	3	4	3	2	0	3	0	1	0	2	2.1	1.6	
120	0	2	0	4	0	3	13	4	4	3	1	3	4	8	2	3	3.4	3.2	
125	0	0	0	4	4	16	75	8	5	15	5	10	20	20	75	75	20.8	26.8	

BILAGA B - RISE rapport: Analys av sprutbetong

Kontaktperson

Mariusz Kalinowski
Samhällsbyggnad
+46 10 516 68 13
mariusz.kalinowski@ri.se

Datum

2023-11-30

Beteckning

1211737

Sida

1 (9)

Vattenfall AB
Att. Erik Nordström
Älvkarleby Laboratory, 814 26 Älvkarleby

Analys av sprutbetong, prover märkta "5:13A", "7:5A" och "D:13B"

(2 bilagor)

1 Inledning

På uppdrag av Vattenfall AB har RISE undersökt tre betongprover, märkta "5:13A", "7:5A" och "D:13B". Enligt uppgift från uppdragsgivaren består prov "5:13A" av våtsprutad betong med vattenglasbaserad accelerator, prov "7:5A" av våtsprutad betong utan accelerator och prov "D:13B" av torrsprutad betong. En del av varje prov har enligt uppgift varit exponerad mot strömmande vatten i Dalälven. Provers utseende presenteras i Bild 1, Bilaga 2.

Undersökningen består av: 1) okulär granskning av prover i syfte att bedöma betongens allmänna tillstånd och vittringsdjup, 2) strukturanalys av betongen i tunnslip med avseende på urlakning av betongens bindemedel, 3) analys av bindemedlens kemiska sammansättning i syfte att ta fram CaO/SiO₂-kvoter och bedöma djup hos urlakning av kalcium. Slutsatser gäller endast för undersökta prover. Slutsatser gäller endast för undersökta prover.

RISE Research Institutes of Sweden AB

Postadress
Box 857
501 15 BORÅS

Besöksadress
Drottning Kristinas
Väg 61
114 28 Stockholm

Tfn / Fax / E-post
010-516 50 00
033-13 55 02
info@ri.se

Konfidentialitetsnivå
K2 - Intern

Detta dokument får endast återges i sin helhet, om inte RISE Research Institutes of Sweden AB i förväg skriftligen godkänt annat.

2 Metoder

2.1 Strukturanalys av betongen i tunnslip

Strukturanalys av betongen i tunnslip gjordes med hjälp av polarisationsmikroskop (förstoring upp till 1000 gånger). Ljuskällor för vanligt ljus och UV ljus användes vid utvärdering av tunnslip. Tunnslipen tillverkades av betong impregnerad med fluorescerande epoxi.

Tunnslipens storlek är 45x25 mm, de består av områden orienterade vinkelrätt mot betongens yta och omfattar djup 0-ca 45 mm i betongen.

Områden i tunnslipen är tagna från följande avstånd från provets eroderade kortända: prov "5:13A, ref": 90 mm; prov "5:13A": 20 mm; prov "7:5A": 20 mm; prov "D:13B": 22 mm. Områdenas lägen i proverna och delar av betongen som användes för tillverkning av tunnslip visas i Bilder 2-7, Bilaga 2.

2.2 Kemisk analys av betongens bindemedel

Skivor med tjocklek ca 5 mm sågades ut från betongproverna. Skivorna knäcktes vinkelrätt mot betongens yta. Brottytorna analyserades i SEM. Analyserade områden finns på följande avstånd från provets eroderade kortända: prov "5:13A, ref": 90-95 mm; prov "5:13A": 15-20 mm; prov "7:5A": 15-20 mm; prov "D:13B": 17-22 mm.

Analys av kemisk sammansättning hos betongens bindemedel gjordes med hjälp av svepelektronmikroskop (SEM) utrustat med sekundära elektrondetektor (SE-detektor) och energidispersivt röntgenspektroskop (EDS). Alla analysområden kontrollerades först med SE-detektor för att undvika inblandning av ballast i analyserna. Varje enskilt analysområde har storlek 0,2x0,1 mm, med längd 0,2 mm orienterad parallellt med betongens yta. EDS-analysen omfattar grundämnen från och med atomnummer 11, dvs natrium eller tyngre. Resultaten från EDS-analyserna är omräknade till oxider och normaliserade till 100 vikt%. Kvantifieringen av halterna kontrollerades mot ett referensprov som består av ett Portlandcement med känd kemisk sammansättning. Mätosäkerhet för halter av CaO och SiO₂ i varje enskild analys uppskattas till +/-1 vikt%.

3 Resultat

3.1 Okulär granskning av prover

I en del av varje prov (del med vittrad kortända) är betongens yta tydligt vittrad. I dessa delar är betongprismornas kortända vittrad. Den andra kortändan består av sågsnitt. (Bild 1, Bilaga 2).

I övrigt har vi inte observerat några tecken på att kraftig sprickbildning har inträffat i betong från proverna.

I det vittrade skiktet har betongens yttre skikt brutits ner. Tabell 1 anger djup hos okulärt uppskattad vittring av betongen. Uppskattning av vittringsdjupet gjordes genom att lägga linjal mot betongens yta i den delen av ett prov där vittringsdjupet bedöms vara försumbar (<0,5 mm) och sedan mäta på sågsnitt orienterade vinkelrätt mot betongytan avståndet till betongens nuvarande yta i områden från vilka prover togs för analys i tunnslip och SEM. Noggrannhet hos uppskattning av vittringsdjup är enligt vår bedömning inte bättre än $\pm 0,5$ mm. Sågsnitten visas i Bilder 2, 4 och 6, Bilaga 2.

Tabell 1. Vittringsdjup uppskattad i proverna.

Provbeteckning	5:13A, ref	5:13A	7:5A	D:13B
Vittringsdjup	<0,5 mm	5,0 \pm 0,5 mm	6,0 \pm 0,5 mm	4,0 \pm 0,5 mm

Djup i Tabeller 2-5, Diagram 1 och Tabeller 1-13 i Bilaga 1 anges med hänsyn tagen till observerade vittringsdjup, dvs djup anges från betongens ursprungliga yta och inte från betongens nuvarande yta i områden där delprover är tagna.

3.2 Strukturanalys av betongen i tunnslip

Tabell 2. Utvärdering av tunnslip tillverkade av betongprover "5:13A, ref" och "5:13A". Djupangivelse av två värden med snedstreck emellan betyder att djup varierar inom området som omfattas av tunnslipet (bredd 25 mm). Värdena anger minimalt och maximalt observerat djup. Exempel på strukturer observerade i tunnslipen visas i Bilder 8 och 9, Bilaga 2.

Provbeteckning	5:13A, ref	5:13A
Fördelning av cementpasta	Jämn	Jämn
Cementpastans homogenitet	God	God
Mikrosprickfrekvens	Låg	Låg
Nedbrytning av betongens yttre skikt	Ytan är vittrad	Ytan är vittrad
Förhöjd kapillärporositet pga urlakning	Djup: 0-1 mm	Djup: 0-10,0/10,5 mm
Relativt låg halt av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i cementpastan	Djup: 0-4,0 mm, liten minskning	Djup: 0-11,0 mm, liten minskning
Karbonatisering av cementpasta	Djup: 0-1,0/2,0 mm	Djup: 0-10,0 mm

Tabell 3. Utvärdering av tunnslip tillverkade av betongprover ”7:5A” och ”D:13B”. Djupangivelse av två värden med snedstreck emellan betyder att djup varierar inom området som omfattas av tunnslipet (bredd 25 mm). Värdena anger minimalt och maximalt observerat djup. Exempel på strukturer observerade i tunnslipen visas i Bilder 10 och 11, Bilaga 2.

Provbeteckning	7:5A	D:13B
Fördelning av cementpasta	Jämn	Jämn
Cementpastans homogenitet	God	God
Mikrosprickfrekvens	Låg	Låg
Nedbrytning av betongens yttre skikt	Ytan är vittrad	Ytan är vittrad
Förhöjd kapillärporositet pga urlakning	Djup: 0-11,0 mm	Djup: 0-6,0 mm
Relativt låg halt av Ca(OH) ₂ i cementpastan	Djup: 0-11,5/13,0 mm, tydlig minskning	Djup: 0-8,0 mm, tydlig minskning
Karbonatisering av cementpasta	Djup: 0-11,0/12,0 mm	Djup: 0-5,5/6,5 mm

3.3 Analys av kemisk sammansättning hos bindemedel

EDS/SEM-analyser av kemisk sammansättning hos bindemedel gjordes på olika djup i betong från prover ”5:13A, ref”, ”5:13A”, ”7:5A” och ”D:13B”. Prov ”5:13A, ref” representerar betong som inte har varit utsatt för lika kraftig fuktbelastning och via okulär granskning av provet inte uppvisar tecken på betydande vittring av ytan.

Resultat från enskilda analysområden presenteras i Tabeller 1-13, Bilaga 1. Tabell 4, nedan visar medelvärden av CaO/SiO₂-kvoter på olika djup i proverna, beräknade från uppmätta kemiska sammansättningar uppmätta i flera områden (4-18 st) per djup. Djupangivelser i Tabell 4 och Diagram 1 är lägen hos analysområdenas mitt. Noggrannhet hos bestämning av analysdjup i SEM uppskattas till ±0,05 mm. Noggrannhet hos uppskattning av vittringsdjup är enligt vår bedömning inte bättre än ±0,5 mm. Sammanlagt bedöms noggrannheten hos angivna djup i Tabeller 4 och 5, och i Diagram 1 vara ±0,05 mm för prov ”5:13A, ref” och ±0,6 mm för prover ”5:13A”, ”7:5A” och ”D:13B”.

Tabell 4. Medelvärden av CaO/SiO₂-kvoter på olika djup i prover ”5:13A, ref”, ”5:13A”, ”7:5A” och ”D:13B”. Resultat från enskilda analysområden presenteras i Tabeller 1-13, Bilaga 1. Första kolumnen anger analysområdes avstånd från betongens ursprungliga yta.

Prov	5:13A, ref	5:13A	7:5A	D:13B
Djup (mm)	CaO/SiO ₂	CaO/SiO ₂	CaO/SiO ₂	CaO/SiO ₂
0,3	2,0	-	-	-
1,0	2,4	-	-	-
1,5	2,0	-	-	-
2,0	2,5	-	-	-
2,5	2,3	-	-	-
3,5	2,3	-	-	-
4,0	2,2	-	-	-
4,1	-	-	-	0,5
4,5	-	-	-	0,6
5,0	2,4	-	-	1,2
5,1	-	0,2	-	-
5,5	-	0,3	-	1,3
6,0	2,4	0,7	-	0,9
6,2	-	-	0,4	-
6,5	-	-	0,6	1,0
6,8	-	1,1	-	-
7,0	2,5	-	1,2	1,8
7,5	-	1,1	0,8	1,7
8,0	-	1,2	1,0	2,1
8,5	-	1,1	1,3	2,6
9,0	-	1,5	1,9	2,6
9,5	-	1,6	1,3	-
10,0	-	1,9	1,9	2,6
10,5	-	2,0	-	-
11,0	-	2,4	1,6	2,7
11,5	-	2,7	-	-
12,0	-	2,8	1,4	2,8
13,0	-	2,5	1,7	2,7
13,5	-	-	1,9	-
14,0	-	2,8	2,0	3,0
14,5	-	-	2,2	-
15,0	-	2,7	2,2	-
15,5	-	-	2,9	-
16,0	-	-	2,3	-
20,0	2,4	-	-	-
24,0	-	-	-	2,8
25,0	-	2,5	-	-
26,0	-	-	2,5	-

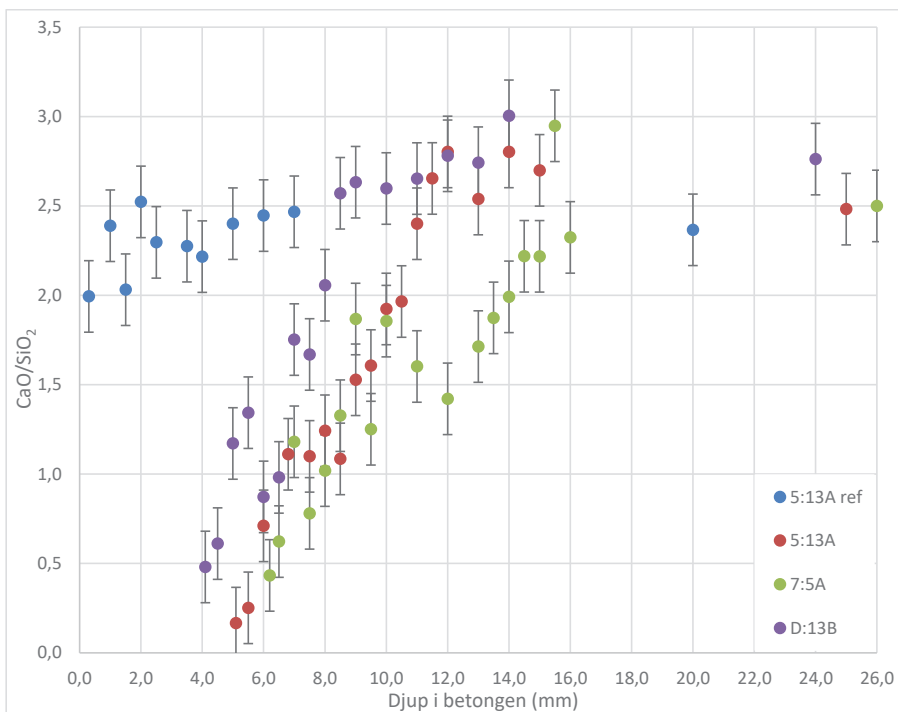


Diagram 1. Medelvärden för CaO/SiO₂-kvoter på olika djup i prover "5:13A, ref", "5:13A", "7:5A" och "D:13B" (se Tabell 4). Felstaplar markerar uppskattad mätosäkerhet ±0,2. X-axel anger uppskattat avstånd till betongens ursprungliga yta.

4 Diskussion och slutsatser

4.1 Betongens struktur

Sammanfattning av observationer gjorda i tunnslip tillverkade av prover "5:13A, ref", "5:13A", "7:5A" och "D:13B" finns i Tabeller 2 och 3. Djup hos områden med relativt hög kapillärporositet och enligt vår bedömning relativt låg halt av portlandit framgår ur tabellerna.

4.2 Bindemedlens kemiska sammansättning

Tabell 5 presenterar vår bedömning av djup hos områden där kalcium har lakats ur betongen. Bedömningen är baserad på uppmätta CaO/SiO₂-kvoter hos betongens bindemedel. Mätosäkerheten hos beräknade CaO/SiO₂-kvoter uppskattas till $\pm 0,2$. Observera att variation hos CaO/SiO₂-kvoter mellan olika analysområden kan också bero på lokala skillnader hos kalciumhalt i cementpastan. CaO/SiO₂-kvoter uppmätta på relativt stora djup i betongprover "5:13A, ref", "5:13A" och "7:5A" indikerar att bindemedlens normala (opåverkade av urlakning) CaO/SiO₂-kvot är $2,5 \pm 0,2$. I prov "D:13B" uppmättes en högre kvot, ca $2,7 \pm 0,2$. Om cement som användes i betongen är av samma sort som i de övriga proverna har vi ingen bra förklaring till varför kvoten är högre. Det är möjligt att det rör sig om lokala skillnader hos halten av kalcium/kalciumhydroxid i cementpastan. Användning av referensvärde för CaO/SiO₂-kvot på $2,7 \pm 0,2$ för prov "D:13B" i stället för $2,5 \pm 0,2$ skulle ändå inte påverka vår bedömning av största djup där kvoten indikerar urlakning. Generellt sett, i samtliga prover CaO/SiO₂-kvoter i områden som enligt vår bedömning inte är urlakade varierar mellan 2,2 och 3,0 (ett område på djup 14,0 mm i prov "D:13B"). För bedömningar som anges i Tabell 5 väljer vi att använda CaO/SiO₂-kvoter $< 2,2$ som indikation på urlakning av kalcium från betongens bindemedel.

Tabell 5. Största observerade djup i betongen med indikation på sänkt CaO/SiO₂-kvot hos bindemedlet (CaO/SiO₂ $< 2,2$). Tabellen anger maximala analysdjup där medelvärde av beräknade kvoter är lägre än 2,2 och minimala analysdjup där kvoter är 2,2 eller högre.

Prov	CaO/SiO ₂ $< 2,2$, indikation på urlakning av Ca, djup (mm)	CaO/SiO ₂ $\geq 2,2$, ingen indikation på urlakning av Ca, djup (mm)
5:13A, ref	ca 1,5 (svag urlakning)	2,0
5:13A	10,5	11,0
7:5A	14,0	14,5
D:13B	8,0	8,5

4.3 Urlakningsdjup hos betongen

I denna undersökning använder vi följande observationer som tecken på urlakning av betongens bindemedel: 1) förhöjning av cementpastans kapillärporositet som observeras i tunnslip, 2) minskning av halten av portlandit som observeras i tunnslip och 3) förändring av bindemedlets kemiska sammansättning som observeras med SEM-analys. Som tecken på urlakning ses minskning av Ca-halten/förhöjning av CaO/SiO₂-kvoten i bindemedlet.

Prover "5:13A" och "D:13B" visar enligt vår bedömning god överenskommelse mellan observationer gjorda i tunnslip och tolkning av resultat från analys med SEM. Bedömda urlakningsdjup i prov "5:13A" varierar mellan 10,0-11,0 mm och 10,5-11,0 mm beroende på metod. I prov "D:13B" är denna variation mellan ca 8,0 mm och 8,0-8,5 mm beroende på metod.

I prov "5:13A, ref" observerades i tunnslip relativt låg halt av portlandit i betongens yttre 0-4,0 mm. Minskningen av halten är dock liten. CaO/SiO₂-kvoter beräknade från SEM-analys på djup 2,0-4,0 mm är i en del av analysområden lite lägre än på större djup i provet men enligt vår bedömning visar ingen tydlig indikation på urlakning.

Observerade djup hos områden med relativt hög kapillärporositet och relativt låg halt av portlandit i tunnslipet tillverkat av prov "7:5A" är maximalt 11,0 mm respektive 13,0 mm medan resultat av SEM-analys indikerar urlakningsdjup på 14,0-14,5 mm. Djupet hos område med relativt låg halt av portlandit varierar mellan 11,5 och 13,0 mm inom tunnslipets bredd (25 mm). Detta visar att det förekommer lokala skillnader hos urlakningsgrad av betongen. Sådana skillnader kan vara förklaringen till att observationer av urlakningsdjup gjorda i tunnslip skiljer sig från bedömningar gjorda via SEM-analys av prover "5:13A, ref" och "7:5A".

RISE Research Institutes of Sweden AB Infrastruktur och betongbyggande - Betongutredning och utbildning

Utfört av

Vidimerat av



Mariusz Kalinowski



Katarina Malaga

Bilagor

Bilaga 1

Resultat från EDS/SEM-analyser

Tabell 1. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "5:13A, ref". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov	5:13A, ref										
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
0,1	0,3	2,9	4,9	27,6	0,5	0,7	53,1	0,5	9,6	100	1,9
0,1	0,2	1,3	4,5	30,5	0,4	0,5	54,8	0,5	7,3	100	1,8
0,1	0,9	1,5	4,2	27,6	1,1	1,1	56,0	0,4	7,2	100	2,0
0,1	0,3	0,9	3,5	21,7	0,3	0,7	65,8	0,4	6,5	100	3,0
0,5	0,1	1,2	5,9	32,2	1,5	0,6	51,5	0,3	6,7	100	1,6
0,5	0,2	0,7	3,9	28,8	0,4	0,7	56,9	0,4	7,9	100	2,0
0,5	0,2	1,3	4,4	32,3	2,0	0,5	51,8	0,4	7,2	100	1,6
1,0	0,3	1,1	4,9	30,7	2,7	0,4	53,1	0,5	6,3	100	1,7
1,0	0,0	0,5	3,3	26,7	3,1	0,3	59,0	0,2	6,9	100	2,2
1,0	0,1	0,5	3,6	24,2	3,0	0,8	61,7	0,2	6,0	100	2,6
1,0	0,2	0,3	2,5	19,7	1,9	0,7	66,6	0,2	7,9	100	3,4
1,0	0,1	0,6	3,8	24,0	2,3	1,4	61,3	0,4	6,1	100	2,6
1,0	0,1	1,4	8,3	27,5	5,0	1,4	52,2	0,1	4,2	100	1,9
1,5	0,3	0,4	3,5	26,6	2,4	0,5	61,5	0,2	4,7	100	2,3
1,5	0,1	0,4	3,9	29,6	3,0	0,3	58,7	0,3	3,7	100	2,0
1,5	0,1	1,0	5,2	32,1	2,0	1,1	51,3	0,4	6,8	100	1,6
1,5	0,1	2,9	4,5	27,7	2,1	0,4	55,7	0,5	6,1	100	2,0
1,5	0,3	1,0	4,5	29,8	2,7	0,4	55,4	0,3	5,6	100	1,9
1,5	0,2	0,5	3,9	24,3	4,5	0,5	59,0	0,4	6,8	100	2,4
2,0	0,1	0,7	2,8	21,7	1,9	0,4	67,1	0,3	5,0	100	3,1
2,0	0,2	0,8	4,7	22,0	4,5	0,3	63,4	0,9	3,3	100	2,9
2,0	0,0	0,6	2,3	26,7	1,8	0,2	62,6	0,3	5,4	100	2,3
2,0	0,1	1,3	7,0	27,7	1,7	1,8	53,1	0,4	6,9	100	1,9
2,0	0,1	0,8	4,5	22,4	2,4	1,0	59,7	0,4	8,6	100	2,7
2,0	0,2	1,1	4,9	25,4	2,4	0,6	58,5	0,4	6,7	100	2,3
2,0	0,1	1,0	3,8	32,6	2,0	0,2	56,1	0,3	3,9	100	1,7
2,0	0,1	0,6	2,9	20,6	2,0	0,4	67,3	0,3	5,8	100	3,3
2,5	0,3	1,3	3,4	25,7	2,1	0,3	61,1	0,3	5,5	100	2,4
2,5	0,0	0,8	2,8	23,9	1,5	0,2	64,7	0,3	5,8	100	2,7
2,5	0,0	0,9	3,2	28,8	1,3	0,2	60,7	0,4	4,4	100	2,1
2,5	0,0	1,3	4,1	29,1	1,9	0,2	58,1	0,3	5,0	100	2,0
3,5	0,7	0,7	5,0	23,7	4,0	0,2	60,4	0,3	5,0	100	2,5
3,5	0,0	1,0	3,9	28,1	2,1	0,3	60,7	0,2	3,8	100	2,2
3,5	0,4	0,9	5,3	29,0	1,7	0,8	55,7	0,4	5,7	100	1,9
3,5	0,4	1,0	4,5	32,8	2,5	0,5	52,5	0,3	5,6	100	1,6
3,5	0,1	1,0	5,0	29,5	2,8	0,9	55,9	0,2	4,6	100	1,9
3,5	0,1	0,4	3,9	24,6	1,2	1,1	63,9	0,1	4,7	100	2,6
3,5	0,1	0,7	2,7	21,0	1,9	0,4	66,9	0,4	6,0	100	3,2
4,0	0,2	0,6	3,3	30,6	2,1	0,3	58,9	0,3	3,9	100	1,9
4,0	0,1	1,0	5,4	25,3	7,1	0,3	57,2	0,2	3,6	100	2,3
4,0	0,3	0,6	4,5	30,5	2,4	0,7	58,3	0,2	2,6	100	1,9
4,0	0,1	0,9	3,8	22,9	2,0	0,5	63,4	0,2	6,3	100	2,8
5,0	0,1	0,7	3,4	27,5	1,2	1,0	61,7	0,2	4,3	100	2,2
5,0	0,4	0,9	4,7	28,5	2,4	0,7	57,5	0,2	4,7	100	2,0
5,0	0,1	0,8	3,8	26,2	2,3	0,5	60,2	0,3	5,9	100	2,3
5,0	0,2	0,8	4,9	20,2	8,5	0,3	61,6	0,3	3,2	100	3,1

Bilaga 1

Tabell 2. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "5:13A, ref". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov	5:13A, ref											
	Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
6,0	0,0	0,9	3,6	29,4	2,2	0,3	59,1	0,2	4,3	100	2,0	
6,0	1,0	0,9	5,2	31,8	1,6	0,6	55,1	0,3	3,8	100	1,7	
6,0	0,4	1,0	3,9	21,8	1,4	0,6	64,1	0,5	6,4	100	2,9	
6,0	0,2	0,6	4,7	20,6	4,8	1,1	64,5	0,4	3,1	100	3,1	
6,0	0,2	1,7	4,5	22,5	1,5	1,1	59,1	0,7	8,7	100	2,6	
6,0	0,2	1,4	3,4	25,4	1,7	1,2	60,2	0,2	6,2	100	2,4	
6,0	0,0	1,0	4,3	31,9	3,0	0,3	55,9	0,2	3,4	100	1,8	
6,0	0,3	1,3	4,7	20,6	2,1	1,0	61,8	0,3	8,0	100	3,0	
7,0	0,2	0,8	4,1	20,6	2,3	0,5	65,7	0,3	5,7	100	3,2	
7,0	0,1	0,9	4,5	28,7	1,6	0,2	56,3	0,3	7,5	100	2,0	
7,0	0,0	0,9	3,7	27,8	2,2	0,3	59,6	0,4	5,0	100	2,1	
7,0	0,2	1,1	5,1	31,5	2,6	0,3	54,5	0,1	4,5	100	1,7	
7,0	0,2	0,6	3,0	21,1	1,7	0,3	68,3	0,2	4,6	100	3,2	
7,0	0,1	1,1	4,1	24,0	1,7	0,7	60,5	0,4	7,4	100	2,5	
7,0	0,1	0,4	3,3	18,4	4,7	0,2	70,1	0,1	2,7	100	3,8	
7,0	0,1	1,0	3,5	30,8	1,2	0,2	58,0	0,3	4,8	100	1,9	
7,0	0,0	0,4	3,0	27,4	2,4	0,3	62,7	0,3	3,5	100	2,3	
7,0	0,1	1,0	3,8	30,6	1,6	0,4	58,4	0,3	4,0	100	1,9	
20,0	0,1	0,8	3,2	25,5	1,7	0,3	64,0	0,4	3,9	100	2,5	
20,0	0,4	0,7	3,5	28,1	1,7	0,3	61,9	0,4	3,0	100	2,2	
20,0	0,3	0,9	4,3	29,1	2,4	0,4	58,6	0,2	4,0	100	2,0	
20,0	0,3	0,6	4,1	26,0	2,9	0,4	62,3	0,2	3,2	100	2,4	
20,0	0,2	0,7	2,6	23,8	1,3	0,3	65,6	0,2	5,2	100	2,8	
20,0	0,3	1,1	4,3	26,6	1,6	0,5	61,0	0,2	4,5	100	2,3	
20,0	0,1	0,9	3,7	26,0	1,7	0,4	62,0	0,4	4,8	100	2,4	
20,0	0,2	0,8	3,2	25,2	1,9	0,3	64,0	0,3	4,2	100	2,5	
20,0	0,2	1,7	3,7	28,9	1,7	0,3	60,3	0,3	2,9	100	2,1	
20,0	0,1	1,0	4,1	24,3	1,7	0,3	63,0	0,3	5,3	100	2,6	
20,0	0,2	0,9	4,4	26,8	2,7	0,5	60,4	0,4	3,8	100	2,3	

Bilaga 1

Tabell 3. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "5:13A". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov	5:13A										
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
0,1	0,3	11,9	6,9	66,5	0,6	1,0	7,1	0,3	5,6	100	0,1
0,1	0,8	15,2	9,1	61,5	0,6	1,0	7,4	0,2	4,3	100	0,1
0,1	0,5	19,5	8,6	55,1	0,5	0,7	8,4	0,4	6,3	100	0,2
0,1	0,4	13,8	5,0	69,1	0,4	0,4	7,1	0,4	3,5	100	0,1
0,1	0,1	21,4	9,3	47,5	1,0	0,6	11,9	0,5	7,8	100	0,3
0,1	0,4	18,1	9,9	47,6	0,8	0,6	12,7	0,7	9,3	100	0,3
0,5	0,0	23,9	7,1	48,7	0,6	0,3	9,0	0,8	9,8	100	0,2
0,5	0,3	23,7	7,2	45,7	0,6	0,6	11,8	0,6	9,5	100	0,3
0,5	0,7	17,9	7,4	51,3	0,7	0,5	13,1	0,5	7,9	100	0,3
0,5	1,3	15,7	9,5	57,1	0,6	1,4	10,4	0,3	3,7	100	0,2
0,5	1,0	9,4	9,5	51,4	0,8	1,2	19,6	0,7	6,5	100	0,4
1,0	0,4	22,3	7,5	46,2	0,7	0,7	13,7	0,8	7,9	100	0,3
1,0	0,5	19,6	9,5	47,9	0,6	0,8	11,3	0,7	9,2	100	0,2
1,0	0,1	16,2	6,0	61,5	0,1	0,5	9,5	0,6	5,7	100	0,2
1,0	0,5	2,0	6,7	53,8	1,0	0,5	29,1	0,3	6,1	100	0,5
1,0	0,2	1,7	7,1	40,0	1,8	0,4	39,9	0,6	8,2	100	1,0
1,0	0,1	0,7	5,5	28,5	9,2	0,4	47,8	0,2	7,6	100	1,7
1,0	0,1	1,7	6,0	44,4	0,8	0,3	38,5	0,6	7,6	100	0,9
1,0	0,3	1,4	5,7	42,2	1,0	0,8	42,5	0,5	5,8	100	1,0
1,0	0,3	1,4	6,4	53,4	1,0	0,8	33,0	0,3	3,6	100	0,6
1,8	0,3	1,7	5,9	38,0	1,3	0,4	43,4	0,5	8,6	100	1,1
1,8	0,9	1,2	6,5	37,6	2,5	0,5	41,1	0,4	9,3	100	1,1
1,8	0,2	1,2	5,6	41,0	1,9	0,6	42,6	0,4	6,5	100	1,0
1,8	0,1	1,3	4,7	34,9	1,2	0,5	48,0	0,5	8,8	100	1,4
1,8	0,3	0,9	4,3	45,2	0,9	0,7	40,9	0,4	6,4	100	0,9
2,5	0,2	1,3	5,0	37,1	2,4	0,8	45,9	0,4	7,0	100	1,2
2,5	0,5	1,8	8,4	39,2	5,8	1,0	33,1	0,5	9,6	100	0,8
2,5	0,0	1,2	4,6	32,5	2,1	0,4	50,0	0,6	8,6	100	1,5
2,5	0,1	2,1	6,4	41,5	4,3	0,5	38,5	0,3	6,3	100	0,9
2,5	0,0	1,3	5,4	35,3	2,8	0,4	47,0	0,3	7,4	100	1,3
2,5	0,1	1,4	5,0	41,1	6,0	0,3	40,1	0,5	5,6	100	1,0
2,5	0,0	1,4	5,5	44,1	2,3	0,7	37,1	0,6	8,3	100	0,8
3,0	0,5	0,8	6,4	32,6	5,3	1,7	44,8	0,3	7,6	100	1,4
3,0	0,1	0,6	3,3	23,8	3,9	0,5	57,4	0,4	9,9	100	2,4
3,0	0,2	1,4	4,9	46,4	4,6	0,8	34,1	0,5	7,3	100	0,7
3,0	0,0	1,3	5,2	39,8	5,1	0,5	41,3	0,6	6,2	100	1,0
3,0	0,2	1,7	6,3	35,6	5,1	0,7	42,3	0,5	7,7	100	1,2
3,0	0,1	0,7	3,4	49,9	2,1	0,5	35,4	0,3	7,7	100	0,7
3,5	0,1	1,3	5,7	37,3	7,2	0,3	42,7	0,2	5,2	100	1,1
3,5	0,3	2,0	5,9	36,2	5,2	1,6	39,2	0,5	9,0	100	1,1
3,5	0,1	1,3	4,7	40,9	2,6	0,2	42,0	0,6	7,6	100	1,0
3,5	0,3	1,0	5,7	32,9	6,9	0,3	47,4	0,3	5,2	100	1,4
3,5	0,1	1,5	4,7	55,1	5,8	0,4	28,5	0,3	3,7	100	0,5
3,5	0,6	1,2	5,8	42,6	4,2	0,6	40,4	0,3	4,3	100	0,9
3,5	0,1	0,9	4,7	31,7	7,9	0,4	47,8	0,4	6,0	100	1,5
3,5	0,1	1,7	5,1	40,9	4,0	0,1	41,3	0,5	6,1	100	1,0

Bilaga 1

Tabell 4. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "5:13A". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov	5:13A											
	Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
4,0	0,1	1,1	5,7	34,4	9,1	0,3	43,1	0,5	5,7	100	1,3	
4,0	0,3	2,1	6,5	36,0	6,4	0,9	41,2	0,3	6,4	100	1,1	
4,0	0,2	0,8	4,1	29,2	4,2	1,0	54,3	0,3	6,0	100	1,9	
4,0	0,3	0,9	4,5	27,7	5,6	0,3	54,4	0,4	6,0	100	2,0	
4,0	0,3	0,9	3,6	28,8	6,4	0,3	54,5	0,3	5,0	100	1,9	
4,0	0,1	1,0	3,5	32,4	3,7	0,2	53,0	0,4	5,7	100	1,6	
4,0	0,5	1,7	6,5	38,4	3,8	0,3	42,4	0,4	6,1	100	1,1	
4,0	0,2	0,8	4,0	27,0	8,5	0,4	54,8	0,2	4,1	100	2,0	
4,0	0,3	1,7	5,4	36,0	4,9	1,3	44,0	0,8	5,7	100	1,2	
4,0	0,0	1,9	3,8	33,2	2,8	1,1	49,6	0,5	7,1	100	1,5	
4,0	0,1	1,2	5,2	38,2	3,4	0,6	46,0	0,4	5,0	100	1,2	
4,5	0,1	0,7	4,0	27,5	7,3	0,3	57,0	0,2	3,0	100	2,1	
4,5	0,1	1,2	3,7	32,6	4,7	0,3	50,7	0,4	6,4	100	1,6	
4,5	0,3	2,1	5,4	42,6	5,3	0,6	37,1	0,6	6,0	100	0,9	
4,5	0,2	1,5	5,0	32,1	8,0	0,4	45,7	0,8	6,6	100	1,4	
4,5	0,1	0,9	3,9	31,8	4,5	0,2	53,9	0,3	4,4	100	1,7	
4,5	0,1	1,0	3,2	36,8	3,8	0,2	48,0	0,4	6,7	100	1,3	
4,5	0,2	0,9	2,9	25,6	3,3	0,4	58,7	0,4	7,6	100	2,3	
4,5	0,2	0,8	3,9	26,9	5,3	0,4	57,4	0,3	5,0	100	2,1	
4,5	0,1	1,4	5,9	34,5	6,5	0,5	45,5	0,5	5,1	100	1,3	
4,5	1,0	0,9	6,2	33,8	6,5	0,4	47,3	0,3	3,6	100	1,4	
5,0	0,2	0,8	4,2	27,6	6,6	0,2	54,5	0,2	5,7	100	2,0	
5,0	0,7	0,8	4,9	34,7	5,5	0,4	48,4	0,4	4,3	100	1,4	
5,0	0,0	1,1	3,1	28,8	5,5	0,2	54,3	0,4	6,7	100	1,9	
5,0	0,3	0,9	4,0	37,5	5,5	0,8	46,6	0,2	4,2	100	1,2	
5,0	0,3	0,8	3,7	29,0	7,1	0,4	54,1	0,3	4,3	100	1,9	
5,0	0,6	0,3	3,3	19,3	7,7	0,3	65,1	0,2	3,3	100	3,4	
5,0	0,1	1,0	4,7	27,5	6,2	0,3	54,5	0,5	5,4	100	2,0	
5,0	0,1	1,6	3,9	35,8	4,0	0,2	49,3	0,5	4,7	100	1,4	
5,0	0,2	1,3	5,3	35,8	3,9	0,8	47,4	0,3	5,2	100	1,3	
5,0	0,6	0,9	5,3	33,5	3,5	0,8	51,9	0,1	3,5	100	1,5	
5,0	0,1	0,5	2,9	20,5	3,1	0,8	65,4	0,3	6,4	100	3,2	
5,5	0,4	0,4	2,9	38,8	6,4	0,5	48,5	0,0	2,1	100	1,2	
5,5	0,0	2,5	5,9	30,4	3,8	0,9	47,0	0,4	9,2	100	1,5	
5,5	1,3	1,7	7,2	37,4	4,7	0,4	43,3	0,1	4,0	100	1,2	
5,5	0,0	0,8	5,1	18,2	2,5	1,1	65,6	0,6	6,2	100	3,6	
5,5	0,1	0,7	4,5	20,2	2,7	0,6	64,4	0,3	6,5	100	3,2	
5,5	0,9	1,1	4,2	42,0	3,2	0,8	43,5	0,5	4,0	100	1,0	
6,0	0,1	0,8	2,8	25,5	2,6	0,1	61,3	0,4	6,4	100	2,4	
6,0	0,2	0,6	2,9	23,8	2,0	0,6	65,7	0,2	4,0	100	2,8	
6,0	0,5	0,7	3,7	26,2	2,9	0,3	60,6	0,5	4,7	100	2,3	
6,0	0,5	0,7	4,4	30,7	1,8	0,8	58,0	0,3	3,0	100	1,9	
6,0	0,0	0,8	3,1	28,1	2,7	0,4	60,2	0,4	4,1	100	2,1	
6,0	0,1	2,1	5,6	20,6	2,9	1,1	59,7	0,2	7,7	100	2,9	

Bilaga 1

Tabell 5. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "5:13A". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov	5:13A											
	Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
6,5	0,1	0,6	3,0	34,5	2,2	0,3	54,6	0,2	4,6	100	1,6	
6,5	0,1	0,6	2,2	24,4	1,7	0,3	65,0	0,3	5,6	100	2,7	
6,5	0,0	0,7	2,3	20,2	2,7	0,2	68,7	0,2	5,0	100	3,4	
6,5	0,3	0,9	3,1	26,0	1,7	0,7	62,4	0,4	4,5	100	2,4	
6,5	0,0	0,8	3,3	23,0	2,4	0,4	65,1	0,3	4,8	100	2,8	
6,5	0,0	1,0	3,0	21,9	2,4	0,4	66,6	0,4	4,4	100	3,0	
7,0	0,9	0,4	3,2	19,0	1,2	0,6	69,1	0,3	5,4	100	3,6	
7,0	1,4	0,5	4,6	24,5	3,0	0,2	62,8	0,3	2,8	100	2,6	
7,0	0,4	0,9	3,8	24,6	1,6	0,4	65,2	0,2	3,0	100	2,7	
7,0	0,1	0,9	4,3	26,6	1,6	0,7	62,9	0,3	2,7	100	2,4	
8,0	0,1	0,9	3,7	25,0	1,4	0,2	62,4	1,0	5,3	100	2,5	
8,0	0,2	0,8	7,1	26,4	1,2	2,0	59,3	0,1	3,0	100	2,2	
8,0	0,9	0,6	5,3	26,1	1,6	0,2	61,1	0,6	3,6	100	2,3	
8,0	0,6	0,7	3,9	25,5	1,8	0,3	63,9	0,3	3,1	100	2,5	
8,0	0,2	0,6	2,6	21,9	1,6	0,3	68,2	0,4	4,1	100	3,1	
9,0	0,3	0,4	3,8	23,0	1,6	0,5	67,1	0,1	3,1	100	2,9	
9,0	0,2	0,7	2,9	22,1	1,7	0,3	69,5	0,0	2,7	100	3,1	
9,0	1,4	0,8	5,7	22,1	1,1	0,6	64,2	0,3	3,9	100	2,9	
9,0	0,0	0,6	2,6	28,8	1,1	0,4	64,3	0,4	1,9	100	2,2	
10,0	0,1	0,9	3,3	23,6	1,3	0,5	65,8	0,3	4,2	100	2,8	
10,0	0,1	1,7	4,1	20,7	1,0	0,4	64,6	0,4	6,9	100	3,1	
10,0	0,1	1,1	4,1	26,7	1,6	1,0	58,3	0,6	6,6	100	2,2	
10,0	0,1	0,7	3,3	22,4	1,8	0,3	66,9	0,3	4,1	100	3,0	
10,0	0,1	0,8	3,6	23,4	1,1	0,2	65,0	0,4	5,6	100	2,8	
10,0	0,2	1,6	5,9	24,6	1,0	1,1	57,9	0,4	7,2	100	2,4	
20,0	0,2	1,2	3,9	31,0	2,0	0,4	57,9	0,3	3,2	100	1,9	
20,0	0,8	1,2	4,9	28,2	0,9	0,7	57,9	0,3	5,2	100	2,1	
20,0	0,4	1,2	4,2	27,4	1,5	0,5	60,7	0,2	3,9	100	2,2	
20,0	0,1	0,9	3,5	29,0	2,0	0,3	61,3	0,2	2,8	100	2,1	
20,0	0,2	0,6	4,1	25,2	1,4	1,0	63,6	0,3	3,6	100	2,5	
20,0	0,3	0,4	3,6	21,3	1,2	0,9	67,3	0,2	4,9	100	3,2	
20,0	0,1	1,1	3,2	22,4	1,6	0,4	64,7	0,4	6,2	100	2,9	
20,0	0,4	1,3	4,2	28,4	2,3	0,4	57,0	0,3	5,7	100	2,0	
20,0	0,2	0,6	2,9	20,7	2,2	0,5	69,4	0,2	3,3	100	3,4	
20,0	0,2	0,9	3,3	22,5	1,1	0,8	66,7	0,6	4,0	100	3,0	
20,0	0,0	1,1	4,0	25,6	1,7	0,6	62,7	0,1	4,4	100	2,5	
20,0	0,7	1,8	5,0	29,0	2,8	0,6	53,8	0,3	6,0	100	1,9	
20,0	0,1	1,2	4,1	27,1	1,6	0,3	61,0	0,4	4,2	100	2,2	
20,0	0,3	1,4	2,8	22,2	1,4	0,3	67,5	0,3	3,7	100	3,0	

Bilaga 1

Tabell 6. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "7:5A". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov		7:5A									
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
0,2	0,2	12,0	8,1	42,8	0,7	0,4	25,4	0,6	9,8	100	0,6
0,2	1,2	11,4	10,1	57,1	1,2	1,4	12,1	0,2	5,4	100	0,2
0,2	0,4	13,6	11,6	49,5	1,2	2,3	14,1	0,5	6,9	100	0,3
0,2	0,2	11,0	8,5	48,1	2,0	0,8	20,2	0,6	8,6	100	0,4
0,2	0,4	6,8	7,0	55,7	1,4	1,0	20,6	0,6	6,4	100	0,4
0,2	0,2	7,1	9,8	47,7	1,3	1,0	23,0	0,7	9,1	100	0,5
0,2	0,2	16,7	8,2	45,7	0,8	0,8	18,4	1,0	8,4	100	0,4
0,2	1,3	13,2	11,5	49,1	0,7	0,9	15,2	0,5	7,7	100	0,3
0,2	0,0	16,2	7,5	42,3	0,7	0,5	26,1	0,6	6,1	100	0,6
0,2	0,3	14,9	11,5	46,9	0,5	1,1	16,1	0,5	8,3	100	0,3
0,2	0,3	11,9	9,2	43,5	0,9	0,7	24,3	0,6	8,7	100	0,6
0,2	0,3	8,8	9,9	43,9	0,7	0,7	24,1	0,8	10,9	100	0,5
0,2	0,6	7,4	9,1	48,2	2,9	1,1	23,4	0,4	6,9	100	0,5
0,5	0,1	2,4	8,9	50,3	1,5	1,0	29,7	0,6	5,6	100	0,6
0,5	0,7	1,5	11,6	31,0	14,6	0,3	37,0	0,2	3,2	100	1,2
0,5	0,4	4,9	9,1	43,9	1,4	0,7	32,0	0,4	7,2	100	0,7
0,5	0,4	6,2	6,9	34,7	1,3	0,6	43,9	0,4	5,7	100	1,3
0,5	0,3	14,5	7,9	40,7	0,8	0,5	26,9	0,5	7,8	100	0,7
0,5	0,3	11,1	8,9	46,2	0,9	0,7	22,3	0,5	9,1	100	0,5
0,5	0,5	10,8	11,9	50,8	0,6	3,5	14,9	0,4	6,8	100	0,3
0,5	0,3	10,3	9,4	42,9	0,7	1,5	22,6	0,9	11,5	100	0,5
0,5	0,9	8,4	8,8	53,0	0,7	0,6	17,3	0,5	9,9	100	0,3
0,5	1,0	7,1	10,3	53,4	0,8	3,3	14,5	0,7	9,0	100	0,3
0,5	0,5	8,7	8,2	56,4	0,5	0,9	16,7	0,5	7,6	100	0,3
0,5	0,7	2,4	8,8	46,2	2,0	0,6	32,8	0,4	5,9	100	0,7
0,5	0,3	2,2	8,2	46,1	1,8	0,4	34,4	0,4	6,2	100	0,7
1,0	0,1	4,9	10,1	46,7	1,3	0,3	19,7	1,1	15,7	100	0,4
1,0	0,2	1,6	5,4	22,1	1,5	0,4	34,8	15,1	19,0	100	1,6
1,0	0,6	1,5	8,0	45,5	2,2	0,9	33,6	0,6	7,2	100	0,7
1,0	0,0	2,0	7,2	33,1	1,0	1,3	36,1	1,0	18,3	100	1,1
1,0	0,2	1,7	6,8	34,6	1,3	0,9	43,7	0,5	10,5	100	1,3
1,0	1,8	1,0	8,5	35,8	1,1	0,6	40,8	0,3	10,3	100	1,1
1,0	0,4	1,3	6,3	34,6	1,2	0,5	44,0	0,7	11,1	100	1,3
1,0	0,1	1,5	4,3	23,4	0,9	0,8	49,3	0,6	19,1	100	2,1
1,0	0,0	0,8	10,1	26,1	12,6	0,7	43,8	0,1	5,7	100	1,7
1,0	0,5	1,6	6,1	41,1	1,4	0,6	39,7	0,0	9,0	100	1,0
1,0	0,6	1,9	8,0	45,1	1,6	1,1	33,3	0,5	7,8	100	0,7
1,5	1,5	2,8	9,2	33,1	2,6	1,5	26,8	0,3	22,2	100	0,8
1,5	0,2	1,0	4,7	33,6	4,6	0,4	42,6	0,5	12,3	100	1,3
1,5	0,1	0,5	3,1	55,8	3,3	1,1	29,2	0,5	6,5	100	0,5
1,5	0,6	1,0	5,8	35,1	3,7	0,8	43,0	0,7	9,3	100	1,2
1,5	0,2	1,3	5,2	50,2	1,6	0,3	33,5	0,5	7,2	100	0,7
1,5	0,1	0,3	2,9	88,0	0,3	0,3	6,0	0,0	2,1	100	0,1
1,5	0,5	1,6	7,0	43,2	1,8	1,0	38,9	0,4	5,6	100	0,9

Bilaga 1

Tabell 7. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "7:5A". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov		7:5A									
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
2,0	1,6	1,3	10,9	40,9	2,5	0,8	30,3	0,2	11,7	100	0,7
2,0	0,7	1,0	6,6	40,9	1,4	0,6	43,3	0,1	5,6	100	1,1
2,0	0,4	0,7	5,2	36,8	7,5	0,4	42,9	0,3	5,9	100	1,2
2,0	0,9	1,0	6,9	40,4	6,4	0,4	38,8	0,2	4,9	100	1,0
2,0	0,9	0,6	16,5	56,6	0,5	15,2	6,9	0,4	2,5	100	0,1
2,0	0,1	2,7	6,6	34,5	4,7	0,6	41,9	0,4	8,4	100	1,2
2,0	0,2	0,9	4,8	31,8	2,3	0,8	49,5	0,5	9,2	100	1,6
2,0	0,1	1,3	5,4	31,7	3,4	0,5	44,9	0,7	12,1	100	1,4
2,0	0,3	1,1	5,6	38,8	2,9	0,5	41,5	0,4	9,1	100	1,1
2,0	2,0	0,8	7,8	42,1	1,6	1,2	37,4	0,4	6,7	100	0,9
2,5	0,7	1,1	7,4	43,9	2,1	1,7	37,2	0,5	5,6	100	0,8
2,5	0,5	0,9	5,8	38,1	3,1	0,4	43,1	0,4	7,8	100	1,1
2,5	0,6	0,6	5,7	27,7	4,5	0,4	51,1	0,3	9,1	100	1,8
2,5	0,3	0,6	3,9	26,5	2,8	0,2	37,1	0,4	28,1	100	1,4
2,5	0,1	0,6	3,3	18,1	1,6	0,3	40,2	0,3	35,6	100	2,2
2,5	3,9	1,5	16,7	45,2	2,2	0,8	23,6	0,1	5,9	100	0,5
3,0	0,1	0,6	4,3	26,4	2,5	0,8	55,2	0,4	9,7	100	2,1
3,0	0,2	0,5	3,7	20,8	4,0	0,7	60,1	0,5	9,5	100	2,9
3,0	0,2	0,4	4,4	27,6	6,5	0,6	54,0	0,3	6,1	100	2,0
3,0	0,1	0,8	4,0	29,0	2,1	0,6	53,7	0,5	9,2	100	1,9
3,0	0,2	1,1	5,7	37,0	2,5	0,6	45,8	0,4	6,7	100	1,2
3,0	0,1	0,9	5,2	36,0	11,2	0,4	42,5	0,3	3,6	100	1,2
3,5	0,1	0,6	4,2	30,4	8,8	0,2	50,8	0,4	4,7	100	1,7
3,5	0,2	0,9	4,5	33,8	4,0	0,5	47,6	0,5	8,1	100	1,4
3,5	0,3	0,8	5,3	41,0	2,0	0,4	43,0	0,5	6,7	100	1,1
3,5	0,0	0,9	5,6	40,8	5,5	0,4	41,9	0,4	4,6	100	1,0
3,5	0,2	0,8	5,1	33,9	2,6	1,2	48,8	0,3	7,1	100	1,4
3,5	0,3	0,8	5,2	45,8	2,1	0,8	39,3	0,4	5,2	100	0,9
3,5	0,1	0,6	3,9	38,7	1,8	0,3	48,1	0,3	6,3	100	1,2
3,5	0,3	0,8	5,0	37,8	2,5	0,4	43,9	0,1	9,2	100	1,2
3,5	0,1	0,9	4,4	34,1	3,3	0,4	48,3	0,6	8,0	100	1,4
3,5	0,0	1,1	5,9	34,9	4,1	0,3	47,3	0,5	5,8	100	1,4
3,5	0,1	1,0	5,8	45,7	4,1	0,6	37,5	0,2	5,0	100	0,8
3,5	0,1	1,2	5,1	38,9	2,4	0,3	44,4	0,4	7,2	100	1,1
3,5	0,0	0,9	4,6	35,0	2,9	0,4	48,0	0,4	7,8	100	1,4
3,5	0,2	0,8	4,2	33,6	3,6	0,3	52,0	0,2	5,0	100	1,5
4,0	0,2	0,7	3,8	21,3	3,7	0,6	56,2	0,2	13,4	100	2,6
4,0	0,1	0,9	4,7	27,6	4,0	0,6	52,4	0,3	9,5	100	1,9
4,0	0,2	0,8	4,9	29,1	5,1	0,3	50,7	0,4	8,6	100	1,7
4,0	1,2	0,5	6,3	25,4	6,7	0,7	49,2	0,5	9,6	100	1,9
4,0	0,2	0,5	4,3	27,1	8,9	0,6	52,2	0,4	5,9	100	1,9
4,0	0,2	1,0	4,9	32,2	3,7	0,4	46,3	0,5	11,1	100	1,4
4,0	0,7	0,9	5,9	28,5	6,0	0,5	39,9	0,6	17,0	100	1,4

Bilaga 1

Tabell 8. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "7:5A". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov		7:5A									
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
5,0	0,3	0,8	4,5	27,4	2,1	0,7	54,2	0,4	9,6	100	2,0
5,0	0,2	0,3	4,1	24,0	3,1	0,9	60,9	0,2	6,3	100	2,5
5,0	0,0	3,4	8,1	46,1	1,6	1,2	29,6	0,2	9,9	100	0,6
5,0	0,1	1,4	7,0	38,3	4,5	1,5	41,9	0,3	5,0	100	1,1
5,0	2,9	0,3	9,1	36,2	5,1	0,7	39,5	0,1	6,1	100	1,1
5,0	0,1	1,2	4,0	33,9	3,1	0,8	47,4	0,5	9,1	100	1,4
5,0	0,2	1,4	4,8	30,6	3,2	1,1	46,0	0,6	12,1	100	1,5
5,0	0,2	0,9	5,7	35,7	2,4	1,2	45,9	0,4	7,7	100	1,3
5,0	0,4	0,8	5,3	32,1	1,8	1,0	49,4	0,4	8,9	100	1,5
5,0	0,0	0,5	6,5	23,0	8,9	0,2	57,1	0,3	3,6	100	2,5
5,0	0,1	1,6	3,8	19,5	1,9	1,5	48,7	1,0	22,0	100	2,5
5,0	0,2	1,0	4,3	39,8	4,3	0,2	46,3	0,2	3,8	100	1,2
6,0	0,1	0,4	4,8	32,7	3,9	3,6	45,5	0,5	8,4	100	1,4
6,0	0,2	1,2	4,9	39,9	3,0	0,4	45,2	0,5	4,7	100	1,1
6,0	0,1	1,1	6,1	31,7	7,4	0,4	48,5	0,0	4,7	100	1,5
6,0	0,2	1,4	5,9	34,6	5,7	0,2	45,6	0,3	6,1	100	1,3
6,0	0,1	0,9	4,4	29,5	5,7	0,4	53,1	0,4	5,7	100	1,8
6,0	0,3	1,2	6,1	34,9	5,1	0,3	47,2	0,2	4,8	100	1,4
7,0	0,4	1,5	4,5	27,3	3,0	0,7	55,0	0,3	7,3	100	2,0
7,0	0,1	0,8	3,6	25,0	3,9	0,5	60,0	0,2	6,0	100	2,4
7,0	0,2	0,7	5,0	33,8	5,2	0,6	48,8	0,3	5,6	100	1,4
7,0	0,2	1,6	8,6	24,9	13,0	0,4	45,0	0,6	5,9	100	1,8
7,0	0,1	0,9	6,7	27,3	13,3	0,7	45,3	0,4	5,4	100	1,7
7,0	0,1	1,0	4,4	45,6	4,6	0,3	39,8	0,4	3,8	100	0,9
7,0	0,1	1,3	5,8	37,8	5,7	0,3	43,3	0,4	5,4	100	1,1
7,0	0,2	1,0	3,2	26,6	4,3	0,6	59,0	0,3	4,9	100	2,2
7,0	0,1	0,8	3,6	27,4	2,8	0,3	55,1	0,3	9,7	100	2,0
7,0	0,1	1,0	6,8	33,1	9,8	0,4	45,3	0,3	3,3	100	1,4
7,0	0,1	0,7	7,3	24,7	11,7	0,5	50,1	0,5	4,5	100	2,0
7,0	0,2	0,9	4,9	29,5	8,6	0,3	52,4	0,1	3,0	100	1,8
7,0	0,4	0,9	4,9	33,4	4,5	0,2	51,0	0,4	4,5	100	1,5
7,5	0,2	1,3	6,9	43,1	3,1	1,6	38,2	0,3	5,4	100	0,9
7,5	0,2	1,1	3,8	47,6	2,0	0,5	40,0	0,6	4,4	100	0,8
7,5	0,0	1,1	4,7	28,9	4,3	0,6	54,4	0,2	5,8	100	1,9
7,5	0,1	0,8	3,9	24,9	3,7	0,6	58,6	0,4	7,1	100	2,4
7,5	0,4	0,6	3,5	20,3	2,7	0,8	62,1	0,5	9,2	100	3,1
7,5	0,4	0,7	4,0	27,6	4,3	0,3	57,7	0,2	4,8	100	2,1
7,5	0,2	1,2	3,9	28,1	3,4	0,5	56,3	0,4	5,9	100	2,0
8,0	0,8	0,9	6,6	32,5	2,4	1,2	52,4	0,2	3,0	100	1,6
8,0	0,1	0,8	3,6	27,8	2,0	0,5	60,9	0,4	4,0	100	2,2
8,0	0,7	0,8	4,6	28,3	2,4	0,7	57,7	0,2	4,5	100	2,0
8,0	0,2	1,0	4,5	27,2	2,6	0,4	58,6	0,3	5,1	100	2,2
8,0	0,2	1,2	4,9	31,7	3,6	0,3	53,7	0,3	4,1	100	1,7
8,0	0,1	0,6	3,1	26,0	3,2	0,3	61,7	0,2	4,7	100	2,4
8,0	0,1	0,8	3,3	26,5	3,2	0,3	59,0	0,4	6,4	100	2,2
8,0	0,1	1,4	6,6	32,0	2,5	1,5	52,5	0,3	3,3	100	1,6
8,0	0,2	1,2	6,2	28,4	3,3	0,7	50,9	0,5	8,6	100	1,8
8,0	0,2	0,7	5,6	25,9	5,6	0,4	56,8	0,3	4,4	100	2,2

Bilaga 1

Tabell 9. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "7:5A". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov		7:5A									
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
8,5	0,1	0,4	3,4	19,8	4,2	0,3	69,4	0,2	2,3	100	3,5
8,5	0,4	0,6	4,2	44,4	2,5	0,5	42,6	0,0	4,7	100	1,0
8,5	0,1	1,2	5,0	26,0	3,6	0,3	59,8	0,3	3,8	100	2,3
8,5	1,1	0,7	7,2	33,9	1,8	1,2	51,0	0,3	2,9	100	1,5
8,5	1,6	0,5	5,4	25,2	1,4	0,5	60,7	0,2	4,4	100	2,4
8,5	0,2	1,1	3,8	23,4	1,9	1,0	61,6	0,3	6,8	100	2,6
9,0	0,1	0,8	4,7	36,0	1,8	1,5	52,2	0,1	2,8	100	1,4
9,0	0,3	1,0	5,3	28,5	2,3	0,4	57,9	0,4	3,9	100	2,0
9,0	0,9	0,8	5,8	18,2	4,7	0,2	63,9	0,3	5,2	100	3,5
9,0	0,2	0,8	3,4	21,8	2,0	0,3	67,6	0,3	3,6	100	3,1
9,0	0,2	1,1	4,3	34,5	1,8	0,2	54,7	0,1	3,2	100	1,6
9,0	0,6	1,0	6,4	29,2	6,2	0,3	52,5	0,3	3,5	100	1,8
9,0	0,7	0,8	4,6	22,7	1,6	0,9	62,3	0,4	6,1	100	2,7
9,0	0,4	0,6	4,2	34,8	2,1	1,3	53,0	0,1	3,5	100	1,5
9,5	0,5	0,8	3,7	20,6	2,5	0,7	67,2	0,5	3,5	100	3,3
9,5	0,1	0,6	2,6	21,0	2,7	0,2	69,8	0,1	2,9	100	3,3
9,5	1,7	0,6	5,6	24,2	0,9	0,7	61,7	0,3	4,4	100	2,6
9,5	0,5	0,5	4,5	20,6	1,2	0,6	69,7	0,2	2,3	100	3,4
9,5	0,4	0,4	3,8	21,7	2,3	0,8	66,5	0,2	4,0	100	3,1
9,5	0,3	2,2	5,8	26,6	1,8	0,8	56,2	0,3	6,1	100	2,1
10,0	0,3	0,8	3,6	28,2	1,3	0,4	60,3	0,3	4,9	100	2,1
10,0	0,5	0,6	3,8	26,2	1,5	0,3	63,7	0,2	3,1	100	2,4
10,0	0,2	0,8	4,4	30,6	1,8	0,2	57,3	0,5	4,2	100	1,9
10,0	0,8	0,9	7,2	27,9	2,3	1,5	55,5	0,2	3,7	100	2,0
10,0	0,2	0,6	2,9	23,6	1,2	0,3	66,3	0,3	4,7	100	2,8
10,0	0,2	0,6	4,8	22,8	1,6	0,8	64,6	0,2	4,5	100	2,8
10,0	0,2	0,6	4,9	28,1	1,5	0,6	61,4	0,3	2,4	100	2,2
20,0	0,2	0,8	2,9	21,9	1,9	0,3	67,8	0,3	4,0	100	3,1
20,0	0,3	1,8	4,4	27,2	1,6	0,5	56,7	0,3	7,3	100	2,1
20,0	0,1	0,7	3,3	22,4	1,4	0,4	68,3	0,1	3,4	100	3,1
20,0	0,2	0,8	3,5	26,7	2,1	0,4	61,3	0,2	4,9	100	2,3
20,0	0,2	0,5	2,3	16,4	1,0	0,7	70,8	0,6	7,6	100	4,3
20,0	0,5	1,0	4,2	25,3	1,9	0,4	62,3	0,3	4,3	100	2,5
20,0	0,1	0,7	3,5	27,3	1,4	0,5	63,0	0,1	3,5	100	2,3
20,0	0,5	0,7	5,1	30,7	2,1	0,3	56,7	0,3	3,7	100	1,8
20,0	0,2	0,6	4,4	25,3	1,9	0,5	63,1	0,2	3,8	100	2,5
20,0	0,2	0,7	4,4	27,8	1,9	0,7	60,6	0,2	3,6	100	2,2
20,0	0,1	1,1	4,0	30,6	1,6	0,3	58,3	0,4	3,7	100	1,9
20,0	0,4	0,9	3,8	30,8	1,8	0,3	58,2	0,0	3,9	100	1,9
20,0	0,2	0,7	3,4	23,0	1,6	0,4	65,8	0,2	4,8	100	2,9
20,0	1,1	0,4	3,7	31,2	1,4	0,3	60,1	0,0	1,8	100	1,9
20,0	0,2	0,7	3,6	22,9	1,7	0,3	64,7	0,3	5,6	100	2,8
20,0	0,0	1,2	4,9	31,0	1,6	0,1	55,0	0,5	5,8	100	1,8
20,0	0,2	1,0	5,2	30,9	2,0	0,7	56,6	0,2	3,3	100	1,8
20,0	0,4	0,5	3,8	20,6	1,4	0,9	63,8	0,4	8,3	100	3,1

Bilaga 1

Tabell 10. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "D:13B". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov		D:13B									
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
0,1	0,1	15,9	7,5	46,1	0,2	0,6	21,3	0,4	8,0	100	0,5
0,1	0,5	14,7	7,4	43,7	0,5	0,2	25,6	0,5	7,0	100	0,6
0,1	0,2	20,2	8,4	46,2	0,3	1,4	15,4	0,3	7,6	100	0,3
0,1	0,3	17,5	6,9	41,6	0,5	0,3	23,6	0,5	8,8	100	0,6
0,1	0,1	16,2	6,5	40,8	0,5	0,3	21,1	0,8	13,7	100	0,5
0,1	0,3	16,8	7,2	39,4	0,4	0,7	19,8	0,6	14,8	100	0,5
0,1	0,2	17,6	6,7	39,7	0,5	0,4	20,1	0,7	14,2	100	0,5
0,1	0,2	22,6	6,5	45,3	0,5	0,3	15,0	0,6	9,0	100	0,3
0,1	0,5	18,3	7,2	39,8	0,4	0,4	20,6	0,6	12,3	100	0,5
0,5	0,4	18,8	7,6	52,6	0,2	0,5	13,2	0,5	6,3	100	0,3
0,5	0,4	18,3	9,7	46,5	0,2	1,1	14,9	0,6	8,3	100	0,3
0,5	0,2	17,5	10,5	46,0	0,2	1,2	15,3	0,6	8,6	100	0,3
0,5	0,2	14,9	6,8	53,7	0,3	0,5	16,8	0,4	6,5	100	0,3
0,5	0,1	15,1	8,0	35,9	0,5	0,2	24,6	1,0	14,7	100	0,7
0,5	0,2	13,6	8,0	35,7	0,6	1,5	25,4	0,9	14,2	100	0,7
0,5	0,2	14,2	9,0	43,3	0,6	1,0	20,6	0,7	10,5	100	0,5
0,5	0,0	7,9	8,3	26,9	0,8	0,4	40,3	1,0	14,4	100	1,5
0,5	0,5	11,4	9,6	40,7	0,6	0,6	25,3	0,7	10,6	100	0,6
0,5	0,3	8,8	8,8	35,7	0,7	0,4	32,2	0,9	12,3	100	0,9
1,0	0,3	9,3	8,1	31,7	0,9	0,9	38,2	0,7	10,0	100	1,2
1,0	0,2	9,7	7,9	34,0	0,9	0,6	36,3	0,8	9,6	100	1,1
1,0	1,2	9,4	9,5	49,0	0,7	0,6	22,7	0,4	6,5	100	0,5
1,0	0,2	9,3	9,2	33,0	1,0	0,4	34,7	0,7	11,6	100	1,1
1,0	0,2	8,5	8,7	34,4	1,0	0,4	33,6	0,9	12,4	100	1,0
1,0	0,2	5,5	6,4	27,8	0,9	0,5	42,8	0,9	15,0	100	1,5
1,0	0,2	5,7	7,2	30,9	0,9	0,4	39,2	0,8	14,8	100	1,3
1,0	0,3	3,5	7,2	29,8	1,3	1,6	37,9	0,8	17,5	100	1,3
1,0	0,3	3,9	6,1	23,7	0,9	1,7	43,8	0,9	18,8	100	1,8
1,0	0,1	6,9	6,1	35,6	0,8	0,5	36,3	1,0	12,8	100	1,0
1,5	0,1	14,5	7,1	36,1	0,6	0,4	34,0	0,4	6,9	100	0,9
1,5	0,1	9,9	8,4	41,5	0,5	1,0	31,0	0,4	7,1	100	0,7
1,5	0,2	9,9	5,8	29,4	0,7	0,6	41,6	0,9	11,0	100	1,4
1,5	0,3	9,7	6,6	30,1	0,9	0,9	43,2	0,5	7,8	100	1,4
1,5	0,1	11,6	6,3	42,8	0,6	0,5	30,2	0,6	7,2	100	0,7
1,5	0,3	8,9	6,6	33,9	0,8	0,3	34,1	0,8	14,3	100	1,0
1,5	0,8	5,4	6,5	30,4	1,4	0,4	49,4	0,3	5,5	100	1,6
1,5	0,2	6,5	3,8	23,8	1,2	0,2	60,1	0,2	4,1	100	2,5
1,5	0,5	4,7	6,1	27,2	1,3	0,7	54,8	0,3	4,6	100	2,0
1,5	0,2	5,2	8,2	37,2	1,6	1,3	37,9	1,3	7,2	100	1,0
2,0	0,2	8,5	7,5	39,2	0,9	0,6	37,0	0,2	5,9	100	0,9
2,0	0,2	5,4	6,8	33,8	0,6	2,3	45,3	0,3	5,3	100	1,3
2,0	0,3	2,5	8,8	46,0	0,8	1,2	32,7	0,6	7,2	100	0,7
2,0	0,5	2,6	8,8	46,7	1,0	0,4	31,7	0,7	7,8	100	0,7
2,0	0,6	2,2	8,4	42,7	2,8	0,5	36,2	0,4	6,2	100	0,8
2,0	0,7	2,5	8,0	46,8	1,9	0,3	31,6	0,5	7,7	100	0,7
2,0	0,1	1,4	6,7	41,6	1,0	0,7	43,2	0,4	5,0	100	1,0
2,0	0,2	2,1	7,4	42,6	2,1	0,8	35,7	0,5	8,6	100	0,8
2,0	0,1	2,0	6,8	46,5	1,0	0,6	36,5	0,2	6,3	100	0,8

Bilaga 1

Tabell 11. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "D:13B". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov		D:13B									
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
2,5	0,3	2,0	11,4	45,2	7,7	1,6	29,0	0,2	2,8	100	0,6
2,5	0,3	1,8	7,7	43,8	2,3	0,3	36,7	0,5	6,6	100	0,8
2,5	0,3	1,4	5,1	32,6	6,8	0,5	41,4	0,4	11,6	100	1,3
2,5	0,1	1,0	4,2	28,6	6,4	0,3	49,7	0,5	9,1	100	1,7
2,5	0,2	1,1	4,3	45,0	2,2	0,3	40,0	0,3	6,6	100	0,9
2,5	0,0	1,2	4,8	40,5	3,2	0,2	43,2	0,4	6,6	100	1,1
2,5	1,8	1,5	7,9	45,9	0,8	0,3	36,6	0,4	4,9	100	0,8
2,5	0,1	1,6	5,0	46,0	0,6	0,3	35,5	0,5	10,4	100	0,8
2,5	0,3	1,3	5,5	43,6	7,2	0,3	36,0	0,4	5,6	100	0,8
3,0	0,2	1,8	5,9	45,2	2,6	0,2	38,0	0,3	5,8	100	0,8
3,0	0,1	1,5	5,4	38,3	3,7	0,4	45,0	0,4	5,3	100	1,2
3,0	0,2	1,4	7,1	19,9	0,5	1,5	65,2	0,4	3,9	100	3,3
3,0	0,0	1,0	3,4	18,9	2,4	0,5	67,8	0,5	5,5	100	3,6
3,0	0,0	1,1	4,2	35,1	5,2	0,2	41,9	1,2	11,1	100	1,2
3,0	0,1	1,0	4,8	39,7	5,3	0,3	43,4	0,1	5,2	100	1,1
3,0	0,4	1,5	6,3	39,0	1,5	0,2	43,2	0,4	7,5	100	1,1
3,5	0,1	1,2	5,2	43,9	1,7	0,4	41,9	0,5	5,2	100	1,0
3,5	0,1	1,2	6,7	36,2	1,3	1,6	42,9	0,5	9,6	100	1,2
3,5	0,1	0,8	4,1	28,0	2,9	0,3	56,4	0,4	7,1	100	2,0
3,5	0,2	1,2	4,7	28,2	6,4	0,3	49,2	0,6	9,2	100	1,7
3,5	0,1	0,9	4,0	26,0	6,5	0,7	56,0	0,4	5,4	100	2,2
3,5	0,3	0,9	4,0	28,1	7,2	0,2	55,0	0,2	4,1	100	2,0
3,5	0,2	1,0	5,5	26,1	5,7	1,0	55,2	0,3	5,1	100	2,1
3,5	0,2	0,9	4,2	38,2	3,8	0,2	46,7	0,5	5,3	100	1,2
4,0	0,1	1,3	4,8	47,5	2,5	0,1	37,5	0,3	5,8	100	0,8
4,0	0,2	1,8	7,5	37,8	3,8	1,2	41,0	0,5	6,2	100	1,1
4,0	0,1	1,1	6,6	32,5	8,8	0,4	44,5	0,4	5,6	100	1,4
4,0	0,3	1,9	7,1	24,6	7,0	0,7	49,7	0,4	8,4	100	2,0
4,0	0,2	1,6	7,2	30,6	6,3	1,3	45,0	0,4	7,4	100	1,5
4,0	0,3	0,7	3,4	26,9	4,8	0,3	59,1	0,2	4,3	100	2,2
4,0	0,0	1,0	3,6	25,6	4,1	0,3	61,0	0,4	4,2	100	2,4
4,0	0,1	0,6	4,1	20,6	8,1	0,2	63,3	0,1	2,9	100	3,1
4,0	0,2	0,8	3,0	21,2	3,4	0,2	61,6	0,4	9,3	100	2,9
4,0	0,4	0,8	3,8	26,1	3,8	0,2	59,0	0,3	5,7	100	2,3
4,0	0,2	0,4	3,6	21,2	2,8	2,9	65,9	0,0	3,1	100	3,1
4,0	0,1	0,3	1,7	31,5	3,1	0,2	58,6	0,2	4,3	100	1,9
4,0	0,1	0,8	3,1	23,0	3,8	0,1	62,5	0,5	6,2	100	2,7
4,0	0,1	0,7	3,2	22,2	3,1	1,0	62,2	0,3	7,3	100	2,8
4,0	0,0	0,5	2,3	49,6	5,1	0,1	39,2	0,2	3,1	100	0,8

Bilaga 1

Tabell 12. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "D:13B". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov		D:13B									
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
4,5	0,6	1,6	6,6	31,1	4,0	1,2	48,5	0,4	5,9	100	1,6
4,5	0,0	1,0	3,6	37,8	5,2	0,1	48,1	0,3	4,0	100	1,3
4,5	0,0	1,2	4,6	34,3	4,3	1,0	50,3	0,3	4,0	100	1,5
4,5	0,5	0,6	3,3	22,9	3,0	0,3	65,4	0,3	3,9	100	2,9
4,5	0,1	0,6	2,6	15,7	1,5	0,3	72,2	0,4	6,7	100	4,6
4,5	0,3	0,4	2,4	29,7	1,9	0,2	62,0	0,4	2,8	100	2,1
4,5	0,4	0,5	3,9	20,9	1,7	1,3	65,0	0,2	6,0	100	3,1
4,5	0,1	0,8	6,4	21,1	2,1	0,5	62,7	0,4	5,9	100	3,0
4,5	0,0	0,9	3,3	28,8	2,9	0,2	58,7	0,2	5,0	100	2,0
4,5	0,2	1,9	6,6	23,1	3,2	1,1	56,9	0,3	6,8	100	2,5
4,5	0,1	1,1	5,1	16,0	2,1	0,2	66,5	0,4	8,4	100	4,2
4,5	0,1	1,6	4,4	22,4	3,1	0,6	60,4	0,6	7,0	100	2,7
4,5	0,2	0,9	4,6	27,2	3,3	0,4	58,4	0,3	4,8	100	2,1
4,5	0,3	0,9	4,3	23,8	2,9	0,2	61,1	0,5	6,0	100	2,6
5,0	0,1	0,9	3,8	24,9	3,2	0,2	62,4	0,3	4,3	100	2,5
5,0	0,1	0,7	2,9	24,1	2,7	0,2	65,3	0,2	3,8	100	2,7
5,0	0,1	0,8	3,2	23,6	2,4	0,3	63,8	0,5	5,4	100	2,7
5,0	0,1	0,8	5,3	21,6	1,7	0,2	60,6	0,5	9,4	100	2,8
5,0	0,1	1,0	4,5	24,6	2,3	0,2	60,4	0,4	6,6	100	2,5
5,0	0,1	0,5	2,9	18,2	2,8	0,2	68,5	0,2	6,6	100	3,8
5,0	0,0	0,5	4,3	33,5	7,8	0,2	49,9	0,2	3,6	100	1,5
5,0	0,6	0,6	3,1	39,6	1,7	0,2	50,2	0,2	3,9	100	1,3
5,0	0,1	0,6	2,5	20,3	1,8	0,3	65,8	0,4	8,2	100	3,2
5,0	0,0	0,9	2,7	22,6	2,4	0,1	65,8	0,1	5,6	100	2,9
5,0	0,0	0,6	2,8	21,6	2,4	0,3	66,9	0,3	5,1	100	3,1
6,0	0,1	0,7	2,1	23,7	1,8	0,2	68,6	0,0	2,8	100	2,9
6,0	0,1	0,6	4,5	19,1	7,5	0,2	64,9	0,2	3,0	100	3,4
6,0	0,0	0,2	1,3	35,0	1,1	0,2	57,6	0,3	4,3	100	1,6
6,0	0,3	1,1	4,1	28,3	2,1	0,8	58,5	0,2	4,7	100	2,1
6,0	0,3	0,6	4,4	21,9	1,7	0,9	65,1	0,0	5,1	100	3,0
6,0	0,0	0,8	2,9	24,5	1,6	0,2	65,6	0,1	4,3	100	2,7
6,0	0,0	0,6	2,6	19,6	2,1	0,1	68,6	0,4	6,1	100	3,5
6,0	1,5	0,6	6,2	29,2	1,5	0,6	54,4	0,5	5,4	100	1,9
6,0	0,2	0,6	3,4	26,2	2,0	0,5	62,1	0,1	4,8	100	2,4
7,0	0,5	1,3	7,3	25,8	1,9	3,0	52,3	0,2	7,7	100	2,0
7,0	0,2	0,6	4,6	24,2	2,6	0,6	62,3	0,4	4,4	100	2,6
7,0	0,1	0,6	3,0	24,6	2,4	0,2	64,1	0,3	4,7	100	2,6
7,0	0,0	1,1	5,7	26,7	2,5	1,3	57,4	0,2	5,1	100	2,2
7,0	0,2	0,6	3,3	17,8	1,7	0,2	69,3	0,3	6,7	100	3,9
8,0	0,0	0,7	3,2	20,5	1,9	0,3	67,6	0,6	5,3	100	3,3
8,0	0,2	1,0	3,8	21,7	2,5	0,3	61,8	0,6	8,0	100	2,9
8,0	0,1	0,7	2,8	27,9	1,9	0,3	61,7	0,3	4,5	100	2,2
8,0	0,9	0,7	6,6	30,9	2,2	2,0	53,0	0,3	3,4	100	1,7
8,0	0,1	1,3	3,9	20,8	1,7	0,8	63,9	0,4	7,1	100	3,1
8,0	0,0	0,6	2,9	17,9	1,9	0,3	72,0	0,3	4,2	100	4,0
8,0	0,1	0,9	3,1	27,2	2,3	0,1	62,2	0,3	3,8	100	2,3

Bilaga 1

Tabell 13. Kemisk sammansättning hos betongens bindemedel i prov "D:13B". Storlek hos enskilda analysområden: 0,2x0,1 mm. Sista kolumnen anger beräknat värde för CaO/SiO₂-kvot.

Prov		D:13B									
Djup	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total	CaO/ SiO ₂
mm	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	vikt%	
9,0	0,3	0,9	3,7	33,3	2,2	0,1	54,5	0,0	5,0	100	1,6
9,0	1,0	1,8	7,4	31,8	2,1	0,7	49,1	0,3	5,8	100	1,5
9,0	0,2	0,6	2,9	20,2	1,7	0,2	70,0	0,2	4,1	100	3,5
9,0	0,1	0,6	3,0	21,8	2,6	0,2	68,4	0,1	3,3	100	3,1
9,0	0,0	0,9	3,2	22,7	2,1	0,1	67,1	0,3	3,7	100	3,0
9,0	0,1	0,7	2,6	23,1	2,3	0,2	66,1	0,2	4,8	100	2,9
9,0	0,2	0,5	3,6	15,6	5,8	0,4	71,1	0,1	2,8	100	4,6
9,0	0,2	1,0	3,9	28,7	2,1	0,4	59,8	0,3	3,6	100	2,1
9,0	0,7	0,7	4,3	25,8	2,3	0,1	62,8	0,1	3,2	100	2,4
10,0	0,2	1,0	3,7	27,7	1,7	0,6	61,0	0,5	3,8	100	2,2
10,0	0,3	1,3	4,0	25,8	2,0	0,3	60,9	0,3	5,2	100	2,4
10,0	0,1	0,7	3,3	24,6	2,0	0,1	64,7	0,6	3,9	100	2,6
10,0	0,0	0,5	2,8	15,0	0,6	0,6	72,2	0,8	7,6	100	4,8
20,0	0,2	1,4	3,5	21,5	1,6	0,7	65,1	0,5	5,6	100	3,0
20,0	0,4	1,3	6,1	27,4	1,9	1,0	56,9	0,3	4,5	100	2,1
20,0	0,2	0,5	2,4	20,7	1,3	0,7	68,8	0,3	5,2	100	3,3
20,0	0,1	0,8	3,8	23,8	1,9	0,6	63,2	0,2	5,6	100	2,7
20,0	0,1	0,9	3,2	23,2	1,8	0,4	65,3	0,3	4,9	100	2,8
20,0	0,3	1,1	3,4	26,0	2,0	0,5	62,5	0,3	4,0	100	2,4
20,0	0,3	0,7	3,1	23,2	2,0	0,5	65,3	0,4	4,6	100	2,8
20,0	0,2	2,1	4,5	21,3	1,8	0,7	61,7	0,5	7,3	100	2,9
20,0	0,3	1,6	4,6	26,0	1,8	0,7	59,0	0,2	5,9	100	2,3
20,0	0,2	0,6	2,7	17,2	1,4	0,9	71,2	0,3	5,6	100	4,1
20,0	0,2	0,7	3,2	26,7	1,8	1,0	62,1	0,3	3,9	100	2,3
20,0	0,9	0,9	3,9	26,0	1,3	0,7	61,8	0,3	4,3	100	2,4

Bilaga 2

Bildbilaga



Bild 1. Prover "D:13B" (till vänster), "5:13A" (i mitten) och "7:5A".

Bilaga 2



Bild 2. Prov "5:13A". Linjer markerar områden som analyserades i tunnslip.

Bilaga 2



Bild 3. Prov "5:13A" efter sågning av bitar som användes för tillverkning av tunnslip och för analys i SEM.

Bilaga 2



Bild 4. Prov "7:5A". Linje markerar område som analyserades i tunnslip.

Bilaga 2



Bild 5. Prov "7:5A" efter sågning av bitar som användes för tillverkning av tunnslip och för analys i SEM.

Bilaga 2



Bild 6. Prov "D:13B". Linje markerar område som analyserades i tunnslip.

Bilaga 2



Bild 7. Prov "D:13B" efter sågning av bitar som användes för tillverkning av tunnslip och för analys i SEM.

Bilaga 2

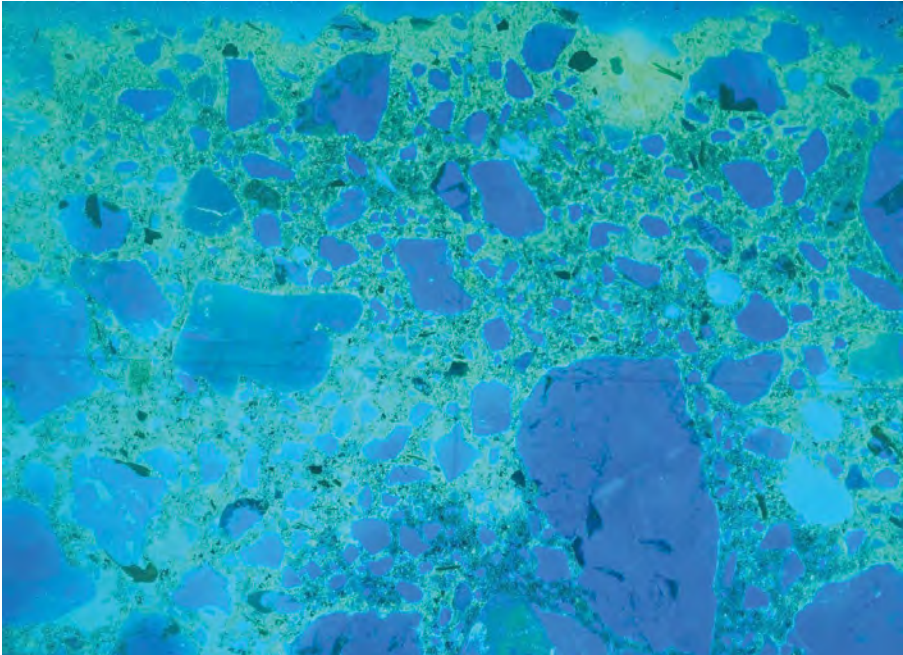


Bild 8. Prov "5:13A, ref", djup: 0-5 mm. Bilden är tagen i tunnslip, UV ljus. Området i bilden är ca 7 mm brett.

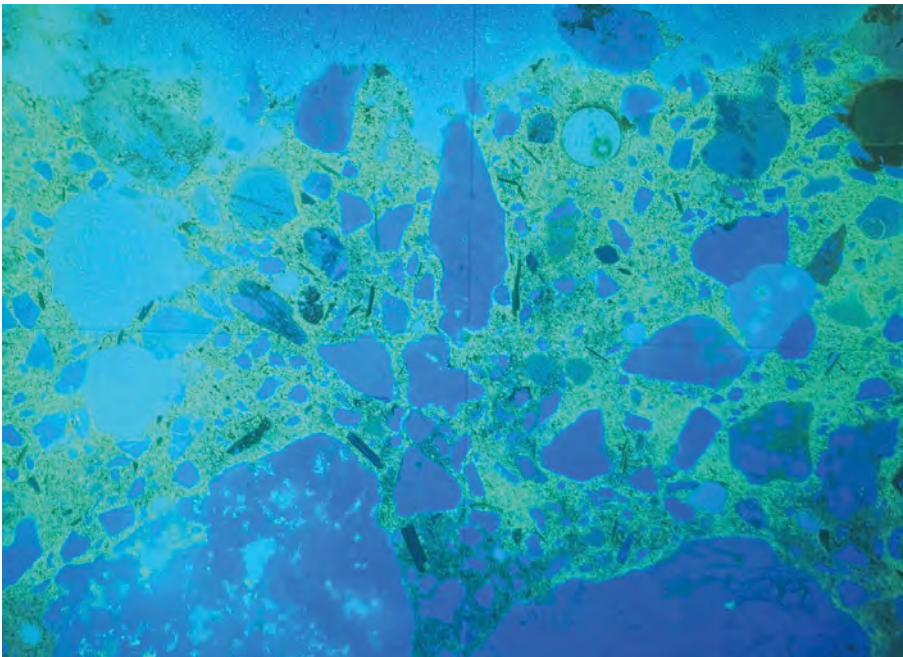


Bild 9. Prov "5:13A", djup: 0-5 mm. Bilden är tagen i tunnslip, UV ljus. Området i bilden är ca 7 mm brett.

Bilaga 2

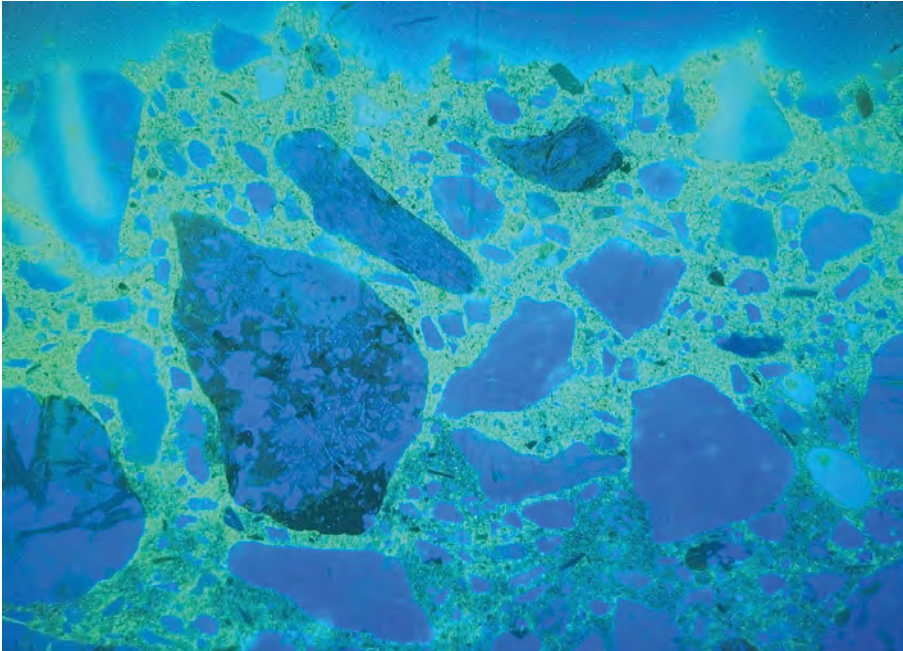


Bild 10. Prov "7:5A", djup: 0-5 mm. Bilden är tagen i tunnslip, UV ljus. Området i bilden är ca 7 mm brett.

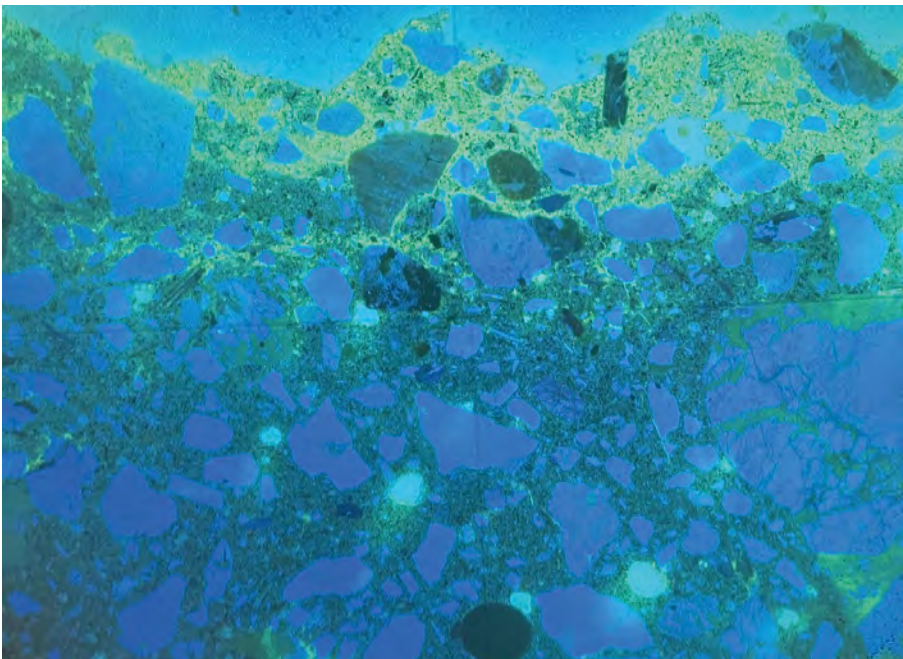


Bild 11. Prov "D:13B", djup: 0-5 mm. Bilden är tagen i tunnslip, UV ljus. Området i bilden är ca 7 mm brett.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19, Stockholm

ISSN 1104-1773