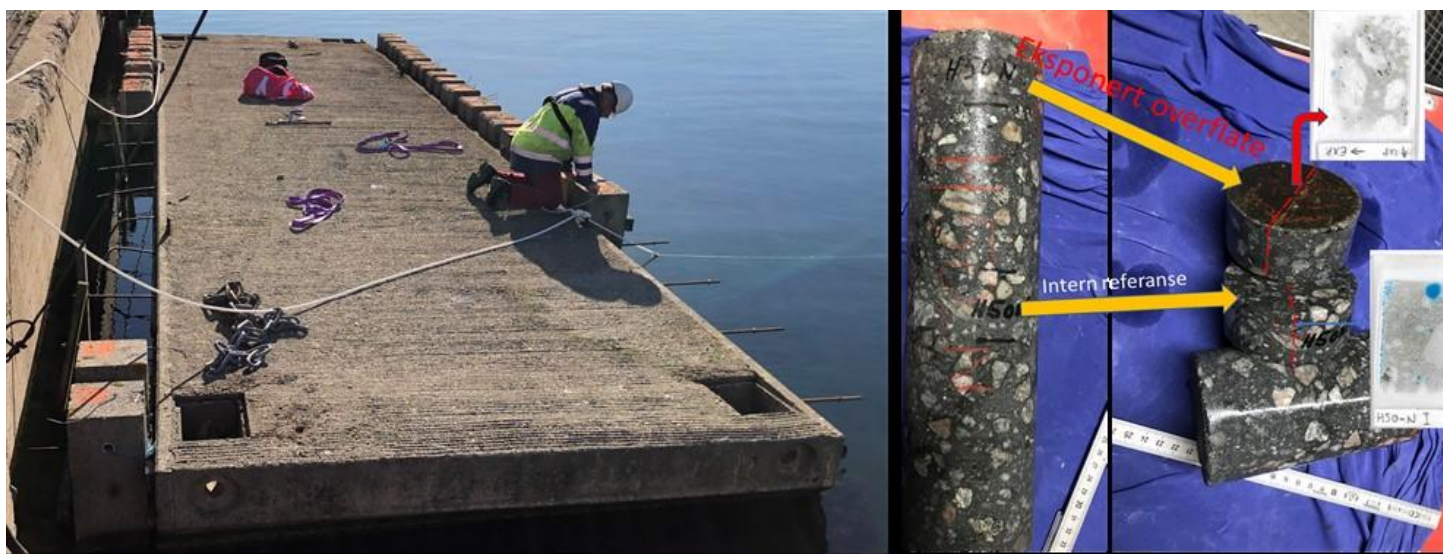


Mikroskopisk undersøkning av betong

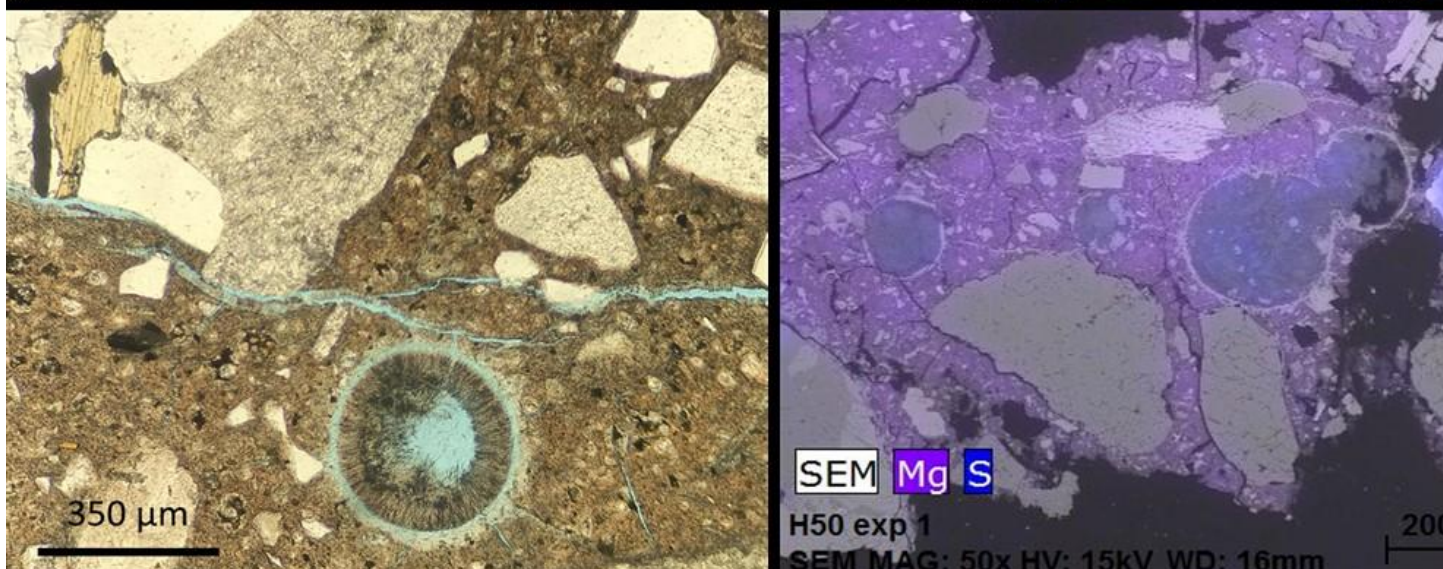
Innverknad av brakkvatn i Kristiansand testfelt

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 878



Fotomontasje: Per Hægelia



Tittel

Mikroskopisk undersøkning av betong

Undertittel

Innverknad av brakkvatn i Kristiansand testfelt

Forfatter

Per Hagelia

Avdeling

Konstruksjoner

Seksjon

Konstruksjonsteknikk

Prosjektnummer

Per Hagelia

Rapportnummer

878

Prosjektleder

Bård M. Pedersen

Godkjent av

Øyvind Bjøntegaard

Emneord

Testfelt, betong, eksponeringsmiljø, nedbrytingsmekanismer

Sammendrag

Denne rapporten dokumenterer nedbrytingsmekanismer i testbetong eksponert i Kristiansand i 25 år. Eksponeringsmiljøet her er brakt sjøvatn med varierende salinitet over årstidene. Tynnslip av tre ulike betongar blei undersøkte i polarisert lys og Scanning elektronmikroskop. Referansebetongen var minst påverka medan betong med høgt innhald av silikastøv og høgt bindemiddelinnehald hadde ei porøs ytre sone påverka sulfat og magnesium. Betong med kalkfyller viste eit tidleg stadium av thaumasitt sulfatangrep og djupare magnesiumangrep med diffus utluting av sementpastaen. Alle betongreseptane var tydeleg påverka av kloridinntrenging.

Title

Microscopical examination of concrete

Subtitle

Influence of brackish water at the Kristiansand test site

Author

Per Hagelia

Department

Structures

Section

Structural Engineering

Project number

Per Hagelia

Report number

878

Project manager

Bård M. Pedersen

Approved by

Øyvind Bjøntegaard

Key words

Test site, concrete, exposure environment, deterioration mechanisms

Summary

This report provides documentation of deterioration mechanisms in concrete exposed for 25 years in brackish seawater with variable seasonal salinity. Thin sections from three concrete mixes were examined in polarised light and by SEM. The reference concrete was least affected whilst concrete with high contents of silica fume and high binder contents had a porous outer zone influenced by sulfate and magnesium. Concrete with limestone filler showed an early stage of thaumasite sulfate attack and a deeper magnesium attack with diffuse leaching of the cement paste matrix. All concretes were significantly influenced by chloride penetration.



Innhold

Samandrag	2
1 Bakgrunn og problemstilling	3
2 Feltstasjonen i Kristiansand	5
2.1 Lokalisering ved Fiskå	5
2.2 Sjøvasstemperatur	5
2.3 Eksponeringsforhold.....	5
3 Prøver og analysemetodikk.....	9
3.1 Reseptar	9
3.2 Utboring av kjerner	9
3.3 Betongpetrografi og Scanning elektronmikroskopi (SEM)	11
4 Resultat	12
4.1 B50_N2, referansebetong.....	12
4.1.1 Petrografi.....	12
4.1.2 SEM.....	13
4.2 F50_N2, høgt innhold av silikastøv.....	15
4.2.1 Petrografi.....	15
4.2.2 SEM.....	17
4.3 H50_N2 med kalkfiller	19
4.3.1 Petrografi.....	19
4.3.2 SEM.....	21
5 Diskusjon	26
5.1 Eksponeringsforhold, nedbryting og mogleg vidare utvikling.....	26
5.2 Kva kan vere årsaka til høgare kloridinntrenging i brakkvatn enn i sjøvatn?.....	27
6 Konklusjon.....	28
7 Referansar	29
Vedlegg 1 Oppsummering av resultat frå Blindtarmen i Oslo (1957-1971).....	31
Vedlegg 2 Betongreseptar – feltstasjonen ved Fiskå, Kristiansand.....	32

Samandrag

Denne rapporten dokumenterer tilstandsutvikling i testbetong eksponert i Kristiansand i 25 år. Eksponeringsmiljøet på testfeltet er brakt sjøvatn med varierende salinitet over årstidene. Tre utvalde betongreseptar blei undersøkt med tanke på nedbrytingsmekanismer i neddykka deler av betongen. Analysane omfatta mikroskopering av betongtynnslip i polarisert lys og med Scanning elektronmikroskop. Resultata viste at referansebetong med $v/b = 0,38$ og 4 % silikastøv var svært lite påverka av sulfat og viste ikkje inntrenging av magnesium. Ein betongresept med $v/b = 0,42$; 12,5 % silikastøv og høgt bindemiddelinnhald hadde ei ytre porøs sone påverka sulfat, utluting av kalsium og magnesium silikathydrat inntil 3 mm og med sekundær ettringitt utfelt på overflateparallelt riss. Denne er dermed potensielt mindre motstandsdyktig enn referansebetongen. Den tredje betongresepten med $v/b = 0,40$ og 17,5 % kalkfiller viste eit tidleg stadium av thaumasitt sulfatangrep og djupare magnesiumangrep med diffus utluting av sementpastaen lokalt inntil 1-2 cm. Denne resepten var tilsynelatande mest open for vidare nedbryting. Alle betongreseptane var tydeleg påverka av kloridinntrenging.

1 Bakgrunn og problemstilling

Statens vegvesen etablerte i 1994 ein teststasjon for eksponering av betong i sjøvatn med ei rad ulike reseptar i Kristiansand (Isaksen & Holtmon 1994). Prøvene blei samla inn etter 25 års eksponering den 25. august 2020 og går inn i eit utvida prøvingsprogram innan FoU-prosjektet «DURMARE» (2021-2024) i samarbeid med NTNU. Figurane 1 og 2 viser lokaliseringa av feltstasjonen rett ved utrensla til Fiskåbekken. Ei av problemstillingane i DURMARE er å avklare effekten av sulfat i sjøvatn med tanke på tilstandsutvikling i konstruksjonsbetong.

Hensikta med denne rapporten er undersøke eit utval av prøver med tre reseptar for å samanlikne effektar av påverknad frå sjøvatn. Det er her lagt særleg vekt på mogleg utvikling av Thumasitt Sulfatangrep (TSA) i resept med kalkfiller. Hypotesen var at resept med kalkfiller kunne vere meir utsett for thaumasittangrep enn reseptar utan kalkfiller.

Thaumasitt, med forenkla kjemisk samansetning $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$, dannast i prinsipp på bekostning av kalsium-silikat-hydrat (C-S-H) og kan føre til fullstendig nedbryting av sementlimet (Crammond mfl. 2003). Omfattande TSA er kjent frå gammal konstruksjonsbetong i alunskifermiljø i Oslo basert på Portlandsement utan spesielle tilsetningsstoff (v/c var > 0,50). Sulfatangrepet i alunskifer, undersøkt av Alunskiferutvalget, blei opphavleg tolka som sekundært ettringittangrep (Bastiansen mfl. 1957, Moum og Rosenqvist 1959, Fiskaa mfl. 1971). Men petrografiske undersøkingar av gjenverande testprismar etter langtidseksponering i den såkalla «Blindtarmen» i Oslo sentrum viste at årsaka var TSA i kombinasjon med syreangrep og indre karbonatisering («Popcorn calcite» – PCD). Testprismar frå «Blindtarmen» (10 cm x 10 cm x 40 cm) viste variabel nedbryting med ytre utvaska betong i direkte kontakt med svovelsurt vatn, følgd av ei sone med utfelling av PCD og ei indre sone med TSA mot relativt upåverka betong (Hagelia og Sibbick 2009). Fiskaa mfl. (1971) rapporterte at «Tilsetting av finmalt kalsitt eller kalkstensmel i det fine tilslaget har vist seg ugunstig», med større grad av nedbryting av sementlimet enn referansebetong, volumtap og svekking av trykkstyrken (30-50 %). Også tilsetting av 4 % luft hadde negativ effekt med større grad av nedbryting enn referansebetongen, og reflekterer truleg auka permeabilitet. v/c-talet var 0,51-0,52 i desse reseptane (Vedlegg 1). *Forsøket i «Blindtarmen» omfatta også ein serie nr 6 med v/c = 0,62 tilsett 15 % silikastøv frå Fiskaa verk: «Mere overraskende var det imidlertid at serie 6 viste så gode resultater». Denne betongen viste seg å vere uskadd i 1960, etter åtte års eksponering og hadde svært lite volumtap etter 20 års eksponering (Fiskaa mfl., 1971, 1973). Dette er interessant i historisk samanheng, og viser at silikastøv inntil omkring 1960 var ukjent som tilsetningsstoff.*

Thaumasitt er observert i moderne sprøytebetong, både i alunskifer- og undersjøisk miljø. I begge tilfelle ser ein thaumasittutfellingar i porer og riss («Thaumasite formation» – TF) og med delvis nedbryting av sementlimet (fullskala TSA, ofte med PCD). Sprøytebetongen i alunskifermiljø, år var basert på sulfatresistent Portland sement med v/b = 0,40 til 0,50 og tilsett 5-10 % silikastøv (Hagelia mfl. 2001, 2003; Hagelia 2011, 2018). TF og TSA i undersjøisk sprøytebetong (v/b = 0,45 til 0,55 med 1-14 % silikastøv) er observert i relativt tynne sprøytebetongsjikt (< 50-100 μm) og med innverknad av magnesium frå sjøvatnet, dels i form av brucitt ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) og dels med Mg som substituerer for Ca i sementlimet (M-S-H) (Hagelia 2011, 2018). Indre karbonatisering i form av PCD dannast i kontakt med oppløyst bikarbonat frå eksternt vatn eller karbonat frå tilslaget og er ikkje direkte relatert til atmosfærisk CO_2 . Det er ofte ein nær samanheng mellom TSA, PCD og utvasking av kalsium frå sementpasta under eksponering av sulfatførande og samtidig surt vatn. TSA er likevel ikkje avgrensa til svovelsurt vatn: Thaumasitt dannast ved pH \approx 11 og kan vere stabilt til pH litt under 7 (Crammond 2003).

I følge NS-EN 206+NA er maksimalt innhold av kalkfiller til betong i kontakt med sulfatførende grunn er 5 % av bindemiddelvekt. Effektar av ulike mengder kalkfiller er blitt undersøkt i fleire forskingsmiljø, og resultatene er ikkje eintydige. Årsaka til dette ligg truleg i at ein ikkje har brukt heilt like betongblandingar, geologisk sett ulike typar kalkfiller, og at dei eksperimentelle forholda også kan ha vore noko forskjellig.

Alunskiferutvalget testa betong med 8 % kalkfiller i Blindtarmen. Dette førte til merkbart forsterka sulfatangrep samanlikna med tidlegare ordinær norsk portlandsement, med stort volumtap (Fiskaa mfl. 1971, 1973). Det var likevel ein viss forskjell mellom type kalkfiller, der knust urein kalkstein frå Franzefoss ($D_{50} = 0,01$ mm, $v/c = 0,52$) ser ut til å ha påført litt meir skade enn knust rein kalsitt ($D_{50} = 0,03$ mm, $v/c = 0,51$). Dette trass i at resepten med knust urein kalkstein hadde mykje lågare utgangsporeabilitet enn resepten med knust kalsitt (Vedlegg 1). Svært finknust kalkstein med høg spesifikk overflate vil i prinsipp vere meir løyseleg; bidra med meir karbonat enn grøvre knust kalkstein og har dermed størst potensial for TSA i alunskifermiljø. Eksempelet med kalksteinsfiller frå Franzefoss tyder på at betong med i utgangspunktet svært låg permeabilitet («god filler effekt») likevel ikkje er motstandsdyktig mot TSA.

Hooton mfl. (2002) fann ikkje eksempel på TSA i europeisk og nordamerikansk betong med kalksteinsfiller i sement opp til 5 %, og understreka at effekten av sement med kalkstein er avhengig av kvaliteten til kalksteinen; på kva måte kalksteinen er blanda inn i sementen og fordelinga av partikkelstorleikar. Crammond (2003) fann at svært finkorna kalkfiller er mest reaktiv og derfor kan påverke omfanget av TSA. Men TSA blei også rapportert frå betong med rikeleg grøvre kalkstein utan nemneverdig innhald av finkorna kalkstein i filler fraksjonen. Potensialet for TSA aukar i takt med kalkfillerinnhaldet i intervallet over 6 %. Rahman og Bassuoni (2014) rapporterte at 5-10 % kalkfiller for det meste ikkje fører til TSA, men at potensialet for TSA typisk aukar med kalkfiller > 10 %. Det er likevel observert tilfelle med TSA ved < 5 % i betong basert på ordinær Portland sement. Sotiriadis mfl. (2013) fann at effekten av sulfat i nokre tilfelle aukar potensialet for TSA under innverknaden av klorid.

Elles er det generelt dokumentert at TSA er avhengig av relativt låg temperaturar (5-15 °C) og at thaumasitt dannast i betong med pH mellom 10,5 og 13 (jamf. Crammond 2003). Thaumasitt dannast også i betong heilt utan kalkstein og i denne samanheng er det muleg at CO₂ i luft kan vere årsak (Zhou mfl. 2006). Undersøking av stabile C og O isotopar i sprøytebetong på alunskifer har vist at opphavet til karbonat i thaumasitt er både atmosfærisk CO₂ og kalsitt i skiferen (Hagelia 2011).

Ved vurdering av potensialet for thaumasittangrep er det viktig å avklare om betongen er eksponert for svovelsyre, sulfat, magnesium, karbonat og klorid. Vatn i kontakt med betong bør alltid analyserast med tanke på desse parametrane. Det finst ein del eksempel på thaumasittangrep i konstruksjonsbetong i marint miljø (bl.a. Crammond 2003, Sibbick mfl. 2003, Chabreliè 2010). Men vi manglar ennå ei systematisk undersøkning av tilstandsutviklinga i konstruksjonsbetong med moderne betongreseptar over lang tid.

2 Feltstasjonen i Kristiansand

2.1 Lokalisering ved Fiskå

Feltstasjonen var lokalisert ved Fiskå rett ved Elkem Carbon (Figur 1). Området har brygger og strandlinje på tre sider med opning mot hamnebassenget mot aust. Sjødjupet på staden er omkring 3 meter.



Figur 1: Lokalisering av feltstasjonen vist ved sirkel rett ved utrensla frå Fiskåbekken.

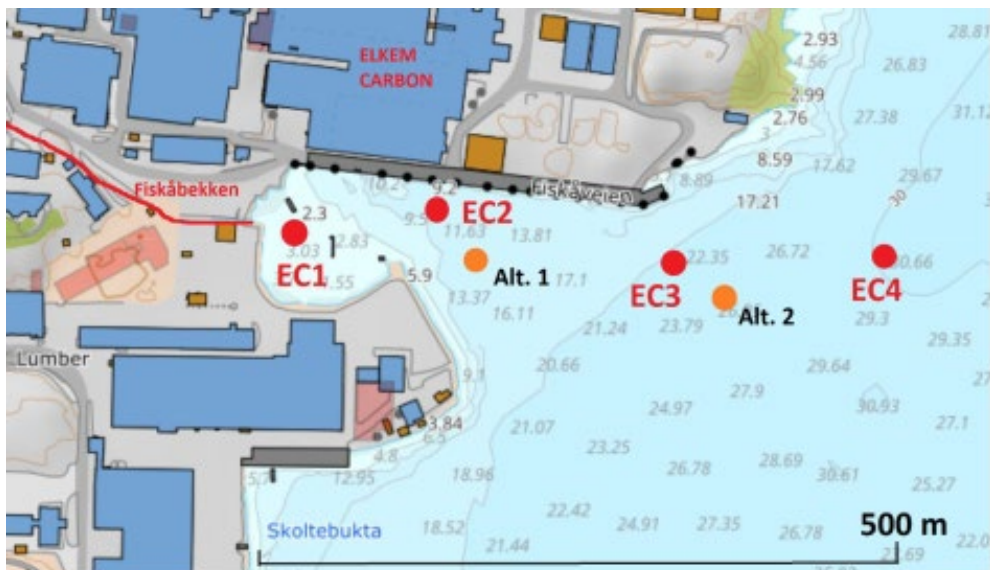
2.2 Sjøvasstemperatur

Gjennomsnittleg årleg sjøvasstemperatur i Kristiansand er 9,9 °C med 5,3 °C om vinteren og 15,8 °C om sommaren. Haust og vår temperaturane overskrider i blant 15 °C, medan sommartemperaturane for det meste er høgare enn 15 °C ([Vanntemperatur i Kristiansand i Nordsjøen nå \(seatemperature.net\)](#)).

2.3 Eksponeringsforhold

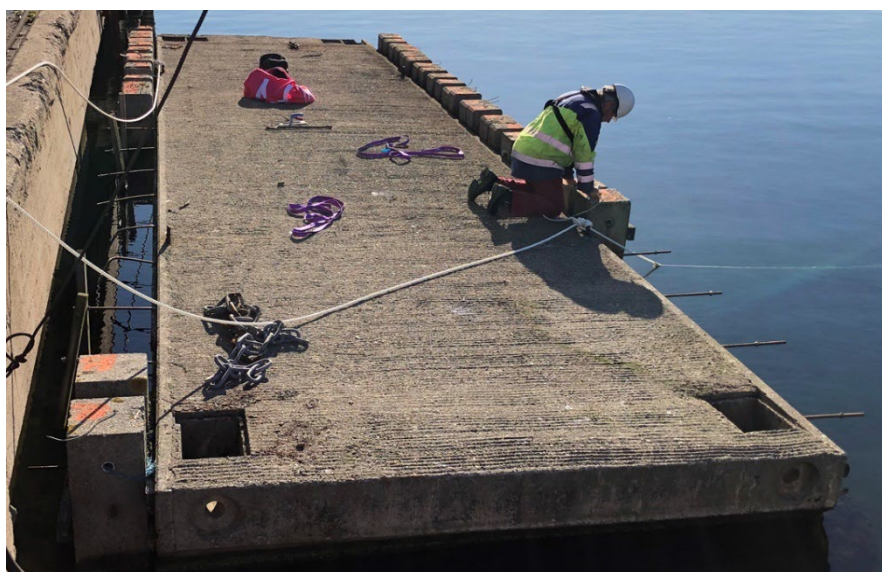
Fiskåbekken renner ut like ved feltstasjonen. Dette er ferskvann i form av bekkevann og kjølevann frå Elkem Carbon. Så vidt vi kjenner til er det ikkje utført kjemiske analysar av vatnet med tanke på Cl, Mg og sulfat her. Men NIVA overvaker avrenningsvann frå Elkem Carbon, blant anna ved monitorering av vassføring ut frå Fiskåbekken. Ein har etablert salinitetsprofilar på fleire stader frå området ved feltstasjonen og utover i hamnebassenget (Figur 2). Overflatevatnet ved feltstasjonen (som var plassert ved monitorpunkt EC1, Figur 2) og utover i sjøen (EC2, EC3, EC4) er brakkevann, og saliniteten aukar generelt mot djupet (Næs mfl. 2021). Full salinitet på 3,5 % eller 35 psu (psu = practical salinity unit) er bare registrert mot sjøbotnen lang ute i hamnebassenget.

Saliniteten på feltstasjonen har veksla i takt med nødbørsmengder og truleg også ved utslepp av kjølevann frå Elkem Carbon. Dette betyr at Eksponeringsklassane i hht. NS-EN 206+NA har variert over tid. *Vurderingane av nedbrytingsomfanget i betongprøvene må sjåast i lys av lokal variasjon i salinitet.*



Figur 2: Fiskåbekken renner ut like ved feltstasjonen. Lokaltetar for monitorering av vatn er vist med raude punkt (NIVA; Næs mfl. 2021). Monitorområdet EC1 er representativt for eksponeringsmiljøet på feltstasjonen.

Feltstasjonen var plassert på ei lita flytebrygge som bevega seg opp og ned i takt med tidevatnet for å sikre mest mogleg lik eksponering av betongprøvene over tid (Figur 3). Den nedre halvdel av prøvene (0,5 meter) var i praksis alltid neddykka medan den øvre halvdel stakk opp over vassflata og var variabelt påverka av bølger og sjøsprut.



Figur 3: Feltstasjonen var plassert på flytebrygge. Foto: Stig H. Helgestad, Statens vegvesen.

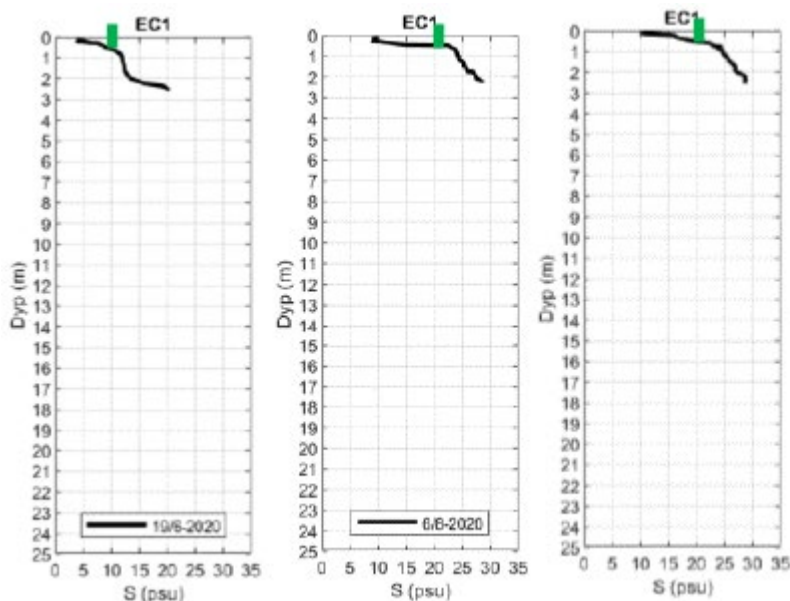
Figur 4 viser sterkt varierende vassføring ved utløpet av Fiskåbekken over 23 månader (1 januar 2019 til 2 november 2020). Variasjonen før 2019 er ikkje kjent, men ein bør rekne med liknande årstidsvariasjonar over historia til testfeltet. Figur 5 viser tre salinitetsprofilar frå monitorpunkt EC1 rett ved feltstasjonen frå siste halvdel av 2020. Raude piler i Figur 4 viser omtrentlege tidspunkt for dei tre profilane: som i alle tre tilfelle viser forholdsvis låg vassføring frå Fiskåbekken (ca. 100 liter/sekund) samanlikna med andre tidspunkt. Næs mfl. (2021) har med utgangspunkt i data i Figur 4 rekna ut at vassføringa frå bekken var 100 liter/sekund i 43 % av tidsrommet (med salinitetar mellom

Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvann i 25 år

5 og 20 psu ved 0 til 0,5 m djup, sjå Figur 5), 200 liter/sekund i 38 % av tida (neppe over 10 psu), 300 liter/sekund i 23 % av tida (neppe over 5 psu) og over 400 liter/sekund i 10 % av tida (under 5 psu). I berre 5 % av tida har det ikkje vore nemneverdig tilførsle av ferskvann til feltstasjonen og muleg høg salinitet også i overflatevatnet.



Figur 4: Vassføring frå Fiskåbekken rett ved feltstasjonen over nesten to år. Det var stor tilførsle av ferskvann til overflatevatnet der betongprøvene var eksponerte. Vassføringa var over 200 liter/sekund i 38 % av tida over dette intervallet og null liter/sekund i 5 % av tida. Pilene referer til salinitetsprofilar ved EC1 i Figur 5 (data frå NIVA; Næs mfl. 2021).



Figur 5: Salinitetsprofilar ved EC1 på tre ulike tidspunkt viser at overflatevatnet dei første ca. 0,5 m var brakkvatn (data frå NIVA; Næs mfl. 2021). Desse representerer situasjonar der vassføringa frå Fiskåbekken neppe var over 100 liter/sekund. Grøne felt illustrerer plasseringa av testbetongen og viser hhv. 5-10 psu, 10-20 psu og 10-20 psu ved djup 0 til 0,5 m.

Med utgangspunkt i data referert til over er det muleg å gje ei kvalifisert vurdering og utrekning av salinitetsvariasjonar på feltstasjonen. Føresetnadene er: 1) at tilførsle frå Fiskåbekken har variert omtrent på same måten som vist i Figur 4 over 25 år, og 2) at ein legg til grunn salinitetsvariasjonar mellom 0 og 0,5 meters djup som tilsvarar lengda av prøver under vassnivå (Figur 5). Vi bruker analyse

Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvattn i 25 år

av lekkasjevatn frå den undersjøiske Flekkerøytunnelen ved Kristiansand som representerer full salinitet (psu = 35). Denne er svært lik djupt sjøvattn i Oslofjorden (Tabell 1). Innhaldet av bikarbonat er rekna ut på basis av analysar av alkalinitet. Vurdert ut frå figurane 4 og 5 er det sannsynleg at saliniteten på feltstasjonen har variert mellom 5 og 25 psu (0,5-2,5 %). Ved vassføring på 100 liter/sekund er ikkje saliniteten høgare enn 20 psu. Sett i lys av at tilførsla av ferskvattn frå Fiskåbekken er over 200 liter/sekund i 71 % av tida er det urealistisk å tenke seg at saliniteten på testfeltet på noko tidspunkt har vore høgare enn 25 psu. Tala tyder på at saliniteten har variert mellom 5 og 20 psu i over halvparten av eksponeringstida. Dette er brukt som grunnlag for å estimere eksponeringsklassar i samsvar med NS-EN 206+NA.

Tabell 1 viser ionekonsentrasjonar rekna ut som fortynning av sjøvattn med ferskvattn for tre ulike salinitetar. Vi antar at konsentrasjonar av Na, Cl, Mg, sulfat og bikarbonat i tilført ferskvattn er 0 mg/L. Data frå Miljødirektoratet viser at dette for alle praktiske formål er rett: Reelle konsentrasjonar av Na, Cl, Mg og sulfat i lokalt ferskvattn er under 10 mg/L ([Vannmiljø \(miljodirektoratet.no\)](http://Vannmiljø.miljodirektoratet.no)). Bikarbonatkonsentrasjonane i bekker på Sørlandet er i tillegg ekstremt låge (oftast 0,01 - 0,2 mg/L). Lokale bekkar i Kristiansandsregionen har pH på mellom 6,2 og 7, medan sjøvattn har pH omkring 8. pH-verdien på feltstasjonen er sett til 7 for alle estimata og urealistisk å anta pH < 6,5 (som ville påverke klassifiseringa etter NS-EN 206+NA). Innhaldet av sulfat og bikarbonat i brakkvatnet har hhv. variert mellom ca. 370 og 1850 mg/L og ca. 20 til 100 mg/L.

Tabell 1: Analysar av sjøvattn frå Oslofjorden og Flekkerøytunnelen med estimerte ionekonsentrasjonar og eksponeringsklassar på feltstasjonen, basert på vassføring frå Fiskåbekken og salinitetar ved målestasjonen EC1. Eksponeringsklassane for kjemisk angrep (XA-klassar) er definert ut frå pH og Mg- og sulfatkonsentrasjonar, medan klassane for korrosjon (XS-klassar) i følgje NS-EN 206+NA er definert av ulike kontaktforhold med sjøvattn.

	Oslofjorden 60 m.u.h. (S=35 psu)	Flekkerøy- tunnelen (S=35 psu)	Estimert max (S = 25 psu)	Estimert mid. (S = 10 psu)	Estimert min. (S = 5 psu)
Na ⁺ (mg/L)	10800	10200	7286	2914	1457
Cl ⁻ (mg/L)	18600	18700	13357	5343	2671
Mg ²⁺ (mg/L)	1370	1310	936	374	187
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	2630	2600	1857	743	371
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	144	146	104	42	21
pH	7,74	8,07	7	7	7
Eksponerings- klasser (NS-EN 206+NA)	XA3 XS2	XA3 XS2	XA2 XS2	XA2 XS2 (?)	XA1 XS2 (?)

Resultata viser at det kjemiske eksponeringsmiljøet ved feltstasjonen er brakkvatn og klassifiserer som XA1 til XA2 (NS-EN 206+NA). Feltstasjonen og prøvene har neppe blitt eksponert for klasse XA3 (sjøvattn). Vi bruker eksponeringsklasse XS2 som gjeld permanent neddykka betong i sjøvattn. NS-EN 206+NA definerer eksponeringsklasser for korrosjon i «kontakt med sjøvattn» (XS-klassar) utan referanse til kloridionekonsentrasjon. Med tanke på reell påverknad er det derfor usikkert om XS2 er riktig ved låge salinitetar (5 til 10 psu).

Dei same reseptane er også eksponert for sjøvattn med full salinitet i Sandnessjøen i 21 år. Det viser seg at kloridinntrenginga i prøvene frå Kristiansand er høgare enn i Sandnessjøen, trass i merkbart lågare salinitet ved feltstasjonen nær Fiskåbekken. Dette er diskutert vidare i Kapittel 5.2.

3 Prøver og analysemetodikk

3.1 Reseptar

Tabell 2 gir oversikt over betongreseptane og Vedlegg 2 gir utfyllende informasjon. Det blei tilført luft (L-stoff) til både referansebetongen B50_N2 og H50_N2 med kalkfiller. Begge desse har omtrent same mengde silikastøv (4 %). Resepten for F50_N2 blei laga med svært høg silikadosering (12,5 %) og høgare bindemiddelinnhald (449 kg/m³) enn i dei to andre reseptane (387 og 400 kg/m³).

Tabell 2: Betongreseptar som er undersøkt. B50-N2 er referansebetong. Silikastøv er oppgitt i % av sementvekt.

Prøve	v/b	Silikastøv (SF) (%)	Luft målt (%)	Kalkfiller (%)	Bindemiddel: Sement + SF (kg/m ³)	Sugporøsitet (%)
B50-N2	0,38	4,1	4,2	0	371 + 15,5	11,2
F50-N2	0,42	12,5	1,2	0	399 + 49,9	14,8
H50-N2	0,40	3,9	3,1	17,5	385 + 15,1	11,9

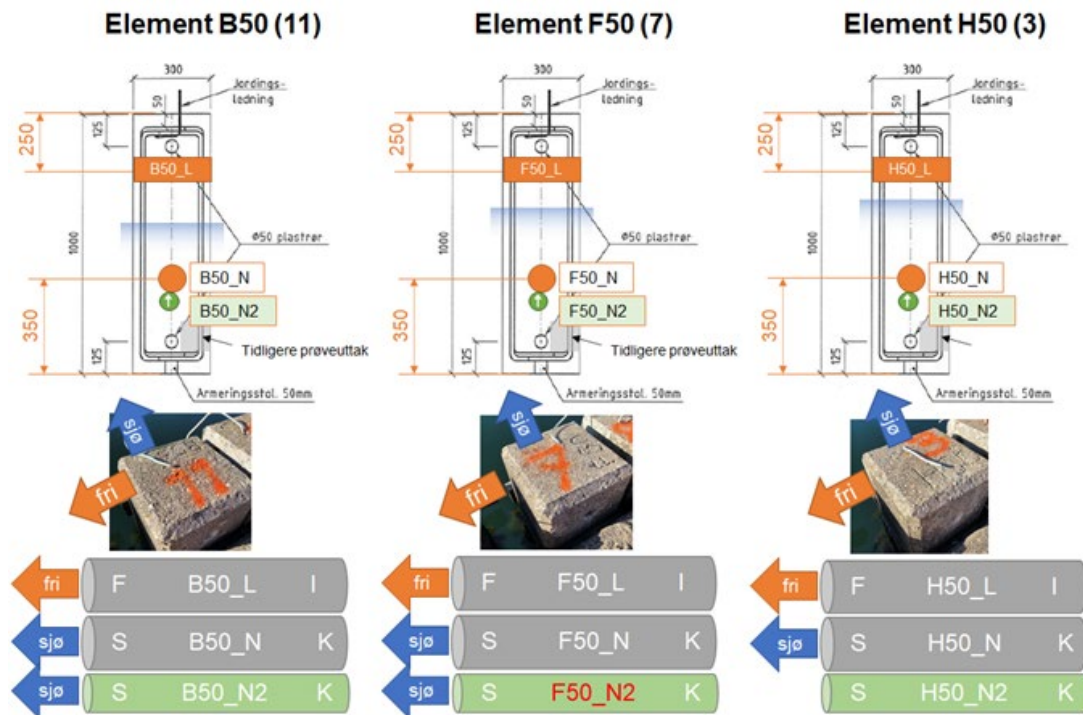
3.2 Utboring av kjerner

Figur 6 viser toppen av dei tre betongprismene før dei blei henta opp av sjøen. Dimensjonane til prøvene var 30 cm x 30 cm x 100 cm. Det blei bora ut ei kerne frå kvar resept ($\Phi = 70 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$). Kjernene blei bora tvers gjennom betongprismene, med ein ende ut mot sjøen og den andre enden inn mot kaia. Dei aktuelle kjernene er farga med grønt og merka med pil i Figur 7.



Figur 6: Prøvene B50-N2 (11), F50-N2 (7) og H50-N2 (3) på feltstasjonen. Foto: Stig H. Helgestad, Statens vegvesen.

Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvatn i 25 år

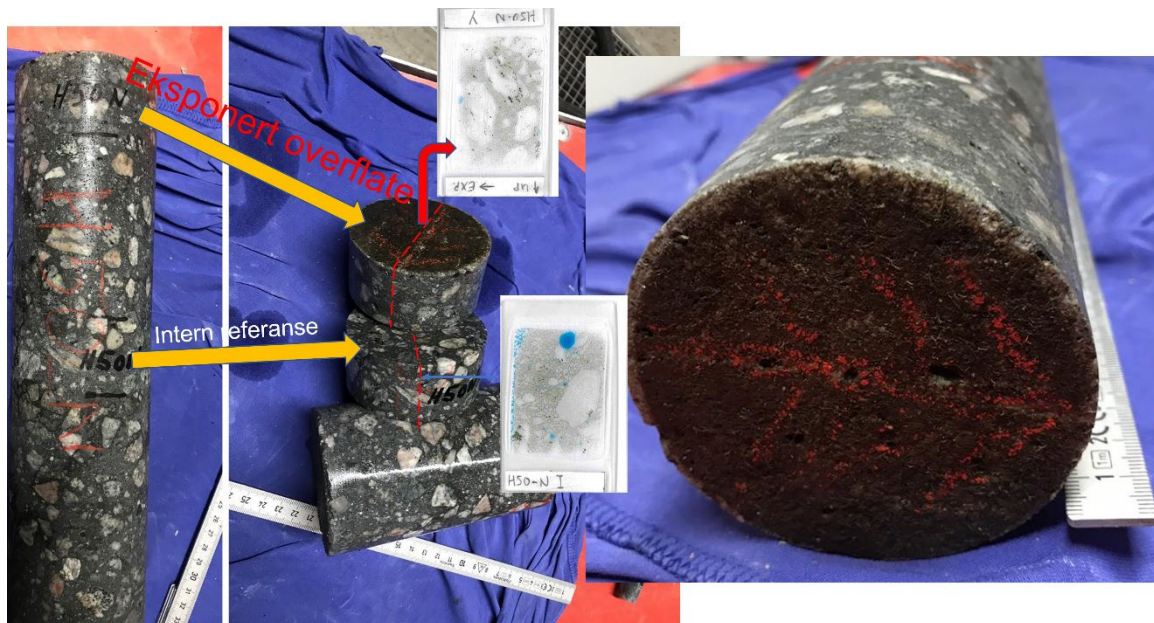


Figur 7: Prinsippkisse over eksponerte prøver og uttak av borekjerne for analyse. Vassnivået er vist med blå farge. Kjernene B50-N2, F50-N2 og H50-N2 (grønne punkt med piler) blei bora ut frå permanent neddykka deler frå sidene som vender utover mot sjøen. Illustrasjonar: Karla Hornbostel/ Eva Rodum, Statens vegvesen.

Figur 8 viser foto av dei tre kjernene. Kjernene inklusive dei ytre eksponerte flatene var ikkje synleg påverka av nedbryting. Figur 9 viser prinsippet for kapping av delprøver med diamantsag for preparering av tynnslip. Det blei deretter laga eitt tynnslip frå ytre eksponert betong som vendte mot «sjø» og eitt referansetynnslip frå midten av kvar kjerne omkring 15 cm inn frå begge eksponerte ytterflatene.



Figur 8: Foto av kjernene H50-N2 (lab-prøvenr. Sentrallaboratoriet 6200002-65), FB50-N2 (6200002-66) og referansebetong B50-N2 (6200002-67). Kjernene hadde blitt pakka godt inn i fleire lag plastfolie rett etter utboring. Foto: Per Hagelia.



Figur 9: Prinsipp for uttak av prøver til tynnslip. Ytterflata som vendte ut mot sjøen (sjå Figur 7) blei vald ut for undersøkning (Eksponert overflate) og var merka med pil raud pil på dei mottekne kjernene. Foto: Per Hagelia.

3.3 Betongpetrografi og Scanning elektronmikroskopi (SEM)

Tynnslipa, totalt seks stykker, blei preparert ved Institutt for energiteknikk på Kjeller. Tynnslipa blei monterte på glas (28 mm x 48 mm), impregnert med lys blå epoxy for å få fram porestrukturen og høgglanspolerte for mikrokjemisk analyse.

Tynnslipa blei først undersøkte i polarisert lys med eit standard mikroskop for petrografisk analyse (Nikon Optiphot - Pol) hos Statens vegvesen. Denne metoden gir ein god oversikt over hovuddraga i dei ulike betongane og avdekker representative trekk for meir detaljert analyse.

Utvalde område blei deretter analyserte i Scanning elektronmikroskop (SEM) ved Naturhistorisk museum, Universitetet i Oslo. Det blei sprøyta på ei tynn hinne med karbon før analyse. Prøvene blei analysert i eit Hitachi S-3600N Scanning Electron Microscope. Instrumentet er utstyrt med ein Bruker XFlash® 5030 energidispersiv X-ray detektor (EDX), knytta til Quantax 400 (Esprit 1.9), for semi-kvantitativ element analyse og hyperspektral mapping. Prøvene blei analyserte ved «variable pressure mode (VP)» ved omkring 20 Pa; 15.0 kV akselerasjonsspenning og 50 nA stråle (beam current).

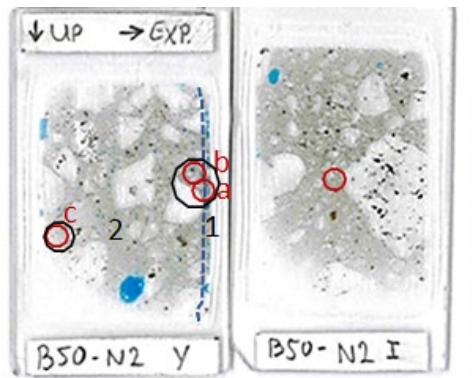
Analysane av dei ytre tynnslipa la vekt på overflatenær omvandling samt eit område lengst unna den eksponerte overflata (ca. 20-25 mm). Referansetynnslipa frå midten av dei store betongprismane blei analyserte i eitt enkelt område sentralt i kvart tynnslip. Det blei lagt størst vekt på kjemisk analyse ved element mapping, som viser fordeling av element i utvalde område (S, Cl, Ca, Mg, m.m.), samt nokre få punktanalysar.

4 Resultat

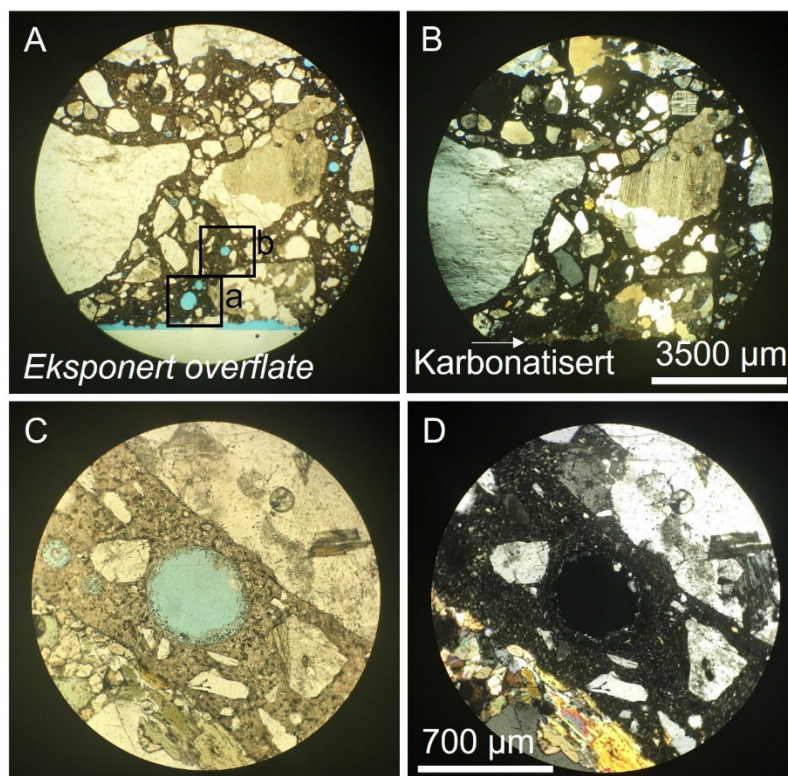
4.1 B50_N2, referansebetong

4.1.1 Petrografi

Figur 10 viser foto av tynnslipa frå referansebetongen. Tynnslip B50_N2 Y dekker den eksponerte overflata (pil – EXP) med markering av ei smal ytre reagert sone (1) og intakt gråbrun sementpasta (2) lenger inne. Referansetynnslip N50_N2 I frå 15 cm under overflata var karakterisert ved intakt gråbrun sementpasta. Steintilslaget var granitt eller granittisk gneis. Sandtilslaget var dominert av kvarts.



Figur 10: Referansebetong B50_N2. Foto av tynnslipa frå eksponert betong (venstre) og ueksponert referanse 15 cm under eksponert overflate (høgre). Sone 1 med karbonatisering og relativt intakt mørk pasta i mestedelen av tynnslipet (Sone 2), tilsvarende referansetynnslipet. Svarte sirkelar = område vist i Figur 11. Raude sirkelar = undersøkt i SEM. Foto: Per Hagelia.



Figur 11: Referansebetong B50_N2 i planpolarisert lys (venstre) og dobbelpolarisert lys (høgre). A & B: frå areal omkring eksponert overflate med områda a og b. C & D (område c): 20 mm under overflata med utfelling av ettringitt. Områda a, b og c blei undersøkt vidare i SEM. Foto: Per Hagelia.

Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvatn i 25 år

Tynnslip B50 N2 Y. Figur 11 A & B frå den eksponerte overflata viser ei tynn fullt karbonatisert sone omkring 200-300 µm brei, og svakare karbonatisering inntil ca. 1500 µm. Sementpastaen innafor var tilsynelatande upåverka. Figur 11 C & D viser område c lokalisert omkring 20 mm under overflata. Sementpastaen var tilsynelatande upåverka, men med litt utfelt ettringitt i ei luftpore. Dette er stadfesta ved SEM-analyse (sjå Fig. 14 og 15).

Tynnslip B50 N2 I hadde ein del luftporer som tilsynelatande samsvarer med resepten (ikkje utført punkttelling). Thaumassitt blei ikkje observert. Tilsett silikastøv var godt dispergert, utan teikn på silika klumpar i sementpastaen. Betongen hadde få mikroriss og var generelt i ein god tilstand.

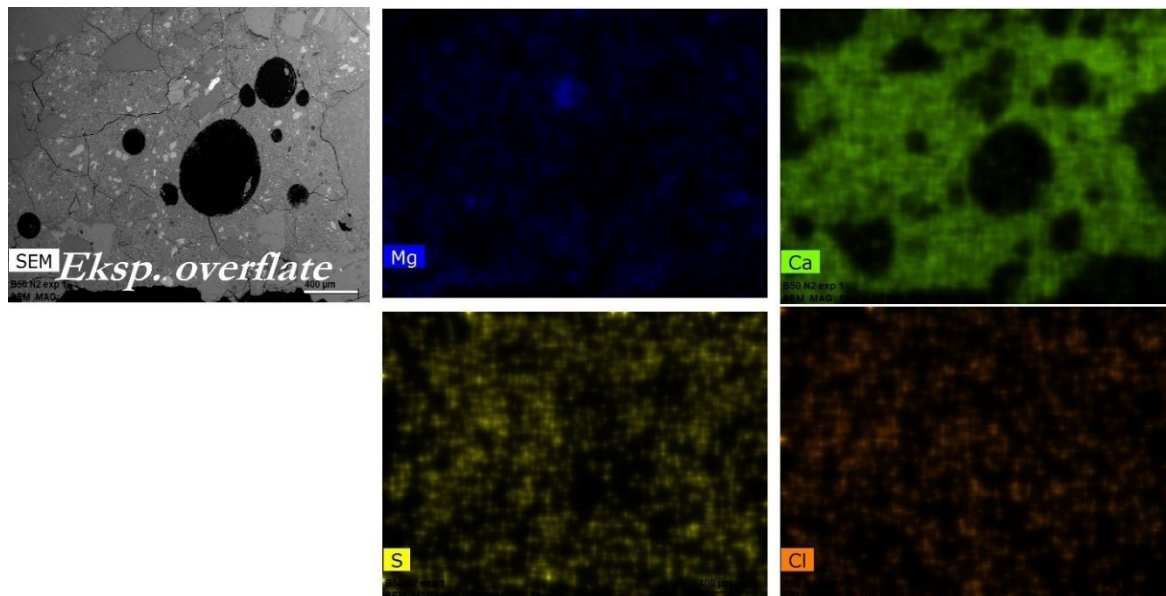
4.1.2 SEM

Ytre tynnslip B50 N2 Y

Område a (Figur 12). Sementpastaen var moderat påverka av sulfat og klorid og var rik på kalsium utan teikn på inntrenging av magnesium frå sjøvatnet.

Område b litt lengre inn (Figur 13) hadde også litt klorid og svovel i sementpastaen. Magnesium var avgrensa til tilslaget.

Magnesium i tilslagsminerala amfibol og biotitt er ikkje tilgjengeleg for porevatnet i betongen.



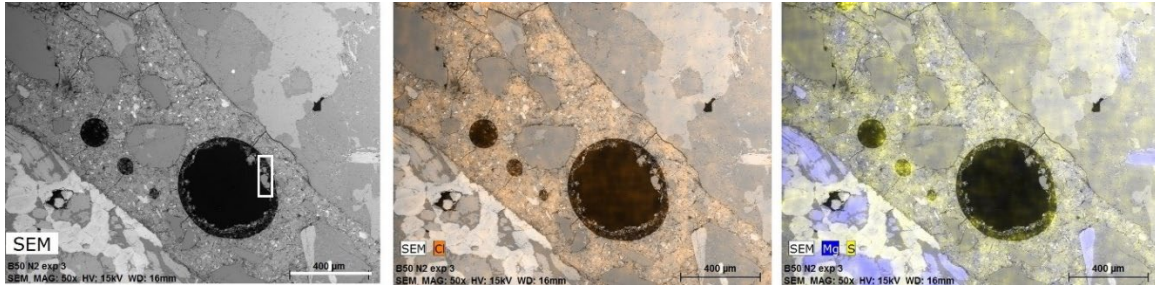
Figur 12: B50_N2 Y, område a. Målestokk = 400 µm. Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.



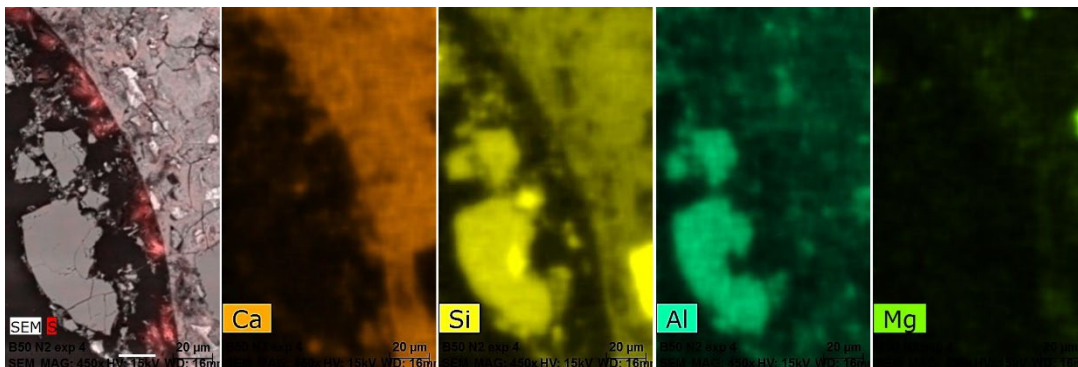
Figur 13: B50_N2 Y, område b. Målestokk = 400 µm. Foto: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvatn i 25 år

Område c (Figur 14) viste kloridinntrenging i sementpastaen og innslag av svovel, for det meste knytta til sekundær ettringitt i luftporene. Figur 15 viser detaljar av nåleforma ettringitt som inneheld Ca, Al og S, og var utan Si. Sementpastaen til høgre i Figur 15 var heilt fri for Mg.



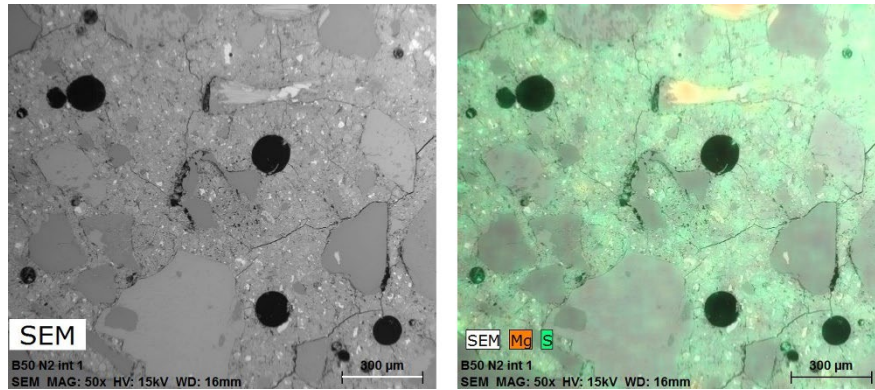
Figur 14: B50_N2 Y, område c omtrent 20 mm under eksponert overflate. Den kvite ramma viser lokaliseringa av Figur 15. Målestokk = 400 µm. Foto: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.



Figur 15: B50_N2 Y. Detalj frå område c med utfelling av nåleforma sekundær ettringitt i luftpore. Dei større korna luftpora til venstre i bildet er kalifeltspat, truleg tilført ved prøvepreparering. Sementpastaen var utan magnesium, bortsett frå eitt punkt (truleg klinker). Målestokk = 20 µm. Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

Referansetynnslip B50 N2 I

Prøva av ueksponert betong frå midten av testprismet hadde tydeleg innslag av svovel i sementpastaen (Figur 16) i samsvar med resepten. Det blei ikkje påvist klorid. Magnesium var avgrensa til glimmer og amfibol i tilslaget. Omfanget av mikroriss var lågt og ujamt fordelt.

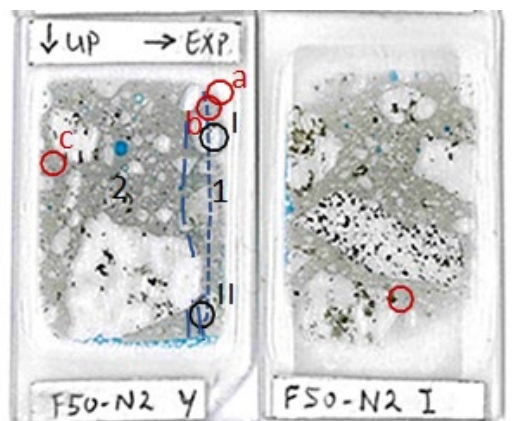


Figur 16: B50_N2 I. Referansetynnslip 15 cm under eksponert overflate med svovel i sementpastaen, med enkelte mikroriss. Målestokk = 300 µm. Foto: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

4.2 F50_N2, høgt innhald av silikastøv

4.2.1 Petrografi

Figur 17 viser foto av tynnslip F50_N2 Y frå den eksponerte overflata (pil – EXP) med markering av ei ytre reagert sone (1) og gråbrun sementpasta lenger inne (2). Referansetynnslip F50_N2 I frå 15 cm under overflata var karakterisert ved intakt gråbrun sementpasta. Steintilslaget var granitt/granittisk gneis. Sandtilslaget var dominert av kvarts.



Figur 17: Prøve F50_N2. Foto av tynnslipa frå eksponert betong (venstre) og ueksponert referanse 15 cm under eksponert overflate (høgre). Sone 1 ved overflata hadde kraftig utluta sementpasta med Popcorn kalsitt (PCD) og inntrenging av magnesium. Sone 2 hadde tilsynelatande intakt pasta i mestedelen av tynnslipet, tilsvarande referansetynnslipet. Blå stipla linje internt i Sone 2 viser overflateparallele riss 5 mm frå overflata. Svarte sirklar (I og II) = område vist i Figur 18 og 19. Raude sirklar = område undersøkt i SEM. Foto: Per Hagelia.

Tynnslip F50_N2 Y var meir påverka enn referansebetongen (Område I, Figur 18). Sone 1 er samansett av ei ytre sone (ca. 1-1,5 mm) med sterk utluting av kalsium og utfelling av kalsitt i form av Popcorn kalsitt (PCD) og ei indre sone (inntil ca. 3,5 mm) med magnesiumførande pasta (M-S-H og brucitt). Sementpastaen i den ytre sona var svært porøs og hadde mista det meste av kalsiumet og er å rekne som silikagel («S-H»). Pasta med MSH er kjenneteikna ved lys pasta i planpolarisert lys (i kontrast til intakt pasta som er relativt mørkare) og grå pasta i dobbelt polarisert lys. Førekost av MSH er nesten alltid assosiert med mikroriss. Vi har fast rutine på å verifisere førekost av MSH ved SEM-analyse.

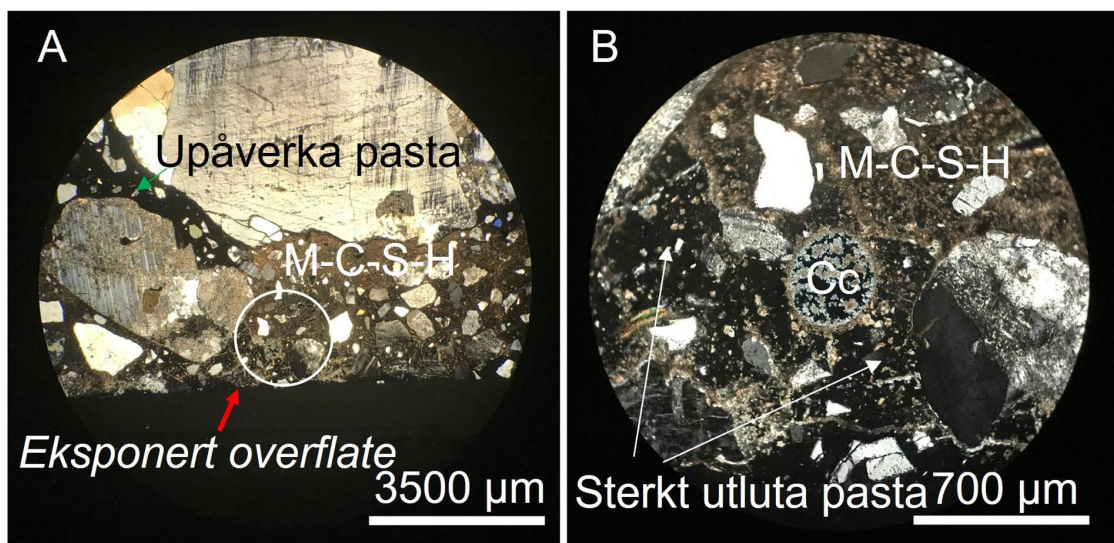
Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvann i 25 år

Det var utvikla to typar overflateparallele riss:

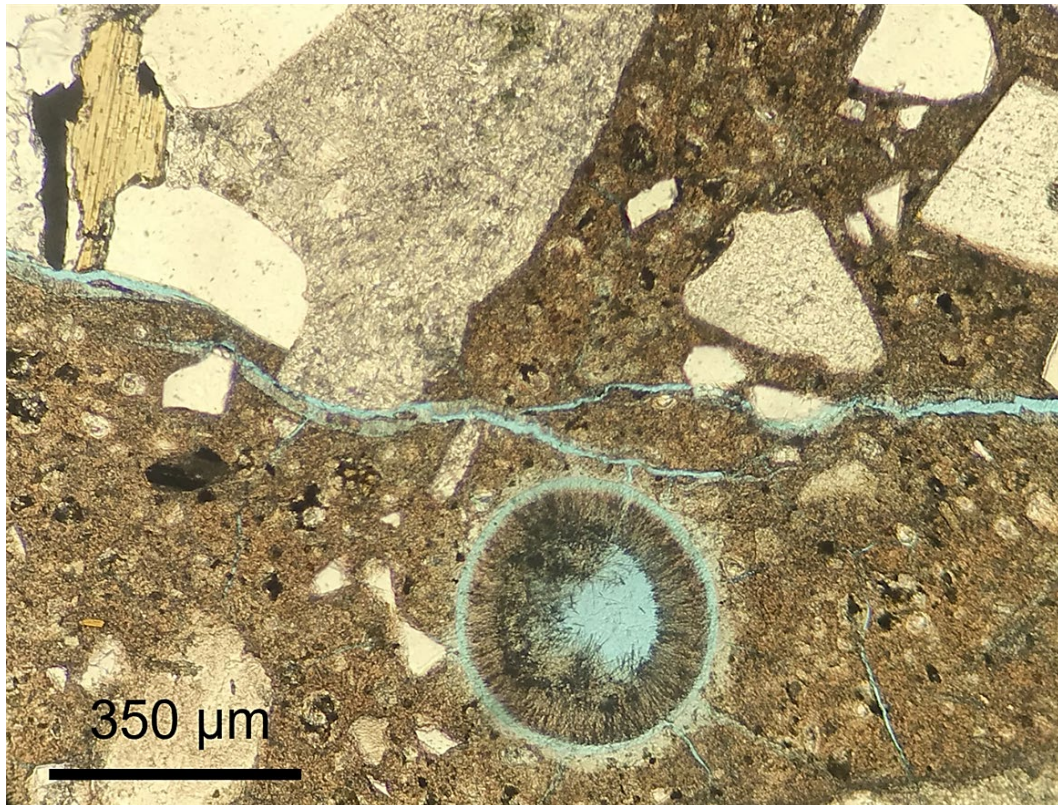
- 1) Riss i Sone 1 med omfattande utfelling av karbonat i utluta sementpasta, lokalt også brucitt (SEM analyse frå område a, Figur 20 & 21).
- 2) Riss med utfelt ettringitt i Sone 2 med relativt intakt sementpasta inntil 5 mm frå den eksponerte overflata (Område II, nærme Sone 1, Figur 19).

Tilsett silikastøv var godt dispergert, utan teikn på silika klumpar i sementpastaen. Det blei ikkje funne thaumasitt i prøve F50_N2.

Referansetynnslip F50_N2 I var karakterisert ved tilsynelatande intakt sementpasta, men hadde litt fleire mikroriss enn dei to andre reseptane.



Figur 18: Prøve F50_N2 Y Område I. Dobbelpolarisert lys. Foto A viser omvandling til omkring 3,5 mm inn frå overflata med upåverka pasta innanfor (grøn pil). Ytterste del mot den eksponerte overflata (detalj i Foto B) har sterkt utluta pasta med utfelling av PCD (Cc) med Mg-substituert pasta innanfor (uformelt «M-C-S-H»), som representerer ei blanding av kryptokrystallinsk MSH og dekalsifisert CSH. Foto: Per Hagelia.



Figur 19: F50_N2 Y. Område II. Planpolarisert lys. Sekundær ettringitt i luftpore og i overflateparallele riss inntil 5 mm frå den eksponerte overflata. Merk at ettringitt-nålene var orientert normalt på rissa og har potensiale for ekspansjon ved krystallvekst i områder der mineralet fyller rissvolumet. Den blå ringen (lys blå epoxy) omkring ettringitt i luftporene tyder på delvis uttørking av mineralet ved preparering. Foto: Per Hagelia.

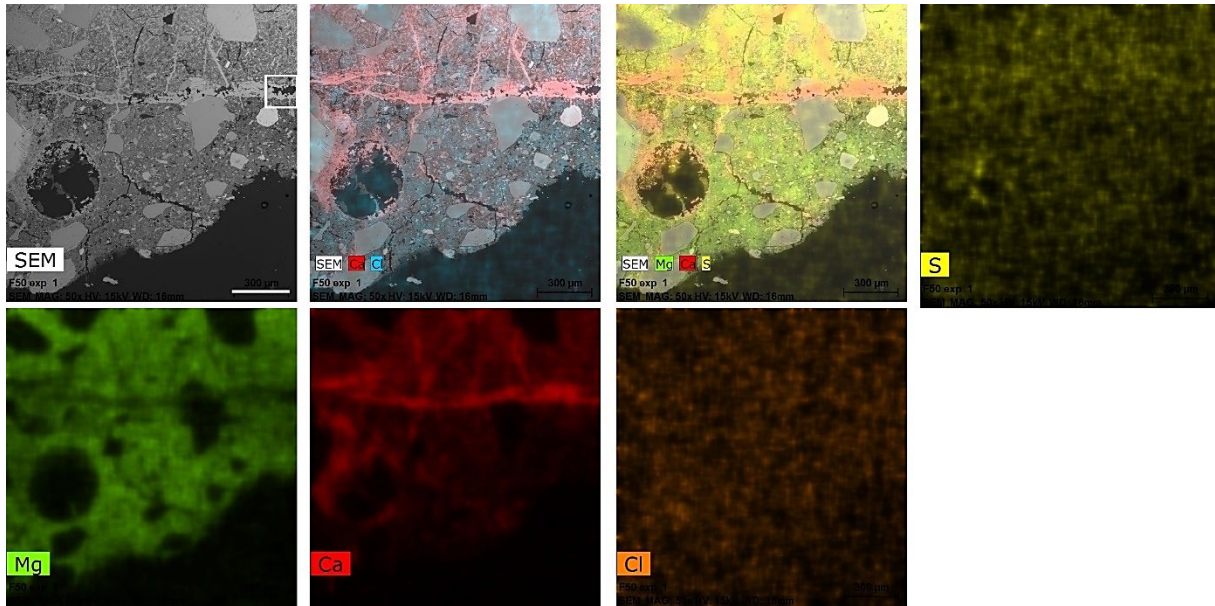
4.2.2 SEM

Ytre tynnslip F50 N2 Y

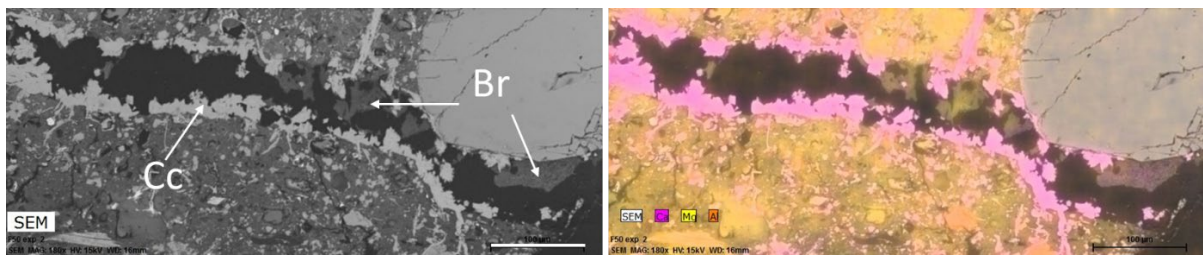
Område a (Figur 20, 21). Sementpastaen hadde lite kalsium i ytre del og var omvandla til dekalsifisert C-S-H og M-S-H. Den uformelle betegnelsen «M-C-S-H» er valgt fordi enkeltkrystallar av C-S-H og M-S-H er kryptokrystallinske og ikkje kan skiljast ut enkeltvis ved SEM analyse. Pastaen var også påverka av sulfat og kloridinntrenging. Rissa var delvis opne og delvis fylte med kalsitt. Figur 21 viser at dette er utfelt kalsitt og brucitt. Merk at brucitt veks ut frå område i direkte kontakt med sementpasta og er ikkje i direkte kontakt med karbonatet. Dette reflektere lokale pH variasjonar: brucitt dannast ikkje ved $\text{pH} < 11$, medan vekst av kalsitt buffrar pH til omkring 7-8. Førekømt av brucitt vitnar om at alkalint porevatn siver ut i sprekkene frå sementpasta under nedbryting.

Område b litt lengre inn (Figur 22) viser ein ganske skarp overgang mellom magnesiumførande sementpasta og meir intakt kalsium-rik pasta. Klorid og svovel fordeler seg ganske likt over området, men er tilsynelatande litt meir anrika i indre delar av den analyserte ramma med litt gjenverande CSH. Dette samsvarer med tidlegare undersøkingar som viser at MSH tar opp mindre S og Cl enn CSH (De Weerd og Justnes 2015). Det var litt fleire mikroris i ytre magnesiumrik del av pastaen.

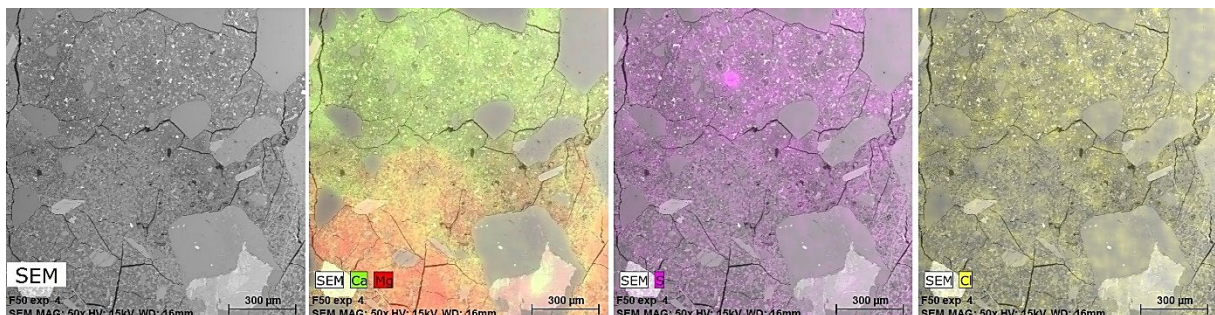
Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvann i 25 år



Figur 20: F50_N2 Y, område a med riss fylt av kalsitt. Kalsium i sementpastaen var i stor grad erstatta av magnesium. Pastaen viste også inntrenging av klorid og sulfat. Målestokk = 300 µm. Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

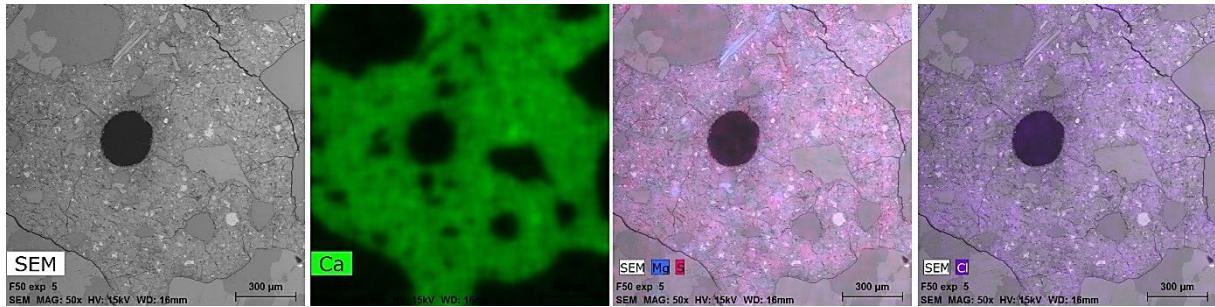


Figur 21: F50_N2 Y, detalj av riss i område a med kalsitt (Cc) og brucitt (Br). Målestokk = 100 µm. Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.



Figur 22: F50_N2 Y, område b viser overgangen mellom magnesiumsubstituert sementpasta og normal C-S-H innfor. Sulfat- og kloridinnhold var meir likt fordelt. Mikroriss var tilsynelatende litt meir utvikla i Mg-rik pasta. Målestokk = 300 µm. Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

Område c (Figur 23) viste kloridinntrenging i sementpastaen og innslag av svovel; for det meste knytta til sekundær ettringitt i luftporene.

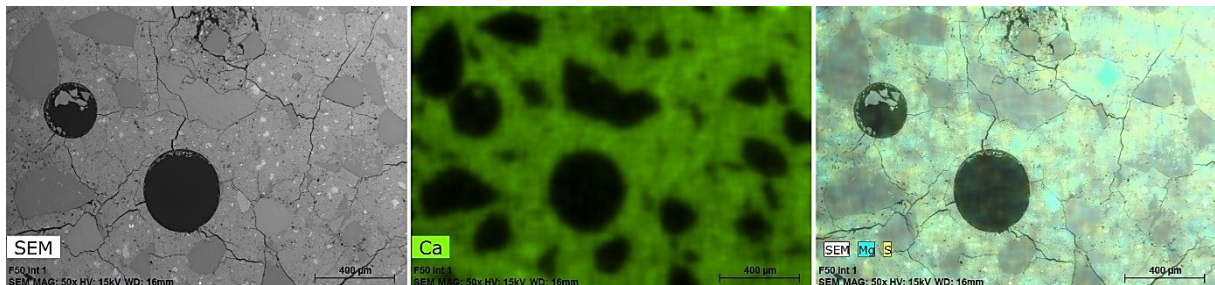


Figur 23: F50_N2 Y, område c omkring 20 mm frå eksponert overflate. Sementpastaen hadde normalt innhald av kalsium utan særleg magnesium, og både sulfat og klorid. Målestokk = 300 µm.

Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

Referansetynnslip F50_N2 I

Prøva av ueksponert betong frå midten av testprismet hadde tydeleg innslag av svovel i sementpastaen (Figur 24). Årsaka er høgt gipsinnhald i sementen. P30- sementen som blei brukt inneheldt 2,97 % SO₃ (Statens vegvesen 1995). Det blei ikkje påvist kloridinntrenging. Magnesium var tilsynelatande avgrensa til korn av glimmer og amfibol i tilslaget. Det var utvikla mikroriss over mesteparten av tynnslipet.

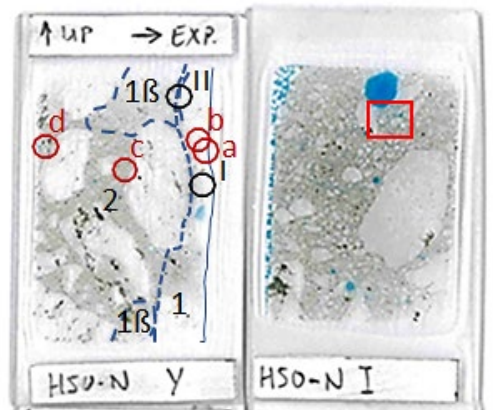


Figur 24: F50_N2 I frå område 15 cm under eksponert overflate. Sementpastaen var rik på kalsium, men viste også innslag sulfat som spreidde punkt, som truleg har mest primær ettringitt. Legg merke til kommuniserande mikroriss i bildet til venstre. Målestokk = 400 µm. Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

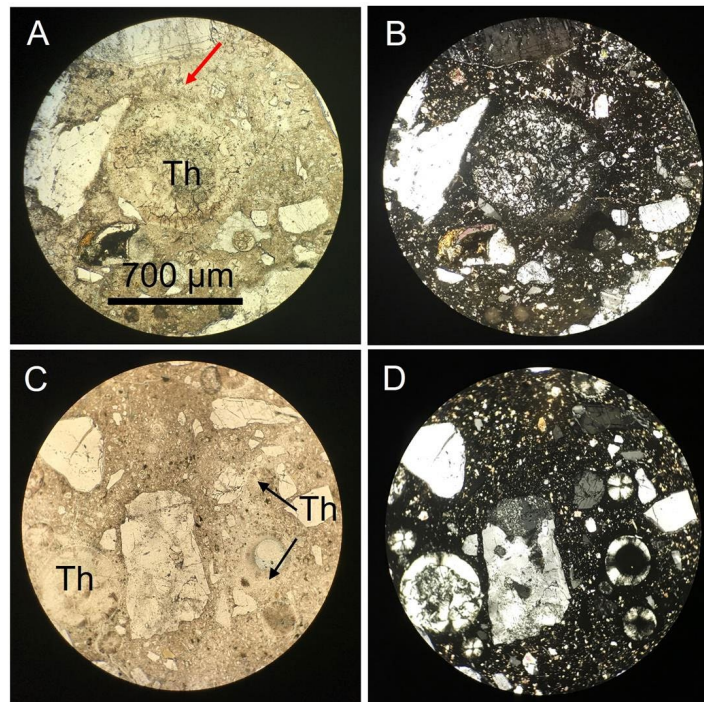
4.3 H50_N2 med kalkfiller

4.3.1 Petrografi

Figur 25 viser foto av tynnslip H50_N2 Y med eksponert overflate (pil – EXP). Denne betongen var meir påverka enn dei to andre reseptane. Den ytre reagerte sona varierte mellom 5 og 15 mm (1 & 1β). Sementpastaen lenger inne var gråbrun og relativt intakt (2). Referansetynnslip H50_N2 I frå 15 cm under overflata var karakterisert ved intakt gråbrun sementpasta. Steintilslaget var granitt/granittisk gneis. Sandtilslaget var dominert av kvarts.



Figur 25: Prøve H50_N2 med kalkfiller. Foto av tynnslipta frå eksponert betong (venstre) og ueksponert betong 15 cm under eksponert overflate (høgre). Det var tydeleg omvandling i ytre delar av eksponerte sjikt (Sone 1) og diffus utluting av sementpasta (Sone 1 β). Sementpastaen var relativt intakt i området innanfor (sone 2). Svarte sirklar (I & II) = område vist i Figur 26. Raude symbol = områda er undersøkt i SEM. Foto: Per Hagelia.



Figur 26: Prøve H50_N2 Y i planpolarisert lys (venstre) og dobbeltpolarisert lys (høgre). Område I (A og B), ca. 0,5-2 mm frå eksponert overflate, viser thaumasitt utfelt i ei stor luftpore (sentralt i bildet) og thaumasitt danna lokalt på bekostning av C-S-H (raud pil). Område II (C og D), ca. 5 mm frå overflata, viser thaumasitt i luftporer. Målestokken er den same i alle foto. Foto: Per Hagelia.

Område I (Figur 26, A & B) nær overflata hadde thaumasitt utfelt i luftporer. Thaumasitt var lokalt danna også på bekostning av sementpastaen, dvs. begynnande thaumasitt sulfatangrep (TSA). I Område II omkring 5 mm frå overflata (Figur 26, C & D) var thaumasitt avgrensa til luftporer (heilt og delvis fylte med thaumasitt). Førekost av thaumasitt var knytta til lys utluta sementpasta i Sone 1. Thaumasitt blei ikkje observert i diffust utluta sementpasta i Sone 1 β og heller ikkje i Sone 2. Det var teikn på sekundær utfelling av karbonat (PCD) fleire stader i Sone 1, men var delvis vanskeleg å skilje frå korn av finkorna kalkfiller. Sjå elles utfyllande detaljar i kap. 4.3.2.

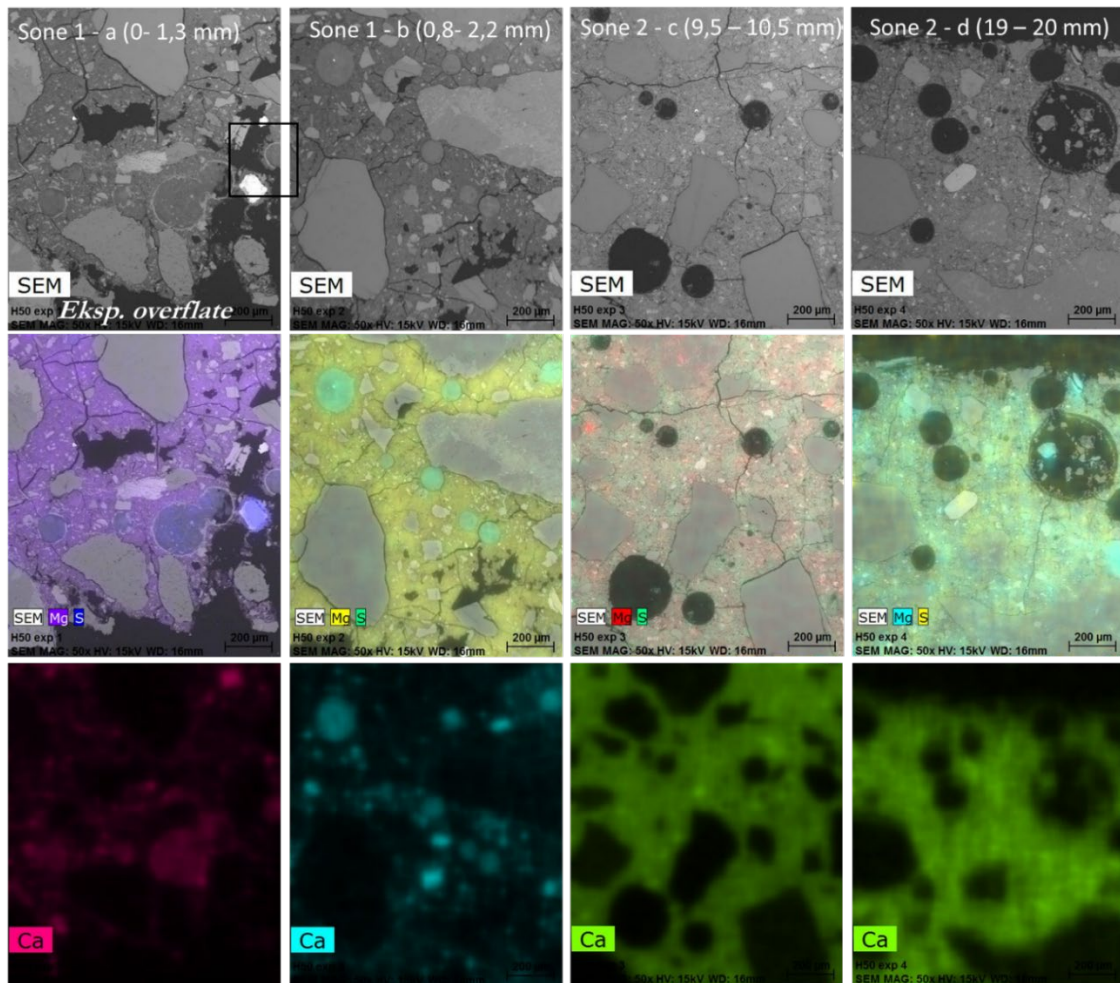
Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvatn i 25 år

Silikastøv var godt dispergert, utan teikn på udispergerte silikaklumpar i sementpastaen. Tynnslipa viste stort innslag av relativt jamt fordelte små sirkulære luftporer, som tyder på lufttilførsel.

Referansetynnslip H50_N2 1 var karakterisert ved tilsynelatande intakt sementpasta med nokre mikroriss, omtrent tilsvarande prøve B50_N2, men i mindre omfang enn i prøve F50_N2.

4.3.2 SEM

Ytre tynnslip H50_N2 Y



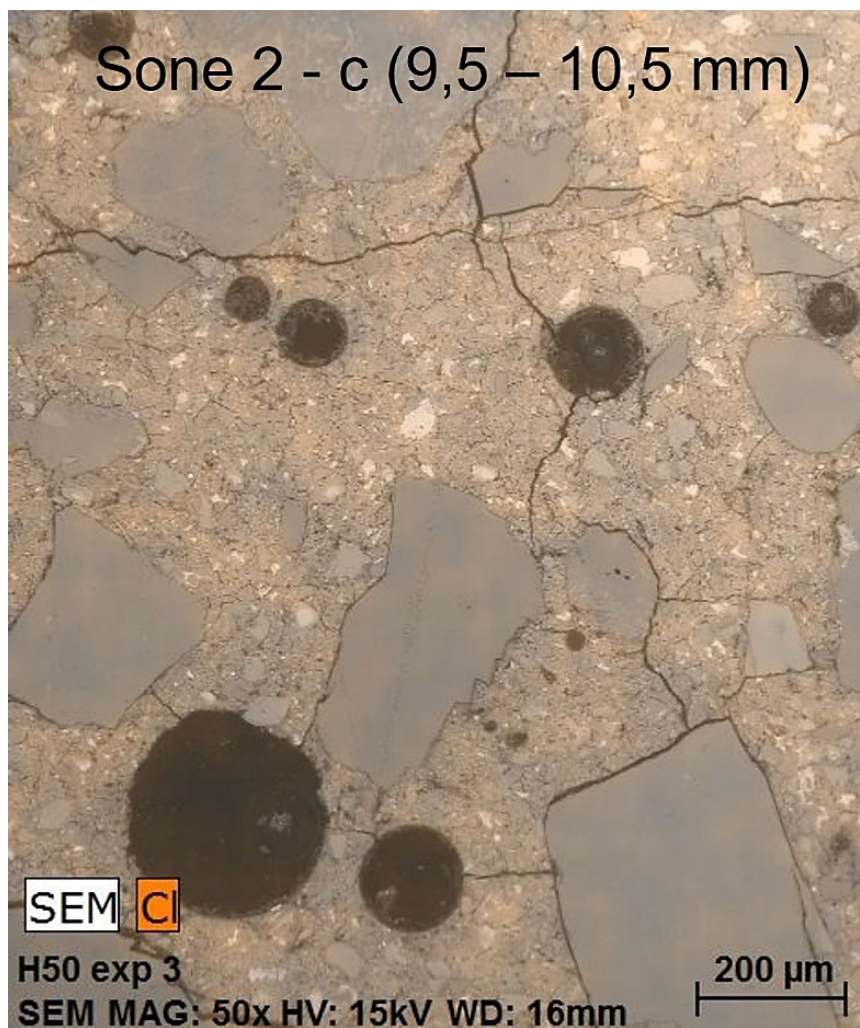
Figur 27: Samanstilling av SEM-backscatter bilder (øvrste rad) og elementkart frå Sone 1 og Sone 2 gjennom tverrsnittet av tynnslip H50_N2 Y. Thaumassitt (høg intensitet av S og Ca) fylte luftporene inntil 2-2,5 mm under overflata. Merk at kalsium minkar mot overflata medan magnesium aukar. Målestokk = 200 µm. Ramma i øvre venstre bilde er vist i detalj i Figur 29. Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

Figur 27 viser elementkart av Sone 1 (Område a & b) og Sone 2 (Område c & d). Områda a og b (0-1,3 mm og 0,8-2,2 mm frå eksponert overflate) hadde krakelert sementpasta med svært lite kalsium og bestod av magnesium-silikat hydrat (M-S-H). Innimellom var det utfelt thaumasitt i luftporer, her vist med svovel og kalsium. Thaumassitt i Sone 1 (truleg saman med brucitt) hadde i nokre tilfelle magnesiumkalsitt utfelt langs kanten (sjå også Figur 29 med punktanalysar).

Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvatn i 25 år

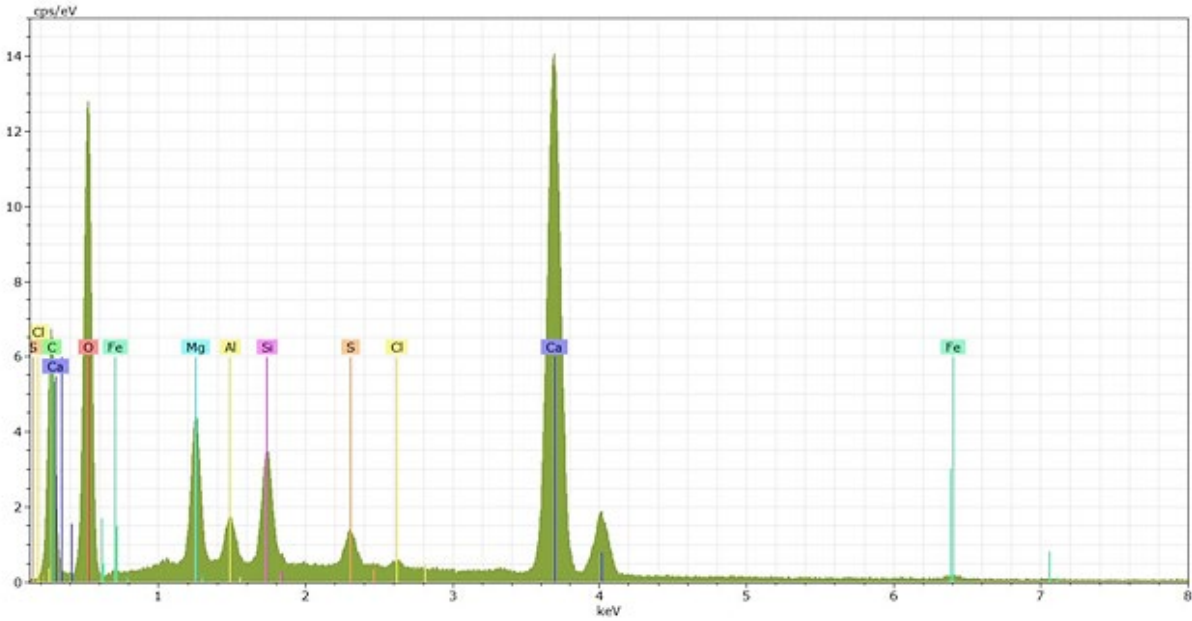
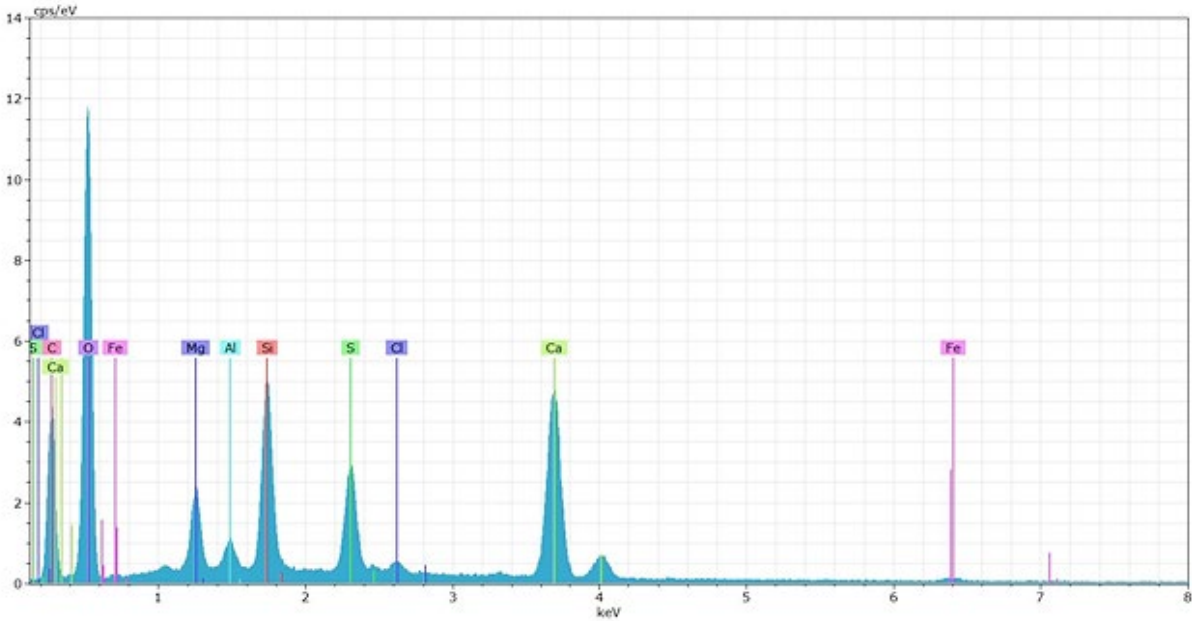
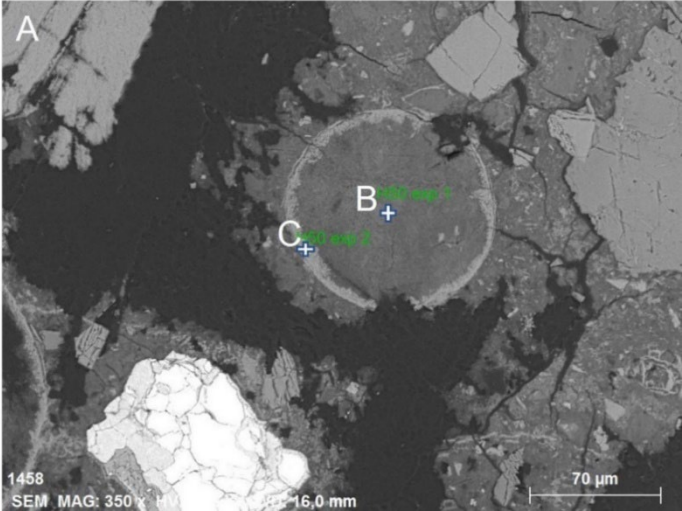
I Sone 2 *Område c* (9,5-10,5 mm frå overflata) i var kalsiumkonsentrasjonen i sementpastaen mykje høgare og auka tilsynelatande innover i *Område d* (19-20 mm med høgare Ca intensitet). Magnesium var fortsatt til stades, men var her ujamt fordelt pastaen. Nokre av tilslaga inneheld også magnesium. Sementpastaen inneheld litt spreidd svovel.

Det blei ikkje utført systematiske kloridanalysar. Figur 28 viser eksempel på omfattande kloridinntrenging omkring 10 mm frå overflata.



Figur 28: Tynnslip H50_N2 Y. Eksempel på kloridinntrenging 10 mm inn frå overflata. I dette området var det også utvikla kommuniserande mikroriss. Foto: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

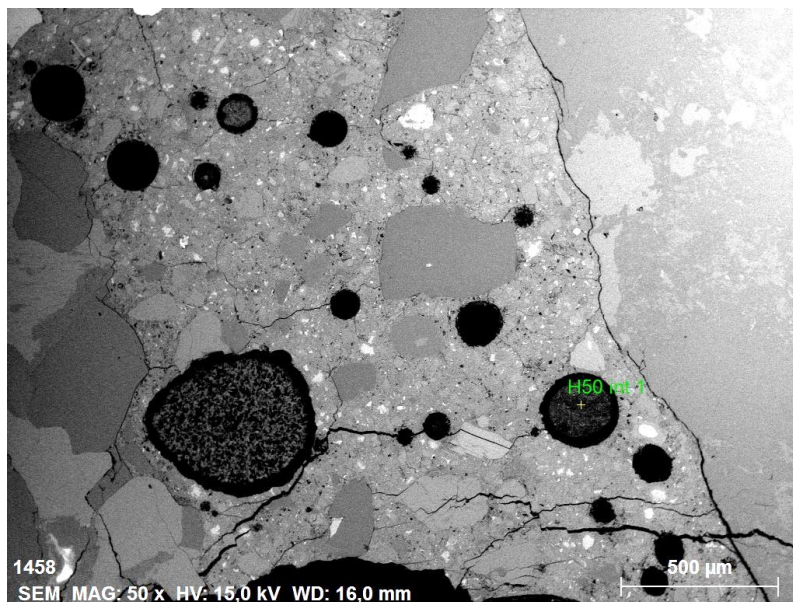
Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvatn i 25 år



Figur 29 (førige side): Tynnslip H50_N2 Y, Sone 1. Punktanalysar frå Område a. EDX-spektrum B (øvt) er thaumasitt (Al-førande) med innblanding av ein magnesiumrik fase (truleg brucitt). Spektrum C av reaksjonsrand på bekostning av thaumasitt (nedst) viser magnesiumkalsitt med litt Al, Si og S; mest sannsynleg rest av ikkje-reagert thaumasitt. Nedbryting av thaumasitt til karbonatmineral er ofte observert i sprøytebetong. Reaksjonen fører til frigjering av sulfation frå thaumasitt, som i blant gir utfelling av gips på og nær tørre overflater (Hagelia og Sibbick 2009). Foto/analyse: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

Referansetynnslip H50_N2 I

Det blei ikkje utført element mapping av dette tynnslipet. Figur 30 viser backscatterbilde av eit sentralt område av intakt sementpasta med nokre mikroriss. Luftporene inneheld eit delvis oppløyst materiale som ikkje er identifisert. Analyse av pkt. H50 int er gitt i Tabell 3 og viser høgt innhald av karbon og lågt innhald av silisium. Dette er neppe reagert silikastøv som bare burde førekomme i sementpastaen og som elles har svært høgt innhald av Si. Det låge innhaldet av Si og svært høgt C samsvarer heller ikkje med silisiumkarbid (SiC), som er brukt ved preparering av tynnslipa. Analysen viser også eit tydeleg innslag av Ca og reflekterer truleg innverknad frå sementpasta.



Figur 30: Fragment i luftpore i tynnslip H50_N2-I. Foto: Nelia Castro, UiO/ Per Hagelia.

Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvatn i 25 år

Tabell 3: Semi-kvantitativ analyse av fragment i luftpore.

Bruker Nano GmbH, Germany		24.11.2020			
Quantax					
Results	H50 int 1				
Date:	24.11.2020				
Element	AN	series	[wt.%]	orm. wt.%]	orm. at.%] (1 Sigma)
Carbon	6	K-series	39,90824	43,61027	4,854775
Oxygen	8	K-series	28,23638	30,85569	3,581068
Silicon	14	K-series	9,119863	9,965853	0,407562
Calcium	20	K-series	9,308423	10,1719	0,309005
Aluminium	13	K-series	1,769861	1,934039	0,111425
Sodium	11	K-series	0,661348	0,722697	0,072392
Sulfur	16	K-series	0,864834	0,94506	0,060199
Magnesium	12	K-series	0,389796	0,425955	0,050048
Iron	26	K-series	0,825477	0,902051	0,064612
Potassium	19	K-series	0,426888	0,466487	0,043018
		Sum:	91,51111	100	100

5 Diskusjon

5.1 Eksponeringsforhold, nedbryting og mogleg vidare utvikling

Med utgangspunkt i den sterkt varierende vassføringa i Fiskåbekken (Næs mfl. 2021), som har utløp til sjøen rett ved testområdet, er det sannsynleg at eksponeringsklasse XA2 dominerte i testperioden og at klasse XA1 førekom ved høg vassføring i fleire periodar i året. Det er ingenting som tyder på forhold tilsvarende klasse XA3 på noko tidspunkt: Eksponeringsforholda har vore prega av brakkvatn og er ikkje representativ for ordinært sjøvatn. Eksponeringsklassen for den undersøkte betongen med omsyn til kloridpåverknad var XS2 (permanent neddykka).

Undersøkinga viser at eksponering i brakkvatn har gitt ulike type nedbrytingsreaksjonar med ulikt omfang i dei tre utvalde reseptane. *Det er likevel verd å merke at nedbrytingsreaksjonane i alle tilfelle hadde eit relativt lite omfang, og at dei ikkje har ført til strukturelle skadar på makroskala etter 25 års eksponering* (Sjå Figur 8 & 9). Diskusjonen er derfor avgrensa til nedbrytingsfenomen observert på mikroskala og forskjellar mellom reseptane som kan seie noko om potensialet for vidare utvikling på lang sikt.

Referansebetongen (B50_N2) hadde få mikroriss og viste svært lite nedbryting (inntil ca. 1,5 mm frå overflata). Betongen med høgt bindemiddelinnhald og 12,5 % silikastøv (F50_N2) var overraskande sterkare påverka inntil 3,5 mm frå overflata. Nedbrytinga omfatta utluting av kalsium og inntrenging av magnesium og svovel med utfelling av kalsitt (PCD) som totalt danna ein litt porøs ytre sementpasta. Denne betongen hadde også to typar overflateparallelle mikroriss inntil 5 mm frå overflata; eitt med utfelling av karbonat og brucitt og eitt med utfelling av ettringitt. Ettringitt hadde vokse på tvers av risset og har truleg bidratt til ekspansjon.

Betongen med 17,5 % kalkfiller (H50_N2) viste som venta førekomst av thaumasitt. Effekten av sulfatangrep var mest tydeleg inntil ca. 2,5 mm og var nært knytta til kraftig utluting av kalsium i sementpastaen. Thaumasitt var for det meste passivt utfelt i luftporene, men pastaen omkring var porøs og erstatta med magnesium som dannar ikkje-sementerande MSH. Det var også ujamt fordelt diffus utluting innover til omkring 15 mm under overflata. Konsentrasjonane av bikarbonat på staden er generelt låge og er ikkje tilstrekkelege som karbonatbidrag til thaumasitt. Det vesentlege av karbonatet i thaumasitt er utan tvil frå kalkfiller.

Designlevetida for konstruksjonsbetong er 100 år, og resultatata frå feltstasjonen i Kristiansand utgjør 25 % av denne tida. Undersøkinga som er rapportert her var avgrensa til betongoverflater omkring 25 cm under sjøoverflata. Det er naturlegvis vanskeleg å framskrive vidare utvikling. Vi kan likevel generelt konstatere:

- Referansebetongen (B50_N2) viser ingen vesentlege teikn på nedbryting og vil truleg ha svært lang levetid.
- Betong med høgt silika og høgt bindemiddelinnhald (F50_N2), med tydeleg utluting av kalsium, typisk sjøvassangrep frå magnesium og sekundær ettringitt på overflateriss, er blitt meir porøs og meir utsett for vidare angrep. Dei sekundære minerala viser at ytre deler av porevatnet har lågare pH enn upåverka betong.
- Betong med kalkfiller (H50_N2), som var påverka av thaumasitt sulfatangrep, magnesiumangrep og utfelt karbonat (PCD) viser at pH i porevatnet er lågare enn i upåverka betong. Nedbrytingsreaksjonane har ført til auka (sekundær) porøsitet. Denne betongen er i prinsipp mest open for vidare angrep.

5.2 Kva kan vere årsaka til høgare kloridinntrenging i brakkvatn enn i sjøvattn?

I samband med prosjektarbeidet i DURMARE er det vist at kloridinntrenginga i reseptane B, F og H eksponert i brakkvatn i Kristiansand er signifikant høgare enn i dei same reseptane på feltstasjonen i Sandnessjøen, der saliniteten er omtrent som sjøvattn. Samanlikninga er i begge tilfelle basert på betongkjernar frå nedre neddykka deler av testprøvene. Dette er omvendt av det ein kunne vente, og står fram som eit tilsynelatande paradoks. Det er neppe grunn til at dette har si årsak i den litt kortare eksponeringstida i Sandnessjøen (21 år mot 25 år i Kristiansand).



Figur 31: Testprøvene frå Kristiansand (A og B) viste lokalt (B) sporadisk vekst av rur, medan prøvene frå Sandnessjøen (C) var sterkt tilgrodd med rur. Foto: Stig H. Helgestad, Statens vegvesen.

Fotografi av prøvene viser at betongen i Kristiansand i svært liten grad var tilgrodd med rur, medan betongen frå feltstasjonen i Sandnessjøen var sterkt tilgrodd (Figur 31). Rur hadde her danna eit tykt og i stor grad samanhengande ytre lag i nedre neddykka deler av alle prøvene .

Rur har generelt eit svært godt feste mot underlaget og dannast ganske raskt der forholda ligg til rette. Det er derfor svært sannsynleg at tykke lag med rur vil motverke effekten av kloridinntrenging. Dette ser ut til å vere ei god forklaring på at betongen eksponert i sjøvattn i Sandnessjøen har lågare innhald av klor enn betongen som var eksponert i brakkvatn i Kristiansand.

Eksempelet viser at det alltid er viktig å beskrive omfanget av tilgroing med rur på eksponerte testprøver. Det er sannsynleg at tilgroing ikkje er likt utvikla på alle prøver og dette kan ha innverknad på vurderingar av kloridmotstanden til ulike betongreseptar. I samband med langtidsforsøk bør ein monitorere dei eksponerte flatene i faste intervall, og i tilfelle med aukande tilgroing ta sikte på å fjerne rur for å sikre like eksponeringsforhold for alle prøvene/reseptane.

6 Konklusjon

Undersøkingane av tre utvalde testprøver med ulike reseptar eksponert i brakkvatn i 25 år viste:

- Referansebetongen B50_N2 hadde bare ei tynn ytre karbonatisert sone og hadde svært få mikroriss. Denne betongen var elles svært lite påverka av sulfat og viste ikkje inntrenging av magnesium
- Betongen med høgt silikainnhald og høgt bindemiddelinnhald (F50_N2) hadde ei ytre porøs sone og er dermed potensielt mindre motstandsdyktig enn referansebetongen
- Betongen med kalkfiller (H50_N2) viste eit tidleg stadium av thaumasitt sulfatangrep og størst omfang av nedbryting og potensiale for vidare nedbryting
- Alle betongane viste kloridinntrenging inntil minst 20 mm under den eksponerte overflata.
- Dei observerte nedbrytingsmekanismane hadde ikkje ført til strukturelle skadar på makroskala etter 25 års eksponering
- Samanlikning av resultatane frå feltstasjonen i Kristiansand og andre feltstasjonar med tanke på vidare utvikling av reseptar og regelverk bør baserast på sikker klassifisering av eksponeringsmiljøa på kvart testområde
- Det er grunn til å tru at sterk tilgroing med rur på testprøver i nokon grad motverkar kloridinntrenging. Variabel tilgroing på eit og same testfelt kan gi ulike eksponeringsforhold for kvar prøve og kan dermed ha innverknad på vurderingar av kloridmotstand til ulike betongreseptar

Takk til:

Nélia Castro, Naturhistorisk museum, Universitetet i Oslo for teknisk hjelp og utføring av SEM-analyse og Jan Kihle Institutt for energiteknikk, Kjeller for preparering av tynnslipa. Forfattaren takkar også for kommentarar frå Klaartje De Weerd, Bård Pedersen, Eva Rodum og Malene Thostrup Pedersen.

7 Referansar

Bastiansen R, Moum J, Rosenqvist I Th (1957): Bidrag til belysning av visse bygningstekniske problemer ved Oslo-området alunskifere. NGI rapport nr 22.

Chabrelie A (2010): Mechanisms of Degradation of Concrete by External Sulfate Ions under Laboratory and Field Conditions. PhD-thesis, École Polytechnique Fédérale du Lausanne.

Crammond NJ (2003): The thaumasite form of sulfate attack in the UK. Cement and Concrete Composites, 25, 809-818.

De Weerd K, Justnes H (2015): The effect of seawater on the phase assemblages of hydrated cement paste. Cement & Concrete Composites, 55, 215-222.

Fiskaa O, Hansen H, Moum J (1971): Betong i alunskifer. Resultater av alunskiferutvalgets forsøksvirksomhet 1947-1963. NGI rapport nr 86.

Fiskaa O (1973): Betong i alunskifer. Resultater av alunskiferutvalgets forsøksvirksomhet 1963-1972. NGI rapport 101.

Hagelia P, Sibbick RG, Crammond NJ, Grønhaug AG, Larsen CK (2001): Thaumasite and subsequent secondary calcite deposition in sprayed concrete in contact with sulfide bearing Alum Shale, Oslo, Norway. 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building materials, p 131-138, Athens, Greece. September 2001.

Hagelia P, Sibbick RG, Crammond NJ, Larsen CK (2003): Thaumasite and secondary calcite in some Norwegian concretes. Cement & Concrete Composites, 25, 1131-1140.

Hagelia P, Sibbick RG (2009): Thaumasite Sulfate Attack, Popcorn Calcite Deposition and acid attack in concrete stored at the "Blindtarmen" test site Oslo, from 1952 to 1982. Materials Characterisation, 60, 686-699.

Hagelia P (2011): Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels. PhD-thesis, Technische Universiteit Delft.

Hagelia P (2018): Oppsummering av tilstandsutvikling i sprøytebetong som bergsikring. Etatsprogrammet Varige konstruksjonar 2012-2015. Statens vegvesens rapportar Nr. 566.

Hooton RD, Nokken M, Thomas MDA (2002): Portland-limestone cement: State of the art and gap analysis for CSA A 3000. Cement Association of Canada, report SN3053, University of Toronto.

Isaksen, H.R. and Holtmon, J.P. (1994): Rapport fra produksjon av prøveelementer. FoU-prosjekt: Utvikling av kloridbestandig betong, 94-13 BRU.

Moum J Rosenqvist I Th (1959): Sulphate attack on concrete in the Oslo region. Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, Paper 56 -18, 8 pp.

Næs K, Staalstrøm A, Haraldstad T (2021): Utslipp og spredning av PAH til sjø fra Elkem Carbon AS, Kristiansand. NIVA RAPPORT L.NR. 7583-2021

Rahman MM, Bassouni MT (2014): Thaumasite sulfate attack on concrete: Mechanisms, influential factors and mitigation. Construction and Building Materials 73, 652–662.

Sibbick RG, Fenn D, Crammond NJ (2003): The occurrence of thaumasite as a product of seawater attack. Cement & Concrete Composites, 25, 1059-1066.

Mikroskopisk undersøkning av betong eksponert i sjøvatn i 25 år

Sotiriadis K, Nikolopoulou E, Tsivilis S, Pavlou A, Chaniotakis E, Swamy RN (2013): The effect of chlorides on the thaumasite form of sulfate attack of limestone cement concrete containing mineral admixtures at low temperature. *Construction and Building Materials* 43, 156-164.

Statens vegvesen (1995): Utvikling av kloridbestandig betong. Resepter og fastheter. Bruavdelingen Rapport 95-07.

Zhou Q, Hill J, Byars EA, Cripps CJ, Lynsdale CJ, Sharp JH (2006): The role of pH in thaumasite sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36, 160-170.

Vedlegg 1 Oppsummering av resultat frå Blindtarmen i Oslo (1957-1971)

Det blei plassert ut totalt 212 prøver i Blindtarmen testfelt for betong i alunskifermiljø. Tabellen under er henta frå Hagelia og Sibbick (2009) og bygger på rapportar frå Fiskaa mfl. (1971) og Fiskaa (1973). Alle testprismar (10 x 10 x 40 cm³) var permanent neddykka i alunskifervatn. Serie 1-9 blei lagt ned i 1952, Serie 10-14 i 1957 og Serie 15-16 blei lagt ned i 1960.

Table 2: Synthesis of Blindtarmen test data from [5] and [9]; * SF = silica fume from Fiskaa Verk; ** Slag from Christiania Spigerverk. *** = Franzefoss limestone. Strength data recalculated from kp/cm² in original work.

Series/ cement type	Additives (% of cement weight) or air entrainment (% additional air volume)	w/c	Permeability (cm/s) of ref. samples (1967)	Volume loss (dm ³)/ exposure time (start to 1972)	- Compressive strength in ref. samples (year measured) - % strength loss on exposure	Overall performance
1/ Nor PC (11.9 % C ₃ A)	None	0.50	1.1 x 10 ⁻¹⁰	0.50/ 20 yrs	- 48 MPa (1957) - 28 %	Severe attack
2/ Danish SRPC (5% C ₃ A & 10 % molére)	None	0.50	7.5 x 10 ⁻¹¹	0.10/ 20 yrs	- 55 MPa (1972) - 35 %	Good
3/ Finnish Ferrari Cement	None	0.51		0.13/ 20 yrs	Not established	Good
4/ American Type 5 SRPC (3.3 % C ₃ A)	None	0.50	1.7 x 10 ⁻¹²	0.09/ 20 yrs	- 50 MPa (1957) - 1-9 %	Very good
5/ Nor PC	Air entrained (4 %)	0.52	2.5 x 10 ⁻¹⁰	2.10/ 20 yrs	- 41 MPa (1957) - 34-53 %	Very severely attacked
6/ 85 % Nor PC	15 % SF*	0.62	1.04 x 10 ⁻¹¹	0.10/ 20 yrs	- 46 MPa (1972) - 31 %	Good
7/ 85 % Nor PC	15 % slag**	0.50	1.01 x 10 ⁻¹¹	1.40/ 20 yrs	- 37 MPa (1957) - 16-44 %	Severe attack
8/ Nor PC	8 % crushed limestone fines (D ₅₀ = 0.01 mm)***	0.52	7.1 x 10 ⁻¹¹	2.66/ 20 yrs	- 46 MPa (1957) - 30-31 %	Very severely attacked
9/ Nor PC	8 % crushed calcite fines (D ₅₀ = 0.03 mm)	0.51	1.6 x 10 ⁻¹⁰	1.56/ 18.9 yrs	- 54 MPa (1957) - 29-50 %	Severe attack
10/ Nor PC	Air entrained (4.3 %)	0.50	n.a	0.26/ 14.2 yrs	Not established .	Severe attack
11/ English sulfacrete (2.6 % C ₃ A)	None	0.50	n.a	0.06/ 14.2 yrs	- 72 MPa (1972) - 7 %	Very good
12/ 85 % Nor PC	15 % Trass	0.50	n.a	0.02/ 14.2 yrs	- 50 MPa (1972) - 6 %	Very good
13/ 85 Nor PC	15 % Trass & crushed calcite sand replacing sand fraction	0.50	n.a	0.11/ 14.2 yrs	Not established	Good
14/ 45 % Nor PC	45 % Trass 10 % Portlandite	0.50	n.a	0.06/ 14.2 yrs	- 44 MPa (1972) - 22 %	Very Good
15/ Danish Type 5 SRPC (0.9 % C ₃ A)	None	0.50	n.a	0.01/ 11.2 yrs	- 70 MPa (1972) - 16 %	Very good
16/ Danish Marine cement (0.9 % C ₃ A with 10 % molére)	None	0.50	n.a	0.01/ 11.2 yrs	- 66 MPa (1972) - 3 %	Very good

Note: 8 % of the sand fraction in Series no 8 and 9 was replaced by calcium carbonate fines.

Vedlegg 2 Betongreseptar – feltstasjonen ved Fiskå, Kristiansand

Tabellen viser alle reseptane som var eksponerte over 25 år i Kristiansand frå mai 1994. Prøver frå neddykka del av prøvene B, F og H er undersøkt i denne rapporten.

Resept	A	B	H	Q	O	E	D	F	R	G	J	I	K	M	L	N	P
Råvare	A-ref.	B-ref.	B-fil.	B-VS	B-HS	B-MP	B-SR	S-ref.	S-VS	S-45	S-33	B-inh.1	B-inh.2	S-inh.2	B-fob.	S-fob.	B-ltx.
Sement	331	371	385	380	375	384	375	399	400	325	433	380	380	400	376	396	377
Silika		15,5	15,1	15,5	15,6	13,4	29,7	49,9	49,9	32,5	28,8	16,4	16,1	50	15,7	49,5	8,2
Fritt vann	168,8	146,5	159,6	155,5	154,3	153,2	158,9	187,1	185,6	166	158,7	154,2	146,1	188,9	146,4	180,9	142,8
Absorbent vann	13,4	12,8	12,1	13	12,9	13,2	12,8	12,2	12,2	13,2	12,6	13	12,9	12,1	12,8	12	12,6
Filler			70														
Tørr sand 0-8 mm	1008	923	863	980	965	1015	961	883	880	989	920	968	964	873	949	867	993
Tørr pukk 8-16 mm	860	899	872	833	834	821	824	843	846	866	868	859	852	846	842	834	743
inhibitor 1												2	4,6	3,6			
inhibitor 2																	
hydrofobering															7,8	4,1	36,1
Polymer																	
P-stoff	1	1,2	1,5	0,8	0,8	1,4	0,5	1,8	1,1	1,4	1,9	1,4	1,4	1,8	1,4	1,8	1,7
SM-110		1,4	2,3	1,5	2	1,5	1,1				2,3	2	2		2,2		
Mighty 150								1,6	1,5	1,2				1,6			
Tilsatt L-stoff	Nei	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nei	Nei	Ja	Nei	Ja	Ja	Nei	Ja	Nei	Ja
Tilsatt R-stoff	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Ja	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
Fersk romvekt	2382	2370	2381	2380	2360	2403	2362	2378	2376	2394	2424	2396	2379	2377	2353	2347	2314
Tot. vann	182,2	159,3	171,8	168,5	167,2	166,4	171,6	199,3	197,8	179,3	171,3	167,2	159,1	201	159,1	192,9	155,5
Luft %, PF-målt	2,3%	4,2%	3,1%	3,3%	4,1%	1,8%	3,6%	1,2%	1,4%	1,7%	1,6%	2,7%	3,8%	1,1%	4,2%	2,4%	4,5%
Sugporisitet, %	12,3%	11,2%	11,9%	11,2%	10,7%	11,9%	12,3%	14,8%	13,2%	12,6%	11,5%	12,2%	11,1%	14,9%	9,2%	12,9%	8,3%
Tilslag volum %	69%	67%	67%	67%	66%	68%	66%	64%	64%	68%	66%	67%	67%	63%	66%	63%	64%
Pasta % ekskl. luft	29%	29%	30%	30%	30%	30%	31%	35%	35%	30%	32%	30%	29%	36%	30%	35%	31%
m = fritt vann/(c+s)	0,51	0,38	0,40	0,39	0,40	0,39	0,39	0,42	0,41	0,46	0,34	0,39	0,37	0,42	0,37	0,41	0,37
m = tot. vann/(c+s)	0,55	0,41	0,43	0,43	0,43	0,42	0,42	0,44	0,44	0,50	0,37	0,42	0,40	0,45	0,41	0,43	0,40
m = fritt vann/(c+2s)	0,51	0,36	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,37	0,43	0,32	0,37	0,35	0,38	0,36	0,37	0,36
m = tot. vann/(c+2s)	0,55	0,40	0,41	0,41	0,41	0,40	0,39	0,40	0,40	0,46	0,35	0,41	0,39	0,40	0,39	0,39	0,40

Tabell 3 Tabellen viser betongens sammensetning og beregnede masseforhold. Uthevet masseforhold blir benyttet dersom annet ikke er spesifisert.



Statens vegvesen
Pb. 1010 Nordre Ål
2605 Lillehammer

Tlf: (+47) 22 07 30 00

firmapost@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Tryggere, enklere og grønnere reisehverdag