



# Oppsummering av tilstandsutvikling i sprøytebetong som bergsikring i ulike tunnelmiljø

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTAR

Nr. 566



Foto: Per Hagelia



## Tittel

Oppsummering av tilstandsutvikling i sprøytebetong som bergsikring i ulike tunnelmiljø

## Forfattar

Per Hagelia

## Avdeling

Vegavdelingen

## Seksjon

Tunnel og betong

## Prosjektnummer

603242

## Rapportnummer

Nr. 566

## Prosjektleder

Synnøve A. Myren / Alf Kveen

## Godkjent av

Synnøve A. Myren

## Emneord

Varige konstruksjoner, tilstandsutvikling tunnel, sprøytebetong, tunnelmiljø, nedbrytingsmekanismer, design parametarar

## Samandrag

Denne rapporten dokumenterer tilstandsutviklinga i våtsprøyta stålfiberarmert sprøytebetong i eit utval representative tunnelar i ferskvassmiljø, svakt svovelsurt miljø, alunskifermiljø og undersjøisk miljø. Undersøkingane omfattar strukturanalyse med mikroskopering av tynnslip og standard betonganalyse. Nedbryting er registrert i både undersjøisk- og alunskifermiljø, medan sprøytebetong i ferskvassmiljø stort sett er upåverka. Stålfiberen er i stor grad intakt også i aggressive miljø. Dei viktigaste årsakene til nedbryting er sulfat- og syreangrep i alunskifermiljø og eit kombinert angrep av biofilm og salt grunnvatn i undersjøisk miljø. Inntrenging av aggressivt vatn på heftsona fører ofte til stort omfang av nedbryting, særleg i sprøytebetongsjikt tynnare enn 100 mm. Restlevetida er vanskeleg å stipulere fordi nedbrytinga er styrt av komplekst samspel av vasskjemi, hydrogeologi/ bergmassegenskapar, forhold i tunnelrommet m.m. Undersøkingane har gitt grunnlag for å spesifisere minimumstykkelse på 100 mm for sprøytebetong i aggressive tunnelmiljø.

## Title

Durability development for sprayed concrete as rock support in different tunnel environments

## Author

Per Hagelia

## Department

Roads Department

## Section

Tunnels and Concrete

## Project number

603242

## Report number

No. 566

## Project manager

Synnøve A. Myren / Alf Kveen

## Approved by

Synnøve A. Myren

## Key words

Durable structures, existing tunnels, sprayed concrete, tunnel environment, degradation mechanisms, design parameters

## Summary

This report provides documentation of the durability development in wet sprayed steel fiber reinforced concrete from representative tunnels in freshwater environments, mildly acidic environment, alum shale environment and subsea environment. The investigations involved structural analysis, microscopy of thin sections and standard concrete analyses. Degradation occurs both in the subsea and alum shale environments, yet being mainly intact in the freshwater environment. Steel fibers were mainly intact also in the aggressive environments. The main degradation mechanisms were sulfate and acid attack in alum shale environment and a combined attack involving biofilm and aggressive ions in the subsea environments. Access of aggressive waters on the adhesion zone has commonly led to significant degradation, especially where sprays are thinner than 100 mm. The remaining lifetime is difficult to estimate, due to complex influence of water chemistry, hydrogeology/rock mass properties, traffic loads etc. The investigations provided basis for specifying a minimum spray thickness of 100 mm for sprayed concrete in aggressive environments.

## Forord

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra **etatsprogrammet Varige konstruksjoner**. Programmet hører til under Trafikksikkerhet-, miljø- og teknologiavdelingen i Statens vegvesen, Vegdirektoratet, og foregår i perioden 2012-2015. Hensikten med programmet er å legge til rette for at riktige materialer og produkter brukes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner, med hovedvekt på bruer og tunneler.

Formålet med programmet er å bidra til mer forutsigbarhet i drift- og vedlikeholdsfasen for konstruksjonene. Dette vil igjen føre til lavere kostnader. Programmet vil også bidra til å øke bevisstheten og kunnskapen om materialer og løsninger, både i Statens vegvesen og i bransjen for øvrig.

For å realisere dette formålet skal programmet bidra til at aktuelle håndbøker i Statens vegvesen oppdateres med tanke på riktig bruk av materialer, sørge for økt kunnskap om miljøpåkjenninger og nedbrytningsmekanismer for bruer og tunneler, og gi konkrete forslag til valg av materialer og løsninger for bruer og tunneler.

Varige konstruksjoner består, i tillegg til et overordnet implementeringsprosjekt, av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer
- Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler
- Prosjekt 3: Fremtidens bruer
- Prosjekt 4: Fremtidens tunneler

Varige konstruksjoner ledes av Synnøve A. Myren. Mer informasjon om prosjektet finnes på [vegvesen.no/varigekonstruksjoner](http://vegvesen.no/varigekonstruksjoner)

Denne rapporten tilhører **Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler** som ledes av Alf Kveen. Prosjektet vil skaffe kunnskap om den tekniske tilstanden på tunnelers konstruksjon og utrustning og øke kunnskapen om nedbrytningsmekanismer. Formålet med prosjektet er å utvikle bedre verktøy for tilstandsutvikling, noe som er viktig både for planlegging av drift og vedlikehold av eksisterende tunneler. Prosjektet vil også etablere kunnskap som kan bidra til at fremtidige tunneler bygges og innredes slik at ønsket kvalitet og levetid oppnås.

Rapporten er utarbeidet av *Per Hagelia*, Statens vegvesen

# Innhold

1	Innleiing .....	3
1.1	Varige konstruksjonar – Tilstandsutvikling i tunnelar .....	4
1.2	Hovudfokuset i Bestandigheit av sprøytebetong og forholdet til andre aktivitetar .....	4
1.3	Mål for oppsummeringsrapporten .....	5
1.4	Avgrensingar .....	5
1.5	Kortfatta oversikt over FoU-prosjekta vi bygger på .....	5
2	Nedbrytingsmekanismar og miljølastar i norske tunnelar .....	7
2.1	Erfaringar med sprøytebetong - oppsummering av tidlegare undersøkingar .....	7
2.1.1	Nokre viktige undersøkingar i tida før 1995 .....	7
2.1.2	Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler .....	9
2.1.3	Sulfatførande grunn og sulfatangrep på betong / Concrete deterioration in Norway caused by sulfate attack - Samarbeid med Building Research Establishment (BRE) .....	11
2.1.4	Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels (PhD).....	13
2.1.5	Moderne vegtunnelar (2007-2011) .....	17
2.1.6	Kort oppsummering av nedbrytingsmekanismar observert i norsk sprøytebetong .....	17
2.2	Forhold som påverkar nedbryting av sprøytebetong .....	19
2.2.1	Materialeigenskapar og design .....	19
2.2.2	Eksponeringsmiljø .....	20
2.2.3	Forhold i tunnelrommet .....	26
3	Undersøkingametodikk basert på kvalitetsdata .....	28
3.1	ITA sitt system for undersøking av bestandigheit .....	28
3.2	Metodikk i Varige konstruksjonar .....	29
3.2.1	Etablering av tidsseriar .....	29
3.2.2	Kriterier for val av tunnelar i aktiviteten Bestandigheit av sprøytebetong .....	29
3.2.3	Nedbryting av sprøytebetong vurdert i lys av prøvetaking i varierende hydrogeologiske forhold, eksponeringsforhold og betongreseptar .....	29
4	Resultat .....	33
4.1	Oppfølging av pelnummer etter «Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler» .....	33
4.2	Detaljundersøkingar på utvalde profilnummer .....	35
4.3	Ferskvassmiljø – Eksponeringsklassane XC2-XC4, XD1-XD3, X0 .....	38
4.3.1	Resultat frå strukturanalyse og standard betonganalyse.....	41
4.4	Svakt svovelsurt miljø - Eksponeringsklassane XC2, XD0, XA1.....	50
4.4.1	Oppsummering av undersøkingane i svakt svovelsurt miljø .....	51

4.4.2	Resultat frå strukturanalyse og mikroskopering av tynnslip .....	53
4.5	Alunskifermiljø – Eksponeringsklassane XC2-XC4, XD0 - XD3, XSA .....	56
4.5.1	Oppsummering av undersøkte lokalitetar i alunskifermiljø .....	59
4.5.2	Resultat frå strukturanalyse av betongkjerner .....	61
4.5.3	Stålfiberkorrosjon .....	72
4.5.4	Resultat frå standard betonganalyse .....	72
4.5.5	Effektar av avskaling, krakelering og utvasking i Ekebergtunnelen, Åkebergveien og Svartdalstunnelen .....	78
4.5.6	Laus betong knytta til alunskifermiljø og prekambrisk gneis .....	82
4.6	Undersjøiske miljø .....	83
4.6.1	Oppsummering av undersøkte lokalitetar i undersjøisk miljø .....	89
4.6.2	Resultat frå strukturanalyse av borkjerner .....	91
4.6.3	Stålfiberkorrosjon .....	113
4.6.4	Resultat frå standard betonganalyse .....	117
4.6.5	Effektar av avskaling, krakelering og sterk nedbryting av sementpasta .....	133
5	Hydrogeologiske og bergmekaniske forhold .....	134
5.1	Hydrogeologiske forhold – eksempel frå tidlegare arbeid i undersjøiske tunnelar .....	134
5.2	Bergmekaniske forhold.....	144
6	Oppsummeringar og konsekvensar .....	147
6.1	Hovudfunn .....	148
6.2	Ferskvassmiljø .....	149
6.3	Svakt svovelsurt miljø.....	149
6.4	Alunskifermiljø .....	150
6.5	Undersjøisk miljø.....	151
6.6	Sprøytebetong i rusta sulfid- og sulfatførande gneis er ikkje undersøkt .....	154
6.7	Dimensjonering .....	154
6.7.1	Behov for auka minimumstykkelse og god heft for sprøytebetong i alunskifermiljø.....	154
6.7.2	Behov for auka minimumstykkelse og god heft for sprøytebetong i undersjøisk miljø .....	156
6.8	Oppsummering og konklusjon.....	160
6.9	Vidare FoU basert på erfaringar frå drift og vedlikehald og rehabiliteringsprosjekt.....	161
6.10	Forundersøkingar og planlegging for auka levetid .....	161
7	Referansar.....	163

## 1 Innleiing

Det er konstatert eit vedlikehaldsetterslep på norske vegar. Dette gjeld både veg i dagen, tunnelar og bruer. Erfaring viser at ein ikkje i tilstrekkeleg grad tar omsyn til framtidige vedlikehaldskostnader når ein planlegger og bygger. Det bør vere eit stort potensial for å redusere levetidskostnadane dersom ein kan oppnå og bygge på ein meir *vedlikehaldsvennleg* måte. På eit overordna nivå vil det vere avgjerande å etablere ein fornuftig balanse mellom investeringskostnader og vedlikehaldskostnader. Samfunnsøkonomisk vurdering og analyse av problemstillinga er også relevant, og må i tillegg bygge på erfaringar om korleis ulike løysingar påverkar av trafikk og trafiksikkerheit.

*Det er likevel djupast sett teknisk faglege og naturfaglege forhold som avgjer kor lang levetid vegkonstruksjonane får.* Laster og nedbrytande krefter varierer også frå stad til stad. Derfor må både materialval, utførsle og design tilpassast lokale tilhøve.

Statens vegvesen er som langsiktig eigar av riksvegnettet avhengig av kunnskap om korleis ulike byggematerialar og installasjonar blir påverka av trafikk, overvatn, grunnvatn, temperatur, samt vêr og vind. Problematikken er typisk tverrfagleg og kompleks. Forsknings- og utviklingsprosjekt av dette slag bør utførast i nær kontakt med driftseiningane i etaten.

Etatsprogrammet Varige konstruksjonar omfattar undersøkingar av alle viktige materialar som blir brukt i tunnelar og bruer i Statens vegvesen:

*«Programmets hovedmål er å legge til rette for at riktige materialer og produkter benyttes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner. Formålet er å oppnå ønsket kvalitet, forutsigbart vedlikehold og definert levetid for ulike konstruksjonsløsninger, i første rekke for bruer og tunneler».*

Varige konstruksjonar omfattar både gjennomgang av tidlegare erfaringar/rapportar og nye undersøkingar. For å oppnå hovudmålet er det nødvendig å samanstille data som representerer bestandigheitsutvikling for byggemateriala i ulike eksponeringsmiljø over lengst muleg tid. Programmet bygger i stor grad på empiriske data. Det er muleg at ein i framtida vil kunne modellere bestandigheitsutviklinga, men dette kan ikkje gjerast utan realistiske og godt dokumentert utviklingstrendar frå bruer og tunnelar. Resultata og kunnskapen frå programmet har stor interesse for Statens vegvesen og bransjen elles.

Tilstandsutviklinga i sprøytebetong er avhengig svært mange forhold, og er delvis forskjellig frå tilstandsutviklinga i brubetong. Denne rapporten gir a) den faglege bakgrunnen for problematikken, b) dokumenterer prosjektresultata frå Varige konstruksjonar i lys av tidlegare prosjekt og c) oppsummerer tilstandsutviklinga for sprøytebetong brukt som bergsikring i eit representativt utval av tunnelar.

## 1.1 Varige konstruksjonar – Tilstandsutvikling i tunnelar

Varige konstruksjonar – Tilstandsutvikling tunnelar har omfatta følgjande aktivitetar:

- Tilstandsutvikling boltar – Aktivitetsleiar Karen Klemetsrud
- Miljøbelastningar i vegtunnelar – Aktivitetsleiar Per Hagelia
- Levetid membranar – Aktivitetsleiar Mona Lindstrøm
- Bestandigheit av sprøytebetong – Aktivitetsleiar Per Hagelia
- Tilstandsutvikling for tekniske installasjonar – Aktivitetsleiar Alf Kveen

## 1.2 Hovudfokuset i Bestandigheit av sprøytebetong og forholdet til andre aktivitetar

Delprosjektet har fokusert på bestandigheit og levetid av sprøytebetong brukt som *bergsikring*. Det er lagt stor vekt på data frå tunnelar med «*moderne sprøytebetong*», der miljølastene samstundes er dokumenterte. Moderne sprøytebetong er i denne samanheng betongmateriale med kvalitetar tilsvarande det Norsk Betongforening Publikasjon nr 7 beskriver. Kapittel 4 i denne rapporten gir utfyllande dokumentasjon av sprøytebetongen i dei undersøkte tunnelane.

I prosjektet har vi konstatert at *sprøytebetong eldre enn ca. 1985 («gammal teknologi»)* er lite eigna til å undersøke utviklingstrendar. Årsaka er at nedbrytingsreaksjonar oftast går raskare i sprøytebetong med lågare materialkvalitet enn dagens kvalitetar. Betong laga etter «gammal teknologi» kan likevel gi nyttig informasjon, fordi dei kan betraktast som «akselererte forsøk».

Delprosjekta om sprøytebetong og miljøbelastningar er gjensidig avhengige av kvarandre, og hovudresultata frå begge delprosjekta blir derfor rapporterte saman.

Arbeidet innan Bestandigheit av sprøytebetong har omfatta:

- Gjennomgang av tidlegare erfaringar med sprøytebetong (tilstandsrapportar og tidlegare FoU-program, masteroppgåver og dr. grads arbeid), med *vekt på å finne fram til tunnelar som er tilstrekkeleg dokumenterte til å seie noko om utviklinga over tid*. Regionkontora har i denne samanheng fått spørsmål om seinare utvikling i tunnelar som blei undersøkt i FoU-prosjektet «Riktig bruk av sprøytebetong» (1995–1997).
- Etablering av undersøkingsmetodikk med tanke på bestandigheitsutvikling i sprøytebetong på berg.
- Nye undersøkingar av bestandigheit av sprøytebetong i eit utval av representative vegtunnelar (kontrakt med Mannvit AS, master oppgåver ved NTNU m.m.).
- Samanstilling og samanlikning av tidlegare rapporterte og nye data, med vekt på parameterar som styrer bestandigheitsutviklinga.
- Oppfølging av testfeltet for sprøytebetong i Oslofjordtunnelen. Feltet blei etablert i mars 2010 under etatsprogrammet «Moderne vegtunnelar» (2007–2011) og vidareført i Varige konstruksjonar. Undersøkingar etter 5 års eksponering i aggressivt undersjøisk miljø, blei utførte i 2015 og er rapportert i ein eigen rapport.
- Vurderingar med tanke på å oppnå 100 års levetid (reseptar, utførsle, design m.m.) og behov for revisjon av styringsdokument i Statens vegvesen.
- Resultat er delvis implementerte i Prosesskoden.

### 1.3 Mål for oppsummeringsrapporten

Målet for denne rapporten er å gje ei samla oppsummering av hovudresultat frå tidlegare undersøkingar sett i lys av dei nye resultatane frå aktivitetane om sprøytebetong og miljøbelastningar i vegtunnelar. Det er lagt vekt på å:

- Gje ei innføring om nedbrytingsmekanismer i sprøytebetong og ulike miljølastar i norske tunnelar, med utgangspunkt i resultat frå tidlegare FoU prosjekt.
- Identifisere viktige forhold/parameterar som påverkar levetida til sprøytebetongen.
- Dokumentere tilstand til sprøytebetong brukt som bergsikring under påverknad av ulike miljølastar og ulike skadeårsaker.
- Undersøke utviklingstrendar over tid basert på eit utval av «best dokumenterte tunnelar» (inkl. data om reseptar, bergmasse, lekkasjeforhold, hydrogeokjemi etc.).
- Undersøke restlevetida for vanleg brukte betongreseptar, i lys av observert pastanedbryting og fiberkorrosjon som funksjon av tykkelse og heft over tid.
- Avdekke eventuelle behov for å endre betongreseptar, design m.m. i nye prosjekt.
- Legge fram bakgrunn for endringar i Statens vegvesen sine styringsdokument.

### 1.4 Avgrensingar

Denne rapporten vurderer ikkje spesielt:

- Effektar av miljøbelastningar på sprøytebetong frå frost og sprakefjell (sjå kap. 2.1.2)
- Brannsikring av vass- og frostsikringsselement
- Innstøypte sprøytebetongbuar

Brannsikring av PE-skum. Mannvit har på oppdrag frå Varige konstruksjonar utført nokre enkle visuelle registreringar av skadd sprøytebetong på vass- og frostsikringshvelv i sine rapportar til aktiviteten Bestandigheit av sprøytebetong (Mannvit 2015a, b, c, d, e, f)). Tilstanden til brannsikringa er elles ivaretatt av det systematiske vedlikehaldet og rehabiliteringsprosjekta som er i gang i Statens vegvesen.

Samanhengen mellom vedlikehaldsøkonomi, trafikkikkerheit, transportøkonomi og samfunnsøkonomi er ikkje tema for Varige konstruksjonar. Pr. dags dato finst det ingen samla oversikt over nedfall av stein og sprøytebetong i tunnelane, men slike data er registrert av Vegtrafikkentralen og ligg lagra saman med andre årsaker til stenging (samtale med Finn Harald Amundsen – Vegdirektoratet, januar 2016).

### 1.5 Kortfatta oversikt over FoU-prosjekta vi bygger på

Tabell 1 gir oversikt over FoU-prosjekta som aktiviteten om sprøytebetong bygger på. Dette omfattar relativt godt dokumenterte tunnelar. Ein del av tunnelane er undersøkte med tanke på nedbrytingsmekanismer, og nokre er undersøkte fleire gongar. Gjennomgang av alle rapportane gav grunnlag for å velje ut eit forholdsvis representativt utval av tunnelar for oppsummering, vidare undersøkingar og endeleg samanstilling av data. Detaljundersøkingane er utførte på lokalitetar der miljølastene og grad av påverknad/nedbryting er dokumentert.



Tabell 1.1: Aktiviteten Bestandighet av sprøytebetong bygger på utvalde FoU prosjekt i Statens vegvesen.

Prosjekt	Utført	Antal tunnelar/objekt
Utvalde tidlege prosjekt	1984–1990	5
Riktig bruk av sprøytebetong	1995–1997	63
Sulfatførande grunn og sulfatangrep på betong/ Concrete deterioration in Norway caused by sulfate attack*)	2000–2003	6
Nedbrytingsmekanismer i sprøytebetong/ Tunnelutvikling Dp 11 Nedbrytingsmekanismer	2003–2007	6
Doktorgrad	2003–2011	9
Moderne vegtunneler	2007–2011	3
Oslofjord testfelt	2010–2015	1
Varige konstruksjonar: – forprosjekt – hovudprosjekt inklusive to masteroppgåver	2011–2015	3 14

\*) Samarbeidsprosjekt med Building Research Establishment (BRE), Storbritannia

## 2 Nedbrytingsmekanismer og miljølaster i norske tunnelar

Hensikta med dette kapitlet er å gi ein oversikt over resultat, funn og tilrådingar frå tidlegare FoU-prosjekt. Dimensjonering, betongresept og design av sprøytebetong har stor betydning for bestandigheitsutviklinga, særleg i kontakt med aggressivt lekkasjevatn.

Fleire av tunnelane som er omtala i dette kapitlet er tatt med i det vidare i grunnlaget for vurdering av bestandigheitsutvikling og restlevetid for sprøytebetong (sjå Kapittel 4 og 5).

Sprøytebetong som bergsikring kom i bruk seint på 1960-talet (tørresprøyting). «Spiralen» ved Drammen var blant dei første tunnelane som blei sikra med sprøytebetong. Tanken var å sikre mot drypplekkasjar, noko som viste seg å vere ei urealistisk forventning. I 1965–1967 blei den 3000 m lange Skarvberg tunnelen i Finnmark sikra med 2–3 cm tykk sprøytebetong utan fiber (tørresprøytemetoden). På grunn av omfattande sikringsbehov på og bak stoff blei anleggskostnadane høge, noko som stansa omfattande bruk av sprøytebetong i Statens vegvesen inntil vidare (sjå Davik 1997f).

Dette kom etter kvart til å endre seg. Norske aktørar tok tidleg på 1980-talet ei leiande rolle internasjonalt når det gjaldt vidareutvikling av sprøytebetongteknologien. Våtsprøytemetoden blei etablert og fekk gjennombrøt omkring 1980, og har seinare vore einerådande i samband med tunnelsikringsarbeider. Utvikling av pumpesystem og sprøytebetongrobotar gjorde det muleg å sprøyte med stålfiberarmering, og produksjonskapasiteten auka dramatisk (Kompen 2008, Woldmo 2008). Fordelen med fiberarmert sprøytebetong er at han absorberer energi ved deformasjonar i bergmassen, og i nokon grad deformerer duktilt sjølv etter moderat opprissing (Morgan and Parker 2006, Bjøntegaard og Myren 2011, Myren og Bjøntegaard 2014).

Sprøytebetong er ein integrert del av bergsikringa saman med bergboltar. Dimensjonering av *sprøytebetongtykkelse* i Statens vegvesen var lenge basert på skjønn, men etter kvart fekk NGI sitt Q-system (Barton mfl. 1974, Barton og Grimstad 2004, NGI 2013) innpass. Statens vegvesen har sidan 2007 sett krav til klassifisering av bergmassen mht Q-verdiar, og frå og med same år etablert ein meir konservativ sikringspraksis i tunnelprosjekta enn det som er spesifisert i Q-systemet (Statens vegvesen 2007, Statens vegvesen Handbok N500 Vegtunnelar).

### 2.1 Erfaringar med sprøytebetong – oppsummering av tidlegare undersøkingar

#### 2.1.1 Nokre viktige undersøkingar i tida før 1995

Tidlege undersøkingar var i hovudsak basert på visuelle observasjonar utan testing av betongen og utan spesielt fokus på miljølaster. Dei mest systematiske undersøkingane blei utført i undersjøiske tunnelar, både i ferskvassonene under land og i undersjøiske tunnelstrekningar.

Ferskvasstrekningane frå desse undersøkingane er med få unntak representative for landtunnelar generelt.

Vardøtunnelen blei bygd i tida 1979–1982, som den første undersjøiske tunnelen i Norge. Uarmert sprøytebetong av låg kvalitet (C25) blei spruta opp i 2–3 til 12 cm tjukke sjikt som arbeidssikring. Undersøkingar rapportert av Olsen (1985) viste at:

- Etter mindre enn 2 år viste det seg at denne sprøytebetongkvaliteten ikkje var motstandsdyktig i kontakt med marint lekkasjevatn.
- Sprøytebetong i ferskvassona var derimot tilsynelatande upåverka.

Frå saltvassona (dokumentert ved vasskjemisk analyse) blei det rapportert oppsprekking, avskaling og nedfall av sprøytebetongen, dels knytta til 4–5 mm *grå-kvit laus utfelling på heftsona*. Betongen kunne delvis brekkast laus med handmakt, med indikasjonar på tidleg utluting og bortvasking av sprøytebetong. Det gjenverande sementlimet i utvaska sprøytebetong inneheldt *magnesium* som stammer frå sjøvatn. Ei prøve av oppsmuldra sprøytebetong hadde heile 5,7 % MgO (Asplan 1985). Olsen (1985) registrerte til dels omfattande vekst av jernbakteriar og manganbakteriar og dreneringsproblem i den undersjøiske delen. Bakteriell nedbryting blei antyda som muleg medverkande årsak til nedbrytinga. Det blei registrert «stram lukt av svovel» (truleg H<sub>2</sub>S) i tilknytning til bakteriane.

Noteby (1986) konstaterte at årsaka til nedbrytinga var utluting og kjemiske reaksjonar på grunn av sjøvatn, men hevda at det ikkje var påverka av sulfatangrep.

Vardø-, Ellingsøy-, Valderøy-, Godøy- og Kvalsundtunnelen (alle undersjøiske) blei undersøkt av Skjølsvold og Jensen (1990) og *sette også standard for vidare undersøkingsmetodikk*. Sprøytebetongen i Vardøtunnelen var då omkring 8 år gammal medan betongen i dei andre tunnelane var ca. 1–2 til 4 år gammal. Alle *dei nye tunnelane hadde stålfiberarmert sprøytebetong*. Det blei tatt ut kjerneprøver for betongtestar, både frå ferskvassona (under land) og saltvassona (under sjø) i alle tunnelane og elles utført mikroanalyse av tynnslip (betongpetrografi). Undersøkingane viste at:

- Vardøtunnelen, C25 (opna 1982) var sterkt skadd med mistanke om sulfatangrep. Diffusjonstest viste at sprøytebetongen hadde svært liten motstand mot kloridinntrenging, med høge kloridinnhald under havnivå. Mikroanalysen av betongen viste svært høgt innhald av udispergert silikastøv (som gir mindre effektiv pozzolanreaksjon, høgare permeabilitet og lågare styrke). Portlanditt var vaska ut. Betongen under sjø var sterkt omdanna med utfellingar internt og i heftsona mot berg. Trykkstyrken var låg (14,5–16 MPa).
- Ellingsøytunnelen, C35 (1987) viste etter ca. 3 år begynnande nedbrytingssskadar, inklusive noko fiberkorrosjon. Mikroanalysen avdekte at det var brukt både flygeaske og silikastøv. Perlittliknande tilslag blei observert i ei prøve. Det var utfellingsprodukt og omvandling av betongen nær kontaktsona mot berg, delvis med høgt magnesiuminnhald. Trykkstyrken i undersjøiske strekning var lågare enn venta for C35 betong, men tilfredsstillande under land i ferskvassonene.
- Valderøytunnelen, C35 (1987). Betongen hadde etter ca. 3 år ingen signifikante teikn på nedbryting, med tilsynelatande høg motstand mot kloridinntrenging. Stålfiberkorrosjon var avgrensa til betongsjiktet mot tunnelen. Likevel var det varierende kloridinnhald i betong frå den undersjøiske strekninga. Mikroanalysen viste

utfellingar og omdanning i betongen nær heftsona mot berg, samt noko udispergert silikastøv og sekundær ettringitt. Trykkstyrken var tilfredsstillande.

- Kvalsundstunnelen, C45 under sjø, elles C35 (1988), viste etter 2 år ikkje teikn til nedbryting, verken av sementlimet eller stålfiber. Betongen hadde tilsynelatande høg motstand mot kloridinntrenging, men viste likevel varierende innhald av klorid og magnesium i den undersjøiske strekninga. Mikroanalysen viste litt udispergert silikastøv og var elles utan nemneverdige utfelling og omvandling. Trykkstyrken blei tolka som tilfredsstillande.
- Godøytunnelen, C45 (1989) viste etter 1 år ikkje signifikant nedbryting. Fiberkorrosjon i saltvassona var avgrensa til overflata mot tunnelrommet. Motstanden mot kloridinntrenging var relativt høg, likevel med relativt høgt innhald av klorid i saltvassona. Mikroanalysen viste litt omdanning og utfelling nær kontakten til berg. Trykkstyrken var stort sett tilfredsstillande.
- Generelle trekk for alle tunnelane:
  - Tilstanden til sprøytebetong i ferskvassonene var jamt over god.
  - Heft mot berg var middels til dårleg

Skjølsvold og Jensen (1990) konkluderte med følgjande råd om sprøytebetong i undersjøiske vegtunnelar:

- Ein bør minst bruke miljøklasse MA (i hht. dåverande NS 3420), samt fasthet på *minimum C45-nivå*
- *Kontrollprosedyrar* for materialar og utførsle innskjerpast, og vatn/bindemiddelforholdet kontrollerast spesielt
- Det etablerast prosedyrar og rutinar for tilstandskontroll med observasjonar og *karakterisering på staden, med etterfølgjande laboratorieundersøkingar* på representative prøver
- Det etablerast prosedyrar for *karakterisering og identifikasjon av miljølaster* (aggressivitet, vasstrykk etc.) og kor desse er lokalisert.

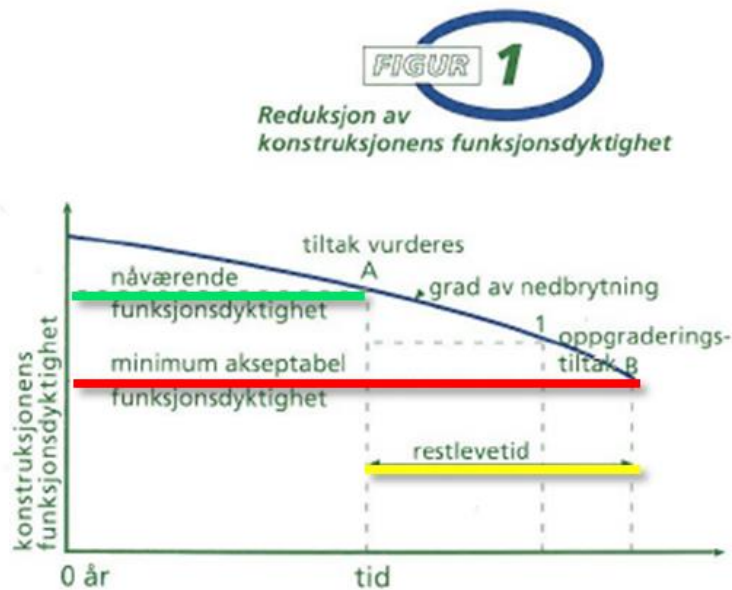
### 2.1.2 Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler

FoU-prosjektet «Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler» (1995–1997) omfatta heile 63 vegtunnelar, og er det mest omfattande prosjektet innan bestandigheit av sprøytebetong som er utført i Norge hittil. Prosjektet dekte i praksis alle landsdelar, og omfatta detaljert tunnelkartlegging og karakterisering, samt prøveuttak og testing av sprøytebetong påverka av ulike miljølaster. Det blei lagt vekt på fysiske og konstruksjonsmessig viktige parametarar, kloridproblematikk og karbonatisering. Eksponeringsmiljøa blei karakteriserte blant anna ved kjemiske analysar av lekkasjevatt. Men det blei lagt lite vekt på å avdekke årsaker til nedbryting ved tynnslipmikroskopi. Figur 2.1 viser hovudkonseptet som prosjektet arbeidde med.

Riktig bruk av sprøytebetong var delt inn i fem delprosjekt, samt sluttrapport:

- A Innkjøring og midtsoner (Davik 1997a)
- B Undersjøiske tunneler (Davik 1997b)
- C Frostsoner (Davik 1997c)

- D Sprakefjell (Davik 1997d)
- E Brannsikring av PE-skum (Davik 1997e)
- Sluttrapport (Davik 1997f)



Figur 2.1: Effekt av nedbryting av sprøytebetong som funksjon av tid. Sprøytebetong basert på riktige materialar, design og utførsle vil gje lite signifikant nedbryting og lang restlevetid (Davik 1997).

Hovudvekta blei lagt på å samanlikne eksisterande tilstand opp mot kvalitetskrava som var bestemt for dei enkelte tunnelane. Kvart delprosjekt bygde på omfattande undersøkingar som er referert til i delrapportane. Hovudresultata frå Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar var:

- Innkjøring og midtsoner (8 tunnelar). Karbonatisering og stålfiberkorrosjon hadde lite omfang, men ventilerte tunnelar viste tendens til djupare karbonatisering i hengen enn nede på sidene. Kloridinntrenging på grunn av tinesalt var høgst i eit belte frå 0,2 m – 1 m over vegbana.
- Undersjøiske tunnelar (13 tunnelar). 12 av dei vurderte tunnelane var 1–10 år gamle. Dei fleste tidlegare undersøkte undersjøiske tunnelar blei undersøkte på nytt. Stålfiberkorrosjon knytta til karbonatisering var ikkje omfattande, stort sett konsentrert til ytre sjikt, lokalt også mot heftsona. Det blei lokalt registrert omfattande stålfiberkorrosjon på grunn av kloridinntrenging. Bakterievekst (feilaktig kalla «algar») førte til tetting av dreneringa, men blei ikkje tolka som skadeleg for betongen. I Freifjordtunnelen blei det observert laus betong som under tvil blei tolka som prelltap. Prosjektet konkluderte med at det er nødvendig med seinare undersøkingar/oppfølging av undersjøisk sprøytebetong med tanke på stålfiberkorrosjon og kloridinntrenging, samt mulege effektar av bakteriar.
- Frostsoner (22 tunnelar). Det blei registrert frostskafer i gammal fuktbelasta sprøytebetong (> 20 år); stort sett tynne betongsjikt (< 20 mm). Mindre lekkasjar såg ut til å gje større frostbelastning enn store lekkasjar, og med muleg samanheng mellom frostskafer og akseleratordosering.

- Sprakefjell (17 tunnelar). Avskaling i tynn sprøytebetong blei registrert. Samstundes blei det vist at sprøytebetongen ikkje er utsett for bergspenningar der bolting/stag er tilstrekkeleg dimensjonert. Som generell regel bør ein unngå sprøyting før bolting.
- Brannsikring av PE-skum (15 tunnelar). Sprøytebetongprodukt med lette tilslagstypar (Robotic 10, Lightcem LC-10, Cafco 800, Firex) blei undersøkt både i tunnel og laboratorium. Tynn sprøytebetong (2–3 cm) viste tydeleg nedbryting: Stålfiberkorrosjon var i stor grad knytt til djup karbonatisering og i mindre grad påverka av kloridinntrenging.
- Generelle trekk (bergsikring):
  - Nedbrytingsfenomena er knytta til tunnellekkasjar.
  - Tynne sjikt av sprøytebetong (< 4–5 cm) viste ofte teikn på nedbryting medan tjukkare betong (> 6 cm), med nokre unntak, ikkje viste signifikant nedbryting.
  - Stålfiberkorrosjon var knytt til karbonatisering og stort sett konsentrert til ytre få mm mot tunnelrommet, i blant nær heftsona og unntaksvis gjennom heile tverrsnittet.
  - Heft mot berg var i mange tilfelle ganske dårleg, og det var ofte tydeleg at heften var best («god») der sprøytebetongsjiktet var tjukt.
- Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar omfatta *ikkje alunskifermiljø* og det blei lagt lita vekt på diagnose av nedbrytingsmekanismer.
- Prosjektet oppsummerte med at mikroanalyse av tynnslip burde ha blitt utført i større utstrekning.
- For undersøiske tunnelar konkluderte prosjektet med at *«i tillegg til nødvendig tykkelse, utføre en sikrere håndtering av lekksepunktene»* og *«unngå stålarmering hvis mulig»*.

### 2.1.3 Sulfatførande grunn og sulfatangrep på betong / Concrete deterioration in Norway caused by sulfate attack – Samarbeid med Building Research Establishment (BRE)

Med utgangspunkt i det velkjente problemet med sulfatangrep på betong i alunskifermiljø, og spesielt undersøkingane som blei utført av Alunskiferkomiteen i tida 1947 til 1973 (Bastiansen mfl. 1957, Moum og Rosenqvist 1959, Fiskaa mfl. 1971, Fiskaa 1973) og spørsmål frå konsulent i 2000 tok Geologi og tunnelseksjonen (Vegteknisk avdeling, Vegdirektoratet) initiativ til undersøkingar av sprøytebetong. Den sulfidførande alunskiferen er særleg utbreidd i Oslo-området og andre stader på Østlandet der det også er høg trafikkbelastning. Sprøytebetong på alunskifer i ei vegskjering i Åkebergveien (Oslo) blei først undersøkt:

- Skjeringa i Åkebergveien blei i 1970 sikra med sulfatresistent betong (basert på SR sement), men total nedbryting førte til at denne måtte meislast vekk etter bare 17 år og erstatta med ny sprøytebetong i 1987.
- Det viste seg at den nye stålfiberarmerte og sulfatresistente sprøytebetongen med silikastøv frå 1987 hadde klare teikn på svekking av betongen på grunn av *thaumasitt sulfatangrep (TSA)*; *utlutning* av kalsium og ei form for *indre karbonatisering*. Angrepet hadde ført til avskaling, lokalt med fullstendig nedbrote sementlim (thaumasitt og

kalkspat) og oppsprekking/tverrsprekkar (Hagelia og Grønhaug 2000, Hagelia mfl. 2001). TSA blei også identifisert i restar av 1970-betongen.

- Dette var første gong thaumasitt sulfatangrep blei rapportert i Norge. TSA føregår på bekostning av sementlimet og kan i ytterste konsekvens erstatte kalsium-silikat-hydrat (C-S-H) fullstendig. Alunskiferkomiteen hadde tidlegare konkludert med at sulfatangrepet i Oslo var forårsaka av sekundært ettringitt angrep i kombinasjon med syreangrep, men våre undersøkingar viste at årsaka var TSA i kombinasjon med intern karbonatisering knytta til inntrenging av karbonatrikt vatn.

Arbeidet førte oss i kontakt med Building Research Establishment (BRE) – Storbritannia, som på denne tida hadde ansvar for eit britisk forskingsprosjekt om sulfatangrep i regi av UK Government's Construction Directorate. Det blei etablerte eit samarbeidsprosjekt «*Concrete deterioration in Norway caused by sulfate attack*» (2000–2003) mellom Vegteknisk avdeling og BRE. Arbeidet fokuserte mest på sprøytebetong i direkte kontakt med alunskifer og svartskifer (Hagelia mfl. 2001, 2003). Også soner med suspekt prelletap (sjå Davik 1997b) i den undersjøiske Freifjordtunnelen blei undersøkt (Hagelia mfl. 2003). BRE la vekt på «forensic methods» og omfatta tynnslipanalyse/betongpetrografi og diagnose, samt dokumentasjon av vasskjemisk miljø. Resultata frå undersøkingane var:

- Begynnande thaumasitt sulfatangrep (TSA) blei konstatert i både Ekebergtunnelen og Svartdalstunnelen (hhv 8 år og 1,5–2 år) i stålfiberarmert våtsprøyta betong. I begge tilfelle var det brukt sulfatresistent (SR-) sement med hhv 8 % (v/b = 0,45) og 5 % silikastøv (v/b = 0,40). Silikastøvet var godt dispergert.
- Fiberfri sprøytebetong i sulfidførande svartskifer i service tunnel på Harpefoss kraftverk (16 år) hadde bare lokalt thaumasitt angrep og nokre utfellingar av natriumsulfat. Betongen var våtsprøyta og basert på Portland sement, truleg med flygeaske. Sulfatinnhaldet i lekkasjevattnet var her vesentleg lågare enn i alunskiferområda.
- Undersøkingar av gammal fiberfri sprøytebetong (ca. 25–35 år, tørrsprøyta) i eit nedlagt tilfluktsrom i alunskifer viste sulfatangrep i stort omfang (thaumasitt med noko sekundær ettringitt og gips), samt avskaling på grunn av alunskifersvelling.
- Sulfatangrepa i alunskifermiljø var *alltid nært knytta til utluting* av kalsium frå sementpasta (dekalsifisering) og utfelling av kalsiumkarbonat (kalsitt) i det indre av betongen (såkalla Popcornkalsitt også kalla PCD: ei destruktiv form for karbonatisering).
- Sulfatangrepet hadde prosentvis minst omfang i tykke sprøytebetongsjikt. Omfanget auka både med betongalder og sulfatinnhald i grunnvatnet.
- Svevka grå-kvit betong og laust materiale i den undersjøiske Freifjordtunnelen viste seg å vere nedbroten sprøytebetong (ikkje prelletap). Årsaka var thaumasitt sulfat angrep i kombinasjon med magnesium angrep (Mg erstattar Ca i sementlimet med utfelling av Mg(OH)<sub>2</sub>) og indre karbonatisering (Popcornkalsitt) knytta til utluting.

Prosjektet undersøkte også betongprismar som hadde vore eksponert over 20 til 30 år i den såkalla «Blindtarmen» på Wessels plass i Oslo. Desse historiske prøvene etter Alunskiferkomiteen (1947–1973), lagra hos Byggforsk sidan 1982, var ikkje tidlegare undersøkt petrografisk. Resultata frå tynnslipanalysen viste at:

- Det klassiske sulfatangrepet på betong i alunskifer i Oslo (Figur 2.2) var ikkje forårsaka av ettringitt og syreangrep (Bastiansen mfl. 1957),
- Årsaka var fullskala thaumasitt sulfat angrep (TSA) i kombinasjon med utluting, Popcorn kalsitt utfelling (PCD, = intern karbonatisering), med eller utan ytre påverknad frå svovelsyre (Hagelia og Sibbick 2009).



*Figur 2.2: Fullskala thaumasitt sulfatangrep. Venstre: Karakteristiske lyse soner («halo») av nedbroten betong omkring alunskifertilslag i gammel betong frå Oslo (Bastiansen mfl. 1957). Nyare undersøkingar har vist at dei velkjente alunskiferskadane var forårsaka av thaumasitt og ikkje ettringitt. Høgre: Lyse soner av thaumasitt omkring sulfidførande skifer i britisk betong (Department of the Environment, Transport and the Regions, 1999).*

#### 2.1.4 Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels (PhD)

Det blei i 2003 sett i gang eit doktorgradsstudium innan nedbrytingsmekanismar (bestilt av Vegdirektoratet), med utgangspunkt i undersøkingane i alunskifermiljø. Delar av samarbeidsprosjektet med BRE knytta til alunskifer gjekk inn som del av doktorgradsarbeidet. Arbeidet blei utført på deltid først og fremst under pågåande FoU-prosjekt: «Nedbrytingsmekanismar», 2003–2005 og «Tunnelutvikling: Dp 11 Nedbrytingsmekanismar i sprøytebetong», 2005–2007 (Statens vegvesen 2008). Arbeidet fokuserte på følgjande problemstillingar (Hagelia 2011b):

- Ferskvassmiljø
- Alunskifermiljø
- Undersjøisk miljø
- Tekniske aspekt

Ferskvassmiljø: Undersøkingar inklusive ferskvassoner i undersjøiske tunnelar viste god bestandigheit. Resultata var:

- Ytre karbonatisering i kontakt med atmosfærisk CO<sub>2</sub> var ikkje omfattande (2–5 mm) og hadde ikkje ført til stålfiberkorrosjon, bortsett frå svak effekt i sona med karbonatisering.



- Lokal utluting med utfelling av kalsitt blei observert (bl.a. stalaktittar), men kan ikkje reknast som problematisk i moderne sprøytebetong opp til ca. 20–25 år.
- Ved aukande grad av utluting ved gjennomstrømming av karbonatrikt vatn er det på lang sikt eit visst potensial for intern karbonatisering i form av Popcorn kalsitt utfelling (PCD). I motsetnad til atmosfærisk karbonatisering (ordinær karbonatisering) fører PCD til svekking av sementimet (Sibbick and Crammond 2003, Hagelia mfl. 2003).

Alunskifermiljø: Vidare undersøkingar viste at:

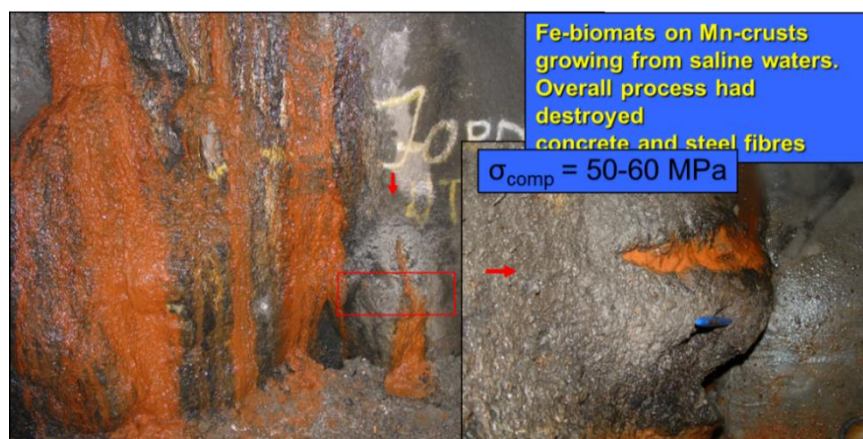
- Fullskala thaumasitt sulfatangrep (TSA) ved omdanning av sementpastaen er raskast ved omfattande *utluting* (dekalsifisering) av sementpastaen der det er utfelt Popcornkalsitt (PCD): Thaumasitt dannast mest effektivt ved reaksjon mellom utluta Ca-fattig sementpasta (stort sett silika-gel) med utfelt Popcornkalsitt og sulfation og medfører ikkje særleg ekspansjon.
- Thaumasitt danna ved direkte reaksjon mellom C-S-H og sulfat- og karbonatførande vatn går derimot svært sakte.
- Thaumasitt bryter ofte ned ved seinare intern karbonatisering, og frigjer då sulfation for vidare sulfatangrep.
- Utfelling av thaumasitt på mikroriss kan gje krystallisasjonstrykk/ekspansjon og føre til avskaling nær betongoverflata.
- Sulfat trenger inn via heftsona og er mest problematisk i tynne sprøytebetongsjikt.
- Sulfatet stammar ikkje bare frå oksidasjon av jernsulfid (svovelkis og magnetkis), men også løyselege sulfat (anhydritt mm.). Karbonatet i thaumasitt stammar frå kalsitt i alunskifer.
- Levetida til 10 cm tykke sprøytebetongsjikt med  $v/b = 0.45-0.50$  ser ut å vere omkring 30 år og neppe 50 år. Sprøytebetong påverka av svovelsyre vil ha kortare levetid.
- Sulfatangrep frå alunskifer vil ha mindre innverknad dersom ein unngår stor grad av utluting: sulfatresistent betong, god heft og tilstrekkeleg tykkelse motverkar problemet og forlenger levetida.

Undersjøisk miljø: Fire undersjøiske tunnelar (Flekkerøy, Freifjord, Byfjorden og Oslofjord) blei undersøkt med vekt på nedbrytingsmekanismer og interaksjon med vatn. I Oslofjorden var det brukt alkalifri akselerator, i dei andre var det brukt vannglas. Hovudresultata var:

- Ein ny type nedbryting blei undersøkt: nemleg bakterielt angrep kombinert med inntrenging av salt grunnvatn:
- Biofilm av mangan- (*Leptothrix*) og jernoksiderande bakteriar (*Gallionella* eller *Mariprofundus*) knytta til punktlekkasjar av salt grunnvatn gjennom betongen legger seg på overflata mot tunnelrommet. *Biofilmen fører til forsuring* av det lokale vatnet som dermed tærer på betongen og reduserer tverrsnittet.
- Salt grunnvatn verkar samtidig frå heftsona, der klorid, sulfat og magnesium trenger inn og fører til omdanning og svekking av sementlimet (utluting, magnesium angrep, thaumasitt sulfatangrep, intern karbonatisering og kloridinntrenging). Dette gjer betongen mindre motstandsdyktig mot syreangrep.

- Det undersjøiske angrepet går raskast der begge prosessane verkar samtidig, og det er i denne sammenhengen stålfiberkorrosjon blir mest omfattande. Betongsjikt på < 5–6 cm er lokalt fullstendig omvandla til thaumasitt og magnesiumfaser.
- Gips fellast ut på sprøytebetongoverflata i sein fase av angrepet, som eit laust vått belegg eller i blant som harde skorper. Gipsbelegget må fjernast der ein reparerer sprøytebetong for å unngå nytt sulfatangrep (utført ved oppgradering av Freifjordtunnelen i 2006–2007).
- Levetida til sprøytebetongen er bl.a. avhengig av tykkelse. Byfjordtunnelen (oftast > 10 cm) viste ikkje særlege teikn til nedbryting etter 14 år, medan dei andre tunnelane viste nedbryting (oftast < 10cm) etter 4–5 år. Det undersjøiske angrepet verkar svært raskt nokre plassar, ved at lokal tykkelse minkar opp til 10 mm/år (Figur 2.3). Andre stader er det praktisk talt ikkje skade. Det er stort behov for vidare oppfølging og forskning.

Det blei konstatert at stålfiber kan bidra til skadeleg bakterievekst. Dette støtta opp om tidlegare endring av Prosesskoden i 2007, der ein spesifiserte inert fiber for undersjøisk sprøytebetong. Argumentet for endringa i Prosesskoden var faren for destruktiv fiberkorrosjon på grunn av kloridinntrenging (Davik 1997b,f; Kompen 2008).

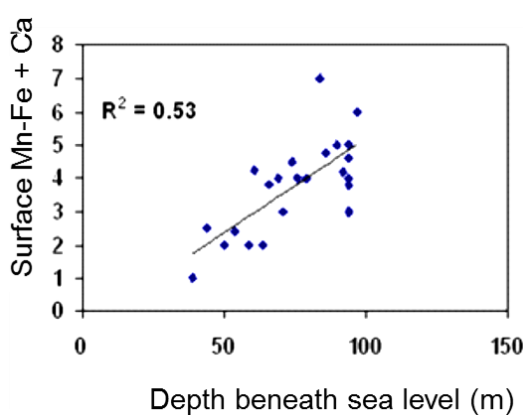


Figur 2.3: Biofilm av mangan og jernbakteriar i Oslofjordtunnelen. Merk at biofilm eter seg inn i overflata i betong som har høg trykkstyrke (Hagelia 2008a).

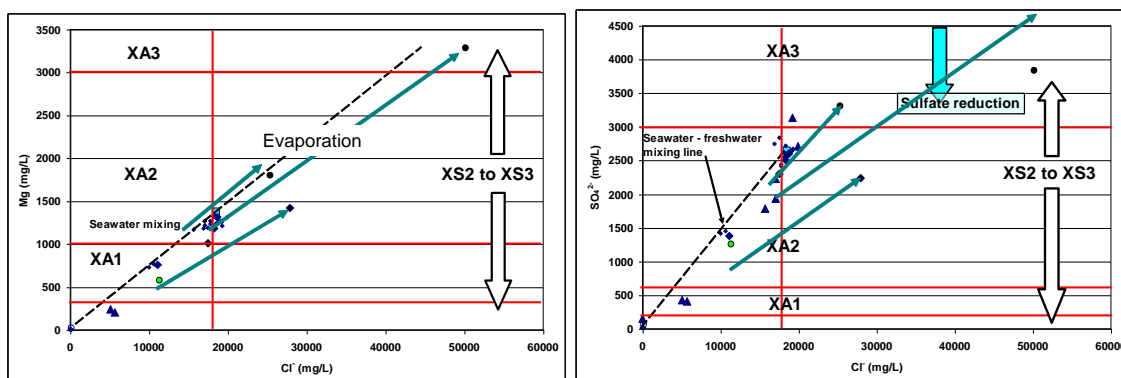
Tekniske aspekt: Følgjande konklusjonar er viktige med tanke på levetid:

- Nedbryting er for det meste eit lokalt fenomen som er klart knytta til fordelinga av aggressive tunnellekkasjar. Relativt tykk sprøytebetong var likevel ganske marginalt påverka i alunskifermiljø og undersjøisk miljø.
- Skadelege alkalireaksjonar blei ikkje observert, og må reknast som uviktig i sprøytebetong som er laga med silikastøv.
- Nedbrytinga er neppe påverka av type akselleter.
- Auka vasstrykk gir raskare nedbryting, dvs. hydrogeologiske forhold er viktige der vatnet er aggressivt mot betong (Figur 2.4)
- Undersøkingar i Svartdalsstunnelen viste at thaumasitt sulfatangrepet hadde stansa opp etter åtte år, fordi lekkasjeomfanget hadde minka (sjå nye data i Kapittel 4).

- Fordamping av tunnellekkasjar med lågt saltinnhald fører til at vatnet blir meir aggressivt (Figur 2.5), spesielt nær tunnelvifter. Dette er mest viktig i tunnelar utan Ekeberghvelv eller duk. Vifter bør ikkje plasserast rett ved brakk- og saltvasslekkasjar.
- Samanlikning av dei aktuelle sprøytebetongreseptane med Eksponeringsklasser etter NS-EN 206-1 kunne tyde på at sprøytebetongen i tunnelane *burde* vere motstandsdyktige mot rask nedbryting, og ha levetider opp mot 100 år. Men det syntte seg at *betongstandarden ikkje forutsa* den raske og delvis omfattande nedbrytinga i undersjøisk miljø og alunskifermiljø. *Betongstandarden dekker ikkje dei spesielle forholda som gjeld sprøytebetong brukt som bergsikring, og nemner ikkje effektar av biofilm, fordamping og vekslende hydrogeologiske forhold.*
- Ferskvassmiljøa representerer tilsynelatande ikkje spesielt store påkjenningar på sprøytebetong.



Figur 2.4: Hydrogeologiske forhold (vasstrykk) påverkar nedbrytinga av sprøytebetong eksponert for aggressivt grunnvatn. Eksempelet er frå Flekkerøytunnelen (Hagelia 2008b). Utfellingar av jern, mangan og kalsiumkarbonat på grunn av utlutning sprøytebetong etter 7 år er rangert av Røhrsveen og Lygre (1996). Kvart punkt representerer gjennomsnitt score pr. 50 løpemetere og aukar i takt med sjødjupet over tunnelen. Spredninga omkring linja reflekterer variasjonar i bergoverdekninga og oppsprekingsgrad (hydraulisk konduktivitet i bergmassen).



Figur 2.5: Fordamping i tunnelrommet fører til at lekkasjevatt blir meir aggressivt. Dette kan føre til at lite aggressivt vatn, f.eks. i Eksponeringsklasse XA1 blir meir aggressivt (XA2 til XA3). Klorid (Cl) i sjøvatt er på ca. 19000 mg/L. Nokre registrerte tunnellekkasjar er hypersaline, dvs. høgare saltinnhald enn sjøvatt (Hagelia 2008b).

### 2.1.5 Moderne vegtunnelar (2007–2011)

Ein del av prosjektet la vekt på bestandigheit av bergskringa. Følgjande blei utført med tanke på sprøytebetong:

- *Tre tunnelar.* Oslofjordtunnelen (10 år), Freifjordtunnelen (20 år) og Ringnestunnelen (landtunnel med ca. 15 år gammal sprøytebetong) blei undersøkt (Holm 2011a, b, c og d). Undersjøisk sprøytebetong *utan* biofilm viste ikkje alarmerande stålfiberkorrosjon. Det blei likevel registrert inntrenging av magnesium og sulfat og klorid i dei undersjøiske tunnelstrekningane, og tilrådd oppfølging. Ringnestunnelen viste kloridinntrenging frå tinesalt i tunnelrommet, med  $> 0,1\%$  klorid 10 mm inn i sprøytebetongen.
- *Oslofjorden testfelt* blei etablert i 2010 på ein stad der det var registrert sterk nedbryting på grunn av biofilm og salt grunnvatn. Det blei lagt opp til testing etter 5 års og 10 års eksponering. Tre felt/tre reseptar med sprøytebetong blei sprøyta på berg ( $v/b = 0,40$  og  $0,45$ , stålfiber og makro PP-fiber). Det blei vidare plassert ut prøver i grøftevatn med bakteriar med dei same tre reseptane. Kjemien til vatnet blir analysert omtrent kvart år, og viser endringar over tid. Etableringa av feltet med innleiande analysar er oppsummerte av Hagelia (2011a). Resultata etter 5 års eksponering blir rapportert i eigen rapport frå Varige konstruksjonar (Hagelia 2016a).

### 2.1.6 Kort oppsummering av nedbrytingsmekanismar observert i norsk sprøytebetong

Tabell 2.1 oppsummerer nedbrytingsmekanismane og miljøa dei er knytta til. I kapittel 4 & 5 ser vi på samanhengar mellom nedbryting og materiale eigenskapar (resept m.m.), grunnforhold og forhold i tunnelrommet.

*Stålfiberkorrosjon skjer ikkje dersom sementlimet opprettheld høg pH ( $\approx 12,5-13$ ), men starter opp etter nedbryting av sementlimet under følgjande forhold:*

- Karbonatisering som senker pH i porevatnet til 8–9 kan gi kraftig korrosjon.
- Gjennomgripande utluting av kalsium og samtidig tilførsel av karbonation frå grunnvatnet fører til at C–S–H blir omdanna til svak silikagel og samtidig utfelling av kalsiumkarbonat i form av såkalla Popkorn kalsitt (PCD). Denne forma for karbonatisering fører også til mekanisk svekking av sementlimet.
- Ved inntrenging av både klorid og oksygen.
- Ved påverknad/inntrenging av syre, der pH kan bli svært låg. Utfelling av gips er teikns på svovelsyreangrep.
- Ved inntrenging av magnesium og sulfat vil det kunne dannast sekundære mineral som kan føre til stålfiberkorrosjon. Magnesium vil heilt eller delvis kunne erstatte kalsium og dermed omdanne C–S–H til ikkje-sementerande magnesiumsilikathydrat (M–S–H) og tungt løyseleg magnesiumhydroksid (brucitt). pH i porevatnet reduserast til omkring 10–11. Thumasitt sulfatangrep (TSA) føregår som regel ved  $pH \geq 12$  og er ikkje aleine årsak til stålfiberkorrosjon, men bidrar likevel til korrosjon i kombinasjon med karbonatisering, kloridinntrenging og magnesiumangrep i undersjøisk miljø.

Tabell 2.1: Nedbrytingsmekanismer i norsk sprøytebetong (M45 og M40). Inntrenginga av aggressive vatn aukar i takt med vasstrykket. Skadelege alkalireaksjonar er ikkje observert, bare lokalt i form av uskadeleg gel i luftporer. Effekten av salt grunnvatn er kompleks og omfattar fleire mekanismar. S = stålfiber, P = polypropylen fiber. C-S-H = kalsium silikat hydrat.

Type nedbryting	Effekt på sementlim	Effekt på stålfiber	Miljø – eksponering
Karbonatisering i luft	Nedbryting av C-S-H ofte bare i overflata Svekking Permeabilitet minkar	S: Kraftig korrosjon, ± rustsprenging P: Ingen effekt	Atmosfærisk CO <sub>2</sub>
Intern karbonatisering: Popcornkalsitt (PCD) Knytta til utluting	Nedbryting av C-S-H Mister styrke Aukar permeabilitet	S: Kraftig korrosjon, ± rustsprenging P: Ingen effekt	Oppløyst HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> i gjennomstrøymande lekkasjevatn
Utluting	Ca lutast ut frå portlanditt og C-S-H. Mister styrke Aukar permeabilitet	S: Korrosjon som følgjeskade P: Ingen effekt	Oppløyst karbonsyre, i gjennomstrøymande lekkasjevatn
Kloridinntrenging	Som oftast liten	S: Kraftig korrosjon ± rustsprenging P: Ingen effekt	1) Undersjøisk miljø (brakkvatn-saltvatn) 2) Tinesalt
Thaumasitt sulfat-angrep (TSA)	Nedbryting av C-S-H Mister styrke Aukar permeabilitet Knytta til utluting	S: Korrosjon som følgjeskade P: Ingen effekt	1) Alunskifermiljø 2) Undersjøisk miljø
Syreangrep (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	Rask nedbryting Rask styrkereduksjon Raskt aukande perm.	S: Kraftig korrosjon P: Neppe effekt	1) Alunskifermiljø 2) Sulfid og sulfatførande gneis
Magnesium*	Mg erstattar C-S-H og fellast som brucitt Mister styrke Aukar permeabilitet	S: Kan gje korrosjon P: Ingen effekt	Undersjøisk miljø, særleg ved høge vasstrykk
Biofilm m/ Fe & Mn bakteriar**	Nedbryting av C-S-H og utfelling av Mn-Fe biomineral	S: Korrosjon P: Ikkje klarlagt	1) Undersjøisk miljø 2) Andre miljø ikkje klarlagt
Mekaniske laster (dynamiske etc.)	Dannar mikroriss Permeabilitet aukar	S: Korrosjon som følgjeskade P: ikkje klarlagt	1) Ustabil bergmasse i unge tunnelar 2) Undersikring
Frost	Makro- & mikroriss Observert i svært tynn sprøytebetong etter over 20 år, «umoderne» teknologi	S: Korrosjon som følgjeskade P: Ingen effekt	Fryse-tine sykklar Frostmengde

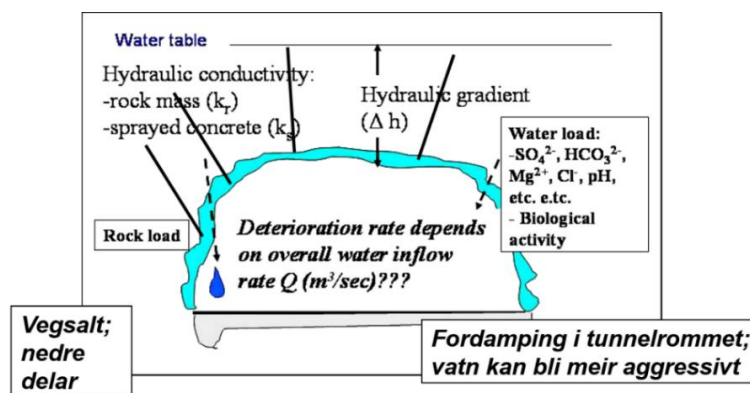
\*) Magnesium frå sjøvatn kan også felle ut på betongoverflater, men forseglar oftast mot vidare inntrenging.

\*\*) Effekten av biofilm varierer mykje, og det finst også ikkje-skadelege Fe og Mn bakteriar. Dette blir nå undersøkt av PhD student Sabina Karačić ved Chalmers i Gøteborg.

## 2.2 Forhold som påvirker nedbryting av sprøytebetong

Eksponeringsmiljøa for tunnelbetong er på fleire vis forskjellige frå det som påvirker brubetong. Sprøytebetong brukt som bergsikring i tunnelar er påverka av svært mange variablar (Figur 2.3). Desse er:

- Material eigenskapar og design (betongresept, styrke, E-modul, hefteegenskapar, ruheit, tykkelse)
- Eksponeringsmiljø:
  - Grunnforhold (hydrogeologi, bergmassestabilitet, mineralstabilitet, vasskjemi, biofilm)
  - Forhold i tunnelrommet (fuktnivå, fordamping, tinesalt, eksos)



Figur 2.6: Variablar som påvirker levetida til sprøytebetong i vegtunnelar (Hagelia 2008a).

### 2.2.1 Materialeigenskapar og design

Materialeigenskapane til sprøytebetong kan endre seg og bli svekka over tid dersom motstanden mot miljølastene er for dårleg. Høg motstand mot nedbrytande krefter er avhengig av at sprøytebetongen har:

- Tilstrekkeleg låg permeabilitet, tilpassa det kjemiske eksponeringsmiljøet
- Tilstrekkeleg høg fastheit og elastisitetmodul, tilpassa bergmassen for å unngå mekanisk opprissing
- Varig god heft mot berg
- Tilstrekkeleg tykkelse

Betongresepten, inklusive fiberdosering, styrer både permeabilitet (hydraulisk konduktivitet) og mekaniske eigenskapar (trykkstyrke, strekkstyrke, dynamisk E-modul). Lågt vatn/bindemiddel forhold (v/b-talet) gir høg motstand mot inntrenging av aggressivt vatn, så sant tilslagsgraderinga er normalt god. Relativt høg silikadosering (eller tilsvarande likeverdige pozzolanar) gir ein effektiv pozzolanreaksjon og meir C-S-H, som sikrar både høg endeleg styrke og låg permeabilitet. Det er viktig at silikastøvet er godt dispergert. Ved for høg akseleratordosering, ofte i samband med sprøyting mot lekkasjar, blir sprøytebetongen svekka. Dette problemet er kanskje størst ved bruk av vannglas. Alkalifrie akseleratorar

(aluminiumsulfat) gir i motsetning til vannglas mulegheit for å sprøyte opp tjukkare sjikt i ein omgang. I kapittel 4 og 5 ser vi nærmare på samanhengar mellom reseptar og tilstandsutvikling.

Fiberdosering og jamn fordeling av fiber er viktig med tanke på å oppnå ønska energiabsorpsjonskapasitet. I norske tunnelar opererer ein med to energiabsorpsjonsklassar (E700 og E1000) som blir bestemt etter bergmasseklassifisering ved Q-metoden (sjå Statens vegvesen 2015). Dersom E-modulen ikkje er tilpassa bergmassen vil sprøytebetongen bli påverka negativt av dynamiske laster. Dette er særleg viktig i ein tidleg fase medan sprøytebetongen fortsatt herder, og før berget «setter seg». Hoseini m. fl. (2009) har vist at tilsetning av mikrofiber gir redusert (lågare) permeabilitet, medan makrofiber ikkje gir nokon nemneverdig effekt. Effektar av varierende fiberdoseringar er undersøkt i Varige konstruksjonar av Myren og Bjøntegaard (2014). Det er elles utført fiber teljingar i samband med fleire av tilstandsundersøkingane i denne rapporten (kapittel 4 og 5).

God heft mot berg er viktig, både med tanke på motstand mot inntrengande vatn og god sikring mot nedfall. For å oppnå tidleg heft er det viktig å trykkspyle berget før sprøyting, så det blir reint for partiklar, belegg m.m. Når det gjeld alunskifer er det konstatert problem med denne framgangsmåten: Under bygging av Svartdalstunnelen og Ekebergstunnelen var det *nødvendig å tørke alunskiferen*. Det blei derfor “reinska” og tørka med trykkluft på 10 bar trykk for å oppnå heft (Ole Fromreide, samtale 2000).

Norsk Betongforening, Publikasjon nr 7, viser at heft, i tillegg til utførsle og resept, blant anna er avhengig av lekkasjar og bergartstype. Publikasjon 7 refererer til Hahn og Holmgren (1979) om innverknadar frå bergartstype på heftegenskapar. Men vi veit truleg for lite om dette stemmer i praksis. Heft mot berg er generelt styrt av komplekse samanhengar mellom bergartstype, forhold på bergoverflata (ruheit, mikrostruktur, overflatekjemi, vatn) samt resept og utførsle (Bryne mfl. 2014). Resultata i kapittel 4 kastar lys over samanhengar mellom observerte heftegenskapar og tilstandsutvikling/nedbryting i ulike eksponeringsmiljø.

Ruheit. Sprøytebetongoverflater er til forskjell frå konstruksjonsbetong svært røe. Overflatene trekker dermed til seg fukt, smuss og partiklar som kan gje gode vekstvilkår for mikrobar og biofilm. Problematikken er ikkje undersøkt særleg inngående i Varige konstruksjonar.

Tykkelse. Det er i fleire tidlegare undersøkingar peika på at nedbryting i sprøytebetong er raskast i relativt tynne sjikt. Undersøkingane i Varige konstruksjonar har lagt stor vekt på å avdekke samanhengar mellom nedbryting og tykkelse i ulike eksponeringsmiljø (kapittel 4 og 5).

## **2.2.2 Eksponeringsmiljø**

For å forstå bestandigheitsutviklinga i sprøytebetong er det nødvendig å undersøke og klassifisere grunnforholda på ein relevant måte.

### ***2.2.2.1 Hydrogeologi og vasstrykk***

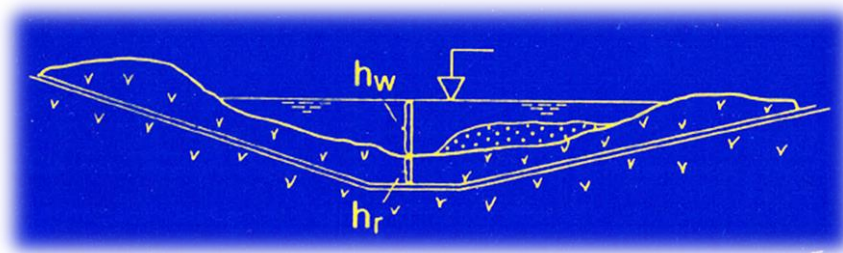
Undersøkingar har vist at mesteparten av tunnellekkasjane er knytta til steile sprekkar (60–90°). Lekkasjepotensialet følger hydrogeologiske lovar. I oppsprukke berg er lekkasjane

kanaliserte langs opne sprekkar og lekkasjevolumet på kvar enkelt sprekk aukar med 3dje potens av sprekkelopninga. I praksis er det alltid forholdsvis få opne sprekkar med store lekkasjar, og desse blir vanlegvis injiserte. Små lekkasjar med aggressivt vatn på overflata og heftsona er oftast meir skadelege for sprøytebetong enn store lekkasjar.

*Det er den arealmessige fordelinga av relativt små lekkasjar frå ikkje-injisert bergmasse som påverkar sprøytebetongen mest. Innverknaden på betongen er avhengig av bl.a. oppsprekkingsgraden i bergmassen.*

Slik bergmasse er karakterisert ved:

- Sprekker som enkeltvis gir lite lekkasjevolum (sprekkelopningar  $\ll 1$  mm)
- Jo høgare sprekkerefrekvens jo fleire spreidde drypplekkasjar, dvs.:



*Figur 2.7: Lengdeprofil av undersjøisk tunnel med bergoverdekning ( $h_r$ ) og sjødjup ( $h_w$ ). Prikka område er lausmasse (Hagelia 1994). Morene og marin leire verkar ofte tettande, medan glasifluviale avsetningar gjerne fører vatn.*

Parameteren  $J_w$  i Q-systemet (Sprekkevasstalet) vil som oftast vere lik 0.66 i bergmasse med lekkasjar som kan påverke sprøytebetongen negativt («Middels innsig, av og til utvasking av sprekketrylling, mange drypp/regn»).

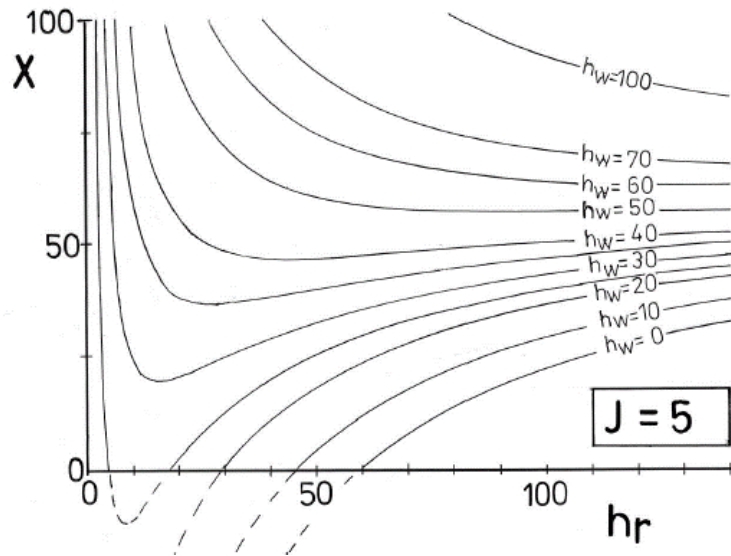
Undersøkingar har vist at tunnellekkasjar oftast følgjer *steile sprekkar med fall på 60–90°* (Selmer–Olsen 1981; Hagelia 1992, 1994). Med utgangspunkt i gjennomsnittleg antal steile sprekkar/ $m^2$  pr. 50 løpemeter (*sprekkeparameteren «J»*), og gjennomsnittleg drypplekkasje ( $X$  i % av tunnelarealet over 50 løpemeter) var det muleg å komme fram til ein empirisk relasjon som beskriver drypplekkasje ( $X$ ) som funksjon av tunneldjupet/potensielt vasstrykk ( $h = h_w + h_r$ ), bergoverdekning ( $h_r$ ), sjødjup ( $h_w$ ) og *hydraulisk konduktivitet uttrykt med den geologiske parameteren  $J$*  (Figur 2.7 og likninga under).

$$X \% = \frac{h - 30.2(h_r / J)^{0.27}}{0.07(h_r / J)}$$

Likninga er ei *førebels kalibrering* som bygger på Darcy's lov og empiriske data for  $J$  og  $X$  for kvar tiande løpemeter i Flekkerøytunnelen og Maursundtunnelen. Det er likevel svært tydeleg at lekkasjepotensialet er avhengig av forholdet mellom bergoverdekning og sjødjupet: Figur 2.8 viser kurver som er kalkulert frå likninga ved ulike sjødjup for ein realistisk situasjon der  $J = 5$  (i gj.sn. 5 steile sprekkar pr. kvadratmeter pr. 50 løpemeter). Diagrammet viser at, ved f.eks. bergoverdekning på 50 meter, så vil det vere lite omfang av drypplekkasje ( $X \approx 15\text{--}20\%$ ) på stader der sjødjupet er 20 meter ( $h = 70$  meter), medan drypplekkasjen er høg ( $X \approx 85\%$ )



%) der sjødjupet er 70 meter ( $h = 120$  meter). Ved høgare grad av oppsprekking vil lekkasjeomfanget vere høgare.



Figur 2.8: Arealet av drypplekkasjar ( $X$  i % av total tunnelareal) er avhengig av både berg-overdekninga ( $h_r$ ) og sjødjupet ( $h_w$ ), sjølv om sprekkfrekvensen  $J$  er konstant (Hagelia 1992).

Hydrogeologiske forhold verkar inn på nedbryting av sprøytebetong (sjå også Figur 2.4). Nedbrytinga er avhengig av at aggressivt vatn kjem i kontakt med betongen. *Ulike hydrogeologiske og hydrogeokjemiske forhold kan føre til ulik nedbrytingsgrad i ein og same sprøytebetongresept med same tykkelse. Det er sannsynleg at også heften mot berg blir påverka av hydrogeokjemiske forhold.* Årsaka er først og fremst knytta til varierende vasstrykk og hydraulisk konduktivitet i bergmassen. Det er konstatert at:

- Innlekkasjen av aggressivt saltvatn til undersjøiske delstrekningar minkar *i variabel grad med tida* på grunn av naturlege tetteprosessar (Davik 1997b, Hem m fl. 2003).
- Innlekkasje i svovelførande bergmasse gir varierende effektar av sulfat og syre.

Det er derfor nødvendig å undersøke nedbrytingsfarta i tunnelar ved fleire tidspunkt, blant anna i lys av lokale hydrogeologiske og kjemiske forhold (kapittel 3, 4 & 5).

### 2.2.2.2 Bergmasse og stabilitet.

Dynamiske laster på sprøytebetongen kan i prinsipp gje ein mykje høgare permeabilitet enn det masseforholdet tilseier. Hoseini et al. (2009) dokumenterte at eit moderat omfang av *dynamiske laster på betong kan føre til redusert permeabilitet, medan ytterlegare deformasjonar kan føre til mikro-opprissing som gir svært høg permeabilitet.* Sprøytebetongen kan dermed lettare bli utsett for nedbryting ved inntrenging av aggressivt lekkasjevatn på mikro-riss. Dette gjeld kanskje særleg under driving av tunnel etter at tidleg fastheit er oppnådd medan berget fortsatt «setter seg».

Det er venta at det på stader med undersikra bergmasse, med for tynn sprøytebetong eller for få bergboltar, vil vere eit større potensial for både mekanisk og kjemisk nedbryting av sprøytebetong enn elles. Effekten av ustabil bergmasse har vore vanskeleg å bestemme.

Årsaka til dette er at bergmassen i eldre norske tunnelar bare i liten grad er klassifisert i bergmekaniske termar (Q-metoden), og fordi konvergensmålingar skjeldan blir utført. Dette gjer det vanskeleg å finne ut om bergssikringa har vore tilstrekkeleg til å hindre tidleg mekanisk mikro-opprissing.

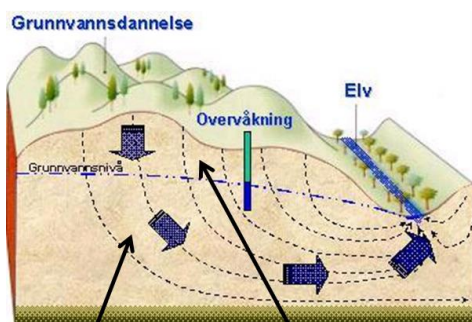
### ***2.2.2.3 Mineralstabilitet og syrepotensial***

Grunnvasskjemien er i nokre tilfelle sterkt påverka av bergmassen. Svovelførande bergmasse, som alunskifer og rusta sulfid- og sulfatførande gneis frigjer sulfat og ofte også svovelsyre til lekkasjevatnet. Aggressiviteten til lekkasjevatnet er avhengig av mineralogi samt tilgang på luft og oksiderande vatn. Svovelkis (pyritt;  $\text{FeS}_2$ ) og magnetkis (pyrrhotitt;  $\text{Fe}_{1-x}\text{S}$ ) er vanleg årsak til surt og sulfatrikt vatn. Også omdanna bergmasse med jernutfellingar og *spesielle sulfatmineral*, danna ved gammal djupforvitring, kan føre til svovelsurt vatn (eks. nokre lettlyselege variantar av mineralet *jarositt*). Dersom det er tilstrekkelege mengder kalsitt ( $\text{CaCO}_3$ ) i bergmassen vil dette motverke forsuring (pH-buffring ved frigjeving av karbonation), men dette hindrar ikkje auka sulfatkonsentrasjonar der det er tilgang på vatn og luft. Slikt vatn er rikt på sulfat og karbonat og kan føre til thaumasitt sulfatangrep sjølv ved  $\text{pH} = 6-7$ .

Alunskiferutvalet tilrådde at betong aldri bør stå i direkte kontakt med alunskifer. Vidare peika ein på at ***senking av grunnvatnet fører til oksidasjon av alunskiferen*** og dermed sterkt auka sulfat- og syrepotensiale (Bastiansen m fl. 1957, Moum og Rosenqvist 1959). Dette gjeld spesielt for alunskifer og sulfid- og sulfatførande gneis m.m. Oksiderande vatn er tilgjengeleg i:

- sigevassona over grunnvassnivået
- lekkasjar i kontakt med luft inni tunnelrommet

Oksidasjon av alunskifer, både i sigevassona og i alunskifer rett under sprøytebetongen, fører til utluting av aggressive ion frå bergmassen: Dette omfattar auka konsentrasjonar av sulfat, karbonat og svovelsyre (Eksponeringsklasse XSA) og fører til thaumasitt sulfatangrep, delvis i kombinasjon med intern karbonatisering (PCD) og syreangrep. *Når oksygenførande vatn trengjer inn på heftsona vil direkte oksidasjon av jernsulfid, eller ved direkte oppløysing av sulfat i berget føre til tap av heft og potensiale for avskaling.*



- Endringar i grunnvassnivået verkar inn på kjemien til vatn:
- Under grunnvassnivået er det ikkje særleg sulfidoksidasjon
- Tilgang på oksygen over grunnvatnet fører til oksidasjon av svovelkis og magnetkis: Dannar svovelsyre, samt aukar sulfatkonsentrasjonen.

pH < 2-4 (litt høgare m/kalkspat i skiferen)

pH ≈ 5-6 (ofte 7-8 m/kalkspat som buffer i skiferen)

Figur 2.9: Oksidasjon av sulfid gir aggressivt vatn. Sulfatkonsentrasjonen og syrepotensialet aukar vanlegvis ved senking av grunnvatnet i alunskifer og anna sulfid- og sulfatførande bergmasse, men er også avhengig av bufferkapasiteten.

#### 2.2.2.4 Vassmiljø og eksponeringsklassar

Betongstandarden (NS-EN 206) definerer eksponeringsklassar og knyttar desse opp mot nærmare bestemte betongreseptar som er tilpassa miljølastene (sjå Tabell NA.15 i standarden). Standarden lovar 100 års levetid dersom ein følger systemet. Sjølv om dette neppe alltid er tilfelle, spesielt for sprøytebetong brukt som bergsikring (sjå Kapittel 2.1.4), er det nødvendig å følgje standarden. Tabell 2.2 viser grenseverdiane for kjemisk angrep frå naturleg grunnvatn og jord. I det nasjonale tillegget er det innført ei eiga eksponeringsklasse, XSA, for betong utsett for sterkt kjemisk angrep som ikkje er dekt av dei andre eksponeringsklassane Denne blir nytta for eksponering i alunskifermiljø. Ikkje aggressive miljø klassifiserast som X0.

Innverknaden frå *parameterane i tabellen gjeld for nær statisk vatn* (det vil seie diffusjonskontrollert), og altså ikkje for rennande vatn eller vatn som pressast inn i betongen på grunn av vasstrykk. Britisk standard BS-EN 206 og praksis legg derimot vekt på *forskjellen på statisk vatn og rennande vatn*: For eksempel er statisk vatn med pH omkring 5,5 neppe skadeleg, medan pH = 5,5 i rennande vatn gir skader (BRE 2003).

Tabell 2.2: Grenseverdier for eksponeringsklassar for kjemisk angrep frå naturleg jord og grunnvatn ved 5 til 25 °C (NS-EN 206). Standarden definerer i tillegg ei eiga klasse XSA for særleg aggressivt miljø.

Kjemisk aggressiv	XA1	XA2	XA3
<i>Grunnvatn</i>			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/liter)	200 – 600	> 600 – 3000	> 3000 – 6000
pH	5,5 – 6,5	4,5 – 5,49	4,0 – 4,49
CO <sub>2</sub> (mg/liter aggressiv væske)	15 – 40	41 – 100	> 100
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/liter)	15 – 30	31 – 60	61 – 100
Mg <sup>2+</sup> (mg/liter)	300 – 1000	1001 – 3000	> 3000
<i>Jord</i>			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg) totalt *	2000 – 3000	3001** – 12000	12001 – 24000
Syretal (ml/kg)	> 200	Ikkje aktuelt	
*) Viss leire med permeabilitet < 10 <sup>-5</sup> m/s kan den settast i ei lågare klasse			
**) Grensa skal reduserast til 2000 mg/kg der det er fare for gjentatt tørking og oppfukting			
Generelt: Den største verdien bestemmer klasse. Ved to eller fleire aggressiv skal miljøet klassifiserast i påfølgande høgare klasse (eks. ved pH og sulfat i XA1, gir til saman XA2).			

Tabell 2.3 oppsummerer eksponeringsklassar knytta til fare for metallkorrosjon og frostskafer. *Det er verd å merke seg at dei normgivande eksempla i standarden ikkje omfattar sprøytebetong*, trass i at sprøytebetongstandardane (NS-EN 14487, NS-EN 14488 og NS-EN 14489) viser til NS-EN 206 når det gjeld klassifisering av eksponeringsmiljøet. Eksempela tyder på at ein har hatt brubetong og byggbetong i tanke, og i mindre grad undergrunnsbetong.

Eksponeringsklassane for karbonatisering (XC-klassane) gjeld for overflatekarbonatisering i kontakt med luft (CO<sub>2</sub>), *medan skadeleg indre karbonatisering (PCD) ikkje inngår i betongstandarden*. PCD opptre i neddykka betong der karbonatførande vatn trenger inn i betongen, vaskar ut Ca frå portlanditt og C-S-H i sementlimet. PCD svekker eller bryter ned sementlimet, og fører samtidig til stålfiberkorrosjon. Påverknad frå sjøvatn (XS-klassane) er *bestemt av kontakt med sjøvatn og er ikkje kopla mot faktiske kloridkonsentrasjonar*. Det er ikkje sett noko klart skilje mellom brakkvatn, vanleg sjøvatn eller hypersalint vatn, sjølv om ulike klorid-konsentrasjonar opplagt gir ulikt korrosjonsomfang.

Tunnelmiljøet er vanlegvis karakterisert av fleire miljøklasser. I følgje gjeldande NS-EN 206 skal ein i slike tilfelle bruke den strengaste mest aggressive miljøklassa.

Eksponeringsklassane i NS-EN 206 dekker likevel ikkje alle observerte miljøbelastningar i tunnelar. Følgjande miljø inngår ikkje i klassifisering etter standarden (Hagelia 2008b):

- Effektar av biofilm
- Effektar av fordamping
- Hydrogeologisk miljø

Tabell 2.3: Oversikt over eksponeringsklassar for metallkorrosjon på grunn av 1) karbonatisering, 2) klorid i sjøvatn og 3) andre kloridkjelder (i praksis tinesalt), samt 4) frost (NS-EN 206).

Klasse	Tilstand	Normgivande eksempel
<i>Korrosjon på grunn av karbonatisering</i>		
XC1	Tørt eller permanent vått	Betong inne i bygg med lite fukt Betong permanent neddykka i vatn
XC2	Vått, sjeldan tørt	Betongoverflater i kontakt med vatn over lenger tid. Fundament
XC3	Moderat fuktig	Betong inne i bygg med moderat høg luftfuktigheit Utvendig betong verna mot regn
XC4	Vekselvis vått og tørt	Betong i kontakt med vatn som ikkje er i klasse XC2
<i>Korrosjon i kontakt med sjøvatn</i>		
XS1	Utsett for klorid i luft utan direkte kontakt med sjøvatn	Konstruksjonar nær eller på kysten
XS2	Permanent neddykka betong	Delar av marine konstruksjonar
XS3	Tidevassoner, skvalpesoner, sprutsoner	Delar av marine konstruksjonar
<i>Korrosjon på grunn av tinesalt og anna klorid</i>		
XD1	Moderat fuktig	Betong utsett for klorid i luft
XD2	Vått, sjeldan tørt	Betong utsett for industrivatn med klorid, samt svømmebasseng
XD3	Vekselvis vått og tørt	Brudelar utsett for sprut med klorid. Vegdekker. Parkeringsanlegg i kontakt med klorid
<i>Frostpåkjenning</i>		
XF1	Moderat vassmetting utan avisingmiddel	Vertikale betongflater utsett for regn og frost
XF2	Moderat vassmetting med avisingmiddel	Vertikale betongflater i vegkonstruksjonar utsette for frost og og luftborne avisingmiddel
XF3	Høg vassmetting utan avisingmiddel	Horisontale betongoverflater utsett for regn og frost
XF4	Høg vassmetting med avisingmiddel eller sjøvatn	Veg- og brudekker utsett for avisingmiddel. Betongoverflater utsett for frost og direkte sprut som inneheld avisingmiddel. Skvalpesona i marine konstruksjonar utsett for frost.

### 2.2.3 Forhold i tunnelrommet

Innverknad av eksos og andre avgassar på sprøytebetong er ikkje spesielt undersøkt i Norge. Det er likevel dokumentert at *karbonatisering* hadde ein tendens til større omfang i hengen, ved at viftene truleg fører til uttørking og inntrenging av CO<sub>2</sub>. Uventilerte tunnelar hadde ein tendens til djupare karbonatisering i dei nedre delane av betongen. Dette tyder på ein effekt frå eksos (Fidjestøl 1994).

Tinesalt har størst innverknad i dei nedre delane av tunnelveggen, oftast 1–2 meter opp (Davik 1997a,f).

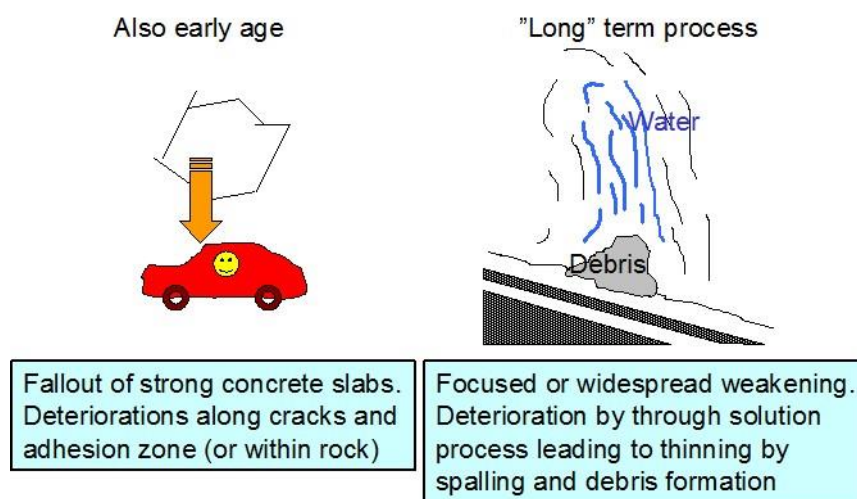
Effekten av fordamping av brakkvasslekkasjar i tunnelrommet er også viktig lokalt (sjå Figur 2.5). Lekkasjevatnet frå bergmassen kan bli vesentleg meir aggressivt enn naturleg bakgrunnsnivå i område med trekk og ventilasjon (Hagelia 2008b).

Det er også klart at *skadeleg biofilm* av jern- og manganførande bakteriar i undersjøiske tunnestrekningar har gode vekstvilkår på bergsikringa og installasjonar, både bak hvelv og i trafikkrommet. Erfaringa tilseier at biofilm først og fremst verkar *frå* tunnelrommet (sjå Hagelia, 2011b, med referansar).

I samband med undersøkingar av bestandigheitsutviklinga i sprøytebetong som bergsikring er det nødvendig å skilje mellom sprøytebetong som er direkte eksponert mot trafikkrommet og sprøytebetong bak hvelv (betongelement). Med utgangspunkt i tidlegare undersøkingar er det *sannsynleg* at:

- Sprøytebetong som er direkte eksponert mot trafikkrommet vil kunne få eit større omfang av overflatekarbonatisering, samt høgare grad av fordamping og oppkonsentrasjon av aggressive ion i tunnellekkasjar (sjå Figur 2.5), enn sprøytebetong bak hvelv.
- Vekst av skadeleg biofilm på sprøytebetong er kanskje mindre avhengig av lokalisering, men det er også muleg at høgare fuktnivå bak hvelv kan bidra til å gje betre vekstvilkår og dermed potensielt større skadeleg effekt på sprøytebetong.

Nedfall av sprøytebetong er ikkje vanleg. Figur 2.10 viser hovudformene for nedfall.



Figur 2.10: Nedfall av sprøytebetong kan skje på grunn av oppsprekking og svekka heft (venstre) eller ved svekking av betongen i samband med tunnellekkasjar (høgre) (Hagelia 2008b).

*When trying to draw conclusions on durability, this can only be made based on documented experience from a wide range of applications and regions, in other words by systematic data collection and comparison*  
ITA Working Group 12

### 3 Undersøkingssystem basert på kvalitetsdata

Hovudmålet for Varige konstruksjonar er å legge til rette for at materialar og produkt blir brukte på riktig måte i tunnelar og bruer. *Riktig bruk av namngjevne materialar og produkt i tunnelar krev at ein kjenner til bruksområda deira og unngår å bruke materiala og produkta i miljø dei ikkje er tilpassa.*

Strategi: Dette FoU-programmet har lagt vekt på å lokalisere og undersøke sprøytebetong på representative tunnelstrekningar der vi har best muleg datakvalitet. Vi har prioritert kvalitetsdata framfor kvantitet. Det er lagt stor vekt på å dokumentere bestandigheitsutviklinga over lengst muleg tid på stader der dei lokale miljølastene er best dokumenterte.

#### 3.1 ITA sitt system for undersøking av bestandigheit

International Tunneling and Underground Space Association (ITA) – *Working Group 12 Sprayed concrete* utvikla eit system for undersøkingar av bestandigheit (Franzén et al. 2001). Ein viste til at undersøkingar utført over fleire år er sjeldne. Working Group 12 konkluderte med at det er behov for å dokumentere mest muleg om fire «Bestandigheitsaspekt» («Durability aspects»):

- Komplette informasjon om eksponeringsforholda (Exposure situations)
- All nødvendig informasjon om sprøytebetongmaterialet, med tanke på å kvantifisere parametrar som motverkar nedbryting («motstandsparametrar», exposure resistance parameters)
- Eksponeringstid, og om nødvendig, skilje mellom lokale nedbrytingsprosessar
- Designbasis og forventa levetid samanlikna med spesifikasjonar og utførsle

ITA presiserte at *bestandigheit er eit relativt omgrep*, som er avhengig av:

- alder samanlikna med spesifisert levetid («specified service life expectancy»), og
- faktiske nedbrytingsprosessar som går føre seg.

Working Group 12 rår til at problematikken bør brytast ned i sine enkelte faktorar:

«When trying to draw conclusions on durability, this can only be made based on documented experience from a wide range of applications and regions – in other words, by systematic data collection and comparison».

*Undersøkingane av sprøytebetong er utførte i samsvar med ITA sine tilrådingar*

## 3.2 Metodikk i Varige konstruksjonar

### 3.2.1 Etablering av tidsseriar

I utgangspunktet var bare få tunnelar undersøkte i relevant detalj og på same stader over tid. Nokre tidlegare undersøkte lokalitetar viste seg dessverre også å vere utilgjengelege for vidare undersøkingar (bl.a. dekkja av brannsikra PE-skum). I Varige konstruksjonar har vi likevel fått etablert nokre tidsseriar som viser tilstandsutviklinga i sprøytebetongen.

### 3.2.2 Kriterier for val av tunnelar i aktiviteten Bestandigheit av sprøytebetong

Det er lagt til grunn følgjande kriterier for å komme fram til eit endeleg representativt utval av tunnelar med tanke på bestandigheitsutvikling i «*moderne sprøytebetong*»:

- Tunnelane må omfatte typisk variasjon i hydrogeologi, grunnvasskjemi og bergmasseforhold.
- Det må ligge føre eller vere muleg å skaffe fram god dokumentasjon av reseptar, geologi/bergmasse, vassmiljø m.m.
- «*Moderne sprøytebetong*» er i Varige konstruksjonar definert som betong laga etter 1983. På dette tidspunktet var våtsprøytemetoden vel etablert, og ein hadde oppnådd mykje erfaring med sprøyting av store volum av stålfiberarmert sprøytebetong
- Sprøytebetong laga etter *forelda teknologi* kan gi innsikt i nedbrytingsreaksjonar, men er *ikkje relevant* med tanke på vurderingar av *restlevetid* for «*moderne sprøytebetong*»
- Alderen til sprøytebetongen må variere og spenne over lengst muleg tid, i praksis har vi nå data over omkring 30 år.
- Nedbrytingsmekanismane må vere representative og relevante med tanke på potensiell reduksjon av bæreevne (jamfør Tabell 2.1).
- Utvalet må dekke breidda av materiale eigenskapar (reseptar, tykkelse m.m.) som er i vanleg bruk i «*moderne sprøytebetong*».
- Samanstillinga og samanlikninga må sjå dei nye undersøkingane innan Varige konstruksjonar (Mannvits arbeid og nokre andre) i lys av tidlegare undersøkingar.

### 3.2.3 Nedbryting av sprøytebetong vurdert i lys av prøvetaking i varierende hydrogeologiske forhold, eksponeringsforhold og betongreseptar

#### 3.2.3.1 Utval av tunnellokalitetar for detaljerte undersøkingar

Det blei lagt vekt på å finne fram til tunnellokalitetar som til saman gir innsikt i tilstandsutviklinga i sprøytebetong som funksjon av *dei mest typiske variasjonane* (sjå kapittel 2.2, kapittel 4), dvs.:

- Effektar av materiale eigenskapar, inklusive variasjonar i sprøytebetongtykkelse og heftforhold
- Effektar av eksponeringsmiljø ved varierende grunnforhold i vid forstand, og ulike eksponeringsforhold i tunnelrommet

Vi har i prosjektet blant anna samanlikna tørre/relativt upåverka sprøytebetong og våt/påverka sprøytebetong innan enkelte lokalitetar.



Laboratorieanalysane omfattar:

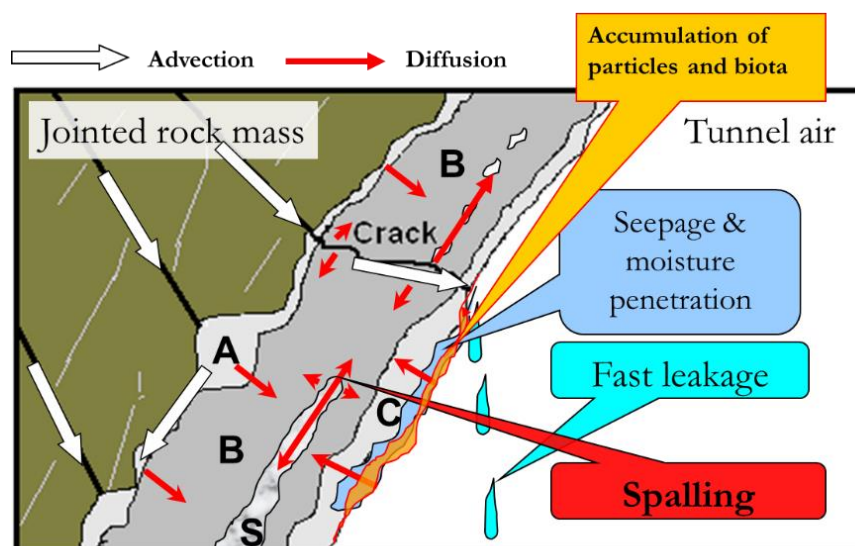
- Standard betongtestar (trykkstyrke, fiberinnhald, PF, karbonatisering, klorid-inntrenging)
- Strukturanalyse med vekt på mikroskopi av tynnslip i polarisasjonsmikroskop og scanning elektronmikroskop (SEM)
- Mineralidentifikasjon ved røntgendiffraksjon (XRD), på småprøver av svakt materiale, utfellingar og biofilm
- Kjemisk analyse av lekkasjevatn (bare parameterar gitt i NS-EN 206 rapporterst her)

### 3.2.3.2 Vekt på sprøytebetong med normalt god utførsle

Vi har forsøkt å unngå sprøytebetong som kan vere utført på feil måte. For å oppnå dette blei det lagt vekt på:

- Å unngå prøveuttak av opphavlege tynne sjikt (< 3–5 cm) mot kanten av sprøytebetongfelt
- Vurdering av lokalitetane for å avdekke muleg dårleg utførsle, også i lys av tilgjengelege rapportar

Det vanlege inntrykket frå sluttrapportar og tilstandsrapportar er at betongarbeida er utførte med tilfredsstillande kvalitet. Sprøytebetongen som er undersøkt i Varige konstruksjonar er rekna for å ha hatt riktig tilsikta kvalitet i utgangspunktet, og representerer såleis «moderne sprøytebetong utført på normal måte».



Figur 3.1: Materialeigenskapane i sprøytebetong kan svekkast i kontakt med aggressivt lekkasjevatn. Vatn renner inn langs sprekkar i berget og trenger inn der heften er middels til dårleg (kvite piler) og trenger inn i betongen ved diffusjon (raude piler). Partiklar eller biofilm akkumulerer på den ru overflata mot tunnelrommet (Hagelia 2008a).

### **3.2.3.3 Strukturanalyse med tynnslip av sprøytebetong og heftsoner**

Det er tidlegare stadfesta at nedbrytinga av sprøytebetong i prinsipp føregår *både* frå heftsona mot berg *og* frå tunnelsida (Figur 3.1). Omfanget er avhengig av kor det aggressive vatnet slepp til, dvs. i nokre tilfelle er nedbrytinga størst i sjiktet mot heftsona (Sone A) og i andre tilfelle mest frå tunnelsida (Sone C), men også frå begge sider (Hagelia mfl. 2001, Hagelia 2008a, Romer 2003).

Avskaling er observert:

- a) Langs heftsona (mot berg eller i A),
- b) Langs interne sjikt med nedbryting (S)
- c) I yttersjiktet (C)

Alle nedbrytingsformer går på bekostning av intakt betong (Sone B) som blir tynnare. Dette fører til at sprøytebetongen blir svekka. I undersjøiske tunnelar er det fleire eksempel på at sprøytebetong i kontakt med skadeleg biofilm dannar eit yttersjikt i Sone C av sterkt svekka betong som kan skrapast vekk og til dels blir *pulverisert* og faller av. Overflatekarbonatisering (OC) inngår i Sone C, men det har vore hensiktsmessig å skilje mellom OC og djupare nedbryting frå overflata i Sone C av den grunn at dette reflekterer ulike mekanismar.

Dårleg heft gir i prinsipp lettare tilgang for vatn over ei større flate (A) og kan derfor potensielt gje større omfang av nedbryting også innover i sprøytebetongsjiktet i aggressivt miljø. Samanhengar mellom heftforhold og totalt nedbrytingsomfang er hittil lite utforska.

Svekking av betongen fører m.a.o. til at det bærande tverrsnittet minkar. Når for eksempel Q-verdiar i bergmassen krev 10 cm tykk sprøytebetong, vil *nedbrytinga over tid kunne føre til at det bærande tverrsnittet etter kvart blir tynnare enn designkriteriet.* Vi har i denne samanhengen fokusert spesielt på følgjande forhold:

- Nedbryting som har ført til, eller på sikt kan føre til, omfattande stålfiberkorrosjon
- Nedbryting som har ført til, eller på sikt kan føre til, avskaling eller anna tap av det bærande betongtverrsnittet.
- Dokumentasjon/diagnostisering av dei nedbrytingsmekanismane og forholda som fører til nedbryting.
- Undersøking av samanhengar mellom sprøytebetongtykkelse, heftforhold og nedbrytingsomfang over tid.

*Ved uttak av kjerneprøver har ein lagt vekt på å få med heile tverrsnitt av sprøytebetongen, inklusive heftsona med litt av berget bakom*

### **3.2.3.4 Betongreseptar**

Vi har undersøkt sprøytebetong laga med variasjonar mht:

- Fiberinnhald
- Silikainnhald og andre pozzolanar
- Akselerator (vannglas og alkalifri)

- Masseforhold
- Sementmengde
- Tilslag, avgrensa til muleg førekomst av skadelege bestandelar

*From the moment concrete is sprayed onto the leaking joints, a contact between the water phase in the concrete and the leakage water in the surrounding rock is established*  
Arne W. Grønhaug, 1996

## 4 Resultat

Dette kapittelet omfattar resultat frå både tidlegare undersøkingar og undersøkingar utført i Varige konstruksjonar. Resultata deler seg i to hovuddelar:

- Oppfølging av spesielle pelnummer/problemstillingar tilrådd i «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar»
- Detaljundersøkingar basert på kvalitetsdata frå nye undersøkingar innan Varige konstruksjonar og tidlegare prosjekt

Regionkontora fekk spørsmål frå Varige konstruksjonar om erfaringar med tilstandsutviklinga for sprøytebetong i tunnelar som tidlegare var undersøkte i «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar» (1995–1997), men etatsprogrammet fekk svært liten respons.

Gjennomgang av tilgjengeleg dokumentasjon innan Varige konstruksjonar viste likevel at mange tunnelokalitetar med sprøytebetong er rimeleg godt dokumenterte over tid. Dette gav oss grunnlag for å etablere eit utval av tunnelar som viser viktige drag av tilstandsutviklinga til sprøytebetong, også med tanke på implementering i retningslinjer og normalar.

### 4.1 Oppfølging av pelnummer etter «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar»

Prosjektet «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar» (1996–1997) tilrådde oppfølging av nedbrytingsfenomen på nokre få namngjevne lokalitetar i fem undersjøiske tunnelar (Davik 1997b). Det var registrert enkelte stader med merkbar nedbryting av sprøytebetongar, som den gong var frå 3 til 8 år gamle. Seinare handtering av problematikken, med status og konklusjonar, er oppsummerte i Tabell 4.1.

Ingen av dei andre undersjøiske tunnelane som blei undersøkte i «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar» viste nemneverdige teikn på nedbryting av sprøytebetong (alder 5 til 10 år), med unntak av den då omkring 15 år gamle Vardøtunnelen, der sprøytebetongen bare var meint som arbeidssikring (C25).

Undersøkingane i Varige konstruksjonar blei avgrensa til *Flekkerøytunnelen*, av *praktiske og økonomiske omsyn*. Flekkerøytunnelen er godt undersøkt med omsyn til: a) tidleg tilstand ved tunnelkartlegging (Kveen og Pedersen, 1990), b) samanhengen mellom innlekkasje, oppsprekking og hydrogeologi (Hagelia 1992, 1994), c) nedbrytingsmekanismar (Hagelia 2008a, 2011) og d) var elles lett tilgjengeleg for Mannvit AS som måtte skipe inn utstyr via hamn. Dette gjorde det muleg å utføre undersøkingar i Baneheiatunnelen på same turen.

*Kvalsundtunnelen* blei ikkje vald, fordi det aktuelle området var blitt utilgjengeleg for undersøkingar alt i 1996. Elles konkluderte «Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler» med at biologisk materiale (feilaktig referert til som «algar») neppe var skadeleg i seg sjølv. Undersøkingar av Hansen (1996) i Flekkerøytunnelen gav likevel tydelege indikasjonar på nedbryting i samband med biofilm. Dette blei seinare bekrefta i PhD-studie (Hagelia 2011). *Maurusundtunnelen og Godøytunnelen* blei utelatne i Varige konstruksjonar, på grunn av for lang avstand og nødvendige prioritering innan budsjettamma. Fotodokumentasjonen frå «Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler» (Lygre og Røhrsveen, 1996) viser at det i Maurusundet er snakk om lokal nedbryting under biofilm tilsvarande det ein har registrert i Oslofjordtunnelen, Flekkerøytunnelen og Freifjordtunnelen. Lokaliteten i Godøytunnelen var prega av avskaling og utluting. *Freifjordtunnelen* er tidlegare følgd opp på dei nemnte lokalitetane, og årsakene til nedbrytinga blei klarlagde i samarbeid med BRE (Hagelia mfl. 2003, Hagelia 2011). Sprøytebetong i Freifjordtunnelen blei også undersøkt i samband med «Moderne vegtunneler» (Holm, 2009a), og tunnelen var oppgradert med ny sprøytebetong før Varige konstruksjonar starta opp.

Alle undersøkingane i Freifjordtunnelen og Flekkerøytunnelen er tatt med vidare i grunnlaget for tilstandsutvikling i Kapittel 4.2.

Tabell 4.1: Oversikt over lokalitetar og problematikk konstateret i «Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler», med behov for oppfølging (Davik 1997b) og seinare handtering.

Tunnel Betongalder undersøkt	Oppfølging, Pelnummer	Problematikk peika på i «Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler»	Handtering etter «Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler»	Konklusjon i Varige konstruksjonar
Kvalsundtunnelen 3 år (Skjølsvold & Jensen) 7 år (Broch & Aarset (1994)	Pelnr: 2751 3089, 3379	Teikn på nedbryting frå 1990 til 1994, <i>Betong ofte &lt; 5cm.</i> Muleg aukande innlekkasje	Ikkje utført. p.g.a. <i>blei tildekt med brannsikra PE-skum før 1996</i>	Bør følgje opp utviklinga i systematisk vedlikehald
Flekkerøytunnelen  8 år (B. O. Hansen 1996)  13 år, 15 år (PhD),  26 år (VK)	Ikkje oppsett	Gjennomgripande <i>nedbryting/tap av heft under biofilm.</i> Våt. pH = 6.5	<u>PhD program</u> Pel 1310–1380m/ mikroskopi, XRD m.m. (Hagelia 2011a,b). <u>Varige</u> <u>konstruksjonar.</u> Betonganalysar pel 885 og 1380 (Mannvit 2015f)	Skadeleg Mn- Fe biofilm med nedbryting av stålfiber og pasta, Mg, TSA, karbonatisering. Lokalt tap av tverrsnitt. Bør følgje opp i systematisk vedlikehald
Freifjordtunnelen  5 år (Lygre & Røhrsveen 1996)  9 år, 13 år, 16 år (PhD/BRE)	4050, 5260, 5700, 5950, 6080, 6180,6420, 6660	Oppsmuldra ofte lys betong. <i>Muleg prelletap som må verifiserast</i>	<u>BRE &amp; PhD program</u> Fleire pel nr undersøkt: Mikroskopi/XRD viser kjemisk omvandling/ikkje	Thaumasitt, magnesium og karbonatisering. Utfelling av gips på overflata. Stålfiber- korrosjon.

Tunnel Betongalder undersøkt	Oppfølging, Pelnummer	Problematikk peika på i «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar»	Handtering etter «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar»	Konklusjon i Varige konstruksjonar
19 år (Moderne vegtunnelar)			prelletap. (Hagelia 2003, 2011a): <i>Moderne vegtunnelar</i> : Betonganalysar pel 3790, 5310, 5450 (Holm 2009a)	Lokalt tap av tverrsnitt. Rehabilitert i 2009. Bør følgje opp i systematisk vedlikehald.
Maurstundtunnelen 5 år (Lygre & Røhrsveen 1996)	3280	<i>Biofilm</i> kombinert med teikn på nedbryting	Ikkje utført. Foto viser Mn-Fe biofilm: dvs. Tilsvarende andre under sjø	Bør følgje opp utviklinga i systematisk vedlikehald
Godøytunnelen 8 år (Lygre & Røhrsveen 1996)	2720	Våt betong med avskaling, utluting oppumuldring. Høg sugporøsitet.	Ikkje utført. Foto viser same avskaling/oppløysing. Tilsv. andre under sjø	Bør følgje opp utviklinga i systematisk vedlikehald

## 4.2 Detaljundersøkingar på utvalde profilnummer

Dette delkapittelet gir ei oppsummering av resultatane frå kvart undersøkt objekt, med samanstilling av analysedata i tabellar og diagram for kvar hovudgruppe. Tunnelane er delte inn i fire hovudgrupper, inklusive eksponering overfor vatn og trafikkrom (Tabell 4.2):

- Ferskvassmiljø – landtunnelar og landstrekningar i undersjøiske tunnelar
- Svakt svovelsurt miljø – landtunnel
- Alunskifermiljø – landtunnelar og vegskjering
- Saltvassmiljø – undersjøiske tunnelstrekningar

Tabell 4.2: Oversikt over tunnelar/objekt som representerer «dimensjonerande grunnlag» for vurderinga av tilstandsutvikling i sprøytebetong brukt som bergsikring.

\*) Landstrekningar i undersjøiske tunnelar; \*\*) Vegskjering. Objektene er grupperte etter type vassmiljø. **Beige** = ikkje direkte eksponert for trafikk (bak hvelv m.m.). **Blå** = eksponert for trafikk/eksos m.m. **Grå** = Objekt som er undersøkt fleire gongar («monitor»). **Undersøkt år/omgang:** Understreka = tunnelinspeksjon/kartlegging med standard betonganalyse og strukturanalyse/diagnose. **Utheva** = tunnelinspeksjon, strukturanalyse/diagnose ± trykkstyrke (t); Kursiv; tunnelinspeksjonar/kartlegging og standard betonganalyse utan strukturanalyse. Årstal elles: Inspeksjonar m.m. ± kartlegging (k).

Tunnel (objekt) Betong-år/ Opningsår	Betongalder – undersøkt – i 2015	Lengde (m) Antal løp	ÅDT pr. løp 2012–2014	Trafikk/Tunnelklasse Landsdel Klima	Undersøkt år/omfang
<b>Ferskvassmiljø</b>					
Grua 1991 1992	<u>23</u> 24	1390 2	3550	Middels trafikk/ C Austlandet. Innlandsklima	<u>2014</u>
Baneheia 2000 2001	<u>14</u> 15	785 2	23200	Svært høg trafikk/ E Sørlandet Kystnært klima	<u>2014</u>
Nesttun 2000–2001 2002	<u>13</u> 14	670 1	19792	Svært høg trafikk/ E Vestlandet Kystnært klima	<u>2014</u>
Hop 2000–2001/ 2002	<u>13</u> 14	760 1	19792	Svært høg trafikk/ E Vestlandet Kystnært klima	<u>2014</u>
Flekkerøya * 1988 1989	8, 15 & 26 27	2327 1	4366	Middels trafikk/ C Sørlandet Kystnært klima	1989k, 1991k, 1996, 2003, 2014
Freifjord * 1990–1991 1992	5, 9, 12 & 15 24	5086 1	2800	Middels trafikk/ B Nordvestlandet Kystnært klima	1996, 2000 2003, 2006
Byfjord * 1991 1992	5 & 13t 224	5875 1	9662	Høg trafikk/ D Sørvestlandet Kystnært klima	1996, 2004t
Oslofjord * 1999 2000	<u>10</u> 16	7252 1	7500	Høg trafikk/ C Søraustlandet Kystnært klima	2004k, 2009, 2014
Sløverfjord* 1996 1997	<u>18</u> 19	3337 1	840	Svært låg trafikk/A Nordnorge Kystnært klima	<u>2014</u>
<b>Svakt svovelsurt miljø</b>					
Harpefoss 1984 1965	13 & 16 31	≈ 150 Servicetunnel Kraftstasjon	«0»	Ingen trafikk Austlandet Innlandsklima	1997, 2000
<b>Alunskifermiljø</b>					
Åkebergveien (1970)1987	13 & 27	150	7250	Middels trafikk Oslo by	

Tunnel (objekt) Betong-år/ Opningsår	Betongalder – undersøkt – i 2015	Lengde (m) Antal løp	ÅDT pr. løp 2012–2014	Trafikk/Tunnelklasse Landsdel Klima	Undersøkt år/omfang
1850–1900	28	<b>Vegskjering/ gate</b>		Kystnært klima	2000, 2006, 2014
Ekeberg 1992 1995	<b>8 &amp; <u>22</u></b> 23	1583 2	67000	Svært høg trafikk/ F Oslo by Kystnært klima	2000, <u>2014</u>
Svartdal 1998–1999 2000	<b>2, 8 &amp; <u>16</u></b> 17	1391 2	28644	Svært høg trafikk/ E Oslo by Kystnært klima	2000, 2006, <u>2014</u>
<b>Undersjøisk miljø</b>					
Flekkerøya 1988 1989	<b>8, 14, 15, <u>26</u></b> 27	2327 1	4367	Middels trafikk/ C Sørlandet Kystnært klima	1989k, 1991k, 1996, 2002, 2003, <u>2014</u>
Byfjord 1991 1992	<b>5 &amp; 13t</b> 24	5875 1	9662	Høg trafikk/ D Sørvestlandet Kystnært klima	1996, 2004t
Freifjord 1991 1992	<b>5, 9, 12, 15,</b> <u>18</u> 24	5086 1	2800	Middels trafikk/ B Nordvestlandet Kystnært klima	1996, 2000, 2003t, 2006, <u>2009</u>
Sløverfjord 1996 1997	<u>18</u> 19	3337 1	840	Svært låg trafikk/ A Lofoten Kystnært klima	<u>2014</u>
Frøya 1999 2001	<u>15</u> 1	5305 1	1300	Middels trafikk/ B Nordvestlandet Kystnært klima	<u>2014</u>
Oslofjord 1999 2000	<b>5t, 6, 7, <u>10,</u></b> <u>16</u> 16	7252 1	7500	Høg trafikk/ C Søraustlandet Kystnært klima	2004k, 2004t, 2005, 2006, <u>2009, 2015</u>

Datagrunnlaget er henta frå 13 ulike vegtunnelar og ei vegskjering og omfattar erfaring opp mot 25–30 år. Betongalderen er oppgitt i heile år (pr. 2014) og er rekna som eitt år før opningsåret i tilfelle der vi ikkje har funne heilt sikker dokumentasjon. Utvalet er rekna som representativt for norske tunnelar, og omfattar typiske variasjonar med tanke på grunnforhold (hydrogeologi, berg), eksponering mot trafikkrommet, vassmiljø, sprøytebetongreseptar, tykkelse og potensielle nedbrytingsmekanismer. Omfanget og type av undersøkingar varierer noko frå tunnel til tunnel og år for år.

Det blei lagt vekt på a) å følgje opp tidlegare undersøkingar, b) at dei nye undersøkingane innan Varige konstruksjonar også fylte hittil udekte problemstillingar, og c) at lokalitetane kan brukast vidare i framtidige tilstandsundersøkingar. Undersøkingar omfattar:



- Tunnelinspeksjonar/geologi inklusive innsamling og kjemisk analyse av lekkasjevatt
- Standard betongundersøkingar (trykkstyrke, PF, kloridinntrenging, karbonatisering m.m.)
- Identifisering av nedbrytingsmekanismar og omfang (strukturanalyse, betong-petrografi, Scanning elektron-mikroskopi, røntgendiffraksjon).

### 4.3 Ferskvassmiljø – Eksponeringsklassane XC2–XC4, XD1–XD3, X0

Kategorien er representert ved undersøkingar i ferskvassmiljø i ni tunnelar. Detaljundersøkingane er avgrensa til 1–2 lokalitetar i kvar tunnel. «Allmenntilstand» vurdert ved inspeksjonar. Tabell 4.3 gir oversikt over tilstand i ferskvasssoner. Materialsamansetninga til sprøytebetongen er oppsummert i Tabell 4.4. Utfyllande dokumentasjon er gitt i Vedlegg 1.

Effektar av frost er ikkje vurdert. Det er ofte høg frostinntrenging i norske tunnelar. Tidlegare undersøkingar har vist at frost neppe er eit problem for sprøytebetong (Davik 1997c, 1998).

#### Nedbrytingsmekanismar i ferskvassmiljø: *Overflatekarbonatisering og tinesalt*

Eksponeringsklassar (NS EN 206):

- Korrosjon på grunn av karbonatisering = XC2–XC4.
- Korrosjon på grunn av tinesalt = XD1–XD3.
- Kjemisk angrep grunnvatt = X0.

Eksponeringsklasse X0 er dokumentert ved kjemiske analysar summert i Tabell 4.5, som også gir oversikt over variasjonsområdet for korrosjonsklassane mellom og innan enkeltlokalitetar i kvar tunnel. Alle vassprøvene er samla frå lekkasjevatt direkte frå berg eller gjennom sprekker i sprøytebetong, og prøvelokalitetane var i fleire tilfelle ikkje på same stadane der det blei bora ut betong. Alle vassprøvene var filtrerte (0,45 µm) før analyse.

Eksponeringsklassane for korrosjon (sjå Tabell 2.3 og Tabell 4.5) er vurdert ut frå standardens verbale tekst. I tidlegare arbeid blei det vurdert at belastning mht karbonatisering og kontakt med vatt i *gjennomsnitt* passa med kategorien «Vått, sjelden tørt», dvs. XC2 (Hagelia 2008a,b). Standarden seier likevel at, dersom det er lokale variasjonar, skal ein velje den mest aggressive observerte klassa for heile konstruksjonen, som i dette tilfelle er XC4 («Vekslevis vått og tørt»). Fjose (2015) har likevel vurdert at sprøytebetong bak hvelv ligg i klasse XC3 («Moderat fuktig»).

Med utgangspunkt i dokumenterte eksempel på auka karbonatisering ved eksponering mot eksos i tunnelrommet (Fidjestøl 1994, Davik 1997f) verkar det fornuftig å bruke ei mindre aggressiv klasse for sprøytebetong bak hvelv, sjølv om betongstandarden ikkje omtalar effekt av høg CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i luft. Fleire av tunnelane er derfor plassert mellom XC2 og XC4.

I ferskvassmiljø er effektar av tinesalt relevant, og det er god grunn til å rekne med at nedre delar av eksponert sprøytebetong har høgste belastning. Vi vurderer derfor at den reelle

*kloridbelastninga frå tinesalt* varierer frå XD3 (nær vegbane) til XD1 (vederlag og heng). Formelt klassifiserer vi likevel heile konstruksjonen i XD3.

*Ein konsekvens av å bruke den mest aggressive observerte klassa for «heile konstruksjonen» er at observert effekt av nedbrytingsmekanismer vil kunne bli undervurdert i forhold til klasse: Det er fullt muleg at observert grad av nedbryting lokalt kan vere «høg» også ved miljøbelastningar som reelt sett er lågare enn «mest aggressive observerte klasse».*

Tabell 4.3: Oversikt over vurdert tilstand til sprøytebetong i ferskvassmiljø, inklusive landstrekningar i undersjøiske tunnelar (\*) til og med siste undersøking. Undersøkingane bygger på tunnelinspeksjonar, utboring frå oppgitte pelnummer, standard betonganalyser (karbonatisering, trykkstyrke og tynnslipanalyse). Mikrosprekkar (stort sett svinnriss) i bindemiddelet varierer: mange (3), middels (2) & få til ingen (1).

Tunnel Pel nr	«Allmenntilstand» Etter år (inkl. strukturanalyse)	Tilstand – bindemiddel – mikroriss	Tilstand – stålfiber	Tilstand – heft	Ref. til siste undersøkingar
Grua 650	God etter 23 år	God 2	(Makro PP-fiber)	Litt svak	Mannvit (2015c); Tabell 8
Baneheia 405 og 590	God etter 14 år	God 2-1	God – svært god	God-litt svak	Mannvit (2015e); Tabell 7
Nesttun 149 og 170	God etter 13 år	God 3	Svært god	God	Fjose (2015); Tabell 6.24
Hop 207 og 620	God etter 13 år	God 1	Svært god	God	Fjose (2015); Tabell 6.24
Flekkerøya * 2143	God etter 26 år	God 2	Svært god	Svakt permeabel	Hagelia (2011b); A6-2-1. Mannvit (2015f); Tab. A
Freifjord * 3132	God etter 23 år	God 3	Svært god	God	Holm (2011a) Hagelia (2011b); Tabell A6-2-1
Byfjord * 4410	God etter 13 år	God 1	Svært god	God	Hagelia (2011b); A6-2-1
Oslofjord * 15410	God etter 10 år	God 3	Svært god	God	Holm (2011b) (Hagelia 2011b)
Sløverfjord * 2480-2500	God etter 18 år	God 1	Svært god	God	Mannvit (2015a) Tabell 12.

Tabell 4.4: Reseptar for sprøytebetong i ferskvassmiljø, inklusive landstrekningar i undersjøiske tunnelar (\*). Alle sementar er CEM 1 tilsett pozzolanar: SF= silikastøv (% av sement-vekt), FA = Flygeaske. Litt dokumentasjon er forsvunnen: PC kan vere standard eller rapid sement. v/b er dei mest autoritative data.. Det er ikkje brukt skadelege tilslag. Data frå Nærum (1996,) Davik (1997b), Austlid & Andreassen (1998), Fjose (2015), Mannvit (2015a, c, e), Egil Tveide (samtale 2017) og Trond Lorentzen (e-post 2017).

Tunnel	v/b som bygd	Pozzolanar % sementvekt	Akselerator	Sement	Bindemiddel (ekv/kg/m3)	Fiber
Grua	0.43	SF 14 % og FA	Vannglas	Standard FA	514	Makro-PP
Baneheia	0.45	SF ca. 10 %	Alkalifri (AF 2000?)	PC-rapid	Antatt 450-500	Stål
Nesttun	0,49	SF 4 %	AF 2000	PC	500	Stål
Hop	0,49	SF 4 %	AF 2000	PC	500	Stål
Flekkerøy *	0.47	SF 14 %	Vannglas	PC-rapid	550	Stål
Freifjord *	0.42	SF 6-8 %	Vannglas	PC-rapid	560-580	Stål
Byfjord *	0.41	SF 1 %	Vannglas	PC-rapid	485	Stål
Oslofjord * Pel 15410	0.42	SF 5 %	AF 2000	PC-standard	515	Stål
Sløverfjord*	0.45 antatt	SF (+ slagg?)	Antatt alkalifri	PC	Antatt 450-500	Stål

Vatn/bindemiddelforhold (v/b) i Tabell 4.4 er basert på dei mest autoritative kjeldene. Det er vanlegvis konkret dokumentasjon om akselerator, men der informasjon manglar har vi antatt at det er brukt alkalifri etter omkring 1999.

Tabell 4.5: Kjemiske analysar (mg/L) av lekkasjevatn i ferskvassmiljø (X0) og eksponeringsklassar for metallkorrosjon. Understreka pelnummer i kursiv er nær strandsona. \* = pH målt i tunnelen, elles i laboratoriet. IA = ikkje analysert, IP = ikkje prøvetatt pga. «tørr» tunnel. Cl- i parentes estimert frå natrium. Data frå Davik (1997b), Hagelia (2008b, 2011b), Fjose (2015), Mannvit (2015 c, f).

Tunnel /Pel	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl-	Korrosjonsforhold	
						Karbonatisering	Tinesalt
Grua / 650	8,38*	-	-	-	-	XC4	XD1-XD3
Grua /1230	7,9	10	IA	0,81	(5)	XC4	XD1-XD3
Baneheia/405	IP	IP	IP	IP	IP	XC4	XD1-XD3
Baneheia/590	IP	IP	IP	IP	IP	XC4	XD1-XD3
Nesttun /N170	10-	-	-	-	-	XC3	Bak hvelv:
Nesttun/N149	10,5* 8,1	10	<0,006	1,3	35	XC3	XD1
Hop /H207	6,8-7,4*	-	-	-	-	XC3	Bak hvelv:
Hop/ H207	8,1	6,5	<0,006	5,5	15	XC3	XD1
Hop/H620	7,0*	-	-	-	-	XC3	
Flekkerøya/2143	IA	IA	IA	IA	IA	XC2-XC4	XD3 Viss tinesalt brukast
Freifjord/3135	7,0	146	IA	1	24	XC2-XC4	XD1-XD3
Freifjord / <u>3155</u>	<u>9,16</u>	<u>124</u>	<u>IA</u>	<u>0,89</u>	<u>26</u>	XC2-XC4	XD1-XD3
Byfjord/ <u>4330</u>	<u>8,15</u>	<u>200</u>	<u>IA</u>	<u>59</u>	<u>1000</u>	XC2-XC4	XD3
Byfjord/ <u>4400</u>	<u>8,33</u>	<u>51,2</u>	<u>&lt;0,005</u>	<u>15,4</u>	<u>260</u>	XC2-XC4	XD3

Tunnel /Pel	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Korrosjonsforhold	
						Karbonatisering	Tinesalt
Oslofjord/15410	8,08	19,7	<0,002	12	163	XC2-XC4	Bak hvelv: XD1
Oslofjord/15150 (SOS8)	8,16	21,1	0,005	5,6	59,6	XC2-XC4	XD1
Oslofjord/20200 (Basseng B1)	7,43	13,3	0,041	3	123	XC2-XC4	XD1
Sløverfjord/2250	9,2	78	IA	1,1	(400)	XC2-XC4	XD3 Viss tinesalt brukast

Datagrunnlaget frå ferskvassmiljø dekker omkring 25 års erfaring. Sprøytebetong brukt som bergsikring i ferskvassmiljø er vurdert som generelt god. Det er ikkje funne nemneverdige teikn til nedbryting av sementlimet, og tilstanden for stålfiber er gjennomgåande svært god.

- Omfanget av overflatekarbonatisering er ikkje svært stort, og varierer frå 1 til 15 mm (Tabell 4.7).
- Heft mot berg var i dei fleste tilfelle god utan karbonatisering mot bergmassen.
- Effektar av tinesalt er ikkje undersøkt systematisk, men problemet er lite i tunnelar vi har data frå.
- Det er teikn på varierende omfang av mikroriss i sementlimet og i blant litt dårleg hydratisering (synlege klinkerkorn i tynnslip).
- Det er ikkje grunn til å rekne med at variasjonar i bergmassekvalitet hittil har verka inn på tilstandsutviklinga innan dei undersøkte områda. Men det manglar dokumentasjon med lokale Q-verdiar.

Data frå betonganalysane er presentert i Kapittel 4.3.2 og dannar grunnlag for å avdekke trendar som kan kaste betre lys over innverknaden frå lokale miljøbelastningar.

#### 4.3.1 Resultat frå strukturanalyse og standard betonganalyse

Omfanget av nedbryting er undersøkt ved strukturanalysar, tynnslip (totalt 25) og/eller karbonatisering ved fenolftalein. Tabell 4.6 viser korleis omvandlinga fordeler seg på ulike soner gjennom tverrsnittet av sprøytebetongen slik det er definert i Kapittel 3.2.3.3. Fiberinnhald, trykkstyrke, porøsitet og kloridverdiar er summerte i Tabell 4.7.

Resultata frå alle analysane er framstilt som diagram i Figurane 4.1 til 4.9. Det er bare lokaliteten i Flekkerøytunnelen som har permeabel heftsone mot bergmassen med litt utluting og omvandling med utfelling av PCD (Popcorn kalsitt) i Sone A.

Tabell 4.6: Tunnelar i ferskvassmiljø. Fordeling av omvandling i Sone A (mot berg), Sone B (intakt betong) og Sone C (ytre betong mot overflata). Sjå elles Figur 3.1. Litt avskaling (S). Undersøkt i tyngslip (Ts/antal) og/eller ved fenolftalein metoden (Fn). Resultat (m) frå Mannvit (2015a, c, e, f), samt. r = Røhrsveen & Lygre 1996/Davik 1997b, ha = Hagelia 2011b, ho= Holm (2015 a, b), f = Fjose 2015.

Tunnel -år/alder - Pelnr.kjerne	Heftforhold	Sone A (mm)	Sone B (mm)	Sone C Ytre karb. (mm)	Overflateforhold
Grua 2014/23 (m) - 650-2 Fn - 650-15 Ts/2	Litt svak/Tørr	0 0	Middels mikroriss: 108 93	7 10	Tørr Tørr
Baneheia 2014/14 (m) -405-4 Ts/2 -405-5 Ts/1 -405-8 Fn	Litt svak/Tørr  Litt svak/Tørr	0 0 0	Middels mikroriss: 117,5 113,5 50 Få-ingen mikroriss:	7,5 6,5 5	Tørr Krakelert (nettriss - mikroriss på makroskala)
-590-8 Fn -590-11 Ts/2		0 0	39 180/ S	6 5	Tørr, med CaCO <sub>3</sub> utfelling
Nesttun 2014/13 (f) -N170 Ts/2	God/Tørr	0	Mange mikroriss: 90	1,5	Fuktig, med CaCO <sub>3</sub> utfelling
Hop 2014/13 (f) -H207 Ts/2	God/Tørr	0	Få - ingen mikroriss: 64	1	Fuktig-rennande vatn, under ikkje- aggressiv biofilm
Flekkerøy 2003/15 (ha) -2143 Ts/2	Svak permeabel	PCD 2,5	Middels mikroriss: 61,5	20	Tørr
Freifjord 2003/12 (ha) -3132 Ts/3	God/Tørr	0	Mange mikroriss: 55	15	Tørr
Byfjord 2004/13 (ha) - 4410-3-3 Ts/3 - 4410-3-2 Ts/4	God/Tørr God/Tørr	0 0	Ingen mikroriss: 95 80	10 15	Tørr Tørr
Oslofjord 2009/10 (ho) - 15410-ok19 Fs - 15410-ok20 Fs	God/Tørr God/Tørr	0 0	Mange mikroriss: 62 89	13 11	Tørr Tørr
Sløverfjord 2014/18 (m) - 2480-12 Ts/2	God/Tørr	0	Få-ingen mikroriss: 86,5	3,5	Tørr

Tabell 4.7: Tunnelar i ferskvassmiljø. Stålfiberinnhald, med unnatak av Grua med makro-PP fiber). Resultat (m) frå Mannvit (2015a, c, e, f), samt. rd = Røhrsveen & Lygre 1996 og Davik 1997b, ha = Hagelia 2011b, ho= Holm (2011a, b), f = Fjose 2015, vk = data publiserte i denne rapporten. IA = ikkje analysert. \*) Referer til pelnummer i Davik (1997b) der kjedinga seinare er endra. \*\*) Tala er frå undersjøisk del, manglar for betongar i ferskvassmiljø.

Tunnel – pelnummer (år testa)	v/b som bygd	Fiberinnhald (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkstyrke Sylinder (MPa)	Sugporøstet (%)	Total porøstet (%)	Klorid (%)
Grua (m) – 650 (2014)	0.43	7,4 (n=3) Makro PP-fiber	33,2 (n=3)	20,3 (n=5)	23,6	0–10 mm: 0,17–0,11 10–120 mm: < 0,05 (3 m over veg)
Baneheia (m) –405 (2014) –590 (2014)	0.45	36,7 (n=3) 42,2 (n=3)	59,1 (n=3) 66,9 (n=3)	20,5 (n=4) 20,4 (n=4)	22,6 22,0	Ikkje utført: (4,5 m over veg)
Nesttun (f) –170 (2014) –170 (2014)	0,49	26 (n=3) IA	44,9 (n=3) IA	22,28 (n=1) 19,10 (n=1)	26,67 23,56	Ikkje utført (bak hvelv)
Hop (f) –207 (2014) –207 (2014)	0,49	42 (n=3) 41 (n=3)	75,2 (n=3) 70,0 (n=3)	21,76 (n=1) 19,32 (n=1)	24,69 21,88	Ikkje utført (bak hvelv)
Flekkerøy (rd) * –2800 (1996)	0.47	45,9 (r) (n=2)	26,9 (r) (n=2)	22,8 (r) (n=2)	27,8	Ikkje utført
Freifjord (rd) ** – (div pelnr.)	0.42	IA (~30–44)	IA (~24–40)	IA (~20)	IA (~23)	Ikkje utført
Byfjord (rd) –770 (1996) –4410 (1996) –4410 (2004) vk	0.41	IA 41,6 (n=1) IA	IA 30,1 (n=6) 40,3 (n=2)	18,7 (n=3) 21,8 (n=6) IA	21,7 24,6 IA	Ikkje utført
Oslofjord (ho) 15410 (2009)	0.42	19 (n=1)	49,5 (n=1)	18,3 (n=2) 17,6 (n=2)	21,9 21,4	0,027: 4 m over veg (ho)
Sløverfjord (m) – 2500 (2014)	0.45 antatt	40,3 (n=3)	50,3 (n=3)	17,7 (n=5)	21,3 (n=5)	0,005 i heile tverrsnittet: 4 m over veg

### Klassifisering av mikroriss

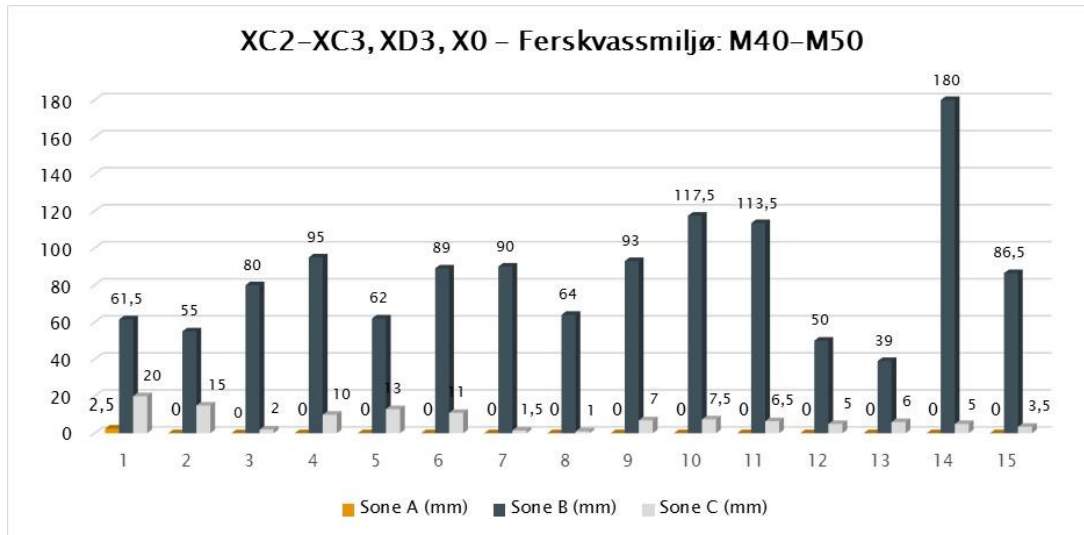
Undersøkingar i tynnslipa, utført i Vegdirektoratet på bakgrunn av alle tilgjengelege preparat viste at det var ein god del variasjon i mikrooppsprekking. Dette representerer delvis svinnriss men også sekundær opprissing. Ein valte å definere følgjande kategoriar av mikrooppripping (visuelt bedømt):

- Klasse 1 = ingen eller få mikroriss
- Klasse 2 = middels mikroriss
- Klasse 3 = mange kommuniserande mikroriss
- Klasse 4 = mange kommuniserande mikroriss med innslag av makroriss

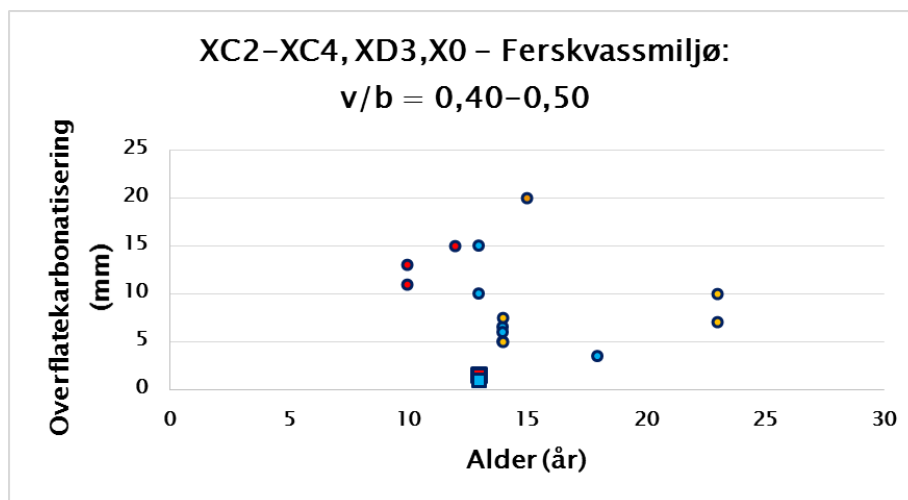
Observasjonane er basert på undersøkinga av tynnslip frå uomvandla deler av sprøytebetong (Sone B) i polarisasjonsmikroskop, og seier truleg ein del om primære eigenskapar.

Mikrooppsprekking i meir eller mindre påverka og/eller nedbrotne soner (Sone A og Sone C) representerer i langt større grad sekundære effektar, og er ikkje representative med tanke på primær opprissing.

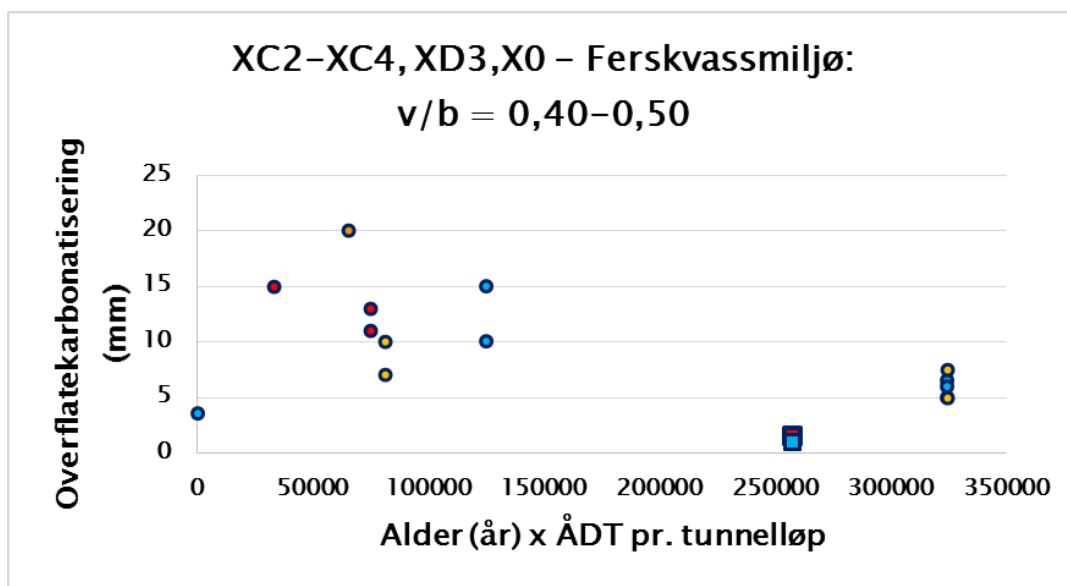
Klassifiseringa er lagt inn med symbolfarge i plott for å avdekke eventuelle samanhengar knytta til primær mikroopprissing som er synleg i polarisasjonsmikroskop.



Figur 4.1: Fordeling av omvandling (Sone A mot berg, Sone C) og intakt indre sprøytebetong (Sone B). Summen av sonene svarar til total tykkelse. Nr 1 er Flekkerøytunnelen med utfelling av Popcorn kalsitt i Sone A. Elles er heftforholda gode. Varierende overflatekarbonatisering i Sone C.



Figur 4.2: Overflatekarbonatiseringa er ikkje avhengig av alder aleine. Dei fleste overflatene i datasettet er direkte eksponerte for trafikk/eksos (runde symbol) og hadde relativt tørre overflater utan utfellingar. Prøver med mange mikroriss (rødt) har relativt djup karbonatisering etter bare 10–12 år, medan prøver med middels mikroriss (brun) og få eller ingen mikroriss (blå) viser stor spreing uavhengig av alder. Sprøytebetong med utfellingar bak vass- og frostsikringshvelv (kvadratiske symbol) i Nesttuntunnelen og Hopstunnelen hadde derimot lite karbonatisering trass i stor skilnad med tanke på mikroriss. Dei undersøkte prøvene var skjerma frå trafikk/eksos, og hadde også våte overflater med utfellingar.



Figur 4.3: Overflatekarbonatisering og akkumulert trafikkmengd. Symbol som i Figur 4.2.

#### 4.3.1.1 Overflatekarbonatisering, overflatefukt, $v/b$ , sugporøsitet og mikroriss

Samanlikning av tunnelar med ulik alder viser ingen klar samanheng med karbonatiseringsdjup (Figur 4.2), medan  $\text{CO}_2$ -belastning over tid (akkumulert trafikkmengd) gir tilsynelatande negativ korrelasjon (Figur 4.3). Fuktig sprøytebetong bak vass- og frostsikringshvelv i Nesttuntunnelen og Hopstunnelen, skil seg ut med minst omfang av overflatekarbonatisering (kvadratiske symbol). På dei undersøkte stadane var det utfelt hhv. tynt kalkspatbelegg og tilsynelatande ikkje-aggressiv biofilm (Fjose 2015), sjå Vedlegg 1. Dei andre datapunkta med relativt djupare karbonatisering (runde symbol) representerer relativt tørr sprøytebetong utan overflatebelegg, og er direkte eksponerte for trafikk. Djupast karbonatisering kombinert med relativt låg akkumulert trafikkmengd er registrert i Flekkerøytunnelen (20 mm med middels omfang mikroriss), Freifjordtunnelen (15 mm, stort omfang av mikroriss).

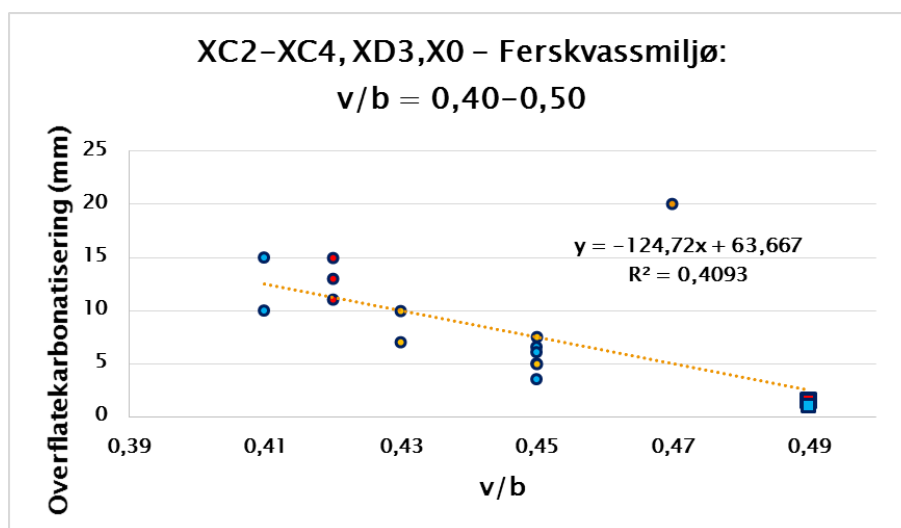
Den akkumulerte trafikkmengda i Oslofjordtunnelen er ganske lik den akkumulerte trafikkmengda i Gruatunnelen. Men karbonatiseringa er djupare i Oslofjordtunnelen (11–13 mm, mange mikroriss) enn i Gruatunnelen (7–10 mm, middels mikroriss) trass i at prøvene frå Gruatunnelen er vel dobbelt så gamle. Dette tyder på at omfanget av mikroriss kan ha innverknad på karbonatiseringa. På den andre sida var det ikkje svært opplagt i tynnslipa at karbonatiseringsfronten følgjer mikro-rissa, og det er muleg at varierende porøsitet i/nær overflata også verkar inn, men som ikkje er fanga opp i undersøkinga.

Figur 4.4 viser at overflatekarbonatiseringa *minskar* når vatn/bindemiddel-forholdet aukar. Uteliggaren er frå Flekkerøytunnelen (15 år, middels oppsprekking, 20 mm karbonatisering). Den signifikante negative korrelasjonen for alle andre prøver ( $R^2 = 0,84$ ), inklusive sprøytebetongen bak hvelv, er tilsynelatande uavhengig av mikro-opprissing. Men isolert sett for  $v/b$ -intervallet frå 0,42 til 0,45 er det faktisk ein relativt klar samanheng også med mikrooppsprekkinga. Alle betongoverflater med  $> 5\text{mm}$  karbonatisering hadde relativt tørre

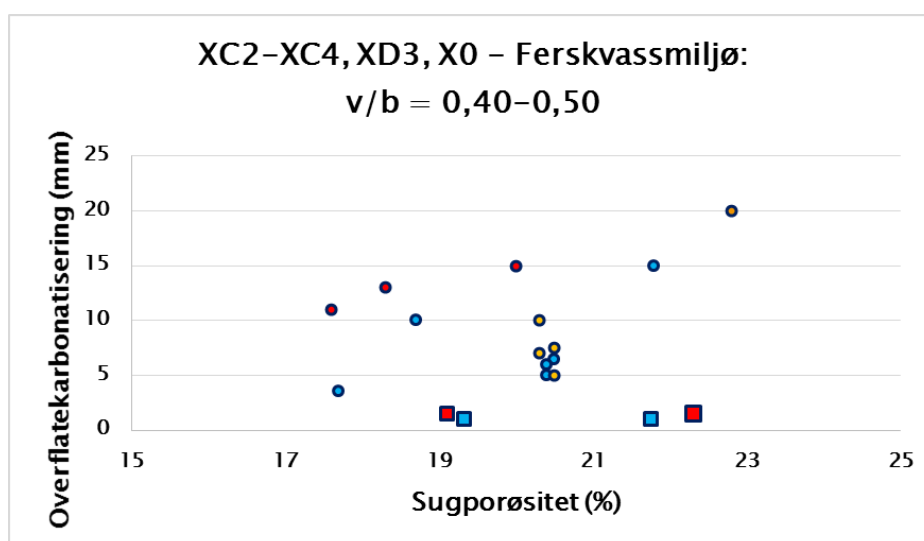


overflater: også dei to prøvene med  $v/b = 0,41$  og 10–15 mm karbonatisering (Byfjorden, Tabell 4.6). For relativt tørr sprøytebetong som er direkte eksponert for trafikk ser det ut til å vere ein ganske klar samanheng med aukande karbonatiseringa mot lågare  $v/b$ - tal.

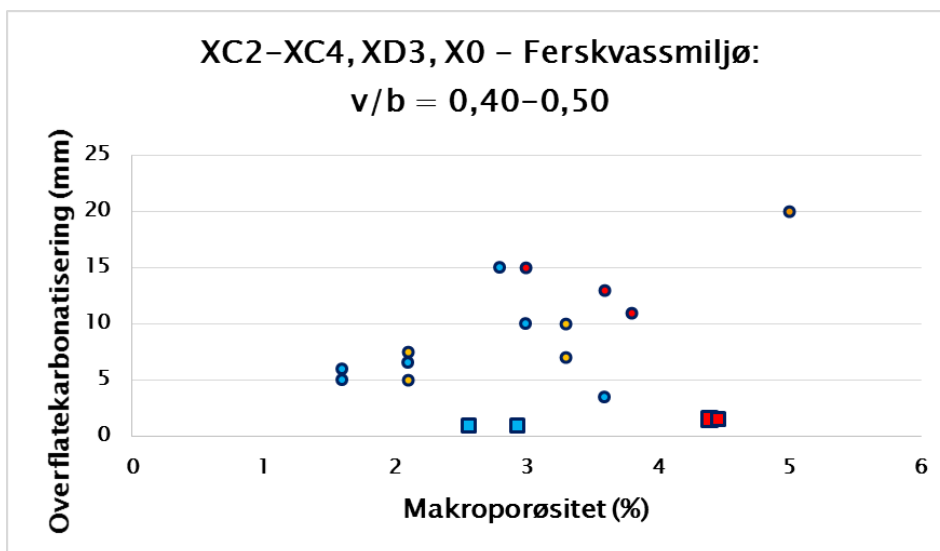
I Figur 4.5 og Figur 4.6 er sugporøsitet og makroporøsitet plotta mot overflatekarbonatisering og viser ingen korrelasjon. Porøsitetsverdiane er basert på kjerner frå same lokalitetar i dei ulike tunnelane men basert på andre kjerner enn dei som er brukt for å bestemme karbonatiseringsdjup. Porøsitetane representerer bare uomvandla del (Sone B). Sone C med overflatekarbonatisering er ikkje karakterisert direkte med tanke på sugporøsitet og kan dermed vere forskjellig frå Sone B. Det er ingen korrelasjon mellom sugporøsitet i Sone B og masseforholdet (Figur 4.7) og heller ingen samanheng mellom betongalder/akkumulert trafikkmengde og sugporøsitet (ikkje vist).



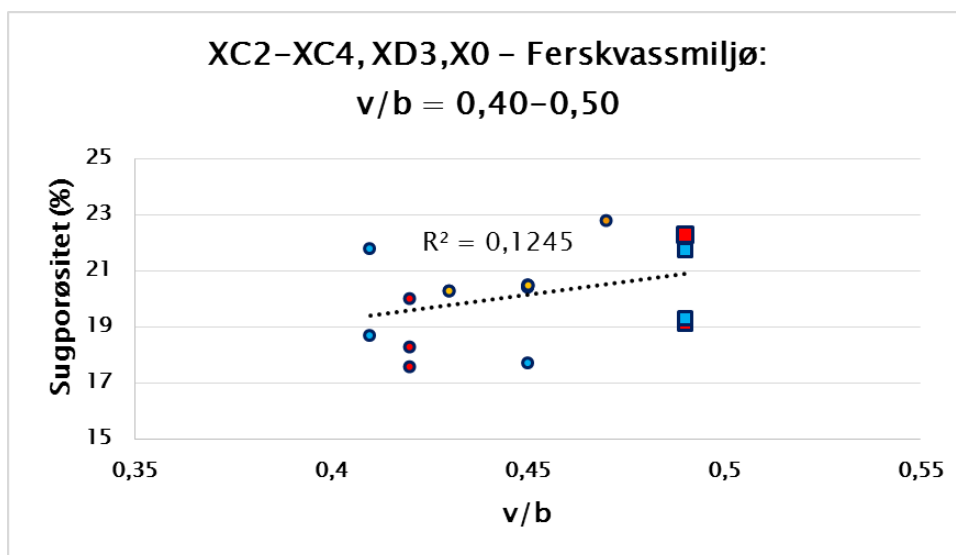
Figur 4.4: Overflatekarbonatiseringa minkar med aukande  $v/b$ -tal. Ein lineær regresjon utan uteliggaren gir signifikant negativ korrelasjon ( $R^2 = 0,84$ ). Symbol som i Figur 4.2.



Figur 4.5: Overflatekarbonatisering er ikkje tydeleg relatert til sugporøsitet, men med tendens til aukande karbonatisering mot høgare sugporøsitet i eksponert betong. Symbol som i Figur 4.2.



Figur 4.6: Overflatekarbonatisering er ikkje tydeleg relatert til makroporøsitet. Symbol som i Figur 4.2.



Figur 4.7: Ingen opplagt korrelasjon mellom v/b og sugporøsitet. Omfang av mikroriss/karbonatisering er også tilfeldig fordelt og tyder på at variasjonar i karbonatisering er mest avhengig av overflatenære eigenskapar (ikkje representert i analysen av sugporøsitet).

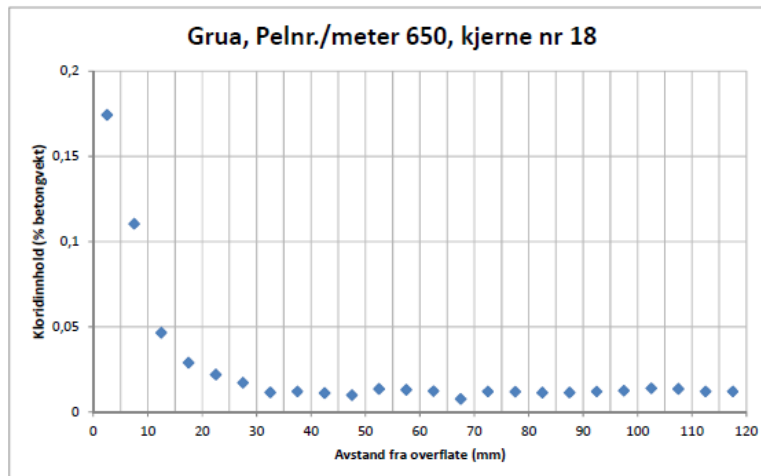
Karbonatiseringsfart og karbonatiseringsdjup ved atmosfærisk CO<sub>2</sub> er styrt av diffusjon. Diffusjonskoeffisientane er avhengig av materialeigenskapar, reseptar og fukt m.m. Karbonatiseringsratene ved overflatekarbonatisering minkar generelt over tid på grunn av vidare hydratisering (gir generelt tettare betong) og fordi det karbonatiserte laget også normalt blir litt tettare enn upåverka sementpasta (Bamforth 1997, Vesikari 2009). Det er sannsynleg at denne aldringseffekten er medverkande årsak til at overflatekarbonatiseringa ikkje er særleg omfattande i sprøytebetong brukt som bergsikring.

Figur 4.3 seier ingenting spesifikt om karbonatisering over tid, men understreker at sprøytebetong i ferskvassmiljø med til dels høg trafikkbelastning ikkje er skadeleg påverka av karbonatisering etter opp til 23 år.

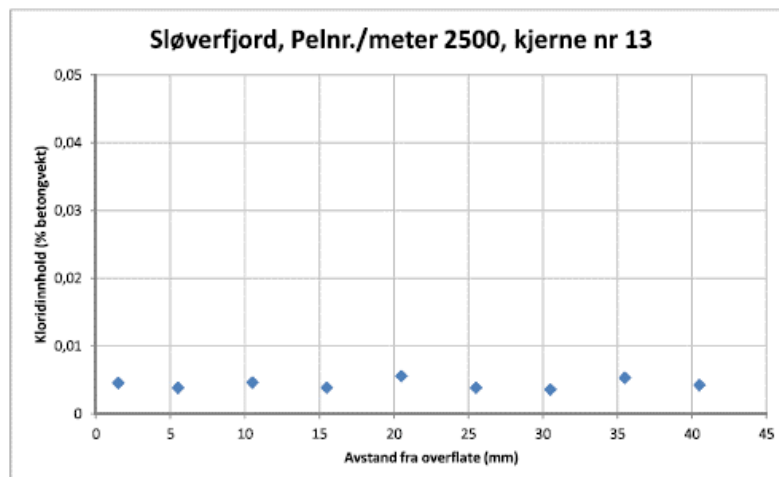
Stålfiberkorrosjon var marginalt utvikla og fullstendig avgrensa til ytre karbonatisering, utan synleg svekking av fibrane.

#### 4.3.1.2 Kloridinntrenging frå tinesalt

Det er rapportert kloridprofilar frå lokalitetar i ferskvassoner i Gruatunnelen og Sløverfjordtunnelen (Mannvit 2015a, c) og gjennomsnittsverdiar frå Oslofjordtunnelen (Holm 2011b) (Tabell 4.7). Gjennomsnittsverdien frå ein lokalitet i Oslofjordtunnelen er  $0,027 \pm 0,002$  % (alder = 10 år, ÅDT: 7500). Profilane frå Gruatunnelen og Sløverfjordtunnelen er vist i Figurane 4.8 og 4.9.



Figur 4.8: Kloridprofil frå kjerne bora ut omtrent 3 m over vegbanen i Gruatunnelen. Inntrenging av tinesalt etter 23 år er ikkje svært høg, men overskrider 0,1 % av betongvekt i området 0–7 mm. Alder = 23 år; ÅDT  $\approx$  3550/pr. løp



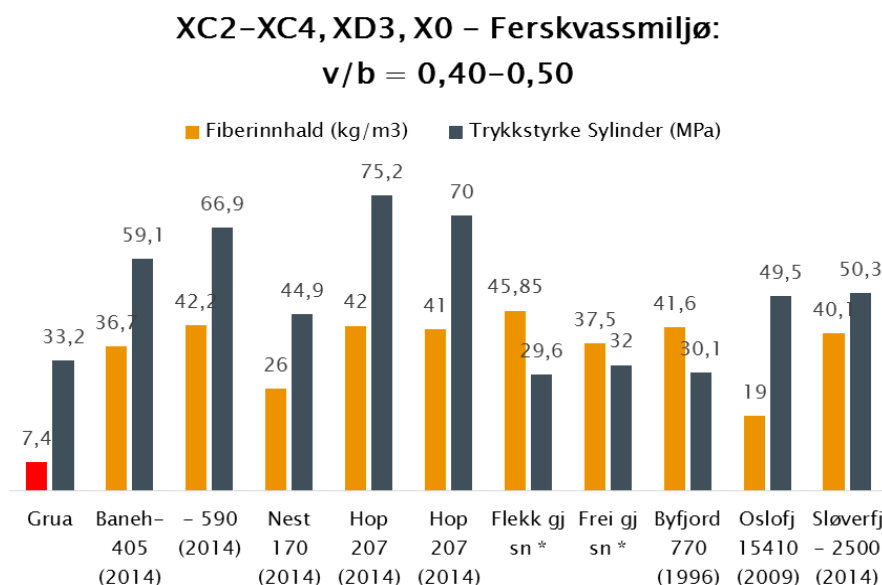
Figur 4.9: Kloridprofil frå ferskvassona i Sløverfjordtunnelen. Alder = 18 år; ÅDT = 840.

Alle prøvene blei bora ut frå eksponert sprøytebetong ca. 3–4 meter over vegbana. Ein bør rekne med at kloridbelastninga er noko høgare 0–2 meter over vegen. Kritisk kloridinnhald ( $> 0,1$  %) i Gruatunnelen er bare registrert inn til 7–10 mm, tilsvarande karbonatiseringsdjupn.

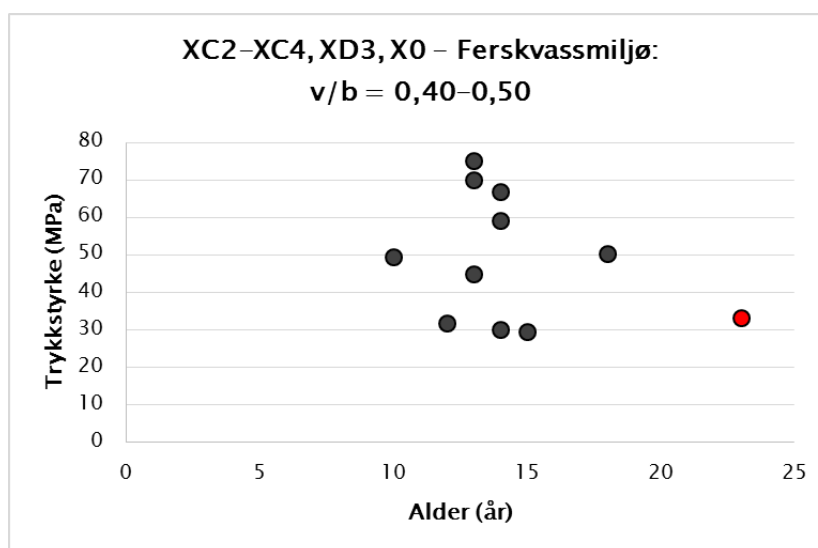
Resultata viser at det er ein samanheng mellom trafikkbelastning og kloridinntrenging. Høgtrafikkerte tunnelar (bl.a. Helltunnelen og Smestadtunnelen) har til samanlikning 0,3–0.35 % klorid i veggelement ned mot vegbana, med > 0,1 % klorid 50 mm under overflata (Luke 2012).

### 4.3.1.3 Trykkstyrke og fiberinnhald

Trykkstyrken (sylinder) til sprøytebetong i ferskvassmiljø varierer mellom 33,2 MPa og 75,2 (Figur 4.10). Dette er i stor grad i samsvar med designkrava på kvar stad. Fiberinnhaldet varierer, og det er ingen opplagt samanheng mellom fiberdosering og trykkstyrke. Figur 4.11 viser trykkstyrke som funksjon av alder. Diagrammet viser ingen tendens. Som venta er det ikkje muleg å etablere påliteleg tidsseriar utan fleire data frå kvar tunnel over lenger tid.



Figur 4.10: Fiberinnhald og trykkstyrke. Byfjord pel 770 tilsvarar nytt pelnummer 4410. Gruatunnelen har makro-PP fiber (raud), elles stålfiber.



Figur 4.11: Trykkstyrke og betongalder. Grua har makro-PP fiber (raud), elles stålfiber.

Holm (2011b) rapporterte strekkfastheit frå Oslofjordtunnelen for å undersøke heft mot bergmassen. Brota gjekk i heftsona i berg, og i betong. Strekkfastheit i ferskvassmiljø (Pel 15410) varierte mellom 0,4 MPa og 3,2 MPa, som er litt høgare enn tilsvarande verdiar i undersjøisk miljø i Oslofjordtunnelen (sjå kapittel 4.6).

#### 4.4 Svakt svovelsurt miljø – Eksponeringsklassane XC2, XD0, XA1.

Undersøkingane er avgrensa til Harpefosstunnelen, som er ein servicetunnel knytta til Harpefoss kraftverk. Geologien i området er dominert av eokambrisk svartskifer og gneis med karbon og sulfidmineral, i veksling med kvarts- og feltspatrik mylonitt (deformert sparagmitt). Sprøytebetongen blei våtsprøyta. Resepten er gitt i Tabell 4.8. Utfyllande dokumentasjon er gitt i Vedlegg 1.

Området er kjent for utfelling av sulfatmineral (epsomsalt) på overflata, såkalla «hakkemette». Eksponeringsmiljøet her representerer eit grensetilfelle mellom vanleg ferskvassmiljø og alunskifermiljø.

**Nedbrytingsmekanismar i svakt svovelsurt miljø:  
Overflatekarbonatisering og sulfatangrep**

Eksponeringsklassar (NS-EN 206):

- Korrosjon på grunn av karbonatisering = XC2
- Korrosjon på grunn av tinesalt = XD0
- Kjemisk angrep frå grunnvatn = XA1

Eksponeringsklasse XA1 er dokumentert ved kjemiske analysar i Tabell 4.9. Vassprøvene er samla frå lekkasjevatn i tunnelen. Det er den litt låge pH-verdien som gir XA1, medan sulfatinnhaldet på ca. 100 mg/L ikkje er dimensjonerande.

Eksponeringsklassa for korrosjon ved karbonatisering er sett til XC2 («Vått, skjeldan tørt»), fordi betongen dei første åra var i kontakt med vatn over lenger tid og delvis var det også ved undersøkingane i 1997 og 2000 (Hagelia mfl. 2003, Hagelia 2011b). Tunnelen må betraktast som ikkje trafikkert. Eksponeringsklassa for korrosjon ved tinesalt er vald fordi det ikkje blir brukt tinesalt (port hindrar frostinntrenging). Kloridinnhaldet i grunnvatnet er elles lågt og tilsvarar variasjonen i normalt ferskt grunnvatn.

*Tabell 4.8: Resept brukt i Harpefoss service tunnel rapportert av E-Service til Statens vegvesen i 1997. Pozzolanar i % av sementvekt. MP30 er ein portlandsement med 20 % Flygeaske (FA). Tilslaget er marginalt alkalireaktivt.*

Tunnel/ -betong år	v/b	Pozzolanar	Akselerator	Sement	Bindemiddel (kg/m <sup>3</sup> )	Fiber
Harpefoss -1984	≈ 0.5	FA (20 %)	Vannglas	PC (MP30)	Antatt > 450	Ingen

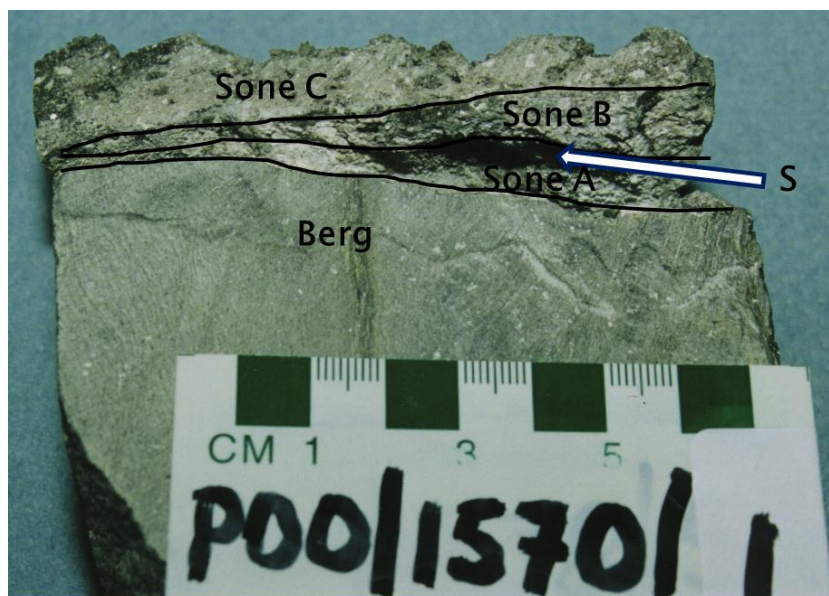
Tabell 4.9: Kjemiske analysar (mg/L) av lekkasjevatn i Harpefosstunnelen (Hagelia mfl. 2003), og eksponeringsklassar for metallkorrosjon.

Tunnel	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Korrosjonsforhold	
						Karbonatisering	Tinesalt
Harpefoss 1	5,70	111	IA	2,3	16,9	XC2	XD0
Harpefoss 2	5,67	106	IA	2,8	13,2	XC2	Ingen trafikk
Harpefoss 3	5,66	102	IA	1,5	15,8	XC2	
Harpefoss 4	6,06	105	IA	3,9	12,8	XC2	

#### 4.4.1 Oppsummering av undersøkingane i svakt svovelsurt miljø

Datagrunnlaget dekker 16 års erfaring. Harpefosstunnelen tunnelen er ikkje undersøkt etter år 2000. Betongen er utan fiber. Sprøytebetongen som er brukt som bergsikring er vurdert som generelt god, men med tydeleg lokale teikn på tidleg utfelling av natriumsulfat og begynnande thaumasitt sulfatangrep (Hagelia mfl. 2003, Hagelia 2011b).

- Sulfidmineral (stort sett pyritt) i svartskifer og karbonførande gneis er årsaka til det svakt svovelsure lekkasjevatnet. Dette vatnet trenger også fram på bergsprekkar i lag av mylonitt og sparagmitt utan sulfid.
- Tunnelen var i 1997 og 2000 nokså tørr, men viste tydelege teikn på tidlegare lokale lekkasjar gjennom sprøytebetongen. Folk på kraftverket bekrefta dette, og at hensikta med sprøytebetongen var å bremse innlekkasjen snarare enn å sikre berget. Det er sannsynleg at grunnvatnet over tunnelen har blitt senka på grunn av drenering, som etterkvart reduserte innlekkasjen av aggressivt vatn.
- Omfanget av overflatekarbonatisering på grunn av atmosfærisk CO<sub>2</sub> er ikkje svært stort og varierer i gjennomsnitt frå ca. 1 til 12 mm (Tabell 4.10). Dette tilsvarar variasjonen i ferskvassmiljø.
- Heft mot berg var i dei fleste tilfelle god utan karbonatisering mot bergmassen. Eit unnatak var ei kjerne som viste fullskala thaumasitt sulfatangrep og utfelling av Popcorn kalsitt i svært tynn betong (Figur 4.12). Dette førte til at betongen blei svært porøs og svak, med avskaling (S) både langs heftsona og i Sone A.
- Utfelling av mineralet thenarditt (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) var konsentrert til nokre uttørka tunnellekkasjar på overflata mot tunnelrommet.



Figur 4.12: Harpefoss –med avskaling i sone A med thaumasitt sulfatangrep og PCD i svært tynn sprøytebetong med overflatekarbonatisering i Sone C inntil 10 mm. Merk avskalinga (S). Bergarten bak sprøytebetongen er mylonittisk gneis (deformert sparagmitt), utan svovelførande mineral. Foto: BRE-Garston -UK.

Tabell 4.10: Harpefoss servicetunnel i svakt svovelsurt miljø. Fordeling av omvandling i Sone A (mot berg), Sone B (stort sett intakt betong) og Sone C (overflatekarbonatisering). Avskaling (S). Sjå elles Figur 3.1. Prøver frå 1997 og 2000 (\*). PCD = Popcorn kalsitt. TSA = Thaumasitt sulfatangrep. ASR = alkalireaksjon. Resultat frå (Hagelia mfl. 2003, 2011b). Alle undersøkt i tynnslip (Ts/antal)

Harpefoss - prøve nr - total tykkelse	Heftforhold	Sone A (mm)	Sone B (mm)	Sone C (mm)	Overflateforhold
- Core 1.1 Ts/2 - 65 mm	God/litt utfelling av ettringitt + thaumasitt	1	63 Ikkje mikroriss	1	Tørr
- Core 2 Ts/1 - 70 mm	Litt svak/ikkje utfelling	0	62,5 Ikkje mikroriss Sporadisk ASR-gel	7,5	Tørr-tidlegare våt/ utfelling av CaCO <sub>3</sub> og Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
- Core 3.2 Ts/2 - 55 mm	Litt svak/ikkje utfelling	0	42,5 Nokre primære svinnriss	12	Tørr
- Core 4 Ts/4 - 65 mm	God/litt utfelling av ettringitt	0,2	64,3 Ikkje mikroriss Sporadisk ASR-gel	0,5	Fuktig
- Core 5 Ts/1 - 80 mm	Litt svak/ikkje utfelling	0	67,5 Ikkje mikroriss	12,8	Tørr
- Core 6 Ts/1 - 60 mm	Litt svak/ litt CaCO <sub>3</sub>	0	47,5	12.5	Fuktig

Harpefoss – prøve nr – total tykkelse	Heftforhold	Sone A (mm)	Sone B (mm)	Sone C (mm)	Overflateforhold
			Ikke mikroriss		
– Core 1570/1 * Ts/1 av heil kjerne) – 20 mm	Fuktig/svak <b>S</b>	7,5/ <b>S</b> Utluta pasta med TSA og PCD; ettringitt på mikroriss	2,5 Mange sekundære mikroriss parallelt overflata	10 Mange sekundære mikroriss parallelt overflata	Fuktig/svak overflate m/utfelling av uidentifisert mørk fase
– Core 1570/2 * Ts/1 av heil kjerne – 110 mm	Delvis heft, rel. Tørr/utfelling av rustfarga CaCO <sub>3</sub>	0	97,5 Ikke mikroriss	12,5	Fuktig/ utfelling av Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
– Core 1570/3 * Ts/1 av heil kjerne – 110 mm	God/ikke utfelling	3,5 Litt karbonatisering	100 Ikke mikroriss	7,5	Fuktig/ utfelling av Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

#### 4.4.2 Resultat frå strukturanalyse og mikroskopering av tynnslip

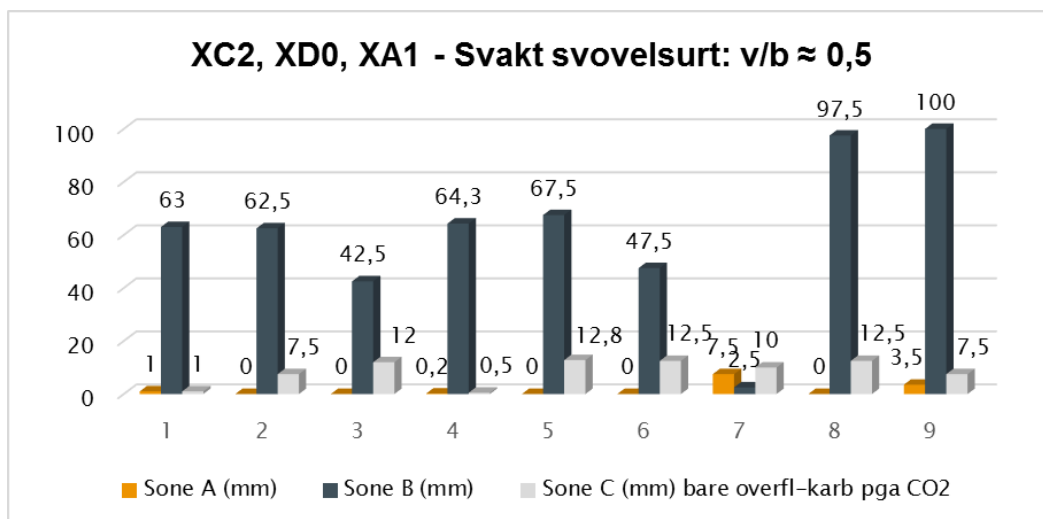
Det blei ikkje utført standard betonganalysar (trykkprøving, porøsitet, fenolftaleintest m.m.) på prøvene frå Harpefosstunnelen. Omfanget av nedbrytingsfenomen bygger på strukturanalyse og mikroskopering av totalt 13 tynnslip.

Tabell 4.10 viser korleis omvandlinga gjennom tverrsnittet av betongen fordeler seg på dei ulike sonene (definert i Kapittel 3.2.3.3), og resultatata er framstilte i Figur 4.12.

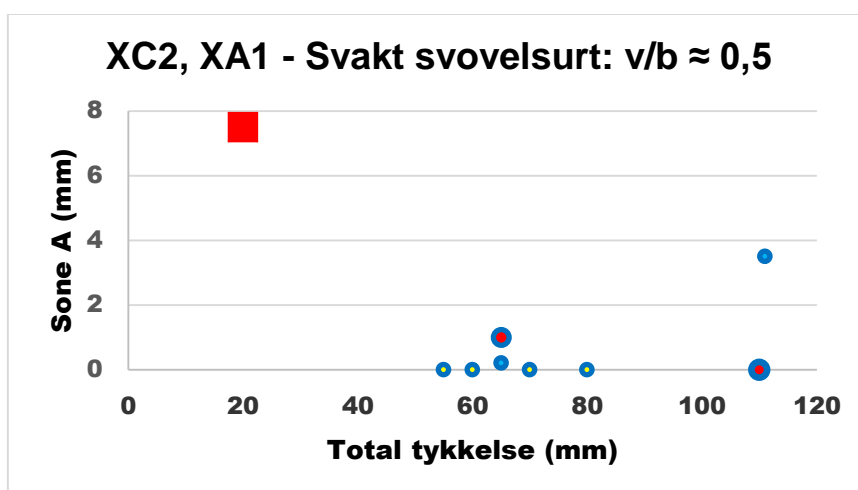
Betongen hadde litt varierende innslag av luftporer. Sementlimet i dei fleste prøvene var tett utan mikroriss, og bare unnataksvis med eit innslag av mikroriss (Tabell 4.10). Det blei elles påvist restar av flygeaske i denne betongen som stadfestar at det var brukt FA-sement. Det var også enkelte teikn på begynnande alkalireaksjon, form av svært tynn gel i nokre få luftporer.

Overflatesjiktet i prøvene frå områda med utfelt Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> var ikkje påverka, og viste ikkje teikn på sulfatsprenging. Dette lett løyselege mineralet er danna frå Na i akseleratoren (vannglas) og sulfat frå oksidasjon av sulfid ved inntørking av lekkasjar gjennom sprøytebetongen.





Figur 4.13: Sprøytebetong i Harpefoss kraftverkstunnel etter 13 og 16 års (nr 7, 8 og 9) eksponering. Overflatekarbonatiseringa (Sone C) var ikkje djup. Fullskala thaumasitt sulfat angrep med PCD hadde omvandla betongen i kontakt mot berg i svært tynn betong (Sone A i analyse 7). Det var elles lokalt utfelt natriumsulfat på tørre overflater ved gamle lekkasjesprekkar, utan tydeleg skadeverknad (Hagelia mfl. 2003).



Figur 4.14: Omvandling i Sone A mot berg var stort sett ubetydeleg og neppe påverka av tykkelsen. Unntak: svært tynn betong (rød firkant) med 7,5 mm fullskala thaumasitt sulfatangrep. Blå symbol = svært god heft, gult = litt svak heft (splittar på heftsona), rød = dårleg heft.

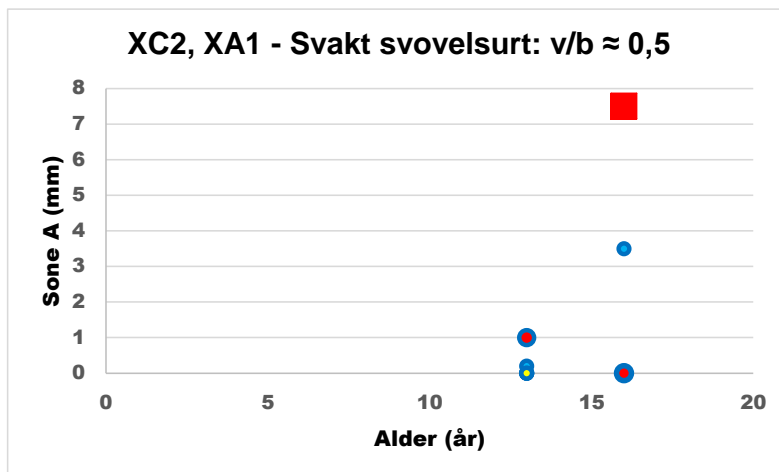
#### 4.4.2.1 Omvandling mot heftsona

Figur 4.13 viser at omvandling i Sone A mot heftsona var lita til ubetydeleg, også for sprøytebetong med litt svak heft (gule punkt). Det var bare kjerne 1570/1 (Figur 4.14) med svært tynn betong (20 mm totalt) som hadde avskaling knytta til fullskala thaumasitt sulfatangrep med utluting og PCD i Sone A. Her var det også sekundære overflateparallele mikroriss.

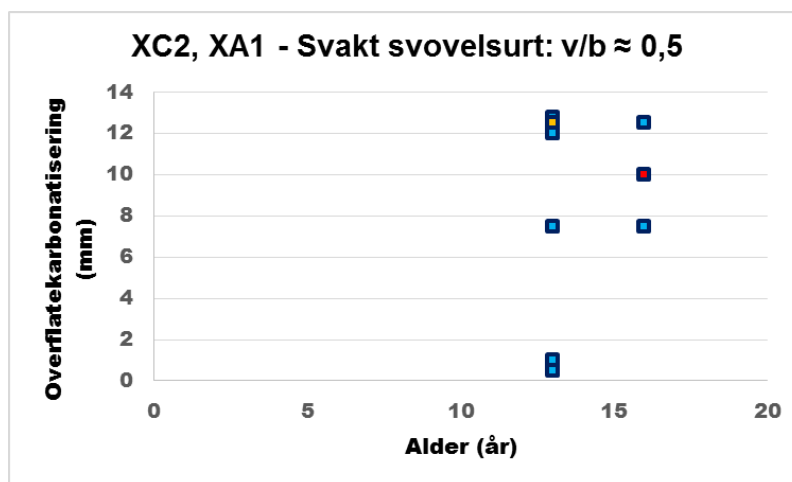
Sprøytebetongen var elles ca. 60 til 110 mm tykk, med lite tydeleg samanheng med heftegenskapar og tykkelse. Den relativt mest omvandla betongen av desse var 110 mm tykk

og hadde god heft, medan ei tilsvarande prøve med relativt dårleg heft var uomvandla. Det er i dette tilfelle *sannsynleg at det svakt aggressive lekkasjevannet ikkje alltid nådde fram i likt monn alle stader.*

Figur 4.15 viser betongalder plotta mot omvandling i Sone A. Med unnatak av den tynne betongen med thaumasitt sulfatangrep er omvandlinga mot heftsona ubetydeleg til svært lita, bare med litt utluting med PCD. Det er ikkje opplagt noka endring i omfang frå 1997 til 2000.



Figur 4.15: Omvandlinga mot berg plotta mot alder. Symbol som i Figur 4.12 (tre plottepunkt faller saman med andre datapunkt: alle utan omvandling og med litt svak heft ).



Figur 4.16: Overflatekarbonatisering (Sone C) var svært diffus (inntil vel 12 mm). Sementpastaen var for det mest fri for primære mikroriss/svinnriss (blå); lokalt med nokre mikroriss (gul). Den tynne betongen med thaumasitt (rød) hadde sekundære overflateparallelle riss i Sone C (og Sone B).

#### 4.4.2.2 Overflatekarbonatisering

Overflatekarbonatisering i Sone C (Figur 4.16) varierer frå 0,5 mm til 12,5 mm. Karbonatiseringa var *oftast svært diffus i motsetning til ferskvassbetongen* som var eksponert for trafikk og eksos. Det er ikkje nokon samanheng mellom karbonatiseringsdjup og observert fukttilstand, medan prøver med utfelt natriumsulfat på overflata i begge tilfelle har djup diffus

karbonatisering på 7,5 og 12,5 mm (sjå Tabell 4.10). Prøvene med tett betong utan mikroriss (blå firkantar) viser karbonatiseringsdjup inntil vel 12 mm både i 1997 og 2000, og det er neppe indikasjonar på at omfanget har auka over tid.

#### 4.5 Alunskifermiljø – Eksponeringsklassane XC2–XC4, XD0 – XD3, XSA

Sprøytebetong i alunskifermiljø er undersøkt i Åkebergveien vegskjering, Ekebergtunnelen og Svartdalstunnelen. Fleire pelnummer representerer tidlegare etablerte monitorlokalitetar (Hagelia 2011b). All sprøytebetong er våtsprøyta. Tabell 4.11 gir oversikt over tilstanden til sprøytebetong i alunskifermiljø. Reseptane er gitt i Tabell 4.12. Utfyllande dokumentasjon er gitt i Vedlegg 3.

Alunskiferen i Ekeberg og Svartdalsområdet er danna i øvre kambrium. Dei undersøkte lokalitetane i tunnelane er alle i rein alunskifer. Sprøytebetongen i Åkebergveien, under Enerhaugen i Oslo, har alunskifer og ein lagergang av mænaitt høgt i skjeringa. Alunskiferen her er truleg danna i nedre Ordovicium, og har i så fall noko lågare sulfidinnhald og litt høgare kalkinnhald, dvs. kanskje litt lågare syre- og sulfatpotensial enn lokalitetane i øvre kambrium (Bjørlykke 1974).

##### Nedbrytingsmekanismar i alunskifermiljø:

*Thaumasitt sulfatangrep, Popcorn kalsitt/utluting ± syreangrep,  
& overflatekarbonatisering*

Eksponeringsklassar (NS EN 206):

- Korrosjon på grunn av karbonatisering = XC4 (XC2–XC3 bak hvelv)
- Korrosjon på grunn av tinesalt = XD3 (XD0 bak hvelv)
- Kjemisk angrep frå grunnvatn = XSA

Eksponeringsklassa for korrosjon ved karbonatisering er sett til XC2–XC3 for sprøytebetong utan eksponering for trafikk/eksos. Påverknaden frå tinesalt bak hvelv må reknast som fråverande (XD0). Dette gjeld for begge tunnelane. Vegskjeringa i Åkebergveien er derimot eksponert for både trafikk og tinesalt og klassifiserer som hhv. XC4 og XD3.

Eksponeringsklasse XSA (spesielt aggressivt miljø) er introdusert i Nasjonalt tillegg; Tabell NA.16 og gjeld for alunskifermiljø og andre særleg aggressive miljø. Tabell NA.13 spesifiserer særskilde krav til bindemiddel i sulfatholdig miljø. Ein bør likevel vere merksam på at denne klassa er svært vid, og også omfattar svært surt miljø. Statens vegvesen har ikkje eksempel frå tunnelar i alunskifer der lekkasjevattnet har  $\text{pH} < 6,5$ . XSA dekkjer også pH verdiar langt under dette. Eksponeringsforholda vi har undersøkt for er dokumenterte ved kjemiske analysar av lekkasjevatt i Tabell 4.13, der pH oftast ligg omkring 7.

I ein del alunskifermiljø der oksygenrikt vatn trenger inn i alunskiferen, for eksempel ved senking av grunnvatnet, kan ein få  $\text{pH} < 3$ . Dette er særleg viktig i alunskifer som er fattig på kalsiumkarbonat som verkar som pH-buffer. Undersøkingane i Varige konstruksjonar har vist at oksidasjon av alunskifer på heftsona har utvikla syre nokre stader.

Tabell 4.11: Sprøytebetong i alunskifermiljø. Åkebergveien er representert ved sprøytebetong i vegskjering. Undersøkingane bygger på inspeksjonar, utboring frå oppgitte pelnummer, strukturanalyse med tynnslip og standard betonganalyse (karbonatisering, trykkstyrke, PF m.m). Sjå Vedlegg 3 med tilleggskonstruksjonar frå Varige konstruksjonar.

Objekt – Pelnummer (betongalder)	«Allmenntilstand» ved siste undersøking på pelnummer	Tilstand – bindemiddel – mikroriss	Tilstand – stålfiber	Tilstand – heft & avskaling	Referanse
<p><i>Åkebergveien:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– vurdert over heile skjæringa (Core 1, 2, 3 &amp;4 og flak 13 år)</li> <li>– visuelt vurdert (27 år)</li> </ul>	Dårleg til svært dårleg etter 27 år; Avskaling og svært omfattande krakelering	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Utluting TSA og PCD</li> <li>– Udispert SF</li> <li>– Lite/ikkje mikroriss</li> </ul>	God til lokalt dårleg m fullt nedbroten fiber. Betongflak henger i fiber ennå.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Avskaling på heftsona p.g.a. syreangrep (oksidasjon av alunskifer).</li> <li>– Avskaling internt i spr.bet. (TSA og PCD)</li> </ul>	<p>Hagelia &amp; Grønhaug (2000), Hagelia mfl (2001, 2003, 2011b)</p> <p>Varige konstruksjonar (Vedlegg 3)</p>
<p><i>Ekeberg tunnelen:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– 1730 H side mot Vålerenga (8 år)</li> <li>– 1700–1710 H side mot Sentrum (22 år)</li> <li>– 1815–1825 H side mot sentrum (22 år)</li> <li>– 1540–1590 mot sentrum (18 år)</li> <li>– 1625–1630 mot Vålerenga 1680–1690 V, 1700–1705 H, 1715–1725 V, alle mot Sentrum (alle 22 år)</li> </ul>	<p>God til noko svekka etter 22 år</p> <p>Sprekker og bom</p> <p>Teikn på deformasjonar i alunskifer/ svelling?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Utluting TSA og PCD SF dispersert</li> <li>– Lite til lokalt middels mikroriss</li> </ul> <p>Ingen detaljar rapportert</p> <p>Ingen detaljar rapportert</p>	<p>Svært god til lokalt korrosjon</p> <p>Ingen detaljar rapportert</p> <p>Ingen detaljar rapportert</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Rel. god heft til 8 år</li> <li>– Lokal avskaling og utluting etter 22 år</li> <li>Indikasjon på lokalt redusert heft</li> <li>Ingen detaljar rapportert</li> </ul>	<p>Hagelia mfl. (2001, 2011b), Mannvit (2015d) Vedlegg 3</p> <p>Multiconsult (2011)</p> <p>Pöyry (2015)</p>

Objekt – Pelnummer (betongalder)	«Allmenntilstand» ved siste undersøking på pelnummer	Tilstand – bindemiddel – mikroriss	Tilstand – stålfiber	Tilstand – heft & avskaling	Referanse
<i>Svartdalstunnelen:</i> – 320 stor nisje bak hvelv: H side mot Ryen (2, 8, 16 år)	Dårleg til svært dårleg etter 16 år. Avskaling og krakelering	– Sterk utlut- ing i hengen med kalk- stalaktittar –ingen/lite	God til svært dårleg	Sterkt svekka heft i betong < 4–5 cm. Syreangrep: Omfattande avskaling	Hagelia mfl. (2001), Hagelia (2011b), Mannvit (2015d), Gulland (2015),
– 320–380 hovudtunnelen bak hvelv: H side mot Ryen (2, 8, 16 år)	Svært god til litt svekka etter 16 år	– Svært god når betongen er tykk og ved god heft –ingen/lite	Svært god til litt dårleg	Svært god heft til litt svekka heft	Varige konstruksjonar (Vedlegg 3)
Observasjonar utanfor alunsona: – 440, 550, 670, 790, 840, 910 1020, 1130, 1255,1390 (16 år)	Variable effektar observert på overflata: utfellingar, utluting m.m.	Teikn på svekking i lekkasjeområde Biofilm m.m.	Dårleg i utvaska område i overflata	Ikkje undersøkt, men 1020 har dårleg heft	Mannvit (2015d)
– 540, 587, 825, 922 (18 år)	Utvaska betonglag 3–5 mm laust materiale.,	Muleg syrepåverknad	Dårleg i utvaska område i overflata	Ikkje undersøkt	Aas-Jacobsen (2016)

Tabell 4.12: Sprøytebetong i alunskifermiljø. Alle sementar er sulfatresistent sement (SR) med  $C_3A$  innhald på omkring 1 % og ferritt omkring 15 % (Stoltenberg-Hansen, NORCEM, samtale 2000). Basert på opplysningar frå Ole Fromreide (samtale 2000) og reseptar gitt i Vedlegg 3. Materialsammansetninga bygger på informasjon frå SF = silikastøv i % av sementvekt. AF 2000 er alkalifri akselerator. \*) = vannglas bare i verkstadnisje ved Pel 320.

Tunnel/Betong- alder/Opna	w/b	Pozzolanar	Akselerator	Sement	Bindemiddel (ekv.kg/m <sup>3</sup> )	Fiber	Design- styrke
Åkebergveien 1970 & 1987/?	0.50	SF, 5–10 %	Vannglas	SRPC	≈ 500	Stål	B45
Ekeberg tunnelen 1992/1995	0.45	SF, 8 %	Vannglas	SRPC	≈ 530	Stål	B45
Svartdalstunnelen 1998–99/2000	0.40	SF, 5 %	AF 2000 Vannglas *	SRPC	≈ 530	Stål	B40

Tabell 4.13: Kjemiske analysar (mg/L) av lekkasjevatt i alunskifermiljø (XSA) (ha = Hagelia mfl. 2003, Hagelia 2011b og Vedlegg 3 med analysar utført i Varige konstruksjonar), og eksponeringsklassar for metallkorrosjon. IA = ikkje analysert. Prøver av vatn frå bergmasse (B); vatn i kontakt med sprøytebetong (S) og vatn frå kalkstalaktittar på sprøytebetong (K), samt dam med biota (D). \*)= rekna frå total S..

Objekt/år/pel nr.	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Korrosjonsforhold	
						Karbonatisering	Tinesalt
<i>Åkebergveien</i> 2000 (ha): – Alunskifervatt (B)	7,60	1841	IA	110	29	XC4	XD3
2014 (ha): – Utfelling av gulgrøn forvitring med bl.a. jarositt på heftsona	2 – 3	–	–	–	–		
<i>Ekeberg tunnelen</i> 2000 (ha): – 1730 H side mot Vålerenga (B)	7,0	592	IA	20	10	XC2–XC3	XD0
– 1730 H side mot Vålerenga (K)	7,0	2031	IA	74	10	XC2–XC3	XD0
2014 (ha) – 1815 H side mot Sentrum (S)	11,9	288*	IA	0	IA	XC2–XC3	XD0
<i>Svartdalstunnelen</i> 2006 (ha) – 320 Nisje, H side mot Ryen (D)	6,84	541	0,10	21,4	18,7	XC2–XC3	XD0
– 370 Hovudtun. H side mot Ryen	IA	IA	IA	IA	IA	XC2–XC3	XD0
2014 (Vedlegg 3) – 320 Nisje, H side mot Ryen (D)	7,5	620	0	21	11	XC2–XC3	XD0
– 320 Utfelling av gulgrøn forvitring på heftsona; bl.a. jarositt (Vedlegg 3)	7,8 2 – 3	750 IA	0 IA	27 IA	16 IA	XC2–XC3 XC2–XC3	XD0 XD0

#### 4.5.1 Oppsummering av undersøkte lokalitetar i alunskifermiljø

Datagrunnlaget frå alunskifermiljø dekker opptil 27 års erfaring med moderne sprøytebetong. Sprøytebetong brukt som bergsikring i alunskifermiljø viser svært variabel grad av nedbryting på grunn av thaumasitt sulfatangrep, utlutning med utfelling av Popcorn kalsitt, delvis med omfattande avskaling på heftsona. Samanlikna med våre tidlegare undersøkingar (sjå kapittel 2.1.3 og 2.1.4) var nedbrytinga i 2014 lokalt mykje meir omfattande. Men det blei også registrert sprøytebetong i svært god tilstand etter forholdsvis lang tid. Hovudinntrykket i tunnelane er at sprøytebetong i alunskifermiljø bare delvis fungerer etter hensikta:

- Tilstanden varierer frå som oftast svært god og god til svært dårleg, med til dels kraftig krakelering og avskaling og tydeleg svekking av konstruksjonen. Det er snakk om nokså stor variasjon over korte avstandar.
- Overflatekarbonatisering er ikkje omfattande.
- Omvandlinga av sprøytebetong mot berg (Sone A) varierer, og omfattar Ca-utluting med thaumasitt sulfatangrep og utfelling av Popcorn kalsitt. Det er også lokalt registert sulfatangrep i den ytre betongen i Sone C under overflatekarbonatisering.
- Silikastøvet var i dei fleste tilfelle svært god dispergert og tyder på at betongen i utgangspunktet (ny) var relativt «tett».
- Det er observert oksidasjon av alunskifer nær heftsona nokre stader. Svovelsyre dannast ved oksidasjon av svovelkis og magnetkis med utfelling av forvitningsmineral inklusive jarositt fører til permeable heftsoner. Dette mineralet kan bare fellast ut frå svært surt vatn, og vitnar om lokal pH omkring 2–3 på nokre heftsoner.
- Ved god heft og nokså tørre forhold var omvandlinga mot berg praktisk talt ikkje merkbar (Gulland 2015).
- Auka permeabilitet i heftsona gir større nedbryting i Sone A.
- Relativt tykk sprøytebetong motverkar nedbryting, truleg fordi dette hindrar omfattande oksidasjon av underliggande alunskifer.
- Silikastøvet var i dei fleste tilfelle svært god dispergert og tyder på at betongen i utgangspunktet (ny) var er relativt «tett».
- Det er noko varierende omfang av mikroriss i sementlimet, som kan verke inn på nedbrytingsfarta generelt.
- Omfang av nedbryting aukar med aukande totalporøsitet, alder og vatn/bindemiddel forhold.
- Stålfiberkorrosjon er vanlegvis bare knytta til utstikkande fibrar og lokalt på sprekker men har lokalt større omfang i område med sterkt utluting mot heftsona (Sone A med kalsitt og thaumasitt). Inspeksjonen viste også tydeleg vekst av Fe-oksiderande biofilm blant anna ved pel 385H, 440V (Mannvit 2015d). Slik biofilm fører til auka stålfiberkorrosjon, men mulege effektar på betongen elles blei ikkje undersøkt.
- Resultata viser at variasjonar mht. geologiske og hydrogeologiske forhold i alunskifer er svært viktige, fordi dette påverkar syre- og sulfatpotensialet.
- Ved senking av grunnvatnet vil ein risikere omfattande oksidasjon av alunskifer over tunnelar (Bastiansen mfl. 1957), som kan føre til aukande nedbryting av sprøytebetong med tida.

Vegskjeringa i Åkebergveien blei sikra med sprøytebetong alt i 1970. Men etter 17 år var denne sprøytebetongen sterkt nedbroten og måtte fjernast. Denne betongen var nettarmert og basert på sulfatresistent Portlandsement (SR-sement), men utan tilsetning av silikastøv (Hagelia mfl. 2001). I følgje Alunskiferkomiteen burde SR-sement vere like motstandsdyktig som vanlege Portlandsementar tilsett silikastøv (Fiskaa mfl. 1971). Betongen frå 1970 var prosjektert som 10–12 cm tykk, men det viste seg at han var vesentleg tynnare (Jørn Grøndal, Oslo kommunes geotekniske kontor, pers. samtale 2001).

Ny og meir moderne betong med stålfiberarmering og silikastøv blei sprøyta opp i 1987 etter bortmeisling av den tidlegare betongen. Jørn Grøndal, Bane Nor (pers. samtale 2017) meiner

at denne betongen var prosjektert med vel 10 cm tykkelse. Det er denne betongen vi har fulgd opp sidan år 2000.

#### **4.5.2 Resultat frå strukturanalyse av betongkjerner**

Det er utført strukturanalyse inklusive undersøking av totalt 46 tynnslip. Tabell 4.14 viser korleis omvandling og nedbryting fordeler seg på ulike soner gjennom tverrsnittet av sprøytebetongen, slik det er definert i Kapittel 3.2.3. Standard betonganalysar blei utført i Varige konstruksjonar (Gulland 2015, Mannvit 2015d). Fiberinnhald, trykkstyrke, porøsitet og kloridverdiar er summerte i Tabell 4.15. Mannvit (2015d) rapporterte ikkje total tykkelse av kjernene for strukturanalyse og tynnslipmikroskopi. Vi har derfor estimert total tykkelse ut frå gjennomsnitts tykkelse av kjerner tatt ut rett ved. Dette er vist med understreking i Tabell 4.14 (eksempel 75 mm).

Nedbryting i Sonene A og C (S) representerer kjemiske reaksjonar som har gitt, eller vil føre til, mekanisk svekking. Sone B representerer hovudsakleg intakt betong, men viser av og til teikn på vasstransport (eksempelvis utfelling av sekundær portlanditt) med litt omvandling og utluting. Resultata er vist i foto og diagram (Figurane 4.17 til 4.46).

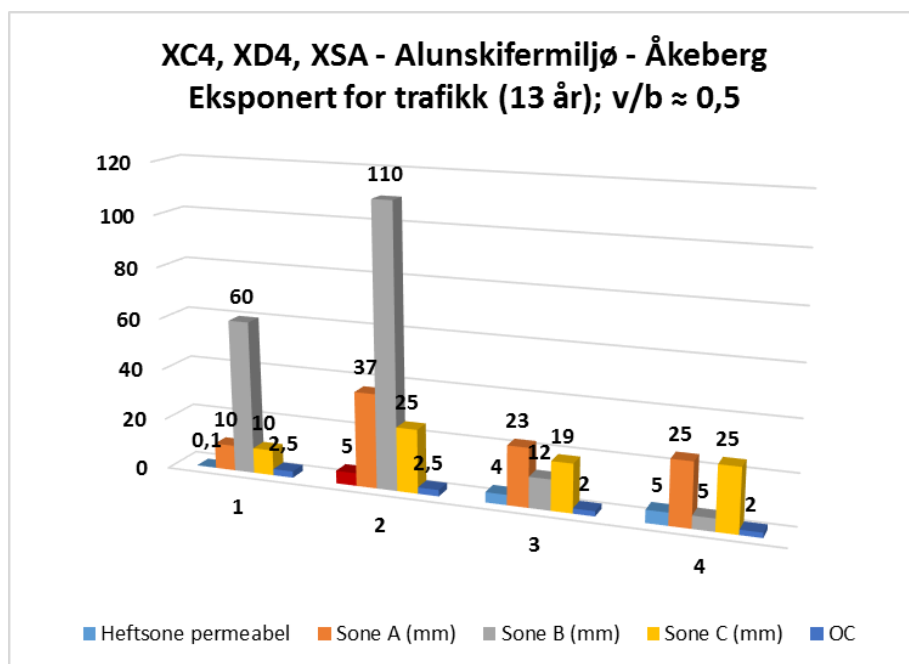


Tabell 4.14: Sprøytebetong i alunskifermiljø. Fordeling av omvandling i Sone A (mot berg), Sone B (meir eller mindre intakt) og Sone C (ytre betong mot overflata). Merk at det i blant er avvik frå dette med interne omvandla lag (også Sone A) og avskaling (S). TSA = thaumasitt sulfatangrep, PCD = Popcorn kalsitt utfelling og Ca-utluting, OC = overflatekarbonatisering. Ts/(antal) = undersøkt i tynnslip; Fn = undersøkt med fenolftalein for karbonatisering. m = resultat frå Mannvit (2015d); ha = Hagelia mfl. (2001, 2003, 2011b); gu = Gulland (2015), samt Vedlegg 3.

Objekt - Pel/prøvenr/Ts - total tykkelse	Heftforhold -Permeabel sone/ mm -Bergart & utfelling	Sone A (mm)	Sone B (mm)	Sone C under OC (mm)	Ytre Sone C med OC (mm)	Overflate- forhold ved prøvetaking
<b>Åkebergveien</b> 2000 (ha) - Core 1 Ts/2 & Ts/1 av heil kj. - 82 mm	-God-tørr/0,1 -Mænaitt Kalsitt-utf.	10	60 Ingen mikroriss	10 Utluta pasta	2,5	Fuktig/intakt overflate
- Core 2 Ts/3 & Ts/1 av heil kj. - 180 mm	Svak / S - Permeabel/ 5 -Alunskifer Syre: forvitram/ jarositt	37 TSA- PCD	110 Få-ingen mikroriss	25 Utluta pasta	2,5	Fuktig/intakt overflate
- Core 3 Ts/1 av heil kjerne - 60 mm	Svak/ -permeabel/ 4 -Alunskifer m/forvitring Kalsitt utfelt	23 TSA- PCD	12 Ingen mikroriss	19 Sterkt utluta pasta	2	Fuktig/intakt overflate
- Core 4 Ts/1 av heil kjerne - 60 mm 1987 spr. bet.	Svak/ -permeabel/ 5 - (mot rest av 1970 betong)	25 TSA- PCD	5 Ingen mikroriss	25 Utluta pasta m/PCD	2	Fuktig/intakt overflate
- 40 mm 1970 sprøytebetong- rest innerst mot alunskifer	Utfelling av kalsitt og thaumasitt på alunskifer	40 TSA- PCD	Ikkje representert	Ikkje representert	Ikkje representert	

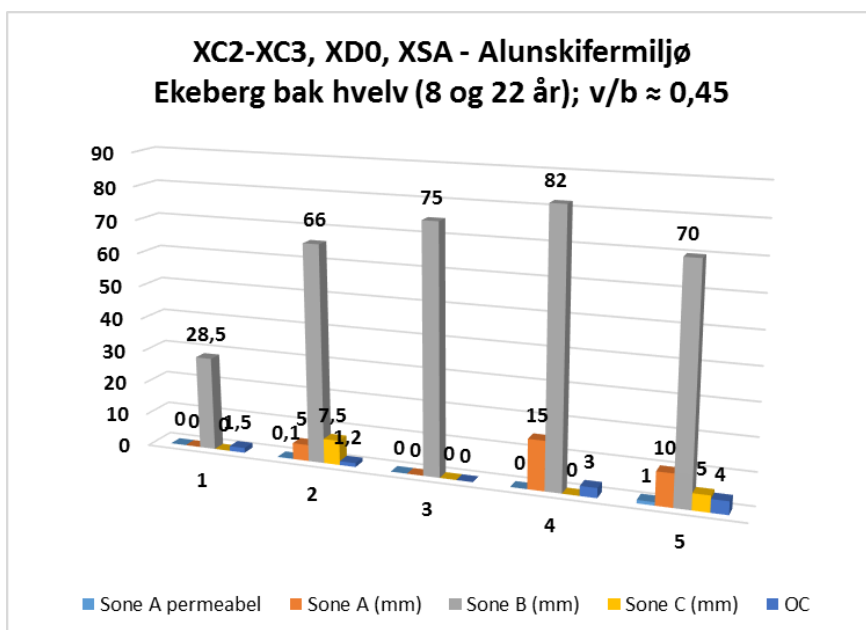
Objekt - Pel/prøvenr/Ts - total tykkelse	Heftforhold -Permeabel sone/ mm -Bergart & utfelling	Sone A (mm)	Sone B (mm)	Sone C under OC (mm)	Ytre Sone C med OC (mm)	Overflate- forhold ved prøvetaking
<b>Ekebergtunnelen</b> 2000 (ha): - 1730/Core 1 Ts/1 - 30 mm	-God-tørr/ 0 -Mænaitt	0	28,5 Middels mikroriss	0	1,8	Fuktig
- 1730/Core 2 Ts/4 - 80 mm	-Litt svak Perm/ 0,5 -Alunskifer Utf. kalsitt, thaumasitt	5	66 (litt TF- PCD litt ASR Middels mikroris	7,5	1	Fuktig
2014 (m): - 1700-24 Ts/2 - <u>75 mm</u>	-God-tørr/ 0 -ikkje utfelling Alunskifer	0	75 frisk utan mikroriss	0 -	Ikkje karbonatiserin g; Beskytta av utfelling!	Fuktig med ca. 1 mm tykk kalsitt-utfelling
- 1706-16 Fn - 95 mm	-Dårleg -Alunskifer	-	-	-	2	Tørt
- 1706-20 planslip - 100 mm	-Dårleg/ «0» -Alunskifer	15 S Porøs (PCD?)	82	0	3	Tørt
- <b>1706</b> Ts/1 <b>overflate- avskaling (5 flak)</b>	Ikkje observert	Ikkje observ.	Ikkje observ. -	40 S PCD/Cc utf Full fiber korrosjon	10-20 ca	Tørt
- 1815-2 Fn - 100 mm	Dårleg/? Alunskifer	-	-	-	2	Fuktig
- 1825 Ts/2 - <u>90 mm</u>	-Litt svak/ 1 -Alunskifer Permeabel Cc utf.	10 Fib.korr.	70 Mikro- riss porer	5 Kraftig utluta m PCD±TSA Fiberkorr. gel (ASR?)	4	Fuktig

Objekt - Pel/prøvenr/Ts - total tykkelse	Heftforhold -Permeabel sone/ mm -Bergart & utfelling	Sone A (mm)	Sone B (mm)	Sone C under OC (mm)	Ytre Sone C med OC (mm)	Overflate- forhold ved prøvetaking
<b>Svartdalstunnelen</b> <b>Generelt:</b>	<u>Alle prøver</u> <u>på alunskifer:</u>		<u>Få/ingen</u> <u>svinn-</u> <u>riss:</u>			
2000 (ha): - Core 320a Ts/2 - 50 mm	-Perm./ 0,1 -TF	1	47	0	2	Fuktig
- Core 320b Ts/3 - 50 mm	-God/0,1 -TF	2,5	45	0	2,5	Tørr
- Core 370a Ts/3 - 63 mm	-Perm./ 0,1 -TF	20 Utluta	39	0	4	Fuktig
- Core 370b Ts/2 - 110 mm	-God/ 0,1 -TF	8	100	0	2,5	Tørr
2006 (ha): - Core 320-O Ts/1 - 25 mm	-God/ 0,1 -TF	1 PCD	22,5	0	1,5	Fuktig
- Core 320N Ts/3 - 35 mm	Perm./ 0,5 -TF	0,5	33	0	1,5	Fuktig
- Core 370V Ts/4 - 130 mm	-Syre/ 0,5 -jarositt	10 PCD	120	0	1	Fuktig
- Core 370H Ts/3 - 100 mm	-God/ 0,1 -TF	5 TSA PCD	94	0	1,5	Fuktig
2014 (m): - 370-21 Ts/2 - 70 mm (Nær 370 H)	-Svært god/ 0 -ingen utf.	10 PCD TSA	58	0	2	Fuktig
- 370-22 Ts/2 - 75 mm	S: Svak/ 3 -Permeabel: -Syre,jarositt, gips	15 TSA PCD	56	0	1	Fuktig
- svart385-5 - 375 mm	-Svært god/0 -ingen utf.	0	373	0	2	Fuktig
2014 (gu): - 360 prøve 5 Ts/2 - 67 mm	-Svært god/0 -ingen utf.	0,1 TSA	66	0	2	Tørr
2014 (ha): - 320 avskaling krakelering og fuktig nisje med kraftig utluta betong i hengen (mange kalk- stalaktittar)	Ekstremt dårleg Permeabel: Syre/	10-20 TSA PCD	20-30 Svekka Pga TSA	10-15 Utfelling av gips og thaumasitt (Vedlegg 3)	3	Permament våt

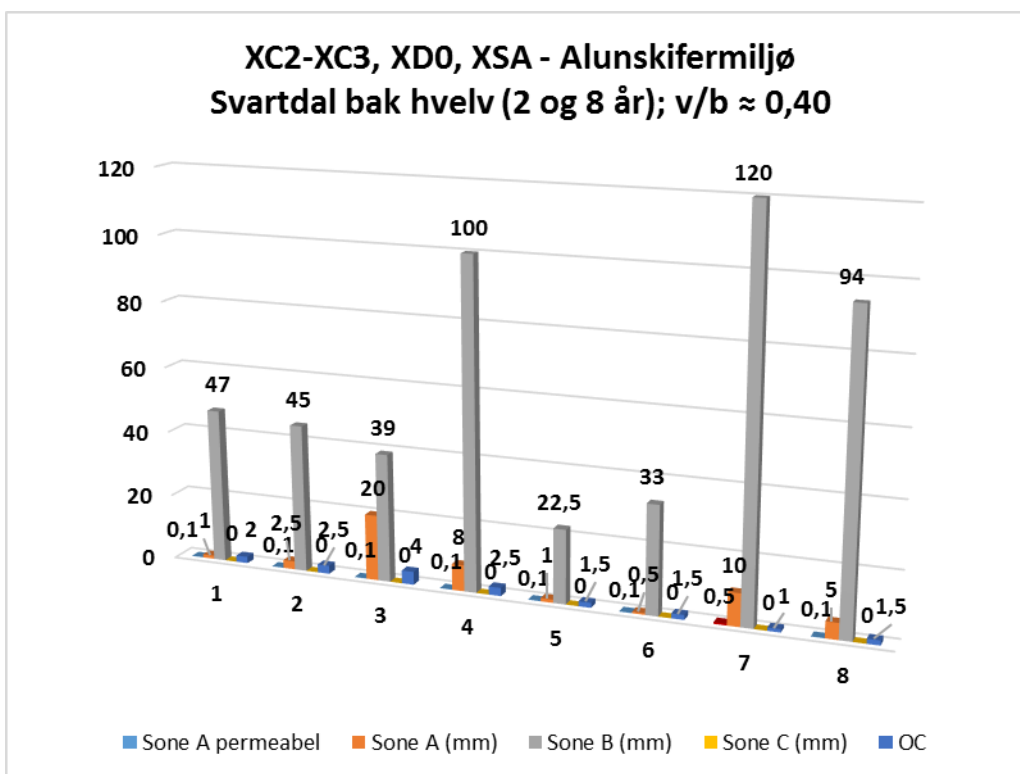


Figur 4.17: Fordeling av omvandling i 13 år gammel SR-betong med silika i Åkebergveien (samla i år 2000). Permeable heftsoner (mm) med påverknad av svovelsyre er farga rødt (Core 2 og Core 3; nr 2 og 3). Heftsona i Core 4 (nr 4) var mot rest av sprøytebetong frå 1970), men utan syrepåverknad. Core 1 (nr 1) mot syenitt hadde ikkje syrepåverknad. OC = overflatekarbonatisering.

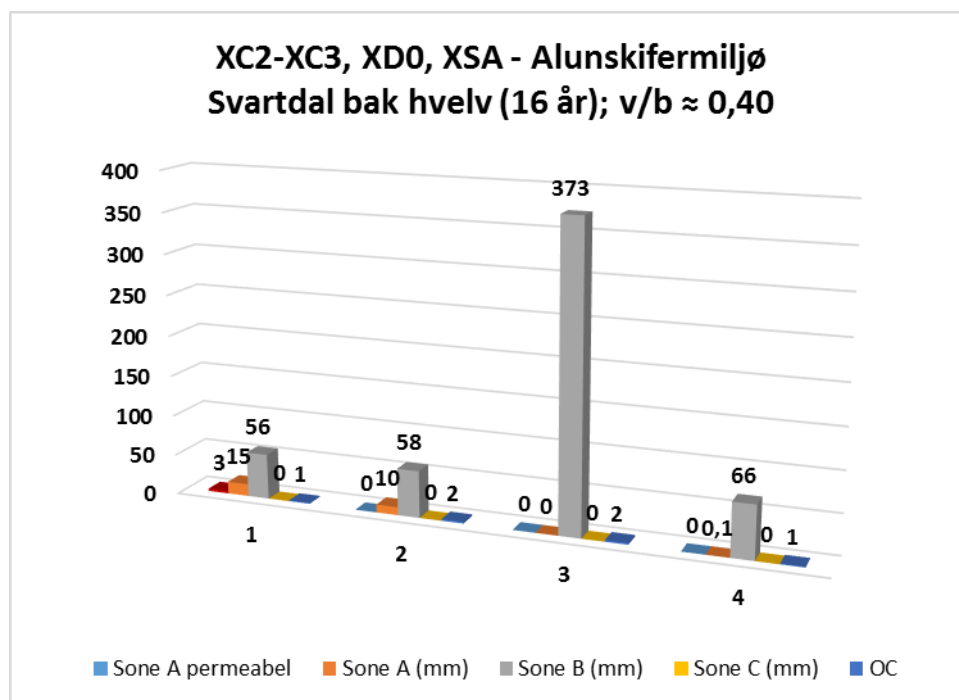
Figur 4.17 t.o.m. 4.20 viser korleis omvandlinga gjennom tverrsnittet av betongen fordeler seg på dei ulike sonene. For dette meir aggressive miljøet er også breidda til permeable heftsoner illustrert, slik det står fram i tynnslip. Det er vidare skild mellom omfang av utlutning m.m. i Sone C *under* overflatekarbonatiseringa (OC).



Figur 4.18: Fordeling av omvandling i 8 år gammel (nr 1 og 2) og 22 år gammel SR betong med silika. Symbol som i Figur 4.17.

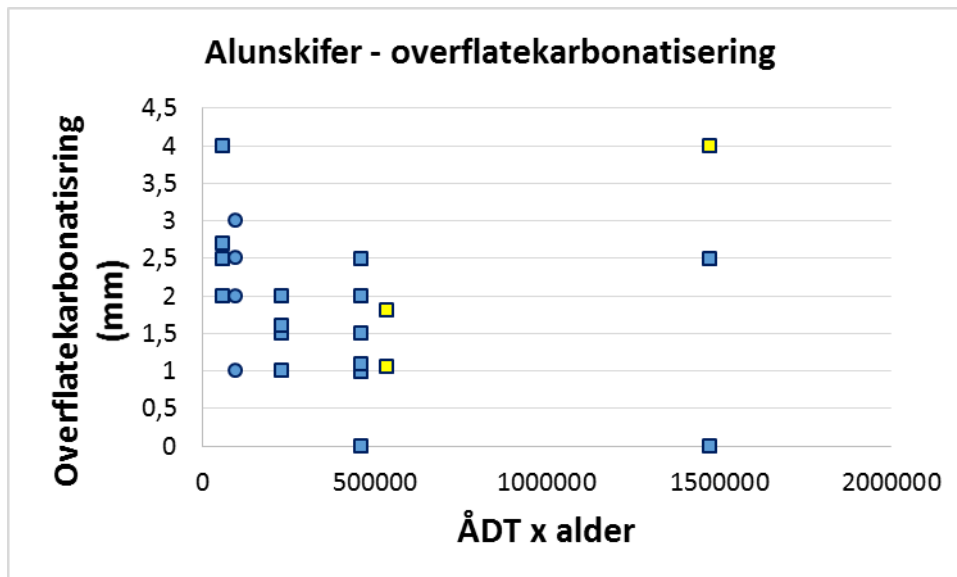


Figur 4.19: Fordeling av omvandling i 2 år gammel (nr 1-4) og 8 år gammel (nr 5-8) SR betong med silika. Symbol som i Figur 4.17.

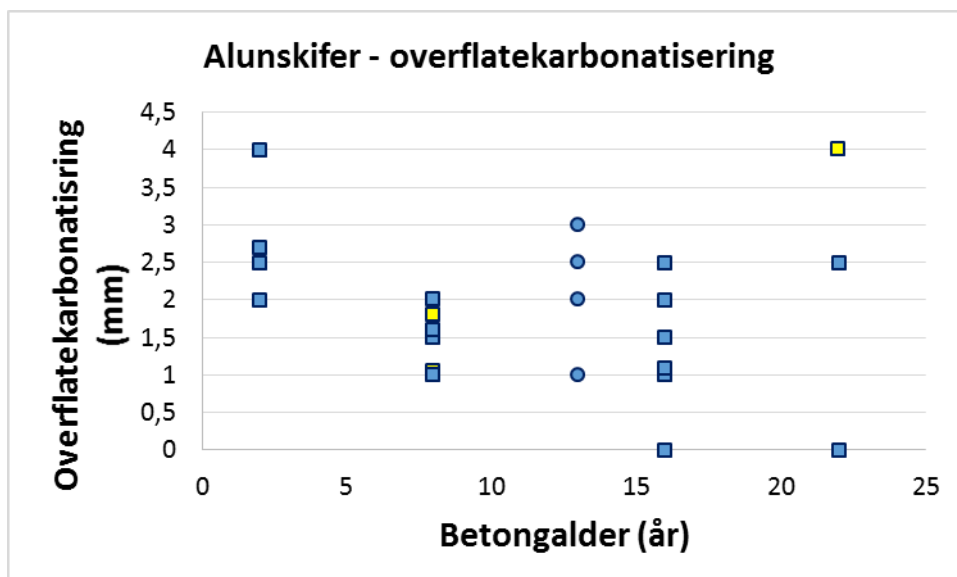


Figur 4.20: Fordeling av omvandling i 16 år gammel SR betong med silika. Symbol som i Figur 4.17.

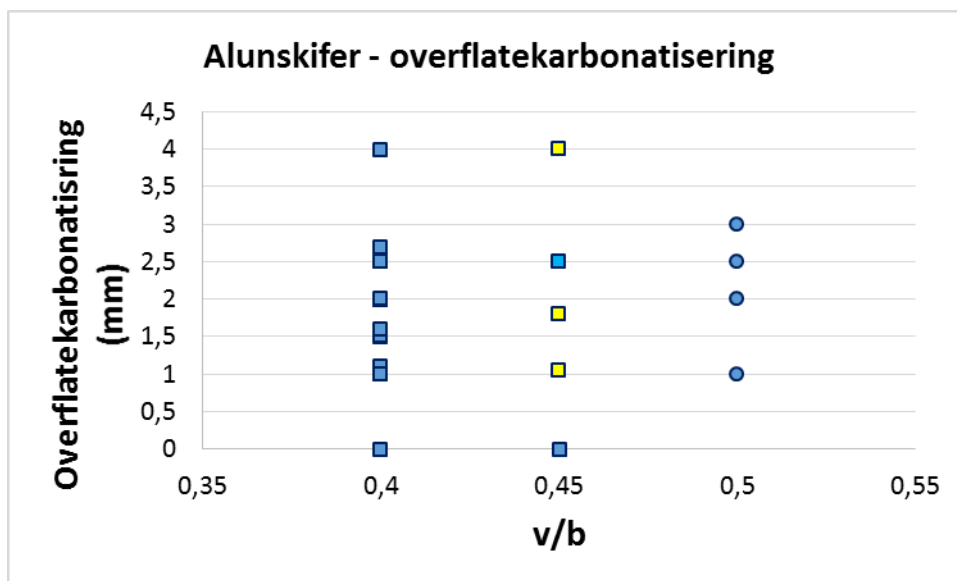
Figurane 4.21 til 4.23 viser *overflatekarbonatisering* plotta mot akkumulert trafikkmengde, betong alder og v/b-tal (vatn/bindemiddel). Sirkulære symbol representerer Åkebergveien som er direkte eksponert for trafikk, medan Ekebergtunnelen og Svartdalstunnelen er sprøytebetong bak hvelv utan direkte kontakt med avgassar frå trafikken (kvadratiske symbol). Betongane var oftast utan tydelege primære mikroriss, med unntak av tre prøver.



Figur 4.21: Overflatekarbonatisering og akkumulert trafikkmengde i Åkebergveien, Ekebergtunnelen og Svartdalstunnelen. I dei fleste tilfelle var det lite eller ingen teikn på mikroriss (blå). Gule symbol er prøver med innslag av middels mikroriss. Kvadratiske symbol = sprøytebetong bak hvelv; sirkulære symbol = eksponert for trafikk (Åkebergveien).

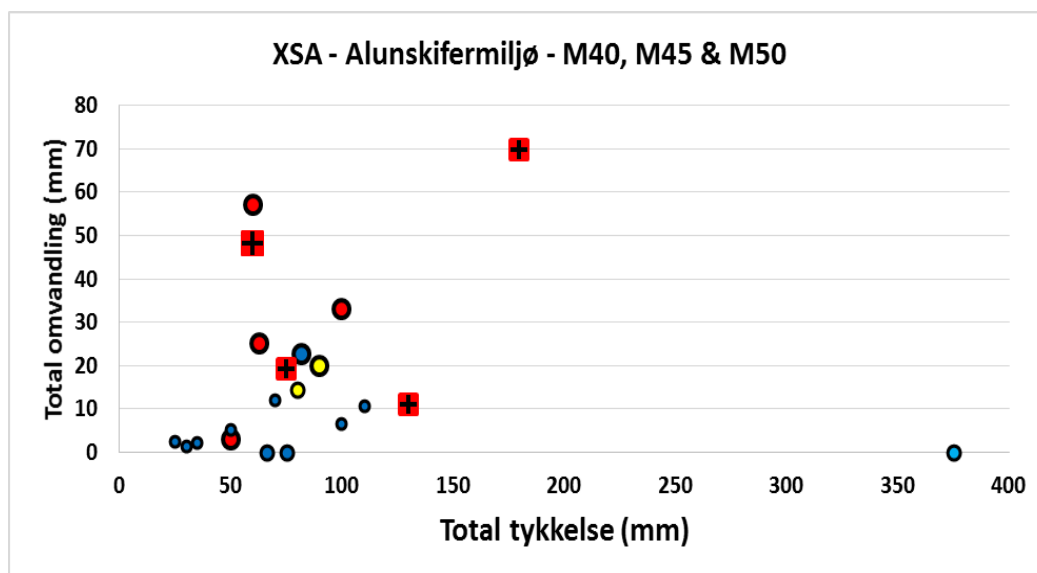


Figur 4.22: Overflatekarbonatisering og betongalder. Symbol som i Figur 4.21.

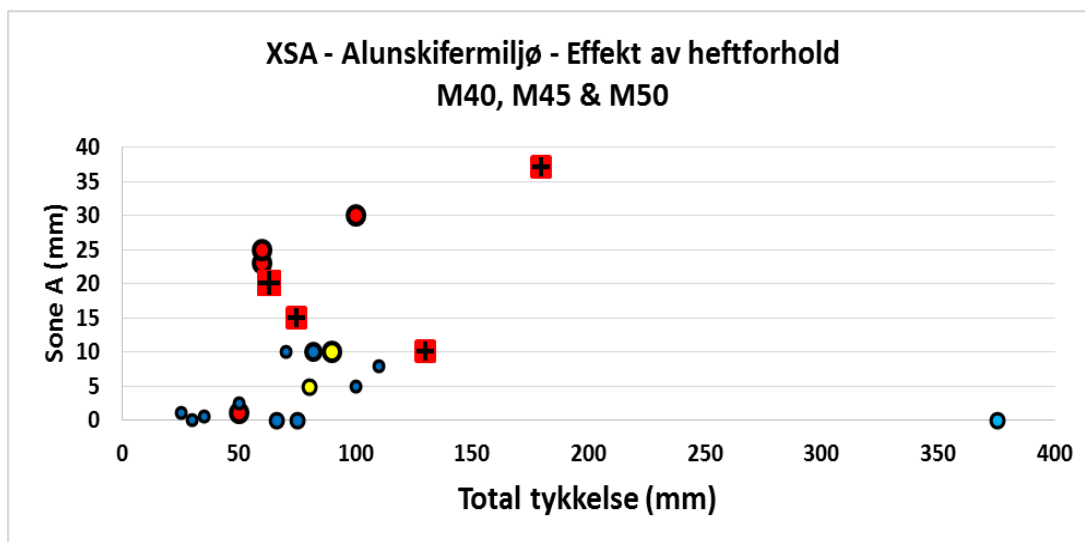


Figur 4.23: Overflatekarbonatisering og vatn/bindemiddelforhold (v/b). Symbol som i Figur 4.21.

Omfanget av overflatekarbonatisering varierer mellom 0 og 4 mm, og er uavhengig av trafikkbelastning, betongalder og v/b. 13 år gammel sprøytebetong med høgste v/b = 0,5 viser variasjon mellom 1 og 3 mm medan betongane med lågare v/b har størst variasjon. Dei to prøvene med djupast overflatekarbonatisering (4 mm) er 2 år (v/b = 0,4) og 22 år (v/b = 0,45). Tilsvarende er dei to prøvene utan overflatekarbonatisering hhv 16 år og 22 år. For Ekeberg tunnelen med v/b = 0,45 er dei to med høgst overflatekarbonatisering (2,5 og 4 mm) begge 22 år. Betong med mikroriss indikerer likevel ein muleg samanheng med betongalder (8 år med mellom 1 og 2 mm, mot 22 år med 4 mm). Sjå datagrunnlaget i Tabell 4.14.



Figur 4.24: Total betongtykkelse plotta mot total omvandling (Sone A, Sone C og overflatekarbonatisering) i forhold til total. Blå symbol = god heft/lite- ikkje permeabel; Gule = litt svekka heft/litt permeabel; Raude sirklar = dårleg heft/permeabel; Raude firkanta = dårleg heft/permeabel med effektar av svovelsyre. Resultat frå mikroskopering av tynnslip (sjå tekst).



Figur 4.25: Omvandling i Sone A i forhold til total tykkelse. Betongalder 2, 8, 13, 16, og 22 år. Symbol som i Figur 4.24.

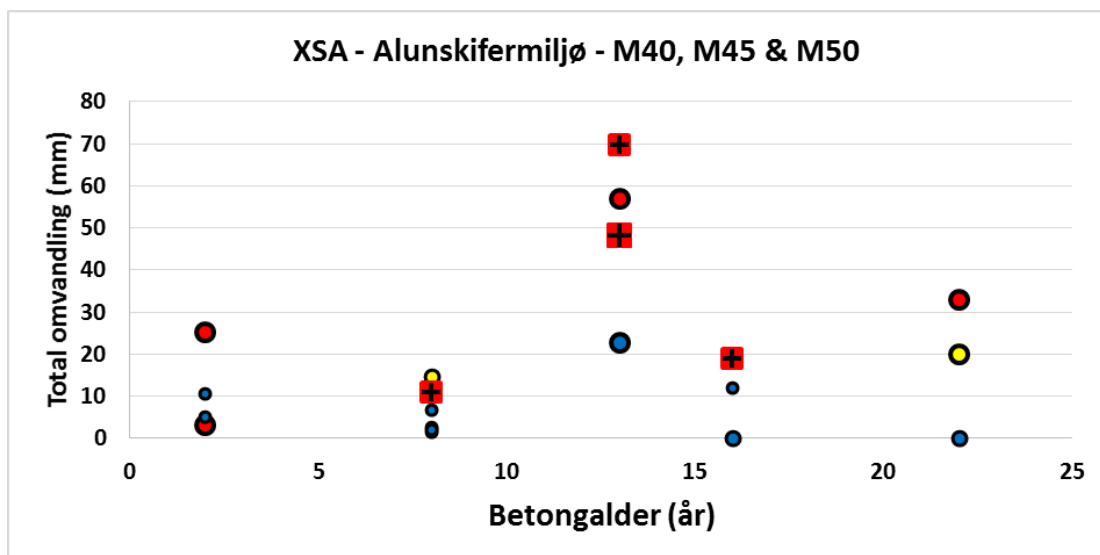
Figurane 4.24 og 4.25 viser at mesteparten av *omvandling og nedbryting er nært knytt til Sone A og forhold på heftsona*. I diagramma er det skild mellom a) god heft med liten eller ingen permeabilitet, b) litt svekka heft med teikn på permeabilitet, c) dårlege heftsoner med permeabilitet og d) dårlege permeable heftsoner med svovelsyre. Utfellingar på heftsona er nokså vanleg (Tabell 4.14). Effektar av svovelsyre er tydelege på nokre heftsoner, med oppløysing av sementlimet i kontakt med forvitningsmineral som Fe-oksyhdroksid og jarositt. Desse forvitningsminerala blir danna ved oksidasjon av svovelkis (pyritt) og magnetkis (pyrrhotitt) i alunskifer, som samtidig frigjer svovelsyre (Figur 4.37). I prøve 370-22 frå 16 år gammal sprøytebetong i Svartdalstunnelen var det også utfelt relativt store gipskrystallar på heftsona, som er typisk for syreangrep på betong basert på Portlandsement (Mannvit 2015d).

Sprøytebetong med *god heft og liten eller ingen permeabilitet på heftsona viser minst omvandling og nedbryting* (sjå også Figur 4.38 og 4.39): Omvandlinga i Sone A varierer frå 0 til maksimalt 10 mm i sprøytebetongsjikt på mellom 25 mm og 375 mm (betongalder 2, 8, 16 og 22 år).

*Sprøytebetong med dårleg og permeabel heftsona viser størst omvandling og nedbryting*. Omfanget i Sone A mot alunskifer varierer mellom ca. 5–10 mm og opp til snaue 40 mm. Thumasitt sulfatangrep og Ca-utlutning med og utan syreangrep i Sone A gir potensielt mest svekking der aggressivt vatn har god tilgang. To prøver med litt dårleg heft og litt permeabel heftsona viser omvandling på 5 og 10 mm etter hhv. 8 og 22 år.

Sone C under overflatekarbonatiseringa korrelerer ikkje med omfanget av Sone A, noko som gir svært varierende utslag på den totale omvandlinga (samanlikne Figur 4.24 med 4.25).





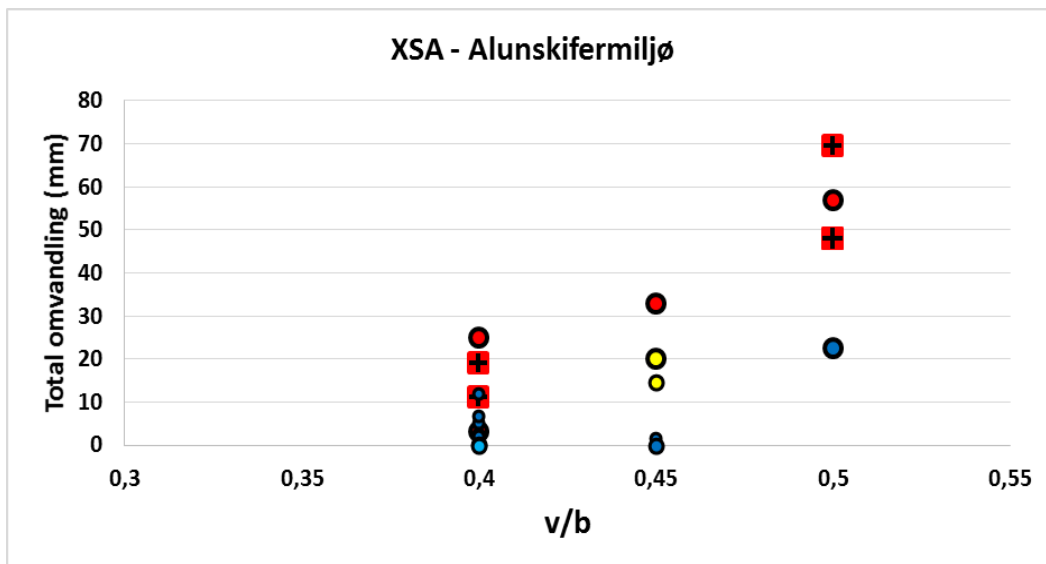
Figur 4.26: Total omvandling (summen av heftzone, Sone A, Sone C og overflatekarbonatisering og betongalder. Symbol som i Figur 4.24.

Figur 4.26 viser total omvandling som funksjon av betongalder. Det er tydeleg at sprøytebetong med generelt god heft og liten eller ingen permeabilitet er mindre nedbroten enn dei med generelt dårleg heft og permeable heftsoner. Bidraget til omvandling og nedbryting er størst i Sone A, med unntak av Åkebergveien (13 år) der omvandling i Sone C også er omfattande. Det er *ikkje muleg å definere ein klar empirisk utviklingstrend med utgangspunkt i denne tidsserien*. Årsaka er at heftforholda, tilgang på aggressivt vatn, tykkelse varierer sterkt og gir varierende lokale effektar. v/b-talet er også viktig (Figur 4.27–4.28).

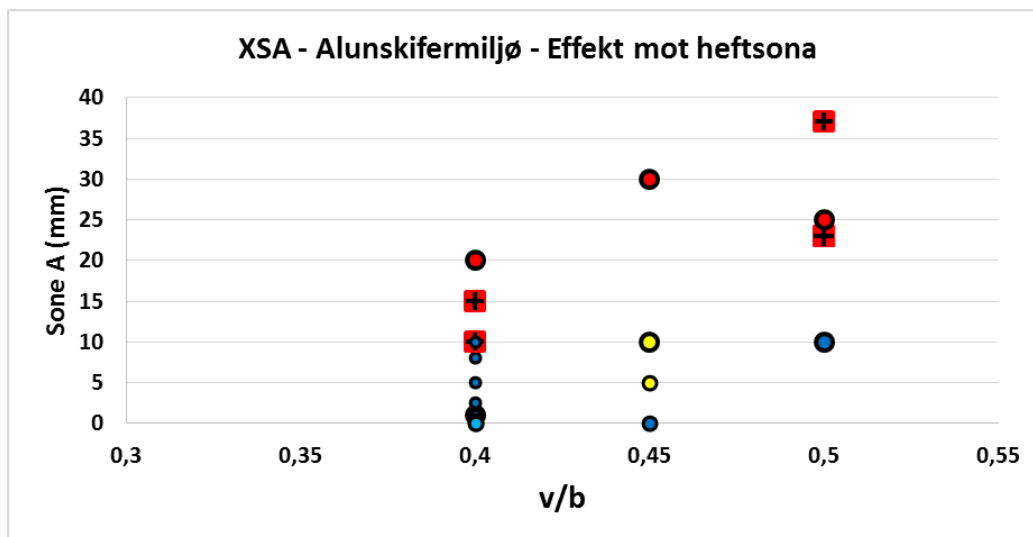
Det er likevel tydeleg at *så lenge det er god heft og tilgangen på aggressivt vatn er avgrensa eller fråverande* aukar ikkje nedbrytinga vesentleg med tida fram til 22 år. Dette er illustrert i Figur 4.37 t.o.m. Figur 4.39: Gulland (2015) undersøkte sprøytebetong i området omkring Pel 360 m i Svartdalstunnelen (M40). Han påviste at der heft mellom alunskifer og berg var svært god var thaumasitt sulfatangrepet bare sporadisk utvikla innan ei svært tynn sone (< 1 mm) mot skiferen og stålfiberen var fullstendig intakt. Motsett har Hagelia mfl. (2001) vist at thaumasitt sulfatangrep hadde ein viss effekt etter mindre enn 2 år i sprøytebetong der heftsona mot alunskifer er permeabel, med lokal fiberkorrosjon i kontakt mot utfelt kalsiumkarbonat.

Dersom surt vatn med svovelsyre trenger inn på heftsona med tida vil nedbrytinga auke på: Først i Sone A mot den oksiderande alunskiferen og etter kvart også frå overflate dersom aggressivt lekkasjevatt trenger gjennom sprøytebetongsjiktet. Motsett, dersom innverknaden av aggressivt lekkasjevatt minkar over tid vil nedbrytingsraten også minke.

Figur 4.27 og 4.28 illustrerer effekten av dei ulike heftforholda samanlikna med dei vatn/bindemiddel forholda. Dette viser at omvandling og nedbryting, både totalt og i Sone A aukar nokså systematisk med aukande v/b-tal. Tendensen er først og fremst definert av sprøytebetong med dårleg heft, men er også antyda av prøver med god heft utan permeabilitet på heftsona. Prøvene frå Ekeberggtunnelen (v/b = 0,45) viser systematisk auka omvandling og nedbryting i takt med aukande permeabilitet på heftsona og svekka heft.



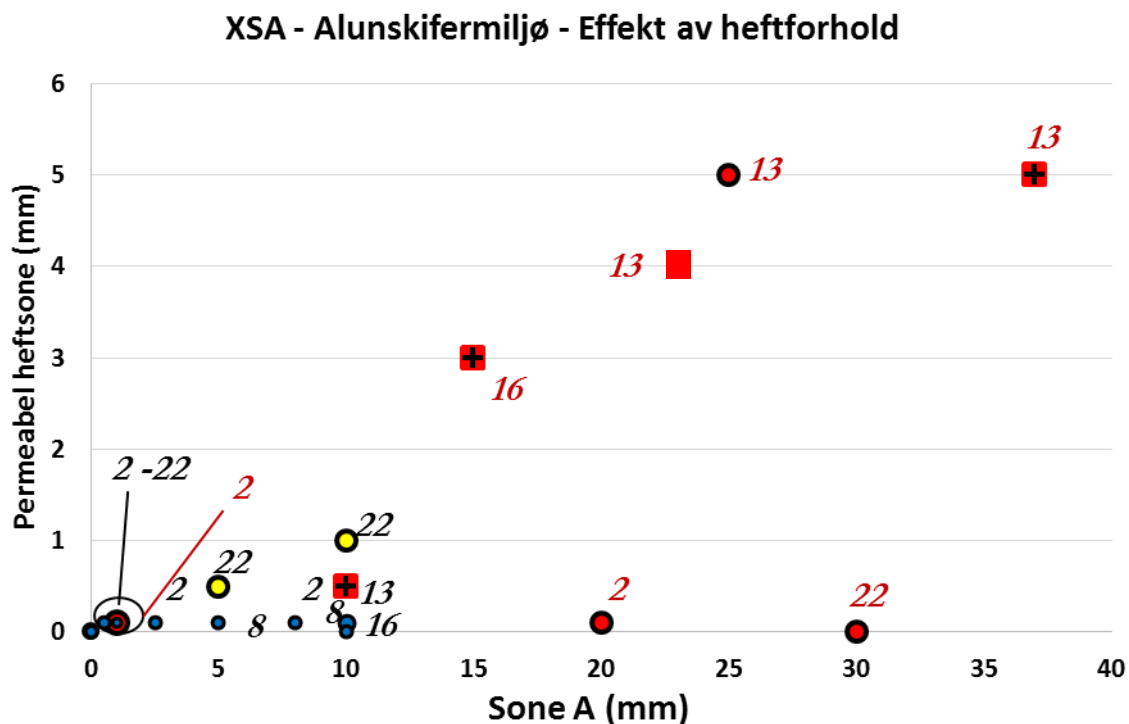
Figur 4.27: Total omvandling (summen av heftsoner, Sone A, Sone C og overflatekarbonatisering ved tre ulike vatn/bindemiddelforhold. Symbol som i Figur 4.24.



Figur 4.28: Omvandling i Sone A mot heftsona ved tre ulike vatn/bindemiddelforhold. Symbol som i Figur 4.24.

Opninga i mm mellom sprøytebetong og alunskifer er grovt kvantifisert i tynnslip (2D) og viser tydeleg skilnader på betong med og utan permeable heftsoner. Figur 4.29 viser at *omvandling i Sone A i stor grad kan knytast til opninga på heftsona*. Det er klart at sprøytebetong med svært liten eller ingen opning på heftsona ikkje gir svært mykje omvandling etter 22 år (5–10 mm). Sprøytebetongen i Åkebergveien ( $v/b = 0,50$ ) med opne og til dels syrepåverka heftsoner hadde størst omvandling og nedbryting i Sone A alt etter 13 år (sjå elles om avskaling etter 27 år i kapittel 4.5.3). Det er også eksempel på betong med tynn permeabel heftsona (utan syre) som har hatt tilsvarende stor omvandling med utluting, thaumasitt og Popcornkalsitt: Ei prøve frå Ekeberggtunnelen ( $v/b = 0,45$ ) viste 30 mm omvandling i Sone A etter 22 år og ei prøve frå Svartdalstunnelen ( $v/b = 0,40$ ) viste opptil 20 mm omvandling i Sone A etter bare 2 år.

Resultata tyder på at den ulike graden av omvandling og nedbryting er avhengig av fleire variablar. Tykkelsen på den permeable heftsona seier noko om kor mykje aggressivt vatn som kan strøyme gjennom, men ikkje kor mykje og kor lenge slikt vatn er verksamt. Det er ikkje usannsynleg at nedbrytinga på ulike plassar startar opp på ulike tidspunkt, avhengig av vekslende tilgang på aggressivt vatn, med og utan svovelsyre (dvs. forvitringstilstand og oksygentilgang til alunskifer). Dette er diskutert vidare i Kapittel 6.



Figur 4.29: Omvandling i Sone A plotta mot opening på heftsona, med oppgitt betongalder for kvar kjerne. Symbol som i Figur 4.24.

### 4.5.3 Stålfiberkorrosjon

Omfanget av stålfiberkorrosjon er (så langt) *mindre* enn den totale omvandlinga. Fiberkorrosjon er observert i tilknytning til overflatekarbonatisering (OC), samt i Sone C og Sone A. Korrosjonen har i dei fleste tilfelle likevel ikkje ført til full nedbryting av fiberen. Korrosjon er mest utvikla i kontakt med karbonat danna frå atmosfærisk CO<sub>2</sub> og Popcorn kalsitt danna ved Ca utluting frå sementlimet ved inntrenging av bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) frå grunnvatnet. Det er ikkje observert stålfiberkorrosjon i Sone B.

### 4.5.4 Resultat frå standard betonganalyse

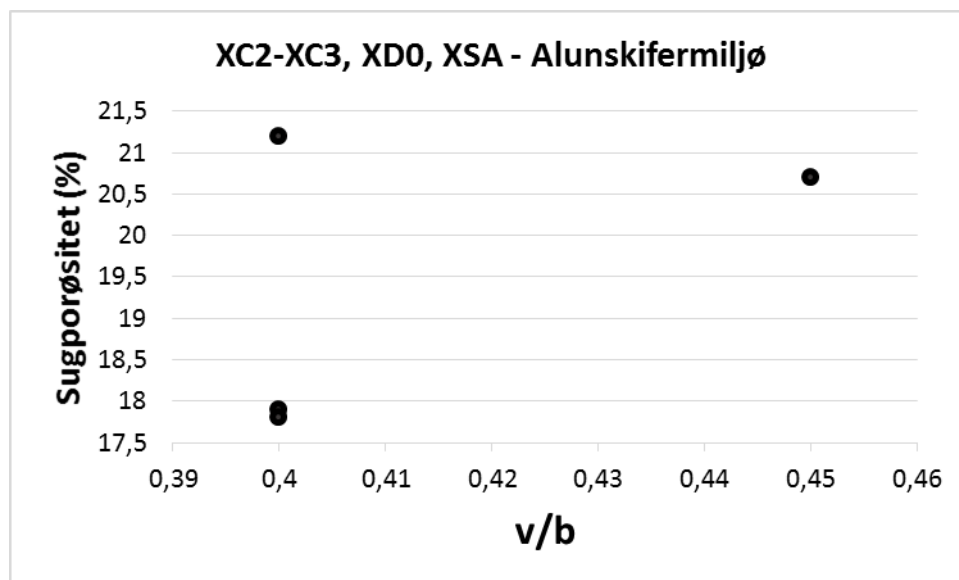
Hovudresultata frå Ekeberg tunnelen og Svartdalstunnelen er summerte i Tabell 4.15. Det blei ikkje utført analyse av kloridinntrenging fordi sprøytebetongen ikkje står i kontakt med tinesalt i trafikkrommet.

Tabell 4.15: Tunnelar i alunskifermiljø. Fiberinnhald, trykkstyrke, sugporøsitet og total porøsitet. Resultat frå Mannvit (2015d) med unnatak av Svartdal - pelnummer 360 (gu =Gulland 2015). Gjennomsnittsverdiar (n = antal kjerner).

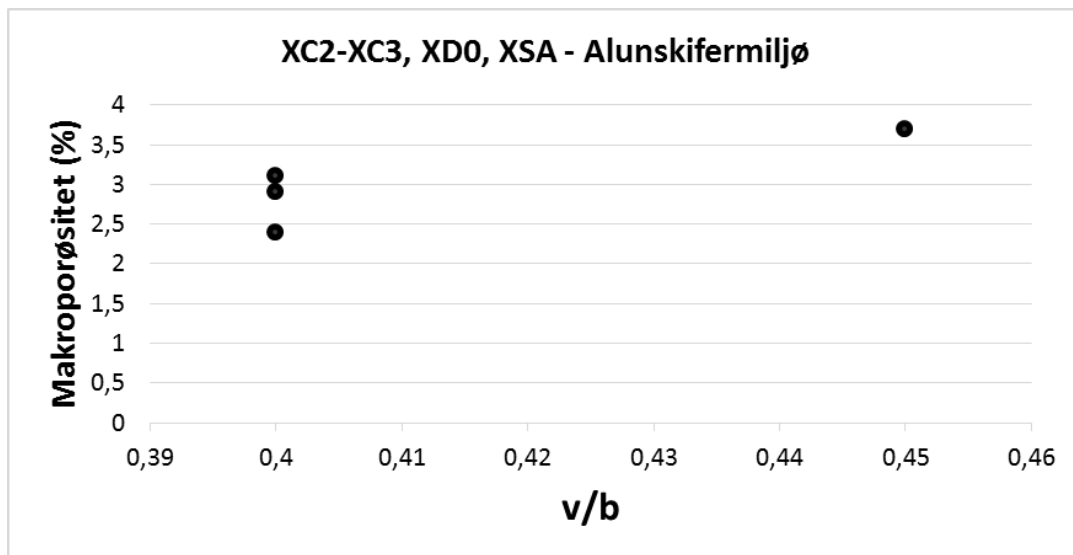
Tunnel - pelnummer (år testa)	v/b som bygd	Fiberinnhald (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkstyrke Sylinder H/D=2 (MPa)	Sugporøsitet (%)	Total porøsitet (%)
Ekeberg - 1705 (2014)	0,45	46,6 (n=3)	35,8 (n=3)	20,7 (n=4)	24,4 (n=4)
Svartdal - 360 (2014) (gu)	0,40	19,5 (n=8)	28,5 (n=4)	17,9 (n=5)	20,8 (n=5)
- 370 (2014)	0,40	35,2 (n=3)	41,4 (n=3)	21,2 (n=5)	23,6 (n=5)
- 385-5 (2014)	0,40	20,7 (n=3)	46,3 (n=3)	17,8 (n=5)	20,9 (n=5)

Figur 4.30, 4.31 og 4.32 viser porøsitetsverdiene plotta mot v/b-tal. Vi har bare tilgang på fire analysar frå hhv. Svartdalstunnelen (3) og Ekebergstunnelen (1). Dersom ein ser bort frå eitt punkt med høgst porøsitet (Svartdalstunnelen) ser det ut til å kunne vere ein viss samanheng mellom porøsitetsverdiene og v/b-tal. Dette er også venta reint teoretisk.

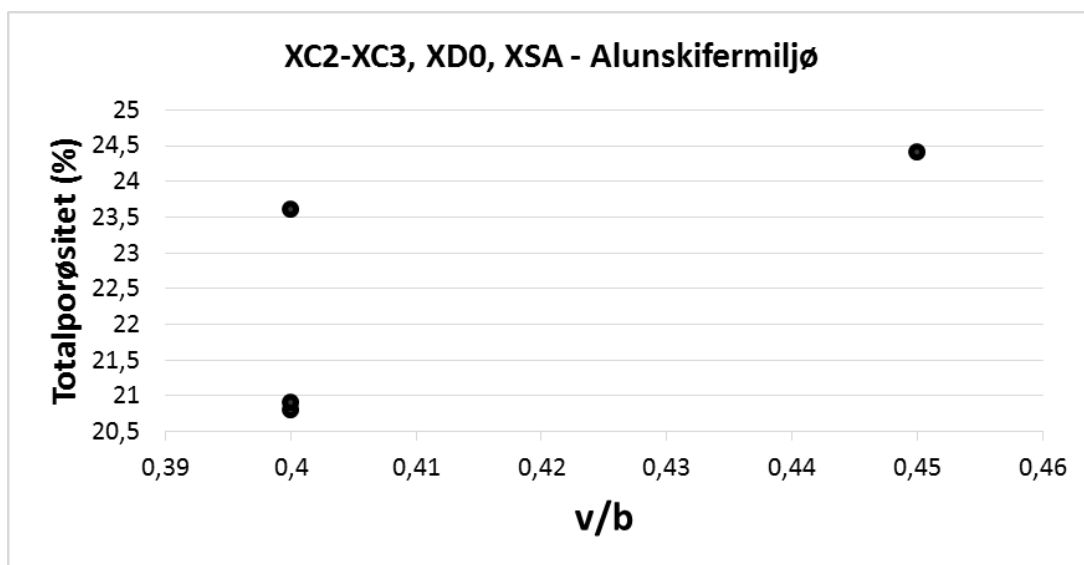
Figur 4.33 viser gjennomsnittleg totalporøsitet plotta mot gjennomsnittleg omvandling og nedbryting i Sone A i prøver frå kvar av dei fire lokalitetane (fleire målingar bak kvart punkt). Totalporøsiteten gir ein perfekt positiv lineær korrelasjon mot mm omvandling i Sone A. Sugporøsitet (Figur 4.34) for same prøvene gir også ein lineære korrelasjon, men med noko dårlegare tilpassing til lineær modell. Det er venta at aggressivt vatn har størst nedbrytande effekt i betong med relativt høge gjennomsnittlege porøsitetsverdiar.



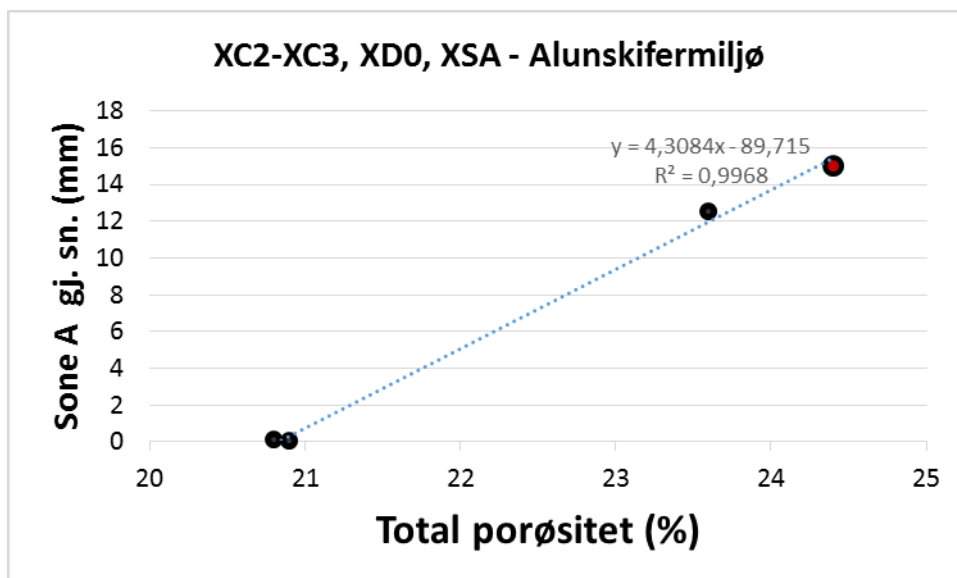
Figur 4.30: Sugporøsitet ved to ulike vatn/bindemiddelforhold: Svartdalstunnelen (16 år) og Ekebergstunnelen (22 år). Begge har omtrent likt bindemiddelinnhald (ca. 520 kg/m<sup>3</sup>).



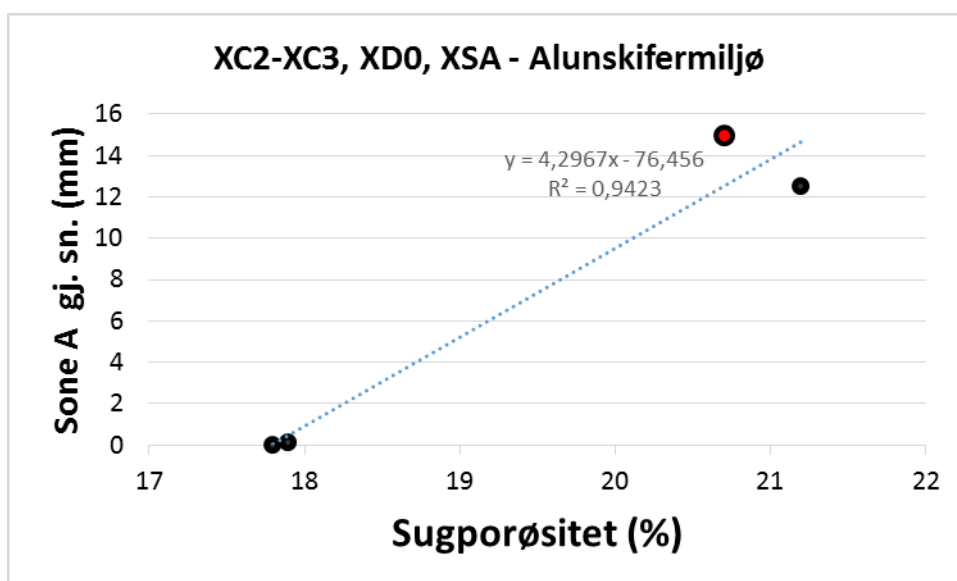
Figur 4.31: Makroporøsitet ved to ulike vatn/bindemiddelforhold: Svartdalstunnelen (16 år) og Ekeberg tunnelen (22 år).



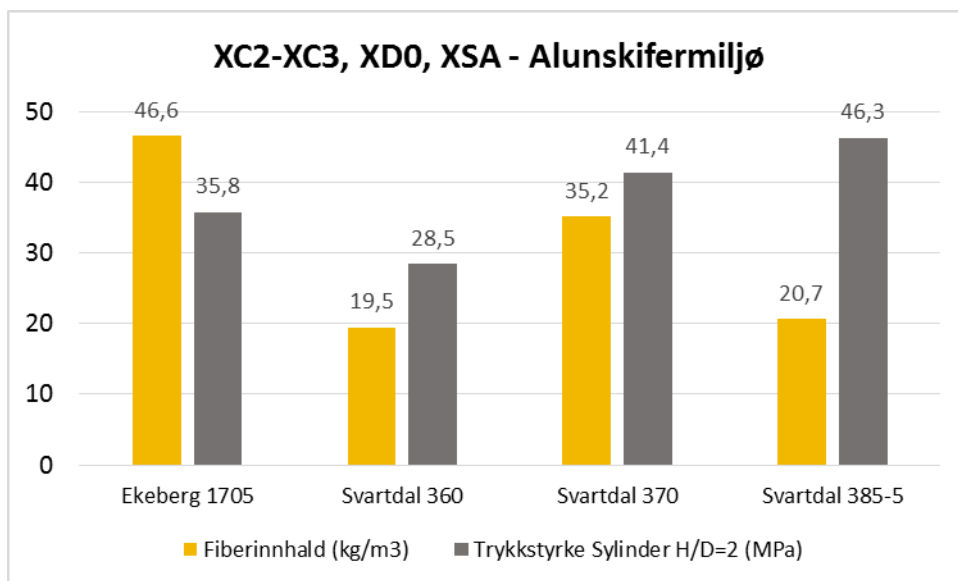
Figur 4.32: Totalporøsitet ved to ulike vatn/bindemiddelforhold: Svartdalstunnelen (16 år) og Ekeberg tunnelen (22 år).



Figur 4.33: Totalporøsitet gir signifikant positivt korrelasjon mot omvandling i Sone A. Plottet er basert på gjennomsnitt av lokalitet 1706 i Ekeberg tunnelen ved betongalder 22 år (rød) og lokalitetene 360, 370 og 385 i Svartdalstunnelen ved betongalder 16 år.

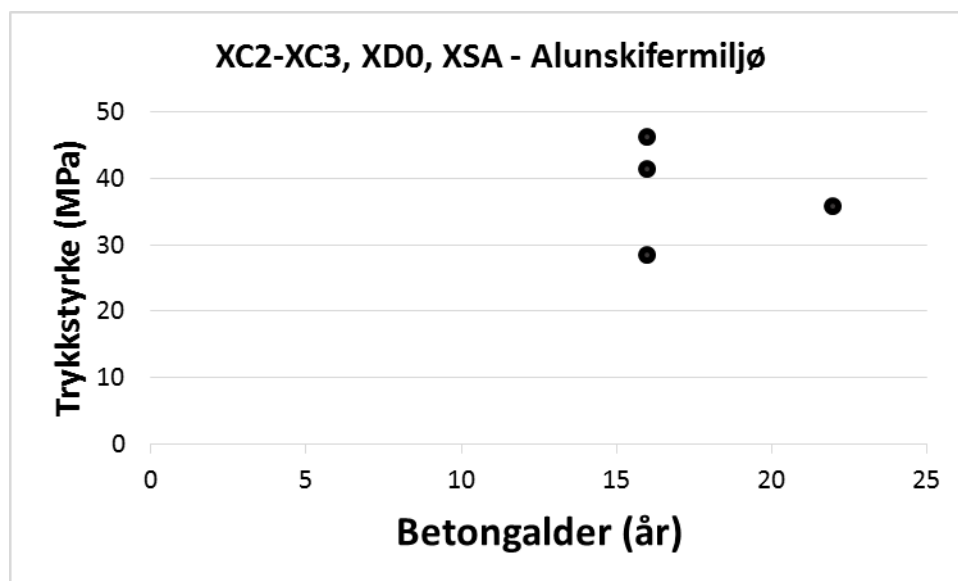


Figur 4.34: Sugporøsitet gir positivt korrelasjon mot omvandling i Sone A, men litt dårlegare enn for totalporøsitet. Same prøver som i Figur 4.33.

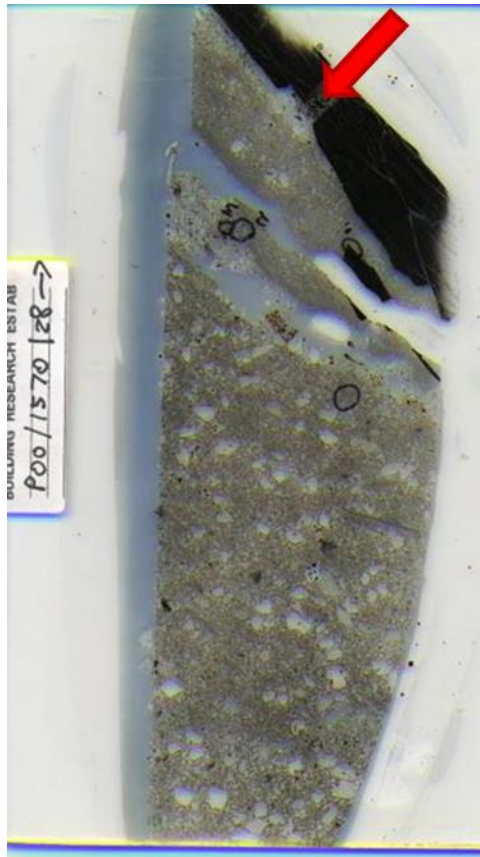


Figur 4.35: Fiberinnhold og trykkstyrke, eksempel frå Ekeberg tunnelen og Svartdalstunnelen .

Figur 4.35 viser fiberinnhold og sylindrefastheit for dei same fire lokalitetane. Det er ingen opplagt samanheng mellom styrke og stålfiberinnhold og ikkje tilstrekkeleg datagrunnlag for å hevde at det har vore endringar over tid (Figur 4.36).



Figur 4.36: Betongalder plotta mot trykkstyrke. Ekeberg tunnelen og Svartdalstunnelen.

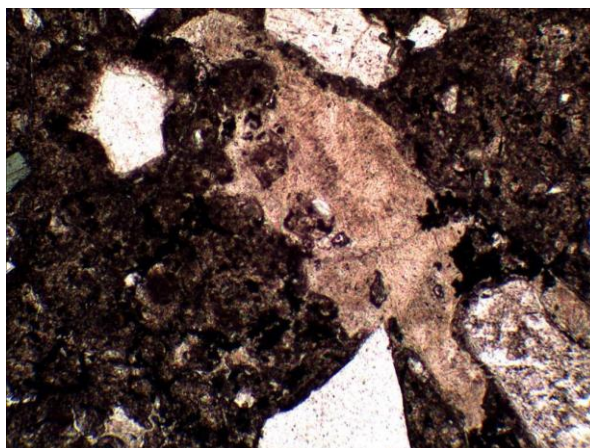


Figur 4.37: Eksempel på nedbryting pga. dårleg heft. Core 2 Åkebergveien av 13 år gammal SR-betong. Heftsona mot alunskifer (svart) er opa i eit område ved brune forvittringsmineral inklusive jarositt i alunskifer (pil), og hadde klare teikn på syreangrep. Lengste bildekant, ca. 180 mm). Foto: BRE-Garston, Storbritannia.



Figur 4.38: Eksempel på intakt sprøytebetong på grunn av svært god heft mot alunskifer i Svartdaltunnelen (betongalder: 16 år). Ikkje-reagerte svovelskorn < 1 mm frå heftsona (pilar). Resultat & foto, Jon Gulland (2015).





Figur 4.39: Svært liten effekt av *Thaumasitt* sulfatangrep (beige område) i sementpasta < 1 mm frå heftsona i betong med svært god heft. Tynnslip i dobbeltpolarisert lys. Bildebreidde = 200 $\mu$ m (Jon Gulland, 2015).

#### 4.5.5 Effektar av avskaling, krakelering og utvasking i Ekebergtunnelen, Åkebergveien og Svartdalstunnelen

Kapittel 4.5.2 omtalar omvandling og nedbryting med utgangspunkt i kjernemateriale. I tillegg er det observert *lokale område med visuelt svært tydeleg avskaling og utvasking* av sprøytebetong på alunskifer:

Figur 4.40. viser eksempel på *kombinert utvasking og avskaling* i Ekebergtunnelen. På denne lokaliteten var det relativt tynn betong (2–3 cm) og pH = 11,9 i det lokale lekkasjevatnet var svært høg. Dette tilsvarar vatn i kontakt med portlanditt (Ca(OH)<sub>2</sub>) og viser tydeleg utvasking av portlanditt i sementlimet, dvs. sprøytebetong som er i ferd med å brytast ned. Den høge pH-verdien forklarar også korfor eksponert stålfiber nær heftsona og på sprekkar er fullt intakt. Stålfiberen i ytre overflata, i kontakt med fuktig luft og karbonatisert betong, er derimot kraftig korrodert. Det er også registrert oppsprekking i samband med svelling i alunskifer på pelnummer 1835 (Vedlegg 3).



Figur 4.40: Ekebergtunnelen – Pel 1815 med avskaling. Stålfiberen i riss og sprekkar er heilt intakt på grunn av pH = 11,9 . Det lokale lekkasjevatnet er sterkt påverka av høg pH vaska ut frå betongens porevatn. Sprøytebetongen her er i ein tidleg fase av nedbryting. Stålfiberen på overflata i kontakt med fuktig luft og karbonatisert pasta er kraftig korrodert.



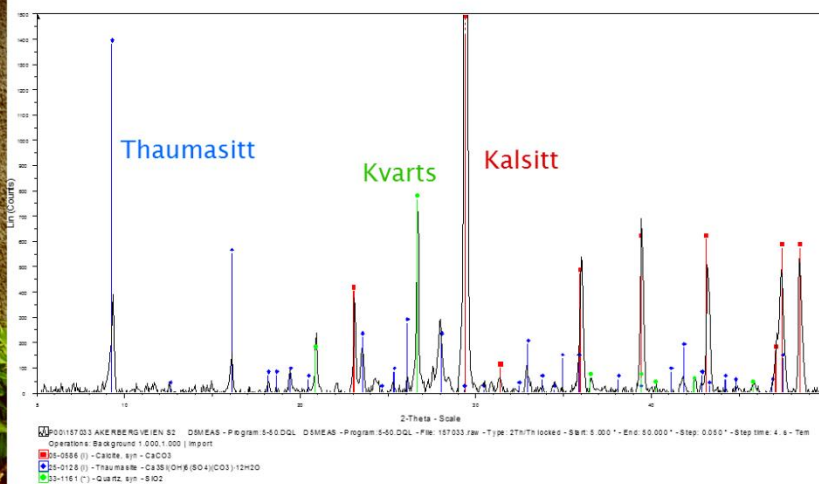
*Figur 4.41: 13 år gammel betong: Intern avskaling langs fullstendig nedbrote 1–3 cm sjikt (øvt-venstre). All stålfiber bortkorrodert: fullskala TSA og PCD: Utfelling av jern-oksyhdroksid frå enkelte sprekker elles lite oppsprukken (øvt-høgre). 27 år gammel betong: Intern avskaling hadde auka kraftig, samt med omfattande krakering over store deler av skjeringa. Foto Per Hagelia.*

Figur 4.41 viser endringar i avskalingsomfang i Åkebergveien over tid, med illustrasjon av viktige detaljar (Figur 4.42 og 4.43). Arealet med tydeleg avskaling knytt til mest omfattande thaumasitt sulfatangrep hadde auka kraftig frå betongalder 13 år til betongalder 27 år (Figur 4.44). Alunskiferen bakom er utsett for oksidasjon av svovelkis og magnetkis og danner syre som delvis har svekka heftsona.

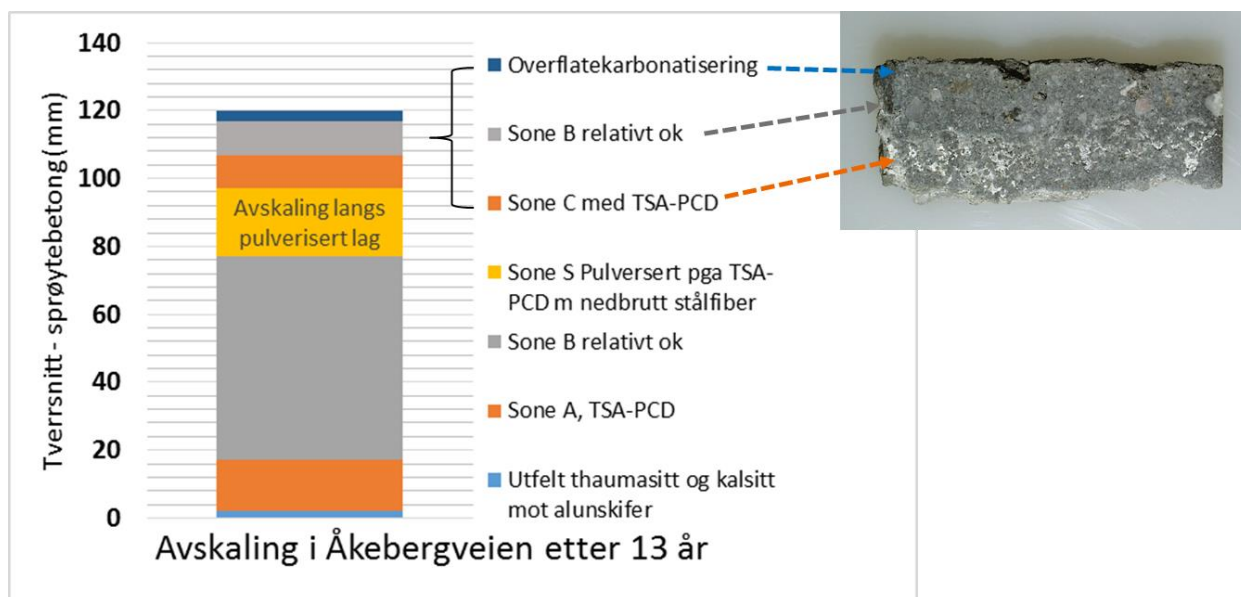
Omfanget av krakering av sprøytebetong hadde også auka, frå omkring 10 % i 2000 til 50 % i 2014 (Figur 4.45). Under er det gitt ei vurdering av restlevetida av sprøytebetongen i Åkebergveien.



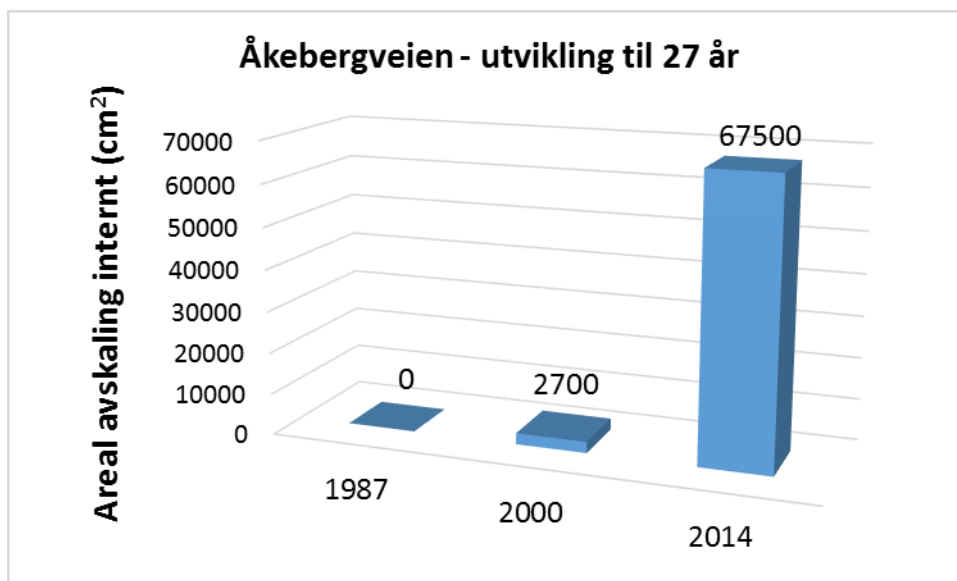
Figure 1. XRD plot for Akerbergveien Cutting Sample 2



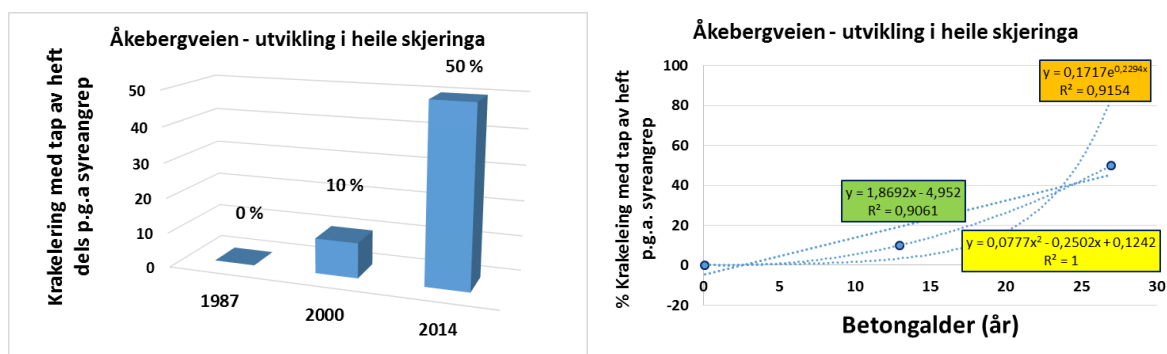
Figur 4.42: Åkebergveien Oslo, år 2000. Avskaling av stålfiberarmert sprøytebetong langs ei ca. 20 mm sone av fullstendig pulverisert betong av thaumasitt, kalsitt og kvarts. Stålfiberen var totalt omvandla til rust.



Figur 4.43: Åkebergveien Oslo, år 2000. Avskaling av stålfiberarmert sprøytebetong langs ei ca. 20 mm sone av fullstendig pulverisert betong av thaumasitt, kalsitt og kvarts. Stålfiberen var totalt omvandla til rust.



Figur 4.44: Den interne avskalinga har auka kraftig etter år 2000.



Figur 4.45: Omfanget av krakelering av sprøytebetongen i Åkebergveien låg på ca. 50 % etter 27 år. Figuren til høgre viser tre ulike regresjonar (lineær, eksponentiell og polynomisk). Same data i begge diagramma. Sjå teksten for vurderingar av muleg vidare utvikling.

Figur 4.45. tyder på at vidare krakelering og avskaling på grunn av syreangrep er aukande. Plottemåten i figuren til venstre kan tyde på at nedbrytinga aukar eksponentielt, men når ein plottar riktige tidsintervall mot krakelingsomfang (høgre diagram) ser det ut til at polynomisk tilnærming gir meir realistisk bilde. Også lineær utvikling er muleg å tenke seg. Med utgangspunkt i dei tre empiriske modellane (høgre diagram) er det rekna ut følgjande: Polynomisk modell (gul) gir 100 % krakelering/avskaling over heile skjeringa etter 37,5 år; eksponentiell modell (oransje) og lineær modell (grøn) gir 100 % krakelering/avskaling etter hhv. 27,7 år og 56 år.

Grunnlaget for utrekningane er spinkelt, og føresetnaden er i alle tilfelle at effekten av deformasjonar og syreproduksjon ved sulfidoksidasjon er nokolunde likt fordelt over heile skjeringa. Visuelt vurdert er derimot krakeringa kommen såpass langt at levetida neppe vil overskride 30–35 år. Ein bør derfor utføre ein grundig inspeksjon i lys av lokal personsikkerheit med tanke på muleg nedfall av sprøytebetong. Betongflaka som er i ferd med å bli avløyste er enkeltvis på godt over 100 dm<sup>3</sup>, og tilsvarar 200 til 300 kg.

#### 4.5.6 Laus betong knytta til alunskifermiljø og prekambrisk gneis

I samband med rehabiliteringsprosjekt i Svartdalstunnelen er det rapportert om fleire førekomstar av *laus utvaska betong på overflata, også der tunnelen går gjennom prekambrisk gneis* nærmare Ryenkryssset (Aas-Jacobsen, 2016). Pelnummera er summerte i Tabell 4.16.

Undersøkingane til Mannvit (2015d) viser også at laus betong på sprøytebetongoverflater i gneis. Mannvit rapporterte om fleire lokalitetar med mørke og lyse utfellingar på betongoverflata og auka stålfiberkorrosjon.

*Tabell 4.16: Rapporterte område med utvaska eller laus betong i Svartdalstunnelen. Bergart er basert på geologiske registreringar under tunneldriving (Hval 2000).*

Tunnel	Pelnummer	Bergart
Svartdalstunnelen	540 V side mot Ryen	Bandgneis med amfibolitt
	587 V side mot Ryen	Bandgneis med amfibolitt
	825 V side mot Ryen	Gneis udifferensiert
	922 H side mot Ryen	Gneis med leire på sprekker



*Figur 4.46: Laus betong på sprøytebetong i austgåande løp i Svartdalstunnelen: Pel 587 venstre side (venstre bilde) og pel 922 høgre side (høgre bilde). Merk lyse område med kalsitt: Foto: Knut Boge, Geovita AS.*

Det er utført mineralidentifikasjon ved XRD på fire av prøver av laus overflatebetong frå Svartdaltunnelen (Tabell 4.17 og Vedlegg 3). Mesteparten av minerala (90–97 %) representerer fint tilslag av kvarts, plagioklas, alkalifeltspat, pyroksen, amfibol, glimmer og kloritt. Elles er det 2–9 % kalsitt. Prøvene frå pel 825V og 922H inneheld spor av svovelkis (< 1%) og sistnemnte også 1 % dolomitt.

Tabell 4.17: Resultat frå XRD på prøver av laus betong i Svartdalstunnelen. Analysen blei utført på kornfraksjon < 0,295 mm. (sjå Vedlegg 3).

Prøve ID	Fint tilslag (%)	Karbonat	Svovelkis	Farge	Tykkelse	Vatn i prøva
540V	91	9	0	Mørk grå	3–4 mm	fuktig
587V	95	5	0	Mørk grå (olivengrønt preg)	4–5 mm	fuktig
825V	97	2	< 1	Gråsvart	3–4 mm	fuktig
922H	90	9	< 1	Mørk grå	3 mm	Grått vatn- pH≈7 (pH-papir)

pH blei målt til ca. 7 i grått vatn frå prøve 922H. Dette er i samsvar med pH-buffring av kalkspat. Det faktum at sementpastaen er vaska ut tyder derimot på gjennomstrøymande lekkasjevatt, sannsynlegvis i kombinasjon med syreangrep. Det er tidlegare vist at sementpasta som er påverka av svovelsyre frå alunskifer bryter ned og at endeproduktet ofte er kalsitt og andre karbonat (Hagelia mfl. 2001, 2003; Hagelia og Sibbick 2009).

Ole Fromreide (samtale 25 oktober, 2000) fant at pH i lekkasjevatt frå gneisar, minst 100 meter frå alunskifer under driving av Ekeberg tunnelen ofte var surare enn i lekkasjevattet frå alunskifer. Dette tyder på at det også kan vere ei kjelde til forsuring i gneisen.

Hval (2000) rapporterte at *gneis i Svartdalstunnelen ved pel 692 (Sentrum –Ryen) var impregnert med pyritt*. Det er ikkje usannsynleg at slik pyritimpregnering kan vere årsaka til lokalt låg pH i lekkasjevatt frå gneis. *Vi kan derfor ikkje sjå bort frå at sprekketrykningar av svovelkis i gneis også kan representere eit bidrag til nedbryting, og derfor bør sprekkemineralane alltid identifiserast i samband med vurderingar av bestandigheit.*

## 4.6 Undersjøiske miljø

### Eksponeeringsklassane XC2–XC4, XS3, XD1–XD3, XA2–XA3

Sprøytebetong i undersjøisk miljø er undersøkt i seks undersjøiske tunnelar. All sprøytebetong er våtsprøyta med noko varierende reseptar (Tabell 4.19). Flekkerøytunnelen, Byfjordtunnelen og Freifjordtunnelen er tidlegare undersøkte både i programmet «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar» (sjå Davik 1997b, med referansar) og som del av ein PhD-studie (Hagelia 2011b). Freifjordtunnelen og Oslofjordtunnelen blei, i tillegg til PhD-studiet, også undersøkte i etatsprogrammet Moderne vegtunnelar (Holm 2011a, b, c).

Varige konstruksjonar la vekt på vidare undersøkingar og oppfølging i Flekkerøytunnelen (Mannvit 2015f), samt undersøkingar i Frøyatunnelen og Sløverfjordtunnelen (Mannvit 2015a, b). Tunnelane blei valde ut med vekt på muleg framtidig oppfølging av tilstandsutviklinga. Det vil vere muleg å følgje opp dei undersøkte lokalitetane i framtidige FoU-program.

Varige konstruksjonar sendte i 2013 ut ein førespurnad til alle regionane om tilstandsutviklinga i namngjevne undersjøiske tunnelar som tidlegare var undersøkt i Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler. Med unnatak av ein fyldig rapport frå Bye og Kynningsrud (2015) om Hvalertunnelen fekk vi ingen konkret respons frå regionane.

Tabell 4.18 gir ein enkel oversikt over tilstanden på dei undersøkte pelnummera, medan Tabell 4.21 gir ein meir detaljert dokumentasjon av forhold på heftsona og nedbrytingsomfang på tvers av sprøytebetongsjiktet for kvar undersøkt prøve.

#### Nedbrytingsmekanismar i undersjøisk miljø:

*Saltvassangrep med vekslende innslag av biofilm; omfattar klorid- og magnesium inntrenging, thaumasitt sulfatangrep, utluting m. Popcorn kalsitt og syredannande Mn-Fe biofilm*

Eksponeringsklassar (NS-EN 206):

- Korrosjon på grunn av karbonatisering = XC4 (XC2–XC3 bak hvelv)
- Korrosjon i kontakt med sjøvatn = XS3
- Korrosjon på grunn av tinesalt = XD3 (XD1 bak hvelv)
- Kjemisk angrep frå grunnvatn = XA3 (lokalt XA1 og XA2)

Eksponeringsforholda er dokumenterte ved kjemiske analysar av lekkasjevatt i Tabell 4.20. I tidlegare arbeid (Hagelia 2008a,b) blei det vurdert at belastning med tanke på karbonatisering og kontakt med vatn i *gjennomsnitt* låg omkring XC2 («Vått sjeldan tørt») og XS2 («Permanent neddykka»). Standarden seier likevel at, dersom det er lokale variasjonar, skal ein velje den mest aggressive klassa for heile konstruksjonen.

Sjølv om dette tilsynelatande er riktig klassifisering i samband med byggjeprojekt er det også klart at dette ikkje blir svært nyansert. International Tunneling and Underground Space Association (ITA) har peika på at det er nødvendig å skaffe fram komplett informasjon om eksponeringsforholda, inklusive kjemisk analyse av vatn (Franzén et al. 2001). I Varige konstruksjonar er det derfor lagt vekt på å nyansere meir, innan termane til NS-EN 206.

Eksponeringsklassar for korrosjon på grunn av karbonatisering er sett til XC2–XC3 for sprøytebetong bak hvelv eller tett duk utan direkte eksponering for trafikk og eksos. XC4 er brukt i tunnelar utan hvelv, der sprøytebetongen er direkte eksponert for trafikk. Tilsvarande nyansering for tinesalt er relevant for tunnelar utan vass- og frostsikringshvelv. Det er sannsynleg at effektane frå tinesalt er størst i nedre 1–2 meter av sprøytebetongen (Davik 1997a, f) og mindre høgare opp på vegg eller tunneltak. I denne rapporten er derfor klasse XD3 brukt for eksponert betong. For undersjøiske tunnelar er XD1 nytta bak hvelv, der det må reknast å vere salt i luft.

For korrosjon i «kontakt med sjøvatn» er XS3 brukt. Det er i tidlegare undersøkingar dokumentert at saliniteten til tunnellekkasjar i undersjøiske strekningar varierer frå brakkvatn via «normal salinitet» (tilsvarande sjøvatn) til *hypersalint vatn* (sjå kapittel 2.1.4). Hypersaline vatn dannast ved fordamping i tunnelrommet; dvs. dei verkar ikkje frå heftsona der saliniteten

aldri overskrider den i sjøvatn. Vasskjemiske analysar av sjøvassliknande eksponeringsforhold svarar til klasse XA3 (angrep på bindemiddelet): konsentrasjonane av Mg og sulfat fell kvar for seg i XA2, og standarden seier då at neste høgare klasse gjeld. Hypersaline vatn vil også klassifisere som XA3, medan brakkvatn ofte klassifiserer som XA2 og i blant som XA1, avhengig av saliniteten.

Betongstandarden opererer derimot ikkje med eksponeringsklassar for biodegradering og førekomst av biofilm. I dette arbeidet er det derfor også lagt vekt på å dokumentere effektar av nedbryting på undersjøisk sprøytebetong, både med og utan biofilm.

Eksponeringsklassane for frostpåkjenning (Tabell 2.3) er generelt relevante for dei fleste norske tunnelar. Men dei undersøkte lokalitetane med undersjøisk sprøytebetong i Varige konstruksjonar er for det meste langt unna tunnelmunningane og har neppe vore utsette for frost. Temperaturane er for det meste godt over 0 C°. I tillegg kjem at frysepunktet i undersjøisk lekkasjevatn for det meste ligg på omkring - 2 C°.

Merk at korrosjonsforhold p.g.a. karbonatisering i NS-EN 206 bare refererer til effekt av atmosfærisk karbondioksid. Intern karbonatisering av typen Popcorn kalsitt (sjå kapittel 2); som dannast frå kalsium utluting og bikarbonat i inntrengande lekkasjevatn, er ikkje kopla til betongstandarden si klassifisering av karbonatisering (Hagelia 2008b).

Dette delkapittelet legg fram resultatata frå undersøkingar i seks utvalde undersjøiske tunnelar. Kapittel 4.6.1 gir først ei kortfatta oppsummering av funna. Vidare diskusjon og tolkingar er gitt i Kapittel 6.



Tabell 4.18: Sprøytebetong i undersjøisk miljø. Undersøkingane bygger på inspeksjonar, utboring frå oppgitte pelnummer, strukturanalyse med tynnslip og standard betonganalyse (karbonatisering, trykkstyrke, PF. m.m.). Sjå Tabell 4.21 for detaljar og Vedlegg 4 for utfyllande dokumentasjon..

Tunnel – sist undersøkt	«Allmenntilstand» siste undersøking	Tilstand – binde- middel – mikroriss	Tilstand – stålfiber	Tilstand – heft & avskaling	Referansar
<i>Flekkerøya</i> – 2014	God til lokalt svekka etter 26 år	– Oftast god: Eksempel på nedbryting – Få til mange mikroriss	God  Eksempel på lokalt dårleg tilstand i tynn betong	Ofte god til middels heft, men også dårleg heft. Eksempel på avskaling	Kveen & Pedersen (1990) Røhrsveen & Lygre (1996) Hansen (1996) Davik (1997) Hagelia (2011b) Mannvit (2015f)
<i>Byfjord</i> – 2004	God etter 13 år, (neppe endringar etterpå)	– God – Få/ingen mikroriss	God	Relativt god heft. Ikkje avskaling	Røhrsveen & Lygre (1996) Nærum (1996) Davik (1997) Hagelia (2008a, 2011b)
<i>Freifjord</i> – 2009	God til lokalt svekka etter 18 år (neppe endringar etterpå)	– Oftast god: Eksempel på nedbryting – Få til mange mikroriss	God. Eksempel på lokalt dårleg tilstand i tynn betong	Ofte god til middels heft, men også eksempel på dårleg heft. Ikkje avskaling	Hagelia mfl. (2003) Hagelia (2011b) Holm (2011a)
<i>Sløverfjord</i> – 2014	God etter 18 år	– God – Få/ingen mikroriss	God	God heft. Eksempel med oppsprekking i overflata	Mannvit (2015a)
<i>Frøya</i> – 2014	God etter 15 år	– God – mange mikroriss	God	God heft. Ikkje avskaling	Mannvit (2015b)
<i>Oslofjord</i> – 2015	God til lokalt svekka etter 16 år	– Oftast god: Eksempel på nedbryting – Få til mange mikroriss	God. Eksempel på lokalt dårleg tilstand i tynn betong	Ofte god til middels heft, men også dårleg heft. Eksempel på avskaling	Hagelia (2011b) Holm (2011b)

Tabell 4.19: Reseptar for sprøytebetong i undersjøisk miljø (ikkje landstrekningar). SF = silikastøv (% av sementvekt), FA = flygeaske. v/b er basert på mest autoritative data. Det er ikkje brukt skadelege tilslag. Data frå Davik (1997b), Austlid & Andreassen (1998), Nærum (1996), Egil Tveide (samtale 2017), Mannvit (2015a, b, f), Stig Lillevik (e-post 2017), Trond Lorentzen (e-post 2017) og Statens vegvesen (2004). Sjå Vedlegg 4. Litt dokumentasjon er forsvunnen (antatt)..

Tunnel/ Betongalder	v/b som bygd	Tilsette pozzolanar	Akselerator	Sement	Bindemiddel (ekv. kg/m <sup>3</sup> )	Fiber	Design- styrke
Flekkerøy 1988	0.47	SF, 14 %	Vannglas	PC-rapid	550	Stål	B45
Byfjord 1990-1991	0.46	SF, 1 %	Vannglas	PC-rapid	485	Stål	B45
Freifjord 1990-1991	0,42	SF, 6-8 %	Vannglas	PC-rapid Rp38	560-580	Stål	B45
Sløvefjord 1996	0,45 (antatt)	SF & slagg? (m)	Alkalifri (antatt)	PC	~500-520 (antatt)	Stål	B45
Frøya 1998-99	0,40	SF, 7 %	Alkalifri SA 161	Std PC	540	Stål	B45-B40
Oslofjord 1999	0,42	SF, 5 %	Alkalifri AF2000	Std PC/Industri (70%/30% %)	514	Stål	B45
2004 Ny: Erstatta forvittra spr. bet, pel 16050 v/pumpesump	0,41	SF, 5 % & FA	Alkalifri SA 162	Std FA	528	Stål	B40

Tabell 4.20: Kjemiske analysar (mg/L) av lekkasjevatn i undersjøisk miljø og eksponeringsklassar etter NS En 206. År = for innsamla prøver; \* = pH målt i tunnel, elles i laboratoriet. IA = ikkje analysert, IP = ikkje prøvetatt. frå hvelv. Det blei ikkje samla inn vassprøve frå undersjøisk strekning i Sløvefjord.(Mannvit 2015a). **Utheva kursiv = i kontakt med biofilm. Utheva = kontakt med betong.** Understreka = frå bergmasse. Resten frå takrenner m.m. Referansar: d = Davik 1997, ha = Hagelia 2011b, hach = upublisert utført saman med Chalmers - Göteborg.

Tunnel/år/ pelnummer	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Kjemisk	Korrosjonsforhold		
							Sjøvatn	Karbonatisering	Tinesalt
Sjøvatn Oslofjorden NIVA-60m	7,74	2630	<0,005	1370	18600	(XA3)	(XS3)		
Flekkerøy 1996 (d)									
- 2140	7,12	2300	-	1045	17300	XA3	XS3	XC4	
- 2710	7,24	1500	-	863	11900	XA2	XS3	XC4	XD3
2002 (ha)									viss
- 1000-F2	8,07	2600	<0,005	1310	18700	XA3	XS3	XC4	tinesalt
- 1095-F3	7,98	2500	0,010	1180	18300	XA3	XS3	XC4	brukast
- <b>1240-F5</b>	7,81	2300	2,490	1010	17500	XA3	XS3	XC4	
- <b>1306-F1</b>	7,39	2240	8,100	1420	27900	XA3	XS3	XC4	

Tunnel/år/ pelnummer	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Kjemisk	Korrosjonsforhold		
							Sjøvatn	Karbonatisering	Tinesalt
<i>Byfjord</i>									
1996 (d)									
- 3050	7,58	1900	IA	998	15100	XA3	XS3	XC4	XD3
- 3650	7,50	2600	IA	1361	19400	XA3	XS3	XC4	viss tinesalt brukast
2004 (ha)									
- <b>2865-By1</b>	7,55	3830	7,40	3280	50200	XA3	XS3	XC4	
- <b>2865-By2</b>	7,56	1250	1,55	571	11400	XA3	XS3	XC4	
- 3650-By3	7,75	3300	0,12	1790	25400	XA3	XS3	XC4	
<i>Freifjord</i>									
1996 (d)									
- 4200	6,71	1100	IA	652	13900	XA3	XS3	XC4	XD3
- 5020	7,03	460	IA	158	5600	XA1	XS3	XC4	viss tinesalt brukast
- 5260	7,30	2400	IA	1100	18200	XA3	XS3	XC4	
- 5929	7,33	2200	IA	1095	17400	XA3	XS3	XC4	
2003 (ha)									
- <b>4890</b>	6,00	424	IA	237	5110	XA2	XS3	XC4	
- <b>4930</b>	5,50	410	IA	205	5680	XA2	XS3	XC4	
- <b>5700</b>	6,00	2230	IA	1220	17100	XA3	XS3	XC4	
- <b>5910</b>	6,00	1930	IA	1270	17100	XA3	XS3	XC4	
- <b>6600</b>	7,00	2710	<0,005	1310	19900	XA3	XS3	XC4	
- <b>6650</b>	6,50	3130	IA	1250	19200	XA3	XS3	XC4	
2006 (ha)									
- <b>4930-1</b>	6,88	510	0,096	213	6500	<b>XA1</b>	XS3	XC4	
<i>Sløverfjord</i>									
2014	IA	IA	IA	IA	IA	XA3	XS3	XC4	XD3 viss tinesalt brukast
<i>Frøya</i>									
2014 (ha)									
- <b>4795V felt</b>	7,81	IP	IP	IP	IP		XS3	Bak duk: XC2-XC3	Bak duk: XD1
- <b>6670V lab</b>	7,50	2500	0,16	1300	19000	<b>XA3</b>	XS3	XC2-XC3	XD1
- <b>6670 felt</b>	7,50	IP	IP	IP	IP		XS3	XC2-XC3	XD1

Tunnel/år/ pelnummer	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Kjemisk	Korrosjonsforhold		
							Sjøvatn	Karbonatisering	Tinesalt
<i>Oslofjord</i>									Bak
2004 (ha)								Bak hvelv:	hvelv:
- <i>15930-V1</i>	7,91	2640	0,091	1260	19100	XA3	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>15930-V2</i>	7,89	2670	0,720	1210	19300	XA3	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>15930-V3</i>	7,88	2640	1,630	1270	19100	XA3	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>15930-V4</i>	7,93	2610	1,640	1260	18900	XA3	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>15930-V5</i>	7,71	2580	1,710	1240	18600	XA3	XS3	XC2-XC3	XD1
-									
2005 (ha)									
- <i>16060-1</i>	6,60	2630	IA	1320	IA	<del>XA3</del>	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>16060-2</i>	6,64	2604	0,510	1320	18300	<del>XA3</del>	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>16060-3</i>	6,89	2720	0,006	1340	18300	<del>XA3</del>	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>17450</i>	7,49	2410	2,210	1270	17800	<del>XA3</del>	XS3	XC2-XC3	XD1
2016 (hach)									
- <i>15935-16</i>	7,6	2500	1,2	1200	18000	XA3	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>16060-</i> <i>pump-rock</i>	7,5	2700	0,74	1300	20000	XA3	XS3	XC2-XC3	XD1
- <i>16060</i> <i>pumpst. 2</i>	7,55	3260	< 0,3	1170	22400	XA3	XS3	XC2-XC3	XD1

#### 4.6.1 Oppsummering av undersøkte lokaliteter i undersjøisk miljø

Datagrunnlaget frå undersjøiske tunnelstrekningar dekker opp til 26 års erfaring med «moderne sprøytebetong» slik det er definert i kapittel 3.2.2. Sprøytebetong brukt som bergsikring i undersjøisk miljø viser variabel grad av nedbryting på grunn av infiltrasjon av salt grunnvatn frå bergmassen, både i Sone A (frå heftsona) og lokalt sterk omvandling av ytterflata (Sone C) på grunn av biofilm. Figur 3.1 illustrerer dei respektive sonene. Samanlikna med tidlegare undersøkingar (kapittel 2.1.4 og 2.1.5) ser vi teikn til aukande nedbryting i nokre lokale område.

Hovudintrykket frå dei undersøkte tunnelane er at sprøytebetongen i undersjøisk miljø ennå stort sett er bra, men ikkje alltid fungerer etter hensikta med tanke på 100 års levetid. Ein bør legge merke til at designlevetida for dei undersøkte tunnelane var 50 år. Tilstanden varierer frå svært god, via «god», til lokalt svært dårleg med tydelege variasjonar over korte avstandar. Sprøytebetong utan påverknad frå lekkasjevatt er vanlegvis i svært god tilstand. Hovuddraga er oppsummert under:

- Karbonatiseringsdjup i overflata (luftkarbonatisering: OC) varierer mellom 0 og 30 mm, og er ofte mindre enn 5 mm.
- Sone OC og Sone C rett under OC er i blant påverka av *syredannande Mn-Fe biofilm* (pH = 5,5–6,5) og har lokalt ført til djup nedbryting, utvasking og tap av tverrsnitt (typisk <5 til 40 mm). Biofilm trivast best der mindre lekkasjar frå gjennomsettande riss/sprekker breier seg i overflata. Fuktige område utan biofilm viser mindre grad av nedbryting, men har ofte utjamna overflater og i nokre tilfelle utfelling av gips. *Ikkje all biofilm har ført til skade* og årsakene til dette er ikkje avklara. Det kan her vere

snakk om ulike bakterieartar; variasjonar i resept/utførsle eller andre ting. pH-verdiar i «uskadeleg biofilm» var nær nøytral (~ 7,5).

- Sone B, av generelt god betong, er i blant litt påverka av sjøvattn med diffus omvandling med magnesium og karbonatisering og i nokre tilfelle med indikasjonar (i tynnslip!) på svært marginal stålfiberkorrosjon.
- Sone A, av omvandla og svekka sprøytebetong mot berg, varierer sterkt og omfattar Ca-utluting med magnesium-angrep på sementlimet med intern utfelling av brucitt og Mg substitusjon i sementlimet («ikkje sementerande» M-S-H). Sterk Ca-utluting er karakterisert ved auka permeabilitet, utfelling av Popcorn kalsitt (PCD), ofte saman med thaumasitt. Det er også påvist eit tilfelle med verknad av syre frå heftsona. Alle desse prosessane fører til heil eller delvis nedbryting av sementlimet.
- Heftsona. Det er delvis samanheng mellom dårleg heft i lekkasjeområder og omfang av nedbryting. Ein ser fleire tilfelle av dårlege og til dels permeable heftsoner. Permeable heftsoner har ofte ført til nedbryting i Sone A. Likevel har utfellingar av brucitt ( $Mg(OH)_2$ ) og karbonat ( $CaCO_3$  og  $(Ca,Mg)CO_3$ ) med tida ført til delvis blokkering av lekkasjar på heftsona.
- Stålfiberkorrosjon av betydning er knytta til relativt djupt (>10 mm) karbonatiserte soner i overflata (OC), nedbryting med omfattande Ca-utluting og PCD i Sonene A og C og inntrenging av klorid. Omfanget av stålfiberkorrosjon i undersjøisk sprøytebetong er mykje mindre enn tidlegare antatt (Davik 1997b, f). Område utan karbonatisering har i praksis intakte stålfibrar, sjølv der det er tydeleg inntrenging av klorid, magnesium og sulfat (sjå Holm 2011a, b, c).
- Sprøytebetongsjikt tykkare enn 10 cm har tydeleg mindre omfang av nedbryting både når det gjeld sementpasta og stålfiberkorrosjon enn tynnare sjikt. Tynn sprøytebetong (< 5–6 cm), som til dømes nedre deler mot tunnelsålen er oftare påverka av nedbryting med fiberkorrosjon (sjå og Davik 1997b, f). Dette er diskutert vidare i kapittel 6.
- Hydrogeologi: Undersjøiske tunnelstrekningar er ofte påverka av relativt høge vasstrykk som fører til at aggressivt sjøvattn blir pressa inn i sprøytebetongen. I samband med svært marginal bergoverdekning og høge hydrauliske gradientar er det lokalt konstatert stor grad av diffusjon gjennom store deler av tverrsnittet med omfattande svekking under påverknad frå både biofilm og salt grunnvattn frå bergsida.
- Trykkstyrken er i dei fleste tilfelle innanfor designkrava som låg til grunn, men nokre data tyder på at trykkstyrken er svekka i område med mykje drypplekkasje.
- Undersøkingar viser delvis låg heftstyrke mellom betong og bergmasse (Holm 2011a, b, c).

Etter raset i Oslofjordtunnelen i desember 2003 blei det utført forsterkning på fleire plassar. Alle ras og nedfall skjedde i bergmasse med svelleleire, og omfanget var berre delvis oppdaga under anleggsarbeidet. Veggane i desse områda var tilnærma usikra, med for lite boltar og etter forholda for tynt lag sprøytebetong i hengen (Statens vegvesen 2004b). I servicetunnelen som fører ned til pumpesumpen blei det vidare konstatert omfattande forvitring i fem år gammal sprøytebetongen (pga. magnesium, sulfat og klorid, Hagelia 2011b), med omfattande stålfiberkorrosjon. Det blei også registrert lokal avskaling og nedfall av 8–10 cm tjukk sprøytebetong. Nedfallet var styrt av dårleg heft og tverrsprekkar i elles upåverka betong. Sprøytebetongen i servicetunnelen blei i stor grad pigga ned og erstatta med Standard FA

tilført 5 % silikastøv (sjå Tabell 4.19). Prøvingsrapport frå Norconsult (Holm 2011b) viser at den nye sprøytebetongen frå 2004 er tydeleg meir motstandsdyktig enn den førige (også ved betongalder 5 år).

Det er også utført *forsterkningar* av sprøytebetongen i Freifjordtunnelen (2006–2007). Hovudårsaka var at vass- og frostsikringa (aluminium platetak) skulle byttast ut, og ein ønska då samstundes å oppgradere sprøytebetongen i samsvar med gjeldande tunnelnormal. Undersøkingar viste at store delar av sprøytebetongen i den undersjøiske delen av Freifjordtunnelen hadde eit overflatebelegg av grå og våt gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Det blei derfor tilrådd at ein la stor vekt på å fjerne gipsbelegget for å unngå å sprøyte ny betong på gips som ville føre til sulfatangrep på heftsona mellom ny og gammal sprøytebetong (Hagelia 2011b og Vedlegg 4).

#### 4.6.2 Resultat frå strukturanalyse av borkjerner

Strukturanalysen la stor vekt på *nøyaktig oppmåling* av breiddene til Sonene A, B, C, OC og omfanget av stålfiberkorrosjon og utfellingsprodukt. I arbeidet med oppsummeringsrapporten var det nødvendig å mikroskopere alle prøver på nytt for å skaffe fram kvantitative data.

Det er utført strukturanalyse av 60 kjerner/prøver og omfattar undersøkingar av totalt 132 tynnslip i polarisasjonsmikroskop: nokre også i Scanning elektronmikroskop. Det er i nokre tilfelle utført røntgenanalyse (XRD) av utfellingar. Tabell 4.21 viser korleis omfanget av omvandling og nedbryting fordeler seg på dei ulike sonene gjennom tverrsnittet av sprøytebetongen, slik dei er definerte i Kapittel 3.2.3. Tabellen gir detaljerte opplysningar om utfellingar på overflater, tilstand på heftsoner, førekomst av biofilm, innverknad frå syre og tap av tverrsnitt ved disintegrering. Utfellingar av gips er teikn på syreangrep. *Biofilm* på overflater hadde i fleire tilfelle  $\text{pH} < 7$  (5,5–6,5), men andre stader var  $\text{pH}$  mellom 7 og 8. Omfanget av mikroriss og heftforhold er også dokumentert ved eigne klassifikasjonssystem (sjå neste side).

Også *diffuse omvandlingar* av sementpastaen med magnesiuminntrenging og indre karbonatisering er tatt med, sjølv om dei ikkje ser ut til å ha svekka sprøytebetongen ved prøvetakingstidspunktet. Denne type omvandling fører alltid til at  $\text{pH}$ -verdien i porevatnet blir noko lågare enn normalt. Om dette utviklar seg vidare vil det føre til svekking av sementlimet og auka fare for stålfiberkorrosjon.

På same måten som for alunskifer (Kapittel 4.5) er det lagt vekt på informasjon om heftforhold og utfellingar, og skild mellom overflatekarbonatisering p.g.a.  $\text{CO}_2$  i luft (OC) og nedbryting/omvandling i Sone C innanfor OC. *Nedbryting i Sonene A og C representerer kjemiske reaksjonar som har gitt, eller kan gje, mekaniske svekking*. Sone B av intakt betong, viser i nokre tilfelle teikn på vasstransport gjennom heile tverrsnittet, for eksempel utfelling av sekundær portlanditt og diffus omvandling med karbonatisering og magnesium inntrenging. Resultata er vist i diagram og foto (Figurane 4.47 til 4.77). Utfyllande dokumentasjon er gitt i Vedlegg 4.

Det er lagt stor vekt på å skaffe fram gode data med tanke på omfanget av stålfiberkorrosjon, og etablert eit klassifiseringssystem (sjå under). Resultata representerer eit nytt grunnlag for vidare vurdering tilstanden (Kapittel 4.6.3; Figurane 4.78 til 4.81

Betydninga av reseptar og tykkelse med tanke på levetid er diskutert i kapittel 6. Erfaringane bygger på relativt moderne stålfiberarmert sprøytebetong dominert av reseptar tilsvarande M45. Resultata frå Varige konstruksjonar dannar grunnlag for nye dimensjoneringsreglar for stålfiberarmert betong.

Dagens krav til undersjøisk sprøytebetong er M40 basert på «SV-kjemisk» med minimum 100 mm tykkelse.

#### Klassifisering av mikroriss, heftforhold og stålfiberkorrosjon

Klassifiseringa er basert på undersøkingar i tynnslip visuelle vurderingar av kjernemateriale og.

Mikroriss (Tabell 4.21). Ranging av mikroriss i sementpastaen er:

- Klasse 1 = ingen eller få mikroriss
- Klasse 2 = middels mikroriss
- Klasse 3 = mange kommuniserande mikroriss
- Klasse 4 = mange kommuniserande mikroriss med innslag av makroriss/sprekker

Heftforhold: (Tabell 4.21) er rangert på basis av:

- Klasse 1 = God heft, god bergkontakt (0–0,1 mm typisk opning)
- Klasse 2 = Middels heft, splitter på heftsona (0,1–0,3 mm typisk opning)
- Klasse 3 = Permeabel heftsone dårleg til svært dårleg heft (0,5–10 mm opning)

Stålfiberkorrosjon: Det er gjort ei ranging av korrosjonsomfanget i sonene A, B, C og OC for kvar undersøkt prøve (Tabell 4.22). Ranginga bygger både på mikroskopering av tynnslip og makroskopiske trekk:

- Klasse 0 = Ingen fiberkorrosjon
- Klasse 1 = Svært marginal fiberkorrosjon, bare synleg i tynnslip på mikroskala
- Klasse 2 = Fiberkorrosjon, destruktiv i ytre deler med intakt indre fiber, synleg på makroskala
- Klasse 3 = Destruktiv fiberkorrosjon, svært omfattande til total nedbryting

Tabell 4.21: Sprøytebetong i undersjøisk miljø. Fordeling av omvandling/nedbryting i Sone A (mot berg), Sone B (meir eller mindre intakt) og Sone C (ytre betong mot overflata), OC = luftkarbonatisering. Avskaling (S) med omvandling. Ts: antal undersøkt i tynnslip, Fn: undersøkt med fenolftalein. Nedbrytingsfenomen: tsa = thaumasitt, pcd = Popcornkalsitt, mc = MCSH, Br = brucitt, Cc = kalsitt, arg = aragonitt, G = gips, dmc = diffus finkorna omvandling med magnesium og karbonatisering, dkmc = diffus finkorna omvandling med magnesium og karbonatisering m. marginal stålfiberkorrosjon (klasse 1); dkorr = destruktiv korrosjon (klasse 2 og 3). Referansar: ha = Hagelia (2003, 2011b, og upubliserte), ho = Holm (2011), m = Mannvit (2015d). Estimert tapt tverrsnitt i Sone C er rekna inn i total initiell tykkelse.

Tunnel: - Pel-prøve nr/ - Total initiell tykkelse/prøve (mm)/ - Tynnslip (Ts)	Heftforhold - Tilstand - Permeabel opning (mm) - Utfelling (mineral)	Sone A (mm)	Sone B (mm)/mikroriss (1-4)	Sone C under OC (mm)	OC i ytre Sone C (mm) (eller Tapt tverrsnitt)	Overflateforhold - Ved prøvetaking - Utfelling
<b>Flekkerøya</b> 2002 (ha) Pel 1300-1380 <u>Avskala ytre:</u> - F2H/15/ Ts 1 - F3H/30/ Ts 1 - F5H/25/ Ts 1  Gipsutfelling.: - F8H/-/Ts 2  - F9V/-/ Ts 1  2003 (ha) -974H/120/Ts5 -1069V/35/Ts2 -1070V/90/Ts3 -1071V/99/Ts4 -1074V/95/Ts4  -1200V/8/Ts 2 -1314H/5/Ts 2 -1373H/30/Ts 2 <u>-1374H/99/Ts 6</u>  -1375H/40/Ts 2 -1800V/5 /Ts 1  2014 (ha) -887H (XRD) -1377V (XRD)  2014 (m): <u>-885H/185/Ts 2</u>  -885H Fn -1380H Fn -1380H/50/Ts 2 <u>Avskala Sone S - ST1380/45/Ts1</u>  <u>-1380-9/30/Ts 1</u>	Ikkje prøve. Ikkje prøve. Ikkje prøve.  Ikkje prøve.  Ikkje prøve.	Ikkje pr. Ikkje pr. Ikkje pr.  Ikkje pr.  Ikkje pr.	Ikkje p. Ikkje p. Ikkje p.  Ikkje p.  Ikkje p.	S S 20 S Mg-subst.  Ikkje prøve Ikkje prøve  0 0 40 0 10  ..betong ..betong 14 mc 5 mc 20 dkmc ..betong  Ikkje kjerne nedste 1 m  0 - - 0 S/ 22 pcd, G, dkorr 0	15 30 dkorr. 5 korr  Ikkje prøve Ikkje prøve  5 korr 12dkorr 10 10 5  - - 0 dkorr Tapt/~5 Tap/ 0 -  Ikkje kjerner	Våt Våt Våt m biofilm  Rusta gipsskorpe/40 mm under våt biofilm Rusta gipsskorpe/40 mm under våt biofilm  Ikkje utfelling, tørr Ikkje utfelling, tørr Litt bio (Fe) Litt bio (Mn) Br-Cc-utfelling, våt  Tynn biofilm, våt Tynn biofilm, våt Tykk våt biof. (Fe-Mn), G Tykk våt biofilm (Fe-Mn) Våt, Br-Cc- utfelling Litt biofilm (Mn)  Bassanitt utfelling Bassanitt utfelling (Vedlegg 4)  Våt, tynn biof., Cc-Br Våt m/biofilm Våt m/biofilm Biofilm/gips/Cc Våt biof. Fe-Mn, Cc (G) Våt biof. Fe-Mn, Cc (G)
<b>Byfjorden</b> 2004 (ha) -2862 Core 1-1/ 140/Ts 4	Middels/2/Cc	30/pcd, mc, dkmc	109/1	0	1	Relativt «tørr», ikkje utfelling



<b>Tunnel:</b> - Pel-prøve nr/ - Total initiell tykkelse/prøve (mm)/ - Tynnslip (Ts)	<b>Heftforhold</b> - Tilstand - Permeabel opning (mm) - Utfelling (mineral)	<b>Sone A</b> (mm)	<b>Sone B</b> (mm)/ mikro- riss (1 – 4)	<b>Sone C</b> under OC (mm)	<b>OC i ytre</b> <b>Sone C</b> (mm) (eller Tapt tverrsnitt)	<b>Overflateforhold</b> - Ved prøvetaking - Utfelling
-2862 Core 1-2/ 190 /Ts 6 -2868 Core 2-1/ 200/ Ts 6	Rel. god/1/ Cc Rel. god/1/ Cc > Br	20/pcd, mc, dkmc 30/pcd, mc, dkmc	155/ 1 145/ 1	0 0	15 mc,Cc, 25 mc,	«Tørr», Cc «Tørr», ikkje utfelling
<b>Freifjorden</b> 2003 (ha) -3730-1/80/ Ts 3 -3730-3/90/ Ts 3 -3910-1/140/ Ts 4 -3910-4/112/ Ts 4 -4032-1/160/ Ts 3 -4890-1/64/ Ts 3 -4890-3/85/ Ts 2 -5245/35/ Ts 3 -5800 /60/ Ts 2 -6150-2/140/ Ts 5 -6935-1/50/ Ts 2  2009 (ho) -3790-fk3/108/ Ts 2 -3790-fk12/Fn -3790-fk13/Fn  -5450-fk17/98/ Ts 1 -5450-fk18/Fn	God/0/ - God /0/ Br Middels/0,3/ <b>po</b> <b>røs:</b> Br, Cc Svært god/0/- Middeld/0,2/ Th, Br God/ 0,1/ -0,2, Th, Cc Rel. god/0,1/- God/0,1/Cc, Br God/0,2/ - Cc, Br Dårleg- <b>Syre</b> / 5/Cc Middels/0,2/ Cc God/0,1/ Br, Cc - - - God/0,1/ - -	30 dkmc 0 100 dkmc 0 40 dkmc 0 3 dmc 5 dmc 5 dkmc 40 tsa, Br, karboxylat 0 2 dmc - - 2 svovel -	37/ 2 88/ 1 32/ 2 102/1 114/ 1 60/2 81/ 2 28 /2 52/1 88 /1 30/1 92/3 Ettr/CH - - 89/3 Ettr/CH -	4 2 0 0 0 0 1 2 dkmc 3 dkmc 0 0 2 - - 2 dmc -	9 0,1 8 10 6 ikkje korrosjon 4 0 0 2 20 12 5 3 5 2	Våt Fuktig Fuktig Fuktig Våt Fuktig / Cc Fuktig / Cc Våt / G, Cc, Br, tsa Våt / biofilm, Cc, Br Fuktig/tynn biofilm, karboksylat mm, «Tørr» Våt/ tynn Fe, Mn - - Biofilm (litt) Fuktig
<b>Sløverfjorden</b> 2014 (m) - 1800H-1/55/ Ts 2 - 1800H-6/38/ Ts 2	Svært god/0/- Brudd/0,2/-	0 0	55/1 36/1	0 0	0 2	Rel tørr Tynn utf. av Cc Fuktig 2-3 mm Cc & G
<b>Frøya</b> 2014 (m) -4795V-3/ Fn  -6660V-14/96/ Ts 3	- Dårleg/0,5/ Cc	- 3 dmc	- 90/3	- 0	3 3	Våt m/ Fe biofilm (neppe skadeleg type) Våt m/ Fe biofilm (neppe skadeleg type)
<b>Oslofjorden</b> 2004 (ha) -16060-KjII/41/ Ts 1  -16060Kj III/ 35/ Ts 3  -16060-Kj IV/ 60/Ts 2	Dårleg/0,5/ Br God/0/ - Svært svak/1/ (ikkje bevart) Middels/0,2/-	20 dkmc, pcd, tsa 5 dkmc, pcd, tsa 25 dkmc, tsa, pcd 20 tsa, mc,pcd, dkorr	14/2 10/1 dkmc 0	6 dkmc, pcd 15 dkmc, pcd 10 mc, pcd, dkorr 5	Tapt/~1 Tapt/ ~5 Tapt/ ~25	Våt m/ Fe-biofilm Våt m/ Mn-Fe biofilm Våt m/ Mn-Fe biofilm

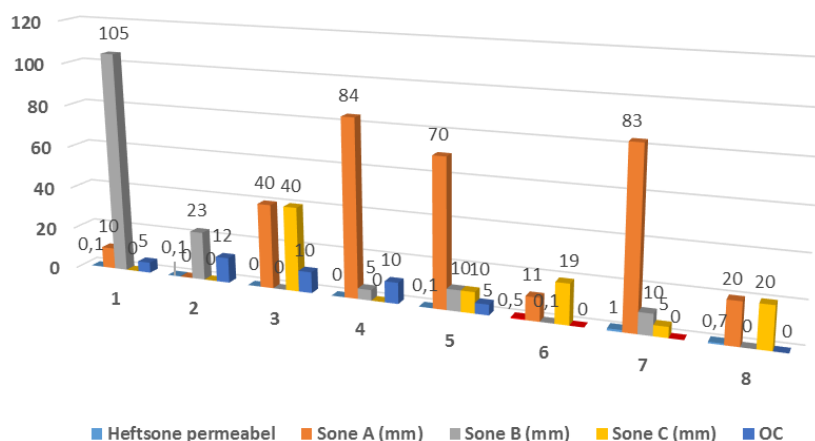
<b>Tunnel:</b> - Pel-prøve nr/ - Total initiell tykkelse/prøve (mm)/ - Tynnslip (Ts)	<b>Heftforhold</b> - Tilstand - Permeabel opning (mm) - Utfelling (mineral)	<b>Sone A</b> (mm)	<b>Sone B</b> (mm)/ mikro- riss (1 – 4)	<b>Sone C</b> under OC (mm)	<b>OC i ytre</b> <b>Sone C</b> (mm) (eller Tapt tverrsnitt)	<b>Overflateforhold</b> - Ved prøvetaking - Utfelling
-16060-Kj V/ - 45/Ts 2	Middels/0,2/ Br	0	0	tsa, mc, pcd, dkorr 4	Tapt/ ~20	Våt m/ Mn-Fe biofilm
-15925-Kj1/100 Ts 2	God/0/ -	0	96/1	mc, pcd 2,5	Tapt/1 (utjevna)	Våt m/ Mn-skorpe
-15925-Kj2/58/ Ts 2	Middels/0,1/Cc , arg	5 dkmc 15	55,5/1	mc, pcd, Br, tsa 5	Tapt/1 (utjevna)	Våt m/ Mn-Fe-skorpe
-15925-Kj5/80/ Ts 3	Middels/0,1/Br, Cc, arg, Mg-Cc	3 dkmc	70/1	Cc, arg 4	Tapt/1 (utjevna)	Våt m/ Mn-Fe-skorpe
-15930-Kj9/70/ Ts 2	Middels/0,1/ Br, Cc	3 dkmc	56/3	dkmc, pcd  11	Tapt/1 (utjevna)	Fuktig utan biofilm
-15930-10/110/ Ts 3			96/2	tsa, mc, pcd, dkorr	Tapt/1 (utjevna)	Fuktig utan biofilm
<i>2009 (ho)</i> -15930-3/85/ Ts 2	Dårleg/1/ Br, Cc	30	25/2	30	2	Fuktig utan biofilm
-15930-5 Fn	-	Svovel mm	-	-	0	Utf. Br, Cc
-15930-8 Fn	-	-	-	-	0	
<i>2015 (ha)</i> -15925-1/100/ Ts 2	God/0,1/ Tynn Br	1	98/1	0	1	Våt m biofilm Mn-Fe
-15930-2/55/ Ts 3	God/0,1/ Br 1-2 mm	0	51/1	0	4	Fuktig utan biofilm Utf. Cc>Br

#### 4.6.2.1 Omvandlingar og nedbrytingsfenomen

Figur 4.47 t.o.m. 4.55 viser fordelinga av nedbryting og intakt sprøytebetong frå alle undersøkte tunnelar. Estimerte breidder på permeable heftsoner frå tynnslipanalyse er også vist. Resultata viser først og fremst at det er svært stor skilnad i omvandling/nedbryting frå stad til stad og frå år til år.

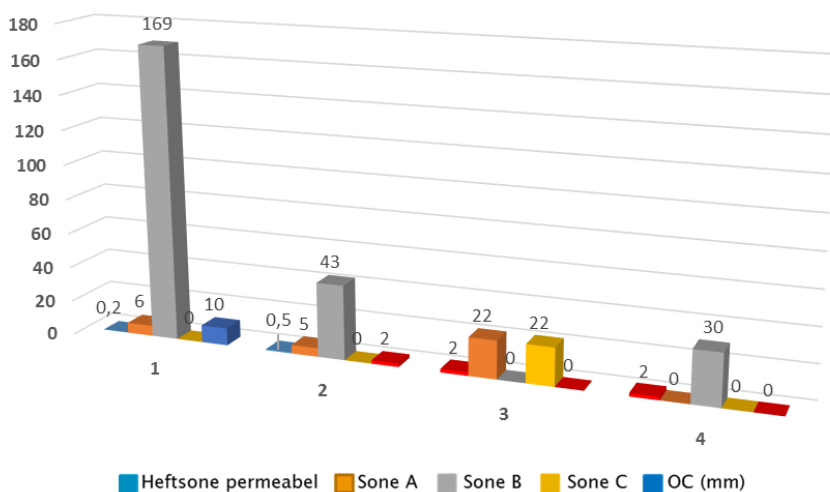
Diffuse omvandlingar. Desse omvandlingane (dmc = diffus finkorna omvandling med magnesium og karbonatisering, dkmc = diffus finkorna omvandling med magnesium og karbonatisering m. marginal stålfiberkorrosjon) representerer tidlege stadium av nedbryting utan dokumentert svekking av bergsikringa. I nokre tilfelle slår dette tydeleg ut på omfanget i Sonene A og C etter 10 til 15 år. Betydninga av diffus omvandling i det lange løp er diskutert i kapittel 6.

XC4, XS3, XA3 - Undersjøisk miljø - Flekkerøya  
Eksponert for trafikk (15 år); v/b = 0,47



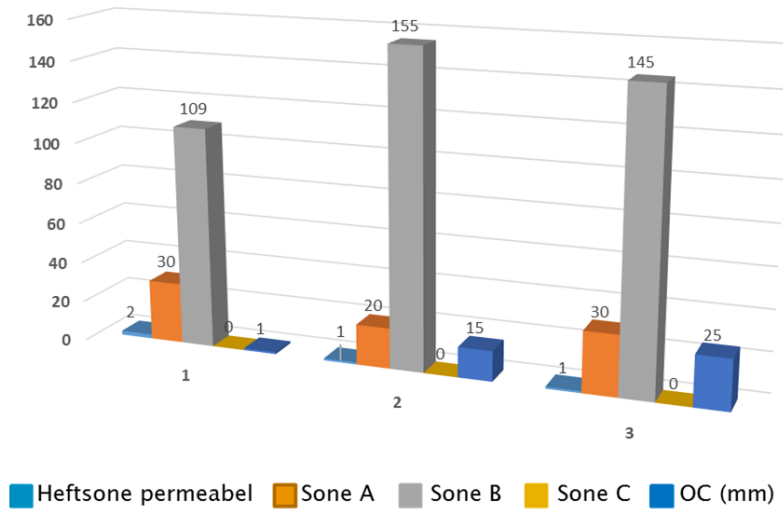
Figur 4.47: Flekkerøytunnelen. Betongalder 15 år. Fordeling av omvandling gjennom tverrsnitt (alle søyler i mm). Sone A i prøvene 3, 4 og 5 (hvh kjerne 1069V, 1070V og 1071V) er representert ved omfattende diffus omvandling med magnesiumintrenging og karbonatisering. Kjernene 1373 og 1374 (nr 6 og 7 i histogrammet) hadde ganske tykk utfelling av Mn-Fe biofilm med påverknad av syre (raud farge viser syrepåverknad i Sone A og Sone C) utfelling av gips og teikn på tap av tverrsnitt.

XC4, XS3, XA3 - Undersjøisk miljø - Flekkerøya  
Eksponert for trafikk (26 år); v/b = 0,47



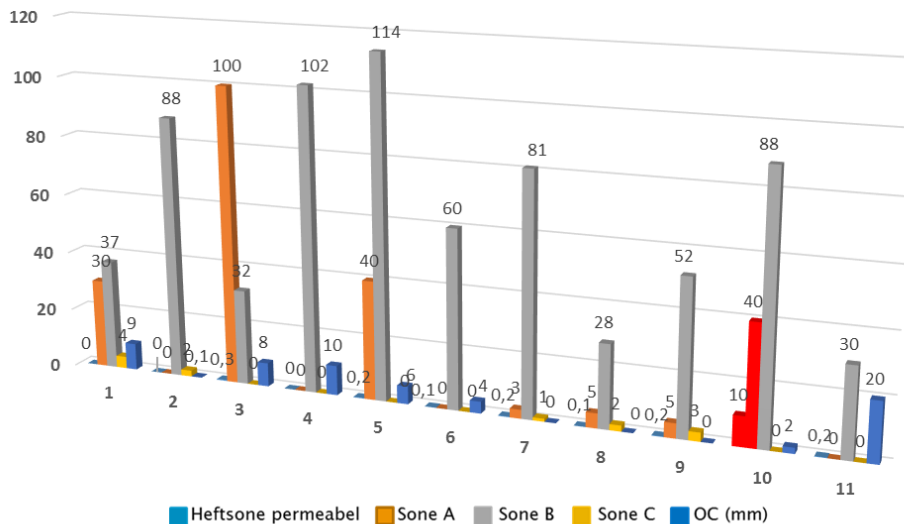
Figur 4.48: Fordeling av omvandling (mm) i 26 år gammel sprøytebetong i Flekkerøytunnelen. Kjerne 885H (nr 1) er relativt lite omvandla. Kjerne 1380 H (nr 2) hadde overflateutfelling av gips og kalsitt under biofilm; sone A har ofte preg av diffus utlutning av kalsium. **Betong nr 3 og 4 er avskala ytre flak («Sone S»):** frå nedre delar av pel 1380 (nr 3 = tynnslip ST-1380, og nr 4 tynnslip 1380-9). Begge var påverka av syre i ytre og indre deler av flaket (raud farge). Elles omfattande og destruktiv stålfiberkorrosjon og innslag av thaumasitt sulfatangrep. Ytre delar av avskala betongen var tapt, men uråd å estimere kor mykje.

XC4, XS3, XA3 - Undersjøisk miljø - Byfjorden  
Ekspontert for trafikk (13 år); v/b = 0,46



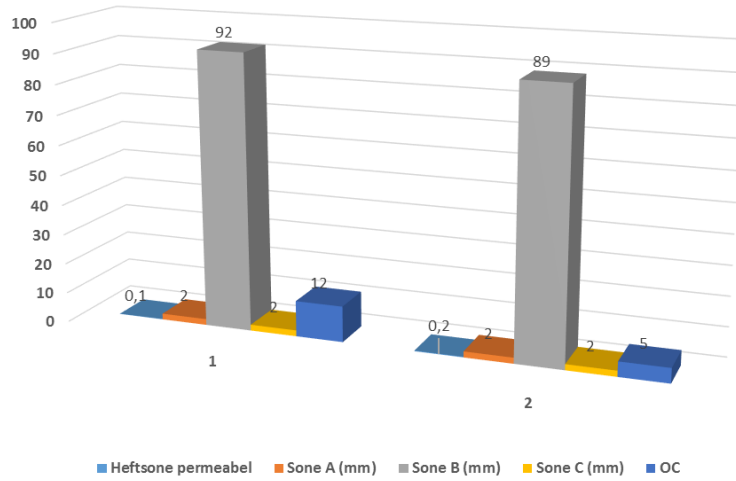
Figur 4.49: Fordeling av omvandling (mm) i 13 år gammel sprøytebetong i Byfjordtunnelen utan biofilm. Alle lokalitetene hadde relativt «tørre» overflater, med teikn på tidlegare fukt/lekkasjar og oftast relativt djup overflatekarbonatisering (OC).

XC4, XS3, XA3 - Undersjøisk miljø - Freifjorden  
Ekspontert for trafikk (12 år); v/b = 0,42



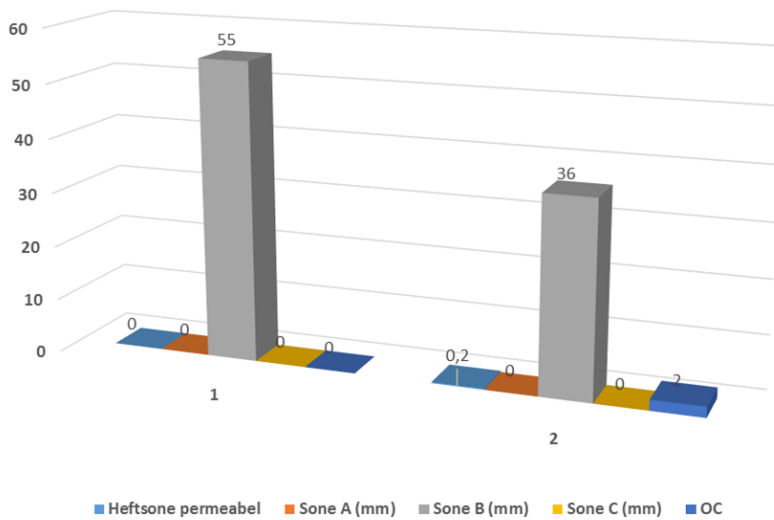
Figur 4.50: Fordeling av omvandling (mm) i 12 år gammel sprøytebetong i Freifjordtunnelen. Sone A var oftast karakterisert med diffus omvandling med Mg og indre karbonatisering (PCD), særleg i 1,3 og 5. Spesielt for kjerne 6150-2 (nr 10 i histogrammet) var kraftig omvandling med destruktiv stålfiberkorrosjon og tydeleg syreverknad frå heftsone og inn i Sone A (raudt). Kjerner med lite overflatekarbonatisering (OC) hadde ofte utfellingar av kalsiumkarbonat på overflata, med relativt djupast OC var fuktige utan utfellingar.

XC4, XS3, XA3 - Undersjøisk miljø - Freifjorden  
Eksponert for trafikk (18 år); v/b = 0,42

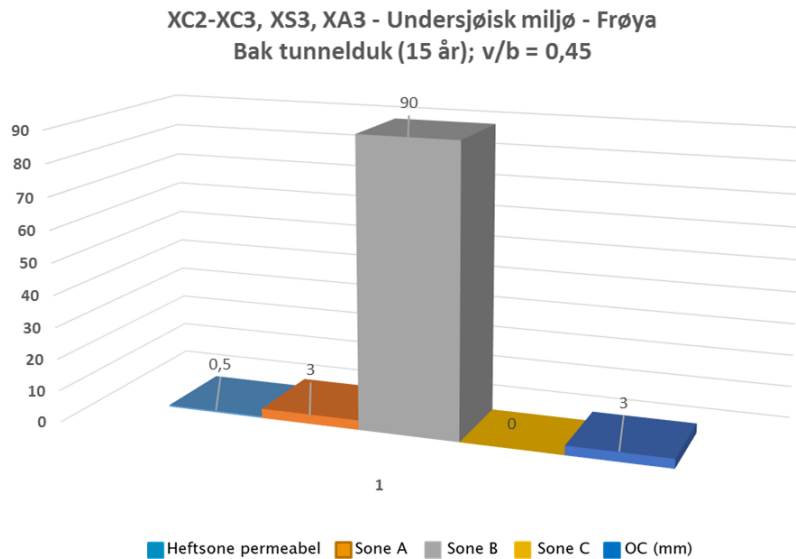


Figur 4.51: Liten grad av omvandling (mm) i 18 år gammel sprøytebetong i Freifjordtunnelen med litt djup overflatekarbonatisering (OC). Begge overflatene var fuktige med sporadisk biofilm utan utfelling av kalsiumkarbonat.

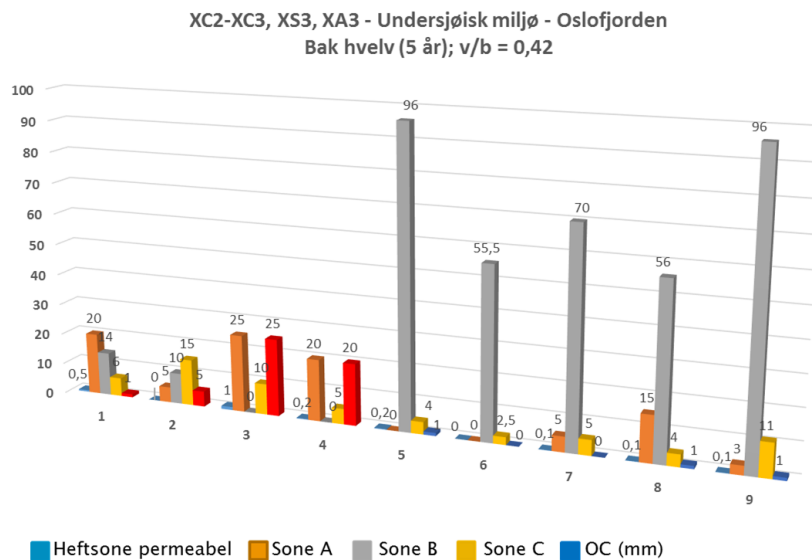
XC4, XS3, XA3 - Undersjøisk miljø - Sløverfjorden  
Eksponert for trafikk (18 år); v/b = 0,45



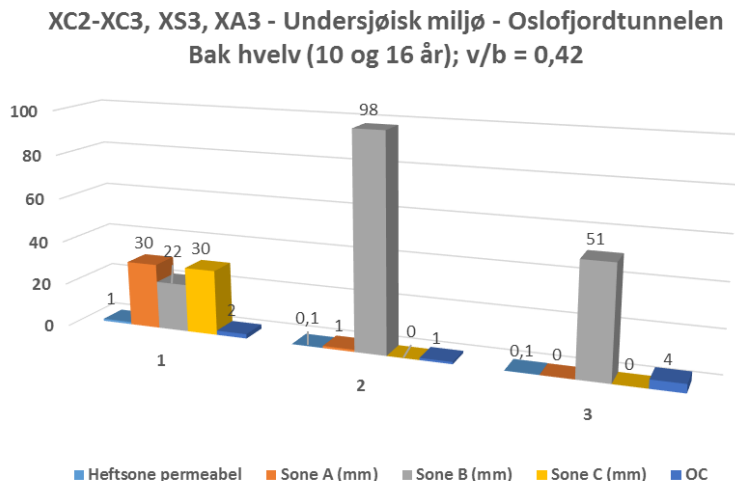
Figur 4.52: Intakt 18 år gammel sprøytebetong i Sløverfjordtunnelen. Overflatekarbonatiseringa (OC) i kjerne 1800H-6 (2) var fuktig med utfelling av kalsium karbonat og gips. Ikkje-karbonatisert kjerne 1800H-1 (1) hadde eit tynt lag av kalsiumkarbonat på overflata.



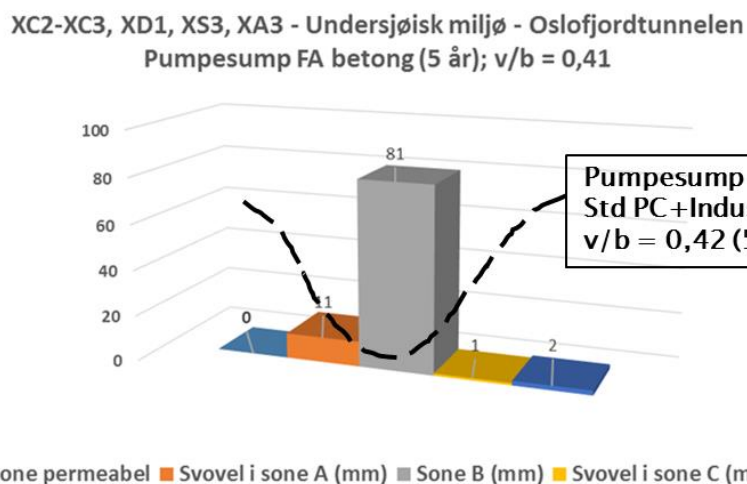
Figur 4.53: Intakt 15 år gammel sprøytebetong i Frøyatunnelen (pelnummer 6660), med marginal diffus omvandling i Sone A (teikn på magnesiuminntrenging) og litt overflatekarbonatisering (OC) under våt jernrik biofilm. Denne type biofilm ser ikkje ut til å vere skadeleg. pH = 7,5.



Figur 4.54: Oslofjordtunnelen ved betongalder 5 år. Fordeling av omvandlingar (mm) gjennom tverrsnittet og estimert tap av yttersjikt (raude søyler) under våt syreproduserande Mn-Fe biofilm (pH = 5,5-6,5). Pelnummer 16060 (1-4) og pelnummer 15925-15930 (5-9). Sonene A og C (1-4) var prega av kraftig omvandling med utluting, magnesiumangrep, indre karbonatisering (PCD), destruktiv stålfiberkorrosjon og delvis fullskala thaumasitt sulfatangrep med tap av tverrsnitt (sjå Tabell 4.22). Betong 5-9 var tjukkare: 5-7 hadde på dette tidspunktet tynn våt Mn-Fe skorpe av utfelte biomineral med lite nydanna biomasse. Betong 8-9 var utan biofilm.

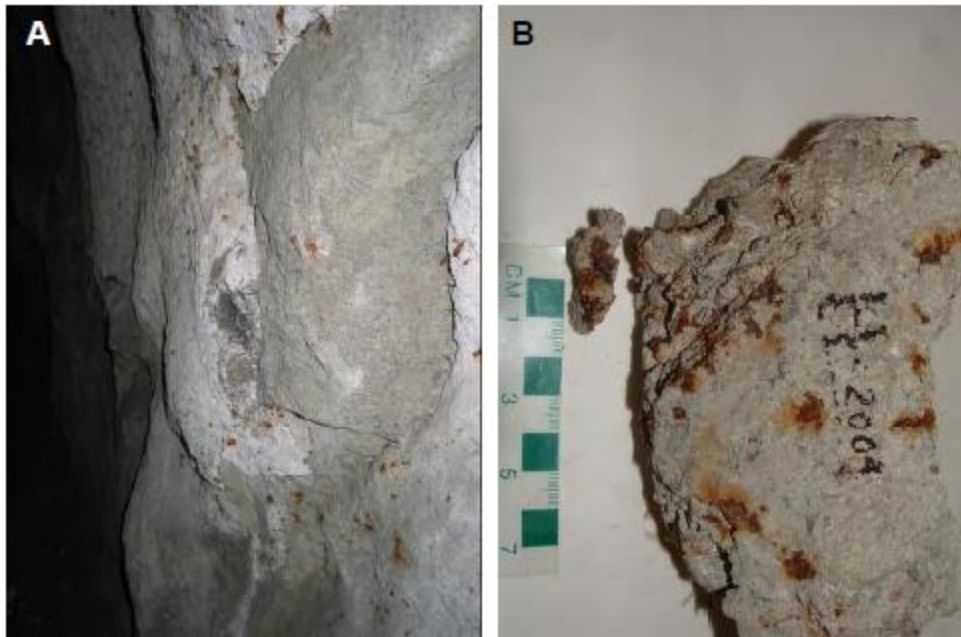


Figur 4.55: Fordeling av omvandlingar (mm) gjennom tverrsnittet i Oslofjordtunnelen ved betongalder 10 år. (1 = pelnummer 15925 utan biofilm) og 16 år (2 = pelnummer 15930 med våt Mn-Fe biofilm; 3 = pel-nummer 15925 utan biofilm).



Figur 4.56: Samanlikning mellom ny sprøytebetong frå 2004 med opprinneleg 1999 betong i servicetunnelen til pumpesumpen (illustrert ved stipla linje), begge ved betongalder 5 år. Den opprinneleg sprøytebetongen var sterkt forvittra med destruktiv stålfiberkorrosjon (Figur 4.57): mesteparten blei fjerna og erstatta med FA basert sement i 2004. Reseptane er vist i Tabell 4.19 og Vedlegg 4. Sjå kommentarar i teksten.

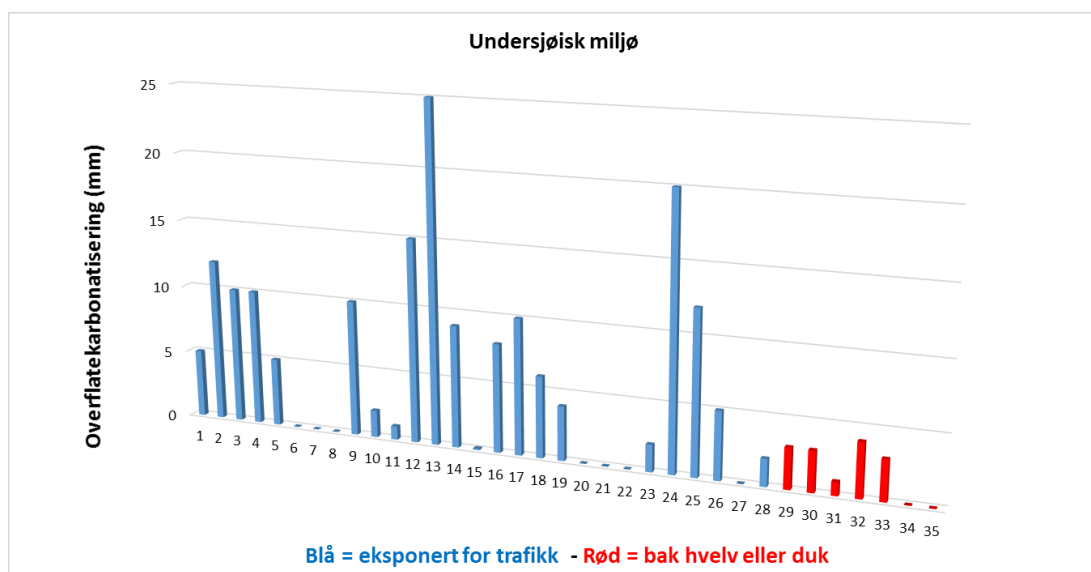
Figur 4.56 samanliknar omvandling i sprøytebetong basert på to ulike reseptar, begge ved betongalder 5 år og begge omtrent 10 cm tykke. SEM-analyse av 2004-betongen viste inntrenging av svovel i sementpastaen frå heftsone (dvs. Sone A), med thaumasitt i luftporer og litt forhøgd kalsium og natrium (salt) inntil 11 mm frå heftsone (Holm 2011b): *Betongen var likevel ikkje svekka og utan stålfiberkorrosjon*. Dette står i kontrast til den opprinneleg betongen frå 1999 som måtte erstattast alt etter fem år på grunn av sterkt forvitring og destruktiv stålfiberkorrosjon (Figur 4.57) forårsaka av omfattande magnesiumangrep, indre karbonatisering og utvasking (Hagelia 2011b). Forskjellane mellom dei to reseptane er diskutert i kapittel 6.



Figur 4.57: Foto av opprinneleg sprøytebetong vinteren 2004. Merk den sterke forvitringa og destruktiv stålfiberkorrosjon. Mesteparten blei meisla bort og erstatta med ny betong med annan resept i 2004 (Foto: Per Hagelia).

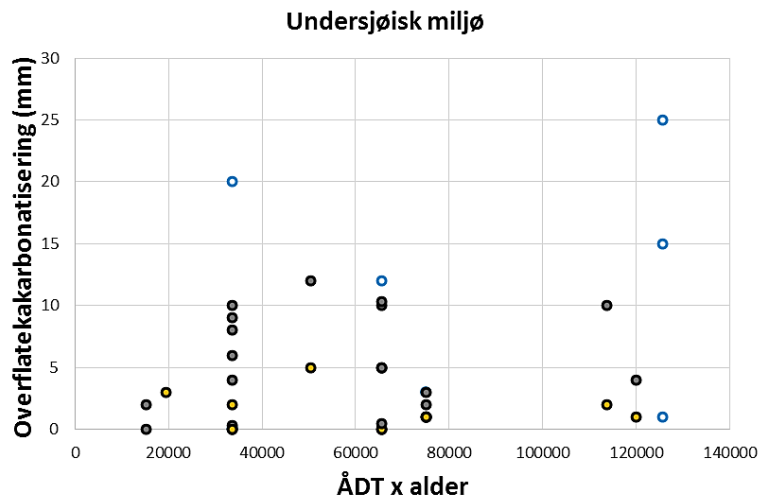
#### 4.6.2.2 Overflatekarbonatisering (OC), bindemiddel og mikroriss

Karbonatisering på grunn av CO<sub>2</sub> frå tunnellufta er generelt djupare i overflater med sprøytebetong direkte eksponert for trafikk enn sprøytebetong bak hvelv eller duk (Figur 4.58). Gjennomsnittet for direkte eksponert sprøytebetong er 6 mm mot 2 mm for betong bak hvelv og duk. Karbonatisering i den nye sprøytebetongen med FA sement i servicetunnelen ved pumpesumpen i Oslofjorden viste til samanlikning karbonatiseringsdjup på 2 mm (Figur 4.55).



Figur 4.58: Karbonatiseringsdjup (mm) i overflatesjiktet (OC) på grunn av CO<sub>2</sub> i luft.





Figur 4.59: Overflatekarbonatisering i trafikkeksponert sprøytebetong plotta mot akkumulert trafikkmengde. Symbol for overflateforhold: Opne = «tørr», Grå = fuktige/våte ( $\pm$  utfellingar av kalsitt, brucitt, av og til svært tynn biofilm), Gul = tykk våt biofilm  $\pm$  gips.

I figur 4.59 er karbonatiseringsdjup plotta mot akkumulert trafikkmengde. Diagrammet viser bare betongar som er eksponerte i trafikkrommet. Det er ein viss tendens til at karbonatiseringa aukar i takt med trafikkmengda, men dette er ikkje signifikant ( $R^2 = 0,06$ ).

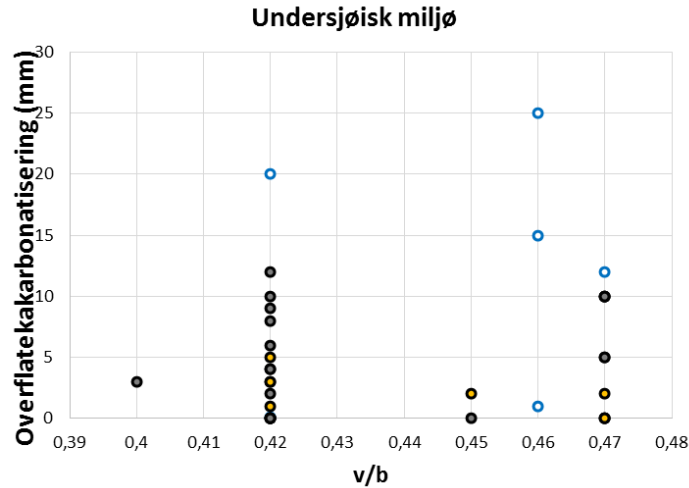
- Den djupaste karbonatiseringa er registrert i relativt tørre betongoverflater, og prøvene hadde få eller ingen mikroriss (Tabell 4.21).
- Våte overflater, som ofte hadde utfellingar av minerala kalsitt og brucitt, ser ut til å ha noko mindre karbonatisering. Mikroriss varierte frå klasse 1 til 3.
- Overflater med tykk våt Mn-Fe biofilm og har lite overflatekarbonatisering.

Karbonatisering på grunn av atmosfærisk  $CO_2$  kan ikkje foregå utan at det er fukt til stades, så sjølv i dei tilsynelatande relativt tørre overflatene er fuktnivået tydelegvis tilstrekkeleg høgt.

Relativt mindre karbonatisering under mineralutfellingar kan tyde på at utfellingane skjermar mot atmosfærisk  $CO_2$  i litt seinare deler av livsløpet (utfellingar kjem etter kvart som tida går).

Biofilm dannar nokre stader syre som kan ha ført til at *delar av tidleg karbonatisert ytterhud er tæra vekk*. Forsking tyder på at det særleg er *lagdelt tykk biofilm* av Mn- og Fe bakteriar som produserer syre, og at betongen under er prega av utluting og lokalt stor grad av nedbryting som går mykje djupare enn overflatekarbonatiseringa (Hagelia 2011b). Ikkje all biofilm har gitt merkbar nedbryting, og det var i slike tilfella ikkje påvist syreproduksjon (eksempel Frøyatunnelen). Årsaka til dette kan vere mikrobiologiske forskjellar eller andre forhold.

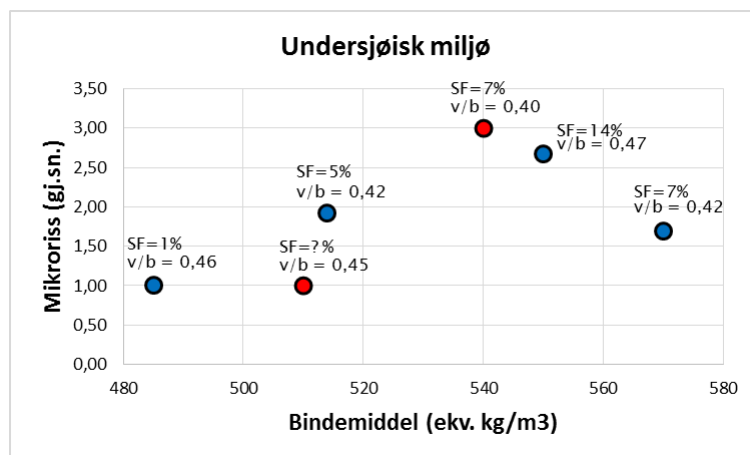
Omfanget av overflatekarbonatisering viser ingen klar samanheng med v/b-talet (Figur 4.60). Dette samsvarer med undersøkinga av sprøytebetong i alunskifermiljø (Kapittel 4.5), og viser at kompleksiteten i sprøytebetong er større enn det ein observerer i laboratorieforsøk.



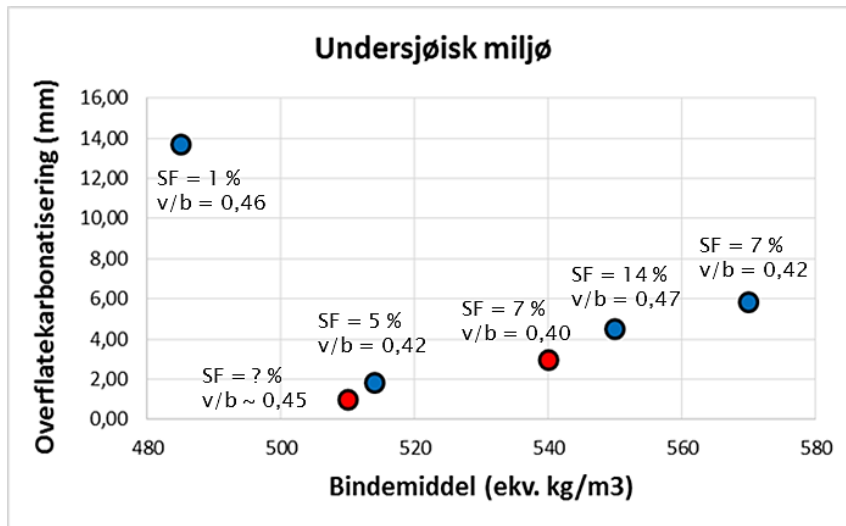
Figur 4.60: Ingen tydelig sammenheng mellom overflatekarbonatisering og vatn/bindemiddel-forholdet. Gjennomsnittsverdiar for kvar tunnel viste heller ikkje korrelasjon (diagram ikkje vist). Symbol som i Figur 4.59.

Mikroriss representerer i prinsipp både primært svinn og effektar av sekundær omvandling (karbonatisering, utluting av kalsium m.m.). Det er ikkje alltid lett å skilje mellom desse. Men klassifiseringa av mikroriss var for det meste basert på uomvandla deler (Sone B) og representere kanskje mest primært svinn. Tidleg svinn vil naturlegvis kunne påverke og forsterke seinare opprissing i samband med nedbrytingsreaksjonar.

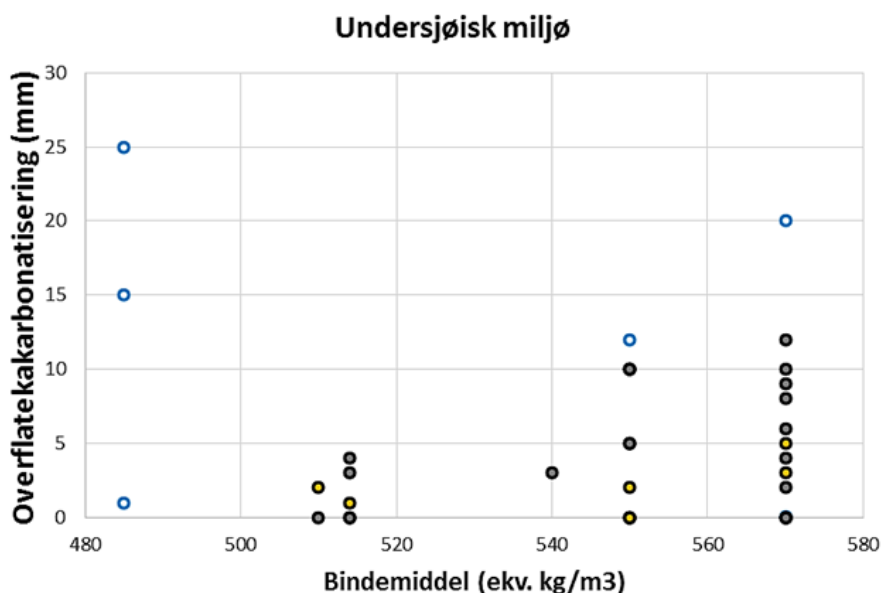
Ein reknar til vanleg med at potensialet for tidleg svinn aukar med bindemiddelinnhaldet. På den andre sida vil høgt bindemiddelinnhald ha fordelar i sprøytebetong. Figur 4.61 viser gjennomsnitt av mikroriss (visuelt rangert) som funksjon av bindemiddelinnhald. Diagrammet kan tyde på at det finst eit ugunstig (*pessimalt*) område med tanke på mikroriss/svinn omkring 540 ekv.kg/m<sup>3</sup>, men statistikken er truleg for svak som bevis: Blå symbol er gjennomsnitt av 12 til 13 enkeltprøver og raude symbol representerer hhv. 1 og 2 prøver.



Figur 4.61: Bindemiddelinnhald plotta mot gjennomsnitt av mikroriss pr. tunnel. Raude symbol = dårleg statistisk grunnlag. SF = silikastøv i % av betongvekt. Merk at betongen med lågast bindemiddelinnhald (Byfjordtunnelen) var heilt utan mikroriss.



Figur 4.62: Bindemiddelinnhald plotta mot gjennomsnittleg overflatekarbonatisering pr. tunnel. Djupaste karbonatisering er oppnådd i relativt tørre betongoverflater med lågt bindemiddelinnhald. Same symbol som i Figur 4.61.



Figur 4.63: Bindemiddelinnhald plotta mot overflatekarbonatisering (alle enkeltprøver). Betong som er eksponert for trafikk dominerer dette diagrammet, medan sju betongar med ikkje-eksponert betong (bak hvelv) har 0–4 mm karbonatisering. Symbol som i Figur 4.59.

Samanlikning av Figurane 4.61 og 4.62 tyder på at omfanget av mikrosprekkar ikkje har innverknad på karbonatiseringsomfanget. Figurane 4.62 og 4.63 tyder på at det er ein viss samanheng mellom aukande bindemiddelinnhald og karbonatiseringsdjup. Unnataket er betong i Byfjordtunnelen med det lågaste bindemiddelinnhaldet og djupast karbonatisering.

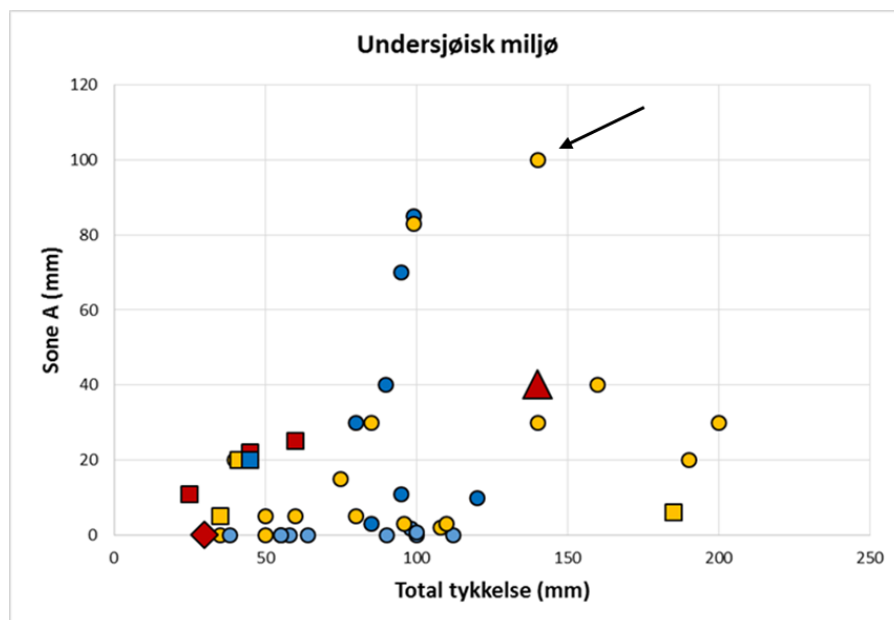
Datagrunnlaget kan tyde på at bindemiddelinnhald mellom ca. 510–540 ekv.kg/m<sup>3</sup> kan vere optimalt med tanke på overflatekarbonatisering. Dette blir diskutert vidare i Kapittel 6, i lys av alle data.

### 4.6.2.3 Omvandling og nedbryting i Sone A og Sone C: Effekt av heftforhold og biofilm

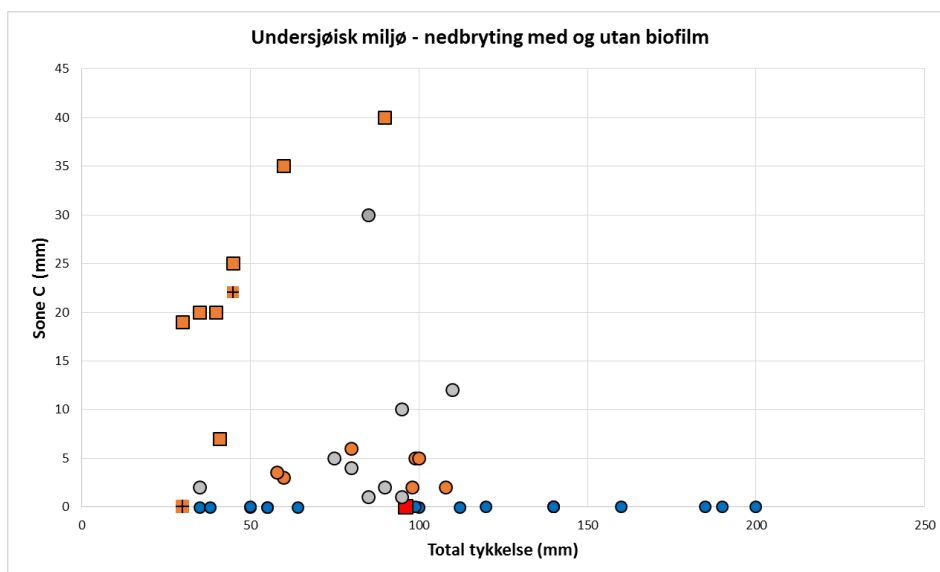
Sone A mot berg og Sone C mot overflata representerer ulike problematikker og er derfor plotta kvar for seg. I datagrunnlaget (Tabell 4.21) er alle typar omvandling registert, og ikkje alle representerer nemneverdig nedbryting.

Figur 4.64 viser at omvandling og nedbryting i Sone A variere svært mykje. Sirkulære symbol med Sone A > 5–10 mm representerer diffus omvandling med magnesium og indre karbonatisering *utan synleg mekanisk svekking* av betongen. Dei fleste av betongane med omfattande diffus omvandling i Sone A har høg  $v/b = 0,47$  (Flekkerøytunnelen), ofte i kombinasjon med litt svak og permeabel heftsona utan utfellingar (blå symbol). Størst diffus omvandling (ei prøve frå Freifjordtunnelen: pil) har lågare  $v/b = 0,42$ , men i dette tilfellet var *heftsona tydeleg permeabel og porøs* med lett tilgang på aggressivt saltvatn (sjå også Figur 4.66).

Dersom ein ser bort frå effekten av diffus omvandling går det fram at det *bare er kraftigare nedbrytinga* som representerer eigentleg svekking i Sone A på «kort sikt», nemleg magnesiuminntrenging, thaumasitt sulfatangrep, utluting og utfelling av kalsitt/Popcorn kalsitt (firkanta symbol i Figur 4.64). Den mest svekka sprøytebetongen er påverka av syre frå heftsona (raude symbol) hovudsakleg i sjikt < 100 mm. Ein bør merke seg at raud trekant representerer nedbryting med destruktiv fiberkorrosjon på grunn av syreverknad frå biofilm frå heftsona (Freifjord prøve 6150, totalt 140 mm). Dette er ein svært uvanleg tilstand og kan ikkje reknast som dimensjonerande med tanke på minimumskrav til tykkelse.



Figur 4.64: Total tykkelse plotta mot omvandling/nedbryting i Sone A mot berg: Firkanta symbol = thaumasitt, brucitt/MSH & kalsitt med utluting; Sirklar = utan omvandling eller med diffust utvikla Mg og intern karbonatisering lokalt med litt marginal korrosjon. Heftforhold: Blå symbol = utan utfelling på heftsona. Orange = utfellingar på heftsona av brucitt og/eller kalsitt; Raude symbol = syre på heftsona (Trekant = innverknad av syre frå biofilm på heftsona. Rombe = opprissa betong med kraftig fiberkorrosjon pga. syre frå biofilm, elles upåverka pasta).



Figur 4.65: Total tykkelse plotta mot omvandling og nedbryting i Sone C (rett under overflatekarbonatisert sone OC). Sone C omfattar også tapt ytre tverrsnitt i nokre tilfelle i Oslofjordtunnelen, der dette var muleg å estimere. Orange firkantar = tydeleg nedbryting under tykk syregivande Mn-Fe biofilm (pH 5,5–6,5) med tapt tverrsnitt (Tabell 4.21); Orange kvadrat med kryss = avskalingsfragment knytta til Mn-Fe biofilm; Orange sirklar = omvandling/nedbryting under tynn og ofte diskontinuerleg biofilm utan syre (pH = 7–7,5). Raudt kvadrat = svært marginal omvandling/nedbryting under uproblematisk biofilm (Frøyatunnelen m v/b = 0,40, pH = 7,5); Grå sirklar = omvandling med magnesium og indre karbonatisering (PCD mm). Blå sirklar = intakt betong. Merk at total tykkelse > 110 mm er upåverka (sjå tekst for kommentar).

Figur 4.65 viser omvandling og nedbryting i Sone C under overflatekarbonatiseringa. Det er skild mellom ulike effektar på sprøytebetong:

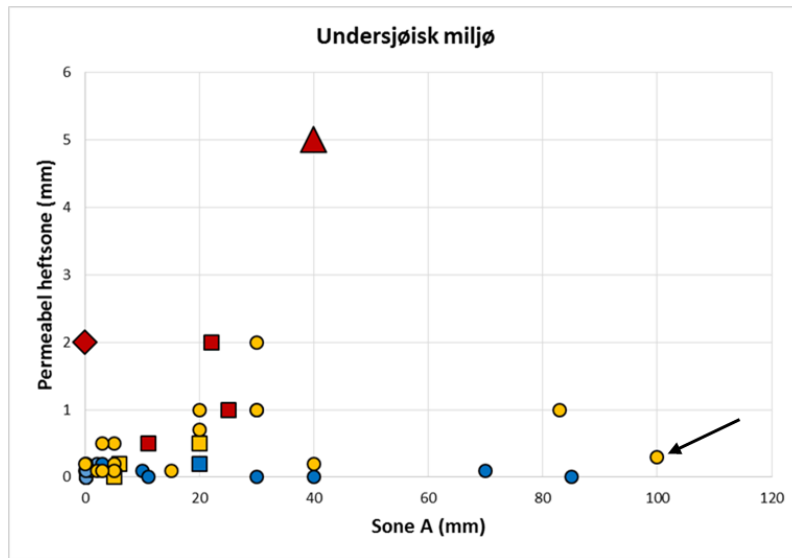
- Syregivande tykk lagdelt Mn-Fe biofilm (pH = 5,5 til 6,5–7)
- Tynn biofilm generelt og eksempel på uskadeleg biofilm (Frøya), alle med pH = 7–7,5
- Betongar utan biofilm (pH ~7–8)

Effekten av tykk syregivande biofilm har lokalt redusert det opphavlege tverrsnittet med minst 40–50 mm etter bare 4–5 år. Observasjonar i Oslofjordtunnelen ved Pelnummer 16060 viser at denne nedbrytinga fortsetter. Den sterke omvandlinga og nedbrytinga i Sone C er avgrensa til sprøytebetong med total tykkelse < 100–110 mm.

Diagrammet viser at betong tykkare enn 110 mm ikkje er omvandla i Sone C, men ingen av desse betongane hadde biofilm på overflata. Det er likevel grunn til å rekne med at tykk betong hindrar oppblomstring av biofilm på overflata:

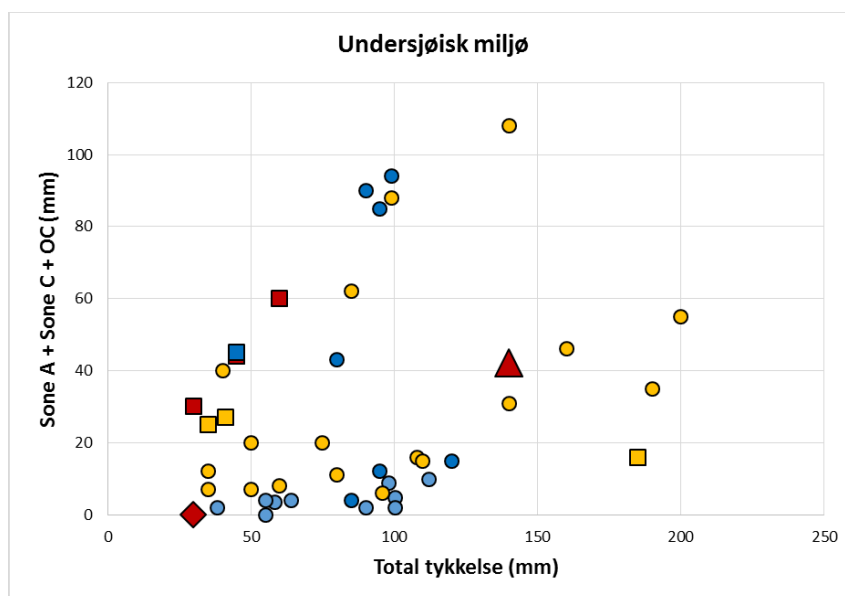
- Tykk betong fører til at fukttransport gjennom tverrsnittet går vesentleg saktare enn i tynnare sjikt (Darcy's lov), og som dermed motverkar utluting og auka permeabilitet. Dette hindrar stor tilgang på ionerikt vatn med blant anna Fe og Mn, som er avgjerande for vekst av skadeleg biofilm.
- Akkumulasjon av biofilm er mest typisk knytta til punktlekkasjar. Tykk sprøytebetong utan biofilm er i praksis også utan lekkasjar på gjennomsettande riss. For eksempel er

lekkasjar med biofilm avgrensa til få og små førekomstar i relativt tynn opprissa betong nede mot sålen i Byfjordtunnelen: ingen vassførande riss med biofilm og i tykk betong.



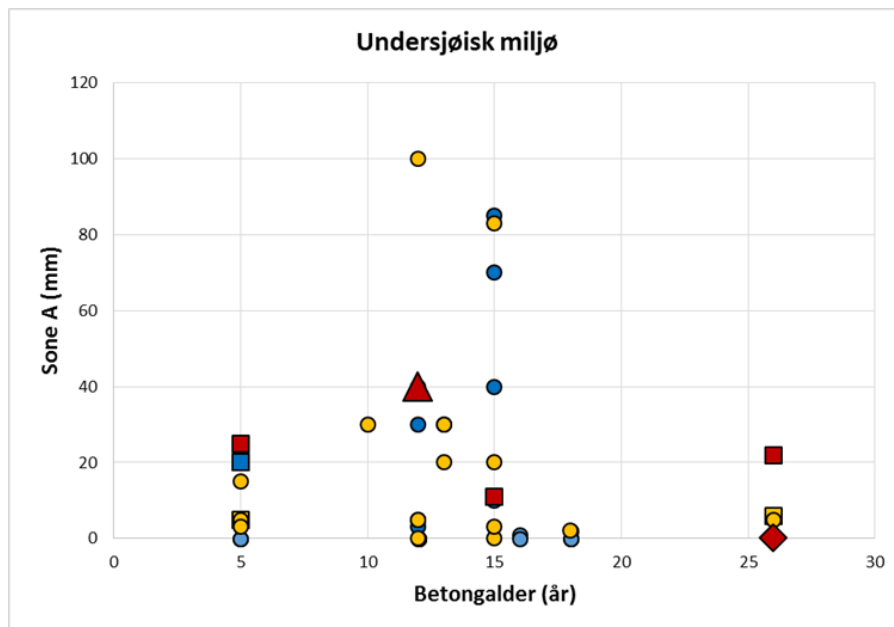
Figur 4.66: Omvandling og nedbryting i Sone A plotta mot opning på heftsone. Symbol som i Figur 4.64. (Pil = Freifjord 3910-1 med veldig porøs betong mot heftsone, men utan syreverknad).

Heftforholda er vidare illustrert i Figur 4.66. Opninga på heftsone bygger på mikroskopering av tynnslip og inspeksjon av kjerner. Som i Figur 4.64 representerer *sirkelsymbol*/variabel grad av *diffus omvandling* utan fysisk nedbryting så langt. Nedbrytinga er i første rekke knytta til betong med effektar av syre på heftsone (raude symbol), og aukar med aukande opning på heftsone. Betong med thaumasitt, magnesiuminntrenging og utluting med utfelling av kalsitt (PCD m.m.), men utan syrepåverknad (brune og blå firkantar), har ført til nedbrytande omvandling mellom 5–20 mm inn frå heftsone. Uomvandla eller svakt omvandla sprøytebetong i Sone A har liten permeabilitet på heftsone.



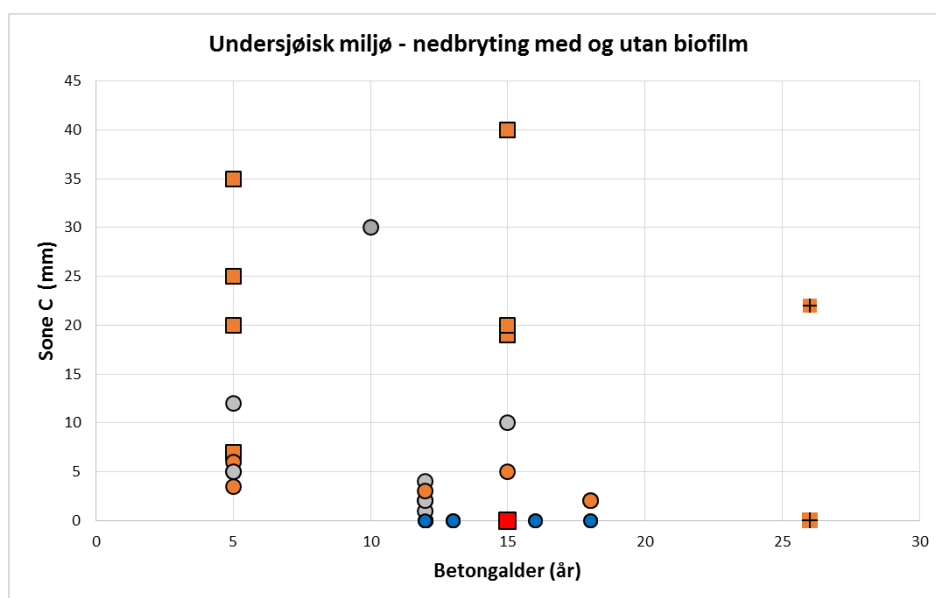
Figur 4.67: Total tykkelse plotta mot total omvandling (Sone A, Sone C og OC). Symbol som i Figur 4.64.

Figur 4.67 viser total omvandling mot total tykkelse. Dersom vi igjen ser bort frå den diffuse omvandlinga utan tydeleg mekanisk svekking, samt den svært unormale betongen med angrep frå biofilm også frå heftsona (raud trekant), så er dei fleste betongane med sterk nedbryting/omvandling mindre enn 100 mm tykke. Eit unnatak er ein 185 mm tykk betong med thaumasitt-angrep, magnesiuminntrenging, utluting og kalsitt-utfelling i Sone A (orange firkant).

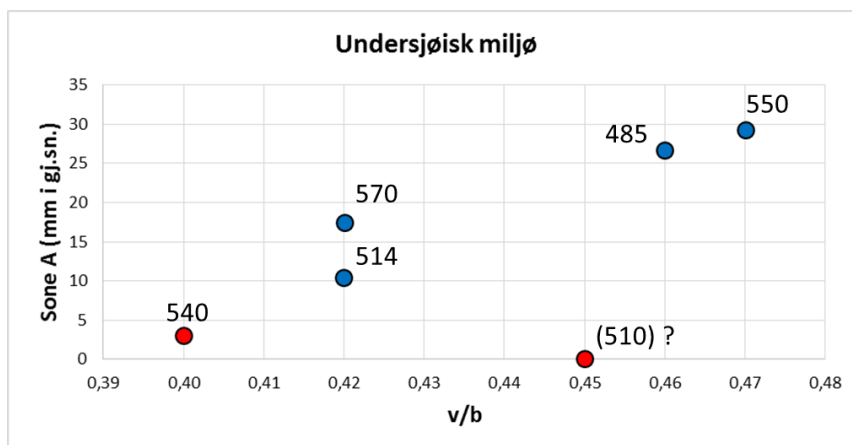


Figur 4.68: Betongalder plotta mot Sone A. Symbol som i Figur 4.64.

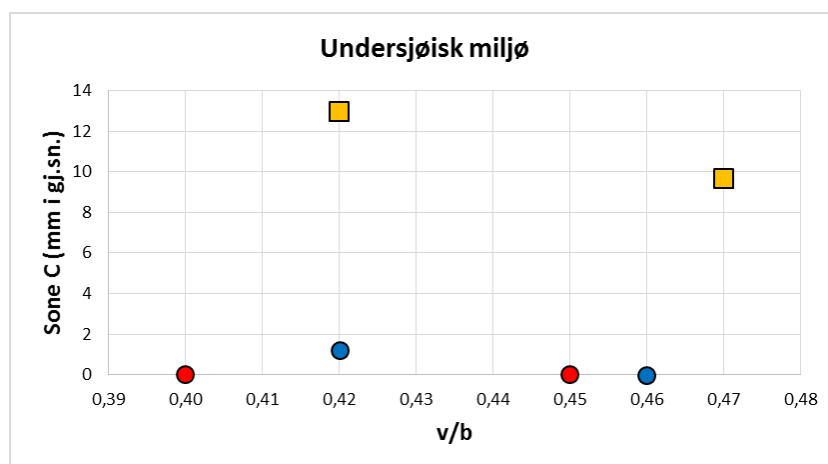
Figurane 4.68 og 4.69 viser at det ikkje er nokon samanheng mellom betongalder og omvandling i Sonene A og C. Det er tydeleg at tilgangen på aggressive vatn og biofilm saman med materialeegenskapar er viktigare med tanke på bestandigheit.



Figur 4.69: Betongalder plotta mot Sone C. Symbol som i Figur 4.65.



Figur 4.70: Gjennomsnittleg omvandling/nedbryting i Sone A viser signifikant positiv korrelasjon med  $v/b$ .  $R^2 = 0,93$ , eksklusive uteliggjar med  $v/b = 0,45$  (Sløverfjordtunnelen). Bindemiddelinnhaldet er også vist. Symbol som i Figur 4.61.



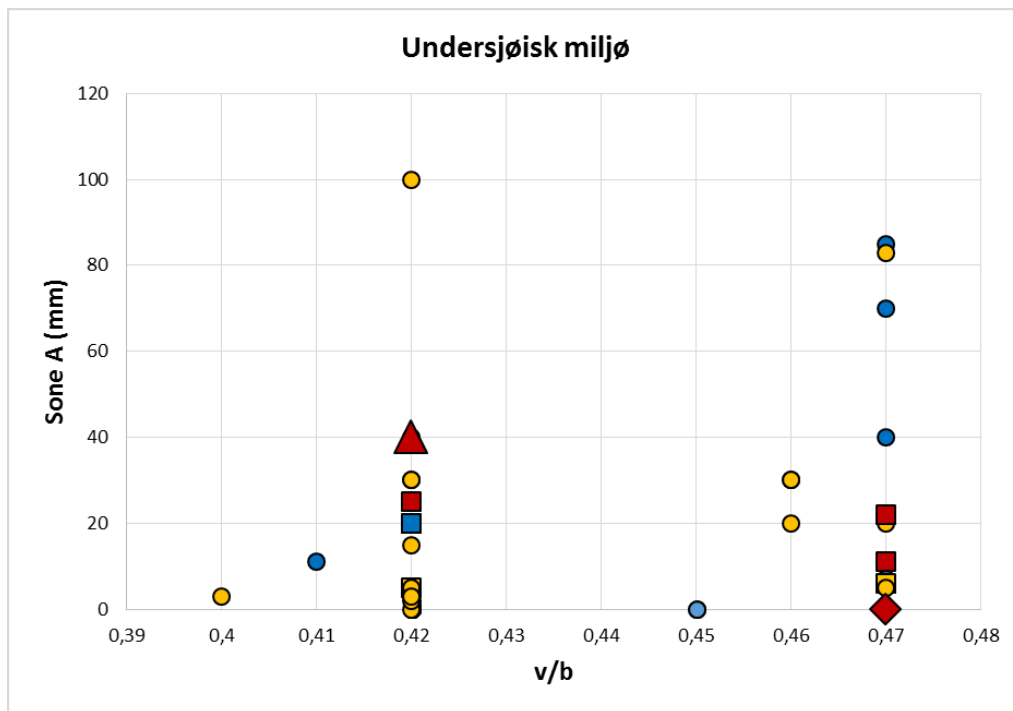
Figur 4.71:  $v/b$  plotta mot gjennomsnittleg omvandling/nedbryting i Sone C. Brune symbol representerer prøver som i gjennomsnitt har stort innslag av tykk biofilm (sjå Figur 4.72).

Figurane 4.70 og 4.71 viser «dei store tal» representert ved gjennomsnitt av kvar tunnel. Gjennomsnittleg omvandling og nedbryting i Sone A er avhengig av  $v/b$ -talet, med størst omvandling ved  $v/b = 0.46$  og  $0,47$ . Omfanget i Sone C er derimot mest avhengig av biofilm. Sprøytebetong med størst innslag av tykk biofilm i utvalet (brune symbol) har ført til størst omvandling og nedbryting. Merk at betongen med  $v/b = 0,40$  (Frøyatunnelen) var dekt av tilsynelatande uskadeleg biofilm ( $pH = 7.5$ ).

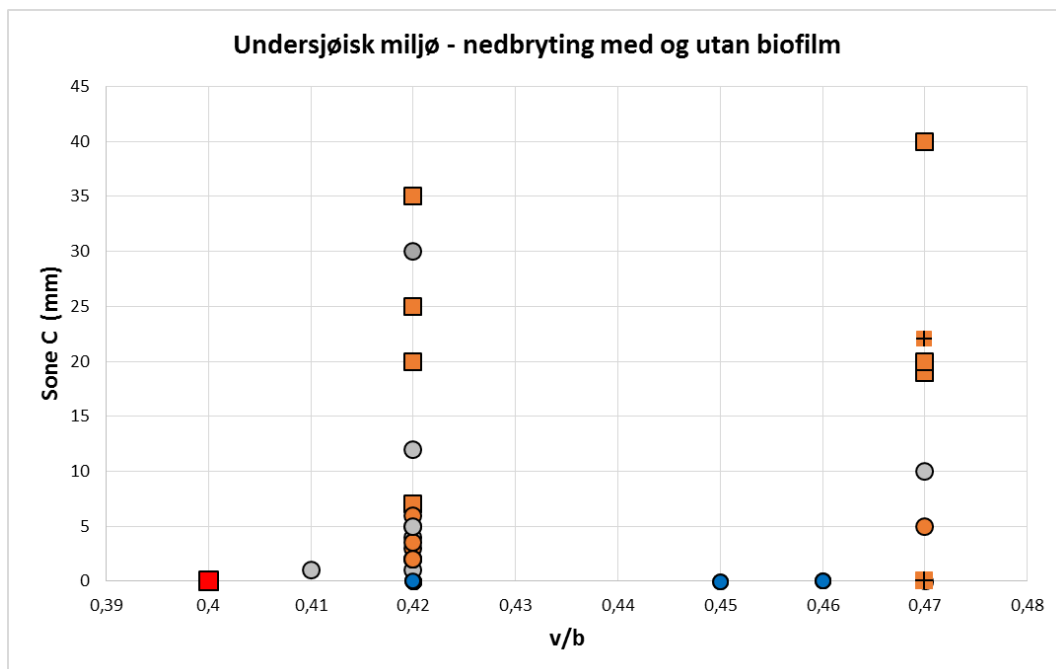
Figurane 4.72 og 4.73 viser tilsvarende diagram der alle prøvene er plotta. Sone A varierer svært mykje mellom lokalitetane, men med tydeleg tendens til aukande omvandling og nedbryting ved høge  $v/b$ -tal. Det mest avvikande punktet med høgst diffus omvandling er prøva frå Freifjord med porøs sprøytebetong mot opa heftsone. Figur 4.74 tyder også på at det kan vere ein samanheng med aukande omvandling/nedbryting i Sone A og høgt bindemiddelinnhald.



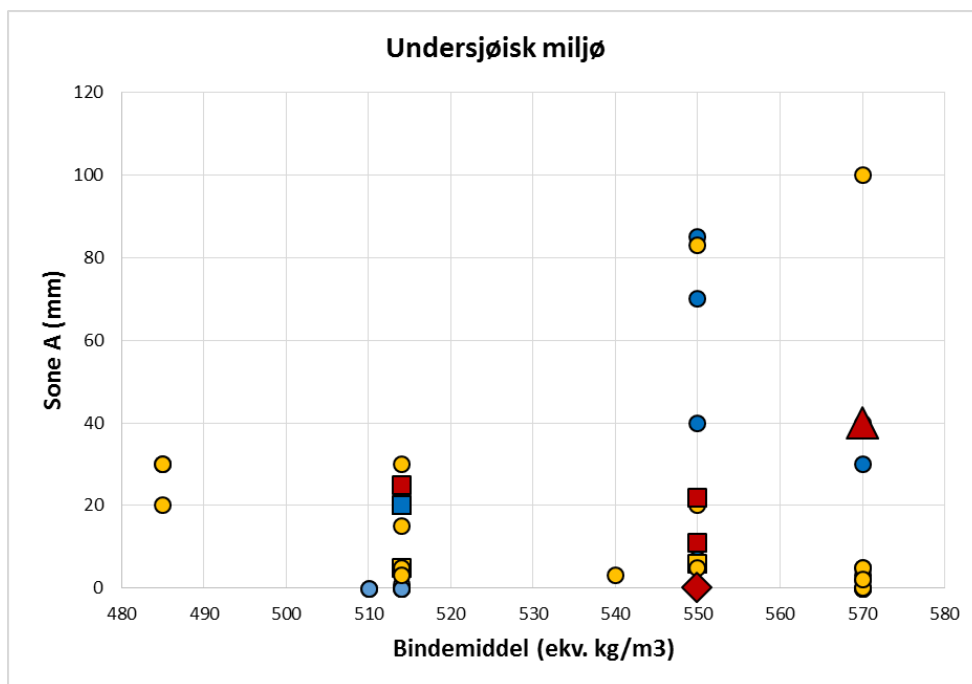
Omfanget av Sone C er derimot sterkest påverka av biofilm, og er størst under tykk syredannande Mn-Fe biofilm. Nedbrytinga i Sone C ser ut til å vere uavhengig av  $v/b$ -tal mellom 0,42 og 0,47 og er også tilsynelatande uavhengig av bindemiddelinnhaldet (Figur 4.75).



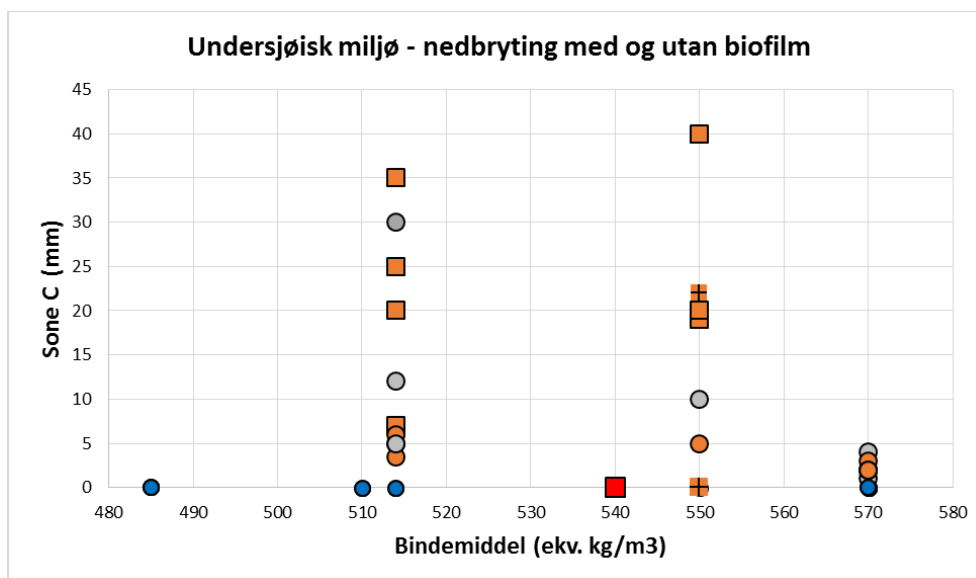
Figur 4.72:  $v/b$  plotta mot Sone A for alle prøvene. Symbol som i Figur 4.64.



Figur 4.73:  $v/b$  plotta mot Sone C for alle prøvene. Symbol som i Figur 4.65.

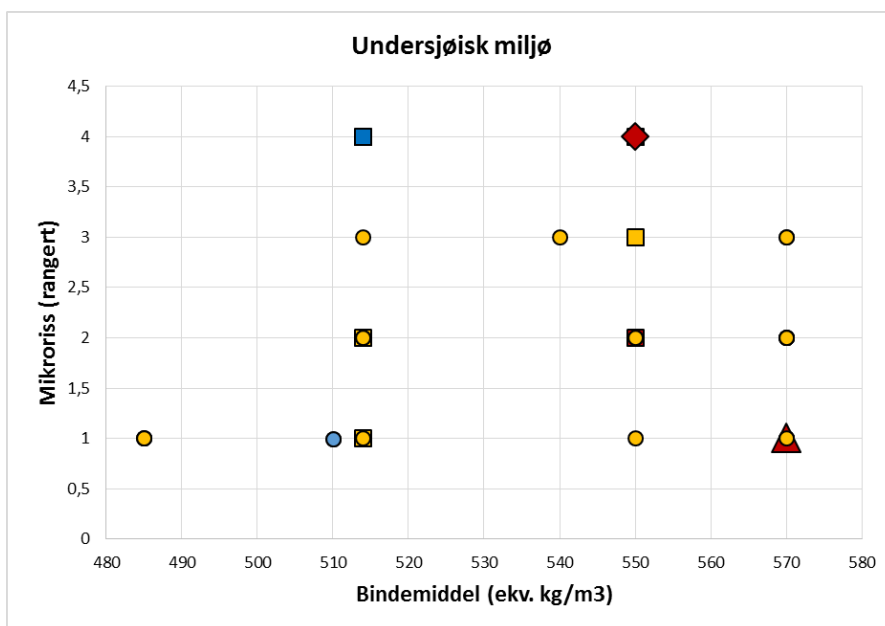


Figur 4.74: Bindemiddelinnhaldet plotta mot Sone A for alle prøvene. Symbol som i Figur 4.64.

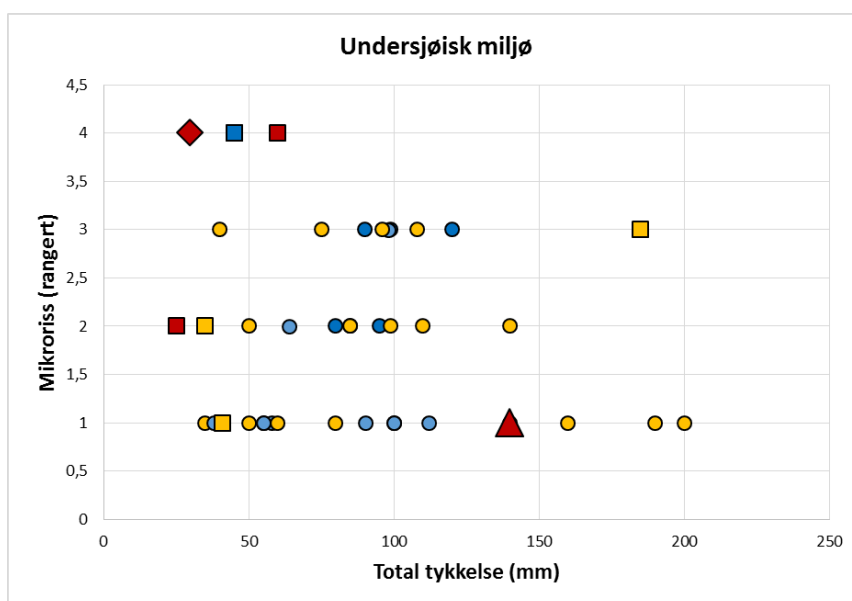


Figur 4.75: Bindemiddelinnhaldet plotta mot Sone C for alle prøvene. Symbol som i Figur 4.65.

Mikroriss i sprøytebetongen representerer i prinsipp både primære svinnriss og effektar av seinare omvandling og nedbryting. Ein reknar ofte med at svinnpotensialet er størst i betong med høgt bindemiddelinnhald. Figur 4.76 viser ingen samanheng mellom mikroriss og bindemiddelinnhald og heller ikkje silikainnhaldet (sjå Tabellane 4.20 og 4.21). Dette gjeld også dersom vi ser bort frå dei mest nedbrotne betongane. Årsaker til dette kan vere at rangeringa av mikroriss er for grov, at dei enkelte sprøytebetongane har vore utsett for ulik grad av sekundær omvandling og at også det reelle bindemiddelinnhaldet i kvar enkelt prøve naturlegvis ikkje er eksakt lik reseptane som blei brukt.



Figur 4.76: Bindemiddelinnholdet plotta mot mikroriss for alle prøvene viser ingen sammenheng. Symbol som i Figur 4.64.

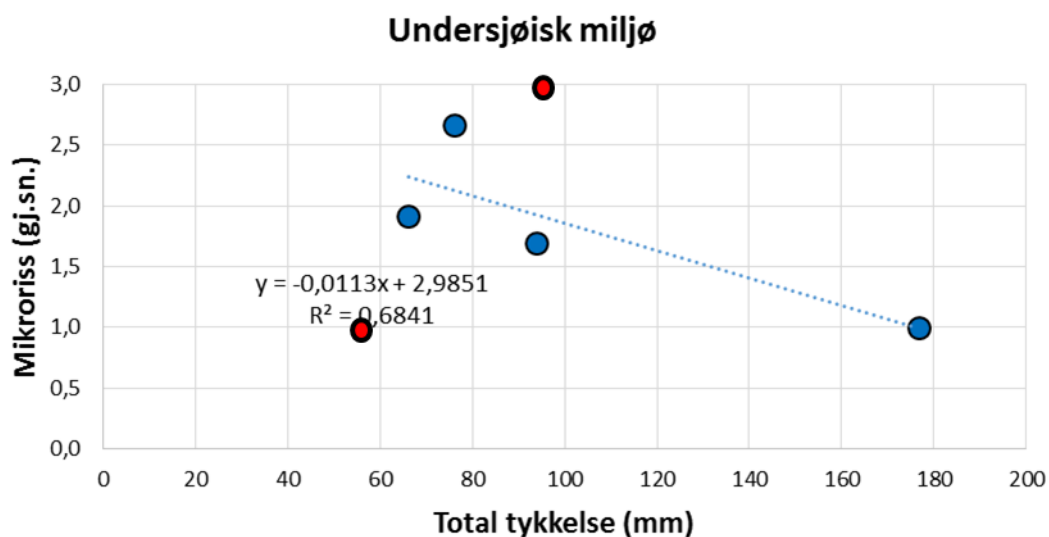


Figur 4.77: Total tykkelse plotta mot mikroriss for alle prøvene. Symbol som i Figur 4.64.

Erfaring frå tunnelar er vanlegvis at tykk sprøytebetong har færre gjennomsettande riss og sprekker enn tynne sjikt (Røhrsveen og Lygre 1996). Av den grunn har det også interesse å samanlikne utviklinga av mikroriss med total tykkelse.

Figur 4.77 viser at det er ein viss tendens til at omfanget av mikroriss aukar mot tynnare betong (bare tre eksempel på klasse 3 i betong tykkare enn 100 mm), også når vi ser på «dei store tal» (gjennomsnitt pr. tunnel) i Figur 4.78. Dette er på den andre sida ikkje muleg å sjå

nokon samanheng mellom observerte mikroriss i intakt Sone B og omvandling/nedbryting i Sonene A og C. Vi vurderer likevel at mikroriss danna ved primært svinn vil ha betydning for utviklinga på sikt.



Figur 4.78: Gjennomsnittleg total tykkelse plotta mot gjennomsnittleg mikroriss for kvar tunnel. Merk at statistikken er dårleg for dei raude punkta (basert på 1 og 2 prøver). Grunnlaget bak dei blå punkta er 12–13 enkeltprøver.

### 4.6.3 Stålfiberkorrosjon

Det blei utført ei rangering av stålfiberkorrosjon i Sone A, Sone B, Sone C og Sone OC basert på observasjonar i tynnslip assistert med visuell undersøking av kjerneprøver med tynnslip (Tabell 4.22). Klassane (karakterar) er definerte i Kapittel 4.6.2. Stålfiberkorrosjon er stort sett fråverande i Sone B («intakt betong»). Hovudmålet var å undersøke samanhengar mellom korrosjonsomfang og tykkelse, samt andre parameterar.

Med utgangspunkt i Tabell 4.22 blei det rekna ut korrosjonsomfang i kvar prøve ved vekting av omfanget i kvar individuelle sone:

$$\text{Vekta karakter} = (A/T \times Ka) + (B/T \times Kb) + (C/T \times Kc) + (OC/T \times Koc)$$

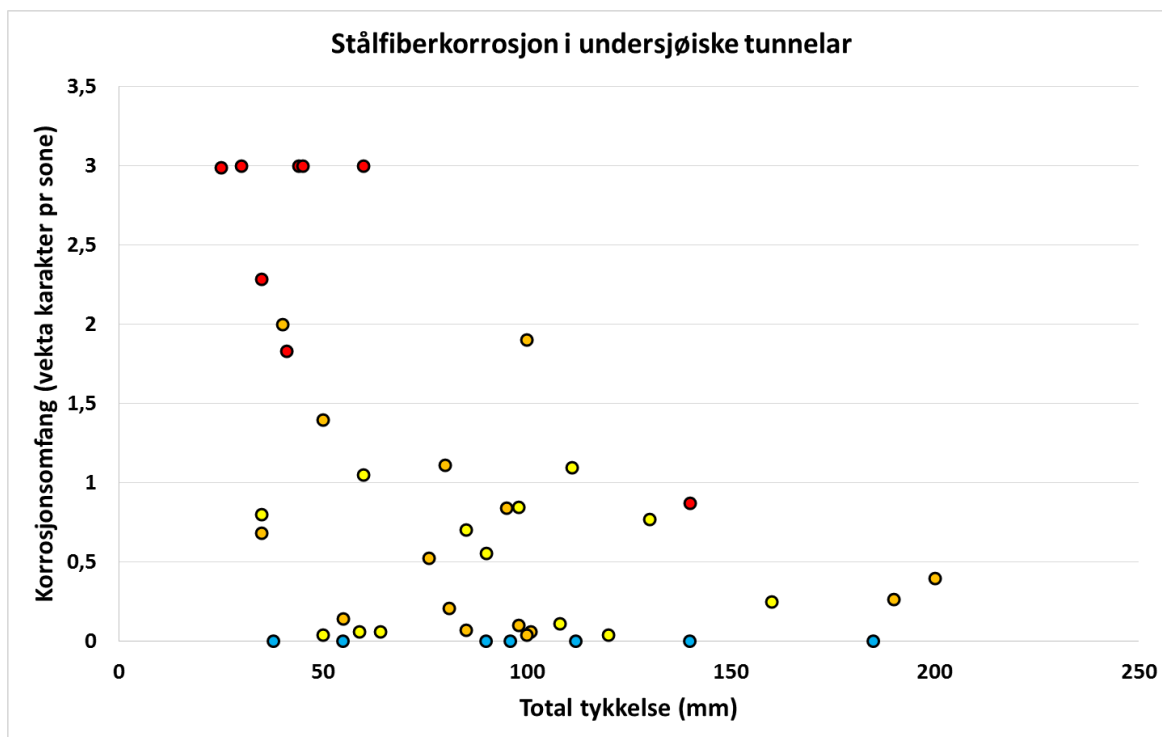
$A, B, C$  &  $OC$  = breidda til dei respektive sonene (mm)

$T$  = total tykkelse (mm)

$Ka, Kb, Kc$  &  $Koc$  = karakterar gitt dei respektive sonene (0, 1, 2, 3)

Tabell 4.22: Oversikt over tykkelse (mm) av sonene A, B, C og OC med karakter (Klasse 0-3) for korrosjonsomfang i kvar sone.

Prøvenr (ref.Tab 4.21)	Fiberkorrosjo		Relativt intakt Fiberkorrosjo		Fiberkorrosjo		Fiberkorrosjo		Vekta karakter
	Omvandling Sone A	Sone A	Sone B	Sone B	Omvandling Sone C	Sone C	Omvandling OC	Sone C	
974	10	0	105	0	0	0	5	1	0,04
1069	0	0	23	0	0	0	12	2	0,69
1070	40	0	0	0	40	1	10	1	0,56
1071	85	2	5	0	0	0	10	2	1,90
1074	70	1	10	0	10	0	5	2	0,84
1373	11	3	0,1	0	14	3	0	0	2,99
1374	83	1	10	0	5	0	0	0	0,85
1375	20	2	0	0	20	2	0	0	2,00
885H	6	0	169	0	0	0	10	0	0,00
1380H	5	0	43	0	0	0	2	1	0,04
1380-9	0	0	30	3	0	0	0	0	3,00
ST 1380	22	3	0	0	22	3	0	0	3,00
2862 1-1	30	0	109	0	0	0	1	0	0,00
2862 1-2	20	1	155	0	0	0	15	2	0,26
2868 2-1	30	1	145	0	0	0	25	2	0,40
3730-1	30	1	41	1	0	0	9	2	1,11
3730-3	0	0	88	0	2	0	0	0	0,00
3910-1	100	1	30	0	0	0	0	0	0,77
3910-4	0	0	102	0	0	0	10	0	0,00
4032-1	40	1	114	0	0	0	6	0	0,25
4890-1	0	0	60	0	0	0	4	1	0,06
4890-3	3	2	81	0	1	0	0	0	0,07
5345	5	0	28	1	2	0	0	0	0,80
5800	0	0	57	1	3	2	0	0	1,05
6150-2	40	3	98	0	0	0	2	1	0,87
6935-1	0	0	30	1	0	0	20	2	1,40
3790-fk3	2	0	92	0	2	0	12	1	0,11
5450-fk17	2	0	89	0	2	0	5	2	0,10
1800H-1	0	0	55	0	0	0	0	0	0,00
1800H-6	0	0	36	0	0	0	2	0	0,00
6660V-14	3	0	90	0	0	0	3	0	0,00
16060-KjIII	20	2	14	1	6	3	1	3	1,83
16060Kj III/	5	2	10	1	15	3	5	3	2,29
16060-Kj IV/	25	3	0	0	10	3	25	3	3,00
16060-Kj V/	20	3	0	0	5	3	20	3	3,00
15925-kj1	0	0	96	0	4	1	1	2	0,06
15925-KJ2	0	0	55,5	0	2,5	1	1	1	0,06
15925-KJ5	5	2	70	0	5	1	1	2	0,21
15930-KJ9	15	2	56	0	4	2	1	2	0,53
15930-kj10	3	1	96	1	11	2	1	1	1,10
15930-3	30	1	25	0	0	1	30	1	0,71
15925-1	1	2	98	0	0	0	1	2	0,04
15930-2	0	0	51	0	0	0	4	2	0,15



Figur 4.79: Total tykkelse av alle prøver plotta mot korrosjonsomfang (vekta karakter pr. sone: sjå teksten). Symbolfargene er: Blå = ingen fiberkorrosjon (klasse 0), Gul = frisk fiber med svært marginal korrosjon (bare svakt antyda i polarisasjonsmikroskop, klasse 1), Orange = frisk fiber med lokalt destruktiv fiberkorrosjon i ytre deler (klasse 2) og Raud = destruktiv fiberkorrosjon, omfattande eller med total nedbryting. Resultatet er diskutert i Kapittel 6.

Det er av stor interesse å undersøke omfanget av stålfiberkorrosjon og om det er muleg, med tanke på design, å unngå eller minske potensialet for framtidig korrosjon. Figur 4.79 viser tydeleg at korrosjonsomfanget i erfaringsmaterialet vårt *minkar når tykkelsen aukar*. Diagrammet viser to forhold:

- Vekta karakter (verdiar  $< 1$  har svært lite/ikkje korrosjon; verdiar  $> 2$  har tydeleg innslag av korrosjon).
- Fargekode som viser førekomst av «verste korrosjonsklasse» i kvar enkelt prøve.

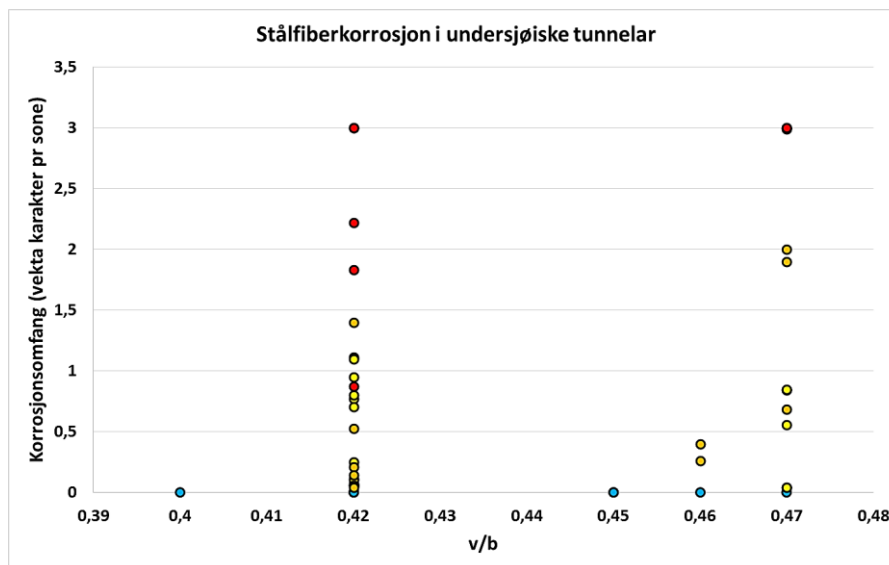
Vekta korrosjonsomfang med verdi  $> 1$  er avgrensa til betong som er tynnare enn omkring 100 mm. Men med utgangspunkt i fargekoden er det også eksempel på tykkare betongar med to førekomstar av korrosjonsklassane 2 og eit eksempel på korrosjonsklasse 3 (raudt symbol).

Sistnemnte representerer 140 mm *kjerne 6650* i Freifjordtunnelen ( $v/b = 0,42$ ) med 40 mm omvandling i Sone A og delvis fullt gjennom-korroderte fibrar. *Nedbrytinga her er likevel svært spesiell og uvanleg, i det at syregivande biofilm har nådd inn på heftsona*. Det er grunn til å tru at dette ikkje kunne skje utan at heftsona i utgangspunktet var permeabel.

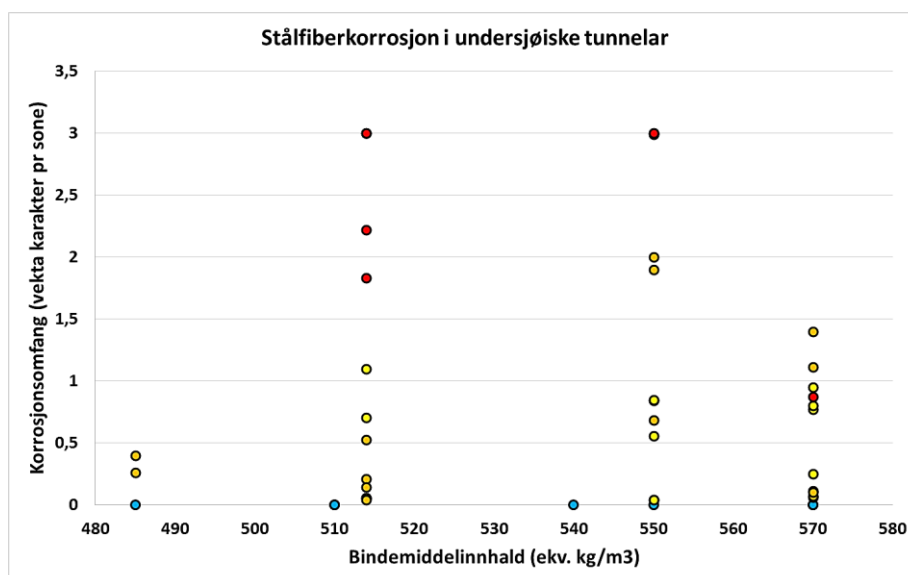
Dei to tykke kjernene i klasse 2 er frå Byfjordtunnelen ( $v/b = 0,46$ ). Begge har tydeleg innslag av destruktiv korrosjon i ytre deler av fiberen i tilknytning til overflatekarbonatisering, men betongen er elles svært god.

Figurane 4.80 og 4.81 viser at det ikkje er klare samanhengar mellom korrosjon og v/b-forholdet eller bindemiddelinnhaldet. Figur 4.82 viser at det heller ikkje er nokon klar samanheng mellom korrosjonsomfang og betongalder.

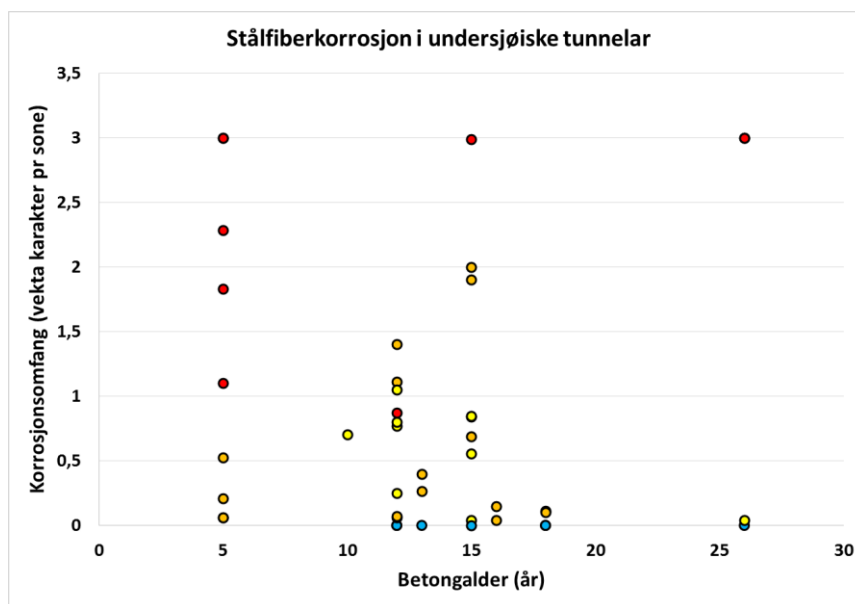
Det er dermed klart at tykkelsen på sprøytebetongen er mest kritisk med tanke på fiberkorrosjon. Grunnlaget for dimensjonering av tykkelse bør i første rekke bygge på typiske og mest representative prøver. Dei fleste prøvene i utvalet viser at uønska stålfiberkorrosjon er avgrensa til sprøytebetong som er tynnare enn omkring 100 mm. Dette blir diskutert vidare i lys av fleire andre forhold i Kapittel 6.



Figur 4.80: Vatn/bindemiddel forhold plotta mot vekta korrosjonsomfang. Effekten av bindemiddelinnhald er underordna den totale tykkelsen til sprøytebetongsjikta. Alle tykkelsar er representert. Symbol som i Figur 4.79.



Figur 4.81: Bindemiddelinnhald plotta mot vekta korrosjonsomfang. Effekten av bindemiddelinnhald er underordna den totale tykkelsen til sprøytebetongsjikta. Alle tykkelsar er representert. Symbol som i Figur 4.79.



Figur 4.82: Betongalder plotta mot vekta korrosjonsomfang. Effekten av år og alder er underordna den totale tykkelsen til sprøytebetongsjiktet. Alle tykkelsar er representert. Symbol som i Figur 4.79.

#### 4.6.4 Resultat frå standard betonganalyse

##### 4.6.4.1 Kloridinntrenging og korrosjon

Resultata viser at undersjøiske sprøytebetong oftast har høgt kloridinnhald, utan at dette hittil har ført til særleg mykje stålfiberkorrosjon. Dette delkapittelet;

- rapporterer kloridprofilane frå undersjøiske tunnellokalitetar
- kommenterer korrosjonsomfanget på kvar lokalitet
- rapporterer om lokale forhold som kan ha påverka korrosjonsomfanget

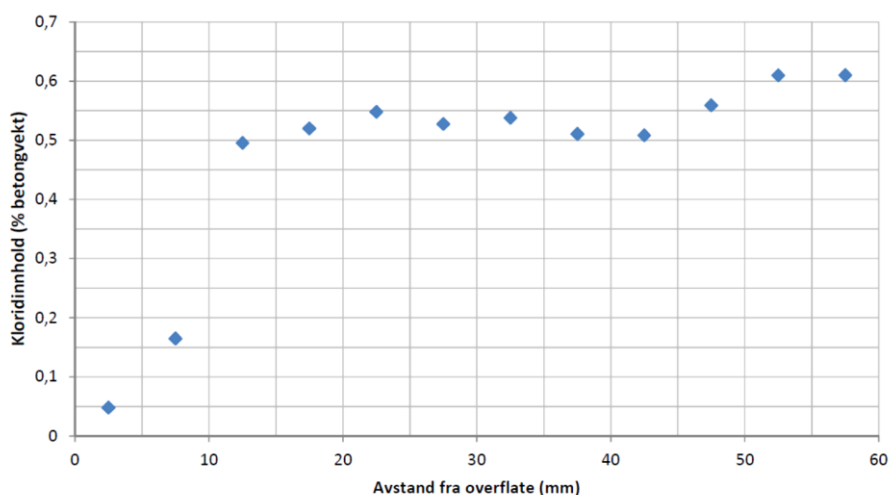
Samanhengar mellom kloridinntrenging og korrosjon er diskutert vidare i Kapittel 6.

##### *Flekkerøytunnelen*

Det blei ikkje utført kloridanalysar av betongen i samband med «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar» (Davik 1997b). Mannvit (2015d) presenterte kloridprofilar frå pel 885 og 1380. Begge viser svært sterk auke i kloridinnhaldet frå overflata og innover mot heftsona. Dette vitnar om inntrenging av salt grunnvatn frå bergsida.



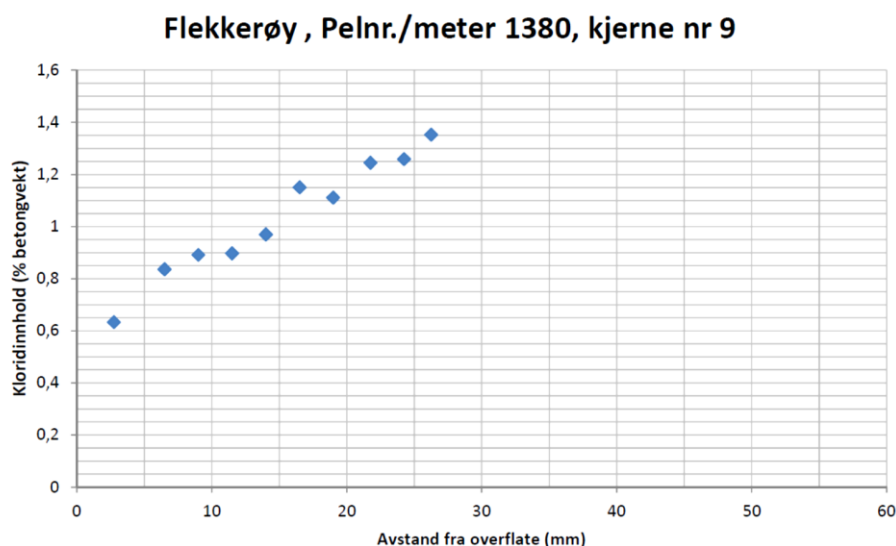
### Flekkerøy , Pelnr./meter 885, kjerne nr 11



Figur 4.83: Kloridinnholdet ved pelnummer 885 var svært høgt i 2014 (betongalder 26 år).

Kjerne 885–11 (Figur 4.83) hadde *ikkje stålfiberkorrosjon*, trass i at kloridinnholdet er mykje høgare enn 0,1 % av betongvekta; for det meste mellom 0,5 og 0,6 %. Kjerner bora ut i same området hadde også høgt innhald av mikroriss (klasse 3) og svært tynn våt biofilm på overflata: Det var *utfelt kalsitt på heftsona og kalsitt og brucitt på overflata*, og overflatekarbonatiseringa (også utan stålfiberkorrosjon!) nådde inn til 10–12 mm (Tabell 4.21). Det er muleg at både utfellingar og overflate karbonatisering kan ha beskytta mot fiberkorrosjon.

Kjerne 1380–9 (Figur 4.84) hadde ekstremt høgt kloridinnhald på mellom 0,6 og 1,4 % av betongvekta, og *omfattande destruktiv stålfiberkorrosjon*. I dette tilfellet hadde betongen *høgt innhald av kommuniserande mikroriss og makroriss/sprekker* (Klasse 4), og det var verknad av syre både frå heftsona og tykk våt syregivande Mn–Fe biofilm. Sementpastaen mellom sprekkar og riss var i dette tilfellet praktisk talt upåverka. *Betongen var open for syrepåverknad frå biofilm*, som forklarar den omfattande fiberkorrosjonen.



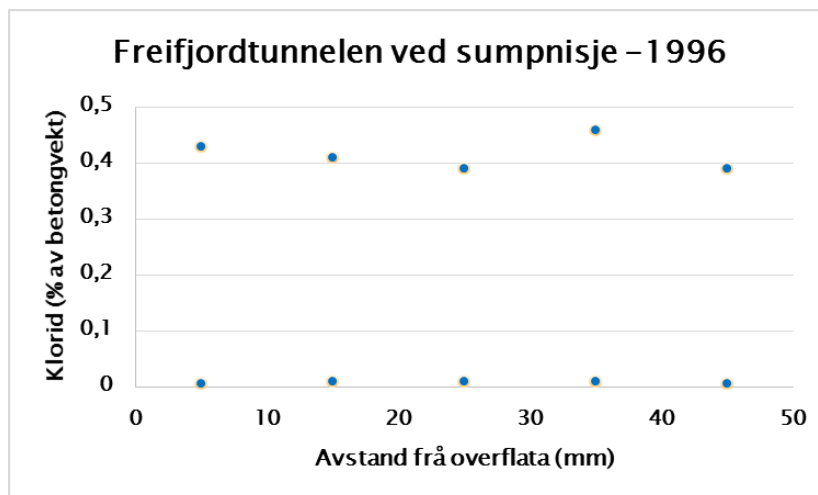
Figur 4.84: Kloridinntrenginga var ekstremt høg i 1380-9. Betongalder 26 år. Sprøytebetongen i området har vore sterkt påverka av aggressiv syredannande biofilm over minst 20 år og tapt ein del av tverrsnittet. Omfattande destruktiv stålfiberkorrosjon.

#### Byfjordtunnelen

Det er så vidt vi kjenner til ikkje undersøkt for kloridinntrenging i denne tunnelen.

#### Freifjordtunnelen

«Riktig bruk av sprøytebetong» (Noteby 1996) og «Moderne vegtunneler» (Holm 2011a) rapporterte kloridprofilar på to ulike tidspunkt, begge frå undersjøisk strekningar (hhv, nærme pel 4900 ved pumpeumpen og pel 3790).



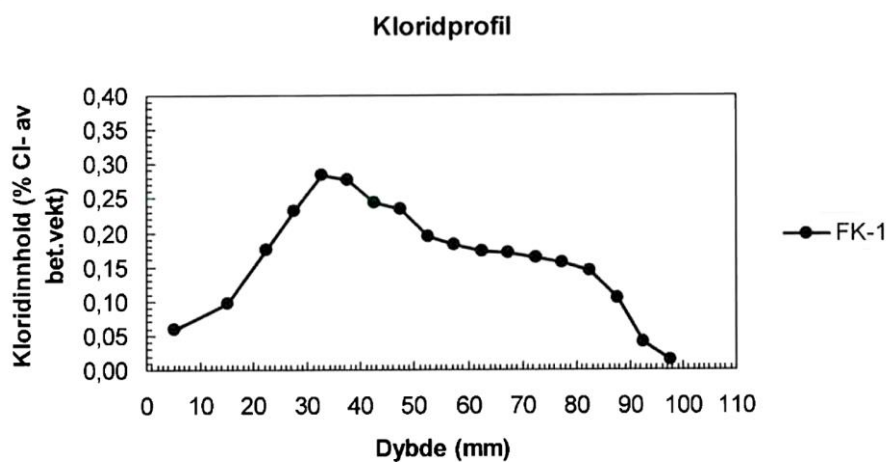
Figur 4.85: Kloridinntrenging i Freifjordtunnelen ved pumpeumpen etter ca. 5 år (Noteby 1996). Det var svært lågt kloridinnhald i Kjerne 1B (nedre) bora ut i vått område i vederlaget, men gjennomgåande høgt kloridinnhald i Kjerne 3A (øvre punkt) bora i vått område med kalkutfellingar 3 m oppe på veggen.

Kjerne 1B frå 1996 hadde ikkje kloridinntrenging (Figur 4.85), og var utan fiberkorrosjon med 7 mm karbonatisering, utan teikn på inntrenging av saltvatn. Kjerne 3A hadde derimot svært høgt kloridinnhald i samband med kalkutfelling på overflata: Noteby (1996) rapporterte om

korrosjon på fiber gjennom heile tverrsnittet (totalt 50 mm) og at prøva var utan karbonatisering. Dette tyder på inntrenging av salt grunnvatn frå bergsida.

Figur 4.86 viser ein profil med høgt kloridinnhald Freifjordtunnelen i prøve frå 2009 (Holm 2011a), med 0,1 % til 0,3 % Cl<sup>-</sup> frå omkring 20 mm under overflata til 90 mm innover i tverrsnittet. Sprøytebetongen hadde mindre enn 0,1 % klorid både mot heftsona og mot tunnelrommet. Det blei også rapportert om unormalt høgt innhald av svovel og magnesium.

Dette vitnar om inntrenging av salt grunnvatn (det er ikkje brukt svovelførande akselerator). Trass i dette blei det ikkje konstaterst stålfiberkorrosjon i tynnslip. Denne sprøytebetongen hadde god heft mot bergmassen med kvite utfelling av brucitt og kalkspat. Overflata på lokaliteten var våt med tynn biofilm og overflatekarbonatisering 3–12 mm (Tabell 4.21). Det er dermed muleg at utfellinga kan ha blokkert for vidare inntrenging av salt grunnvatn frå bergmassen (sjå Kapittel 6).



Figur 4.86: Kloridprofil gjennom 100 mm tykk sprøytebetong av prøve 3790-fk1 i Freifjordtunnelen etter 13 år (Holm 2011a). Kjerna blei bora ut i vått område 2,5 m oppe på vegg, med kalkutfellingar.

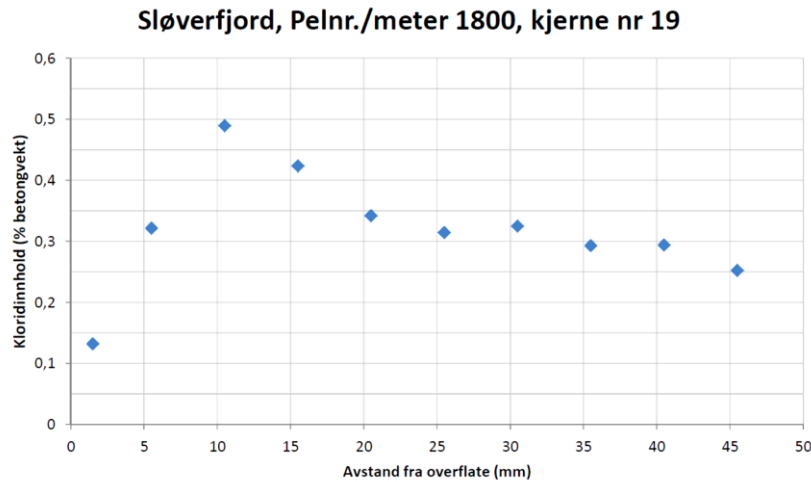
Tabell 4.23: Kloridinnhald – enkeltverdiar i andre prøver frå pelnummer 3790 (Holm 2011a).

Prøver fra borkjerne merket	Kloridinnhold, % Cl <sup>-</sup> av tørr betongvekt	
	Enkeltresultater	Middel
"fk2"	0,236	0,227
"fk10"	0,216	0,199
"fk11"	0,161	0,172

### Sløverfjordtunnelen

Mannvit (2015d) presenterte ein kloridprofil frå undersjøisk delstrekning ved pel 1880 (Figur 4.87). Kloridinnhaldet var over 0,1 % (0,12 % til 0,48 %). *Også i dette tilfellet var stålfiberen rapportert å vere utan korrosjon.* Den aktuelle kjerna (1800–19) fekk brot i heftsona under utboring. Overflatekarbonatiseringa varierte frå 0 til 2 mm. Hefteegenskapane var delvis svært god, og det var tynn utfelling av kalsitt (av og til også gips) på relativt tørr til fuktig overflate

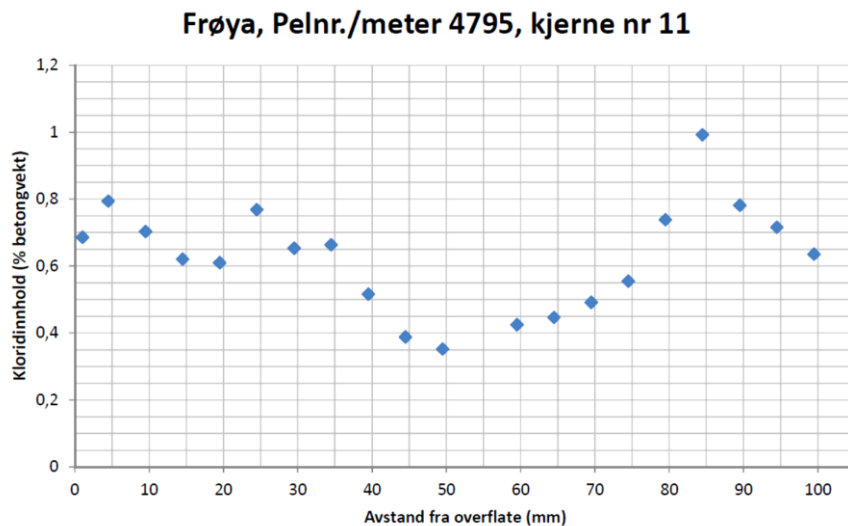
mot tunnelrommet. Det er muleg at heft mot bergmassen var såpass god at inntrenging av klorid kan ha stansa opp.



Figur 4.87: Kloridprofil frå Sløverfjorden, kjerne 1800–19. Kjerna er bora ut i mannshøgde. Betongalder 18 år.

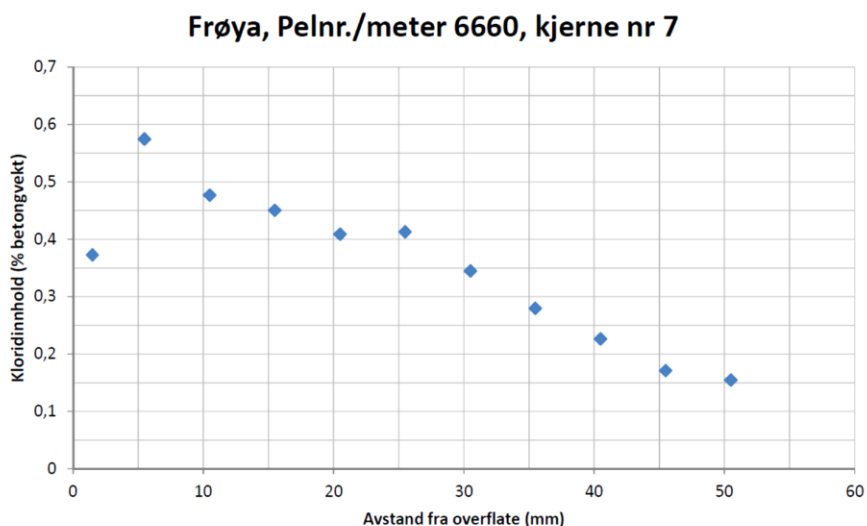
#### Frøyatunnelen

Mannvit (2015d) presenterte to kloridprofilar, ein frå pel 4795 under våt biofilm (tilsynelatande uskadeleg Fe rik biofilm) og den andre frå pel 6660 med innslag av tynn biofilm (Figur 4.88 & 4.89).



Figur 4.88: Kloridprofil frå Frøyatunnelen, kjerne 4795–11. Betongalder 15 år.

Kjerne 4795–11 hadde høgt kloridinnhald mellom 0,3 og 1 % med tre maksima. I følgje Mannvit (2015d) var det ein gjennomsettande sprekk i sprøytebetongsjiktet 85 mm under overflata med 1 % Cl. Kjerna fekk brot i heftsona ved 100 mm under utboring. Det er ikkje rapportert om spesiell korrosjon i kjerna, men ikkje tynnslip frå denne lokaliteten.



Figur 4.89: Kloridprofil frå Frøyatunnelen, kjerne 6660-7. Betongalder 15 år.

Kjerne 6660-7 (venstre side av tunnelen) hadde høgst kloridinnhald frå overflata og inn til omkring 25 mm, for det meste omkring 0,40-0,45 %. Kloridinnhaldet minkar deretter til 0,15 % mot heftsona. Kjerna fekk brot i heftsona under utboring (Mannvit 2015d). Tynnslip av ei kjerne rett ved var *utan stålfiberkorrosjon* (sjå Tabell 4.21). *Heftsona var her litt opa og svak, men hadde utfelling av kalsitt. Overflatekarbonatiseringa (OC) var på 3 mm.* Det ser ut til at inntrenging av saltvatn var størst frå tunnelsida.

Eit separat tynnslip frå pelnummer 6660 på høgre side av tunnelen viste stålfiberkorrosjon med tendensar til avskaling i ytre sjiktet.

#### *Oslofjordtunnelen*

Norconsult bora i 2009 ut kjerner frå servicetunnelen ned til pumpesumpen ved pelnummer 16070 og bak hvelv inn mot frysosona ved pelnummer 15930 (Holm 2011b,c).

Betongen ved pumpesumpen var ny i 2004 og erstatta tidlegare forvitra sprøytebetong. Kloridinnhaldet var under 0,1 % gjennom heile tverrsnittet (Tabell 4.24). Den undersøkte kjerna («ok7») var visuelt ganske homogen og utan stålfiberkorrosjon.  $v/b$ -tal = 0,41 (resept, sjå Tabell 4.19).

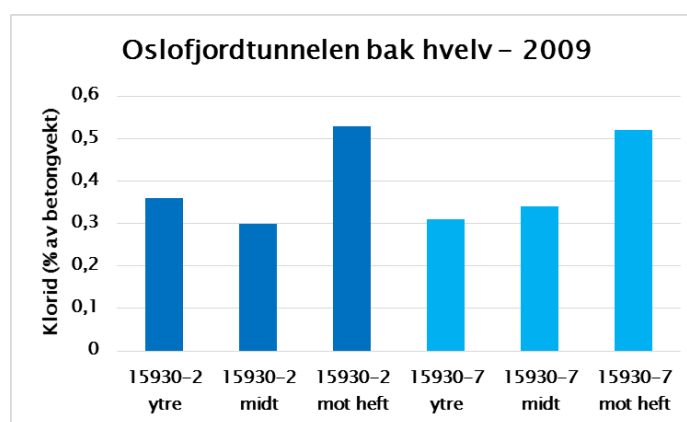
Tabell 4.24: Kloridinnhold frå servicetunnelen ned til pumpesumpen. Betongalder 5 år (Holm 2011b).

**Tabell 8 Kloridinnhold (sjikt mot tunnel)**

Prøve- legeme merket	Kloridinnhold per sjikt [% Cl av betongvekt]						
	Tunnel =>		Avstand fra overflaten [mm] =>			Fjell	
	0-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	...
"ok7"	0,066	0,098	0,089	0,062	0,035	0,028	...

**Tabell 9 Kloridinnhold (sjikt mot fjell)**

Prøve- legeme merket	Kloridinnhold per sjikt [% Cl av betongvekt]					
	Tunnel <= Avstand fra kontaktsone mot fjell[mm] <= Fjell					
	...	30-25	25-20	20-15	15-10	10-0
"ok7"	...	0,014	0,021	0,031	0,030	0,034

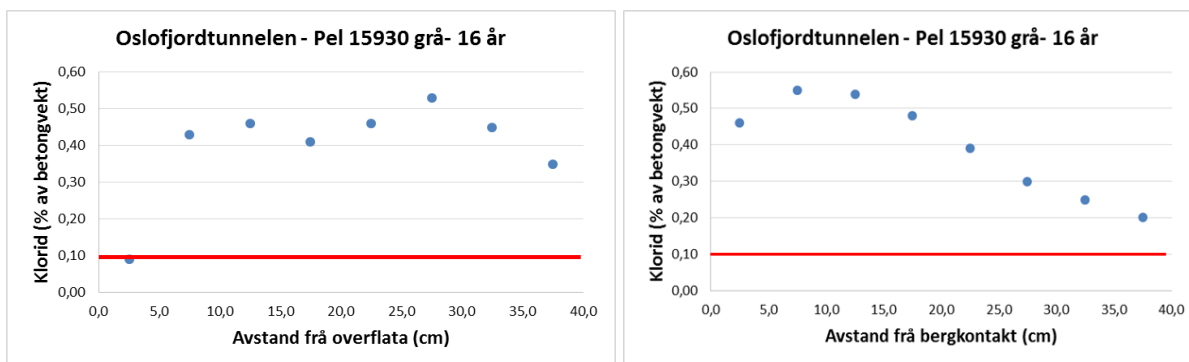


Figur 4.90: Kloridprofil frå Oslofjordtunnelen kjernene 15930-7 og 15930-7. Området var utan biofilm, men betongoverflata var svært fuktig. Betongalder 10 år (Holm 2011c).

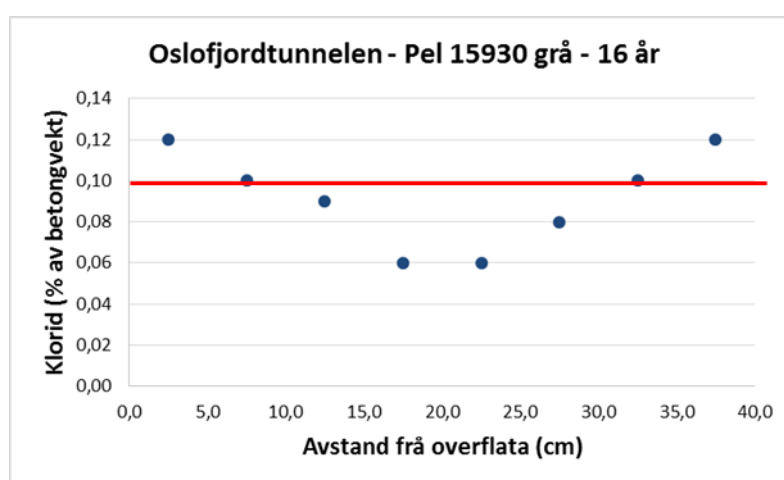
Figur 4.90 viser kloridinnhaldet i to kjerner frå pelnummer 15930 i Oslofjordtunnelen omkring 25 m avstand frå frysesezona (Holm 2011c). Høgste kloridinnhald var i begge tilfelle mot heftsona med litt over 0,5 % klorid. Området var undersøkt petrografisk i 2004 ved betongalder 5 år og viste inntrenging av magnesium og sulfate i betongen. Det var likevel ikkje nemneverdig fiberkorrosjon på dette tidspunktet. Heftsona hadde tykke utfellingar av brucitt og kalsitt (Hagelia 2011b).

Kloridprofilar frå same lokalitet i 2015 viser at maksimal kloridinnhald mot heftsona låg på omtrent same nivå som i 2009 (Figur 4.91, høgre). Kloridverdiane i ytre delar (Figur 4.91, venstre) var litt høgare enn i 2009. Midten del av kjerna hadde derimot vesentleg lågare kloridinnhald (0,06 – 0,12 %, Figur 4.92).

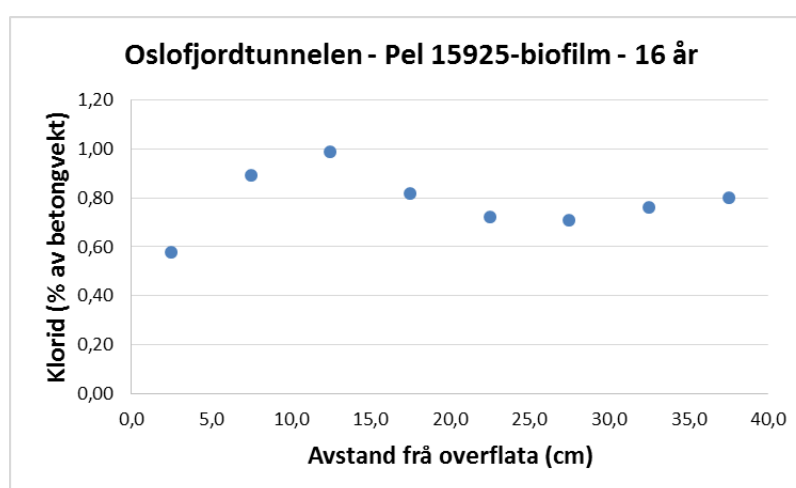
Undersøking i tynnslip viste at heftsona hadde tykk utfelling av brucitt (1–2 mm), og ytterflata hadde utfelling av kalsitt og litt brucitt.



Figur 4.91: Kloridprofil frå Oslofjordtunnelen pel 15930 ved betongalder 16 år. Kjerna var 130 mm lang og det blei frest 40 mm frå hhv overflata og frå heftsona. Sjå også Figur 4.92 for midtre deler. Området var fortsatt utan biofilm, men betongoverflata var svært fuktig (resultat frå Varige konstruksjonar).



Figur 4.92: Kloridprofil midtre deler av 130 mm kjerne pel 15930 ved betongalder 16 år (resultat frå Varige konstruksjonar).



Figur 4.93: Kloridprofil frå ytre deler av 100 mm kjerne ved pelnummer 15925 ved betongalder 16 år. Det var våt Mn-Fe- biofilm på overflata (resultat frå Varige konstruksjonar).

Figur 4.93 viser kloridinnhaldet i ytre 40 cm under biofilm. Kloridinnhaldet ligg her på mellom 0,6 og 1 % av betongvekta og gir inntrykk av at biofilmen har ført til høgare kloridinntrenging enn i tilfellet utan biofilm.

Også betongen med biofilm hadde utfelling av brucitt på heftsona. Kjernene blei inspiserte i laboratoriet og viste ingen fiberkorrosjon, bortsett frå heilt lokalt i overflata. Det blei også laga tynnslip som viste det same: Det blei observert litt korrosjon i ytre delar, for det meste i tilknytning til overflatekarbonatisering (Klasse 1–2). Det er også i dette tilfelle muleg at utfellingane har påverka vidare tilførsle av klorid.

Årsakene til det sparsame omfanget av stålfiberkorrosjon i samband med høge kloridverdiar er diskutert vidare i Kapittel 6.

#### 4.6.4.2 Styrke, fiberinnhald og porøsitet med kommentarar til korrosjon

Hovudresultata av trykkprøving og porøsitet på sylindrar frå undersjøiske tunnelar er summerte i Tabell 4.25. Holm (2011a, b, c) undersøkte også strekkstyrke over heftsona i Freifjordtunnelen og Oslofjordtunnelen (Tabell 4.26).

I dette delkapittelet ser vi på mulege samanhengar mellom parameterar i Tabell 4.25 samt korrosjon. Vi har ikkje komplette datasett for alle prøvestadane på alle tidspunkt.

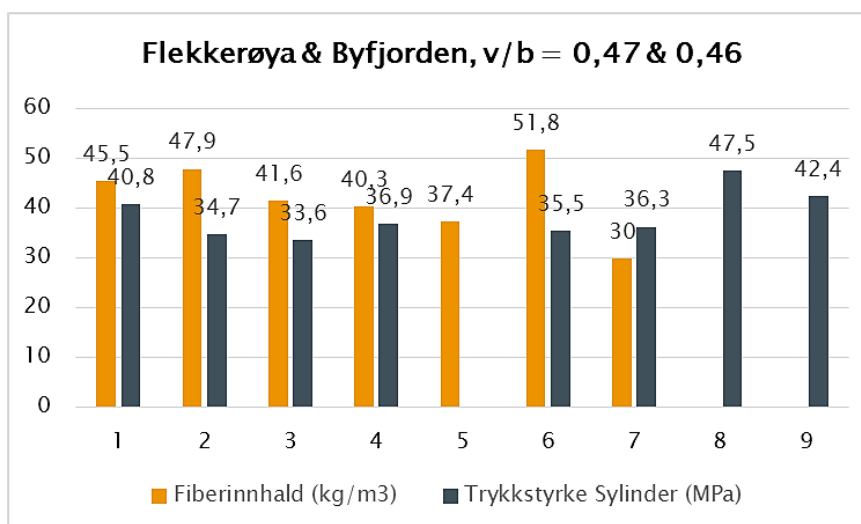
*Tabell 4.25: Tunnelar i undersjøisk miljø. Fiberinnhald, trykkstyrke (sylinder), sugporøsitet og total porøsitet. Resultat frå os = Ove Lars Strømme (anleggsperioden: NB, terningfasthet), rl = Rørsveen og Lygre (1996), n = Noteby (1996), gn = Nærum (1996), da = Davik (1997b), ho = Holm (2011x), m = Mannvit (2015x) for Varige konstruksjonar, vk = Varige konstruksjonar (SVV), ha = prøving utført av Tunnel og betongseksjonen, Statens vegvesen (tidlegare upubliserte). Gjennomsnittsverdiar (n = antal kjerner) elles enkeltverdiar. vis = visuelt estimert på saga flate ved samanlikning mot kjent prøve. IA = ikkje analysert. I Flekkerøya er profilnummer endra (tidlegare pelnummer i parentes).*

Tunnel –år undersøkt –betongalder –pel/prøve nr.	v/b som bygd (da, rl)	Fiberinnhald (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkstyrke (MPa)	Sugporøsitet (%)	Total porøsitet (%)	Meknader –biofilm –m.m.
<b>Flekkerøy</b>						
1996/8år (rl, da)						
–885 (1770)	0,47	45,5 (n=1)	40,8 (n=6)	22,5 (n=7)	25,8 (n=7)	Ikkje biofm. i 96
–1045 (1930)	0,47	47,9 (n=1)	34,7 (n=5)	23,0 (n=7)	25,9 (n=7)	Litt biofilm
–1145 (2030)	0,47	41,6 (n=1)	33,6 (n=9)	21,4 (n=7)	25,6 (n=7)	Ikkje bio i 96
2014/26 år (ma)						
–885	0,47	40,3 (n=3)	36,9 (n=3)	22,0 (n=5)	25,3 (n=5)	Våt tynn biofm.
–1380	0,47	37,4 (n=3)	IA	23,4 (n=5)	26,0 (n=5)	Tykk biofilm



Tunnel -år undersøkt -betongalder -pel/prøve nr.	v/b som bygd (da, rl)	Fiberinnhald (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkstyrke (MPa)	Sugporøsitet (%)	Total porøsitet (%)	Meknader -biofilm -m.m.
<b>Byfjord</b> 1990-1991 (gn) 0 år (kontroll) 28 d fasthet	0,46	-	34±8 (n=16)	-	-	Ung: 9,8 % under krav til karakt- eristisk fasthet
1996/5 år (rl) -2862	0,46	51,8 (n=2)	35,5 (n=8)	22,9 (n=7)	26,4 (n=7)	Våt, litt kalk
-2868	0,46	30,0 (n=1)	36,3 (n=8)	20,6 (n=7)	23,5 (n=7)	Våt, litt kalk
2004/13 år (ha) -2862 1-3A	0,46	IA	37,2 ytre	IA	IA	Relativt tørre i
-2862 1-3B	0,46	IA	65,5 indre	IA	IA	2004, med litt
-2862 1-4A	0,46	IA	43,0 ytre	IA	IA	gammal
-2862 1-4B	0,46	IA	44,1 indre	IA	IA	kalkutfelling
-2868 2-2A	0,46	IA	40,6 ytre	IA	IA	
-2868 2-2B	0,46	IA	44,2 indre	IA	IA	
<b>Freifjord</b> 1990-1991/(os) kjerneboring	0,42	IA	39 ± 10	IA	IA	Gj .snitt. av 18 seriar (ung)
1996/ 5 år (rl) -3780	0,42	42,4 (n=8)	29,8 (n=8)	19,9 (n=7)	22,5 (n=7)	Våt, kalk
-3940	0,42	49,1 (n=7)	57,8 (n=7)	19,9 (n=7)	22,7 (n=7)	Våt, kalk (bio?)
-4920	0,47	47,0 (n=6)	29,2 (n=6)	22,6 (n=7)	25,5 (n=7)	Fuktig, kalk
-5780	0,38	40,6 (n=8)	43,2 (n=8)	17,7 (n=7)	20,4 (n=7)	Våt, kalk
1996/5 år (n) -Pkt 1 (v sump)	0,42	25,7 (n=1)	24,0 (n=2)	IA	IA	Våt
-Pkt 2 (v sump)	0,42	34,4 (n=1)	24,0 (n=2)	IA	IA	Rel. tørr
2003/12 år (ha) -3730	0,42	IA	40,0 (n=2)	IA	IA	Fuktig
-3910	0,42	IA	35,8 (n=2)	IA	IA	Fuktig
-4032 (kvit)	0,42	IA	31,6 (n=1)	IA	IA	Våt, kalk
-4890-04	0,42	IA	52,6 (n=1)	IA	IA	Fuktig
-5700	0,42	IA	51,4 (n=1)	IA	IA	Våt, tyynn biof.
-6650A (kvit)	0,42	IA	27,1 (n=1)	IA	IA	Våt, omvandla
-6935A	0,42	IA	59,2 (n=1)	IA	IA	Våt
2009/18 år (ho) -3790	0,42	16 (n=3)	42,6 (n=3)	17,4 (n=4)	20,5 (n=4)	Fuktig
-5450	0,42	IA	IA	15,3 (n=1)	17,2 (n=1)	Våt, tyynn biof.
<b>Sløverfjord</b> 2014/18 år (m) - 1800	(0,45)	51,9 (n=3)	36,6 (n=3)	17,1 (n=4)	20,9 (n=4)	Relativt tørr
<b>Frøya</b> 2014/15 år (m) -4795	0,40	32,3 (n=4)	32,3 (n=4)	21,7 (n=6)	24,8 (n=6)	Fuktig biofilm
-6660	0,40	40,1 (n=3)	42,3 (n=3)	20,6 (n=5)	23,5 (n=5)	Tynn bio m kalk

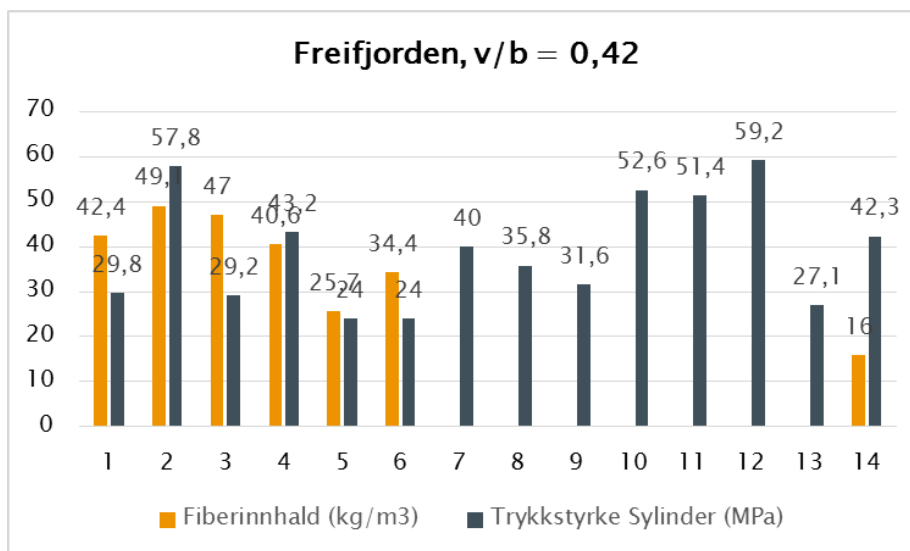
Tunnel -år undersøkt -betongalder -pel/prøve nr.	v/b som bygd (da, rl)	Fiberinnhald (kg/m <sup>3</sup> )	Trykkstyrke (MPa)	Sugporøsitet (%)	Total porøsitet (%)	Meknader -biofilm -m.m.
<b>Oslofjord</b>						
2004/5 år (ha)						
-Ras A	0,42	45,0 (n=1)	56,9 (n=1)	IA	IA	Litt biofilm
-Ras B	0,42	49,4 (n=1)	56,2 (n=1)	IA	IA	Neppe biofilm
-16060 (sump)	0,42	39,7 (n=5)	53,2 (n=5)	IA	IA	+/-biofilm
2009/ 10 år (ho)						
-15930	0,42	10,5 (n=7)	46,3 (n=7)	22,4 (n=2)	25,2 (n=2)	Utan biofilm våt
2009/ 5 år (ho)						
-16050 (erstatta)	0,42	21,0 (n=3)	62,9 (n=3)	19,6 (n=3)	23,1 (n=3)	Relativt tørr
2015/16 år (vk)						
-15925-3&5	0,42	IA	IA	25,8 (n=7)	28,9 (n=7)	Alle våte: Mn-Fe biofilm
-15930	0,42	24,4 (n=2)	35,0 (n=2)	20,81 (n=4)	23,67 (n=4)	Utan biofilm



Figur 4.94: Fiberinnhald og trykkstyrke: Flekkerøytunnelen, betongalder 8 år (nr 1, 2 & 3) og betongalder 26 år (nr 4 & 5); Byfjordtunnelen, betongalder 5 år 1996 (nr. 6-7) og betongalder 13 år (nr. 8-9).

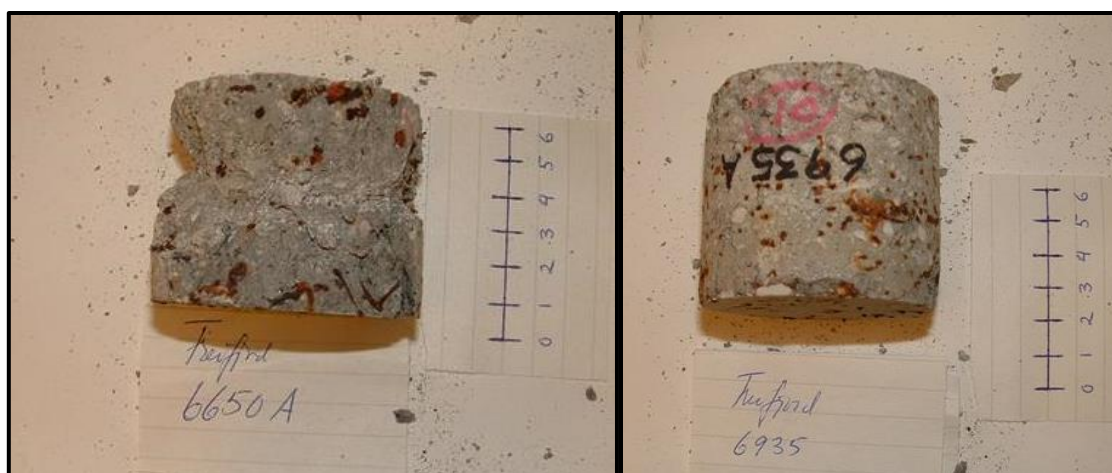
Figur 4.94 viser fiberinnhald og trykkstyrke (sylinderfastheit) for sprøytebetong i Flekkerøytunnelen og Byfjordtunnelen. Trykkstyrken på pelnummer 885 i Flekkerøytunnelen er undersøkt både i 1996 og 2014, og kan tyde på ei svekking frå opphavleg 40,8 MPa til 36,9 MPa (nr. 1 og 4 med hhv 6 og 3 parallellar). *Prøve 1380 (nr. 5) er sterkt svekka sprøytebetong under syredannande biofilm, og materialet var for svakt til å utføre ordinær trykkprøving.*

Byfjordtunnelen viser ikkje opplagt svekking frå 1996 til 2004. Dette er i godt samsvar med resultatata frå strukturanalysen.



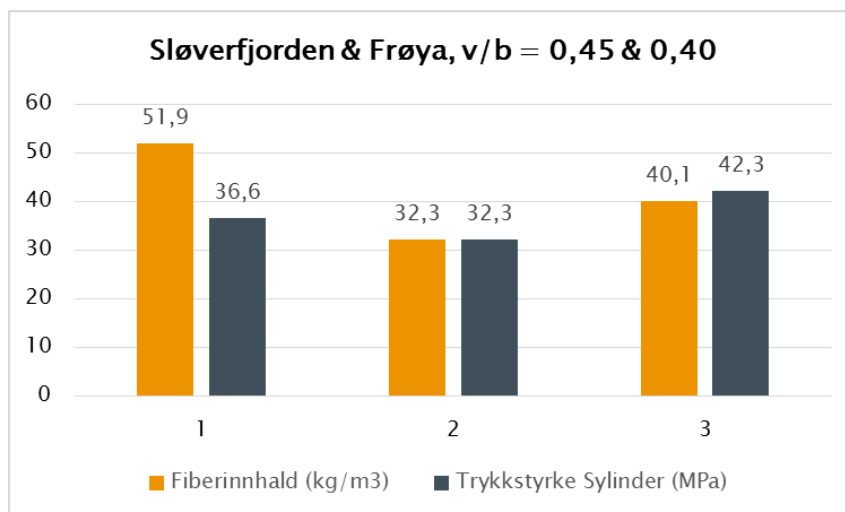
Figur 4.95: Fiberinnhold og trykkstyrke: Freifjordtunnelen betongalder 5 år (nr 1– 6), betongalder 12 år (nr. 7–13 ) og betongalder 18 år (nr 14). Figur 4.96 samanliknar kjernene 6935 og 6650 (nr 12 og 13).

Tidsserien for Freifjordtunnelen (Figur 4.95) tyder ikkje på vesentleg svekking av sprøytebetongen frå 1996 til 2009. Ein bør likevel legge merke til at *kjerne 6650A (nr 13) er tydeleg svekka i forhold til kjerne 6935 (nr 12) på grunn av større grad av nedbryting* (sjå Figur 4.95).



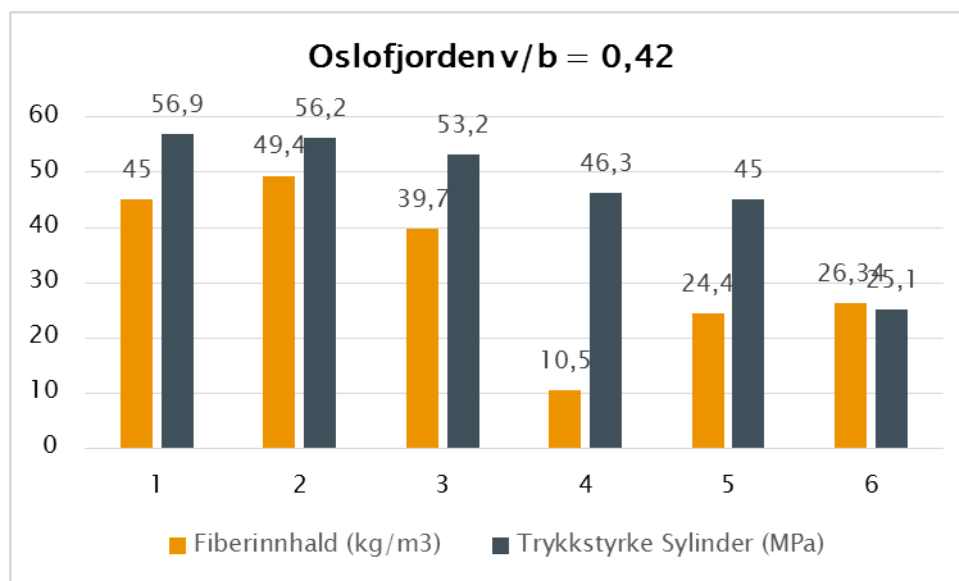
Figur 4.96: Freifjordtunnelen, betongalder 12 år. Venstre: Kraftig fragmentering etter trykkprøving av prøve 6650A (27,1 MPa). Denne sprøytebetongen hadde sterkt svekka pasta på grunn av diffus og til dels kraftig omvandling/utlutning med Mg og kalsitt (delvis Popcorn kalsitt). Høgre: Svak fragmentering av prøve 6935 (59,2 MPa) med mindre nedbryting (same type).

Figur 4.96 viser at prøver med ulik grad av nedbryting i sementpastaen gir utslag på trykkstyrken. Undersøkingar i tynnslip viste at nedbrytingsmekanismen var den same i begge prøvene, men med tydelege forskjellar: Den sterke prøva (6935) hadde flekkvis diffus omvandling medan den svake prøva (6650A) viste at fleire omvandla og nedbrotne mikro-område var i kontakt med kvarandre. Det er derfor muleg at styrkereduksjonen først setter inn etter nokså kraftig nedbryting.



Figur 4.97: Fiberinnhald og trykkstyrke. Sløverfjordtunnelen betongalder 18 år (nr 1) og Frøyatunnelen, betongalder 15 år (nr 2 & 3).

I samband med Varige konstruksjonar blei det utført trykkprøving og fiberteljing på ein lokalitet i Sløverfjordtunnelen og på to stader i Frøyatunnelen (Figur 4.97). Vi har ikkje funne data frå tidlegare. Begge tunnelane er godt eigna for seinare oppfølging.



Figur 4.98: Fiberinnhald og trykkstyrke. Oslofjordtunnelen, betongalder 5 år (nr 1–3), betongalder 10 år (nr 4) og betongalder 16 år (nr 5–6).

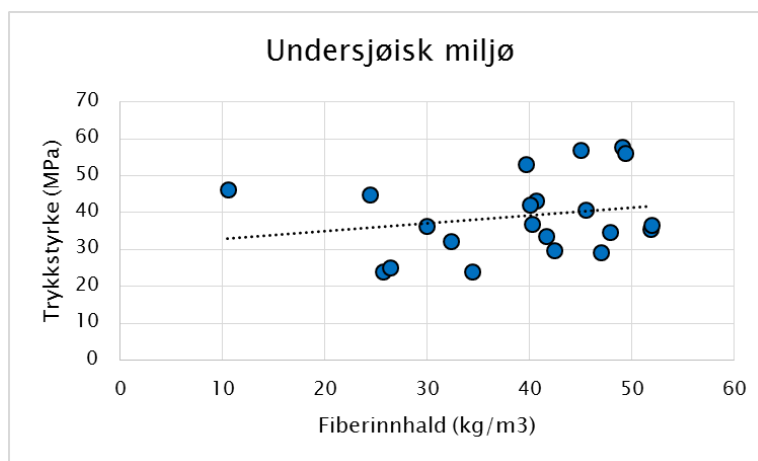
Figur 4.98 viser resultatane for Oslofjordtunnelen frå nokre lokalitetar på ulike tidspunkt. Samla sett gir analysane inntrykk av at sprøytebetongen har blitt svekka over tid under påverknad av salt grunnvatn. Men dette er neppe sikkert fordi det alltid finst lokale variasjonar. Det er mest hensiktsmessig å samanlikne data frå same lokalitet over tid. Betongen ved pelnummer 15930 (grå og våt utan biofilm) blei undersøkt petrografisk i 2004 (5 år) og viste tidleg innverknad frå aggressivt vatn (Hagelia 2011b). Ein valte å utføre trykkprøving og fiberteljing både i 2009 (nr 4) og i 2015 (nr 5 & 6). Undersøkingane tyder truleg på at betongen på denne lokaliteten har blitt noko svekka over tid. Merk at det likevel var svært lite fiberkorrosjon i denne betongen (Tabell 4.22).

### Strekstyrke over heftsona

Holm (2011a, b, c) undersøkte også strekkstyrke over heftsoner i Freifjordtunnelen og Oslofjordtunnelen. Det er ikkje tidlegare utført slike undersøkingar her til lands. Resultata er vist i Tabell 4.26. Holm (2011a) konstaterer at heftstyrke på omkring 2 MPa i Freifjordtunnelen er overraskande høgt. Elles er heftstyrken nokså svak.

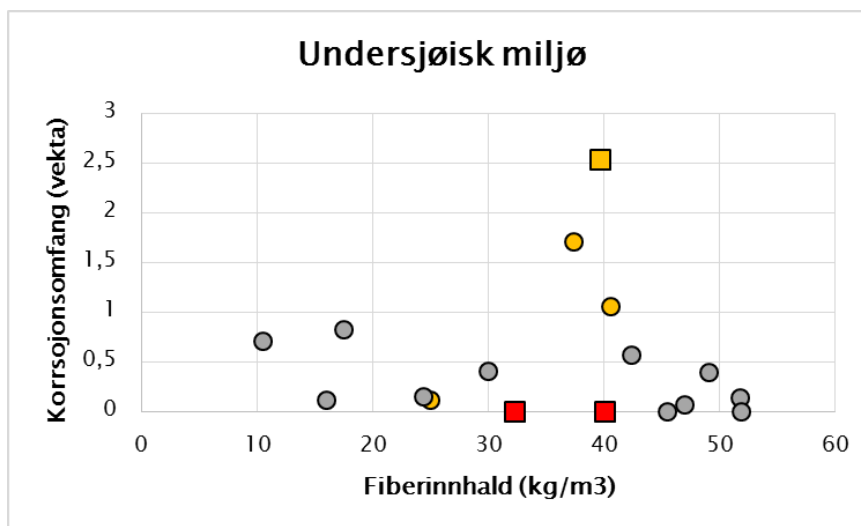
Tabell 4.26: Strekkstyrke over heftsoner Utfellinga på heftsona ved Oslofjord 15930 var brucitt og kalsitt. Oslofjord 16070 er FA betongen i servicetunnelen til pumpeumpen som var sprøyta i 2004.

Tunnel/pelnummer	Betongalder	Dominerande brot	Strekstyrke /gjennomsnitt
Freifjord/3970 og 5310	18 år	Heft > betong	1,1–2,9 MPa/1,9 MPa
Oslofjord/15930	10 år	I heft med utfelling	0,3 MPa /bare ei måling
Oslofjord/16070	5 år	I heft og berg	0,2–0,8 MPa/0,5 MPa



Figur 4.99: Det er ingen samanheng mellom trykkstyrke og fiberinnhald ( $R^2 = 0,046$ ).

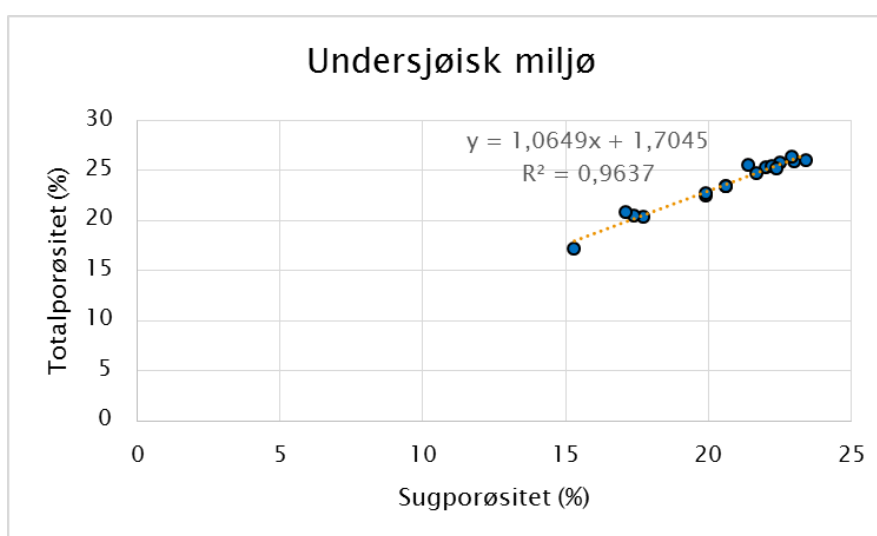
Figur 4.98 viser at det ikkje er nokon samanheng mellom trykkstyrke og fiberinnhald. Dette samsvarer med litteraturen. Inspeksjon viste også at både v/b-tala og silikainnhaldet for dei enkelte datapunkta fordeler seg tilfeldig utan samanheng mot trykkstyrke (ikkje vist).



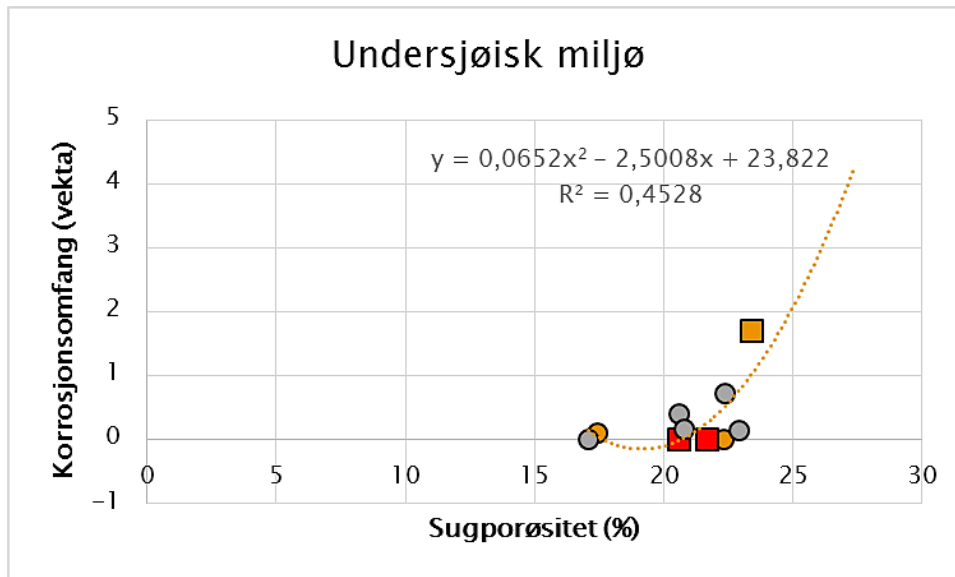
Figur 4.100: Samanstilling av data for fiberinnhald og korrosjonsomfang. Brunt kvadrat = tykk syregivande Mn-Fe biofilm; brune sirkelar = tynn Mn-Fe biofilm; raude kvadrat = Fe-rik biofilm utan syre; Grå sirkelar = relativt intakt betong utan biofilm.

I Kapittel 4.6.2.3 er det vist at destruktiv stålfiberkorrosjon er typisk knytta til relativt tykk Mn-Fe biofilm på overflata, og at Fe-rik biofilm utan syre ikkje har ført til djup korrosjon (Kapittel 4.6.3). Figur 4.100 er plotta for å undersøke om auka fibermengde kan gi auka korrosjon. Nokre punkt er gjennomsnitt av 2-3 prøver frå same lokalitet.

Sprøytebetong utan biofilm viser ikkje auke i korrosjonsomfang i takt med fiberinnhaldet (grå symbol). Men resultatata for sprøytebetong med innverknad frå Mn-Fe biofilm (brune symbol) viser at korrosjonsomfanget tilsynelatande aukar mot høgare fiberinnhald. Fe-rik biofilm utan syre representerer også intakt betong. Dette er diskutert vidare i Kapittel 6.



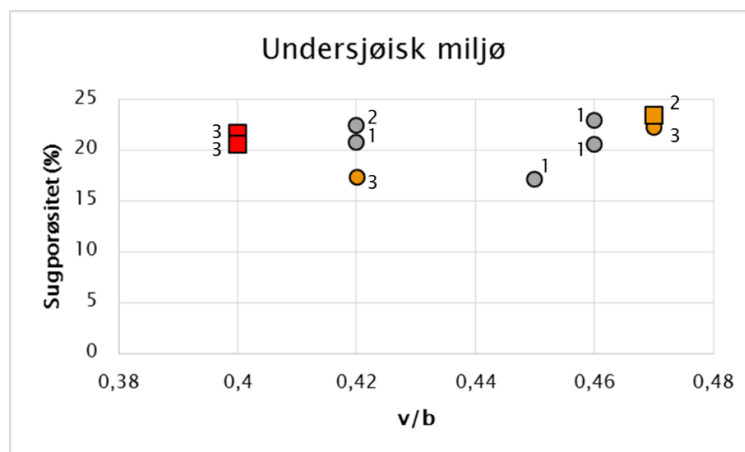
Figur 4.101: Svært god korrelasjon mellom sugporøisitet og total porøisitet (alle prøver).



Figur 4.102: Korrosjonsomfang som funksjon av sugporøsitet. Symbol som i Figur 4.99.

Det er ein svak tendens til at korrosjonsomfanget aukar mot aukande sugporøsitet for prøver med relativt uomvandla sementpasta (Figur 4.102). Sjølv om dette er venta, er talgrunnlaget svakt.

Figur 4.103 viser at det ikkje er noko opplagt samanheng mellom v/b-tal, mikrosprekkar og sugporøsitet. Prøvene representerer alle mikrorissklasser (1 til 3). Dette samsvarar dårleg med forventningane, fordi sugporøsitet har samanheng med permeabilitet. Ein bør merke seg at vi gjennomgåande har brukt «beste estimat» for v/b-tal, og at rangeringa av mikroriss er basert på grove visuelle observasjonar. Det er sannsynleg at meir eksakte estimat ville ha gitt ein klarare systematikk.



Figur 4.103: Tilsynelatande ingen samanheng mellom sugporøsitet, v/b-tal og mikrosprekkar. Symbol som i Figur 4.100.

#### 4.6.5 Effektar av avskaling, krakelering og sterk nedbryting av sementpasta

Vi har hittil sett på betong som viser nokså representativ variasjon med tanke på tilstand. I området rett ved frysosona i Oslofjordtunnelen er derimot sprøytebetongen lokalt kraftig nedbroten. Sprøytebetongen er her minst 300 mm tykk. Dette var særleg tydeleg i 2004 ved 5 års betongalder:

- Eit 10 cm tykt ytre flak av sprøytebetong kunne lett rivast laust med handmakt (Figur 4.104)
- Nokre veker seinare var alle skarpe kantar avrunda ved forvitring
- Undersøkingar i laboratoriet viste at mangan og jern frå relativt tynn og våt biofilm på overflata hadde trengt djupt inn i betongen og ført til ekstrem svekking ved total omvandling av sementpastaen og med samtidig fullstendig nedbryting av stålfiberen

Figur 4.104 viser eksempel på denne nedbrytinga, og er omtalt av Hagelia (2011b). Nedbryting med så stort omfang er på ingen måte representativt for undersjøiske tunnelar, men det er avgjort av interesse at det finst eksempel på total disintegrering av ein stor del av tverrsnittet bare etter 4–5 år. I Kapittel 5 er denne svært sterke nedbrytinga vurdert i lys av hydrogeologiske forhold.



*Figur 4.104: Sterkt forvittra og svært svakt betongflak Oslofjordtunnelen frå område med høgt vasstrykk. Betongen kunne brytast opp med handmakt.*

I Flekkerøytunnelen blei det i 2014 (betongalder 26 år) observert eit område der sprøytebetongen var tæra heilt bort i nedste ca. 1–1,5 meter mot vegbanen. I området var det i staden spreidde utfellingar av kalsiumsulfat. Dette kom fram ved å samanlikne med tunnelkart frå 1989 (betongalder 1 år), der det går fram at sprøytebetongen opprinneleg gjekk heilt ned til tunnelsålen. Dette var tilfelle fram til 2003, men vi manglar observasjonar i tida fram mot 2014 (sjå detaljar i Vedlegg 4).

Det er god grunn til å tru at sprøytebetongen her opprinneleg var svært tynn. Observasjonen er likevel viktig fordi det seier ein del om kor raskt nedbrytande prosessar kan foregå. Det understrekar også at tunnelregistreringar over lenger tidsrom gir viktig informasjon.



## 5 Hydrogeologiske og bergmekaniske forhold

I kapittel 4 er omfanget av nedbryting av sprøytebetong dokumentert for fire forskjellige kjemiske miljø. Som vist i kapittel 2.2 representerer også dei hydrogeologiske forholda ein viktig del av eksponeringsmiljøet, som verkar inn på tilstandsutviklinga til sprøytebetong. Også bergmassestabilitet kan tenkast å påverke tilstanden til sprøytebetongen.

Målsettinga med dette kapittelet er å undersøke innverknaden på sprøytebetong, av:

- hydrogeologiske parametrar, med tanke på tunnellekkasje, utluting av kalk (kalsitt) og vekst av biofilm. Det er her lagt vekt på talmateriale som representerer gjennomsnitt for heile undersjøiske strekningar («dei store tal»), og
- bergmassestabilitet i lys av Q-verdiar frå lokalitetar vi har undersøkt i kapittel 4.

### 5.1 Hydrogeologiske forhold – eksempel frå tidlegare arbeid i undersjøiske tunnelar

I samband med «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar» kartla Røhrsveen og Lygre (1996a) undersjøiske tunnelar med omsyn til vasslekkasjar, kalkutfellingar (kalsiumkarbonat) og biofilm med jern/mangan (kalla «jern/alger»). Ein nytta eit visuell klassifiseringssystem med talkarakterar, der 0 tilsvarar tørr upåverka betong og 5 representerer størst påverknad på overflata av sprøytebetongen (bergsikringa). Røhrsveen og Lygre (1996b–k) rapporterte detaljerte registreringar for kvar 10 løpemeter av synleg sprøytebetong og rekna ut gjennomsnitt for både saltvassoner og ferskvassoner i kvar enkelt tunnel.

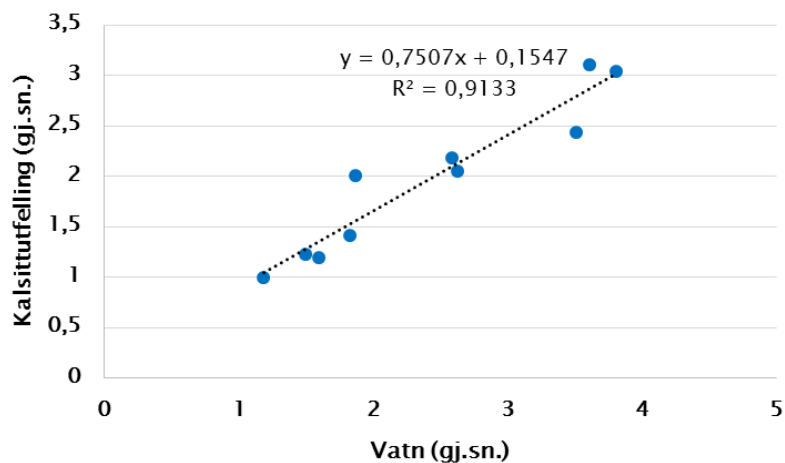
I dette kapittelet er klassifiseringa (karakterane) frå Røhrsveen og Lygre (1996a) brukt som eit mål på nedbrytingspotensiale og tidleg nedbryting. Karakterane for vatn, kalkutfelling og biofilm er plotta mot enkle hydrogeologiske variablar.

Tabell 5.1 viser gjennomsnittstalkarakterar frå saltvasstrekningar i totalt ti undersjøiske tunnelsstrekningar. Til samanlikning var karakterane frå ferskvasstrekningane i kvar enkelt tunnelane mykje lågare (sjå Røhrsveen og Lygre 1996a–k). Lekkasjeomfanget («Vatn» i Tabell 5.1) representerer arealmessig spreidde lekkasjar med totalt relativt små volum. Volummessig store lekkasjar er alltid knytt til relativt få sprekkar med stor spalteopning, som for ein stor del er tetta ved injeksjon. Eventuell førekomst av store vasslekkasjar som ikkje er tetta er i praksis svært uvanlege. Det er dermed dei små spreidde restlekkasjane som kan påverke tilstandsutviklinga til sprøytebetong

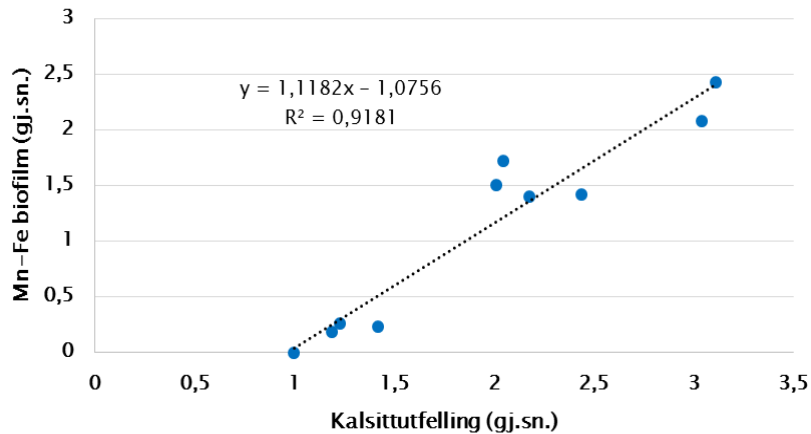
Tabell 5.1: Gjennomsnittskarakterer for vatn, kalkutfelling og Mn-Fe utfellingar med biofilm for ti undersøkte undersjøiske tunnelstrekningar (Røhrsveen & Lygre 1996b-k).

Tunnel	Vatn	Kalkutfelling	Mn-Fe utfelling biofilm
Godøy	1,87	2,01	1,51
Ellingsøy	1,19	1	0
Valderøy	1,83	1,42	0,23
Fannefjord	3,61	3,11	2,43
Freifjord	2,59	2,18	1,4
Flekkerøy *	2,63	2,05	1,72
Mastrafjord *	1,5	1,23	0,26
Byfjord *	1,6	1,19	0,19
Nappstraumen	3,81	3,04	2,08
Maurusundet *	3,51	2,44	1,42

Figur 5.1 viser at det er svært god positiv korrelasjon mellom karakterar for utfelt kalk ( $\text{CaCO}_3$ ) og karakterar for salt lekkasjevatn i tunnelane. Figur 5.2 viser også svært god positiv korrelasjon mellom utfelt kalsiumkarbonat og utfelling av mangan og jern frå biofilm. Basert på gjennomsnittskarakterane («dei store tal») ser det ut til at biofilm først begynner å akkumulere etter at det er utfelt litt kalsiumkarbonat (karakteren for Mn-Fe - biofilm er  $> 0$  når karakteren for utfelt kalk er  $> 1$ ).



Figur 5.1: Gjennomsnittskarakterar for kalkutfelling ( $\text{CaCO}_3$ ) og førekomst av vasslekkasjar i ti undersjøiske tunnelstrekningar viser god positiv korrelasjon.

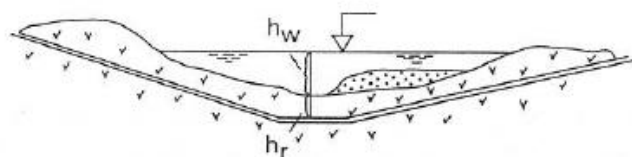


Figur 5.2: Gjennomsnitts karakterar for kalkutfelling viser god positiv korrelasjon med Mn-Fe utfellingar (biofilm) i undersjøiske tunnelstrekningar. Biofilm ser ut til å bli vanleg først etter at det er utfelt ein del kalsiumkarbonat.

Tabell 5.2 viser gjennomsnittleg: 1) tunneldjup under havnivå; 2) sjødjup; 3) bergoverdekning og 4) lausmassar på sjøbotnen for dei undersjøiske strekningane, rekna ut på grunnlag av detaljerte oppmålingar av dei respektive tunnelprofilane (utført i Varige konstruksjonar). Sprekkefrekvensar ( $J/m^2$ ) er oppgitt som gjennomsnitt av undersjøiske strekning i fire av tunnelane (Hagelia 1992, samt upublisererte data). Figur 5.3 viser ein vertikal lengdeprofil av undersjøisk tunnel.

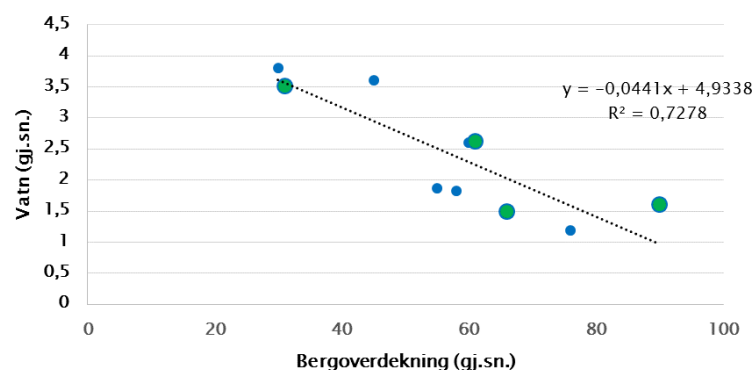
Tabell 5.2: Utrekna gjennomsnitt for kvar undersjøisk strekning, basert på detaljert oppmåling av vertikale lengdeprofilar. \*) = tunnelar med målte sprekkefrekvensar («J» reflekterer variasjonar i hydraulisk konduktivitet i bergmassen; sjå Kapittel 2.2.2).

Tunnel	Djup under havnivå (m)	Sjødjup (m)	Bergoverdekning (m)	Lausmasse (m)	J (antal steile sprekkar/ $m^2$ )
Godøy	130	40	55	35	
Ellingsøy	106	24	76	6	
Valderøy	95	32	58	5	
Fannefjord	69	19	45	5	
Freifjord	102	37	60	5	
Flekkerøy*	73	12	61	0	13
Mastrafjord*	104	21	66	17	5
Byfjord*	165	55	90	20	5
Nappstraumen	42	12	30	0	
Maurusundet*	62	23	31	8	12

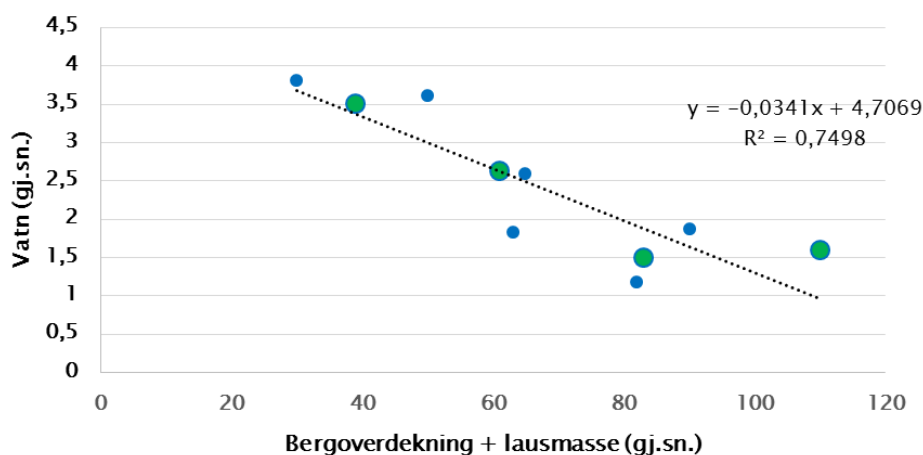


Figur 5.3: Vertikal lengdeprofil av undersjøisk tunnel:  $h_w$  = sjødjup;  $h_r$  = bergoverdekning; stipla område = lausmasse på sjøbotnen ( $h_s$ ). Djup under havnivå ( $h$ ) =  $h_w + (h_s) + h_r$ .

Figurane 5.4 til og med 5.11 illustrerer «dei store tal» med tanke på innverknad av bergoverdekning, lausmasse og djup under havnivå. Desse er ikkje korrigererte for hydraulisk konduktivitet i berg eller lausmasse. Det er gitt eigne symbol for tunnelar der vi også har gjennomsnittleg detaljoppsprekking. For desse tunnelane er også omfang av vatn, kalkutfellingar og biofilm korrigerert for konduktivitet (sprekkeparameteren J) i bergmassen (sjå Figurane 5.12 til 5.17).

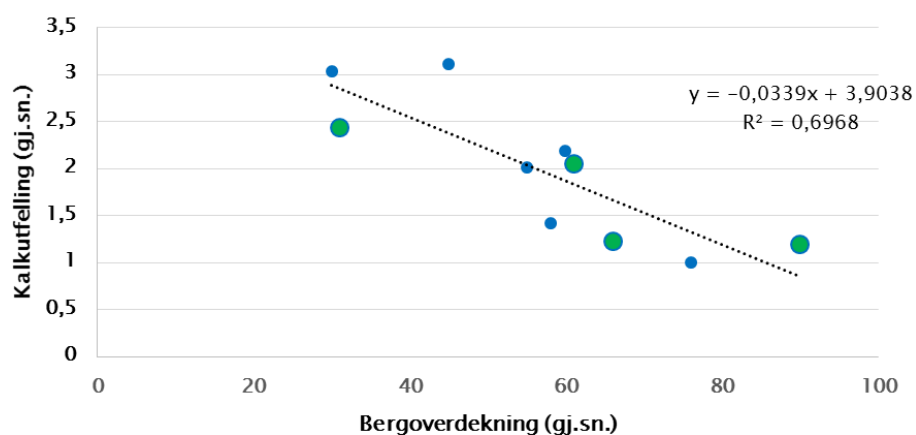


Figur 5.4: Gjennomsnitts bergoverdekning i undersjøiske tunnelstrekningar plotta mot vatn (gjennomsnittskarakterar) viser ein relativt god negativ korrelasjon, sjølv utan korreksjon for hydraulisk konduktivitet. Blå = tunnelar der sprekefrekvensmålingar manglar. Grøn = undersjøiske tunnelstrekningar (n=4;  $R^2 = 0,77$ ) der det også er målt sprekefrekvensar (Tabell 5.2).



Figur 5.5: Gjennomsnitts bergoverdekning + lausmasse i undersjøiske tunnelstrekningar plotta mot vatn viser ein relativt god negativ korrelasjon. Symbol som i Figur 5.4.

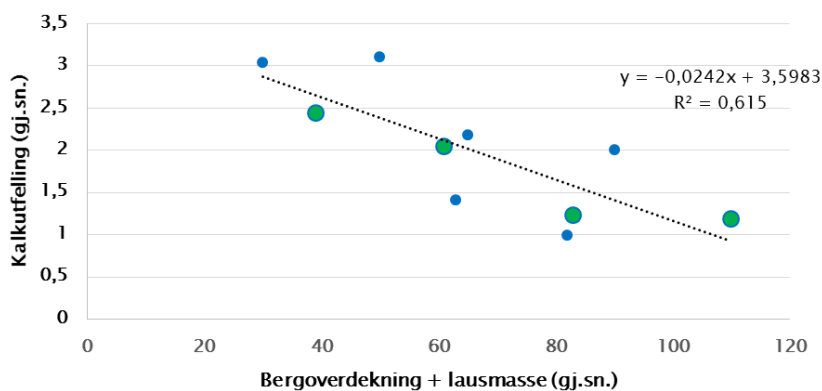
Figur 5.4 viser at lekkasjeomfanget tydeleg minkar når bergoverdekninga aukar. Dette er generelt som venta i lys av Darcy's lov, men korrelasjonen er likevel overraskande god sett i lys av at datasettet ikkje er korrigerert for hydraulisk konduktivitet (oppsprekking). Effekten av lausmassar på sjøbotnen (Figur 5.5) endrar ikkje vesentleg på korrelasjonen, og tyder på at hydraulisk konduktivitet i bergmassen gir størst utslag på lekkasjeomfanget.



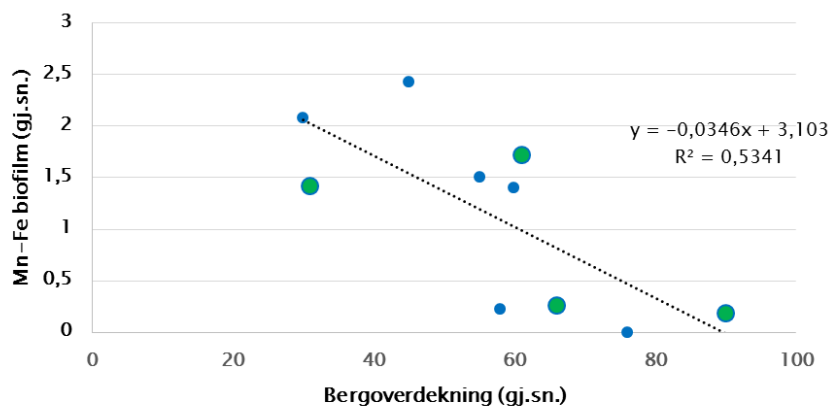
Figur 5.6: Gjennomsnittleg bergoverdekning i undersjøiske tunnelstrekningar plotta mot kalkutfelling viser ein relativt god negativ korrelasjon. Symbol som i Figur 5.4.

Figur 5.6 viser at også gjennomsnittskaracteren for kalkutfelling minkar når bergoverdekninga aukar, men korrelasjonen er litt svakare enn i Figur 5.4. Effekten av lausmassar på sjøbotnen gir omtrent det same resultatet (Figur 5.7).

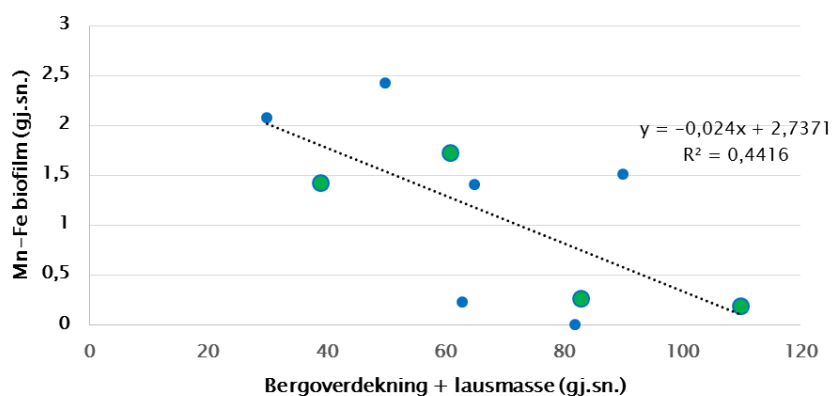
Figurane 5.8 og 5.9 viser også at førekomst av biofilm minkar når bergoverdekning og lausmasse aukar, men korrelasjonane er ikkje veldig gode. Summen av kalkutfelling og biofilm korrelerer litt betre mot bergoverdekning (Figur 5.10).



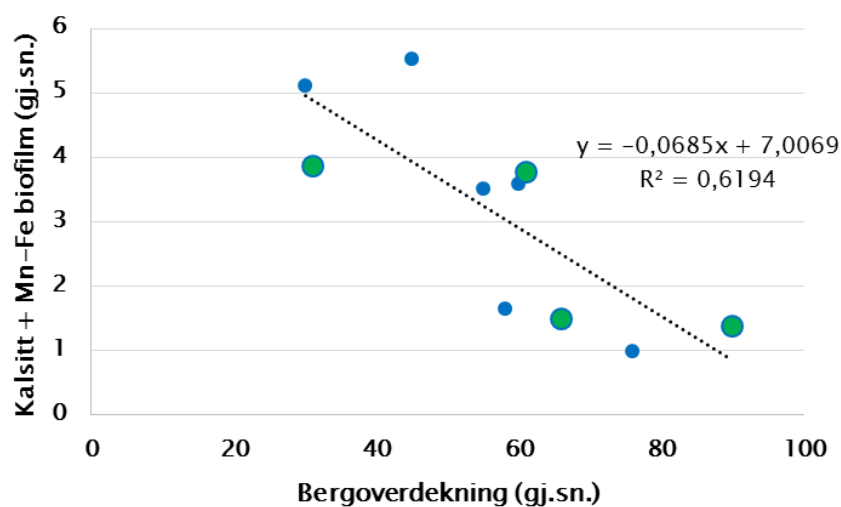
Figur 5.7: Gjennomsnitts bergoverdekning + lausmasse i undersjøiske tunnelstrekningar plotta mot kalkutfelling viser ein relativt god negativ korrelasjon. Symbol som i Figur 5.4.



Figur 5.8: Gjennomsnitts bergoverdekning plotta mot Mn-Fe utfellingar (biofilm) viser ein svakt negativ korrelasjon. Symbol som i Figur 5.4.

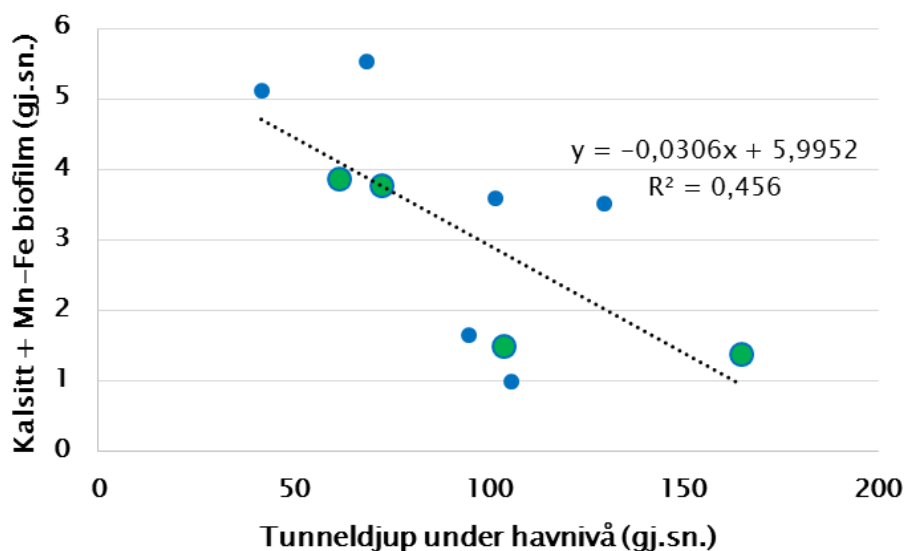


Figur 5.9: Gjennomsnitts bergoverdekning + lausmasse i undersjøiske tunnelstrekningar plotta mot Mn-Fe utfellingar (biofilm) viser ein svakt negativ korrelasjon. Symbol som i Figur 5.4.



Figur 5.10: Gjennomsnitts bergoverdekning + lausmasse i undersjøiske tunnelstrekningar plotta mot summen av kalkutfellingar og biofilm viser ein relativt god negativ korrelasjon. Symbol som i Figur 5.4.

Tunnelnivå under havnivå er eit uttrykk for hydraulisk potensial. Figur 5.11 viser ein negativ korrelasjon, som tilsynelatande er motsett av det vi skulle vente. Men tunneldjup plotta mot bergoverdekning + lausmasseoverdekning for dei ti tunnelane (ikkje vist) gir ein svært god positiv korrelasjon ( $R^2 = 0,94$ ), og viser at overdekninga aukar i takt med tunneldjupet. Dette forklarar hovudtrenden i Figur 5.11: Det er overdekninga som har størst innverknad på innlekkasjen i desse tunnelane.



Figur 5.11: Gjennomsnitts tunneldjup under havflata (hydraulisk potensial) plotta mot summen av kalkutfelling og Mn-Fe utfellingar (biofilm) gir ein svak negativ korrelasjon. Symbol som i Figur 5.4.

Diagramma under illustrerer forholda i fire tunnelar der vi også har korrigert for hydraulisk konduktivitet i bergmassen og vurderer innverknaden av alle parametarar under eitt. I Kapittel 2.2.2. er det vist at antal steile sprekkar (60–90 graders fall) per  $m^2$  i stor grad simulerer variasjonar i hydraulisk konduktivitet. Innlekking av vatn er avhengig av sprekkparameteren  $J$  i bergmassen; bergoverdekninga og tunneldjupet under havnivå. Innverknad frå tykke eller tette lausmasser på sjøbotnen er også sannsynleg. Darcy's lov kan enkelt formulerast slik:

$$Q \text{ (lekkasjemengde)} = h k / L$$

Der  $h$  = hydraulisk potensial,  $k$  = hydraulisk konduktivitet i materialet som vatnet trenger gjennom og  $L$  = er lengda til materialet som vatnet trenger gjennom. Forholdet  $k/L$  = hydraulisk konduktans og  $L/k$  er hydraulisk resistans. Det er muleg å formulere Darcy's lov med parametarar gitt i Tabellane 5.1 og 5.2:  $Q = \text{«vatn»}$   $h = \text{tunneldjup under havnivå}$ ;  $k = \text{sprekkeparameteren } J$ , og  $L = \text{bergoverdekning (hr), eller bergoverdekning (hr) + lausmasseoverdekning (hs)}$ . For å holde oss innanfor termene til likninga i kapittel 2.2.2.1 uttrykker vi resistans som « $hr/J$ »:

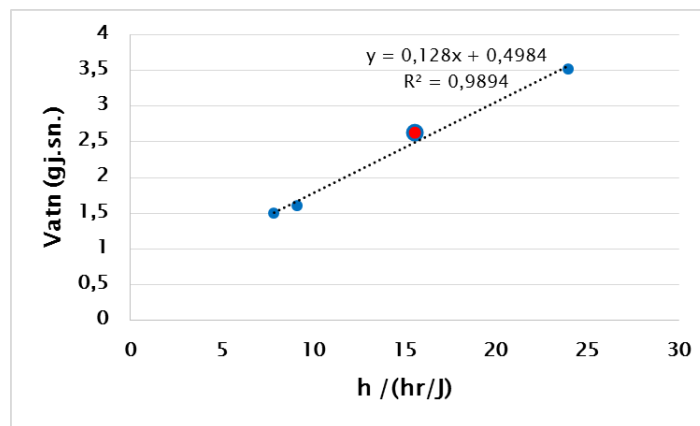
$$\text{«Vatn» (talkarakter)} = h / (hr/J)$$

Tilsvarande er også  $hr + hs/J$  eit uttrykk for resistans gjennom lausmasse og bergmasse. Den hydrauliske konduktiviteten i lausmasse er ukjent og kan ikkje uttrykkast ved  $J/m^2$ . Likevel vil

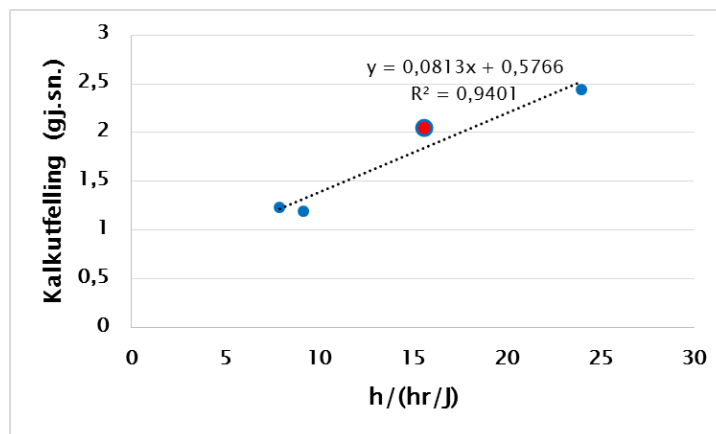
samanlikning av plott med bergoverdekning aleine og bergoverdekning + lausmasse gje nyttig informasjon om hydraulisk konduktivitet også i lausmassane.

Parameteren J er målt i detalj i Flekkerøytunnelen, Maursundtunnelen (Hagelia 1992) og Byfjordtunnelen. Undersøkingar i Byfjordtunnelen blei utført i heile den undersjøiske tunnelstrekningen medan tunnelen var råsprengt og gav i gjennomsnitt  $J = 5/m^2$  (Hagelia, upubliserte data frå 1992). Målingane blei utført for kvar 10 løpemetar på begge sider av tunnelen, dvs. på same måten som målingane i Flekkerøytunnelen og Maursundtunnelen. Rask gjennomgang av deler av Mastrafjordtunnelen, også i 1992, indikerte eit tilsvarande tal ( $J \sim 5/m^2$ ) som for Byfjordtunnelen, men blei ikkje talt opp like nøyaktig. Mastrafjordtunnelen er også rapportert å ha svært låg grad av oppsprekking og lite lekkasje (Davik 1997b).

Det er av interesse å undersøke om kalkutfelling, vekst av biofilm (teikn på nedbryting) er styrt av desse parameterane. Figurane 5.12 – 5.17 viser gjennomsnittlege karakterar for vatn, kalkutfelling og biofilm plotta mot  $h/(hr/J)$  og  $h/(hr+hs)/J$ .

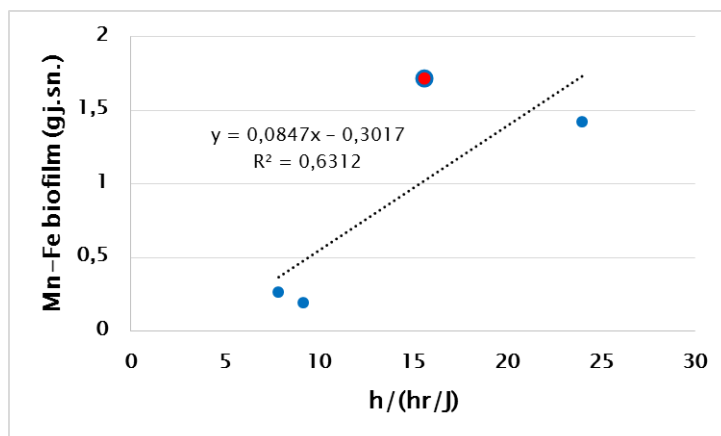


Figur 5.12: Parameteren «vatn» som funksjon av hydrogeologiske parameterar (eksklusive lausmasseoverdekning). Raudt symbol = Flekkerøytunnelen.

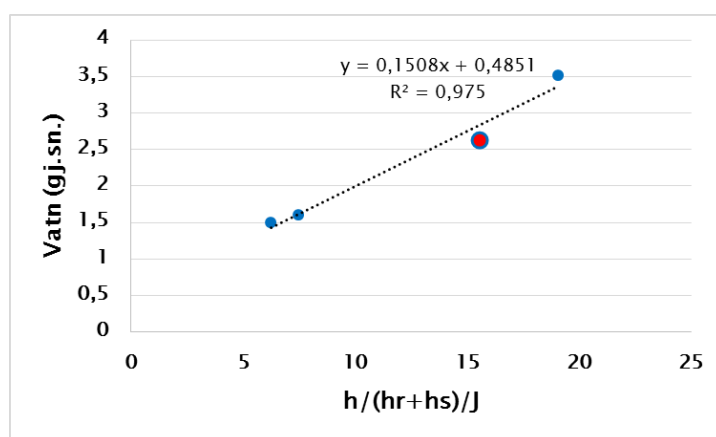


Figur 5.13: Parameteren «kalkutfelling» som funksjon av hydrogeologiske parameterar (eksklusive lausmasseoverdekning). Symbol som i Figur 5.12.

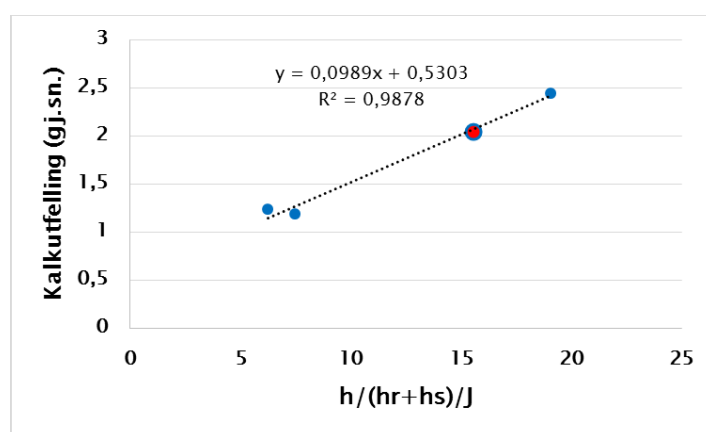




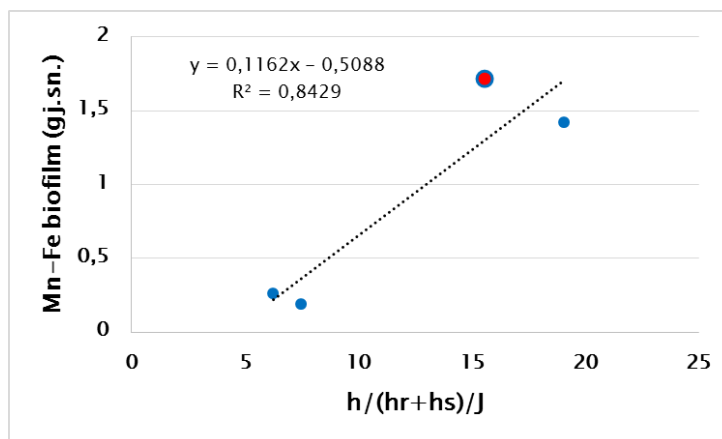
Figur 5.14: Parameteren «Mn-Fe biofilm» som funksjon av hydrogeologiske parameterar (eksklusive lausmasseoverdekning). Symbol som i Figur 5.12.



Figur 5.15: Parameteren «vatn» som funksjon av hydrogeologiske parameterar, inklusive lausmasseoverdekning. Symbol som i Figur 5.12.



Figur 5.16: Parameteren «kalkutfelling» som funksjon av hydrogeologiske parameterar, inklusive lausmasseoverdekning. Symbol som i Figur 5.12.



Figur 5.17: Parameteren «Mn-Fe biofilm» som funksjon av hydrogeologiske parameterar inklusive lausmasseoverdekning. Symbol som i Figur 5.12.

Resultata, gitt ved modell basert på Darcy's lov med variasjonar i sprekkefrekvensen som uttrykk for hydrauliske konduktivitet, viser svært gode lineære korrelasjonar mot parametrane «vatn» og «kalkutfelling». Korrelasjonskoeffisientane varierte mellom 0,94 og 0,99.

Utfelling/akkumulasjon av biofilm gir ikkje like god korrelasjon, og det er Flekkerøytunnelen som avviker med høgste karakter for biofilm. Vi har erfart fleire stader at biofilm akkumulerer over tid. Sprøytebetongen i Flekkerøytunnelen var 8 år i 1996 då målingane blei utførte, i motsetning til dei tre andre tunnelane, som var 5–6 år gamle. Det er derfor muleg at forklaringa er aukande akkumulasjon av biofilm på grunn av aldersforskjellen.

Grunnen til at bergoverdekninga har størst effekt på lekkasjeomfanget ser ut til å ha samband med at 1) lausmassane jamt over er tynnare enn bergoverdekninga og 2) at den hydrauliske konduktiviteten i lausmassane er mindre eller omtrentleg lik den hydrauliske konduktiviteten i bergmassen. Dette er best illustrert med det forholdet at parameteren «Vatn» viser svært signifikante og likeverdige korrelasjonar *både* med bergoverdekning aleine ( $R^2 = 0,99$ ) *og* med summen av bergoverdekning og lausmasse ( $R^2 = 0,98$ ). Til samanlikning er korrelasjonskoeffisientane lågare utan korreksjon for hydraulisk konduktivitet (hhv.  $R^2 = 0,73$  og  $R^2 = 0,75$ , sjå Figurane 5.4 og 5.5). Dette illustrerer tydeleg at sprekkeparameteren J simulerer hydraulisk konduktivitet på ein god måte.

Det er generelt erfart at innlekkasjen i undersjøiske tunnelar minkar etter kvart som tida går (Davik 1997b), men reduksjonen er ikkje like stor i alle tunnelar. Årsakene til desse skilnadane er ikkje detaljert klarlagt, men har samband med utfelling på sprekkesystema.

Det er muleg å trekke følgjande delkonklusjonar:

- Hydrogeologiske forhold styrer tilgangen på lekkasjevatt og er dermed viktige med tanke på tilgang på aggressivt vatn i undersjøiske tunnelar.
- Tilgangen på aggressive lekkasjevatt i undersjøiske tunnelar minkar i takt med aukande bergoverdekning.
- Utvasking av kalsium frå sementlimet og vekst av syregivande biofilm er i stor grad ein direkte funksjon av dei hydrogeologiske variablane.

- Tilstandsutvikling i sprøytebetong må sjåast i lys av både hydrogeologiske og hydrogeokjemiske forhold.
- I Kapittel 4 blei det vist at sprøytebetongen i Byfjordtunnelen var ganske lite påverka av nedbryting, trass i resepten med  $v/b = 0,46$  og lågt bindemiddelinnhald. Dette har tydeleg samanheng med relativt tykk sprøytebetong, men det er også sikkert at bergmassen i Byfjorden har låg oppsprekkingsgrad som gir lite lekkasje.
- Den unormalt kraftige og svært lokale nedbrytinga av sprøytebetong i Oslofjordtunnelen (Kapittel 4.6.5) har tydeleg samanheng med dei spesielle hydrogeologiske forholda på staden. Under tunneldrivinga kom tunneltaket opp i lausmassar som ligg i botnen av eit søkk i Oslofjorden. Ein dreiv gjennom området ved grunnfrysing og seinare etablering av ein permanent betongkulvert (rør). Tunnelen ligg her 120 m under havnivå, med 60 m permeabel grus som kviler rett på betongkulverten. Den horisontale avstanden i berg frå søkket med grus til enden av røret er omkring 7 meter, noko som gir svært høgt vasstrykk mot sprøytebetongen og som har ført uvanleg djup inntrenging av aggressivt vatn i sprøytebetongen.
- Geologiske forundersøkingar for tunnelprosjekt i undersjøiske miljø bør også legge vekt på hydrogeologiske parameterar. Det er vanleg at ein teller sprekkerekvansar for å estimere  $Q$ -verdiar med tanke på stabilitetssikring. Dette omfattar alle sprekkar uavhengig av orientering og fallvinkel, og omfattar derfor alltid også telling av steilståenda sprekkar. Det er derfor enkelt å bestemme sprekkparameteren « $J$ » i same slengen. Vidare vil det alltid vere muleg å bestemme kva type lausmassar som ligg på sjøbotnen for å avdekke om desse verker tettande eller ikkje verkar inn på lekkasjeomfanget i det heile. Marin leire vil oftast ha hydrauliske konduktivitet godt under  $10^{-9}$  m/sekund medan normalt oppsprukke berg gjerne ligg mellom  $10^{-9}$  og  $10^{-7}$  m/sekund. Til samanlikning vil silt og siltig sand gjerne vere nokså likt hydraulisk konduktivitet i normalt oppsprukke berg, medan vel sortert sand er meir permeabel. Grus, for eksempel i djuprenna i Oslofjorden, vil vere svært permeable med verdiar mellom  $10^{-3}$  og  $10^{-0}$  m/sekund (sjå blant anna NFF 2000).

## 5.2 Bergmekaniske forhold

Mekanisk innverknad frå bergmassen på sprøytebetongbergsikringa er bare sannsynleg dersom:

- bergsikringa lokalt er undersikra, dvs. tynnare enn designverktøyet ( $Q$ -verdien)
- aggressivt vatn kan føre til omfattande nedbryting med svekking av det berande tverrsnittet

Det er sannsynleg at tidlege deformasjonar ved dynamiske laster fører til oppsprekking og mikrooppsprekking. Dette kan bane veg for nedbryting i aggressivt miljø i det lange løp. Dimensjonering av sprøytebetongtykkelse etter NGI sitt system gir relevant og oftast tilstrekkeleg sikkerheitsnivå i kontakt med ferskt grunnvatn.

*NGI sitt  $Q$ -system er dimensjonert med bakgrunn i stabilitetsforhold observert på relativt kort sikt og er truleg dominert av erfaringar frå ferskvassmiljø. På den andre sida har undersøkingar i Statens vegvesen over fleire år vist at aggressivt grunnvatn (alunskifermiljø og undersjøisk miljø, sjå kapittele 4.5 og 4.6) delvis fører til nedbryting av både sementpasta og stålfiber i*

betong som er tynnare enn omkring 100 mm. NGI sitt Q-system aksepterer tykkelse ned til 6 cm, medan Statens vegvesen opererer med minimum 8 cm i ferskt grunnvatn og minimum 10 cm i undersjøisk miljø (Handbok N500).

Tabell 5.3: Q-verdiar og sprøytebetongdata frå tre tunnelar. Svartdal-alunskifermiljø; Byfjord og Frøya: undersjøisk miljø.

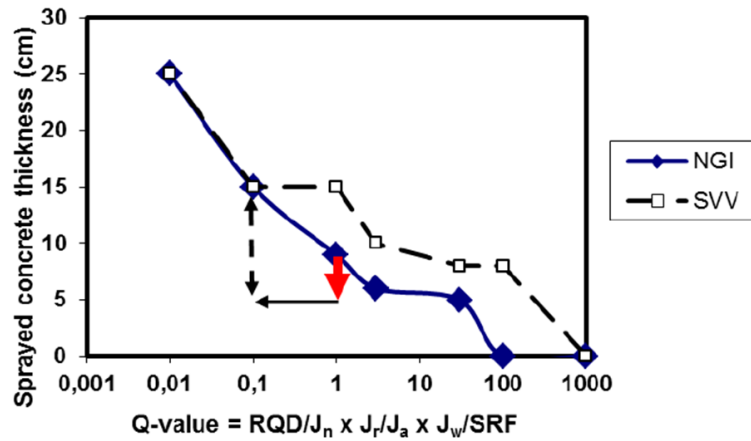
Tunnel-pelnr.	Q-verdi	Tykkelse: NGI / SVV (mm)	Observerte tykkelsar: varisjon/gj.snitt (mm)	Tilstand observert i sprøytebetong: Varige konstruksjonar
Svartdal - 360 - 370 - 385	0,04-1,32 0,04-1,32 0,38-0,95	60-90/150-200 60-90/150-200 90-120/150	45-185 /95 (gu) 45-130 /72 (ha, m) 66-357/199 (m)	Stort sett upåverka etter 16 år Påverka etter 5-16 år Stort sett upåverka etter 16 år
Byfjord - 2862- - 2868	0,08-6,3 0,08-6,3	60-150/100-150 --«--	140-190/ 165 (ha) 200 /200 (ha)	Stort sett upåverka etter 13 år --«--
Frøya - 4795 - 6660	2,1-2,0 (hø) 1,0-1,9 (hø)	60-90/100 90/ 150-100	64-154/109 (m) 52-103/ 83 (m)	Upåverka etter 15 år Upåverka etter 15 år

Det er i praksis vanskeleg å samanlikne tilstandsutviklinga i sprøytebetong med mekanisk påverknad, fordi dette sannsynlegvis er svært avhengig av heilt lokale bergmekaniske forhold. Vi kan derfor bare undersøke dette nokså skjematisk i lys av Q-verdiar og observert tilstand med tanke på kjemisk nedbryting. Vi har tilgang på sikre Q-verdiar frå tre av dei undersøkte tunnelane; Svartdalstunnelen (Hval 2000), Byfjordtunnelen (Bøyeie 1994) og Frøyatunnelen (Statens vegvesen 2000, og data mottatt av Are Håvard Høien 2017). Det er ikkje observert makroskala deformasjonar på desse stadane. Tabell 5.3 viser Q-verdiar på pelnummer som er undersøkte i Kapittel 4. Faktisk observerte tykkelsar bygger på alle utbora kjerner på kvart pelnummer: gu = Gulland (2015); ha = Hagelia (2011b), m = Mannvit (2015b).

Tabellen viser at når Q-verdiar ligg til grunn for dimensjoneringa så samsvarer sprøytebetongsjiktet nokså godt med NGI sitt Q-system. På den andre sida viser resultatet at tynne sjikt i Svartdalstunnelen er noko påverka av nedbryting etter nokså få år, medan tykkare sprøytebetong held seg bra.

Tabell 5.3 viser at observert sprøytebetong utan nedbryting stort sett samsvarer med dimensjoneringskrava i Handbok N500. Eit unnatak er betongen ved pelnummer 6660 i Frøyatunnelen som i gjennomsnitt var på 83 mm.

Vi har ikkje Q-verdiar frå område med sterkt nedbroten betong i undersjøiske tunnelstrekningar, men all erfaring viser at relativt tynne sjikt ikkje er svært bestandige. Dimensjonering etter Statens vegvesen sine reglar ser ut til gje betre sikring for lange levetider i kjemisk aggressive miljø, og er i tillegg meir robust med tanke på uoppdaga leirinfisert bergmasse (sjå Figur 5.18).



Figur 5.18: Q-verdi plotta mot dimensjonert sprøytebetongtykkelse etter Q-systemet (NGI) og etter Statens vegvesens Handbok N500 (SVV). Raud pil = effekt av tapt bærende tverrsnitt, svart pil = effekt av ikkje oppdaga leire. Stipla pil = underdimensjonering i tilfelle med uoppdaga leire og tap av sprøytebetongtverrsnitt i aggressivt kjemisk miljø.

*We have an interest in the design of structures so that effects from degradations is minimized*

Vagn Askegaard

## 6 Oppsummeringar og konsekvensar

Varige konstruksjonar har lagt vekt på å skaffe fram ny kunnskap om nedbryting av sprøytebetong brukt som bergsikring, slik at vi kan gjere korrigerande tiltak. Viktige føresetnadar for å oppnå dette har vore at:

- tilstandsutviklinga i dei undersøkte sprøytebetongprøvene er sett i samanheng med miljølastene som verkar lokalt på kvar enkelt prøvestad.
- prøver er samla inn på ulike tidspunkt over fleire år i tunnelane.
- sprøytebetongen er laga med relevant moderne teknologi; i praksis våtsprøyta betong yngre enn ca. 1985 og med stålfiberarmering.
- det ligg føre god dokumentasjon av reseptar og standard betonganalysar

Det blei planlagt for at tunnelobjekta også er eigna for seinare oppfølging av tilstandsutviklinga og eventuelle endringar i eksponeringsforhold. Dette er nødvendig, fordi vi ikkje har empiriske erfaringar med «moderne sprøytebetong» eldre enn ca. 25–30 år av totalt 100 års tenkt levetid.

Vi har undersøkt sprøytebetong i fire ulike vasskjemiske eksponeringsmiljø, samt sett på effektar av trafikkmiljø (eksponert/ikkje eksponert) og påverknad av ulike hydrogeologiske forhold.

Særleg viktige tema har vore:

- å finne ut om det er realistisk å rekne med 100 års levetid for sprøytebetong
- undersøke samanheng mellom a) nedbrytingsomfang i sementpasta og omfang av fiberkorrosjon, samt b) tykkelse, heftforhold og resept

Undersøkingane er utført i eit representativt utval av tunnelar både med tanke på miljøbelastningar, trafikk og betongalder (sjå Tabell 4.2). Tabell 2.1 gir ein kortfatta oversikt over kjente nedbrytingsmekanismar i norske vegtunnelar. Kapittel 4 gir detaljert dokumentasjon av omfang av nedbryting i sprøytebetong brukt som bergsikring, og viser kva som er årsaker til skadeleg nedbryting.

Oppsummeringa av rapporten legg vekt på å trekke saman dei mest viktige erfaringane med tanke på:

- restlevetid av sprøytebetong i eksisterande tunnelar, og
- kva som bør/kan gjerast ved planlegging og bygging av nye tunnelprosjekt for å sikre 100 års levetid for sprøytebetong under alle eksponeringsforhold.

## 6.1 Hovudfunn

Nedbrytingsfarta er generelt styrt av følgjande forhold:

- Materialeigenskapar (betongresept, tykkelse, forhold på heftsona, styrke)
- Grunnforhold (vasskjemi, mineralstabilitet, biofilm, hydrogeologi, bergmassestabilitet)
- Forhold i tunnelrommet (fuktnivå, fordamping, tinesalt, eksos)
- Eventuelle skadelege tilslagsmaterialar

Det er ikkje brukt skadelege tilslag i dei undersøkte betongane. Omvandling og nedbryting er derfor forårsaka av miljøpåkjenningar (grunnforhold og forhold i tunnelrommet) og materialeigenskapar.

Dei viktigaste funna i Varige konstruksjonar – bestandigheit av sprøytebetong er:

- Dårlig heft mot bergmassen fører til auka nedbrytingsomfang i alunskifermiljø og undersjøisk miljø. Høg permeabilitet på heftsona gir varig tilgang på aggressivt grunnvatn og vedvarande nedbryting.
- Stålfiberkorrosjon er eit mykje mindre problem enn tidlegare antatt. Stålfiberen er for det meste intakt i undersjøisk miljø, sjølv om kloridinnhaldet ofte er høgt.
- Nedbryting i tynne sprøytebetongsjikt er velkjent (Davik 1997), men samanhengar mellom tykkelse, nedbrytingsmekanisme og nedbrytingsomfang er først kvantifisert i Varige konstruksjonar:
- Detaljert oppmåling viser at *både* stålfiberkorrosjon *og* nedbryting av sementpasta stort sett er fråverande eller svært lite utvikla i sjikt > 100 mm, så lenge hefteegenskapane er gode nok til å hindre omfattande kontakt med aggressivt grunnvatn.
- Akkumulasjon av skadeleg syregivande biofilm er fråverande i utvalet av undersjøiske tunnelar med sprøytebetongsjikt > 100 mm. Dette har truleg samanheng med at tykke sjikt hindrar effektiv gjennomtrenging av ionerikt grunnvatn til overflata via gjennomsettande riss der mikrobane har gode vekstvilkår.

Tilstandsutviklinga i dei undersøkte tunnelane er ikkje alarmerande, men i alunskifermiljø og undersjøisk miljø er det lokalt observert stor grad av nedbryting.

Restlevetida har vist seg vanskeleg å stipulere fordi omfanget av nedbryting er avhengig av svært mange variablar som varierer over korte avstandar. For tunnelstrekningar over nokre titals meter kan restlevetida i dei mest aggressive miljøa variere frå under 50 år til opp mot 100 år.

Oppsummeringa under legg *størst vekt på funn som er særleg viktig med tanke på design*, og særleg heft, tykkelse og resept, som grunnlag for optimal dimensjonering av bestandig sprøytebetong. Undersøkingemetodikken er oppsummert i kapittel 3 med definisjonar av *sonene A, B, C og S* i Figur 3.1.

## 6.2 Ferskvassmiljø

Nedbrytingsmekanismane i ferskvassmiljø er avgrensa til overflatekarbonatisering og mulege effektar av tinesalt. Vi har undersøkt sprøytebetong med varierende v/b-tal (0,41 til 0,49) og prøvetaking ved betongalderar frå 10 til 23 år.

Overflatekarbonatiseringa i sprøytebetong eksponert for trafikk er tydeleg større enn i sprøytebetong bak hvelv (hhv. 4–20 mm og ~ 1 mm). For eksponert betong er det ein tendens til at karbonatiseringa aukar når sugporøsiteten aukar. Det er ein tilsynelatande tendens til at karbonatiseringa minkar mot høgare v/b-tal, men relativt tørre betongoverflater har ofte djupast karbonatisering og er tilsynelatande den dominerande faktoren. Våte overflater og overflater med utfelt kalsiumkarbonat tenderer til å ha noko mindre karbonatisering. Det er usikkert om mikroriss har verka inn på karbonatiseringa.

Det er ikkje etablert nokon klar samanheng mellom betongalder og karbonatiseringsdjup og heller ikkje mot akkumulert trafikkmengde (uttrykt som betongalder x ÅDT).

Indre karbonatisering (popcorn kalsitt) og utluting av kalsium mot berg er registrert i Sone A i eitt tilfelle med svak og permeabel heftsone. Omfanget var svært lite (2,5 mm). Men utluting av kalsium frå betong i ferskvassmiljø er ikkje heilt fråverande, noko også utfellingar av kalsitt i form av overflatebelegg og stalaktittar viser.

Stålfiberkorrosjon er bare marginalt utvikla i ytre deler av karbonatisert sone og representerer ikkje noko problem. Tinesalt har påverka ytre få mm i eksponert sprøytebetong, men er neppe eit stort problem. Nedre 1–2 meter mot tunnelsålen vil kanskje kunne bli påverka negativt i det lange løp i tunnelar med høg ÅDT og mykje salting.

Trykkfastheit og fiberinnhald samsvarar med gjengs design.

Restlevetid. Det er tydeleg at ferskvassmiljøet ikkje har ført til nemneverdig skadeleg nedbryting av sprøytebetongen så langt. Dette samsvarar med tidlegare konklusjonar frå FoU-prosjektet «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar», som også omfatta betong frå tida før 1985 (Davik 1997f). Tilstandsutviklinga for sprøytebetong i ferskvassmiljø er svært god og tyder på lange levetider, truleg opp mot 100 år. Det er i eit slikt tidsperspektiv likevel sannsynleg at område med lekkasjar vil kunne føre til utluting av sementlimet og muleg lokal svekking av sprøytebetongen.

Datagrunnlaget frå ferskvasstunnelar så langt tyder ikkje på vesentlege problem med eksisterande dimensjoneringreglar.

## 6.3 Svakt svovelsurt miljø

Nedbrytingsmekanismane i svakt svovelsurt miljø er avgrensa til overflatekarbonatisering og innslag av sulfatangrep i Sone A mot heftsone. Resultata bygger på undersøking av fiberfri sprøytebetong i service tunnel ved Harpefoss kraftverk utan vegtrafikk. Betongen her har eit v/b-tal omkring 0,5, og er basert på sement med 20 % flygeaske. Det blei tatt ut prøver ved betongalder 13 år og 16 år.



Overflatekarbonatiseringa varierte frå 1–13 mm. Thaumasitt sulfatangrep var bare synleg i ein svært tynn betong i kombinasjon med dårleg permeabel heftzone. Sulfatinnhaldet i grunnvatnet var på litt over 100 mg/liter og tyder på at slike konsentrasjonar kan vere tilstrekkelege for å danne thaumasitt i alle fall heilt lokalt.

Restlevetid. Resultata frå Harpefoss er relevante for tunnelar i Eokambrisk svartskifer, for eksempel i Gudbrandsdalen. Vi har per dags dato ikkje svært mykje erfaring med dette miljøet. Framtidige tilstandsundersøkingar bør omfatte tunnelstrekningar i denne svartskiferen.

Datagrunnlaget frå svakt svovelsurt miljø tyder så langt ikkje på vesentlege problem dersom sprøytebetongarbeid utførast i tråd med eksisterande praksis for ferskvasstunnelar.

## 6.4 Alunskifermiljø

Nedbrytingsmekanismane i alunskifermiljø omfattar overflatekarbonatisering, thaumasitt sulfatangrep, kalsium utlutning med popcorn kalsitt og varierende innverknad av svovelsyre. Vi har ikkje undersøkt effektar av tinesalt. Stålfiberarmert sprøytebetong med varierende v/b-tal (0,40 til 0,50) blei undersøkt i prøver samla inn ved betongalder 2, 8, 13, 16 og 22 år. Alle betongane var basert på sulfatresistent sement (ca. 530 ekv. kg/m<sup>3</sup>) med silikastøv (5–10 %) med vannglas eller alkalifri akselerator.

Overflatekarbonatiseringa varierte frå 0 til 4 mm, dvs. mindre enn i ferskvasmiljø. Det var ingen forskjell mellom trafikkeksponerte- og ikkje-trafikkeksponert sprøytebetongar, og omfanget var uavhengig av v/b-forholdet. Overflatekarbonatisering er, så vidt ein kan sjå, svært uproblematisk i sprøytebetong basert på sulfatresistent sement med silikastøv.

Intern karbonatisering (popcorn kalsitt m.m.) og thaumasitt sulfatangrep er nært knytta til kalsium-utlutning ved inntrenging av aggressivt grunnvatn gjennom sementpastaen. Dette representerer den typiske og velkjente utfordringa med betong i alunskifermiljø. Det er først og fremst dårlege heftsoner med høg permeabilitet som styrer nedbrytinga av sprøytebetong i alunskifermiljøet. Nedbrytinga i Sone A frå heftsona utgjer mestedelen av den totale omvandlinga og nedbrytinga, og omfanget er særleg stort der det er danna svovelsyre ved oksidasjon av alunskifer. Det er i tillegg observert utlutning og effektar av sulfatangrep som verkar frå overflata (Sone C).

Stålfiberkorrosjonen er svært destruktiv i soner der sementpastaen er sterkt nedbroten til thaumasitt og kalsitt. Elles er stålfiberkorrosjonen meir sporadisk utvikla med noko mindre omfang enn den totale omvandlinga. Trykkfastheit og fiberinnhald samsvarar med gjengs design.

Restlevetid. Figur 4.26 viser at betongalderen fram til omkring 20–25 år ikkje er avgjerande for nedbrytingstakten, medan forholda på heftsona alltid er utslagsgivande. Levetida er avhengig av oksidasjon i alunskifer, heftforhold, v/b-tal, sugporøsitet og designtykkelse.

Erfaringane frå sprøytebetongen i Åkebergveien, med v/b ~ 0,50 i gammal vegskjering med oksidasjon av alunskifer over lang tid, tyder på levetid omkring 30–35–40 år: *Dårleg heft med syreverknad har gitt stor grad av omvandling og nedbryting i betongsjikt opp til 180 mm.*

Restlevetida er større så lenge tykkelsen og heften er tilstrekkeleg god. Det er vist at nedbrytinga er minst i sprøytebetong i Svartdalstunnelen med  $v/b = 0,40$  (Figur 4.27). Denne betongen var laga med  $v/b = 0,40$ , 5 % silikastøv og alkalifri akselerator (resept nokså likt dagens krav). Eksempel frå Ekeberg tunnelen viser også svært lite nedbryting i 22 år gammal sprøytebetong med  $v/b = 0,45$  (8 % silikastøv og vannglas akselerator), der betongen er tykk og heftsona er tett. Undersøking av 16 år gammal sprøytebetong i Svartdalstunnelen viser at låg sugporøsitet (under 18 %) er fordelaktig (Figur 4.34).

Utviklinga i alle undersøkte tunnelar viser klart at oksidasjon av alunskifer bakom sprøytebetongen dannar svovelsyre som tærer på heftsona og aukar nedbrytinga i Sone A. Dette kan føre til krakelering og nedfall. I Åkebergveien og Svartdalstunnelen har vi observert akselerert nedbryting etter ei tid. Tidspunktet er i prinsipp avhengig av sulfidinnhald i alunskifer og tilgang på oksygen. Oksidasjon av alunskifer vil også føre til svelling i skiferen og mekanisk trykk på sprøytebetongen (sjå Ekeberg tunnelen).

Datagrunnlaget frå alunskifermiljøet tyder på at tykkare betong motverkar oksidasjon og viser at eksisterande dimensjoneringreglar for sprøytebetong bør endrast (sjå Kapittel 6.7).

## 6.5 Undersjøisk miljø

Nedbrytingsmekanismane i undersjøisk miljø omfattar overflatekarbonatisering og saltvassangrep: saltvassangrepet omfattar kloridinntrenging, magnesiumangrep, thaumasitt sulfatangrep, kalsium utlutning med utfelling av popcorn kalsitt og varierende innverknad frå syredannande biofilm. Omfanget av stålfiberkorrosjon er undersøkt i detalj saman med heftforhold og samanhengar med tykkelse. Vi har undersøkt sprøytebetong med varierende  $v/b$ -tal (0,40 til 0,47) basert på prøvetaking ved betongalder 5 år til 26 år. Betongane var basert på standard portlandsement eller rapidsement med varierende innhald av silikastøv (1–14 %) med både vassglas og alkalifri akselerator.

Overflatekarbonatiseringa er ikkje omfattande og representerer ikkje noko problem med tanke på fiberkorrosjon. Karbonatiseringa er djupare i sprøytebetong som er eksponert for trafikk (0–25 mm) enn betong bak tunnelkvelv (mindre enn 5 mm). Det er ein tendens til at overflatekarbonatiseringa aukar i takt med akkumulert trafikkmengde i eksponert betong, men er ofte også djupast i sprøytebetong med høgt bindemiddelinnhald. Lågt silika innhald på 1 % i betong med lågast bindemiddelinnhald har likevel djupare karbonatisering (Figurane 4.61 og 4.62). På same måte som ferskvasstunnelar er den djupaste karbonatiseringa registrert i relativt tørre betongoverflater. Karbonatiseringa er ofte mindre omfattande i betong under overflateutfellingar av uskadelege mineral (kalsiumkarbonat og brucitt). Overflatekarbonatiseringa har minst omfang under syredannande tykk biofilm, og har samheng med at ytre karbonatiserte sjikt er tæra vekk.

Det er utført ei rangering av mikroriss i betongen, som viser store variasjonar. Men det er vanskeleg å knytte dette til grad av omvandlingar og nedbryting. På den andre sida er det ein tendens i talmaterialet som tyder på at mikroopprissing minkar når tykkelsen aukar. Tykk sprøytebetong har også færre makroriss.

Nedbryting av sprøytebetong i undersjøisk miljø verkar frå begge sider og i stor grad på grunn av ulike mekanismar. Omvandling i Sone A og Sone C er derfor plotta separat som funksjon av total tykkelse og dokumentert i kapittel 4.6. Nedbryting på grunn av syredannande biofilm i Sone C er avgrensa til betong < 100 mm. På same måte er viktig nedbryting i sone A mest typisk for tynn sprøytebetong.

I kapittel 4.6 er effektar av svak diffus omvandling i tykkare betong dokumentert i forhold til både pastaomvandling og korrosjonsomfang. Den diffuse omvandlinga omfattar bare isolerte mikrodomene med innslag av intern karbonatisering og magnesium som begge reduserer pH i pasta (truleg til pH-verdiar nær 10). I slik betong er det delvis sporadiske teikn på stålfiberkorrosjon, som bare er svakt indikert i mikroskop og aldri synleg på makroskala. Det er *litt usikkert om dette kan utvikle seg til destruktiv fiberkorrosjon* på lenger sikt.

Trykkfastheit og fiberinnhald samsvarar med gjengs design, men det er vist at betong med stor og visuelt synleg omvandling med bl.a. magnesium fører til svekking. Strekkfastheit over heftsona er testa i to undersjøiske tunnelar og varierer frå relativt sterk til svak. Dette samsvarer med inntrykket frå undersøkingane av kjernematerialet.

Stålfiberkorrosjon er lite utbreidd i betong tykkare enn 100 mm. Dette står i kontrast til det høge kloridinnhald som blei målt i dei aller fleste undersøkte kjernene (> 0,1 % av betongvekt). Årsaka ser ut til å ha samanheng med at stålfiberarmert sprøytebetong ikkje har lett tilgang på oksygen (ingen katode) der ein samtidig har tilgang på klorid (anode).

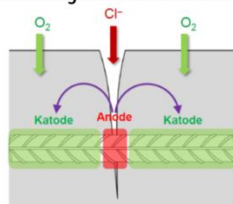
Så lenge sementpastaen er rimeleg intakt og dermed hindrar inntrenging av oksygen er det vanskeleg å sette i gang korrosjon. Fordi stålfibrane neppe er i særleg kontakt med kvarandre vil uansett det elektrokjemiske systemet bare kunne operere på mm til cm skala, i motsetning til armeringskorrosjon i brubetong (Figur 6.1).

Det er også ei generell erfaring at fullt intakt stålfiber i kjerner frå undersjøisk sprøytebetong startar å korrodere på kjerneoverflatene nokså raskt etter utboring, sjølv når ein har vaska dei i drikkevatn. Dette skjer aldri i same omfang i sprøytebetong frå ferskvassmiljø (Hagelia 2008a, Mannvit 2015). Dette viser at så fort oksygen slepper til i kloridinfisert betong så får vi også etablert katoden.

Undersøkingane av sprøytebetong i undersjøisk miljø viser klart at destruktiv fiberkorrosjon i hovudsak er knytta til nedbryting av sementpastaen. Nedbrytinga av pasta fører til at tilgangen på både klorid og oksygen aukar. Det er derfor ikkje overraskande at både korrosjonsomfang og nedbryting av sementpasta gir omtrent same resultat med tanke på minimums («kritisk») tykkelse.

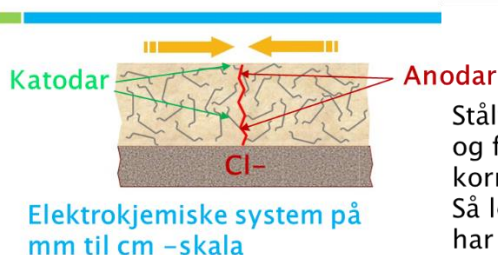
Dette støttast også indirekte av forskning ved Chalmers i Gøteborg: Stålfiberarmering har ein generelt positiv effekt på tilstandsutvikling og bestandigheit (Berrocal 2017).

### Korrosjon i brubetong:



Armeringsjern er potensielt påverka i heile lengda. **Elektrokjemiske system på (ti-)meter skala**

### Korrosjon i stålfiberarmert sprøytebetong:



Stålfiberen er ofte utan fysisk kontakt og forklarar delvis korfor vi ikkje har korrosjon trass i høge kloridinnhald. Så lenge oksygen ikkje er tilgjengeleg har vi ingen katode.

Figur 6.1: Illustrasjon av ein viktig forskjell mellom korrosjon av lange armeringsjern i brubetong og korte stålfibrar i sprøytebetong.

**Restlevetid.** Figurane 4.67 og 4.68 viser at betongalderen fram til omkring 25 år ikkje er avgjerande for nedbrytingstakten, medan forholda på heftsona er utslagsgivande. Levetida er avhengig av heftforhold,  $v/b$ -tal, bindemiddelinnhald, sugporøsitet og designtykkelse.

Det er uvanleg at heftsoner i undersjøiske tunnelar er påverka av syre (einaste eksempel er kjerne 6150 i Freifjordtunnelen). Effekten av syregivande biofilm fører til nedbryting av både sementlim og stålfiber, særleg i relativt tynn betong. Dette er nokså uavhengig av  $v/b$ -tal mellom 0,41 og 0,47. Figur 4.101 tyder på at sugporøsitet på 15–20 % er viktig for å oppnå god bestandigheit. Undersøkingane tyder på at bindemiddelinnhaldet ikkje bør vere svært høgt (Figurane 4.69, 4.73) og at  $v/b$ -forholdet alltid bør vere 0,40.

Dokumentasjonen i Kapittel 4.6 viser at nedbryting av både sementpasta og stålfiber er lite viktig i sprøytebetong tykkare enn 100 mm til betongalder omkring 20 år, særleg når det er god heft. Men det er likevel vanskeleg å stipulere endelege levetider fleire titals år framover. I tillegg til data i denne rapporten er det særleg to forhold ved undersjøiske tunnelar som er viktig:

- Innlekkasjen til undersjøiske tunnelar minkar med tida, dvs. påverknaden frå aggressivt salt grunnvatn blir etter kvart mindre
- Utfellingar av kalsitt og brucitt på heftsoner og overflater ser ut til å blokkere vidare påverknad frå aggressivt grunnvatn.

Kombinert med auka minimumstykkelse og reseptar basert på  $v/b = 0,40$  er det grunn til å rekne med at vi vil oppnå auka levetida for undersjøisk sprøytebetong.

Handbok N500 Vegtunnelar og Handbok R761 Prosesskode 1 har innarbeidd nye krav til minimum sprøytebetongtykkelse på 100 mm i undersjøisk miljø basert på resultatata frå Varige konstruksjonar. Prosjektresultata har i tillegg skaffa fram dokumentasjon som viser at Statens vegvesen igjen kan ta i bruk stålfiber til undersjøisk betong utan særleg risiko for skadeleg

fiberkorrosjon og redusert bestandigheit. Prosesskoden tillater ikkje lenger bruk av plastfiber i sprøytebetong og vi kan dermed oppfylle krava frå miljøstyresmaktene utan at det går utover Statens vegvesen sine kvalitetskrav.

Datagrunnlaget og vurderingane bak dei nye dimensjoneringsreglane er behandla i Kapittel 6.7.

## **6.6 Sprøytebetong i rusta sulfid- og sulfatførande gneis er ikkje undersøkt**

Tunnelar i sterkt syregivande berg med  $\text{pH} < 5,5$  er ikkje undersøkt. Slike bergartar finst blant anna i Lillesandsdistriktet, der rusta sulfid- og sulfatførande gneis har gitt kraftig sur avrenning med  $\text{pH} \leq 4$  og store skader på ytre miljø.

Syrepotensialet til rusta sulfid- og sulfatførande gneis er i stor grad styrt av løyselege forvittringsmineral (ein variant av jarositt) som *gir syrereaksjon utan oksidasjon av bergmassen* i tillegg kjem innhald av jernsulfid, som gir syrereaksjon ved oksidasjon (sjå Hagelia og Fjermestad 2016). Denne gneisen inneheld ikkje kalsiumkarbonat og er, i motsetning til mange alunskifervariantar, heilt *utan bufferevne*. Det er derfor sannsynleg at denne gneisvarianten vil føre til sterkt syreangrep på heftsona og at effekten er større enn dei verste eksempela med sprøytebetong på oksidert alunskifer.

Ein bør særleg merke seg at rusta sulfid- og sulfatførande gneis generelt er mykje mindre oppsprukne enn alunskifer. Bergmassen vil ofte ikkje vere spesielt ustabil sett ut frå ein bergmekanisk synsvinkel, og sprøytebetong–tykkelsen vil ofte ligge på 80 mm.

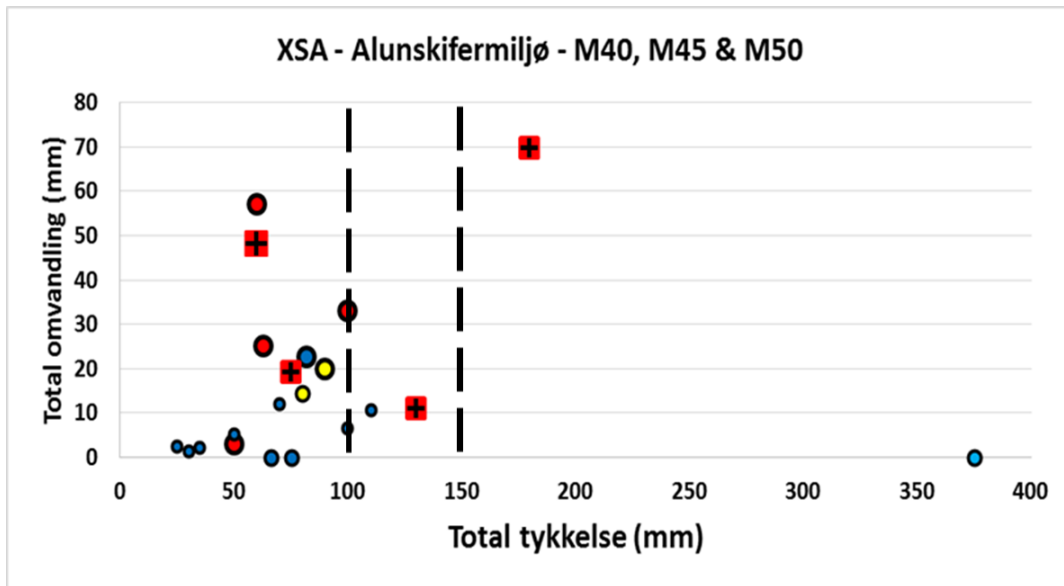
Kombinasjonen av svært sterk syrebelastning frå bergmassen og såpass «tynn betong» er derfor sannsynlegvis uheldig. Det er i tillegg muleg at bergmasse av dette slag kan krevje ein meir syrebestandig resept enn det vi bruker i dag. Det er behov for å undersøke dette nærmare.

## **6.7 Dimensjonering**

I dette delkapittelet diskuterer vi dimensjonering av tykkelse, med vekt på observerte nedbryting sett i lys av dagens reseptar.

### **6.7.1 Behov for auka minimumstykkelse og god heft for sprøytebetong i alunskifermiljø**

Den klare samanhengen mellom permeable heftsoner med svovelsyre og nedbryting i Sone A, viser at sulfida i alunskiferen oksiderer. Den observerte positive effekten av god heft og tykk betong tyder på at dette motverkar oksidasjon av alunskifer, fordi det hindrar tilgang på oksygen frå tunnelrommet.



Figur 6.2: Total tykkelse plotta mot total omvandling viser at minimumstykkelsen til sprøytebetong i alunskifermiljøet bør være minst 100 mm. Stipla linje ved 150 mm viser minimumstykkelsen etter Handbok N500 ved Q-verdiar mellom 0,1 og 1. Symbol som i Figur 4.24.

Erfaringsmaterialet i Figur 6.2 viser at tykkelsen bør være minst 100 mm, og at dette ikkje er spesielt konservativt. Dei fleste prøver med god heft (blå symbol) hadde lite omvandling: Sprøytebetong med  $v/b = 0,40$ , god heft, og som er over 100 mm tykk, viser total omvandling/nedbryting på 0 mm til 10 mm av tverrsnittet etter 16 år. Prøvene med sterkaste omvandlinga har svovelsyre på heftsona (raude firkantar med kryss), spesielt i sprøytebetongen frå Åkebergveien med  $v/b = 0,50$ . Silikastøvet i Åkebergbetongen var ikkje svært god dispergert (Hagelia mfl. 2001). Også andre prøver med permeabel heftsona (raude sirkelar) er ofte sterkt omvandla/nedbrotne; vanlegvis meir enn sprøytebetong med litt svekka og litt permeabel heft (gul).

Dersom vi ser bort frå den oksiderte alunskiferen i Åkebergveien, så er sprøytebetongar tykkare enn 100 mm å rekne som lite påverka. Merk likevel eksempel på 110 mm tykk betong med 10 mm omvandling (blått punkt i Figur 6.2).

Handbok N500 setter ikkje spesielle krav til minimumstykkelse for alunskifermiljø og 80 mm gjeld for aggressiv alunskifer på same måte som ikkje aggressivt ferskvassmiljø. Men ein vil likevel ofte bruke minst 100 mm dersom ein dimensjonere etter handboka. Dette fordi bergmassekvalitet i alunskifer er dårleg, ofte med Q-verdiar mellom 0,1 og 1 som gir 150 m tykkelse i Statens vegvesen sitt system (Tabell 6.1 i Handbok N500). På den andre sida finst det alunskiferbergmasse som vi erfarer blir gitt Q-verdiar på over 10, noko som etter regelverket gir minimumstykkelse på 80 mm. Dette er alt for snautt ut frå erfaringsmaterialet, særleg sett i lys av syrepotensialet i mange alunskifervariantar. Handboka bør reviderast og spesifisere minimum 100 mm for alunskifermiljø. Vi veit ikkje korleis dette vil bli etter 40–50 år sjølv med dagens krav til  $v/b = 0,40$  i aggressive kjemiske miljø. For over seksti år sidan peika Alunskiferkomiteen på at senking av grunnvatnet fører til sterkt auka syrepotensial i alunskifer (Bastiansen 1957). Følgjande tiltak vil gje auka levetid for sprøytebetong i alunskifermiljø:

- Unngå senking av grunnvatnet over tunnelane for å minske oksidasjon og syreproduksjon i bergmassen over tunnelen. Det er behov for å etablere strenge krav til innlekkasje og systematisk forinjeksjon.
- Fokus på hefteegenskapane under bygging. Det er vist at ein kan oppnå betre tidleg heft dersom ein tørkar alunskiferen med trykkluft etter ordinær spyling (samtale med O. Fromreide, sjå Vedlegg 3).
- Etablere minimumstykkelse på 100 mm for å motverke oksidasjon av alunskiferen og syreproduksjon nær heftsona. Dette vil også motverke inntrenging av aggressivt vatn..
- Bruke reseptar som gir tettast muleg sprøytebetong, i praksis M40 ( $v/b = 0,40$ ) med sugporøsitet mindre enn 18 %. Bindemiddelinnhaldet må vurderast i forhold til svinnpotensialet i aktuelle reseptar.
- Følgje med på utviklinga over fleire år, særleg med tanke på hefteegenskapane og om desse svekkast over tid.

Seinare oppfølging av tunnelane i alunskifermiljø bør ha stort fokus på effektar av syre og utfellingsprodukt både på heftsona og på riss i sprøytebetongen. Utfellingar av jarositt og andre forvittringsprodukt vitnar om svovelsurt vatn og vil alltid tære på heftsona. Utfellingar av gips, som er danna ved reaksjon mellom sulfat i vatnet og kalsium i sement, fører til kraftig svelling på heftsoner og på riss i sprøytebetongen, krakelering og nedfall (sjå Vedlegg 3).

### **6.7.2 Behov for auka minimumstykkelse og god heft for sprøytebetong i undersjøisk miljø**

Nedbryting av sprøytebetong i undersjøisk miljø er komplisert, fordi:

- Nedbrytinga verkar frå begge sider av sprøytebetongsjiktet.
- Nedbrytingsmekanismane som verkar frå overflata er i stor grad forskjellige frå dei som verkar frå heftsona.

Vurderingar med tanke på dimensjonering for bestandigheit bør derfor ta utgangspunkt i erfaringsdata som skil mellom:

- Nedbryting av sementlimet *både* nær heftsona (Sone A) *og* nær overflata (Sone C).
- Nedbryting av stålfiber (korrosjonsomfang).

Figurane 6.3, 6.4 og 6.5 illustrerer korleis omvandling og nedbryting av både sementlim og stålfiber varierer med tykkelse. Tyngda i erfaringsmaterialet er basert på sprøytebetong med  $v/b$ -tal som i all hovudsak ligg mellom 0,42 og 0,47. Bare Frøyatunnelen tilsvarar dagens krav med låg  $v/b = 0,40$  og representerer lågaste betongpermeabilitet i datasettet. Erfaringar viser at det i praksis er svært vanskeleg å oppnå  $v/b$ -tal lågare enn 0,40 i sprøytebetong (samtale med Reidar Kompen, 2008).

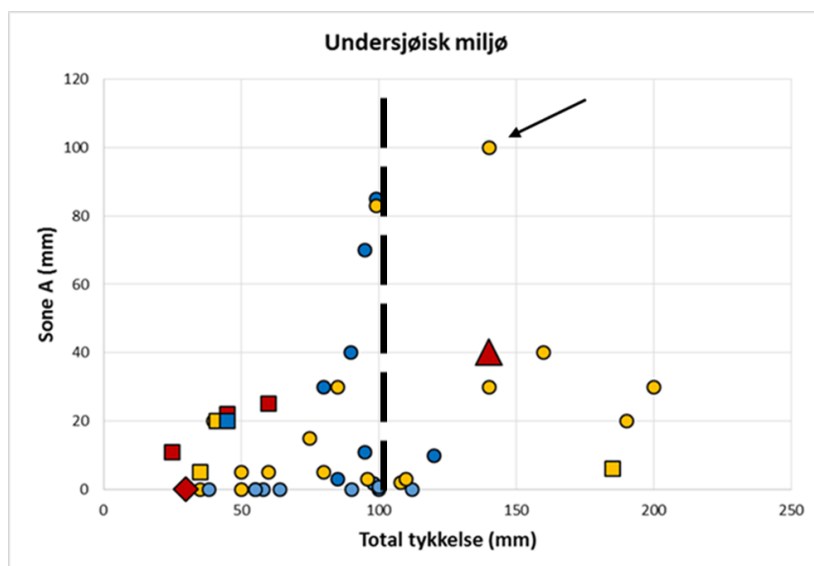
#### **6.7.2.1 Nedbryting av sementlimet**

I vurderingar om dimensjonering er det skild mellom:

- Nedbryting som tydeleg har svekka deler av sprøytebetongen (svært viktig)
- Mindre omvandlingar som ikkje viser klare teikn på svekking (underordna)

Figur 6.3 (same data som i Figur 4.64) viser at nedbryting som har ført til svekking i Sone A for det meste er avgrensa til betong < 100 mm. Dette omfattar a) abiotiske angrep med sterk utluting, indre karbonatisering, magnesium-angrep og thaumasitt sulfatangrep (kvadratiske symbol); b) sterkt opprissa betong med destruktiv fiberkorrosjon (rombe) og c) eitt enkeltsåande tilfelle med syregivande biofilm på heftsona (trekant). Raude symbol viser effekt av nedbryting der det er konstatert syreverknad på heftsona. Orange og blå kvadrat representerer abiotiske angrep (a), der det hhv er utfelt/ikkje utfelt karbonat og brucitt på heftsona.

Bortsett frå to enkeltsåande tilfelle er nedbryting og svekking av sementlimet bare observert i sprøytebetong som er tynnare enn 100 mm. Dei to unnataka med nedbryting i tykkare betong (raud trekant og orange kvadrat) bør ikkje styre dimensjoneringa av tykkelse: 1) Innverknad av biofilm på heftsona i 140 mm tykk sprøytebetong (Freifjordtunnelen, 12 år med  $v/b = 0,42$ ) er svært uvanleg (foto av kjerna er vist i Vedlegg 4); 2) Abiotisk angrep med thaumasitt (6 mm) i 185 mm tykk sprøytebetong (Flekkerøytunnelen, 26 år med  $v/b = 0,47$ ) er ikkje svært omfattande, særleg i sett lys av masseforholdet som er vesentleg høgare enn dagens krav.



Figur 6.3: Total tykkelse plotta mot omvandling og nedbryting i Sone A mot berg. Den stipla linja viser kravet i Handbok N500. Symbol som i Figur 4.64.

Mindre omvandlingar utan teikn på svekking er illustrert med sirklar i Figur 6.3. Dette representerer varierende innslag av *svak diffuse usamanhengande omvandlingar*. Undersøkingar av betong med diffuse omvandlingar har vist at trykkfastheit i slik sprøytebetong truleg ofte er høg (sjå Figur 4.95). Sjølv om innslaget av diffus omvandling i blant påverkar mykje av betongen er ikkje dette problematisk så langt (blå = utan utfelling på heftsona; orange = utfelling av karbonat og brucitt på heftsona). Fenomenet er mest utvikla i relativ porøs betong (pila viser betong med visuelt høgste porøsitet mot heftsona i betong med  $v/b = 0,42$ ), og det er sannsynleg at slik diffus omvandling med litt karbonat og magnesium/brucitt (indikerer pH omkring 10 i sementlimet) kan utvikle seg mot meir nedbryting i det lange løp. På den andre sida er diffus omvandling mest utbreidd i

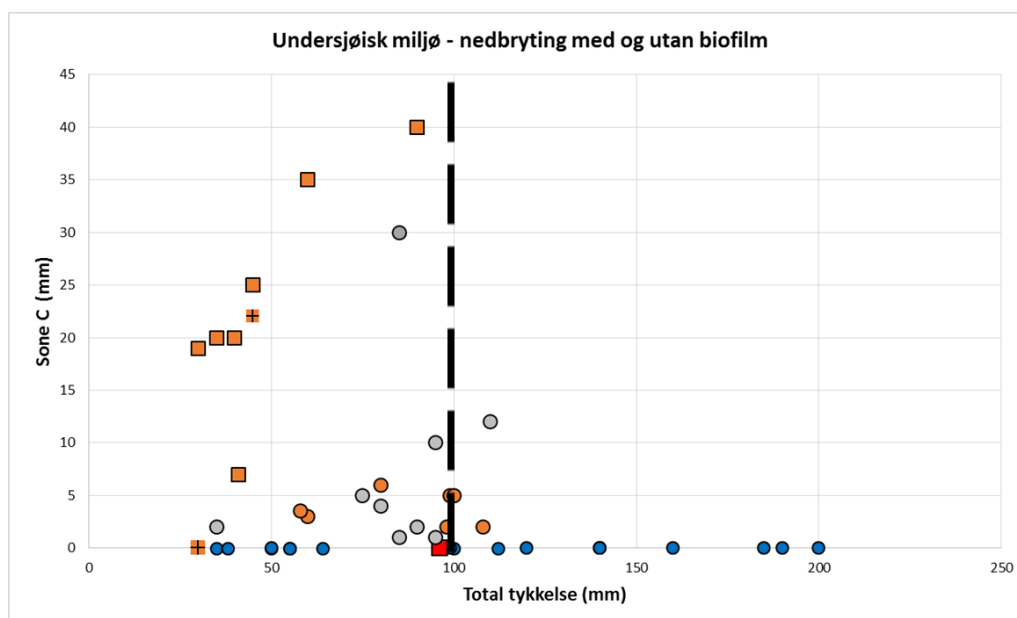


sprøytebetong med  $v/b > 0,42$  og oftast  $v/b = 0,46 - 0,47$  (også sprøytebetongprøvene med tykkelse over 100 mm).

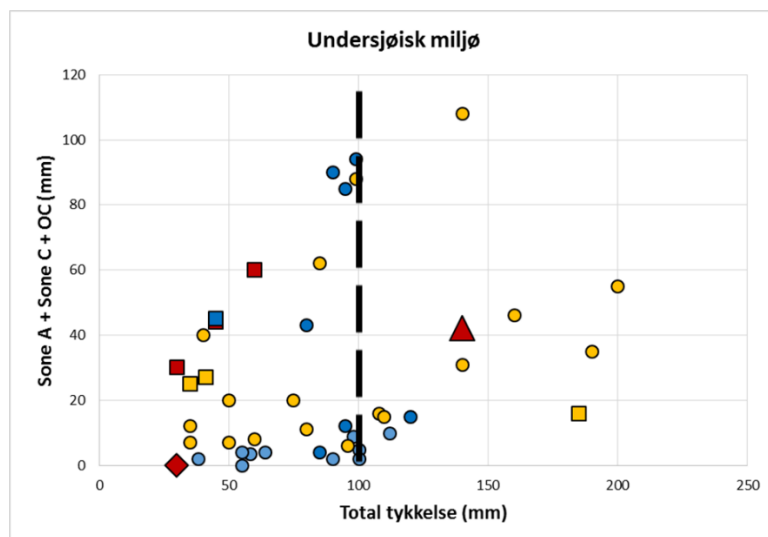
Betongen i Frøyatunnelen (96 mm tykk,) hadde dårleg heft med utfelling av kalsitt, men hadde likevel bare 3 mm diffus omvandling mot heftsona (sjå Tabell 4.21) etter 15 år. Resepten i Frøyatunnelen, med  $v/b = 0,40$  og 7 % silikastøv (Tabell 4.19), må reknast som tilsvarande dagens krav til M40 i undersjøisk sprøytebetong. Dette tyder på at reseptar vi bruker i dag er meir motstandsdyktige enn dei vi har undersøkt, og at sprøytebetong med minimum 100 mm tykkelse i undersjøisk miljø kan reknast som varige konstruksjonar.

Nedbryting av sementpasta av biofilm m.m. viser det same. *Det er ikkje observert nedbryting på grunn av syredannande biofilm i sprøytebetong tykkare enn 100 mm.* Figur 6.4 viser total tykkelse plotta mot nedbryting i Sone C på grunn av syredannande Mn-Fe biofilm (orange kvadrat: kryss er prøver med avskaling). Til sone C er også rekna inn estimert tapt tverrsnitt ved total nedbryting av betongen (varierer frå 1 mm til ca. 25 mm der det var muleg å sjå). Orange sirklar representere relativt svak omvandling/nedbryting under tynn og usamanhengande biofilm utan syre. Raudt kvadrat er Frøyatunnelen med tilsynelatande uskadeleg Fe-rik biofilm utan syre ( $v/b = 0,40$ ). Grå sirklar viser betong utan biofilm med omvandling/nedbryting med magnesiuminntrenging, kalsium utluting og indre karbonatisering. Blå sirklar representerer intakt betong utan omvandling under ytre karbonatisert sone.

Resultata indikerer at vekst av biofilm er avgrensa til sprøytebetong tynnare enn 100 mm.



Figur 6.4: Total tykkelse plotta mot omvandling i Sone C (eksklusive overflatekarbonatisering) med og utan biofilm. Den stipla linja viser kravet i Handbok N500. Symbol som i Figur 4.65.

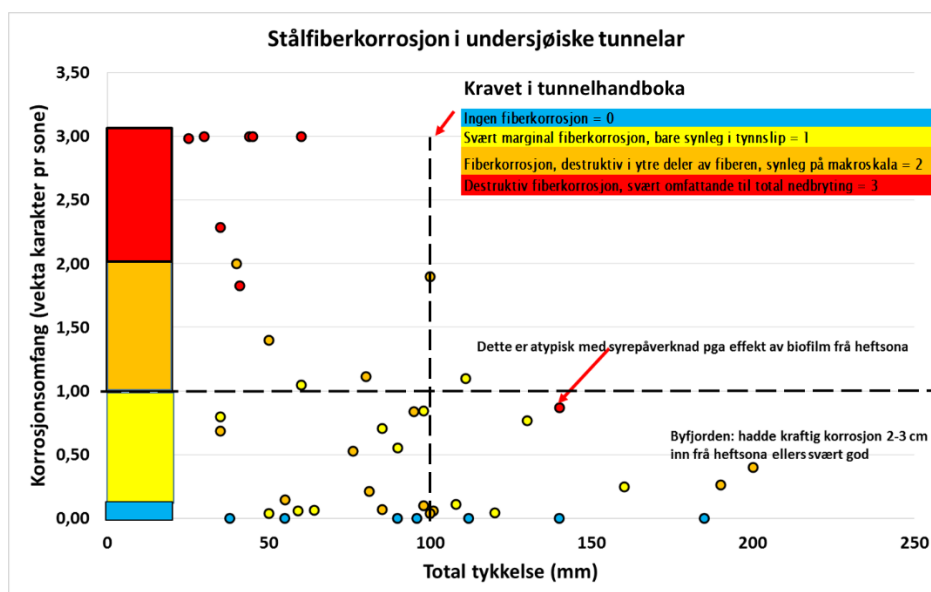


Figur 6.5: Total tykkelse plotta mot total omvandling. Den stipla linja viser kravet i Handbok N500. Symbol som i Figur 4.64.

Figur 6.5, med same symbol som i Figur 6.3, viser den totale omvandlinga. Her er også overflatekarbonatisering (OC) tatt med. Overflatekarbonatisering er ikkje avhengig av tykkelsen til sprøytebetong.

### 6.7.2.2 Stålfiberkorrosjon

Figur 6.6 viser total tykkelse av sprøytebetong plotta mot vekta korrosjonsomfang (sjå Kapittel 4.6.3). Vekta karakter < 1 representerer betong heilt utan teikn på korrosjon (blått) eller svært lite korrosjon bare synleg i tynnslip (gult). Dette er karakteristisk for sprøytebetong tykkare enn 100 mm. Også dei fleste enkeltprøvene over 100 mm viste maksimal karakter 1 (gul) med svært marginal fiberkorrosjon.



Figur 6.6: Total tykkelse plotta mot vekta korrosjonsomfang gjennom tversnitt av undersjøisk sprøytebetong. Vekta karakter < 1 er vurdert som tilfredsstillande. Førekomst av verste tilfelle av korrosjon i enkeltprøver er også vist med farge symbol (sjå tekst).

To prøver med vekta karakter  $< 1$  (190 og 200 mm) hadde likevel 20–30 mm med innslag av destruktiv fiberkorrosjon i klasse 2 (orange: destruktiv korrosjon i ytre deler av fiber som er synleg på makroskala) mot heftsona. Begge desse er frå Byfjordtunnelen med  $v/b = 0,46$ , 1 % silikastøv og lågt bindemiddelinnhald basert på rapidsement (13 år). Den eine prøva med destruktiv fiberkorrosjon i klasse 3 (raud) er igjen kjerne 6150 frå Freifjordtunnelen med uvanleg påverknad av biofilm frå heftsona.

Stålfiberkorrosjon er med andre ord ikkje heilt fråverande i all tykk sprøytebetong, men eit stort fleirtal av prøver med stor grad av fiberkorrosjon (vekta i klasser mellom 1 og 3,  $y$ -aksen i Figur 6.6) var frå sprøytebetongsjikt tynnare enn 100 mm. Stålfiberkorrosjon er ein følgjeskade etter omvandling og nedbryting av sementpasta. Det er derfor ikkje overraskande at data frå både pastanedbryting og stålfiberkorrosjon gir same resultat med tanke på effekt av tykkelse.

Med unnatak av kjerne 6660 frå Frøyatunnelen (karakter 0), var ingen av reseptane i samsvar med dagens krav til M40 i undersjøiske tunnelstrekningar. Det empiriske grunnlaget i denne rapporten er derimot dominert av sprøytebetong i samsvar med tidlegare krav til M45.

## 6.8 Oppsummering og konklusjon

Statens vegvesen har konkludert med at 100 mm minimums tykkelse er nødvendig og bør vere tilstrekkeleg for å hindre både nedbryting av sementpasta og stålfiberkorrosjon i moderne sprøytebetong i aggressivt undersjøisk miljø. Kravet til 100 mm minimums tykkelse kan oppfattast som konservativt, men bergsikringa skal vere funksjonsdyktig i 100 år. Erfaringane våre med moderne sprøytebetong dekkjer bare 25 år av designlevetida.

*Det er viktig å vere klar over at tilstanden til sementpastaen er like viktig som tilstanden til fiberarmeringa.* Dei aktive nedbrytingsmekanismane i undersjøisk miljø drivast i hovudsak av andre forhold enn fibertypen. Det er derfor ikkje grunnlag for å redusere tykkelsen sjølv om ein skulle ta i bruk inerte fibrar.

Følgjande tiltak vil gje auka levetid for stålfiberarmert sprøytebetong i undersjøisk miljø:

- Etablere strenge krav til innlekkasje og systematisk forinjeksjon.
- Sikre god, tidleg heft under bygging.
- Unngå porøs betong, særleg mot heftsona
- Etablere minimumstykkelse på 100 mm for å motverke inntrenging av aggressivt undersjøisk grunnvatn. Dette vil også redusere omfanget av gjennomsettande lekkasjeførande riss, som kan føre til vekst av skadeleg biofilm på overflata.
- Bruke reseptar som gir tettast muleg sprøytebetong, i praksis M40 ( $v/b = 0,40$ ) med sugporøsitet mindre enn 20%. Bindemiddelinnhaldet må vurderast i forhold til svinnpotensialet i aktuelle reseptar.
- Følgje med på utviklinga over fleire år, særleg med tanke på hefteegenskapane og om desse svekkast over tid.

Seinare oppfølging av tunnelane i undersjøisk miljø bør ha stort fokus på effektar utfellingsprodukt, riss gjennom sprøytebetongen og eventuell oppbygging av biofilm. Utfellingar av karbonatmineral og brucitt på heftsona bidrar i nokon grad til blokkering mot

aggressivt vatn. Utfellingar av gips, som er danna ved reaksjon mellom sulfat i vatnet og kalsium i sement, fører til kraftig svelling på heftsoner og på riss i sprøytebetongen, krakelering og nedfall (sjå Vedlegg 4).

## 6.9 Vidare FoU basert på erfaringar frå drift og vedlikehald og rehabiliteringsprosjekt

Rapportar frå det systematiske tunnelvedlikehaldet og rehabiliteringsprosjekt bør vere utgangspunkt for nye forskings- og utviklingsprosjekt. Det vil vere ein stor fordel om slike rapportar alltid har eit eige sjekkpunkt eller underkapittel der ein peikar på problematikkk som krev FoU-innsats.

Dette vil gje Statens vegvesen eit betre grunnlag for å definere FoU-prosjekt som griper meir direkte inn i totaløkonomien.

Varige konstruksjonar og tidlegare program viser at det er behov for FoU innan følgjande tema:

- Hefteegenskapar, med vekt på auka heft for å motverke effektar frå aggressivt vatn. Tidlegare undersøkingar av heftproblematikken av for eksempel Hahn og Holmgren (1979) og Bryne m. fl. (2014) bør vurderast som viktig grunnlagsmateriale
- Biofilm. Avdekke dei meir detaljerte eigenskapane til biofilm, fordi effektane varierer. Det er i gang ein PhD-studie ved Chalmers i Gøteborg med vekt på DNA og identifikasjon av mikroorganismane i norsk undersjøisk sprøytebetong. Det føregår også eit internasjonal arbeid innan mikrobiologiske effektar på betong (RILEM 253-MCI). Det kan også vere av interesse å følgje med på utviklinga av biofilm i alunskifermiljø.
- Undersøke sprøytebetong på nytt på same stader som i Varige konstruksjonar og fleire av tunnelane i Riktig bruk av sprøytebetong.
- Undersøke miljølaster i berggrunn som ikkje er representert i Varige konstruksjonar. Det vil i praksis dreie seg om tunnelar i svakt svovelsurt miljø (eokambrisk svartskifer på E6 i Gudbrandsdalen) og tunnelar i ekstremt syregivande rusta sulfid og sulfatførande gneis (E18 Grimstad – Kristiansand).

## 6.10 Forundersøkingar og planlegging for auka levetid

Varige konstruksjonar har vist at tilstandsutviklinga til sprøytebetong er avhengig av ei rekke faktorarar. I dette ligg det eit stort og i stor grad ikkje utnytta potensial for betre planlegging for auka levetid og sikrere oversikt over drifts- og vedlikehaldskostnader. Kapittel 5 viser for eksempel at det er tydelege samanhengar mellom nedbrytingsfenomen i betong som reflekterer variasjonar i hydrogeologiske forhold.

I lys av resultata frå Varige konstruksjonar er det muleg å peike på følgjande fokusområde under planlegging av nye tunnelprosjekt, som vil kunne bidra til å auke levetida til sprøytebetong, og meir riktig kostnadsplanlegging:

- Ingeniørgeologiske registreringar av bergmasse, Q verdiar, lokalisering av sannsynlege lekkasjeområde, betydning av lokale bergartar og forvittringsmineral.
- Vasskjemi og lokalisering av dei potensielt mest aggressive strekningane, som grunnlag for val av resept og annan design.
- Hydrogeologi og konsekvens av traseval inklusive effektar av bergoverdekning og oppsprekkingsgrad med tanke på tilgang på aggressivt vatn.

## 7 Referansar

- Austlid V og Andreassen TH (1998): Oslofjordtunnelen. Prosjekt anleggsteknikk VK. Institutt for bygg- og anleggsteknikk, NTNU, 40 sider & vedlegg.
- Asplan (1985): Driftsproblemer ved Vardøtunnelen – drenering, betongskader, korrosjon. Rapport, 35 sider & 4 vedlegg.
- Bamforth P (1997): Probabilistic Performance Based Durability design of Concrete Structures. Proc. Int. Sem. Management of Concrete Structures for longterm serviceability. University of Sheffield. pp. 32–44.
- Barton N and Grimstad E (2004): The Q-system following thirty years of development and application in tunnelling projects. Rock Engineering – Theory and Practice, Proceedings of ISRM Regional Symposium EUROCK 2004, Salzburg, Austria, 15–18.
- Bastiansen R, Moum J and Rosenqvist I Th (1957): Bidrag til belysning av visse byggetekniske problemer ved Oslo-området alunskifere. Norges geotekniske institutt. Publikasjon nr 20, 69 sider.
- Beaupré D, Talbot C, Gendreau M, Pigeon M and Morgan DR (1994): Deicer salt scaling resistance of dry and wet-process shotcrete. ACI Materials, Vol. 91, No. 5, 487–494.
- Bernard ES (2008): Current deficiencies in the design of fibre reinforced shotcrete linings in hard rock. In: K Berg, C Hauck, R Kompen (Eds.), 5<sup>th</sup> International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Lillehammer, pp. 36–47.
- Berrocal CG (2017): Corrosion of Steel Bars in Fibre Reinforced Concrete: Corrosion Mechanisms and structural performance. PhD-thesis. Chalmers University of Technology, Gøteborg.
- Bjørlykke K (1974): Depositional history and geochemical composition of Lower Palaeozoic epicontinental sediments from the Oslo region. Norges geologiske undersøkelse, 305, Bulletin 24, 1–81.
- Bryne LE, Ansell A and Holmgren J (2014): Laboratory testing of early age bond strength of shotcrete on hard rock. Tunnelling and Underground Space Technology 41, 113–119.
- Bye TI & Kynningsrud HR (2015): Rapport Varige konstruksjoner, F108 Hvalertunnelen. Statens vegvesen, 80 sider.
- Building Research Establishment (2003): Concrete in aggressive ground. Parts 1–4, BRE Special Digest 1.
- Bøyeie AE (1994): Klassifisering av bergartene i Rennfast-tunnelene ved hjelp av Q-metoden, RMR-metoden og RSR-metoden. Statens vegvesen. Veglaboratoriet. Internrapport 1708, 66 sider & vedlegg.
- Davik KI (1997a): Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler, Del A Innkjøring- og midtsoner. Statens vegvesen, 15 sider.
- Davik KI (1997b): Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler, Del B Undersjøiske tunneler. Statens vegvesen, 66 sider.
- Davik KI (1997c): Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler, Del C Frostsoner. Statens vegvesen, 19 sider.
- Davik KI (1997d): Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler, Del D Sprakefjell. Statens vegvesen, 31 sider.
- Davik KI (1997e): Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler, Del E Brannsikring på PE-skum.

- Statens vegvesen, 35 sider.
- Davik KI (1997f): Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler, Sluttrapport. Statens vegvesen, 46 sider.
- Davik KI (1998): Proper use of sprayed concrete in tunnels. Nordic Road and Transport Research 1998-1, 16-17.
- Department of the Environment, Transport and the Regions (1999): The thaumasite form of sulfate attack: risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction. Report of the Thaumasite Expert Group, DETR, January 1999.
- Fidjestøl TM (1994): Betong i tunnel. Tilstand - levetid. Hovedoppgave i anleggsteknikk, NTH, 91s.
- Fiskaa O, Hansen H og Moum J (1971): Betong i alunskifer. Norges geotekniske institutt, Publikasjon nr. 86. 32 s.
- Fiskaa O (1973): Betong i alunskifer, resultater av alunskiferutvalgets forsøksvirksomhet. 1963-1972 Norges geotekniske institutt, Publikasjon nr. 101, Oslo, 12 s.
- Fjose A (2015): Nedbryting av sprøytebetong i E39 Hopstunnelen og Nesttuntunnelen. Masteroppgåve NTNU Trondheim, 244 sider.
- Franzén T, Garshol KF and Tomisawa N (2001): ITA/AITES Accredited Material. Sprayed concrete for final linings: ITA working group report. Tunnelling and Underground Space Technology 16, p 295-309.
- Grønhaug A (1995): Kartlegging av sprøytebetong i vegtunneler. Veglaboratoriet. Internrapport 1816, 23s.
- Grønhaug A (1996): Performance of shotcrete linings in road tunnels. In: N. Barton, R. Kompen, K.R. Berg (Eds.), 2nd International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Sprayed Concrete for Underground Support, Gol, Norway, pp 345-358.
- Grønhaug A og Hagelia P (2000): Alunskifer kan skade sulfatresistent betong. Betongindustrien Nr 3, 8-9.
- Gulland J (2015): Sprøytebetong testet med destruktiv og ikke-destruktiv metode. Masteroppgåve NTNU Trondheim, 138 sider.
- Hagelia P (1992): Semi-quantitative estimation of water shielding requirements for subsea road tunnels using geological and hydrological data. Statens vegvesen.Veglaboratoriet. Internrapport 1569, 35s.
- Hagelia P (1994): Semi-quantitative estimation of water shielding requirements and optimisation of rock cover for subsea road tunnels. In M.E. Abdel-Salam (Ed.), Tunnelling and Ground Conditions, Cairo, Egypt, p 485-492.
- Hagelia P and Grønhaug A (2000): Thaumasitt - infeksjon som fører til betongskader. Våre Veier Nr. 9, 54-55 (in Norwegian).
- Hagelia P, Sibbick RG, Crammond NJ, Grønhaug AG, Larsen CK (2001): Thaumasite and subsequent secondary calcite deposition in sprayed concrete in contact with sulfate bearing Alum Shale, Oslo, Norway. 8<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Athens, Greece, 131-138.
- Hagelia P, Sibbick RG, Crammond NJ, Larsen CK (2003): Thaumasite and secondary calcite in some Norwegian concretes. Cement and Concrete Composites, 25, 1131-1140.
- Hagelia P (2008a): Deterioration mechanisms and durability of sprayed concrete in

- Norwegian tunnels. In: K.Berg, C.Hauck, R.Kompen (Eds.), 5<sup>th</sup> International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Sprayed Concrete for Underground Support, Lillehammer, Norway, pp 180–197.
- Hagelia P (2008b): Does the EN 206–1 Exposure Classification Apply to Tunnel Concrete? In: E.V. Sørensen, D.H. Bager (Eds.), Nordic Exposure Sites – Input to revision of EN 206–1, Workshop Proceedings from a Nordic Miniseminar, Hirtshals, Denmark, pp 241–263.
- Hagelia P, Sibbick RG (2009): Thaumaside 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 (2011a): Sprayed concrete in aggressive subsea environment – the Oslofjord test site. In: T.Beck, O Woldmo, S Engen (Eds.), 6<sup>th</sup> International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Sprayed Concrete for Underground Support, Tromsø, Norway, pp 161–175.
- Hagelia P (2011b): Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Nederland. 205p and Appendices. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:d64b8ff8-8d68-4eea-a320-73148e9f1b15?collection=research>
- Hagelia P (2013): Interaction of abiotic and biochemical reactions and their role in concrete deterioration. *Concrete July/August 2013*, pp 49–51.
- Hagelia, P. (2016a): Oslofjord testfelt for sprøytebetong – etablering og fem års testresultat. *Etatsprogrammet Varige konstruksjonar 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr. 570*
- Hagelia, P. (2016b): Internt sulfatangrep i lettbetong med perlitt – Nestunnelen E16. *Etatsprogrammet Varige konstruksjonar 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr 582.*
- Hagelia, P. (2016c): Miljøbelastninger i vegtunneler – oppsummering. *Etatsprogrammet Varige konstruksjonar 2012–2015. Statens vegvesen rapport 577.*
- Hahn, T. (1978) Sprutbetongens vidhäftning mot olika bergtytor. *SveBeFo Bergmekanikdag 1978.*
- Hahn T, Holmgren J (1979): Adhesion of shotcrete to various types of rock surfaces and its influence on the strengthening function of shotcrete when applied on hard jointed rock, *Proceedings, 4th International Congress on Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics Montreux, Switzerland, 1979, Vol. 1, pp. 431–440.*
- Hansen BO (1996): Levetidsbetraktninger av sprøytebetong i undersjøiske tunneler (Flekkerøy). *Rapport frå temadag i Ålesund 12–14 august 1996, tema 3.3.*
- Hem LJ, Bruas L, Vik EA (2003): Naturlige tetteprosesser – Miljø- og samfunnstjenlige tunneler. *Statens vegvesen, Intern rapport nr. 2306.*
- Holm JV (2011a): Moderne vegtunneler – Freifjordtunnelen. *Sprøytebetong. Norconsult, Oppdragsnummer 5013053. 10 sider m/vedlegg frå SINTEF.*
- Holm JV (2011b): Moderne vegtunneler – Oslofjordtunnelen. *Sprøytebetong fra passeringstunnelen. Norconsult, Oppdragsnummer 5013053. 10 sider m/vedlegg fra SINTEF.*
- Holm JV (2011c): Moderne vegtunneler – Oslofjordtunnelen. *Sprøytebetong over fryseseonen. Norconsult, Oppdragsnummer 5013053. 10 sider m/vedlegg fra SINTEF.*
- Holm JV (2011d): Moderne vegtunneler – Ringnestunnelen. *Sprøytebetong. Norconsult, Oppdragsnummer 5013053. 6 sider m/vedlegg fra SINTEF.*



- Hoseini M, Bindiganavile V and Banthia (2009): The effects of mechanical stress on permeability of concrete: A review. *Cement and Concrete Composites* 31, 213–220.
- Hval O (2000): Sammenlikning av de ingeniørgeologiske klassifikasjonssystemene RMR, Q og RMI – erfaringer fra praktisk anvendelse i Tåsentunnelen og Svartdaltunnelen. Cand. Scient. oppgåve. Universitetet i Oslo, 230 sider.
- Karačić S, Hagelia P, Persson F and Wilén B–M (2016): Microbial Attack on Subsea Sprayed Concrete. RILEM–MCI seminar, TU–Delft Juni 2016, 13 sider. <http://demo.webdefy.com/rilem-new/wp-content/uploads/2016/10/c8f6d6950a6653e01c62471bb5efe1a2.pdf>
- Kompen R (2008): How the use of fibres has developed in Norway. In: K Berg, C Hauck, R Kompen (Eds.), 5<sup>th</sup> International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Lillehammer, pp. 245–249.
- Kveen AT, Pedersen KB (1990): Kartlegging av utførte tunnelsikringsarbeider på E18, Rv.9 og Rv. 457 i Vest–Agder. Veglaboratoriet. Internrapport 1432, 28 s med tunnelkart.
- Luke J (2012): Kartlegging av miljøbetingelser i tunneler. Helltunneln, Ekeberg tunnelen og Smestad tunnelen. Forprosjekt til Varige konstruksjoner. Nordconsult, Oppdragsnr. 5113881.
- Mannvit (2015a): Tilstandskontroll sprøytebetong. Sløverfjordtunnelen. Mannvit rapport MV–2015–007. 125 sider.
- Mannvit (2015b): Tilstandskontroll sprøytebetong. Frøyatunnelen. Mannvit rapport MV–2015–011. 117 sider
- Mannvit (2015c): Tilstandskontroll sprøytebetong. Gruatunnelen. Mannvit rapport MV–2015–012. 108 sider.
- Mannvit (2015d): Tilstandskontroll sprøytebetong. Svartdals og Ekeberg tunnelene. Mannvit rapport MV–2015–013. 410 sider
- Mannvit (2015e): Tilstandskontroll sprøytebetong. Baneheiatunnelen. Mannvit rapport MV–2015–014. 200 sider.
- Mannvit (2015f): Tilstandskontroll sprøytebetong. Flekkerøytunnelen. Mannvit rapport MV–2015–015. 226 sider.
- Morgan DR and Parker HW (Eds) (2006): Shotcrete for underground support X. 10<sup>th</sup> International Conference on Shotcrete for Underground Support. Whistler, BC, Canada. American Society of Civil Engineers, 382p.
- Moum J and Rosenqvist I Th (1959): Sulphate Attack on Concrete in the Oslo Region. *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings, Volume 56: 56–18, 8 pp.*
- Multiconsult AS (2011): Geologiske inspeksjon i tunneler. Ekeberg tunnelen. Rapport 118942–0–1, 7 sider & 5 vedlegg.
- Myren A and Bjøntegaard Ø (2014): Fiber reinforced sprayed concrete – mechanical properties and pore structure characteristics. 7<sup>th</sup> International Symposium on Sprayed Concrete, Sandefjord.
- NGI (2013): Bruk av Q–systemet. Bergmasseklassifisering og bergforsterkning. Håndbok.
- Noteby AS (1986): Undersøkelse av sprøytebetongen i Vardø tunnelen. Noteby Rapport 21336–Nr 1.
- Noteby AS (1996): Freifjordtunnelen, prøving av sprøytebetong. Noteby rapport 68196.
- Nærum G (1996): Erfaringer frå produksjons– og kvalitetssikringsrutiner (Byfjordtunnelen).

- Sprøytebetong i undersjøiske tunneler. Rapport frå temadager i Ålesund, 12–14 august 1996. Statens vegvesen – Vegdirektoratet – Driftsteknisk avdeling.
- Olsen AB (1985): Vardøtunnelen – en statusrapport. Vegdirektoratet, 25 sider & 5 vedlegg.
- Pøyry (2014): Ingeniørgeologisk inspeksjon Opera Ekebergstunnelen, 14 sider & 4 vedlegg.
- Romer M (2003): Detachment of shotcrete linings due to long term interaction with round water. International Seminar: The Thaumacite Form of Sulfate Attack, University of Sheffield.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996a): Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler. Hovedoppgave, NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996b): Fannefjordtunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996c): Byfjordtunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996d): Mastrafjordtunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996e): Freifjordtunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996f): Maursundtunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996g): Nappstraumetunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996h): Flekkerøyunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996i): Godøytunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996j): Valderøytunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Røhrsveen NG og Lygre JK (1996k): Ellingsøytunnelen. Delrapport for diplomoppgave med analyseresultater. NTNU, Trondheim.
- Selmer–Olsen R (1981): Betragtninger over store vannlekkasjer i dyptliggende tunneler. Fjellsprengningsteknikk – Bergmekanikk–Geoteknikk. Tapir, Trondheim.
- Sibbick RG and Crammond NJ (2003): The petrographical examination of popcorn calcite deposition (PCD) within concrete mortar, and its association with other forms of degradation. 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Trondheim, Norway.
- Skjølsvold O og Jensen V (1990): Undersøkelse av sprøytebetong fra undersjøiske vegtunneler. SINTEF–FCB, Rapport STF65 F90058, 81 sider.
- Statens vegvesen (1998): Statens vegvesen Hordaland. E39/Rv 580 Hop– Midtun, Tunnelen. Ingeniørgeologisk forundersøkelse. Noteby, 19. februar 1998.
- Statens vegvesen (2000): Sluttrapport for fastlandsforbindelsen Hitra – Frøya. 63 sider & vedlegg.
- Statens vegvesen (2004): Utbedringer i Oslofjordtunnelen. Sluttrapport for arbeider utført 2004. Statens vegvesen – Region Øst, prosjektkode 2633, Mai 2004.
- Statens vegvesen (2004b): Vurderinger av stabilitet og forslag til sikring i Oslofjordtunnelen. Rapport frå ekspertgruppe 27. januar 2004, 10 s.

- Statens vegvesen (2006): Vegkapital – Tunnel. Optimal drift- og vedlikeholdsinnsett.
- Statens vegvesen (2007): Nye bestemmelser, prosedyrer og tiltak vedrørende planlegging, prosjektering, bygging, drift og vedlikehold av vegtunneler. NA-Rundskriv 2007/03.
- Statens vegvesen (2008): Prosjekter 2007 – Geo- og tunnelseksjonen. Rapport nr 2504, s 11.
- Statens vegvesen (2016): FoU-programmet Varige konstruksjoner 2012–2015. Sluttrapport. Statens vegvesen rapport nr 606.
- Vesikari E (2009): Carbonation and Chloride Penetration in Concrete with Special Objective of Service Life Modelling by the Factor Approach. VTT Report VTT-R-04771-09, 38p.
- Wigum BJ (2016): Tilstandskontroll av sprøytebetong i sju tunneler. Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012–2015. Statens vegvesen rapport nr. 475.
- Woldmo O (2008): The history of wet mixed sprayed concrete from a Norwegian perspective. In: K Berg, C Hauck, R Kompen (Eds.), 5<sup>th</sup> International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support. Lillehammer, pp.343–346.

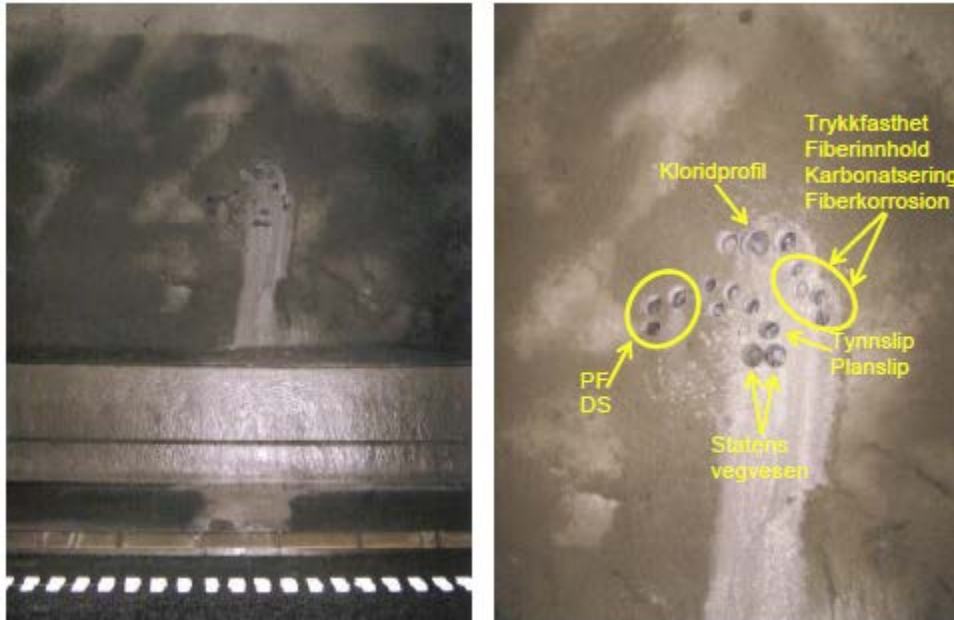
# Vedlegg 1 – Sprøytebetong i ferskvassmiljø

---

# Gruatunnelen

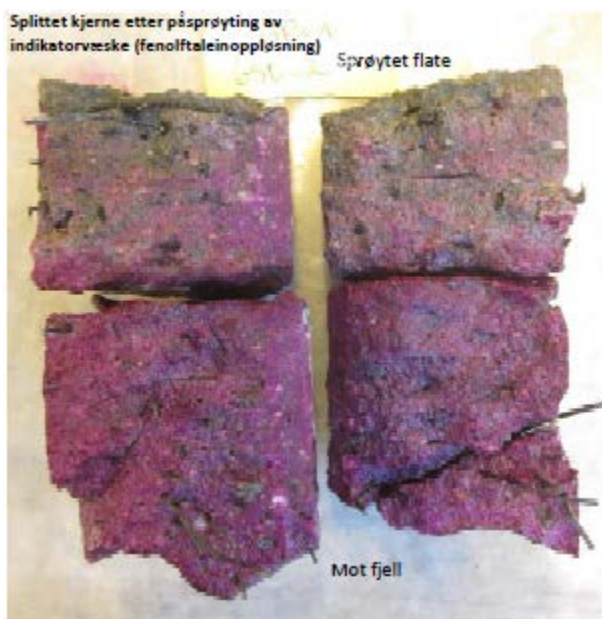
## Tunneldokumentasjon

Prøvestader i tunnelen og undersøkingar av kjerner. Utdrag frå Mannvit (2015c, Rapport MV-2015-012).

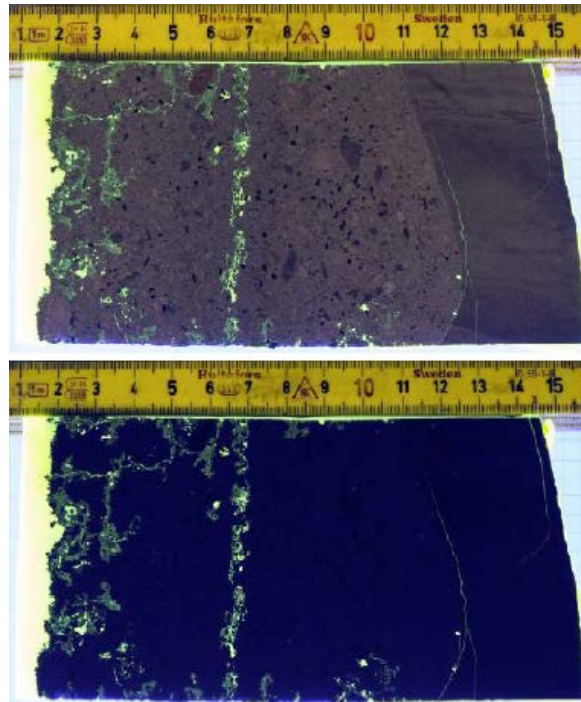


VI.1 Prøvestader ved pel 650. Bora ut i 2014. Betongalder 23 år. Foto: Mannvit.

## Eksempel frå utbora kjerner



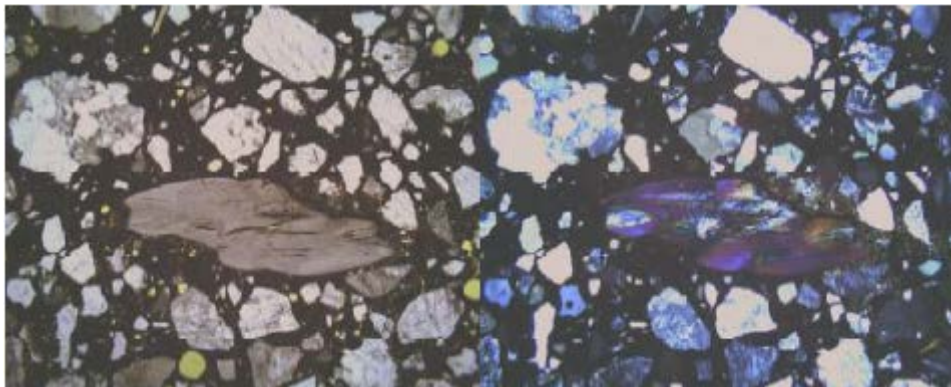
VI.2. Omkring 7 mm overflatekarbonatisering mot tunnelrommet i kjerne 650-2. Ikkje karbonatisering frå heftsona mot berg. Betongalder 23 år. Foto: Mannvit.



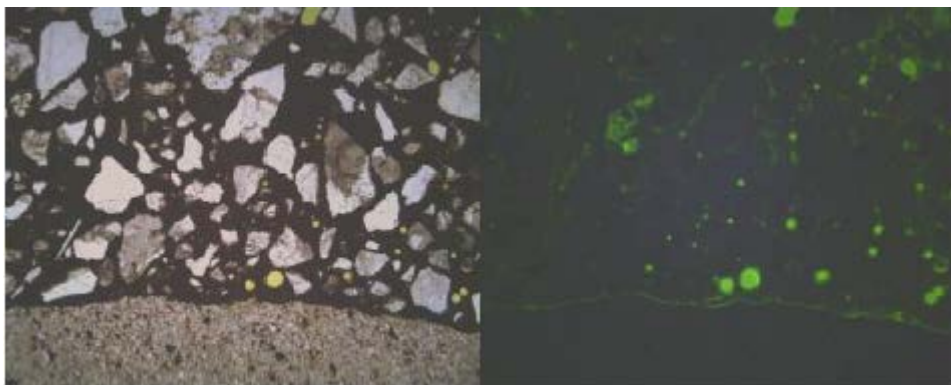
*VI.3 Kjerne 650-15 for plan og tynnslip. Øvste foto i vanleg lys, nedste foto i UV-lys. Betongalder 23 år. Foto: Mannvit.*

### **Eksempel frå mikroskopering av tynnslip**

Mannvit (2015c) rapporterte petrografi inklusive mikrokjemiske analysar.



*VI.4 Makro-PP fiber midt i bildet. Kjerne 650-15. Betongalder 23 år. Foto: Mannvit.*



*VI.5 Heftsona i kjerne 650-15 var litt svak. Betongen hadde god kvalitet. Betongalder 23 år. Foto: Mannvit.*

## Sprøytetongresept - Gruatunnelen

Unicon

### AS Betondeklaration

v. Side 1 d. 18-11-2009 kl.

10:49:04



Identifikation og klassifikation			
Fabrik	Hønefoss	Kontrollklasse	206
Receptidentifikation	55130A	Maksimal stenstr. (mm)	8
Version	36	Tilstræbt konsistens (mm)	220
Standard	NS-EN 206-1	Min. konsistens (mm)	160
Betontype	Egenskapsdefinert betong	Max.konsistens (mm)	260
Bestandighetsklasse	Bestandighetsklasse M45	Chloridindholdsklasser	cl 0,10
Styrkeklasse			
Eksponeeringsklasser	X0, XC1 - XC4, XD1, XS1, XF1, XA1 - XA2		

Delmaterialer			
Cementtype	Norcem Std FA CEM II/A-V 42,5R	Sand klasse	
Type I tilsætning		Sten klasse	
Type II tilsætning	Silika	Fibre	
Andre tilsætninger		Andet	
Tilsætningsstoffer	SP-stoff	Valgfrie materialer	Plastfibre for sprøytetong, Lang plastfibre, Makro pp, Englehår for brannsikring, Kort stålfibre, Pumpeforbedrer, Interncuring, SP-stoff

Betonsammensætning			
Forventelig værdi ved tilstræbt konsistens			
Flyveaske/cement forhold		Cementindhold, kg/m <sup>3</sup>	486
Mikrosilica/cement forhold	0,06	Ekvivalent sementinnh, kg/m <sup>3</sup>	514
Andre tilsætninger, % af C		Ækv. chloridindhold, % af C+FA+M	0,07
V/C-forhold	0,43	Ækv. alkaliindhold kg/m <sup>3</sup>	4,0
Luftindhold, vol-%	5,0		

Producent / dato

Sven Kirschhausen / 18-11-2009

Modtager / dato

### **Analyse av vatn frå Pel 1230 i Gruatunnelen.**

Det er generelt lagt vekt på analyse av vatn frå lekkasjar nær ved prøvetatt sprøytebetong. I dette tilfellet er vassprøva frå annan del av tunnelen på grunn av få lekkasjepunkt. Det er likevel grunn til å rekne vatnet frå pelnummer 1230 for representativt for Gruatunnelen.



## Certificate

1/2

Project: 1510001389/48

Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Søndre Meland  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO

Sample information:	Statens vegvesen Vegdirektoratet, Tunnel wash water, Kjemiske analyser av kontaminert vegv		
Reference:	pro.no: 603245 v/Bård Pedersen	Date of sampling:	
Place of sampling:	Grua tunnel st.1230	Date of arrival:	30.10.2014
		Research started	30.10.2014

## Water analyce

Analysis	14SL08018	Unit	Method
Pretreatment, filtration	ok		
pH	7,9		RA2000*
Metals 1 diss	ok		
Aluminium (Al), diss	<10	µg/l	RA3000*
Arsenic (As), diss	1,3	µg/l	RA3000*
Barium (Ba), diss	3,6	µg/l	RA3000*
Boron (B), diss	<20	µg/l	RA3000*
Mercury (Hg), diss	<0,020	µg/l	RA3000*
Phosphorus (P), diss	<100	µg/l	RA3000
Cadmium (Cd), diss	<0,030	µg/l	RA3000*
Potassium (K), diss	1800	µg/l	RA3000*
Calcium (Ca), diss	25000	µg/l	RA3000*
Cobalt (Co), diss	<0,50	µg/l	RA3000*
Chromium (Cr), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Copper (Cu), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Lead (Pb), diss	<0,50	µg/l	RA3000*
Magnesium (Mg), diss	810	µg/l	RA3000*
Manganese (Mn), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Molybdenum (Mo), diss	18	µg/l	RA3000*
Sodium (Na), diss	2400	µg/l	RA3000*
Nickel (Ni), diss	1,3	µg/l	RA3000*
Silicon (Si), diss	4300	µg/l	RA3000
Iron (Fe), diss	<10	µg/l	RA3000*
Sulfur (S), diss	3400	µg/l	RA3000
Zinc (Zn), diss	<5,0	µg/l	RA3000*
Strontium (Sr), diss.	60	µg/l	RA3000
Thorium (Th), diss.	<0,20	µg/l	RA3000
Uranium (U), diss	1,9	µg/l	RA3000*
Vanadium (V), diss	<1,0	µg/l	RA3000*

The results apply solely to the samples analyzed. The certificate may only be copied as whole.

Ramboll Analytics  
Niemenkatu 73, FI-15140 Lahti  
Kiltterinkuja 2, FI-01600 Vantaa

Tel +358 20 755 611  
Business ID 0101197-5

www.ramboll-analytics.fi  
Domicile Espoo



\* Method is accredited by the FINAS. Uncertainty of measurement is reported if requested.

**Ramboll Analytics**



Ilpo Lahdelma  
M.Sc., Chemist, +358 40 074 5295

The certificate has been accepted electronically.

**More info** The amount of solid material after filtration was too low for laboratory analyses.

**Delivery** per.hagelia@vegvesen.no

**Trykkstyrke, fiberinnhold, porøsitet, PF, D/S, m.m.**

Dokumentert av Mannvit (2015c).

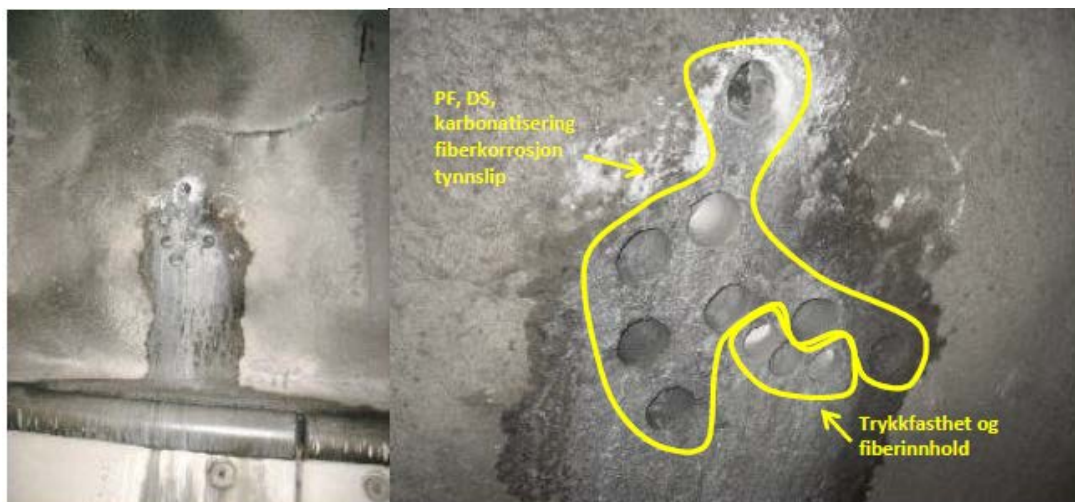
# Baneheiatunnelen

## Tunneldokumentasjon

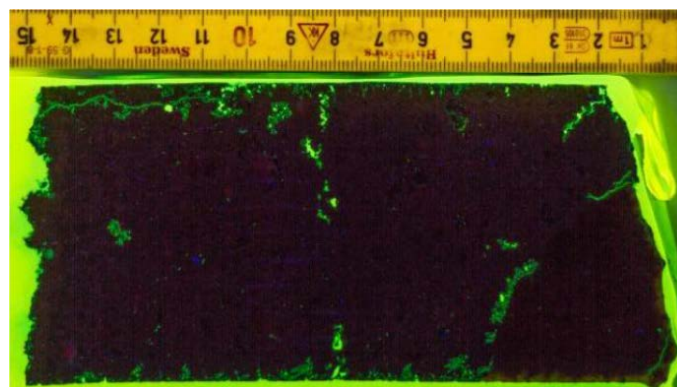
Prøvestader i tunnelen og undersøkingar av kjerner. Utdrag frå Mannvit rapport MV-2015-014 (Mannvit 2015e).



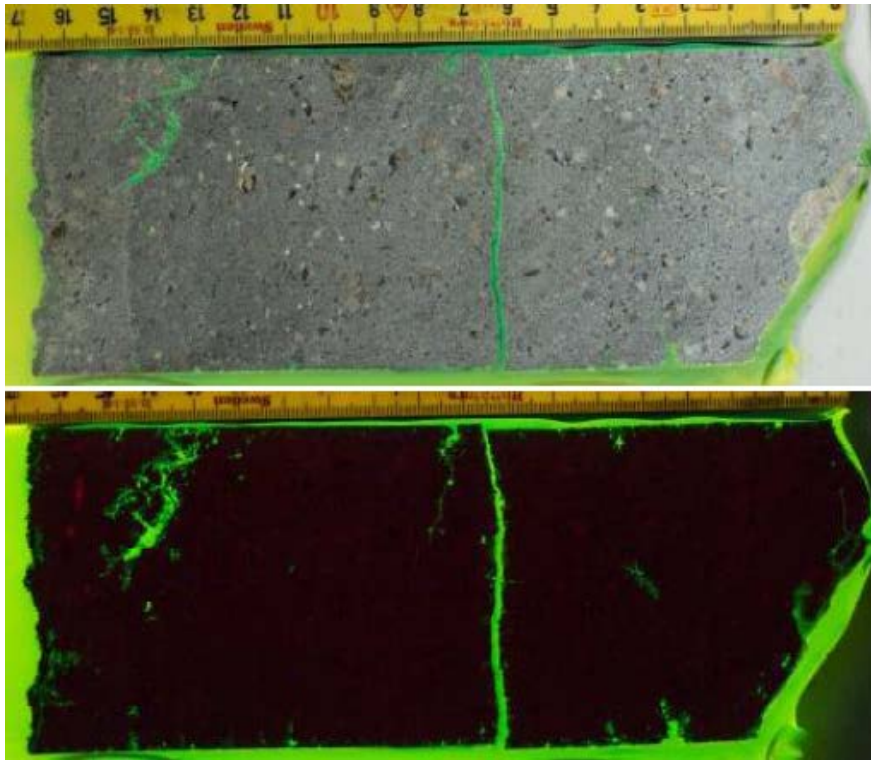
VI.6. 405 høgre. Bora ut frå lift i krakalert område 4,5-5 m over vegbanen i 2014. Betongalder 14 år. Foto: Mannvit.



VI.7. 590 venstre. Bora ut frå lift i område 4,5-5 m over vegbanen i 2014. Foto: Mannvit.



VI.8. Pelnummer 405 venstre side. Kjerne 405-5. Fluorescens-impregnerert planslip i UV-lys. Betongalder 14 år. Foto: Mannvit.

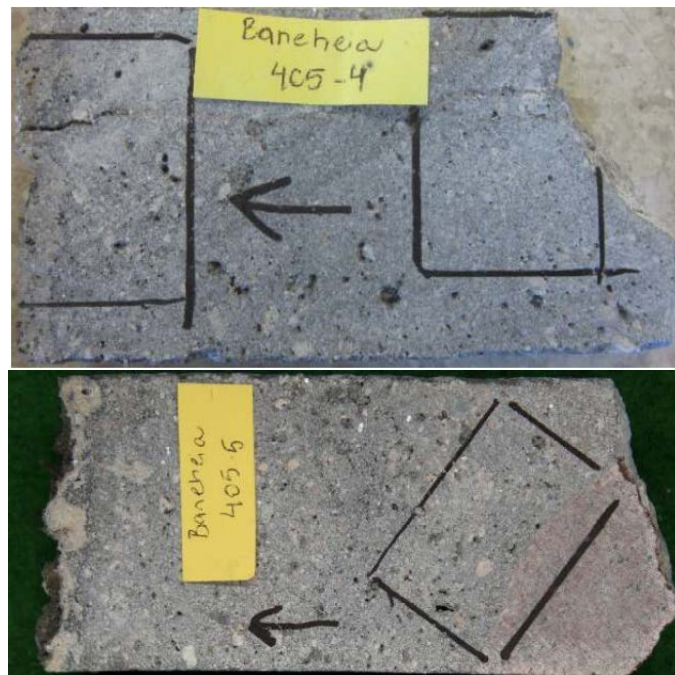


VI.9. Pelnummer 590 venstre side. Kjerne 590-11. Fluorescensimpregnert planslip i vanleg lys og UV-lys (nedst). Betongalder 14 år. Foto: Mannvit.

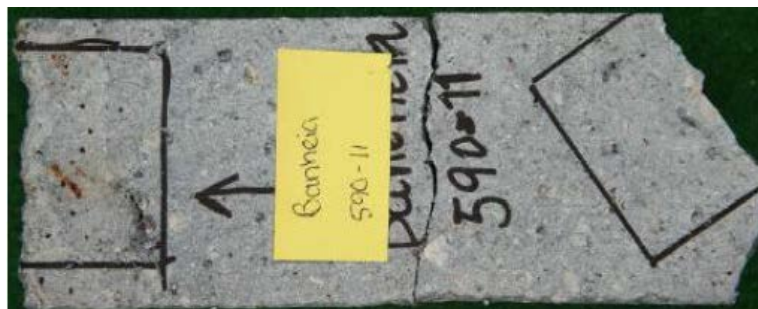


VI.10. Pelnummer 405 høgre. Kjerne 405-8. Overflatekarbonatisering inn til 5 mm samt lokalt på riss inn frå overflata. Ikkje karbonatisering frå heftsona mot bergmassen. Betongalder 14 år. Foto: Mannvit.

## Sprøytebetongkjerne med plassering av tynnslip - Baneheia

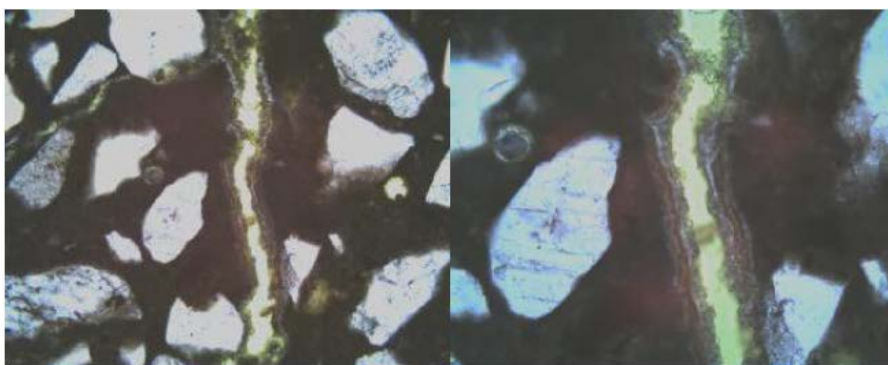


VI.11. Pel 405 høyre side. Plassering av tynnslip i kjerne 405-4 og kjerne 405-5. Foto: Mannvit.

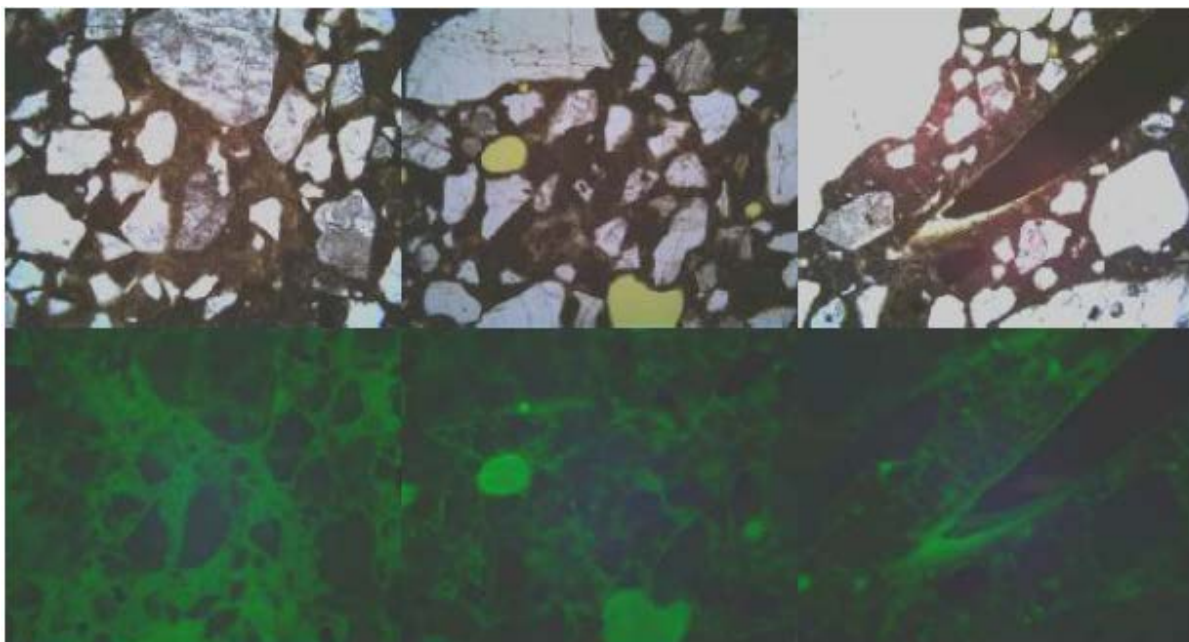


VI.12. Pelnummer 590 venstre side. Kjerne 590-11 med plassering av tynnslip. Betongalder 14 år. Foto: Mannvit.

### Eksempel frå mikroskopering av tynnslip



VI.13. Kjerne 405-4: utsnitt av krakelringssprekk med utfelling av kalsiumkarbonat. Sementpastaen er intakt. Betongalder 14 år. Foto: Mannvit.



VI.14. Pelnummer 590 venstre side. Kjerne 590-11 i polarisert lys (øvre rad) og UV-lys (nedre rad). Det er litt variabelt vatn/bindemiddel innhald; litt høgt i venstre bilde. Stålfiber (høgre) viser ikkje teikn til korrosjon. Betongalder 14 år. Foto: Mannvit.

Mannvit (2015e) rapporterte petrografi inklusive mikrokjemiske analysar.

### **Sprøytebetongresept – Baneheiatunnelen**

Det har ikkje lykkast å finne den originale resepten. Hovudtrekka av resepten er oppgitt i Tabell 4.4 og bygger på samtale med Egil Tveide våren 2017. Tveide var byggeleiar for Baneheiatunnelen.

### **Analysar av vatn**

Baneheiatunnelen er stort sett tørr og det var vanskeleg å finne lekkasjar for prøvetaking. Tunnelen ligg rett under to tjern (Stampene) med liten bergoverdekning. Godt utført forinjeksjon resulterte i ein tett tunnel.

### **Trykkstyrke, fiberinnhald, porøsitet, PF, D/S, m.m.**

Dokumentert av Mannvit rapport MV-2015-014 (Mannvit (2015e)).

# Nesttunnelen

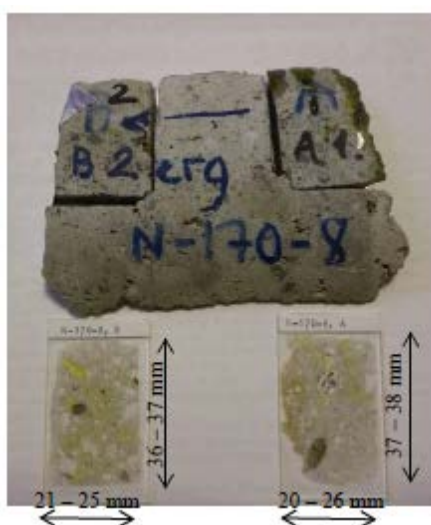
## Tunneldokumentasjon

Prøvestader i tunnelen og undersøkingar av kjerner. Utdrag frå masteroppgåva til Arnhild Fjose (2015).



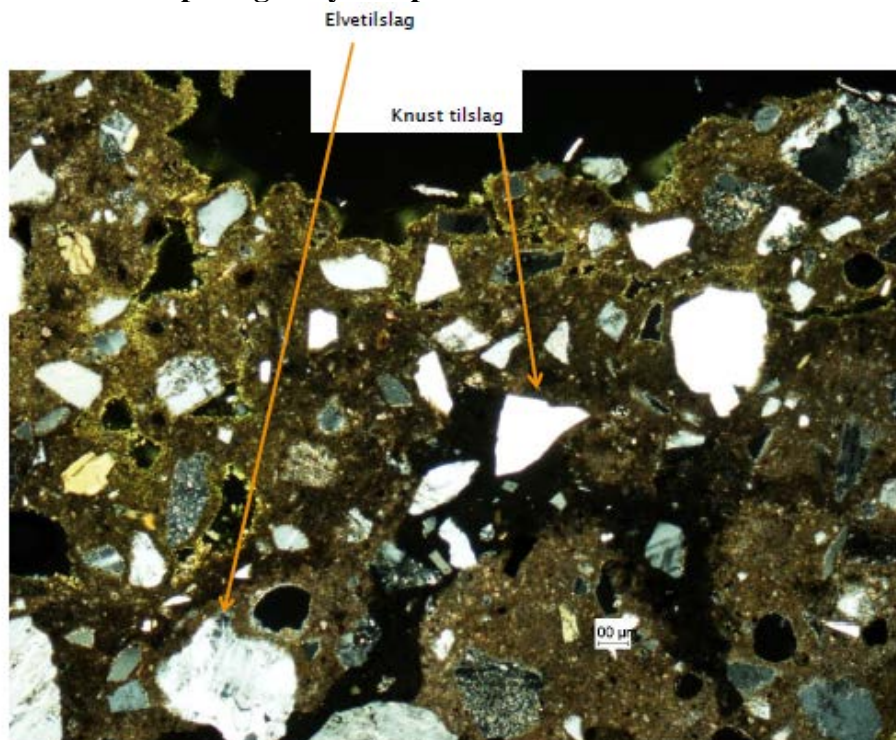
VI.15. Prøvestader ved pel 170. Bora ut i 2014. Betongalder 13 år. Foto: Arnhild Fjose.

## Sprøytebetongkjerne med plassering av tynnslip

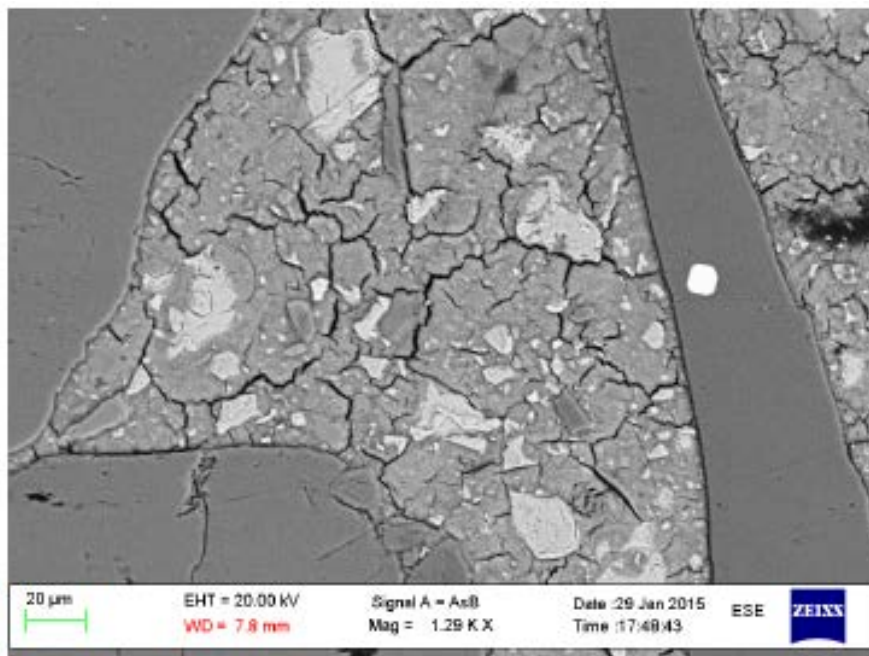


VI.16. Kjerne N-170-8 med tynnslip plassert mot berg (venstre) og overflata (høgre). Betongalder 13 år. Foto: Arnhild Fjose.

## Eksempel frå mikroskopering av tynnslip



VI.17. Overflatekarbonatisering (brune område) lokalt inntil 3 mm, vanlegvis 1-1,5 mm. Tynnslip N-170-8. Dobbeltpolarisert lys. Betongalder 13 år. Foto: Arnhild Fjose.



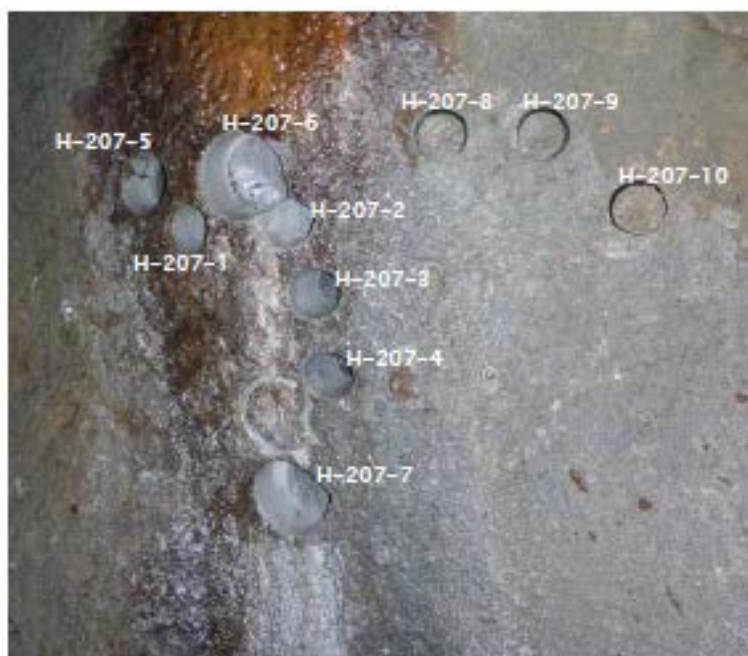
VI.18. Mange mikroriss i sementpastaen i N-170-8. Typisk for mikrorissklasse = 3 brukt i Varige konstruksjonar. Scanning elektronmikroskop (SEM). Betongalder 13 år. Foto: Universitetet i Bergen.



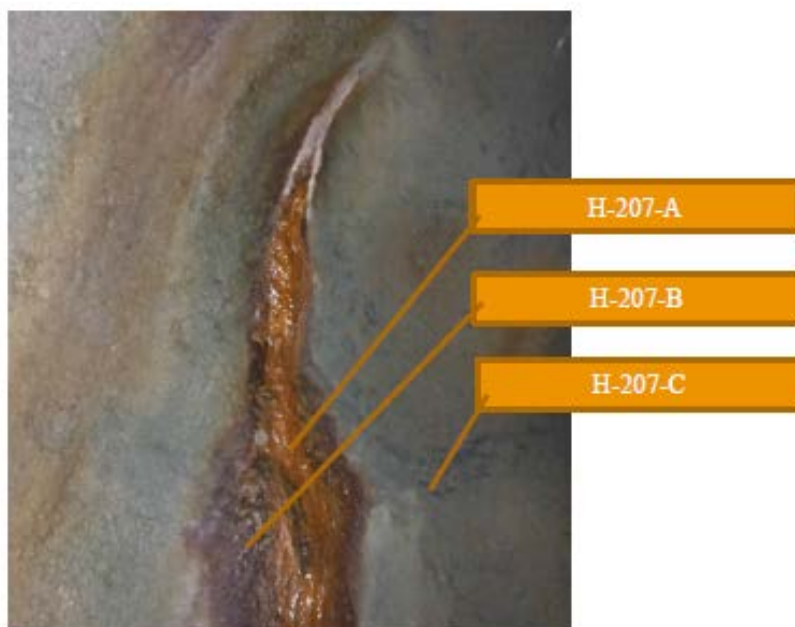
# Hopstunnelen

## Tunneldokumentasjon

Prøvestader i tunnelen og undersøkingar kjerner og biofilm. Utdrag av masteroppgåva til Arnhild Fjose (2015).

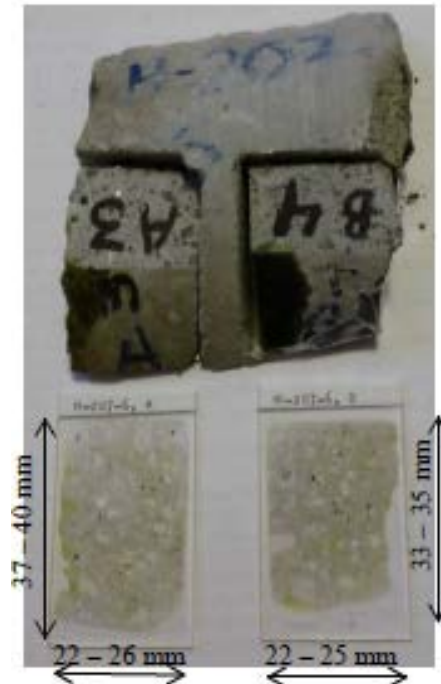


VI.19. Prøvestader ved Pel 207. Bora ut i 2014. Betongalder 13 år. Foto: Arnhild Fjose.



VI.20. Prøver av jernrik biofilm ved Pel 207. Bakteriebelegget hadde ikkje ført til djup nedbryting slik vi har observert i nokre undersjøiske tunnelar. Betongalder 13 år. Foto: Arnhild Fjose.

## Sprøytebetongkjerne med plassering av tynnslip



VI.21. Kjerne H-207-6 med tynnslip plassert mot berg (høgre) og overflata (venstre). Betongalder 13 år. Foto: Arnhild Fjose.

## Eksempel frå mikroskopering av tynnslip

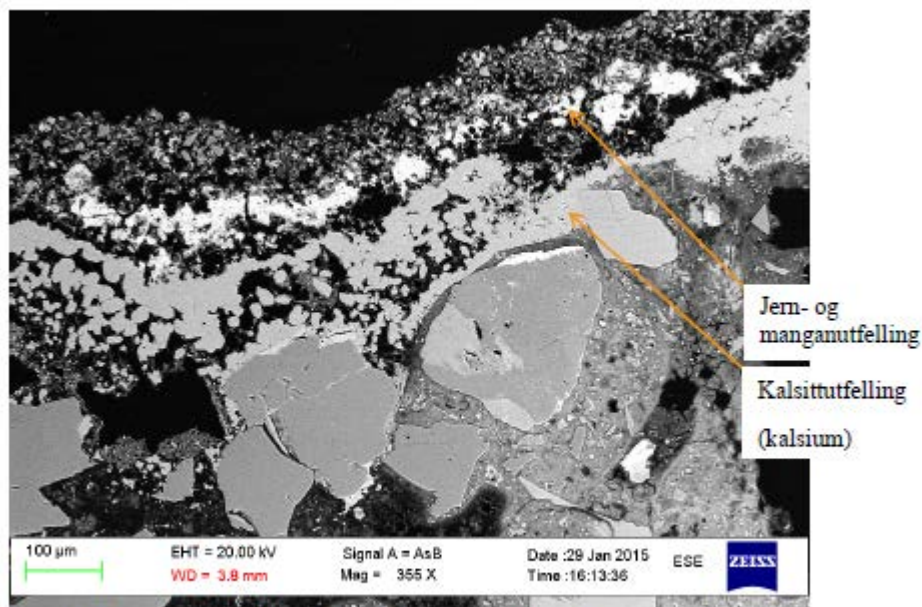
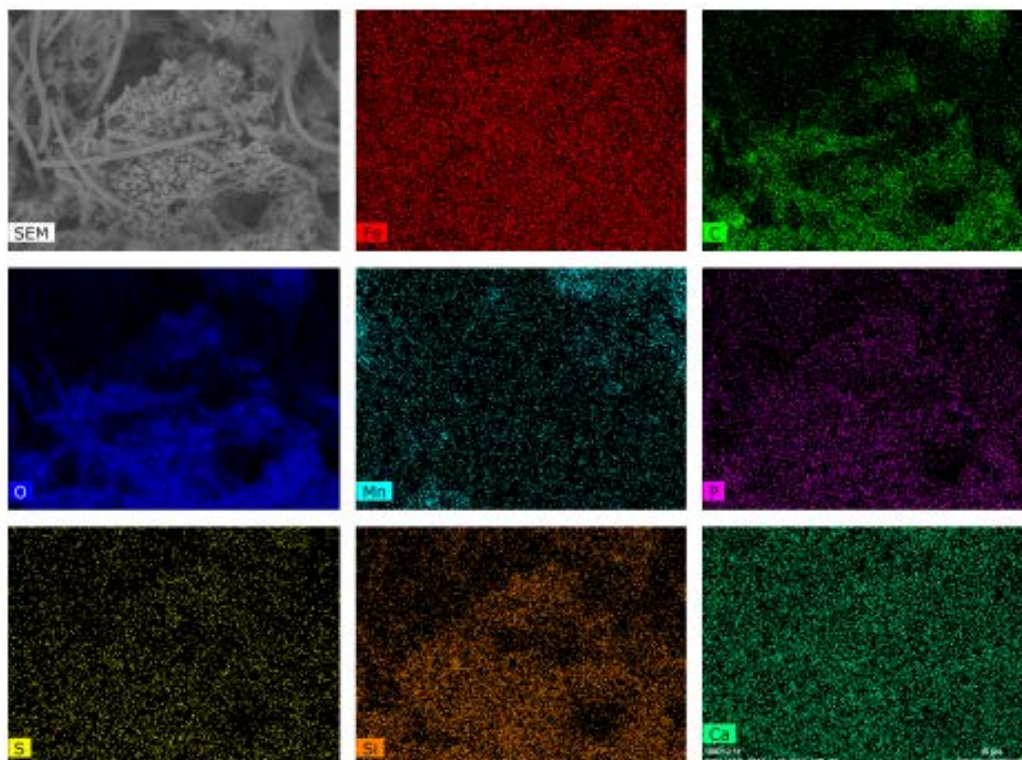
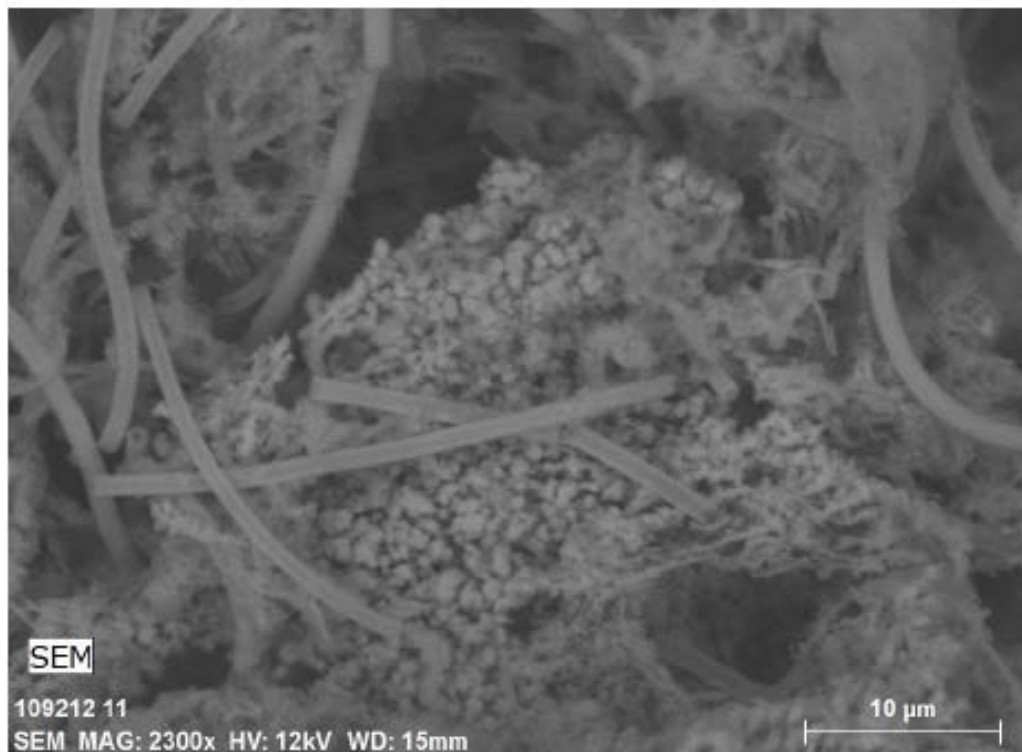


Foto 6.22 Rand med utfelling på overflata til prøve H-207-6-A.

VI.22. Tynn utfelling av jern og mangan frå biofilm; Pel 207. Scanning elektronmikroskop (SEM). Sementpastaen innanfor utfellinga er heilt intakt (høgre nede), men er litt utluta i eitt mindre område (venstre nede). Det var generelt veldig lite karbonatisering i Hopstunnelen. Betongalder 13 år. Foto: Universitetet i Bergen.

### H-207-A Mapping av overflatemateriale



VI.23. Fordeling av element i biofilm. Hylsebakteriar på finkorna utfelling av silisiumoksid i biofilmen ved Pel 207. Heile området er rikt på jernoksyhydroksid eller jernhydroksid med innslag av mangan og organisk karbon og fosfor. Foto: Harald Foldvik, Naturhistorisk Museum, Universitetet i Oslo.

## Sprøytebetongresept - Nesttuntunnelen og Hopstunnelen (Fjose 2015)

Fjose (2015) peikar på problemet med at sentral dokumentasjon av byggverka ofte forsvinner. Det er avgjerande å kjenne til reseptar for å trekke ut kunnskap om tilstandsutviklinga over lang tid. Telefonsamtalar med pensjonerte ingeniørar er ofte einaste alternativet.

Notat frå samtalar desember14/ januar15 med Arne Snemyr, frå Snemyr og Limm. 2014.

18.12.2014:

Telefonsamtale med Reidar Steinesto – anleggsleiar på Hop – og Nesttuntunnelane.

Hugsa ikkje noko spesielt om sprøytebetongen, men meinte det var Snemyr og Limm som leverte den.

Telefonsamtale med Arne Snemyr – 951 23 991:

Meinte å hugse at fiber vart underkjend pga. stålkvalitet og at dei dermed endra til bølgefiberet (truleg ein forløpar til Dramixfiber, levert av Bekaert, Belgia). Det fyrste fiberet som blei levert var truleg eit Dramix-fiber, men dette var før det var krav til stålet i fiberen og klassifisering av sprøytebetongen.

Betongen var fyrst levert av Bergen betong, men pga. at dei ikkje leverte dokumentasjon på betongkvaliteten endra dei til Norbetong. Antok at Bergen betong leverte kanskje den fyrste mnd. med drift? Snemyr og Limm blei trua med rettsak ved oppseiing av kontrakta med Bergen betong, men dette blei ingenting av sidan kvalitetsdokumentasjonen var klart manglande. Ringer Arne Snemyr på nytt når han har leita litt etter resept på betongen.

16.01.2015 Tlf. Arne Snemyr:

Har ikkje resepten lagra men fekk den etter slik han hugsar den:

B35-M45

400 kg sement

20 kg silika

3,5 kg dynamo (plastiserande eller superplastiserande stoff)

1500 kg sand

1 kg SD-2000 (stoff som sikrar oppetid på ca. 4 timar og som blir drept av akselleratoren)

35 l AF-2000 (alkaliefri akselerator)

vann

Tilsette og 25kg stålfiber – Dramix

Blanda på v/c-tal 0,42 og tok då høgde for sprutveske.

# Analyse av vatn frå Pel 149 i Nesttunnelen og Pel 207 i Hopstunnelen (Fjose 2015).

Ramboll Analytics

Date: 6.10.2014

**RAMBOLL**

## Certificate

1/2

Project: 1510001389/34

Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Søndre Meland  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO

Sample information: Statens vegvesen Vegdirektoratet, Kjemiske analyser av kontaminert vegvann, sedimenter og

Date of sampling:

Date of arrival: 17.9.2014

Sampling by:

Research started: 17.9.2014

### Water analyce

			Unit	Method
Sampling point	Nesttunt 149	Hopst 207		
Sample ID	14SL 06516	14SL 06517		
<b>ANALYSIS</b>				
Pretreatment, filtration	ok	ok		
Turbidity	0,28	<0,20	NTU	RA2024*
pH	8,1	8,1		RA2000*
Alkalinity	2,6	3,5	mmol/l	RA2001*
Dissolved Organic Carbon (DOC)	2,4	4,8	mg/l	RA2007*
Chloride (Cl)	35	15	mg/l	RA2018*
Fluoride (F)	0,15	<0,10	mg/l	RA2050
Sulphate (SO4)	10	6,5	mg/l	RA2018*
Nitrate (NO3)	1,8	2,4	mg/l	RA2018*
Ammonium (NH4)	<0,0060	<0,0060	mg/l	RA2046*
Metals 1 diss	ok	ok		
Aluminium (Al), diss	54	<10	µg/l	RA3000*
Arsenic (As), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*
Barium (Ba), diss	8,1	48	µg/l	RA3000*
Boron (B), diss	48	30	µg/l	RA3000*
Mercury (Hg), diss	0,22	0,17	µg/l	RA3000*
Phosphorus (P), diss	<100	<100	µg/l	RA3000
Cadmium (Cd), diss	<0,030	<0,030	µg/l	RA3000*
Potassium (K), diss	12000	7400	µg/l	RA3000*
Calcium (Ca), diss	8300	58000	µg/l	RA3000*
Cobalt (Co), diss	<0,50	<0,50	µg/l	RA3000*
Chromium (Cr), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*
Copper (Cu), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*
Lead (Pb), diss	<0,50	<0,50	µg/l	RA3000*
Magnesium (Mg), diss	1300	5500	µg/l	RA3000*
Manganese (Mn), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*
Molybdenum (Mo), diss	1,9	<1,0	µg/l	RA3000*
Sodium (Na), diss	67000	9700	µg/l	RA3000*
Nickel (Ni), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*
Silicon (Si), diss	4500	6100	µg/l	RA3000
Iron (Fe), diss	<10	<10	µg/l	RA3000*
Sulfur (S), diss	4600	3400	µg/l	RA3000
Zinc (Zn), diss	<5,0	<5,0	µg/l	RA3000*

The results apply solely to the samples analyzed. The certificate may only be copied as whole.

Ramboll Analytics  
Niemenkatu 73, FI-15140 Lahti  
Killerinkuja 2, FI-01600 Vantaa

Tel +358 20 755 611  
Business ID 0101197-5  
www.ramboll-analytics.fi  
Domicile Espoo

**FINAS**  
13  
Accreditation Service  
1008 (EN ISO/IEC 17025)

## Certificate

2/2

Project: 1510001389/34

	14SL 06516	14SL 06517	Unit	Method
Strontium (Sr), diss.	45	160	µg/l	RA3000
Thorium (Th), diss.	<0,20	<0,20	µg/l	RA3000
Uranium (U), diss	0,48	<0,10	µg/l	RA3000*
Vanadium (V), diss	8,5	<1,0	µg/l	RA3000*

\* Method is accredited by the FINAS. Uncertainty of measurement is reported if requested.

## Ramboll Analytics



Ilpo Lahdelma  
M.Sc., Chemist, +358 40 074 5295

The certificate has been accepted electronically.

**More info** Turbidity was analyzed after 0,45 µm filtration.

**Delivery** per.hagelia@vegvesen.no

**Trykkstyrke, fiberinnhold, porøsitet, PF, D/S – Nesttuntunnelen og Hopstunnelen**

Dokumentert i masteroppgåva (Fjose 2015).

# Flekkerøytunnelen – ferskvassoner under land

## Tunneldokumentasjon

Det blei bora ut ei enkelt kjerne i 2003. Ferskvassonene i Flekkerøytunnelen var relativt tørre. Dette er også dokumentert av Kveen og Pedersen (1990). Tunnelen er tidlegare undersøkt innan programmet Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler (Røhrsveen og Lygre 1996, Davik 1997b). Undersøkingane av Mannvit (2014f) i samband med Varige konstruksjonar omfatta ikkje sprøytebetong i ferskvassonene.



VI.24. Lokalisering av kjerne 2142 i lys og opprinneleg tørr betong med tydeleg ytre karbonatisering. Bora ut i 2003. Betongalder 15 år. Foto: Dag Øystein Løyning, Mesta.

## Sprøytebetongresept - Flekkerøytunnelen

Hansen (1996) og Davik (1997b) oppgir følgjande:

C45:

Sement RP 38: 420 kg/m<sup>3</sup>

Silikaslurry: 80 kg/m<sup>3</sup>

Sand: 1500 kg/m<sup>3</sup>

Vanntilsetning: 150 kg/m<sup>3</sup>

Stålfiber: 50 kg/m<sup>3</sup>

P-stoff: 5,8 kg/m<sup>3</sup>

14 % mikrosilika.

## Analysar av vatn.

Det er ikkje utført kjemisk analyse av ferskvatn i Flekkerøytunnelen.

## Trykkstyrke, fiberinnhald, porøsitet, PF, D/S, m.m.

Tilstanden i 1996 er dokumentert av Røhrsveen og Lygre (1996) og Davik (1997).

# Freifjordtunnelen – ferskvassoner under land

## Tunneldokumentasjon

Det blei bora ut ei kjerneprøve frå ferskvassona i 2003. Rapport LH03062 frå Statens vegvesen Region midt gir fotodokumentasjon av dette området saman med dokumentasjon av alle prøvelokalitetane i undersjøiske delstrekningar. Rapporten ligg i Vedlegg 4.

Sprøytebetong blei kartlagt i 1996 med registreringar av vatn og utfellingar (Røhrsveen og Lygre 1996, Davik 1997), men det ligg ikkje føre andre undersøkingar frå ferskvassonene. Undersøkingar i 2009 (Holm 2011a) omfatta bare sprøytebetong i saltvassonene.

## Sprøytebetongkjerne med plassering av tynnslip



VI.25. Kjerne 3132 (frå same pelnummer) med tynnslipområder. Bora ut i 2003. Karbonatiseringsdjup i kontakt med tunnelluft er 15 mm. Heftsona mot berg er god, utan omvandling og utfellingar. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia.

## Tynnslipobservasjonar

Summert i Tabell 4.6

## Sprøytebetongresept - Freifjordtunnelen -Strømme (1996) og Davik (1997b)

C45:	
Sement RP 38:	500 kg/m <sup>3</sup>
Silika:	30-40 kg/m <sup>3</sup>
Sand:	1475 kg/m <sup>3</sup>
Stålfiber:	50-70 kg/m <sup>3</sup>
P-stoff:	3 liter
R-stoff:	12 liter
Vannglass:	26 liter



## Analysar av vatn frå ferskvassona i Freifjordtunnelen

Det er generelt lagt vekt på analyse av vatn frå lekkasjar nær ved prøvetatt sprøytebetong. For tidlegare publiserte analysar viser ein til originalrapportane (Tabell V1.1). Vassprøvene er samla inn i same området som betongprøvene.

Tabell V1.1 Referanse til publiserte analysar av ferskt lekkasjevatn.

Pelnummer	Samla inn	Referanse:
3135	2003	Hagelia (2011b)
3155	1996	Røhrsveen og Lygre (1996), Davik (1997b)

### Trykkstyrke, fiberinnhald, porøsitet, PF, D/S, m.m.

Ikkje utført på betong frå ferskvassonene.

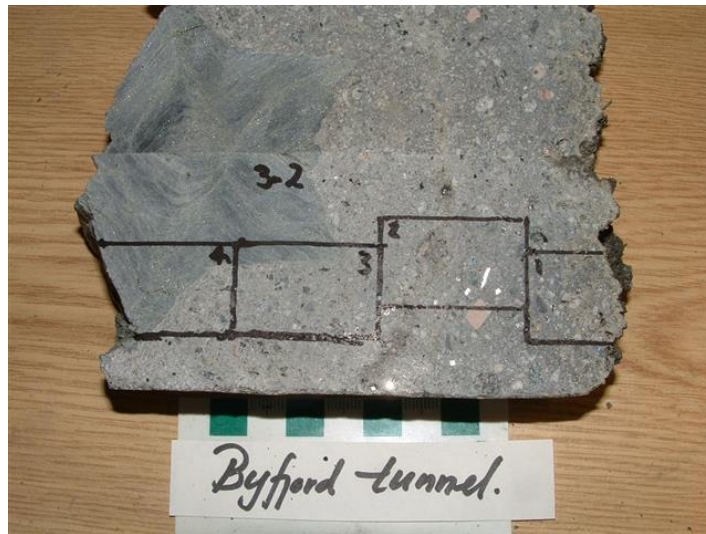
## Byfjordtunnelen – ferskvassona under land

### Tunneldokumentasjon



V.1.26. Lokalisering av kjernene 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 og 3, 5 (høgre) ved pelnummer 4410 frå lys og opprinneleg tørr betong med tydeleg ytre karbonatisering. Bora ut i 2004. Betongalder 13 år. Prøvene 3-1, 3-4 og 3-5 blei brukt til trykkprøving; 3-2 og 3-3 for strukturanalyse med tynnslip. Prøvepunktta oppe til venstre representerer kjerner bora ut i 1996, og undersøkte i etatsprogrammet «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar» (Røhrsveen og Lygre 1996, Davik 1997b). Foto: Per Hagelia.

## Sprøytebetongkjerne med plassering av tynnslip



VI.27. Kjerne 3-2 frå pelnummer 4410 med tynnslipområder. Bora ut i 2004. Svært god heft mot berg (venstre side) utan nedbryting og utfellingar. Karbonatiseringsdjup i kontakt med tunnelluft er 15 mm med litt marginal fiberkorrosjon. Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia..



VI.28. Kjerne 3-3 frå pelnummer 4410 med tynnslipområder. Bora ut i 2004. Svært god heft utan omvandling og utfellingar. Karbonatiseringsdjup i kontakt med tunnelluft er på 20 mm med litt marginal fiberkorrosjon. Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia..

## Sprøytebetongresept – Byfjordtunnelen (Nærum 1996, Davik 1997b)

C45 Anvendt resept for stort sett all sprøytebetong.

Sement RP 38:	475 kg/m <sup>3</sup>
Silika:	5 kg/m <sup>3</sup>
Tilslag:	1585 kg/m <sup>3</sup>
Vatn:	200 kg/m <sup>3</sup>
Stålfiber:	55 kg/m <sup>3</sup> (EE-fiber)
SP:	20-25 liter Rescon Sprut/Betokem Quick
P-stoff:	3 liter Rescon P og Rescon HP etter behov

## **Analysar av vatn frå ferskvassona i Byfjordtunnelen**

For tidlegare publiserte analysar viser ein til originalrapportane (Tabell V1.2).

*Tabell V1.2 Referanse til publiserte analysar av ferskt lekkasjevatt.*

Pelnummer	Samla inn	Referanse:
4330	1996	Røhrsveen og Lygre (1996), Davik (1997b)
4400	2004	Hagelia (2011b)

### **Trykkstyrke, fiberinnhald, porøsitet, PF, D/S, m.m.**

Tilstanden på pel 4410 i 1996 er dokumentert av Røhrsveen og Lygre (1996) og Davik (1997b). Det blei også utført trykkprøving av kjerner frå pel 4410 i 2004 (sjå Vedlegg 5 saman med andre resultat).

# Oslofjordtunnelen – ferskvassona under land

## Tunneldokumentasjon

Prøvestader ved Pel 15410 nær strandsona og undersøkingar av kjerner. Utdrag frå Norconsults rapport 5012043 (Holm 2011b). Det blei ikkje laga plan og tynnslip av denne betongen.



VI.29. Utboring av sprøytebetongkjerner frå bergsikringa i 2009 (pil). Betongalder 10 år. Foto: Jan Viggo Holm, Norconsult.



VI.30. Overflatekarbonatisering inntil omkring 12 mm. Betongalder 10 år. Foto: SINTEF.

## Sprøytebetongresept – Oslofjordtunnelen

Det lykkast ikkje å finne originalreseptar. Trond Lorentzen var involvert under bygging av tunnelen og rapporterte reseptar i ein e-post. Vi legg til grunn at resepten som blei brukt dei første 1-2 åra gjeld for ferskvassonene.

### Hagelia Per

---

**Fra:** Lorentzen Trond  
**Sendt:** 6. mars 2017 13:09  
**Til:** Hagelia Per  
**Emne:** Resept Oslofjordtunnelen

Hei Per!

Sprøytebetong resepten som ble brukt til Oslofjordtunnelen var litt todelt ettersom hvor langt uti prosjektet man var kommet.

De første 1-2 åra ble det brukt:

Standard sement 470 kg  
22 kg silica  
Scancem tilsetningsstoff (husker ikke akkurat type, men antar at også P-stoff ble brukt i tillegg til SP og akselator)  
Tilslag 0/8 mm ca. 1640 kg  
Masseforhold 0,42

Resten av tiden ble resepten endret til:

Standard sement / Industri sement totalt 470 kg hvor industri andelen var 30 %  
Scancem ble byttet ut til Sika, type sikament 92.  
Tilslag 0/8 mm ca. 1640 kg  
Masseforhold 0,42

Vannmengde må ha ligget rundt 215 liter / m3.....

Hvis du har prøver fra mer i senter av tunnelen tror jeg mest sannsynlig at det er den siste resepten som gjelder, med 30 % industri.

Industri var vel høy alkalisk (?) mener vi tok hensyn til det i regnskapet.

Jeg blandet noen lass fra et backupverk i 98-99, men det var Inge Olav Dalen som var produksjonssjef - han kan finne detaljer hvis du ønsker Per  
Han treffes på tlf. 909 60956, skulle hilse deg fra han også ☺

Hs Trond v/lab

## Analyse av vatn frå ferskvassona i Oslofjordtunnelen

Det er generelt lagt vekt på analyse av vatn frå lekkasjar nær ved prøvetatt sprøytebetong. Analyseresultatet som representerer pelnummer 15410 er gitt under. Prøva blei samla inn i 2009 frå ein rennande lekkasje i servicetunnel i eit område under land, som ligg like langt frå strandlinja som prøvelokaliteten for betong.

For tidlegare publiserte analysar av ferskt grunnvatn andre stader i Oslofjordtunnelen viser ein til originalrapportane (Tabell V1.3).

Tabell VI.3 Referanse til publiserte analysar av ferskt lekkasjevatn.

Pelnummer	Samla inn	Referanse:
15150 (SOS8)	2005	Hagelia (2011b)
20200 (B1)	2005	Hagelia (2011b)



Norsk  
Institutt  
for  
Vannforskning

Gaustadalléen 21  
0349 Oslo  
Tel: 22 18 51 00  
Fax: 22 18 52 00

## ANALYSE RAPPORT

Side nr.1/2



Navn **Statens Vegvesen**  
Adresse **Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO**

<b>Deres referanse:</b> Per Hagelia	<b>Vår referanse:</b> Rekv.nr. 2009-2378 O.nr. O 29016 08	<b>Dato</b> 01.12.2009
--	---	---------------------------

Prøvene ble levert ved NIVAs laboratorium av oppdragsgiver, og merket slik som gjengitt i tabellen nedenfor. Prøvene ble analysert med følgende resultater (analyseusikkerhet kan fås ved henvendelse til laboratoriet):

Prøvenr	Prøve merket	Prøvetakings- dato	Mottatt NIVA	Analyseperiode
1	Prøve 2 15410		2009.10.20	2009.10.21-2009.11.11

Analysevariabel	Enhet	Prøvenr		1
		Enhet	Metode	
Surhetsgrad	pH	A	1-4	8,08
Konduktivitet	mS/m	A	2-3	86,4
Alkalitet	mmol/l	C	1	2,805
Ammonium	µg N/l	C	4-3	<20
Nitrat	µg N/l	C	4-3	8
Klorid	mg/l	C	4-3	163
Sulfat	mg/l	C	4-3	19,7
Fluorid	µg/l	C	4-3	2450
Karbon, organisk	mg C/l	G	5-3	1,8
Aluminium	mg/l	E	9-5	<0,005
Arsen	mg/l	E	9-5	<0,02
Barium	mg/l	E	9-5	0,002
Kalsium	mg/l	E	9-5	41,7
Kadmium	mg/l	E	9-5	<0,001
Kobolt	mg/l	E	9-5	<0,002
Krom	mg/l	E	9-5	<0,002
Kobber	mg/l	E	9-5	<0,002
Jern	mg/l	E	9-5	0,0055
Kalium	mg/l	E	9-5	2,7
Magnesium	mg/l	E	9-5	12,0
Mangan	mg/l	E	9-5	0,0445
Molybden	mg/l	E	9-5	0,044
Natrium	mg/l	E	9-5	110
Fosfor	mg/l	E	9-5	<0,04
Bly	mg/l	E	9-5	<0,01
Svovel	mg/l	E	9-5	6,8
Silisium	mg/l	E	9-5	4,95
Strontium	mg/l	E	9-5	0,290
Vanadium	mg/l	E	9-5	<0,001
Sink	mg/l	E	9-5	0,002

### Kommentarer

1 Det.grense <20µg/l på NH4 pga prøvens matris.

Denne analyserapporten får kun kopieres i sin helhet og uten noen form for endringer. Analyseresultatet gjelder kun for den prøven som er testet.

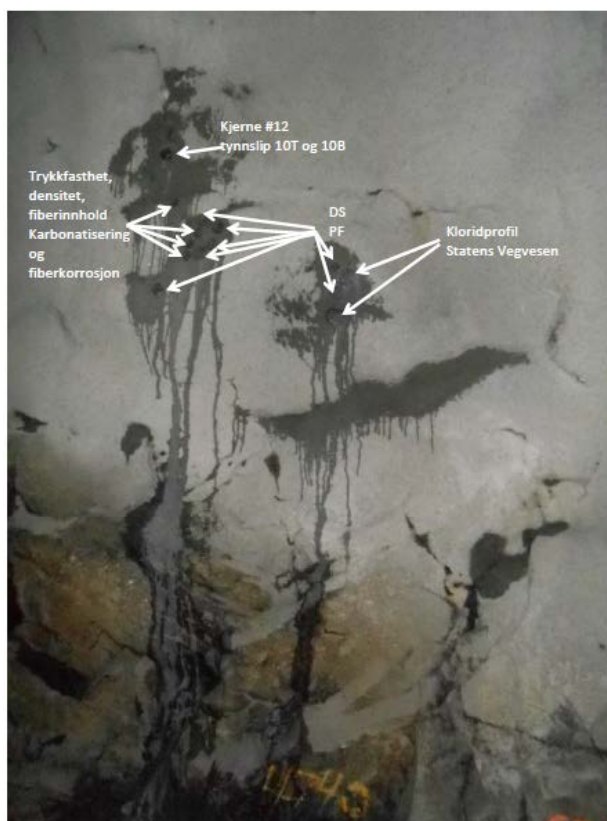
**Trykkstyrke, fiberinnhold, porøsitet, PF, D/S, m.m.**

Tilstanden på pelnummer 15410 i 2009 er dokumentert av Holm (2011b).

# Sløverfjordtunnelen – ferskvassone under land

## Tunneldokumentasjon

Prøvestader i tunnelen og undersøkingar av kjerner. Utdrag frå Mannvit rapport MV-2015-007 (Mannvit 2015a).

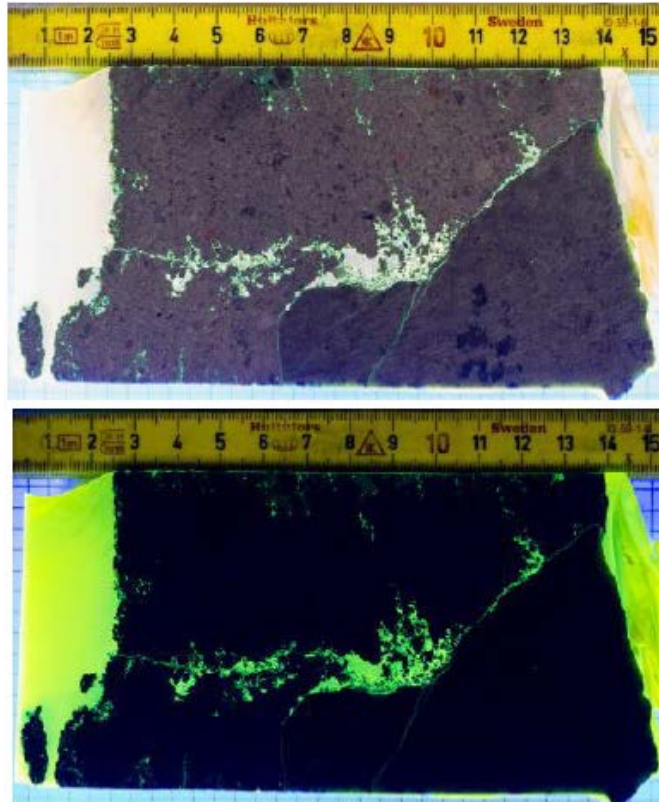


VI.31. Prøvestader ved pel 2480-2500. Bora ut i 2014. Betongalder 18 år. Foto: Mannvit.

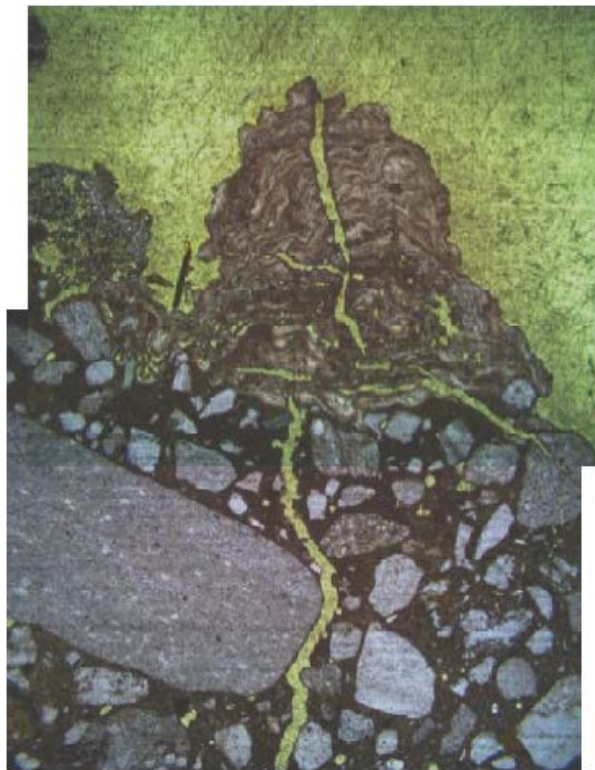
## Analysar av betong



VI.32. Karbonatisering avgrensa til overflata. Kjerne 2500-5. Betongalder 18 år. Foto: Mannvit.



VI.33. Gjennomgående riss i kjerne 2480-12. Betongalder 18 år. Foto: Mannvit.



VI.34. Tynnslip av kjerne 2480-12: utfelling av kalsiumkarbonat på betongoverflata over gjennomgåande riss. Sementpastaen var intakt utan stålfiberkorrosjon (polarisert lys. Utsnittet tilsvarar 3,6 x 5,3 mm). Betongalder 18 år. Foto: Mannvit.



## **Sprøytebetongresept- Sløverfjordtunnelen**

Vi har ikkje funne resepten. Tabell 4.4 gjengir ein omtrentleg samansetning som var vanleg på den tida.

## **Analyse av vatn frå Pel 2250 i Sløverfjordtunnelen**

Det er generelt lagt vekt på analyse av vatn frå lekkasjar nær ved prøvetatt sprøytebetong. I dette tilfelle er var det ikkje muleg å samle inn vatn nær Pel 2480 der betongen blei bora ut. Analysen frå pelnummer 2250, nokså nærme strandlinja, viser at vatnet er ferskt. Pelnummer 2480 ligg godt under land.

## Certificate

Project: 1510001389/31

Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Søndre Meland  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO

Sample information:	Statens vegvesen Vegdirektoratet, Kjemiske analyser av kontaminert vegvann, sedimenter og		
Place of sampling:	Sloverfjord 2250	Date of sampling:	
		Date of arrival:	3.9.2014
		Research started	3.9.2014

## Water analyce

Analysis	14SL06065	Unit	Method
Pretreatment, filtration	ok		
pH	9,2		RA2000*
Metals 1 diss	ok		
Aluminium (Al), diss	<10	µg/l	RA3000*
Arsenic (As), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Barium (Ba), diss	3,2	µg/l	RA3000*
Boron (B), diss	250	µg/l	RA3000*
Mercury (Hg), diss	<0,020	µg/l	RA3000*
Phosphorus (P), diss	140	µg/l	RA3000
Cadmium (Cd), diss	<0,030	µg/l	RA3000*
Potassium (K), diss	9500	µg/l	RA3000*
Calcium (Ca), diss	1300	µg/l	RA3000*
Cobalt (Co), diss	<0,50	µg/l	RA3000*
Chromium (Cr), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Copper (Cu), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Lead (Pb), diss	<0,50	µg/l	RA3000*
Magnesium (Mg), diss	1100	µg/l	RA3000*
Manganese (Mn), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Molybdenum (Mo), diss	1,3	µg/l	RA3000*
Sodium (Na), diss	230000	µg/l	RA3000*
Nickel (Ni), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Silicon (Si), diss	5600	µg/l	RA3000
Iron (Fe), diss	<10	µg/l	RA3000*
Sulfur (S), diss	26000	µg/l	RA3000
Zinc (Zn), diss	<5,0	µg/l	RA3000*
Strontium (Sr), diss.	9,9	µg/l	RA3000
Thorium (Th), diss.	<0,20	µg/l	RA3000
Uranium (U), diss	<0,10	µg/l	RA3000*
Vanadium (V), diss	<1,0	µg/l	RA3000*

The results apply solely to the samples analyzed. The certificate may only be copied as whole.

Ramboll Analytics  
Niemenkatu 73, FI-15140 Lahti  
Kiltterinkuja 2, FI-01600 Vantaa

Tel +358 20 755 611  
Business ID 0101197-5  
www.ramboll-analytics.fi  
Domicile Espoo

  
**FINAS**  
 Finnish Accreditation Service  
 T039 (EN ISO/IEC 17025)

Ramboll Analytics

## Certificate

Project: 1510001389/31

Date: 11.9.2014

2/2



\* Method is accredited by the FINAS. Uncertainty of measurement is reported if requested.

### Ramboll Analytics

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Sami Tyrväinen".

Sami Tyrväinen  
M.Sc., chemist, +358 50 434 4092

The certificate has been accepted electronically.

**Delivery** per.hagelia@vegvesen.no

### **Trykkstyrke, fiberinnhold, porøsitet, PF, D/S, m.m.**

Tilstanden i 2014 er dokumentert av Mannvits rapport MV-2015-007 (Mannvit 2015a).

## Vedlegg 2 – Sprøytebetong i svakt svovelsurt miljø

---

# Harpefoss

## Tunneldokumentasjon

Servicetunnel til Harpefoss kraftverk som blei undersøkt av Statens vegvesen i 1997 og Building Research Establishment (BRE) & Statens vegvesen i 2000.

Fotodokumentasjon frå 1997 (neste side) viser tidlege utfellingar av kalkspat og natrium-sulfat (thenarditt), samt lokal førekomst av rusta biomasse i grøft. Det var ingen kontakt mellom bakteriar og betong verken i 1997 eller 2000.

Det blei bora ut 6 kjerner for tynnslip og betongpetrografisk undersøking i 1997 og 3 kjerner i samarbeid med BRE i 2000. I tillegg blei det samla inn prøver av utfellingar for nærmare identifikasjon.



*V2.1. Kjerne P00/1570/1, bora ut i 2000. Betongalder 16 år. Fullskala thaumasitt sulfatangrep (TSA) var avgrensa til svært tynn betong. Foto: Ted Sibbick, BRE.*

## Mikroskopering av tynnslip

BRE utarbeidde ein eigen petrografisk rapport om sulfatangrep på sprøytebetong (BRE-P00/1570/R1). Rapporten dokumenterer sentrale funn i samband med samarbeidsprosjektet med Statens vegvesen og omfattar sprøytebetongane frå Harpefoss, Åkebergveien, Ekebergtunnelen og Svartdaltunnelen (sjå Vedlegg 3).



V2.2. Utfellingar av kalsiumkarbonat og natriumsulfat (kvit) i Harpefosstunnelen 1997. Betongalder 13 år. Merk lokal bioakkumulasjon (rusta jernbakteriar). Det var inga endring å merke ved undersøkinga i 2000. Foto: Per Hagelia.

## Sprøytebetongresept – Harpefosstunnelen

### Sprøytebetong i Harpefoss Kraftstasjon, Adkomsttunnel

Sprøytet av E-service i 1984

Betongleverandør: Ringebu Betong

Tlf. 61281212 eller 91170701

Samtale med eier av Ringebu Betong, Stein Olav Dokk, den 14.jan.97 om tilslag og bindemiddel;

Blandeverk og tilslag fra Lomoen (Vestsida ved Vinstra) i Gudbrandsdal Betongvareindustri gruve, (finnes også en Haugen gruve inntil som er samme elvevifte, men der tar ikke han sin grus fra). Petrografisk undersøkt av SINTEF. Norcem har også testet tilslaget. Ikke gjennomført kanadisk test pga. høy kostnad, men bruker heller lavalkalisement til bruer o.l.

Gruven virker jevn og en bør anta at tilslaget er omtrent det samme idag som i 1984.

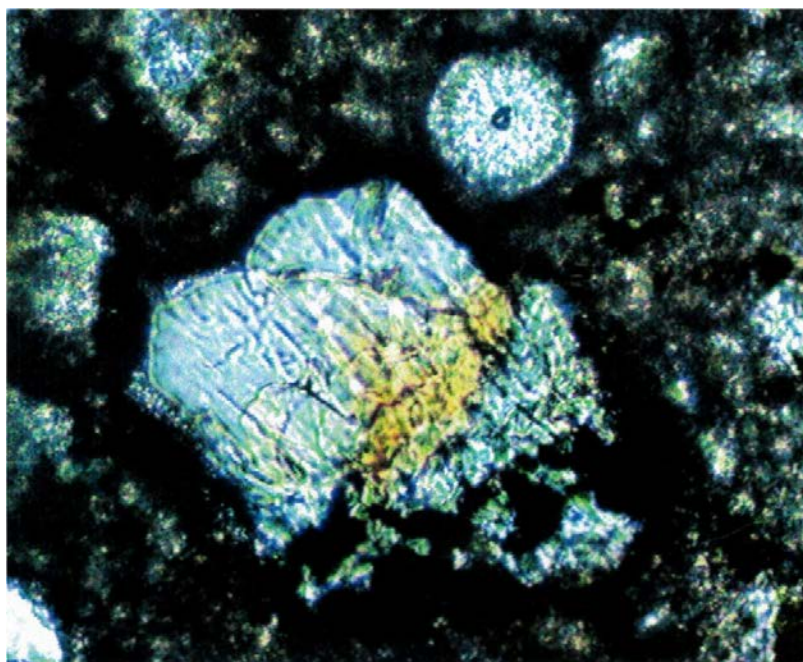
Silikasilo installeres nå, brukt sekker i 1992 til Nedre Vinstra Kraftselskaps tilløpstunnel.

1984 er før "hans tid", men han skal forhøre seg med de som arbeidet der da. Trolig uten silika.

Sement: MP30 eller P30, trolig MP30.

Stig S. Grytting

14.1.1997



V2.3. Undersøkingar i tynnslip utført ved Veglaboratoriet viste eit lite innslag av ikkje-reagert flygeaske (kulerund partikkel øvst i bildet), og bekreftar at sementen var MP30. Foto: Per Hagelia.

## Identifikasjon av kvite utfellingar ved røntgenanalyse



### MINERALOGISK-GEOLOGISK MUSEUM

UNIVERSITETET I OSLO

SARS' GATE 1

N-0562 OSLO, NORWAY

Telefon 22851600 - International +47 22851600

Telefax 22851800 - International +47 22851800



14. november 1997

Per Hagelia  
Statens Vegvesen  
Veglaboratoriet  
Gaustadalléen 25  
0371 Oslo

Analysene av prøvene med belegg på sement fra Harpefoss kraftverk ga følgende resultat:

Prøve 1 (stalakitt): Kalsitt (røntgenr. 29719).  
Prøve 2 (hvitt belegg): Kalsitt (røntgenr. 29718).  
Prøve 3 (hvitt pulver): Thenarditt (røntgenr. 29720).

Prøvene er returnert.

Med hilsen

*Hans-Jørgen Berg*  
Hans-Jørgen Berg  
Avdelingsingeniør



## **Analysar av vatn**

Analyse av pH i fire prøver samla i 2000. Rapporten frå BRE (P00/1570/R2) er samla i Vedlegg 3 under «Samarbeid med BRE». Sjå elles Tabell 4.8 for analyseresultat frå ione kromatografi (Hagelia, Sibbick, Crammond og Larsen 2003).

# Vedlegg 3 – Sprøytebetong i alunskifermiljø

---

# Åkebergveien

Åkebergveien er første stad i Norge med dokumentert thaumasitt sulfatangrep i sprøytebetong (Hagelia og Grønhaug 2000). Opplysningar om resept, omvandling/nedbryting er tabulert i kapittel 4.5. Hovudoversikt over utviklinga av krakelering og avskaling er vist i kapittel 4.5.3.

## Feltdokumentasjon



V3.1. Oversikt over prøvepunktene frå 2000 sett i 2014. Kjerneprøver ( $d = 100 \text{ mm}$ ): Core 1 og 2 (venstre bilde) og Core 3 og 4 (høgre). Foto: Per Hagelia.



V3.2. Sprøytebetongen i Åkebergveien var kraftig krakelert etter 27 år på grunn av kombinert syre- og thaumasitt sulfatangrep og sannsynlegvis svelling i alunskiferbergmassen. Rusta og gule render er utfelte frå oksidert alunskifervatn via gjennomsettande sprekkar i betongen. Foto: Per Hagelia.



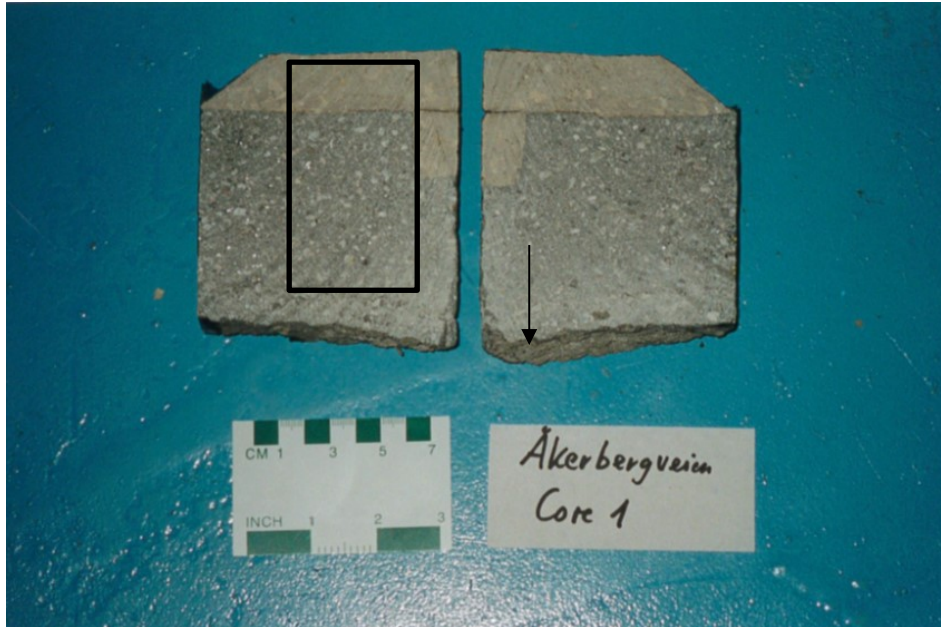
V3.3. Detaljar frå Åkebergveien i 2014. Venstre: Kraftig nedbryting av sprøytebetong og avskaling i overflata. Gul utfelling av forvittrings-mineral (jarositt m.m.) er danna frå syregivande sulfidoksidasjon i alunskifer. Høgre: Utfelling av kalsiumkarbonat på overflata og på nettriss (og muleg gips og thaumasitt) danna ved utluting av betongen i kombinasjon med thaumasitt sulfatangrep. Betongalder 27 år. Foto: Per Hagelia.



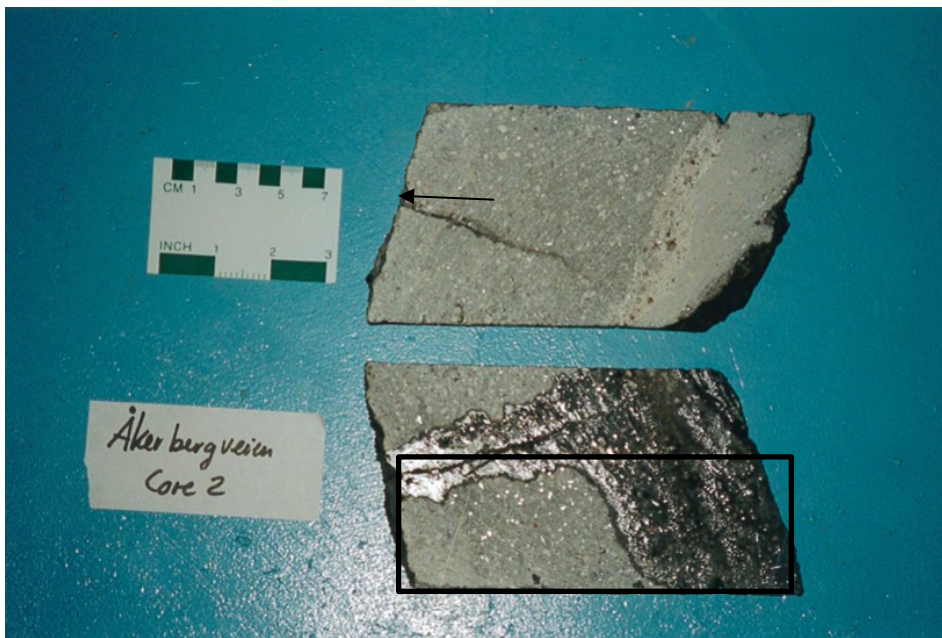
V3.4. Detaljar frå Åkebergveien i 2014. Avskaling i sprøytebetong langs sone med fullskala thaumasitt sulfatangrep og destruktiv stålfiberkorrosjon. Betongalder 27 år. Foto: Per Hagelia.

## Kjerneprøver med tynnslip

Alle kjernene ble bora ut i 2000 ved 13 års betongalder. Rammene viser områda med store tynnslip preparert ved BRE. Piler viser ytterflata. Sprøytebetongen frå 1987 var stålfiberarmert men hadde eit ytre tynnare lag (0,5-1,5 cm) utan fiber. Det blei også preparert tynnslip av avskalingar (prøve Pr 2 og P00/1570/42).



V3.5. Kjerne Core 1 med tynnslip område for BRE nr. P00/1570/27. Sprøytebetong på syenitt (månaitt) stort sett upåverka av sulfatangrep. Ingen stålfiberkorrosjon. Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.



V3.6. Kjerne Core 2 med tynnslip område for BRE nr. P00/1570/28. Sprøytebetong på alunskifer med omvandling mot alunskifer. Stålfiberkorrosjon var spesielt konsentrert til indre del mot alunskifer (Sone A). Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.

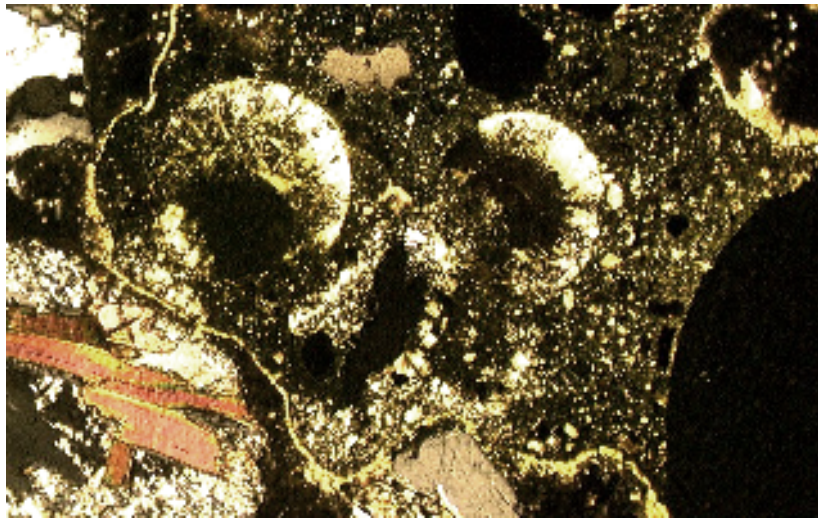


V3.7. Kjerne Core 3 med tynnslip område for BRE nr. P00/1570/29. Sprøytebetong med omfattende stålfiberkorrosjon knytta til syreangrep mot alunskifer (Sone A). Betongalder 13 år. Litt alunskifer bevart i venstre kjernehalvdel. Foto: Per Hagelia.



V3.8. Kjerne Core 4 med tynnslip område for BRE nr. P00/1570/30. Kjerna hadde ein ca. 30-50 mm rest av sprøytebetongen frå 1970 med stålrubber som armering under ca. 40 mm stålfiberarmert sprøytebetong og 20 mm ytre fiberfri betong frå 1987. Begge betongane var litt svekka av Ca-utluting, thaumasitt sulfatangrep og Popcorn kalsitt. Stålet i stor grad var intakt gjennom heile tverrsnittet. Foto: Per Hagelia.

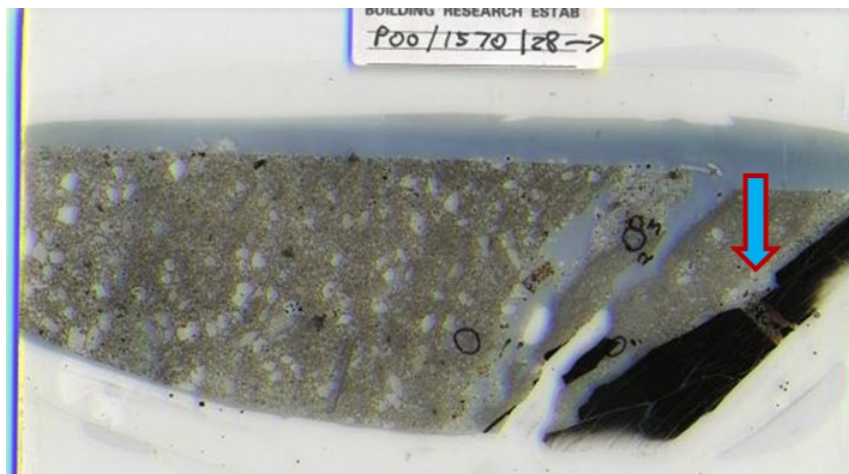
### Eksempel frå mikroskopering og analyse av tynnslip



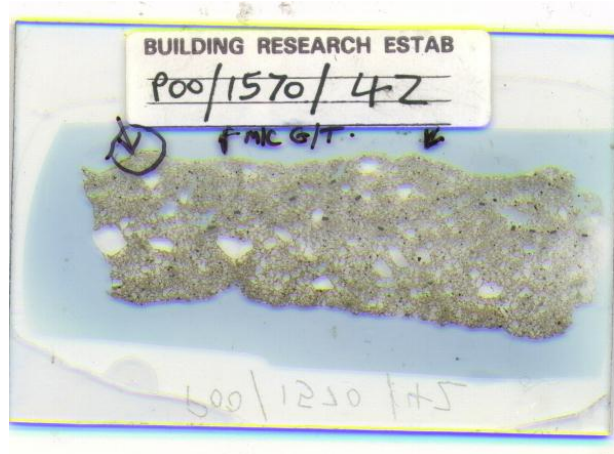
V3.9. Tynnslip av prøve Pr 2 (Statens vegvesen) i 13 år gammel sprøytebetong på alunskifer i Åkebergveien, Oslo. Thaumasitt: lyse utfellingar på runde luftporer (Hagelia og Grønhaug 2000). Foto: Per Hagelia.

Tabell V3.1. Analysar av thaumasitt i Pr 2 med elektronmikroskop (EMPA), utført av Muriel Erambert, Naturhistorisk Museum, Universitetet i Oslo).

	SO3	P2O5	Cl	K2O	SiO2	Al2O3	MgO	CaO	FeO <sub>t</sub>	Total
Pr 2a-1	19.05	0.55	0.04	0.00	13.73	2.00	0.00	45.36	0.00	80.74
Pr 2a-2	19.43	0.48	0.10	0.00	12.17	2.40	0.00	40.65	0.09	75.32
Pr 2a-3	19.83	0.62	0.06	0.02	12.94	1.76	0.00	42.00	0.09	77.32
Pr 2a-4	18.68	0.53	0.07	0.02	13.01	1.49	0.00	40.90	0.32	75.02

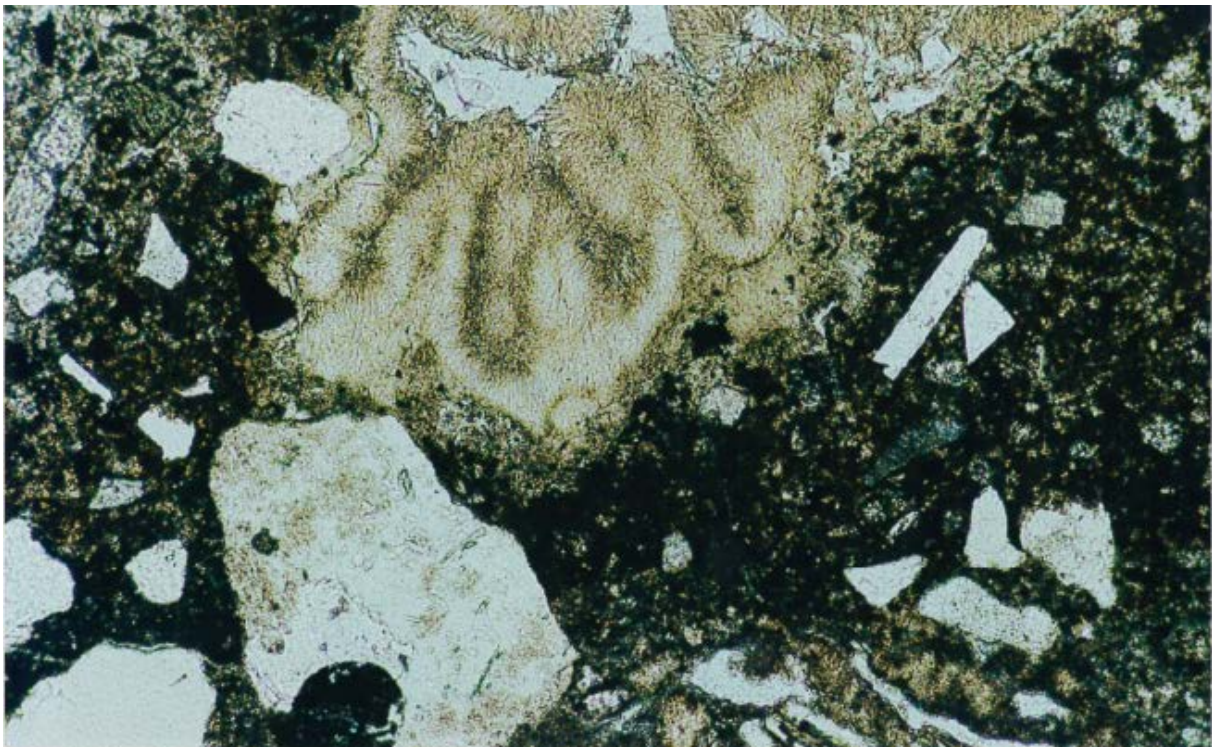


V3.10. Stort tynnslip av kjerne Core 2 viser at indre Sone A mot alunskifer var svært svak. Pila peikar mot ei svært porøs heftzone mot alunskiferen. Alunskiferen har her ein sprekk som fører forvittringsmineral danna ved oksidasjon av sovelkis i skiferen, utluting på grunn av lokalt syreangrep på heftsona. Stålfiberkorrosjon mot alunskifer, men stort sett lite korrodert fiber i resten av tverrsnittet. Betongalder 13 år. Foto: Ted Sibbick. BRE-Garston, Watford.



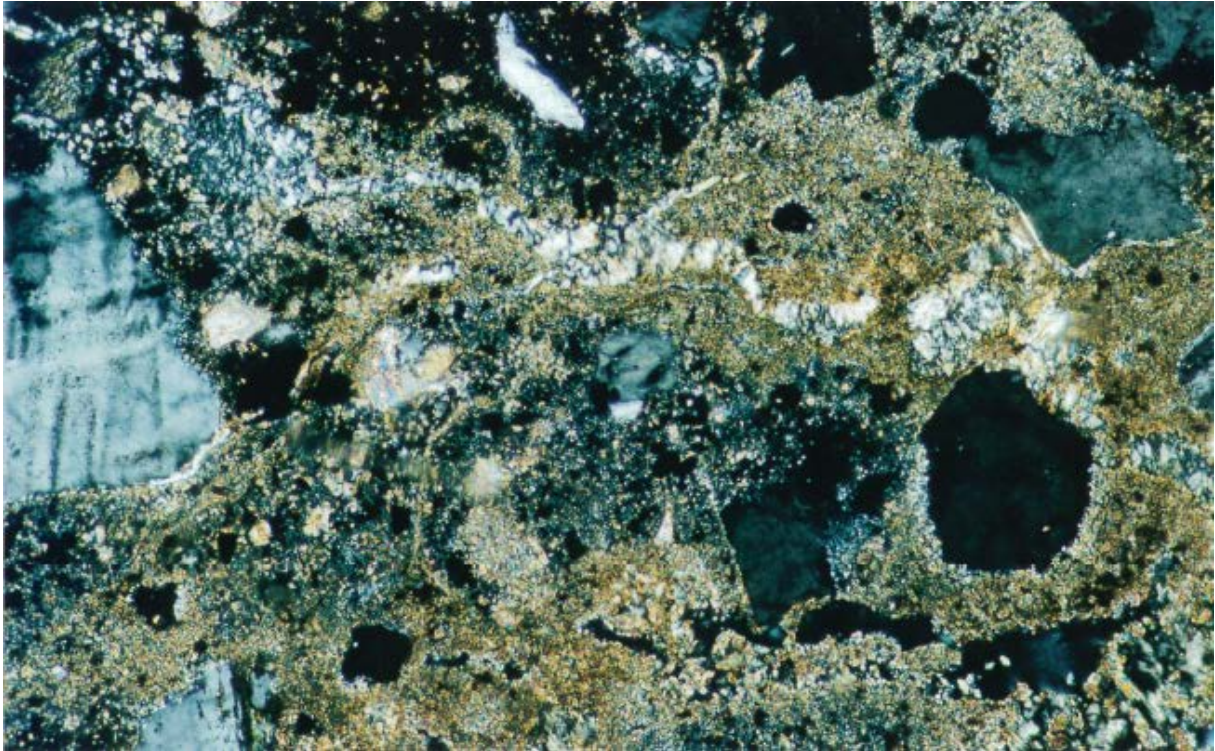
V3.11. Tynnslip av ytre avskaling (ca. 20 mm tykk; BRE nr. P00/1570/42, same type avskaling som prøve Pr 2). Nedre kant er ytre betongflate med brun overflatekarbonatisering. Øvre kant er sida mot avskalingssona. Foto: Ted Sibbick. BRE-Watford.

Tynnslip av avskala flak (V3.11) viste både utfelling av thaumasitt og fullskala thaumasitt sulfatangrep med nedbryting av C-S-H. Tydelege teikn på vasstransport gjennom tverrsnitte (Ca- utluting, Popcorn kalsitt; lokal utfelling av sekundær portlanditt i luftporer). Kontakt mellom stålfiber og thaumasitt viste ingen korrosjon.



V3.12. Tynnslip av ytre avskaling (BRE nr. P00/1570/42) med thaumasitt (strågul) utfelt i stor luftpore og med thaumasitt sulfatangrep/erstatning av utluta C-S-H (mørk) i nedre kant. Betongalder 13 år. Planpolarisert lys, 126 x. Foto: Ted Sibbick. BRE-Garston, Watford.

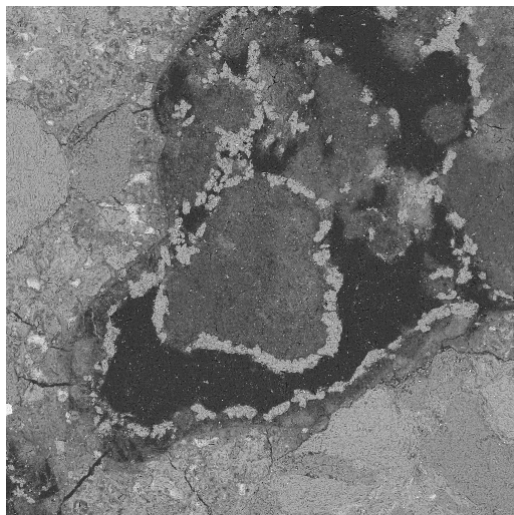




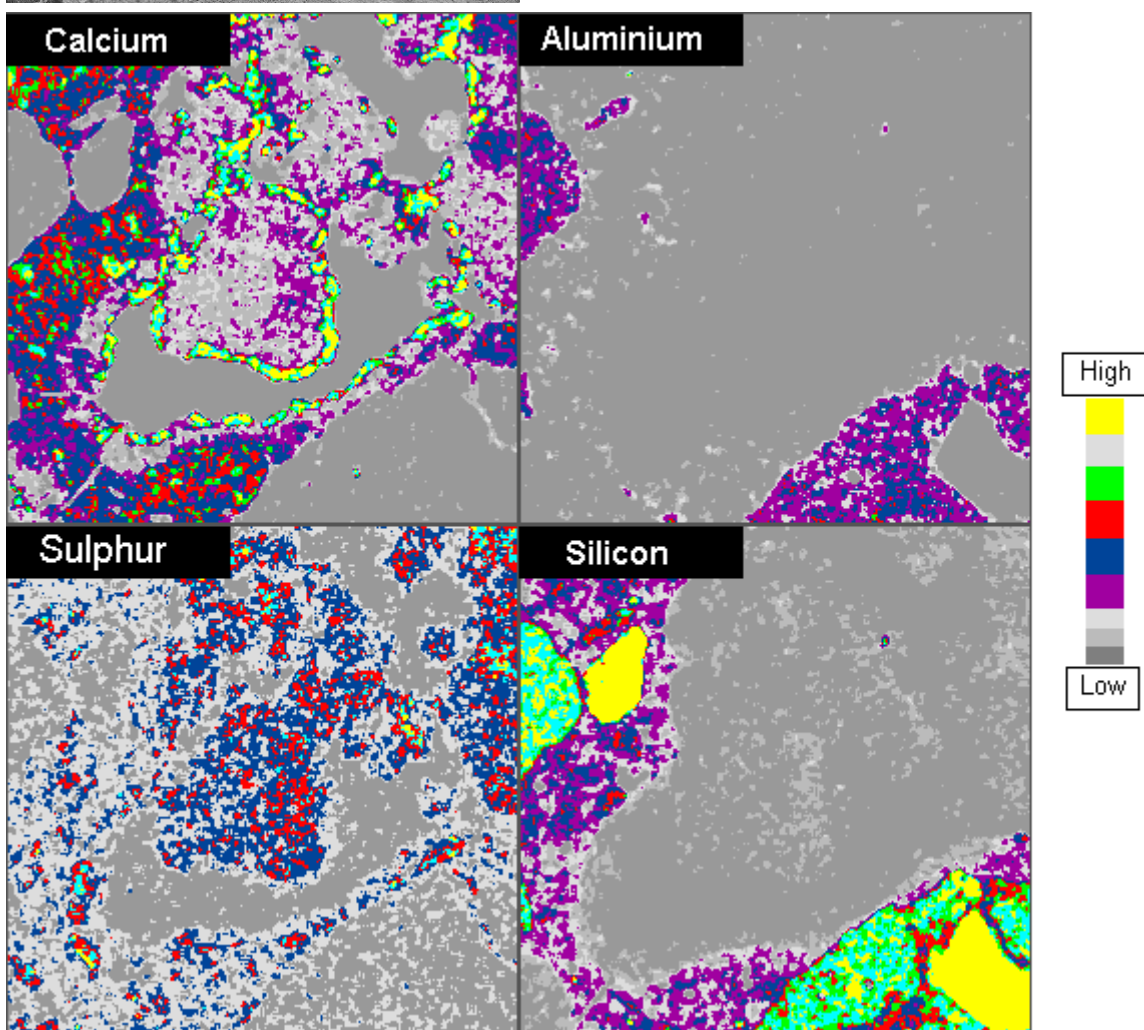
V3.13. Tynnslip av ytre avskaling (BRE nr. P00/1570/42). Thaumascitt på sprekk (lys grå) og delvis ved nedbryting av C-S-H (mørk til lys grå; nedst høyre halvdel). Seinere delvis omdanning til kalsitt (brune område). Betongalder 13 år. Dobbelpolarisert lys, 126x. Foto: Ted Sibbick, BRE-Watford.



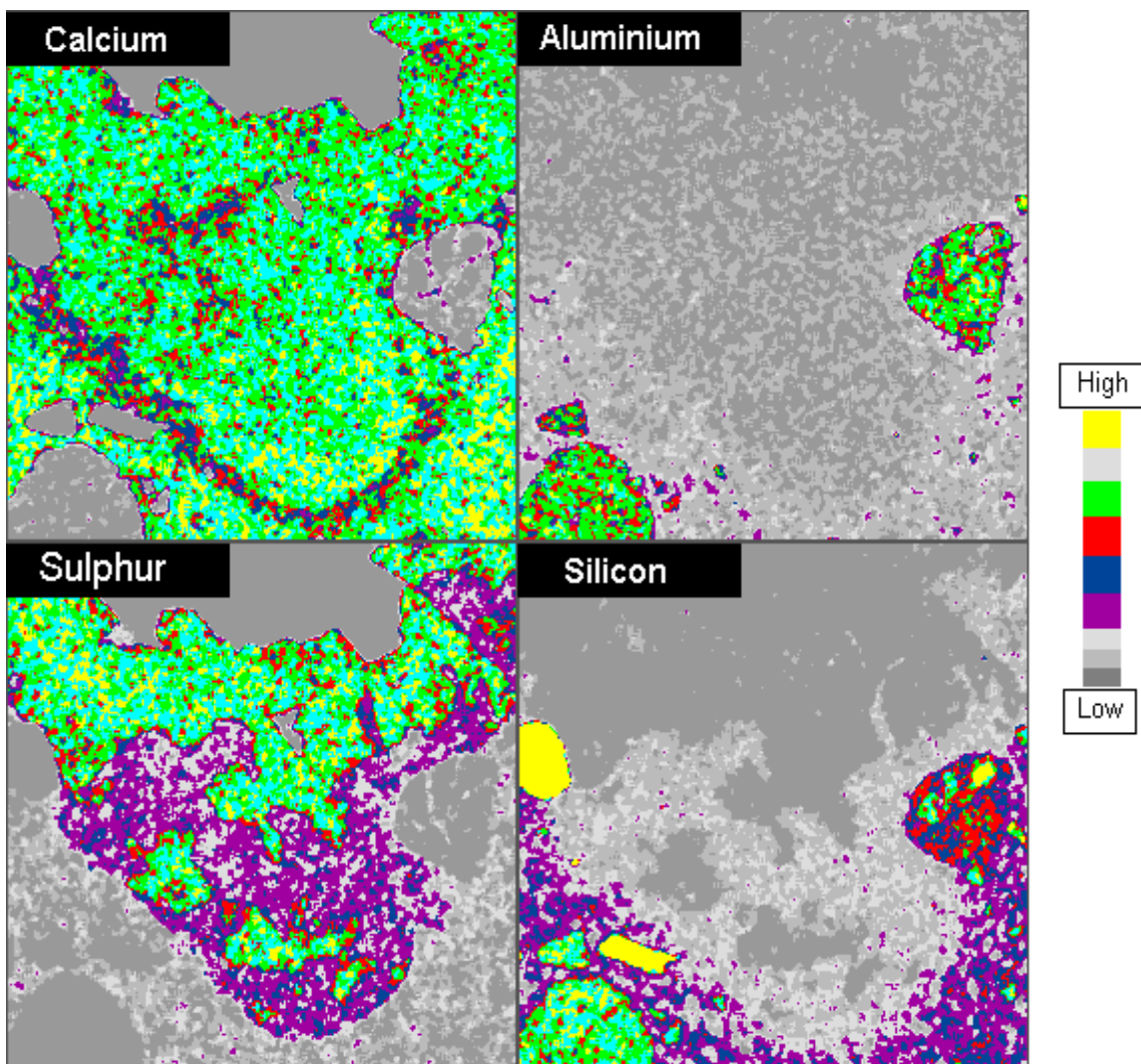
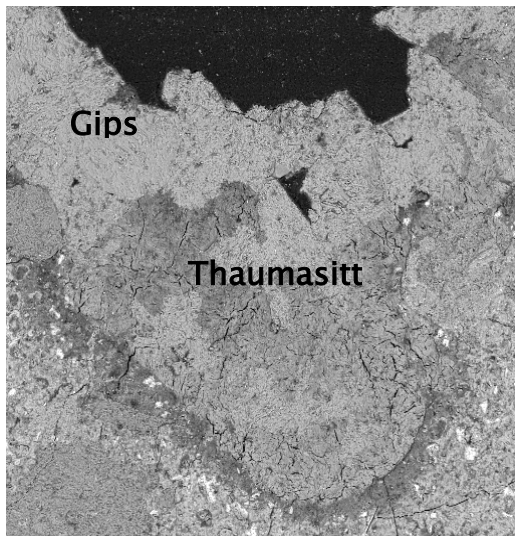
V3.14. Udispersert silika i Åkebergveien (runde), omgitt av utluta sementpasta (mørk grå) og Popcorn kalsitt (lysare grå). Bare godt dispersert silika gir ønska effekt. Foto: Derek Metcalf, BRE-Garston, Watford.



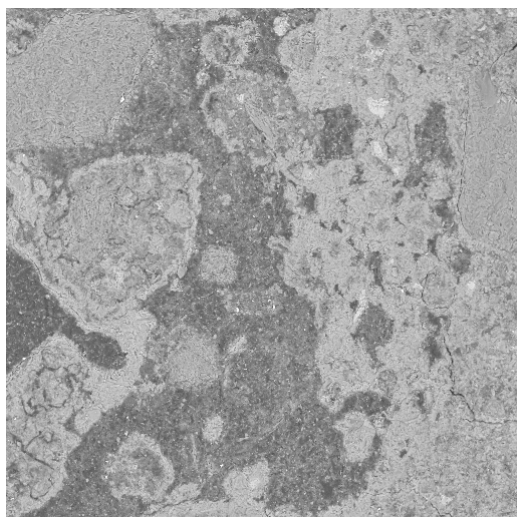
100  $\mu\text{m}$



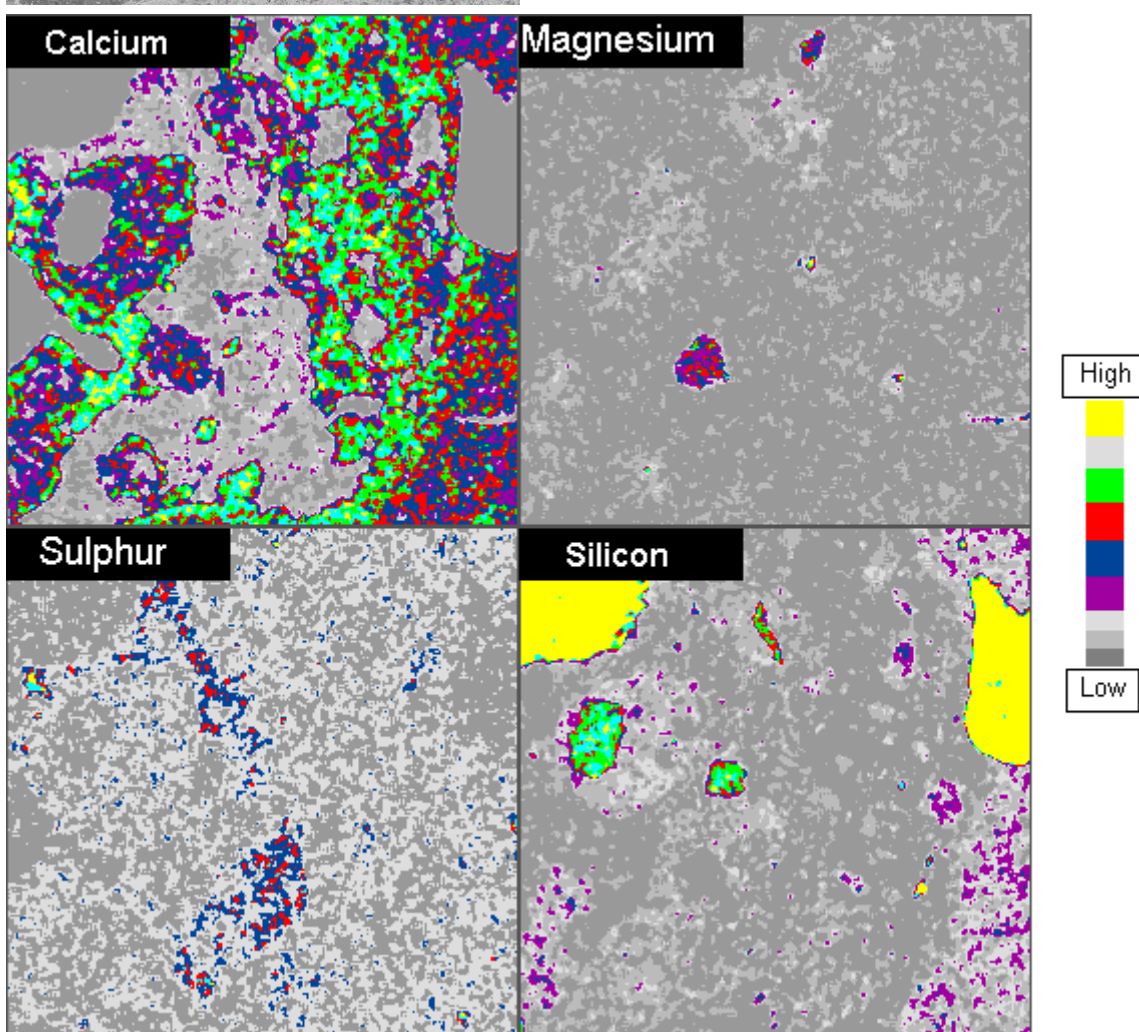
V3.15. Core 4. Elementfordeling (X-ray mapping) av pore med thaumasitt og seinare utfelt kalsitt. Merk at sementpastaen mot luftpora er utluta i kanten mot thaumasitt (lokalt lågare Ca enn i intakt C-S-H omkring). Utført av Derek Metcalf, BRE-Garston, Watford.



V3.16. Core 4. Elementfordeling (X-ray mapping) av pore med gips og thaumasitt. Merk at sementpastaen er utluta i kanten mot thaumasitt (lokalt lågare Ca enn elles). Utført av Derek Metcalf, BRE-Garston, Watford.



100 um

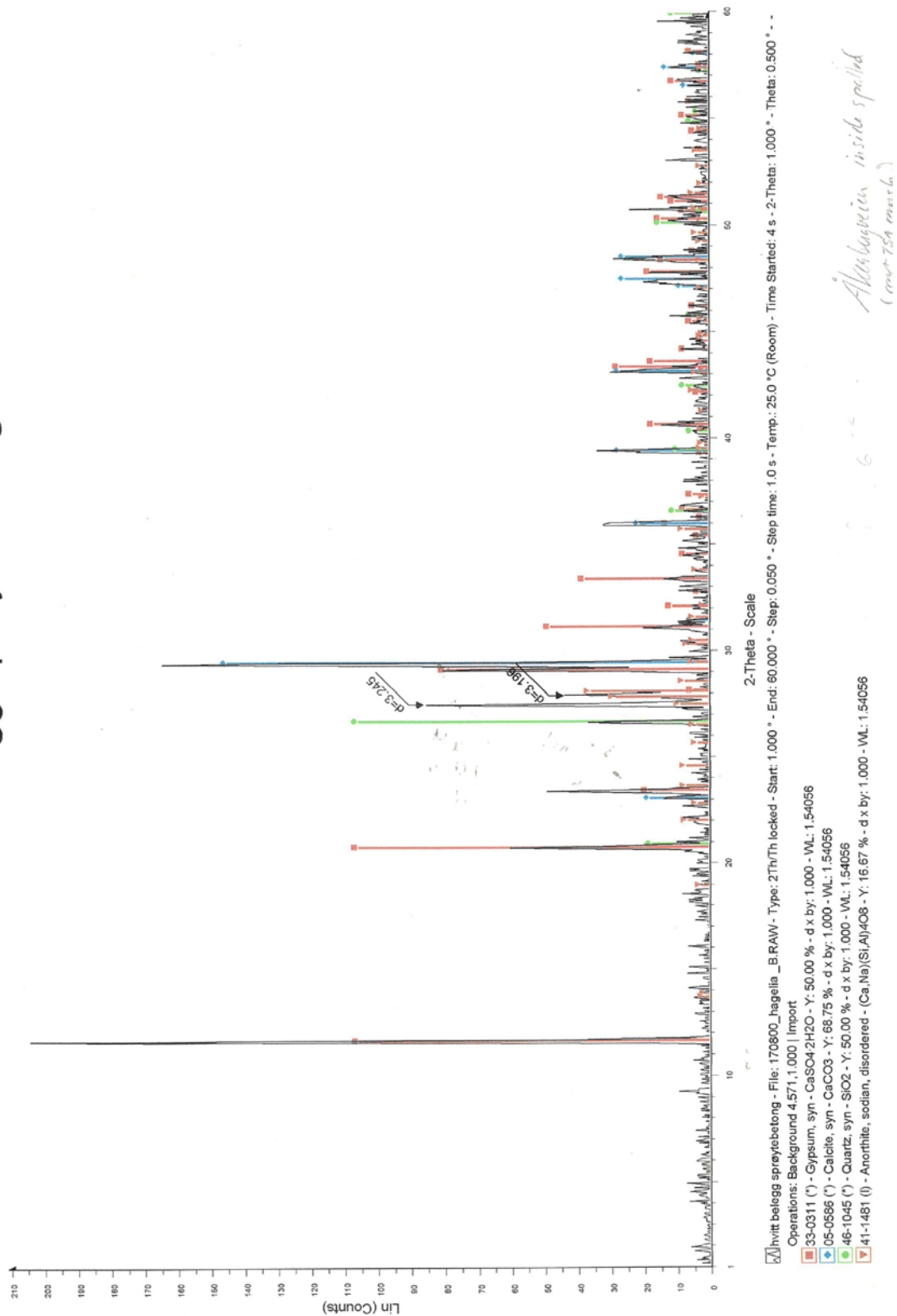


V3.17. Core 2. Elementfordeling (X-ray mapping) av område med svært diffus utfelling av thaumasitt og innslag av dolomitt (høg Mg og høg Ca). Sementpastaen er delvis utluta mht. Ca (varierende intensitet). Utført av Derek Metcalf, BRE-Garston, Watford.

## Røntgenopptak (XRD)

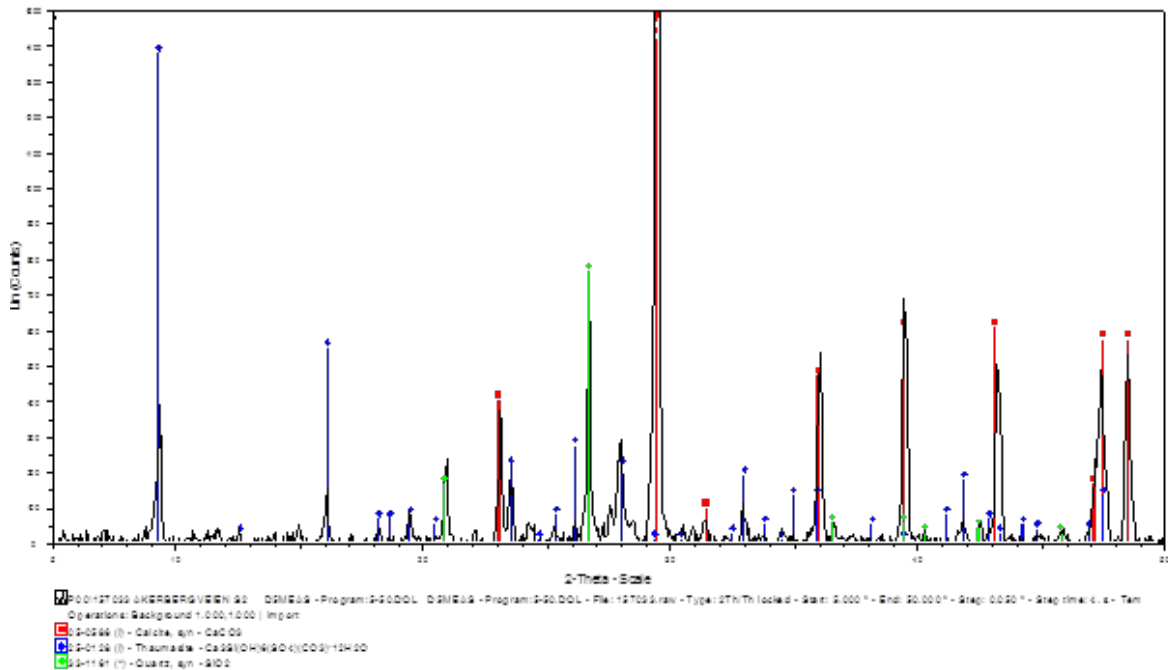
hvitt belegg sprøytebetong

482



V3.18. Åkebergveien i 2000, 13 år gammel sprøytebetong. Røntgenopptak av fullstendig nedbroten sprøytebetong (pulver) i avskalingszone med gips og kalsitt samt to uidentifiserte toppar (utført av Hans-Jørgen Berg, Naturhistorisk Museum, Universitetet i Oslo).

Figure 1. XRD plot for Åkerbergveien Cutting Sample 2



V3.19. Åkebergveien i 2000. Betongalder 13 år. Røntgenopptak av fullstendig nedbroten sprøytebetong i avskalingszone (pulver, same type som i V3.17). Thaumassitt og kalsitt samt kvarts frå tilslag. Utført av Roger Bollinghaus, BRE-Garston, Watford (BRE-rapport P00/1570/R5).

### Sprøytebetongresept – Åkebergveien

Resepten er kjent i store trekk (samtale med Ulf Fredriksen, Oslo kommune, 2000).

NORCEM Sulfatresistent sement:	450 kg/m <sup>3</sup> (ca.)
Tilslag:	1550 kg/m <sup>3</sup> (ca.)
Stålfiber (visuelt vurdert, samanlikna med betong med kjent innhald):	30-40 kg/m <sup>3</sup> (ca.)

Silikastøv:	5-10 %
v/b:	0,45-0,50

Resepten er i samsvar med tilrådingar frå den tidlegare Alunskiferkomiteen (Bastiansen mfl. 1957, Fiskaa mfl. 1971).

### Analyse av vatn – Åkebergveien

Ei prøve av vatn frå dreneringshol nær kjerne Core 1 blei analysert i 2000. Sjå BRE rapport P00/1570/R3 («Samarbeidsprosjekt med Building Research Establishment» vedlagt nedanfor).

## Notat fra Oslo kommune om sikring i Åkebergveien

13 NOV '88 14:21 OVA UTBYGGING 22664081

S.2/2



OSLO KOMMUNE  
Geoteknisk kontor

Kingsg. 22  
Postboks 9884 ILA  
0132 Oslo 1  
Tlf.: (02) 35 59 60

Saksbehandler: V. Kveldsvik

Oslo 12.05.1987

Oslo Veivesen  
Herslebs gt. 19  
0561 Oslo 5

Deres ref.: Eggen  
Vår ref. : R-2338 Åkebergveien

*Join 04-01  
- 19m 17m last po*

### SIKRING AV FJELLSKJÆRING I ÅKEBERGVEIEN

Fjellskjæringen i Åkebergveien ble befart av to mann fra Geoteknisk kontor 4.05.1987 etter henvendelse fra Oslo Veivesen.

Fjellskjæringen består av den lyse gangbergarten menaitt og den mørke sedimentære bergarten alunskifer. Begge bergartene er forvitret og tett oppsprukket. Spesielt er alunskiferen intenst oppsprukket og man kan uten problemer bryte løs bergarten med fingrene. Alunskiferen er svært småfallen; ingen større blokker ble observert. I menaitten, som også har en småfallen karakter, ble det i tillegg observert noen større blokker i øvre halvdel av fjellskjæringen, hvorav noen danner overheng.

Alunskiferen kan begynne å svulle ved kontakt med oksygenholdig vann, hvilket kan føre til skader på konstruksjoner som er i kontakt med bergarten. F. eks. vil sprøytebetong kunne sprekke opp som en følge av trykk bak betongen. Et annet særdrag ved alunskiferen er at den kan være aggressiv mot betong- og metallkonstruksjoner. Aggressiviteten oppstår gjennom kjemiske reaksjoner mellom oksygenholdig vann og mineraler i alunskiferen som fører til dannelsen av syrer.

Vi foreslår at fjellskjæringen sikres med fiberarmert, sulfatresistent sprøytebetong. I tillegg foreslår vi en bolterast i menaitten i øvre halvdel av fjellskjæringen. Bolterasten bør settes med ca. 2 meters avstand mellom boltene. Her bør det imidlertid utvises skjønn slik at man sørger for å få med seg kritiske blokker. Vi anbefaler at det brukes 3m lange varmforsinkede kamstålbolter som støpes inn i sulfatresistent sement. Dette burde gi en tilfredsstillende armering i fjellskjæringens øvre halvdel. Boltene bør dekkes til under påføring av sprøytebetongen slik at man senere kan sette trekantplater på boltene for å forankre betongen til fjell. Det kan også bli aktuelt med noen flere forankringspunkter. Dette kan vurderes etter at sprøytebetongen har blitt påført.

Før påføring av sprøytebetong er det viktig at fjellskjæringen renskes og spyles grundig. Vi foreslår at man tilstreber ca. 10 cm tykkelse på sprøytebetongen.

For å redusere faren for reaksjoner mellom alunskiferen og oksygenholdig vann samt å unngå oppbygging av vanntrykk bak sprøytebetongen, foreslår vi at det bores drenasjehull gjennom sprøytebetongen og et par meter inn i fjellskjæringen. Det kan bores en hullrast med ca. 2 meters avstand mellom hullene ved foten av fjellskjæringen og tilsvarende et par meter over skjæringsfoten. I tillegg bør man prøve å ta vare på gamle drenasjehull under påføring av ny sprøytebetong.

Dersom det skulle være behov for vår assistanse, f.eks. i forbindelse med oppfølging av sikringsarbeidene, står vi gjerne til tjeneste.

Geoteknisk kontor  
*U. Frødricksen*  
U. Frødricksen  
overing.

*Vidar Kveldsvik*  
Vidar Kveldsvik  
avd.ing.

# Ekebergtunnelen

## Feltdokumentasjon

**2000**

Utboring av to kjerner (Ekeberg Core 1 og Core 2) frå Pel 1730, høgre side i tunnellopet mot Vålerenga (BRE-rapport P00/1570/R1; sjå «Samarbeidsprosjekt med Building Research Establishment», vedlagt nedanfor). Betongalder 8 år.

**2014**

Mannvit (2015d) undersøkte to lokalitetar ved pelnummer 1700-1706 og pelnummer 1815-1825, begge på høgre side i tunnellopet mot Oslo sentrum. Betongalder 22 år.



*V3.20. Ekebergtunnelen, pelnummer 1700 H med tynt belegg av kalsitt på overflata. Utboring av kjerner for analyse: ei kjerne for strukturanalyse med tynnslip, sjå Tabell 4.14). Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.*





V3.21. Ekeberg tunnelen, pelnummer 1706H. Tørr overflate. Oversikt over prøvestader (ikkje strukturanalyse og tynnslip). Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.



V3.22. Ekeberg tunnelen, pelnummer 1815H. Uttak av kjerner, inklusive strukturanalyse med tynnslip (sjå Tabell 4.14). Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.



V3.23. Ekeberg tunnelen, pelnummer 1820H med lys nedbroten betong og destruktiv stålfiberkorrosjon. Pelnummer 1825H (høgre bilde): Kjerne 1825 av 90 mm tykk relativt intakt sprøytebetong, og handstykke 1825 av sterkt nedbroten betong nær sålen (Tabell 4.14). Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.



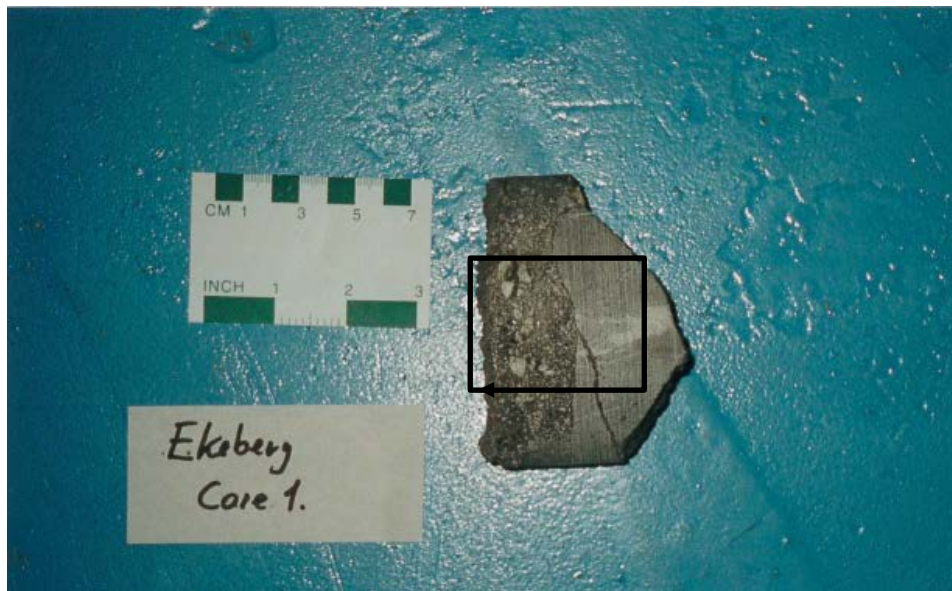
V3.24. Ekeberg tunnelen, pelnummer 1820H med kraftig nedbryting nær sålen. Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.



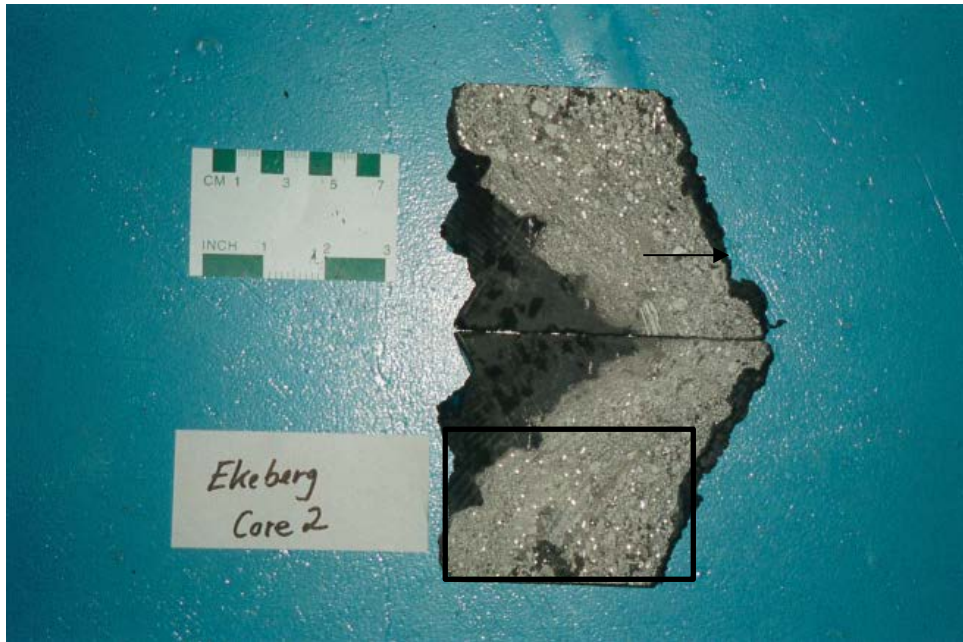
V3.25. Ekebergtunnelen, pelnummer ca. 1835H Indikasjon på alunskifersvelling. Pelnummer. Det er tidligere rapportert om aktiv svelling frå kjellarar på Ekeberg (Ole Fromreide, sjå notat etter samtale 2000 under). Betongalder 22 år. Målestokk = 1 m. Foto: Per Hagelia.

## Kjerneprøver

2000



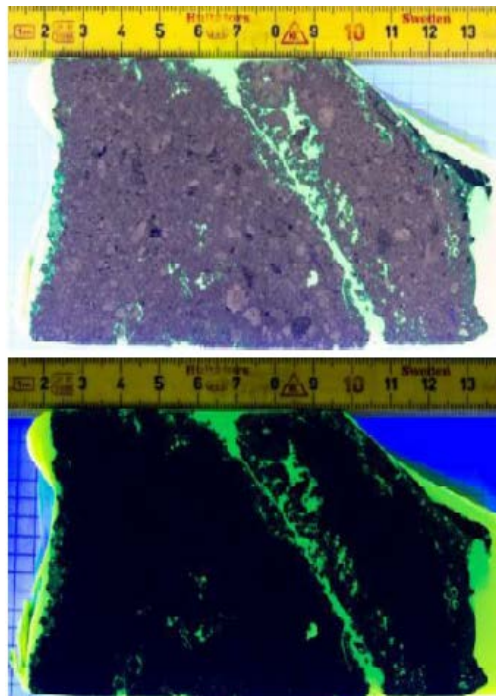
V3.26. Kjerne 1730-Core 1 med tynnslip område for BRE nr. P00/1570/37. Betongalder 8 år. Foto: Per Hagelia.



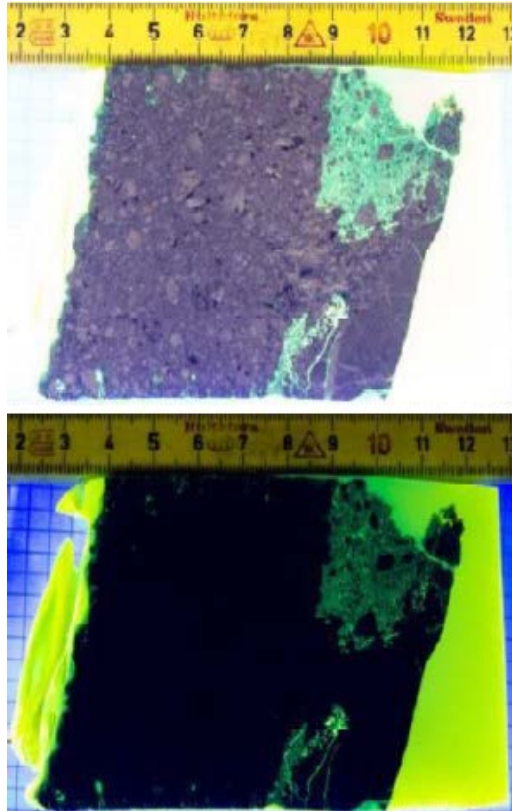
V3.27. Kjerne 1730-Core 2 med tynnslip område for BRE nr. P00/1570/40. Merk: intakt stålfiber gjennom heile tverrsnittet. Betongalder 8 år. Foto: Per Hagelia.

**2014**

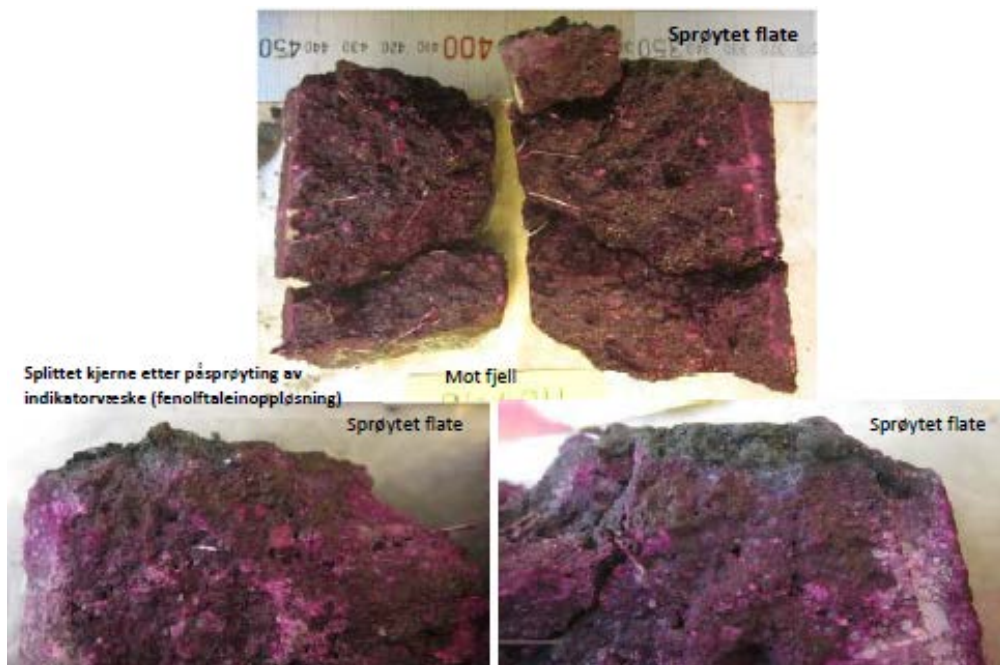
Fotografi av alle kjerner er rapportert av Mannvit (2015d). Det blei ikkje rapportert fotografi av tynnslipplasseringa.



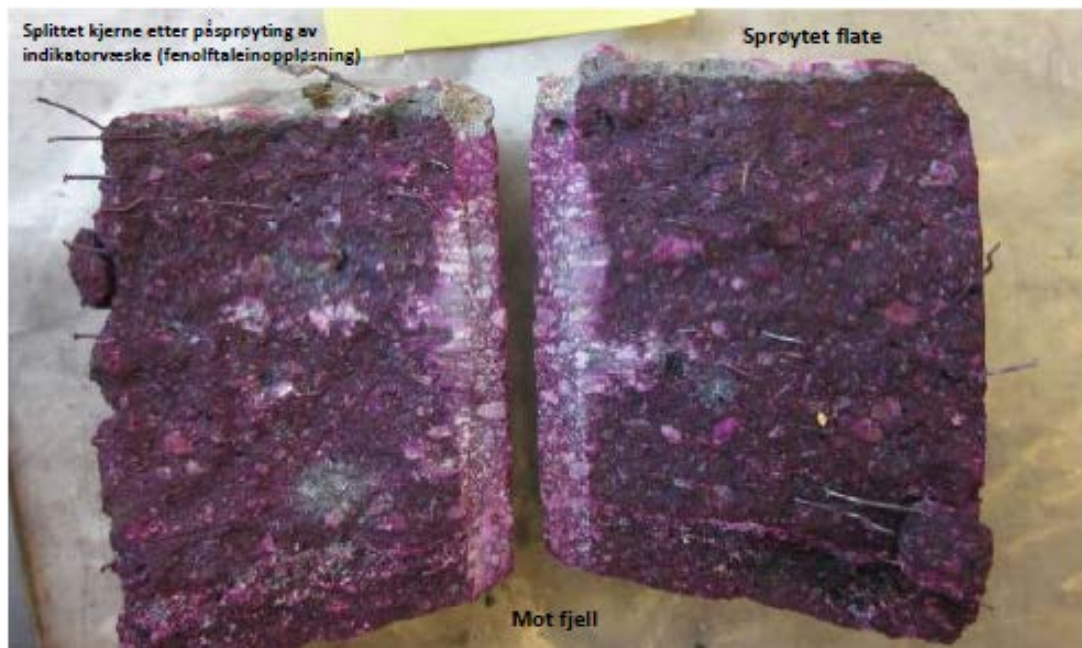
V3.28. Ekebergtunnelen. Planslip av kjerne 1706-20. Sprekk mellom to lag i sprøytebetong, delvis porøs. Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.



V3.29. Ekebergtunnelen Kjerne 1815-9: Planslip som viser tydeleg nedbryting i området mot bergmassen (syenitt i alunskifer). Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.



V3.30. Ekebergtunnelen Kjerne 1705-16: Omkring 2 mm djup overflatekarbonatisering. Ikkje karbonatisering mot heftsona. Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.

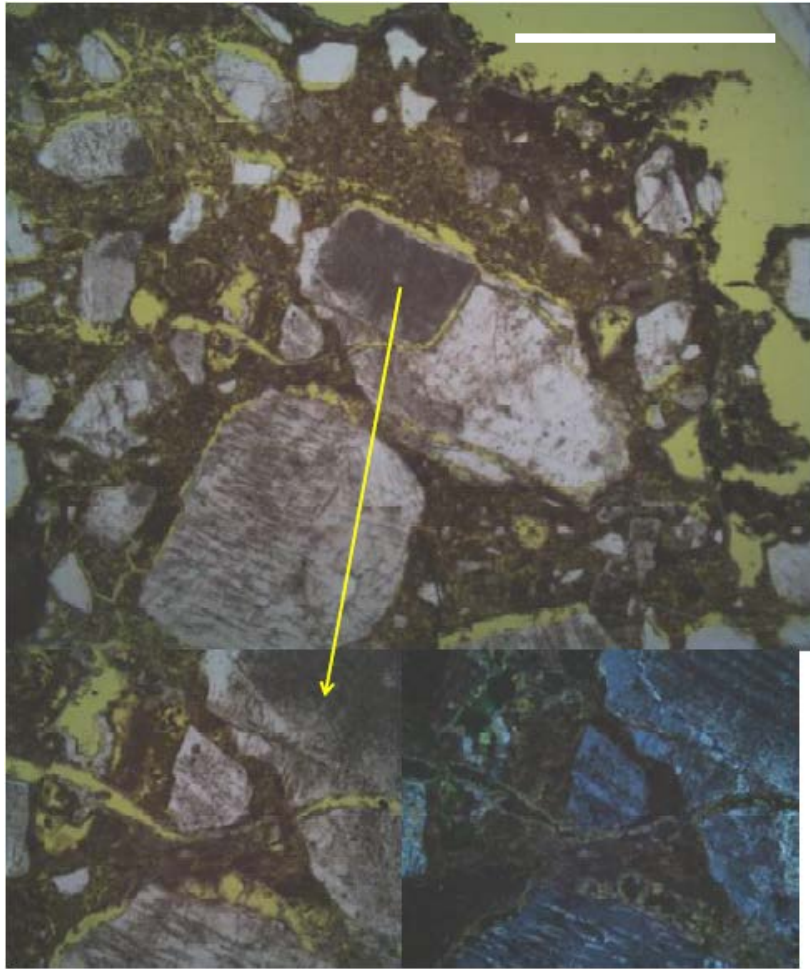


V3.31. Ekeberg tunnelen Kjerne 1820-2: Omkring 2 mm djup overflatekarbonatisering. Ikkje karbonatisering mot heftsona. Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.

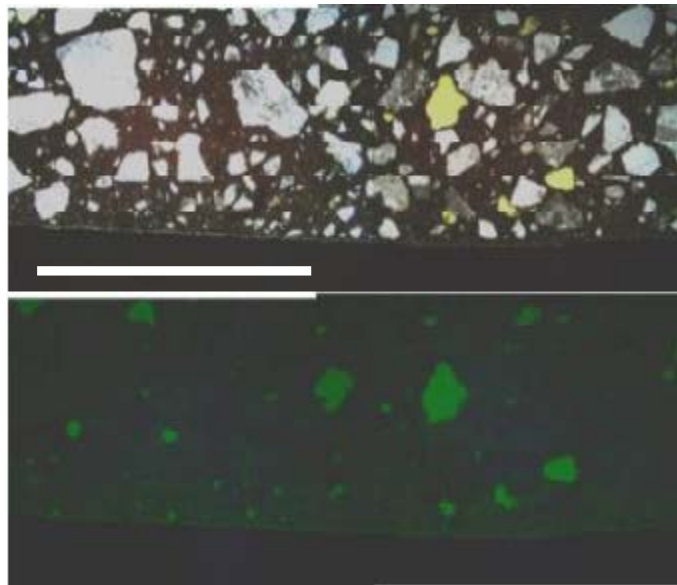
### Eksempel frå mikroskopering av tynnslip

**2000.** Hovudtrekka frå pelnummer 1730 – høgre side retning Vålerenga er rapportert i publikasjonar av Hagelia mfl. (2001, 2003).

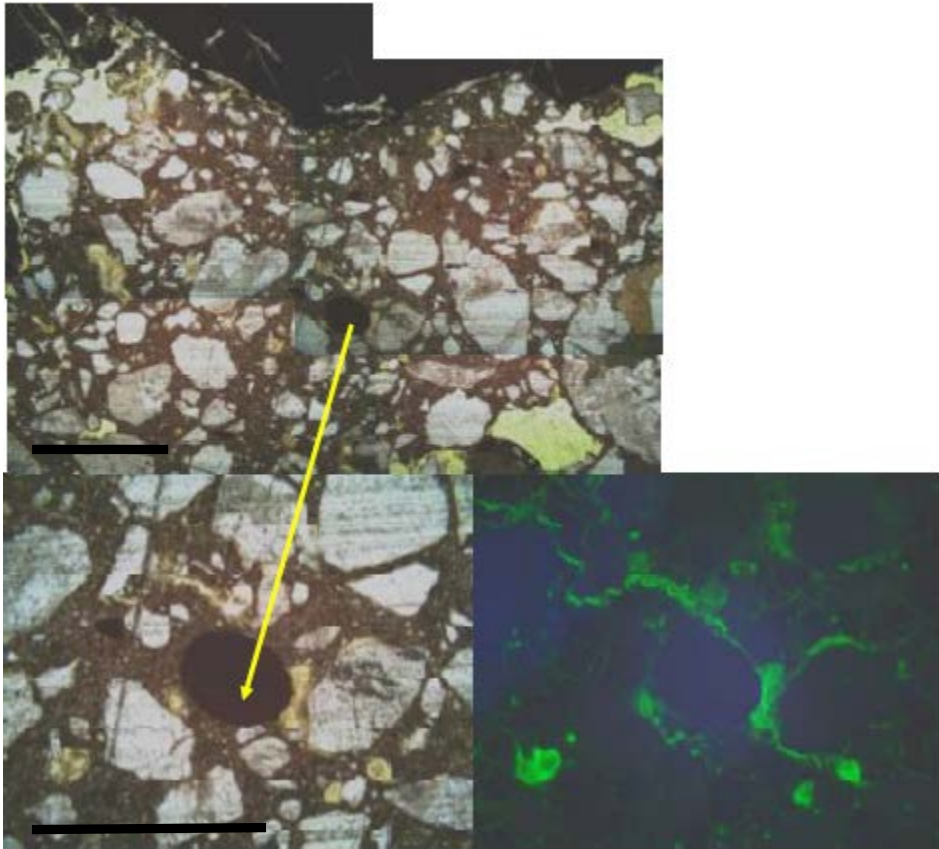
**2014.** Mannvit (2015d) rapporterte detaljert frå pelnummera 1700-1706 og 1815-1825. I tillegg til eksempela i figurane nedanfor blei det utført svært mange mikrokjemiske analysar av omvandlingsprodukt. Desse resultata reiser faglege problemstillingar knytta til kjemiske reaksjonar i sulfatinfisert betong, men er ikkje tema i denne rapporten.



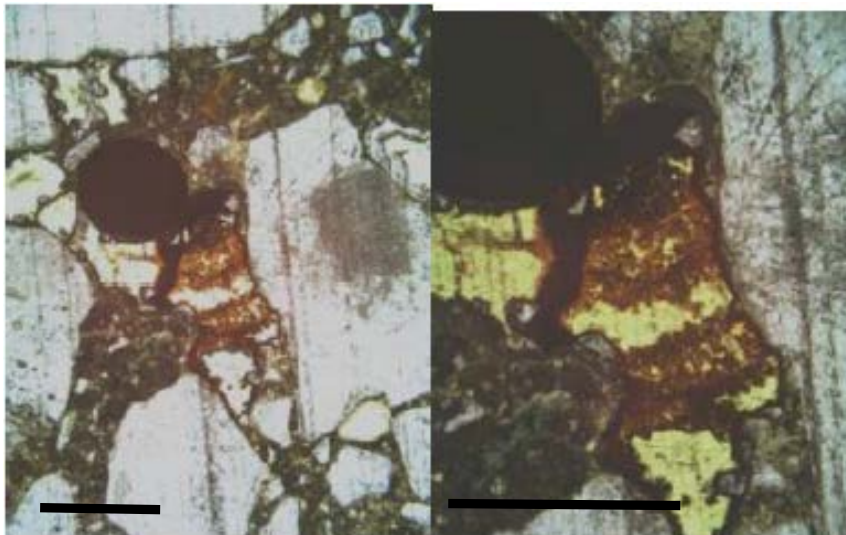
V3.32. Ekebergtunnelen, handstykke 1706. Kraftig utluta sprøytebetong. Porer og sprekker er delvis fylt med kalsitt. Betongalder 22 år. Målestokk øvre bilde = 2,5 mm. Foto: Mannvit.



V3.33. Ekebergtunnelen, Kjerne 1700-24. Litt dårleg heft mot alunskifer utan omvandlingar mot bergmassen. Betongalder 22 år. Målestokk = 2,5 mm. Foto: Mannvit.

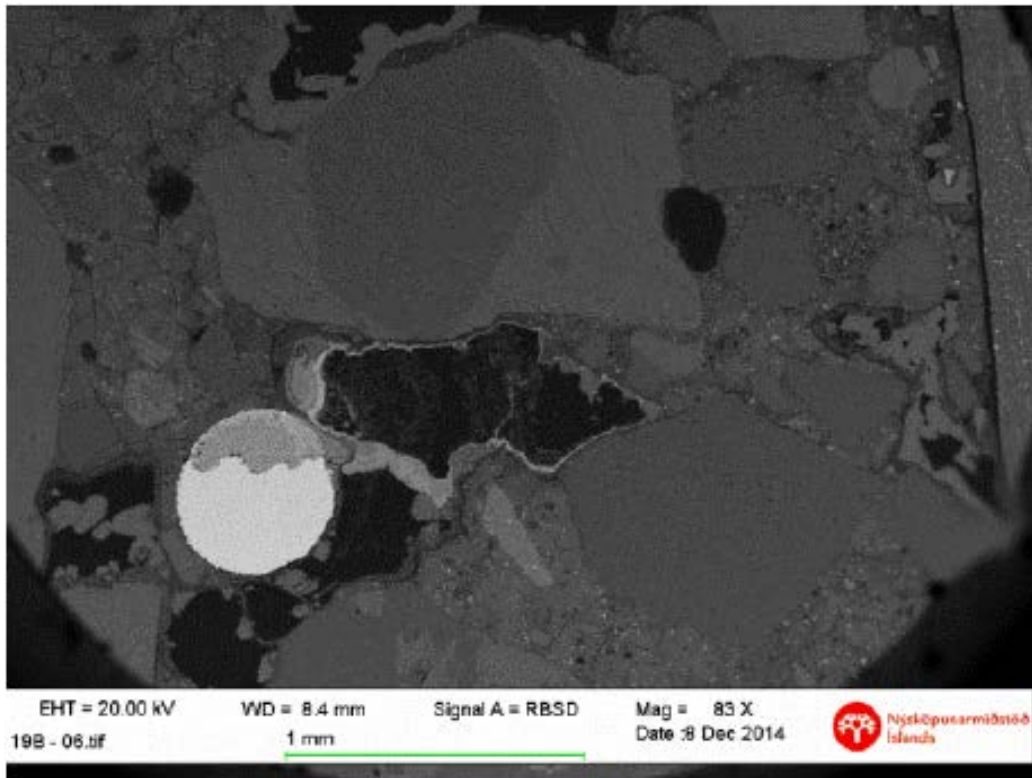


V3.34. Ekeberg tunnelen, Kjerne 1825 mot alunskifer (svart: øvre bilde) har mikroriss og spredde utfellingar av thaumasitt. Relativt intakt område. Betongalder 22 år. Målestokkar = 1 mm. Foto: Mannvit.

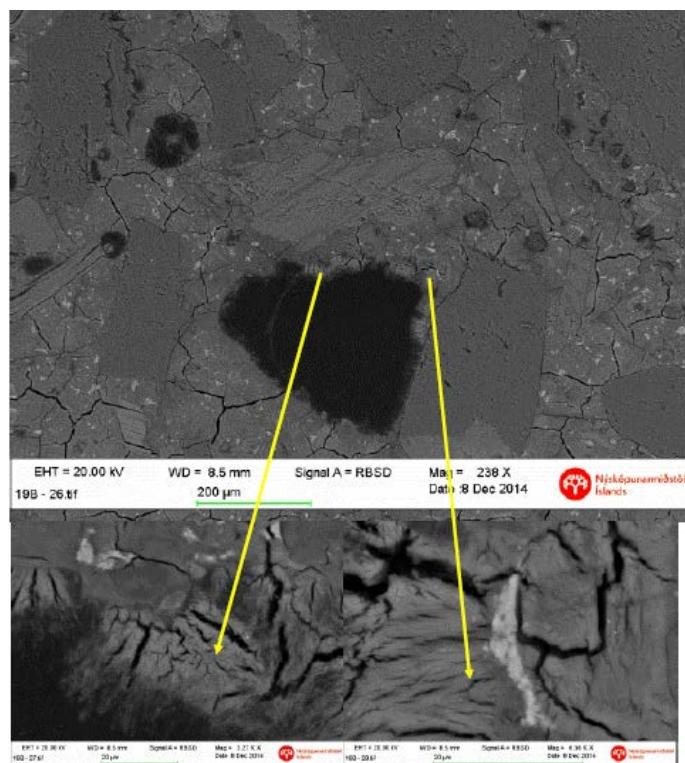


V3.35. Destruktiv stålfiberkorrosjon i Kjerne 1825 mot alunskifer (tynnslip 19 botn). Målestokkar = 0,5 mm. Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.

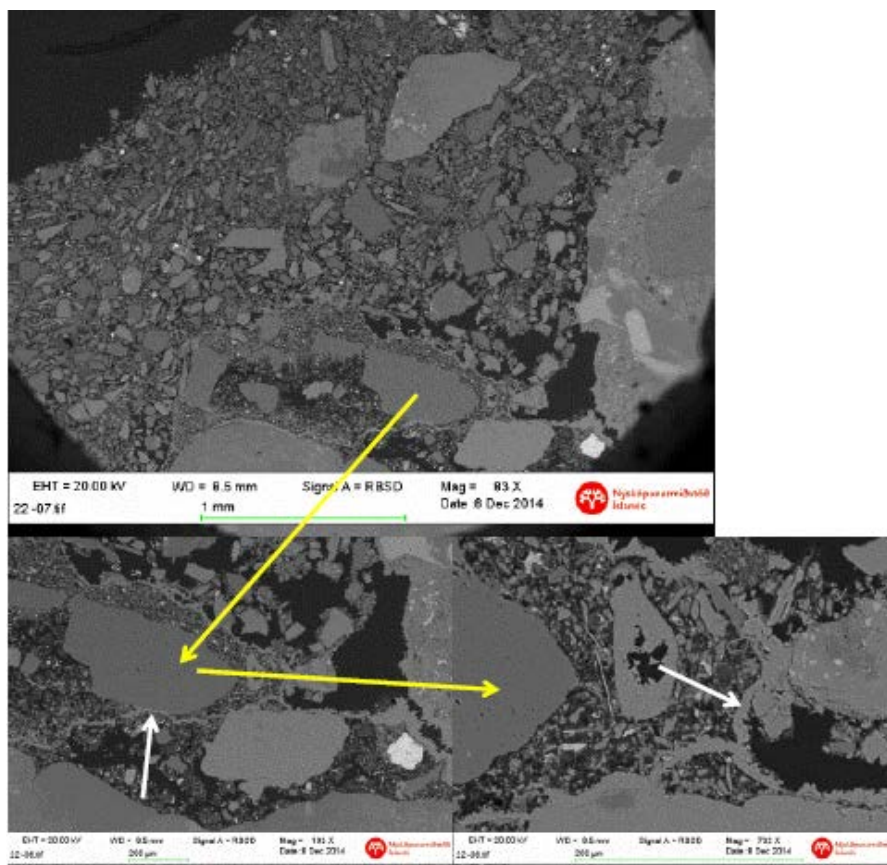




V3.36. Kjerne 1825. Destruktiv stálfiberkorrosjon observert i SEM. Intakte område er lyse, med grå område som indikerer korrosjon. Betongalder 22 ár. Foto: Mannvit.



V3.37. Kjerne 1825 med thaumasitt utfelt i luftpore. Betongalder 22 ár. Foto: Mannvit.



V3.38. Handstykke frå pelnummer 1825. Sementpastaen er i stor grad vaska ut. SEM-analysar viste restar av pasta saman med thaumasitt, kalsitt og ettringitt. Destruktiv fiberkorrosjon. Betongalder 22 år. Foto: Mannvit.

### Sprøytebetongresept – Ekeberg tunnelen

Resept for Ekeberg tunnelen oppsummert i Tabell 4.12 er basert på informasjon frå Ole Fromreide i 2000 (sjå vedlagd notat frå samtale i 2000). Er ikkje komplett med tanke på tilsetningsstoff. Undersøkingar av intakt sprøytebetong ved fluorescensmetoden tyder på at det opprinneleg v/b- forholdet varierte frå  $< 0,45$  og  $0,45$  til  $0,50$  (Mannvit 2014d, Tabell II 46). Vi reknar derfor med v/b  $\sim 0,45$ . (B45, M45).

### Analyse av vatn – Ekeberg tunnelen

**2000.** BRE analyserte to prøver samla i 2000 ved pelnummer 1730 (sjå BRE rapport P00/1570/R3 under overskrifta «Samarbeidsprosjekt med Building Research Establishment», vedlagt nedanfor).

**2014.** Analyseresultat frå prøve samla frå lekkasjevatt på heftsona ved pelnummer 1815. Prøva var ikkje stor nok for å analysere ioner. Prøva blei samla inn rett ved området er vist i Figur 4.40.

## Certificate

Project: 1510001389/50

Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Sondre Meland  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO

Sample information:	Statens vegvesen Vegdirektoratet, Tunnel wash water, Kjemiske analyser av kontaminert vegv		
Reference:	prosjektnummer: 603245	Date of sampling:	
Place of sampling:	Ekeberg 1	Date of arrival:	3.11.2014
		Research started	3.11.2014

## Water analyce

Analysis	14SL08122	Unit	Method
Pretreatment, filtration	ok		
pH, field	11,9		
Metals 1 diss	ok		
Aluminium (Al), diss	180	µg/l	RA3000*
Arsenic (As), diss	1,8	µg/l	RA3000*
Barium (Ba), diss	100	µg/l	RA3000*
Boron (B), diss	<20	µg/l	RA3000*
Mercury (Hg), diss	0,023	µg/l	RA3000*
Phosphorus (P), diss	370	µg/l	RA3000
Cadmium (Cd), diss	0,24	µg/l	RA3000*
Potassium (K), diss	85000	µg/l	RA3000*
Calcium (Ca), diss	200000	µg/l	RA3000*
Cobalt (Co), diss	<0,50	µg/l	RA3000*
Chromium (Cr), diss	4,4	µg/l	RA3000*
Copper (Cu), diss	14	µg/l	RA3000*
Lead (Pb), diss	<0,50	µg/l	RA3000*
Magnesium (Mg), diss	<50	µg/l	RA3000*
Manganese (Mn), diss	<1,0	µg/l	RA3000*
Molybdenum (Mo), diss	1800	µg/l	RA3000*
Sodium (Na), diss	110000	µg/l	RA3000*
Nickel (Ni), diss	5,4	µg/l	RA3000*
Silicon (Si), diss	1800	µg/l	RA3000
Iron (Fe), diss	19	µg/l	RA3000*
Sulfur (S), diss	96000	µg/l	RA3000
Zinc (Zn), diss	<5,0	µg/l	RA3000*
Strontium (Sr), diss.	2100	µg/l	RA3000
Thorium (Th), diss.	<0,20	µg/l	RA3000
Uranium (U), diss	0,19	µg/l	RA3000*
Vanadium (V), diss	<1,0	µg/l	RA3000*

The results apply solely to the samples analyzed. The certificate may only be copied as whole.

Ramboll Analytics

# Certificate

Project: 1510001389/50

Date: 17.11.2014

2/2



\* Method is accredited by the FINAS. Uncertainty of measurement is reported if requested.

## Ramboll Analytics

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Ilpo Lahdelma".

Ilpo Lahdelma  
M.Sc., Chemist, +358 40 074 5295

The certificate has been accepted electronically.

**Delivery** per.hagelia@vegvesen.no

# Svardalstunnelen

## Tunneldokumentasjon.

Det blei i august 2000, dagen før opning, etablert monitorlokalitetar i Svartdalstunnelen. Oppfølging fram til 2014 viser tydeleg utvikling i retning av aukande nedbryting i alunskifermiljøet.

2000

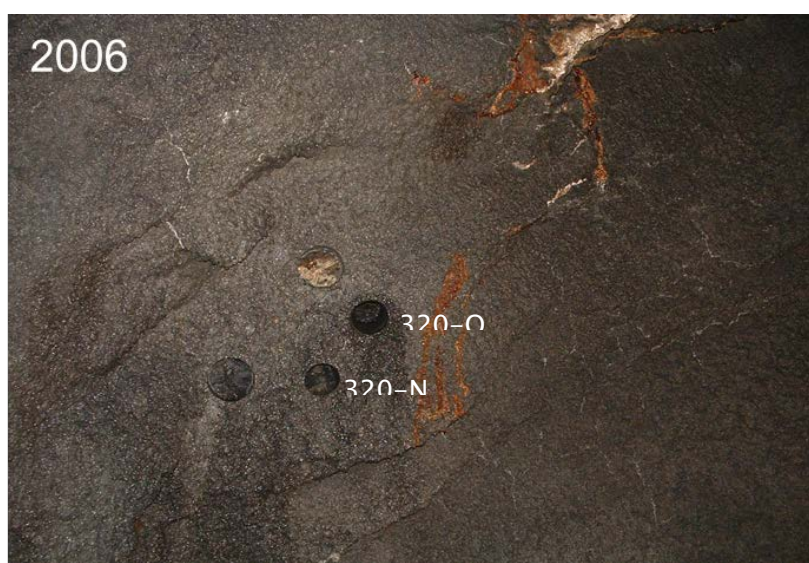


V3.39. Svartdalstunnelen, pelnummer 320, retning Ryen, i tidlegare verkstadnisje. Lokalisering av kjerner for petrografisk undersøking. Kvit utfelling undersøkt ved XRD (sjå diffraktogram merka 480 under) er kalsitt (kalsiumkarbonat) og thenarditt (natriumsulfat). Kjerne 320a hadde litt permeabel heftzone. Det blei registrert eit begynnande thaumasitt sulfatangrep og Popcorn kalsitt, men i lite omfang i begge kjernene (Hagelia 2011b). Betongalder 1,5-2 år. Foto: Claus K Larsen.



V3.40. Svartdalstunnelen, pelnummer 370 i hovudtunnelen (retning mot Ryen). Lokalisering av kjerner for petrografisk undersøking. Kjerne 370a hadde permeabel heftzone og viser litt rustforvitring på grunn av sulfidoksidasjon. Kjerne 370b hadde svært god heft mot uforvittra alunskifer. Betongalder 1,5-2 år. Foto: Claus K Larsen.

2006



V3.41. Svartdalstunnelen, pelnummer 320 i verkstadsnisje (retning mot Ryen). Lokalisering av nye kjerner for petrografisk undersøkning. Endringar sidan 2000: rustutfellingar og lyse utfellingar av kalsitt og sulfatmineral. Gulbrun utfelling av forvittringsmineral (jarositt m.m.) på alunskifer i tidlegare kjernehol 320a vitnar om sulfidoksidasjon og utvikling av svovelsurt vatn lokalt. Petrografiske undersøkingar viste at betongen elles var omtrent i same forfatning som i 2000, utan tydeleg vidareutvikling av sulfatangrepet. (Hagelia 2011b). Betongalder omkring 8 år. Foto: Per Hagelia.



V3.42. Sprøytebetongen i verkstadsnisja ved pelnummer 320 hadde litt fleire utfellingar av rustutfelling og kalk/sulfatmineral i områda omkring monitorlokaliteten, men blei ikkje vurdert å vere i særleg dårleg stand i 2006. På dette tidspunktet kunne ein få inntrykk av at sulfatangrepet hadde «flata ut». Betongalder omkring 8 år. Foto: Per Hagelia.



V3.43. Svartdalstunnelen, pelnummer 370 i hovudtunnelen. Lokalisering av nye kjerne for petrografisk undersøkingar. Gulbrun utfelling av forvittringsmineral (jarositt m.m.) på alunskifer i tidlegare kjernehol 370a (oppe til venstre) vitnar om sulfidoksidasjon og utvikling av svovelsurt vatn lokalt. Ny kjerne 370V hadde permeabel og syrepåverka heftsoner. Petrografiske undersøkingar viste at betongen var omtrent i same forfatning som i 2000 utan tydeleg vidareutvikling av sulfatangrepet (Hagelia 2011b). Betongalder omkring 8 år (Hagelia 2011b). Foto: Per Hagelia.

## 2014

Sprøytebetongen i nisja ved pelnummer 320 var nå svært sterkt påverka av sulfatangrep I taket var det lange kalkstalaktittar overalt. Området blei undersøkt visuelt med uttak av ei prøve for identifikasjon av sekundære mineral (sjå under).



Monitorområde frå år 2000.

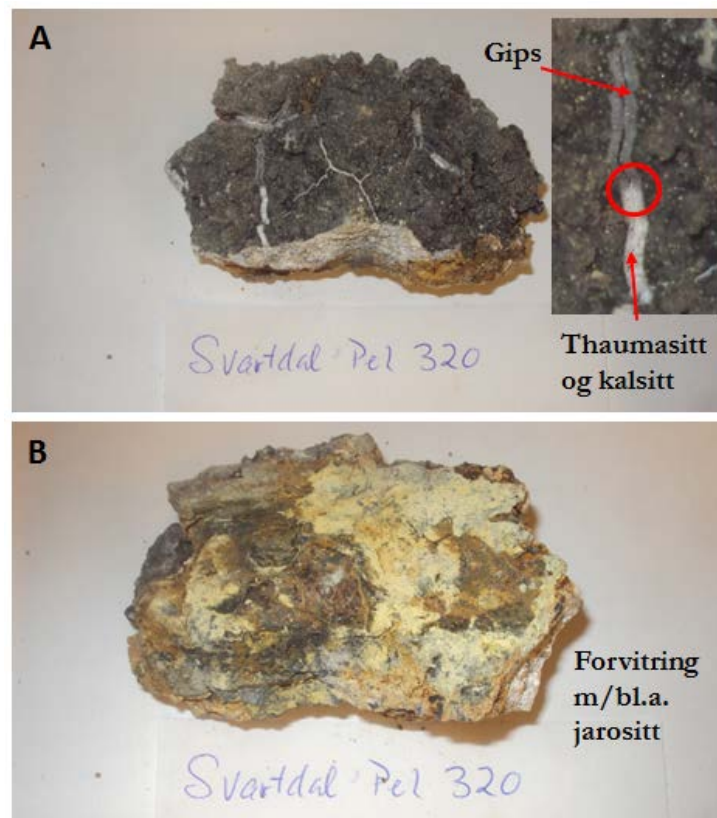
Fram til 2006 var dette ok betong (8 år)

**I 2014: syrepåverknad på heftsona fører til avskaling (senking av grunnvatnet og luft i tunnelrommet gir sulfidoksidasjon)**

V3.44. Sprøytebetongen i nisja ved pelnummer 320 var i full nedbryting med fleire eksempel på avskaling langs heftsona til 3-5 cm tykk betong. Heftsona hadde rusta og gulaktige forvittringsmineral som vitnar om sulfidoksidasjon og sterk påverknad av svovelsurt vatn. (venstre: nedre bildekant omkring 1,5 meter). Det var til dels omfattande krakelering med utfelling av lyse mineral på sprekkane, samt gulbrune utfellingar i svært nedbroten betong (høgre: nedre bildekant omkring 40 cm). Betongalder 16 år. Foto: Per Hagelia.



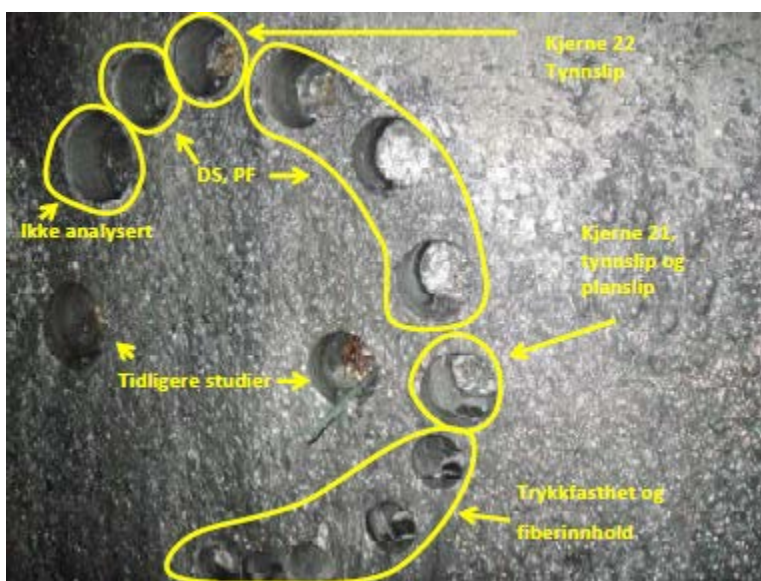
V3.45. Kraftig avskaling og nedfall av tynn sprøytebetong i nisja ved pelnummer 320. Merk omfattande utfelling av rust og gule forvitningsmineral (jarositt m.m.) på overflata, men også på heftsona. Betongalder 16 år. Foto: Mannvit.



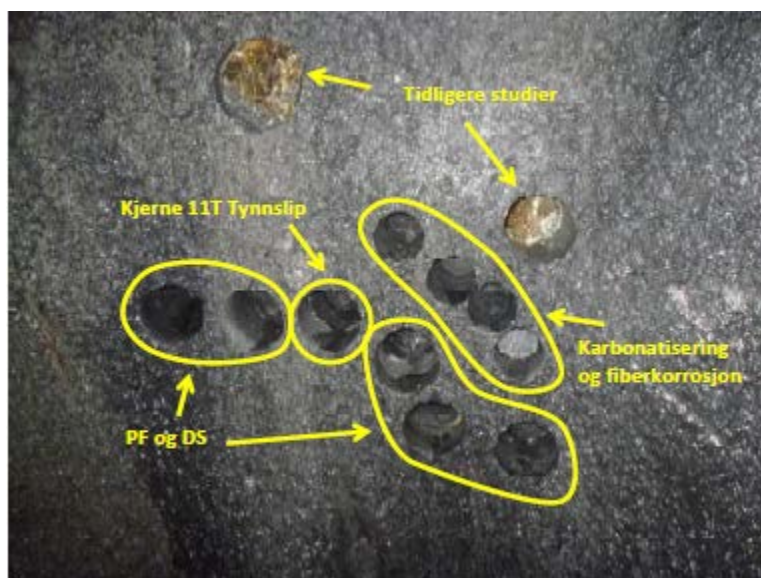
V3.46. Prøve av tynn sprøytebetong med typisk krakelering. A: Ytterflata med utfellingar av gips, thaumasitt og kalsitt på riss og sprekker. Gips som vekser på sprekkaner fører til sprenging ved utfelling. Kombinasjonen av gips, thaumasitt og kalsitt vitnar om kombinert syre og sulfatangrep. B: Baksida mot heftsona hadde omfattande utfelling av forvitningsmineral med bl.a. jarositt (bare stabil ved pH på ca. 2-4). Svovelsyra angriper og svekker hefteegenskapane. Foto: Per Hagelia.



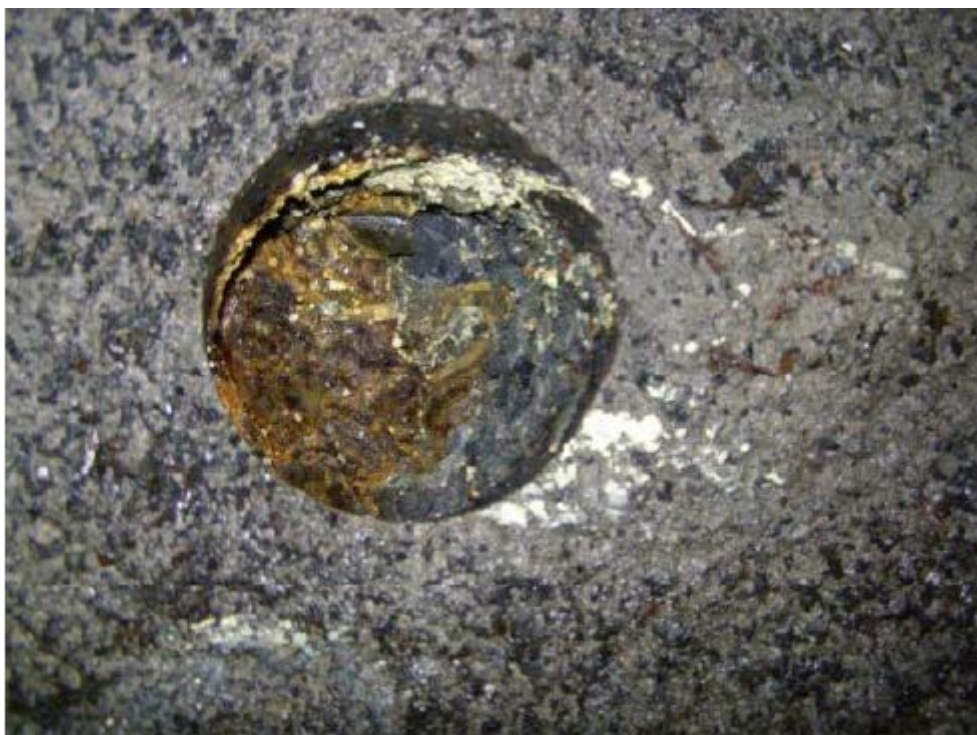
Utboring av kjerner var avgrensa til hovudtunnelen omkring pelnummer 370-380 på same plassar som i 2000 og 2006.



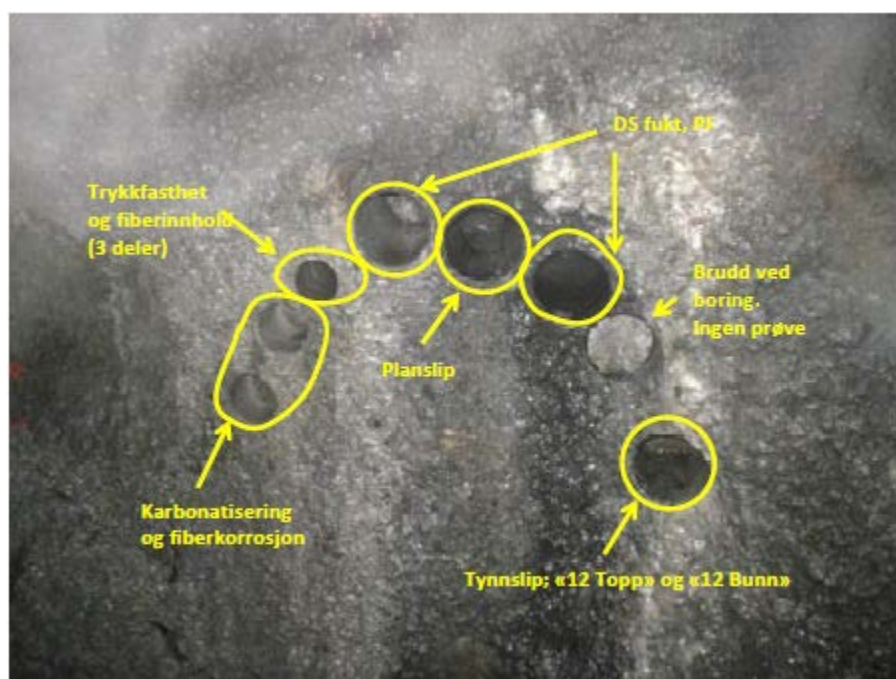
V3.47. Lokalisering av nye kjerner på pelnummer 370 i område med tidlegare utboring i 2000 og 2006, med hhv. kjerne 370b og 370V. Foto: Mannvit.



V3.48. Lokalisering av nye kjerner på pelnummer 370 i område med tidlegar utboring i 2000 og 2006, med hhv. av kjerne 370a og 370H. Foto: Mannvit.



V3.49. Detalj med jarosittførende utfelling på heftsona i tidlegare kjerne 370a, rapportert av Mannvit (2015d). Foto: Mannvit.



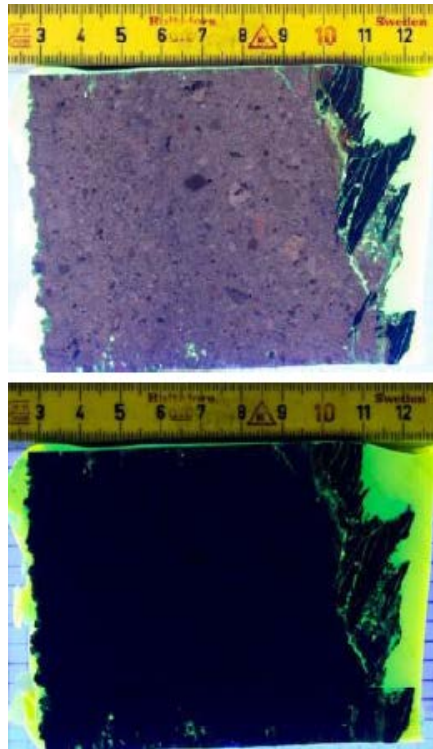
V3.50. Lokalisering av kjerner i nytt område på pelnummer 385 (retning Ryen på same side som tidlegare utboringar). Betongalder 16 år. Foto: Mannvit.



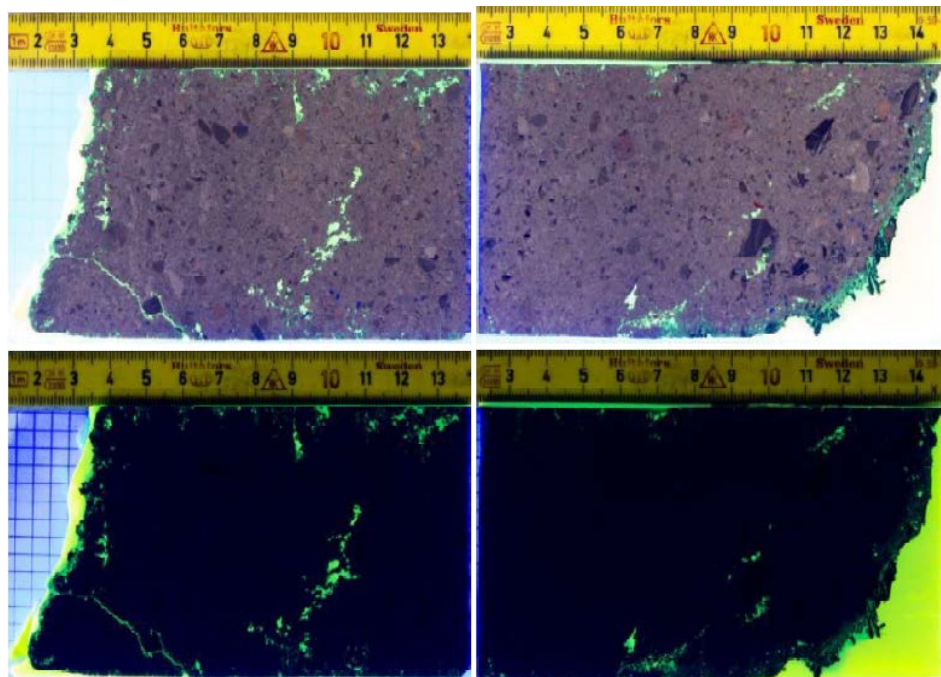
V3.51. Kjerne 370-1 var utan karbonatisering, verken i overflata eller mot heftsona. Dokumentasjonen tyder på gode heftegenskapar. Betongalder 16 år. Foto: Mannvit.



V3.52. Kjerne 385-3. Overflatekarbonatisering inntil 1-2 mm, men med litt diffus karbonatisering ned til 10-20 mm. Kjernebrot, kontakt mot berg er ikkje bevart. Betongalder 16 år. Foto: Mannvit.



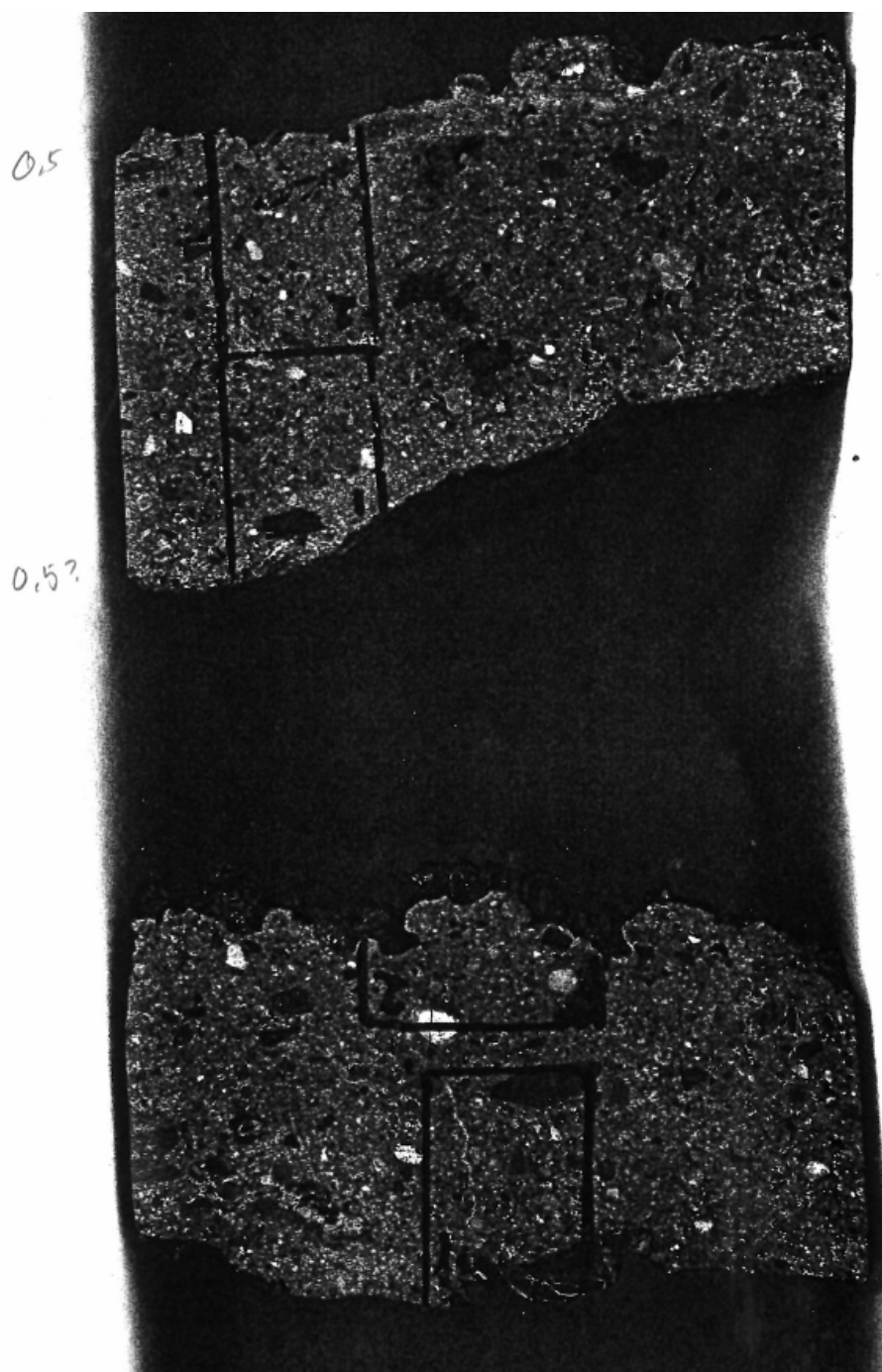
V3.53. Fluorescensimpregnert planslip av kjerne 370-1 i normalt lys og UV-lys. Betongen verkar homogen, men har litt permeabel heftsone mot alunskifer (høgre). Betongalder 16 år. Foto: Mannvit.



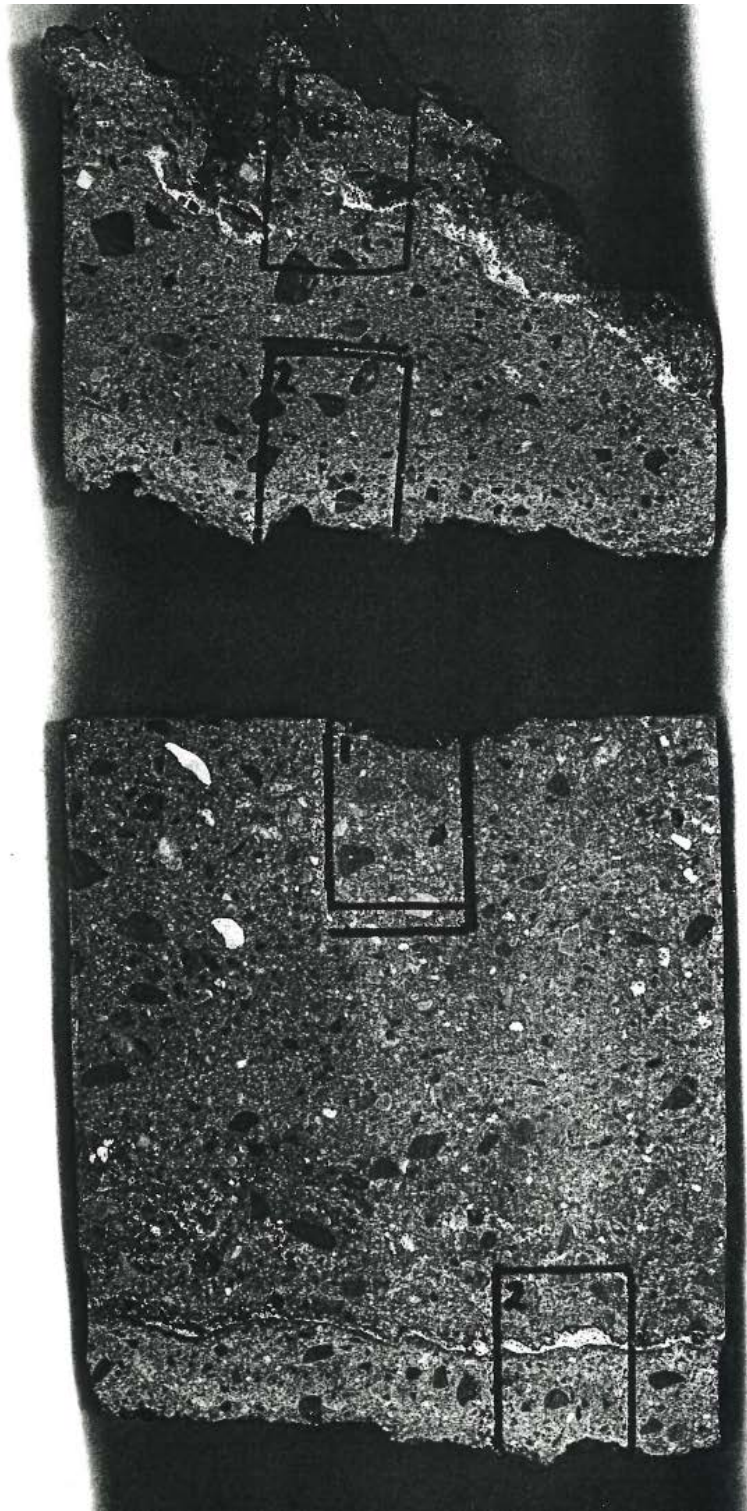
V3.54. Fluorescensimpregnert planslip av kjerne 385-9 i normalt lys og UV-lys. Venstre halvdel mot tunnelrommet, høgre halvdel mot berg. Innslag av porøse område og riss. Betongalder 16 år. Foto: Mannvit.

## Kjerneprøver med tynnslip

2000



V3.55. Kjerneprøvene 320A (øverst) og 320B (nedst) med tynnslipområda. Betongalder 1,5-2 år.



V3.56. Kjerneprøvene 370A (øverst) og 370B (nedst) med tynnslipområda. Betongalder 1,5-2 år.

2006



V3.57. Kjerneprøvene 370V og 370H med tynnslipområda. Betongalder 8 år. Foto: Per Hagelia.

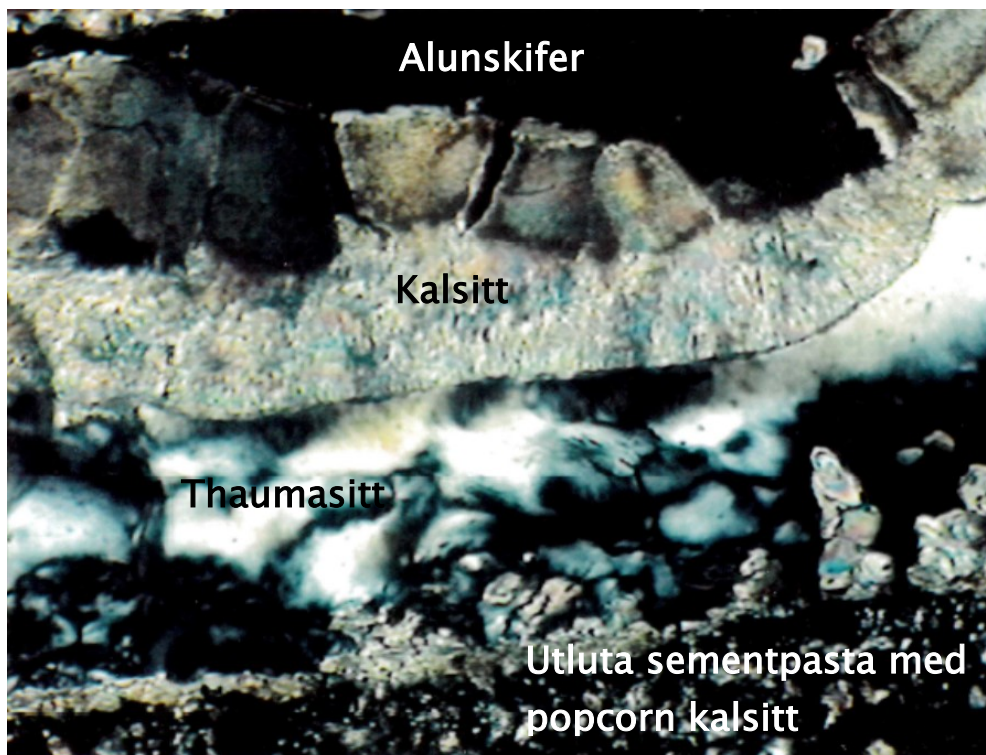


V3.58. Kjerneprøvene 320 N og 320 O med tynnslipområda. Betongalder 8 år. Foto: Per Hagelia

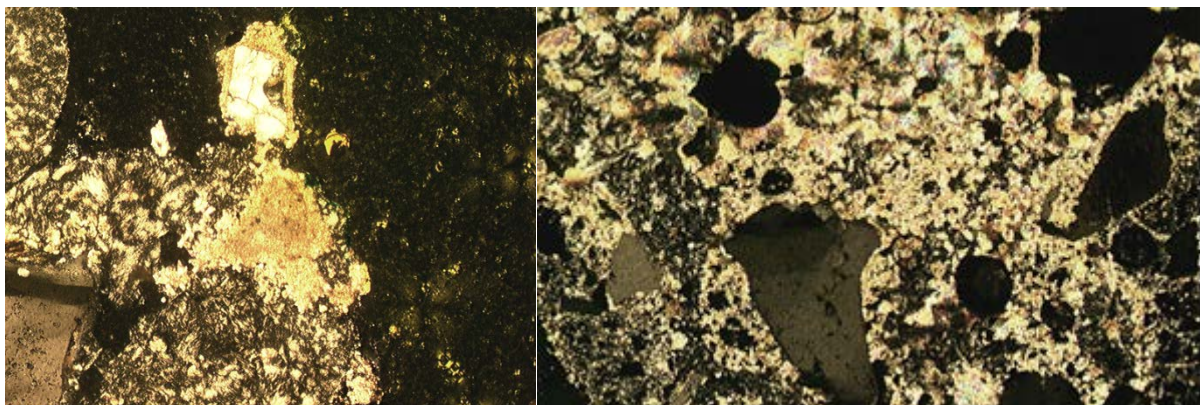


## Eksempel frå mikroskopering av tynnslip

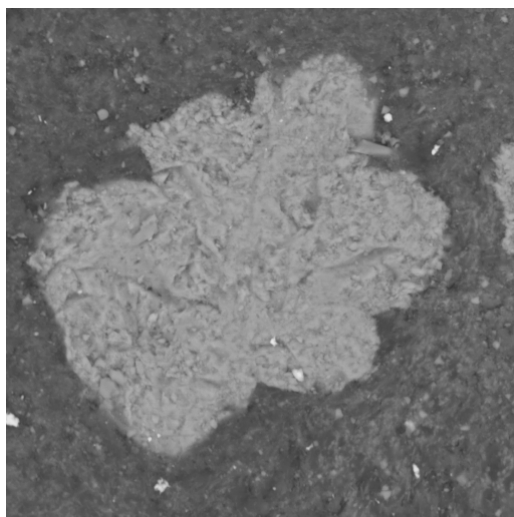
2000. Hovudtrekka frå pelnummera 320 og 370 er rapportert av Hagelia mfl. (2001, 2003).



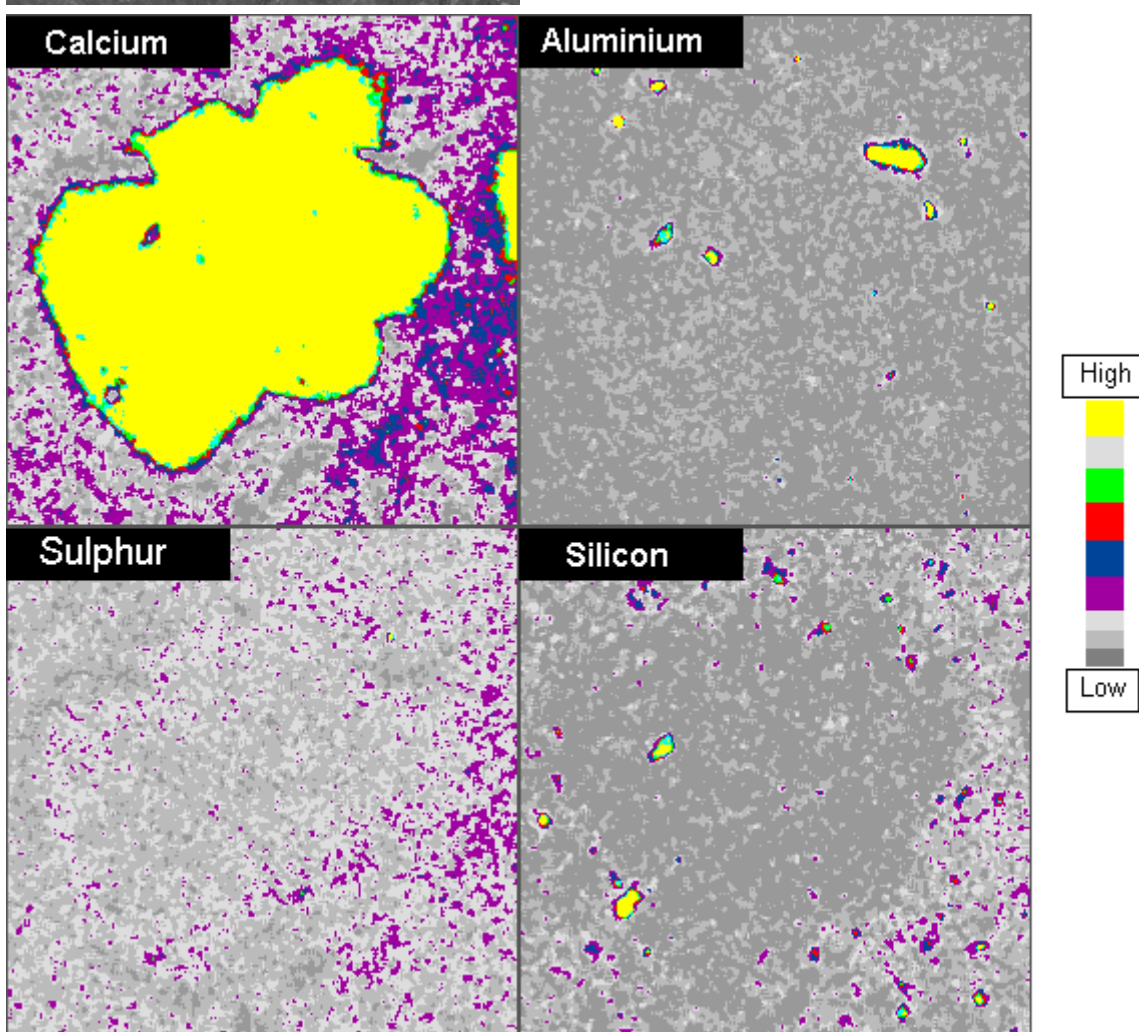
V3.59. Permeabel heftsone med utfellingar: 1) relativt grovkorna blokkforma kalsitt mot alunskifer (øvt), 2) finkorna kalsitt (delvis fibrig), 3) thaumasitt (grå-kvit), 4) kalsitt (spredde korn). Sementpastaen (nedst) er omvandla er utluta i kalsium (mørk) med utfelling av Popcorn kalsitt i pasta og delvis inn i heftsone mot thaumasitt. Prøve 370B Svartdalstunnelen. Betongalder 1,5-2 år. Tynnslip/dobbeltpolarisert lys. Foto: Ted Sibbick.



V3.60. Svartdalstunnelen (venstre) og Åkebergveien (høgre) med kalsitt (K) som erstattar thaumasitt (T). Nedbryting av thaumasitt til kalsitt utan samtidig utfelling av gips betyr at thaumasitt-sulfatet blir frigjort og igjen blir aktivt. Betongalderar, hhv 1,5-2 år og 13 år.. (Hagelia mfl. 2001). Tynnslip/dobbeltpolarisert lys. Foto: Per Hagelia.



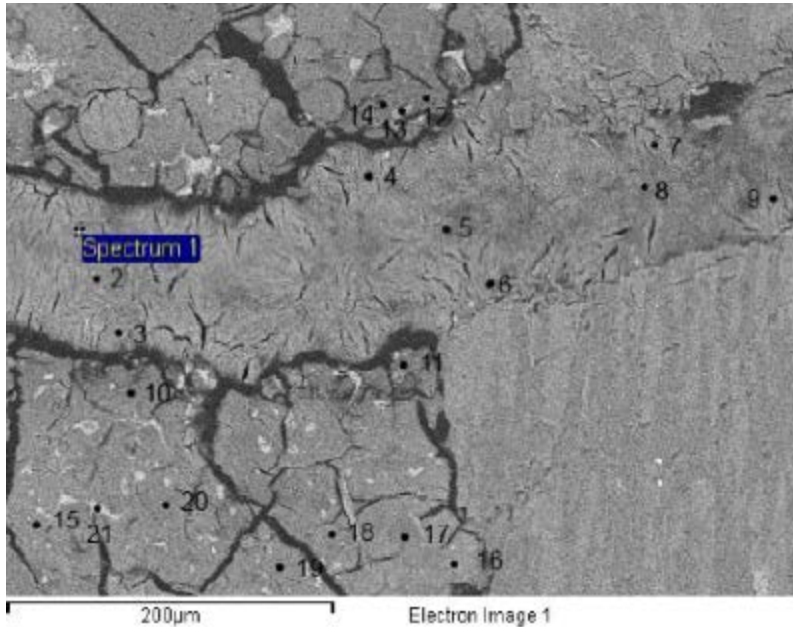
10um



V3.61. Svartdalstunnelen, Kjerne Core 370a (BRE prøve P00/1570/46). Elementfordeling (X-ray mapping) av Popcorn kalsitt i porøs thaumasitt. Betongalder 1,5-2 år. Utført av Derek Metcalf, BRE-Garston, Watford.

**2006.** Hovudtrekka frå pelnummera 320 og 370 er rapportert av Hagelia (2011b).

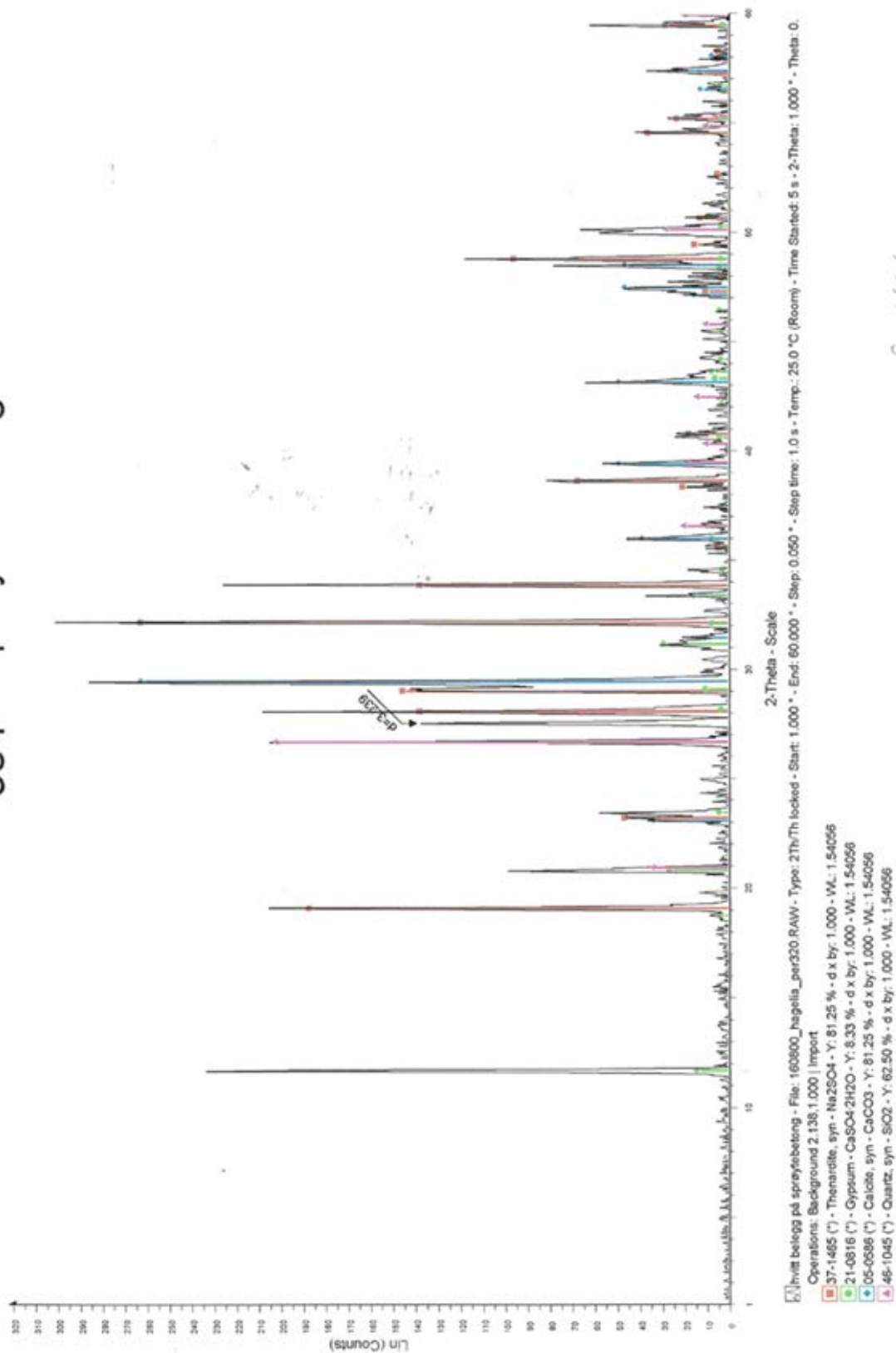
**2014.** Mannvit (2015d) rapporterte detaljert frå pelnummer 370-385. Det blei utført svært mange mikrokjemiske analysar som reiser faglege problemstillingar knytta til kjemiske reaksjonar i sulfatinfisert betong, men er ikkje tema i denne rapporten. V.56



*V3.62. Svardalstunnelen, Kjerne 370-a med thaumasitt sulfatangrep. Betongalder 16 år. Foto: Mannvit.*

480

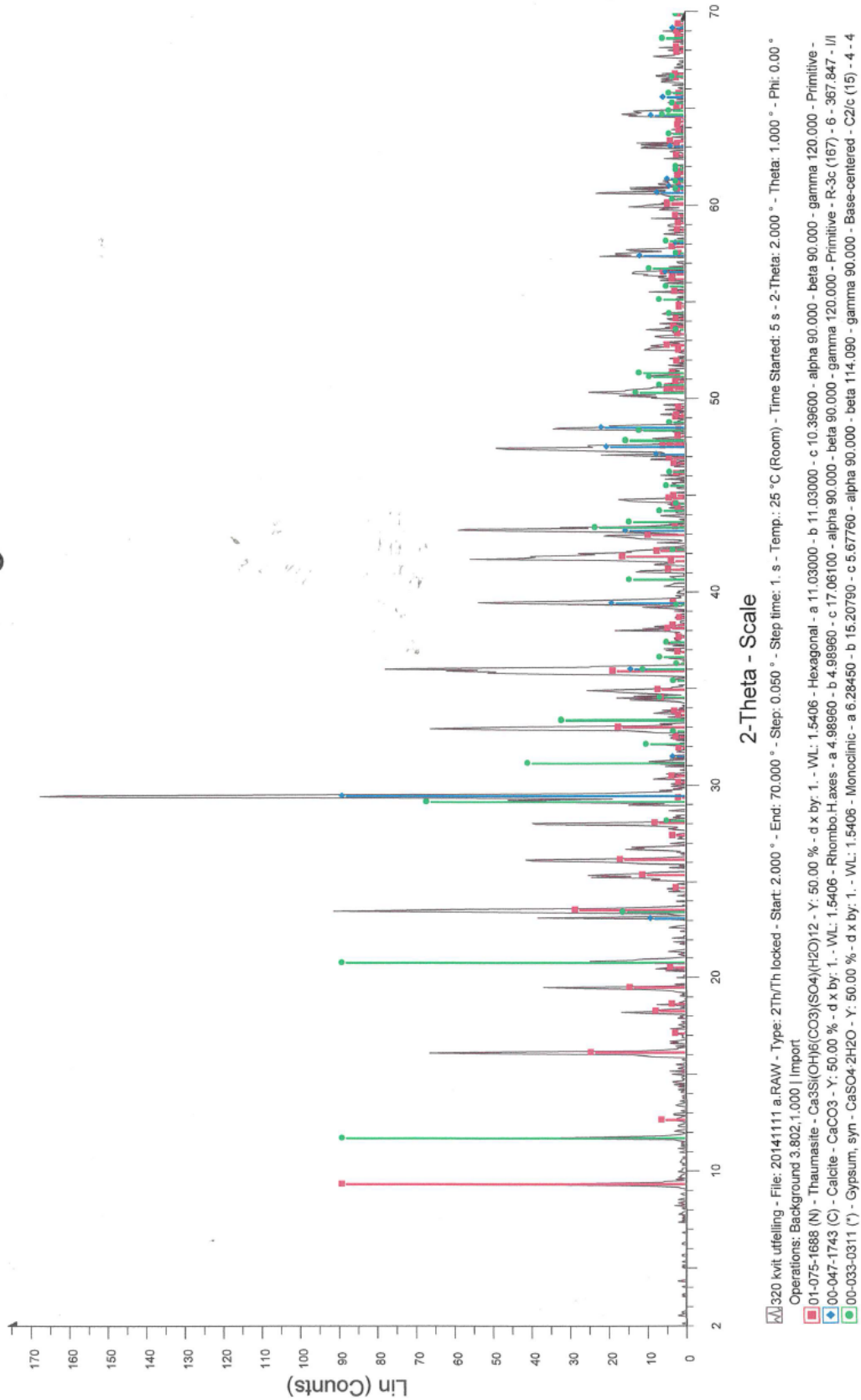
## hvitt belegg på sprøytebetong



Svartdalstunnelen

V3.63. Svartdalstunnelen, pelnummer 320 (nisje) i år 2000. Betongalder 1,5-2 år. Kvit utfelling på riss i sprøytebetong av natriumsulfat (thenarditt), gips og kalsitt. Utført av Hans-Jørgen Berg, Naturhistorisk museum, Universitet i Oslo.

# 320 kvit utfelling



V3.64. Svartdalstunnelen, pelnummer 320 (nisje) i år 2014. Betongalder 16 år. Kvit utfelling på riss i sprøytebetong av natriumsulfat (thenarditt), gips og kalsitt. Utført av Harald Foldvik, Naturhistorisk museum, Universitet i Oslo.

## Undersøking i samband med rehabiliteringsprosjektet i 2016

Røntgenopptak av laus betong samla inn av Christian Rønneberg (Aas-Jacobsen) og Knut Boge (Geovita) i 2016 viste at det meste av sementpastaen var vaska vekk. Prøvene (nr. referer til pelnummer) inneheld kalsitt som mest sannsynleg er danna ved karbonatisering. Det var også litt svovelkis i to av prøvene, som truleg kjem frå alunskiferen. Alle opptaka viser nokre svært små toppar i området mellom 2-theta = 29-32° som tyder på svært små restar av C-S-H.



Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi  
Institutt for geologi og bergteknikk

Vår dato  
13.6.2016  
Deres dato  
6.6.2016

Vår referanse  
LT / 16-068  
Deres referanse  
11443

1 av 5

Statens vegvesen Vegdikertoratet  
Per Hagelia  
Postboks 8142 Dep.  
0033 Oslo

### XRD-analyse av 4 prøver av utfellinger.

Analysene er utført på en Bruker D8 ADVANCE. DIFFRAC.SUITE.EVA programvare i kombinasjon med databasen PDF-4+ foreslår følgende mineralfaser.

Rietveld (Topas 4) er brukt til mineral-kvantifisering på 4 prøver.

Tilslagsmateriale større enn 0,295 mm er fjernet fra prøvene før analyse.

Prøve mrk.	540V	587V	825V	922H
J.nr.	160303	160304	160305	160306
Kvarts	37 %	38 %	26 %	41 %
Plagioklas	18 %	19 %	15 %	18 %
Alkalifeltspat	11 %	8 %	19 %	10 %
Pyroksen	2 %	2 %	1 %	2 %
Amfibol	5 %	6 %		
Glimmer	9 %	12 %	13 %	8 %
Kloritt	11 %	10 %	24 %	12 %
Kalsitt	9 %	5 %	2 %	8 %
Dolomitt				1 %
Svovelkis			< 1 %	< 1 %

Med hilsen

Laurentius Tjihuis  
Overingeniør

Torill Sørlokk  
Overingeniør

Postadresse  
7491 Trondheim

Org.nr. 974 767 880

E-post:  
igb-info@ivt.ntnu.no

<http://www.ivt.ntnu.no/igb/>

Besøksadresse  
Sem Sælunds veg 1  
Gleshaugen

Telefon  
+ 47 73 59 48 10  
Telefaks  
+ 47-73-59 48 14

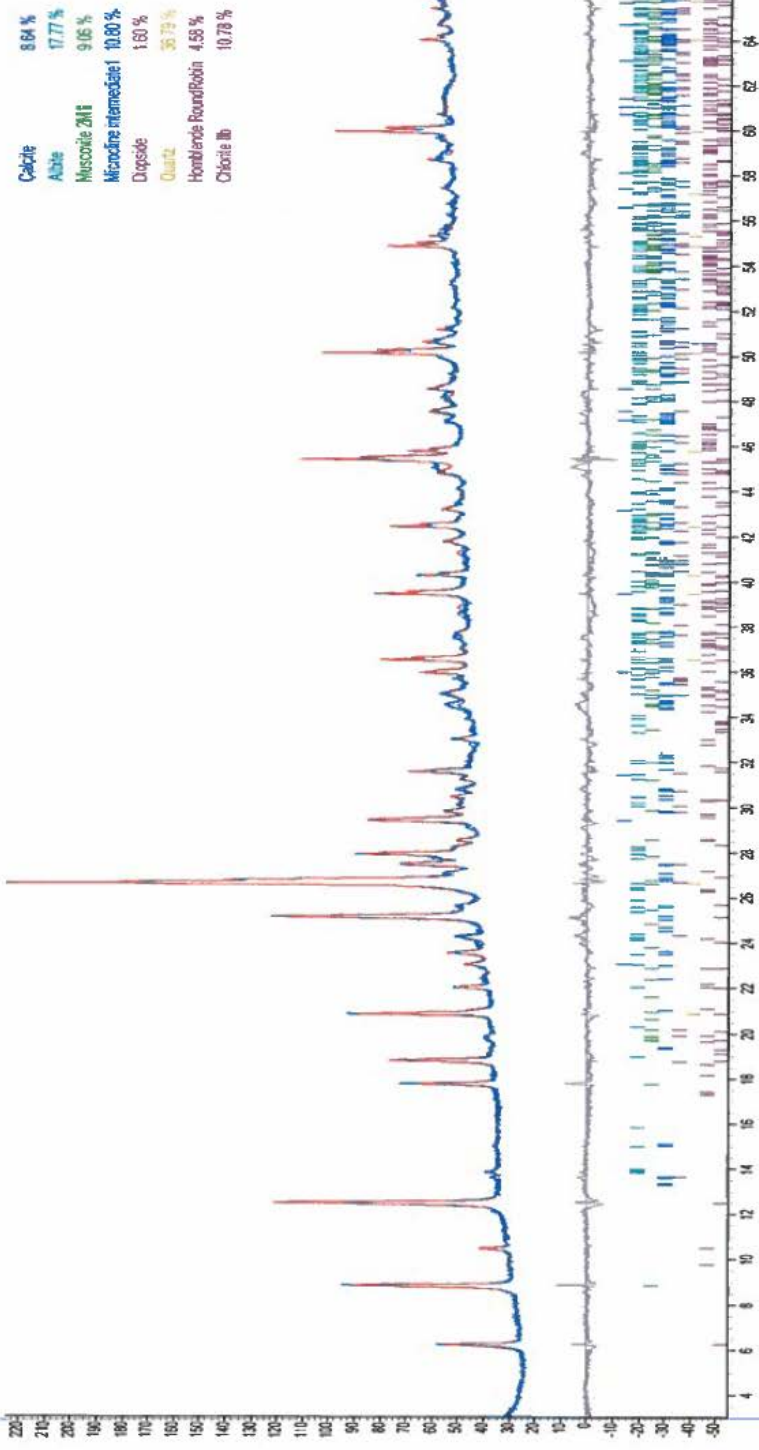
Laurentius Tjihuis  
Mobil: +47 91 89 71 34

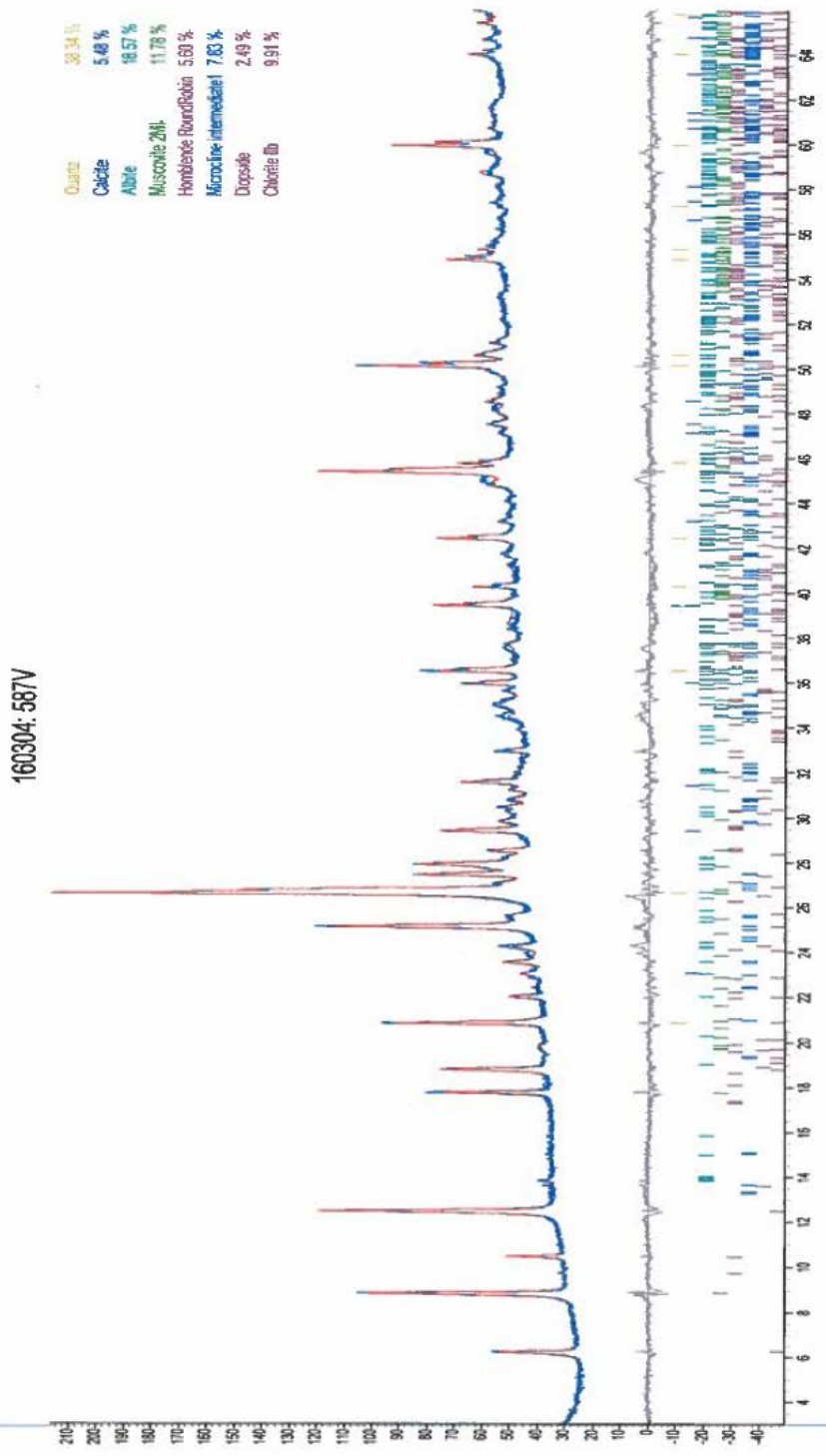
All korrespondanse som inngår i saksbehandling skal adresseres til saksbehandlende enhet ved NTNU og ikke direkte til enkeltpersoner. Ved henvendelse vennligst oppgi referanse.

Vår dato 13.6.2016 Vår referanse LT / 16-068

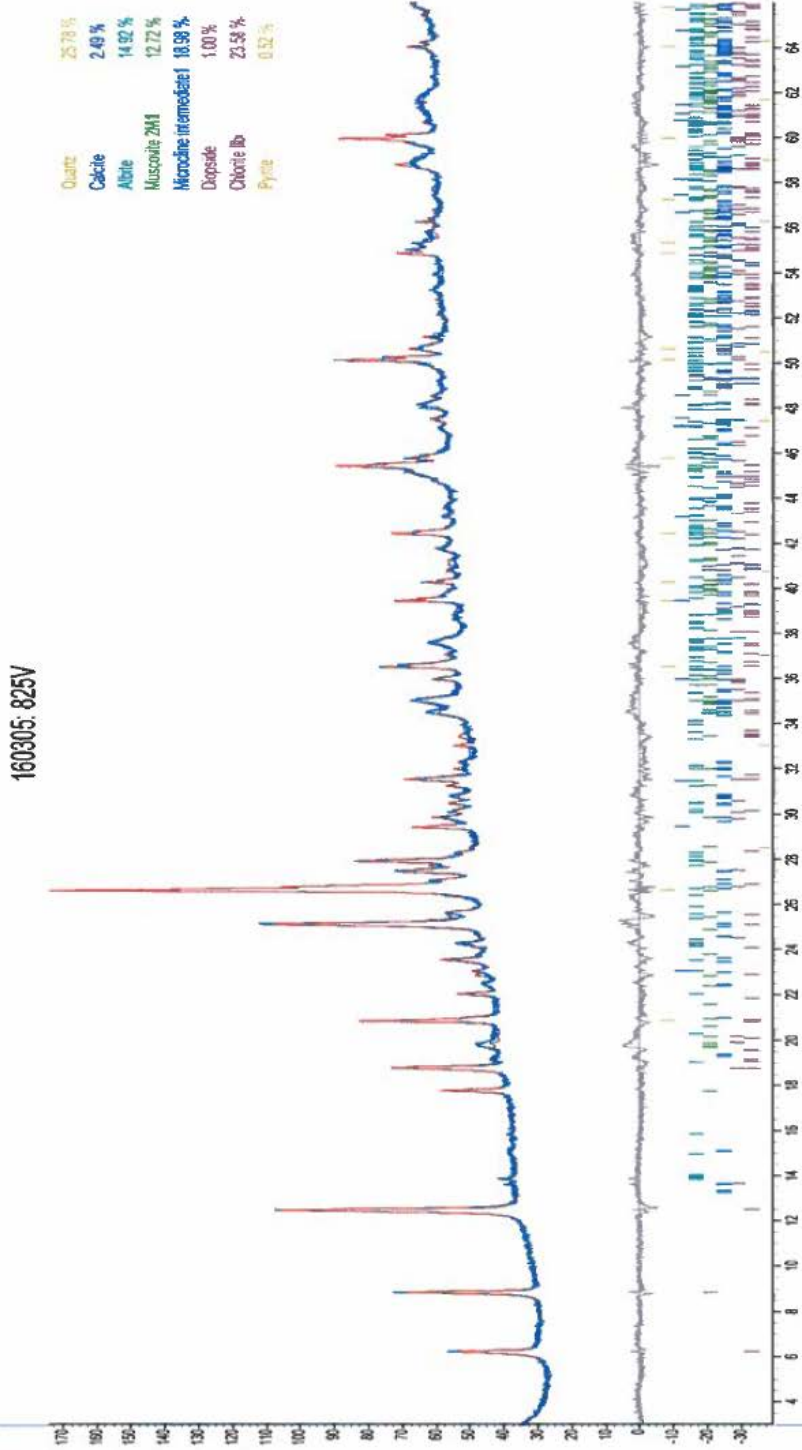
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

160303: 540V



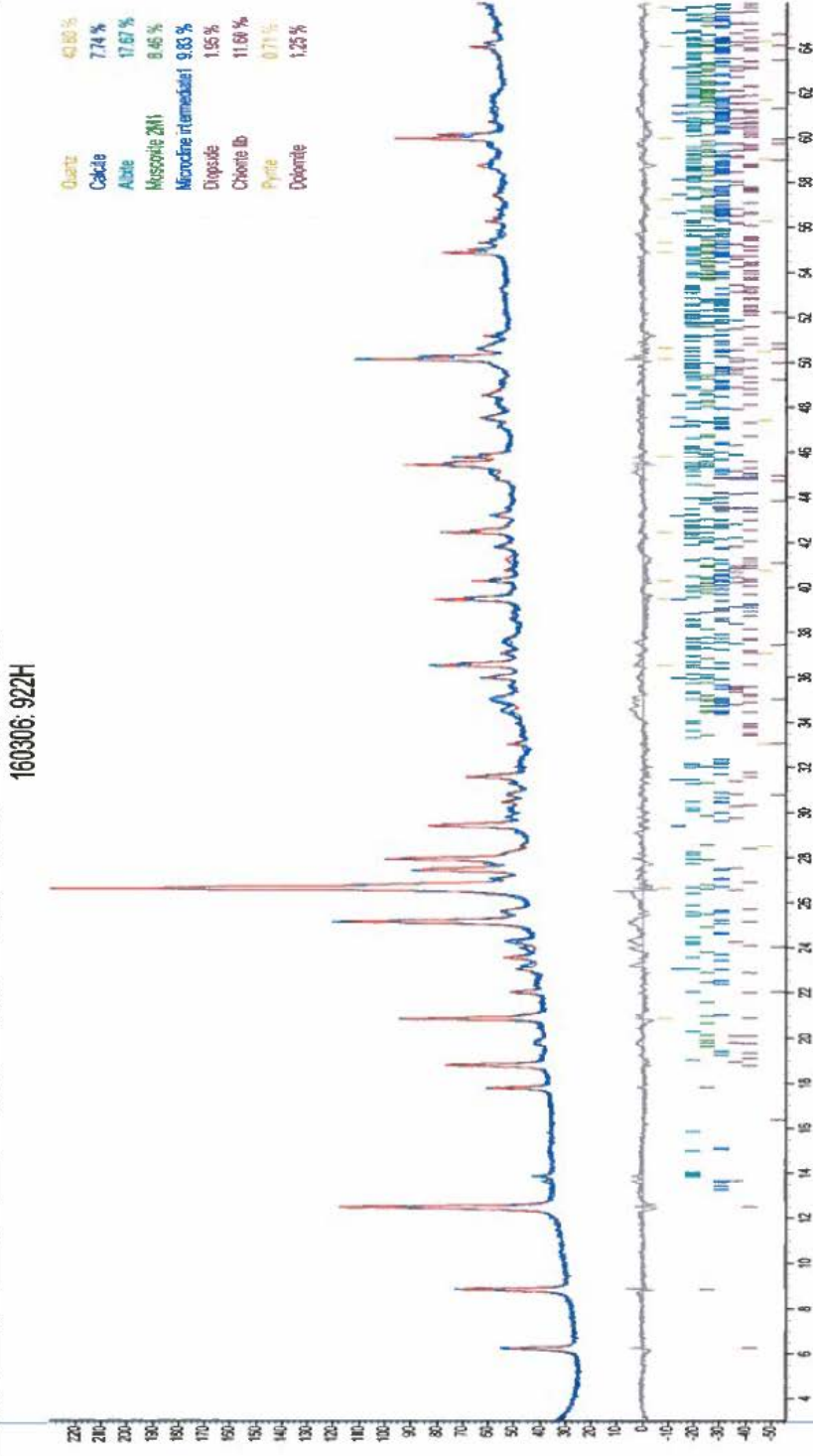






Vår dato 13.6.2016 Vår referanse LT / 16-068

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet



## Sprøytebetongresept – Svartdaltunnelen

Det blei brukt litt ulike reseptar i alunskiferområdet, men hovudforskjellen er alkalifri akselerator i hovudtunnelen (dvs. ved pelnummer 370-385) og vassglas i den tidlegare verkstadsnisja ved pelnummer 320.

25/01 '01 TOR 12:42 FAX 23035520

23035520

ST. VEGVESEN OSLO

001



Statens vegvesen  
Oslo vegkontor

# Telefaks

Blanketten skal sendes foran dokumentet

Til	Navn	PER HAGELIA	Telefaksnr.	22 07 32 80
	Adresse	Vegtek	Deres referanse	

Fra	Navn	DIESEN	Telefaksnr.	23 03 55 20
	Avdeling/kontor	Utbygging/Ryen	Telefon	23 03 55 25
Adresse		Besøksadresse : Svartdalsveien 47	Vår referanse	

Dato/tid	25/1-01	Antall sider, inkl. forside	6
Original blir oversendt		<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nei	

Merknader

Reseptes sprøytebetong  
Svartdaltunnelen

D. W. M. O.

Vegkontor:  
Postboks 8037 Dep  
0030 OSLO  
Telefon 22 07 43 00  
firmapost.osl@vegvesen.no

Kontoradresse:  
Grenseveien 97 A  
Telefaks 23 21 07 99  
Org nr. 973051113

Trafikkentral:  
P.b. 8037 Dep, 0030 OSLO  
K.adr.: Akershusstranda 57  
Telefon 22 07 43 00  
Telefaks 23 23 77 57  
Veg- og trafikkinfo.: 175

Trafikkasjon:  
Postboks 342 Økern  
0513 OSLO  
Kontoradr.: Østre Akor vei 50  
Telefon 22 07 43 00  
Telefaks 22 07 43 89

Bilregister tlf.: 22 07 45 45  
Tekn. kontr. tlf.: 22 07 45 40  
Førerkort tlf.: 22 07 45 35  
Førerprøver tlf.: 22 07 45 30  
Tekn. sp. tlf.: 22 07 45 25

Hovedkontor:  
Unicon AS

Tlf: 67 15 23 70  
Faks: 67 15 23 71

Avd.: Sjurseya  
Postboks 8145,  
Grønland  
0134 Oslo  
Tlf: 22 68 00 52  
Faks: 22 68 03 29

**unicon** ///

Olav Ingotvedsv. 6  
Postboks 204  
1309 Rud

Foretaksnr.: NO 942 822 979 MVA  
Kontonr: Bank: 8142.05.12316

Sehner Skanska

v/ Aspås

**TELEFAKS:** Nr.: 22 19 34 37

Totalt 5 sider

Deres ref.:

Vår ref.: BH

Oslo, 25.01.01

**Sak: Resepter sprøytebetong**

Etter avtale er resept 18, 19, 207 og 214 vedlagt. Resept 18 og 19 er benyttet sammen med alkaliefri sprøyteveske, spesielt ved sprøyting av sikringsbuer. Resept 18 er med SR-sement og resept 19 med Standard sement.

*NSI. Dose i 1,6 370*

*Dose i Nøp 320*

Resept 207 og 214 er benyttet med vannglass aksellerator. 207 med Industrisement og 214 med SR sement.

Med vennlig hilsen  
For Unicon AS  
Region Oslo

*Eivind Heimdal*

Eivind Heimdal  
Teknisk Sjef

Mobil: 95 76 06 88

Vedlegg:

*1/1 Bj. Dieseth.*

*T. Aspen*

Eivind Heimdal

Avd.: Sjurseya, Postboks 8145 Grønland, 0134 Oslo

21 SIDE

STANSE BETONGA

25/01/2001 11:00 22680329

STANGE BETONG AS

BLANDERESEPT : 207 / 417

ENTREPENØR: SELMER AS

BYGGEPLASS: NATIONALTEATERST

I KLARTEKST PÅ FØLGESEDDER

<u>207-SPR.BET.(MAC40)IND 8 SIL</u>	<u>SLUMP</u>
<u>417-P 5.0 + SP 2.0</u>	<u>20</u>

GRUNNRESEPT-NR. : 207

NORCEM STANDARD STD. \_\_\_\_\_ KG  
NORCEM ANLEGG ANL. \_\_\_\_\_ KG  
NORCEM INDUSTRI IND. 470 KG  
NORCEM SULFATR. SR. \_\_\_\_\_ KG  
SILICA \_\_\_\_\_ 25 KG (100% TØRRSTOFF) FESIL A/S  
SAND \_\_\_\_\_ 1254 KG TYPE: SA1 0 - 8 MM, SVELVIK  
SAND \_\_\_\_\_ 314 KG TYPE: SA6 0 - 8 MM, NORSTONE  
STEIN \_\_\_\_\_ KG TYPE: \_\_\_\_\_  
STEIN \_\_\_\_\_ KG TYPE: \_\_\_\_\_  
VANN 219 L. V/C : \_\_\_\_\_ V/C+S\*2 : 0.42

TILSETNINGSSTOFFRESEPT-NR. : 417

P : 5.0 KG (40% TØRRSTOFF) SIKÅ NORGE A/S  
SP : 2.0 KG (15% TØRRSTOFF) SIKÅ NORGE A/S  
L : \_\_\_\_\_ KG (AER 1:19) SIKÅ NORGE A/S  
R : \_\_\_\_\_ KG (R10) SIKÅ NORGE A/S  
DIV : 45 KG STÅLFIBER

KONTROLL AV	
TABELL	INNSETTING

DATO 25-08-97 SIGN.: GS

ANMERKNING: VED BRUK AV CA. 25 LITER  
AKSELERATOR OPPNÅES ET V/C-TALL PÅ 0.45.

Presentandel alkalireaktive korn:  
Norstone: andel 20%, 0 % reaktive korn= 0 %  
Svelvik : andel 80%, 23 % reaktive korn=18.4%

TOTALT REAKTIVE KORN = 18.4 % TILLATT 20%  
SIDE 46

Nisje 321!

STANGE BETONG AS

BLANDERESEPT : 214 / 664  
ENTREPENØR: SELMER ASA  
BYGGEPLASS: SVARVALSTUNNELLEN

I KLARTEKST PÅ FØLGESEDDEL

<u>214-SPR.BET (MAC40) SR. B SIL</u>	<u>SLUMP</u>
<u>664-P 1.5 + SP 4.0</u>	<u>20</u>

GRUNNRESEPT-NR. : 214

NORCEM STANDARD STD. \_\_\_\_\_ KG  
 NORCEM ANLEGG ANL. \_\_\_\_\_ KG  
 NORCEM INDUSTRI IND. \_\_\_\_\_ KG  
 NORCEM SULFATR. SR. 470 KG  
 SILICA 5,32% SF (sum vekt) 25 KG (100% TØRRSTOFF) FESIL A/S  
 SAND \_\_\_\_\_ 1254 KG TYPE: SA1 0-8 MM SVELVIK  
 SAND \_\_\_\_\_ 314 KG TYPE: SA6 0-8 MM NORSTONE  
 STEIN \_\_\_\_\_ KG TYPE: \_\_\_\_\_  
 STEIN \_\_\_\_\_ KG TYPE: \_\_\_\_\_  
 LUFTINNHOOLD \_\_\_\_\_ LITER  
 VANN 219 L. V/D: \_\_\_\_\_ V/D+S\*2 : 0,42

TILSETNINGSSTOFFRESEPT-NR. : 664

P : 1.5 KG (40% TØRRSTOFF) SIKKA NORGE A/S  
 SP92 : 4.0 KG (15% TØRRSTOFF) SIKKA NORGE A/S  
 L : \_\_\_\_\_ KG (AER 1:19) SIKKA NORGE A/S  
 R : \_\_\_\_\_ KG (R10) SIKKA NORGE A/S  
 DIV : 45 KG STALFIBER

TEMPERATUR T BETONGEN : \_\_\_\_\_ °C :

KONTROLL AV	
TABELL	INNSETTING
<u>AS</u>	_____

ANMERKNINGER :

DATO 19-05-98 SIGN.: GS

SIDE 79

TIL: FAN DAHL  
FRA: A. GERTSEN

STANGE BETONG AS

BLANDERESEPT : 19 / 19

ENTREPENØR: SELMER

BYGGEPLASS: NATIONALTHEATERET

I KLARTEKST PÅ FØLGESEDEL

19 - SPR. BET. (M4, C40) STD 8 SU - SLUMP	
19 - SP 10,2	20

GRUNNRESEPT-NR. : 19

NORCEM STANDARD STD. 485 KG

NORCEM ANLEGG ANL. \_\_\_\_\_ KG

NORCEM INDUSTRI IND. \_\_\_\_\_ KG

NORCEM SULFATR. SR. \_\_\_\_\_ KG

SILICA 5.1% 25 KG (100% TØRRSTOFF) FESIL A/S

SAND 80 1224 KG TYPE: SA1: SYBLENK 0.8mm

SAND 20 306 KG TYPE: SA6: NORRONE 0.8mm

STEIN \_\_\_\_\_ KG TYPE: \_\_\_\_\_

STEIN \_\_\_\_\_ KG TYPE: \_\_\_\_\_

VANN 210 L: V/C : \_\_\_\_\_ V/C+S\*2 : 0.39

TILSETNINGSSTOFFRESEPT-NR. : 19

P : \_\_\_\_\_ KG (40% TØRRSTOFF) SIKI NORGE A/S

SP92 : 10.2 KG (15% TØRRSTOFF) SIKI NORGE A/S

L : \_\_\_\_\_ KG (AER 1:19) SIKI NORGE A/S

R : \_\_\_\_\_ KG (R10) SIKI NORGE A/S

DIV : 45 KG STÅLFIBER

TEMPERATUR I BETONGEN : \_\_\_\_\_ °C

KONTROLL AV	
TABELL	INNSETTING

ANMERKNINGER :

CL: 0.463

Alkali: 4.875%

DATO 15.12.97 SIGN.: *Alb*

Ok

SIDE 0

*Rel 370*

STANGE BETONG AS

BLANDERESEPT : 18 / 18

ENTREPENØR : SELMER ASA

BYGGEPLASS : SVAERTDALSTUNNELN

I KLARTEKST PÅ FØLGESEDDEL

<u>18 - SPR. BET (MA 440) 5/2 8 SIL</u>	SLUMP
<u>18 - SP 10.2</u>	<u>20</u>

GRUNNRESEPT-NR. : 18

NORCEM STANDARD STD. \_\_\_\_\_ KG  
 NORCEM ANDEGG ANL. \_\_\_\_\_ KG  
 NORCEM INDUSTRI IND. \_\_\_\_\_ KG  
 NORCEM SULFATR. SR. 485 KG <sup>5</sup>  
 SILICA 5 25 KG (100% TØRRSTOFF) FESIL A/S  
 SAND 80 1224 KG TYPE: S41: SUELVIK 0-8mm  
 SAND 20 306 KG TYPE: S46: NORSTONE 0-6mm  
 STEIN \_\_\_\_\_ KG TYPE: \_\_\_\_\_  
 STEIN \_\_\_\_\_ KG TYPE: \_\_\_\_\_  
 LUFTINNHOLD 60 LITER  
 VANN 210 L. V/C : \_\_\_\_\_ V/C+S\*E : 0.39

TILSETNINGSSTOFFRESEPT-NR. : 18

P : \_\_\_\_\_ KG (40% TØRRSTOFF) SIKKA NORGE A/S  
 SP92 : 10.2 KG (15% TØRRSTOFF) SIKKA NORGE A/S  
 L : \_\_\_\_\_ KG (AER 1:19) SIKKA NORGE A/S  
 R : \_\_\_\_\_ KG (R10) SIKKA NORGE A/S  
 DIV : 45 KG STÅLFIBER

TEMPERATUR I BETONGEN : \_\_\_\_\_ °C

KONTROLL AV	
TABELL	INNSETTING
_____	_____

ANMERKNINGER :

*cc: 0.463* *1.141.13.177\**

DATO 28.07.98 SIGN. : Ala

*Ok*

SIDE 0



## Analysar av vatn – Svartdalstunnelen

2000. Samla frå dam i nisja ved pelnummer 320. Rapportert av Hagelia (2011b).

2014. Tilsvarande:

Ramboll Analytics  
Certificate  
Project: 1510001389/46

Date: 6.11.2014  
1/2



Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Søndre Meland  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO

Sample information: Statens vegvesen Vegdirektoratet, Tunnel wash water, Kjemiske analyser av kontaminert vegv  
Reference: pro.no: 603245 v/Bård Pedersen Date of sampling: 30.10.2014  
Date of arrival: 30.10.2014  
Sampling by: Research started: 30.10.2014

### Water analyce

Sampling point	Svartdal 1	Svartdal 2	Unit	Method
Sample ID	14SL 08013	14SL 08014		
<b>ANALYSIS</b>				
Pretreatment, filtration	ok	ok		
Turbidity	0,60	0,25	NTU	RA2024*
pH	7,5	7,8		RA2000*
Alkalinity	2,4	2,8	mmol/l	RA2001*
Dissolved Organic Carbon (DOC)	2,4	2,0	mg/l	RA2007*
Chloride (Cl)	11	16	mg/l	RA2018*
Fluoride (F)	0,80	0,62	mg/l	RA2050
Sulphate (SO4)	620	750	mg/l	RA2018*
Nitrate (NO3)	1,2	<1,0	mg/l	RA2018*
Ammonium (NH4)	<0,0060	<0,0060	mg/l	RA2046*
Metals 1 diss	ok	ok		
Aluminium (Al), diss	<10	<10	µg/l	RA3000*
Arsenic (As), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*
Barium (Ba), diss	13	19	µg/l	RA3000*
Boron (B), diss	160	210	µg/l	RA3000*
Mercury (Hg), diss	<0,020	<0,020	µg/l	RA3000*
Phosphorus (P), diss	<100	<100	µg/l	RA3000
Cadmium (Cd), diss	0,092	0,054	µg/l	RA3000*
Potassium (K), diss	10000	6400	µg/l	RA3000*
Calcium (Ca), diss	210000	270000	µg/l	RA3000*
Cobalt (Co), diss	<0,50	<0,50	µg/l	RA3000*
Chromium (Cr), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*
Copper (Cu), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*
Lead (Pb), diss	<0,50	<0,50	µg/l	RA3000*
Magnesium (Mg), diss	21000	27000	µg/l	RA3000*
Manganese (Mn), diss	19	<1,0	µg/l	RA3000*
Molybdenum (Mo), diss	190	84	µg/l	RA3000*
Sodium (Na), diss	31000	40000	µg/l	RA3000*
Nickel (Ni), diss	29	65	µg/l	RA3000*
Silicon (Si), diss	18000	9500	µg/l	RA3000
Iron (Fe), diss	<10	<10	µg/l	RA3000*
Sulfur (S), diss	240000	270000	µg/l	RA3000
Zinc (Zn), diss	6,1	5,9	µg/l	RA3000*

The results apply solely to the samples analyzed. The certificate may only be copied as whole.

Ramboll Analytics  
Niemenkatu 73, FI-15140 Lahti  
Kiltterinkuja 2, FI-01600 Vantaa

Tel +358 20 755 611  
Business ID 0101197-5

www.ramboll-analytics.fi  
Domicile Espoo



Ramboll Analytics  
Certificate  
Project: 1510001389/46

Date: 6.11.2014  
2/2



	14SL 08013	14SL 08014	Unit	Method
Strontium (Sr), diss.	2500	3400	µg/l	RA3000
Thorium (Th), diss.	<0,20	<0,20	µg/l	RA3000
Uranium (U), diss	120	190	µg/l	RA3000*
Vanadium (V), diss	<1,0	<1,0	µg/l	RA3000*

\* Method is accredited by the FINAS. Uncertainty of measurement is reported if requested.

Ramboll Analytics

Iipo Lahdelma  
M.Sc., Chemist, +358 40 074 5295

The certificate has been accepted electronically.

Delivery per.hagelia@vegvesen.no



Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Søndre Meland  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO

Sample information:	Statens vegvesen Vegdirektoratet, Tunnel wash water, Kjemiske analyser av kontaminert vegva		
Reference:	pro.no: 603245 v/Bård Pedersen	Date of sampling:	
Sampling by:		Date of arrival:	30.10.2014
		Research started:	30.10.2014

Results			Unit	Method
Sampling point	Svartdal 1, filtered particles	Svartdal 2, filtered particles		
Sample ID	1455 02477	1455 02478		
<b>ANALYSIS</b>				
Pretreatment, filtration	ok	ok		
Pretreatment, microwave oven (HNO <sub>3</sub> /HF)	ok	ok		RA3009
Metals 1	ok	ok		
Aluminium (Al)	5100	3500	mg/kg dw	RA3000
Arsenic (As)	170	170	mg/kg dw	RA3000
Barium (Ba)	330	180	mg/kg dw	RA3000
Boron (B)	69	50	mg/kg dw	RA3000
Mercury (Hg)	<0,10	<0,10	mg/kg dw	RA3000
Phosphorus (P)	<100	240	mg/kg dw	RA3000
Cadmium (Cd)	7,8	6,4	mg/kg dw	RA3000
Potassium (K)	2400	1200	mg/kg dw	RA3000
Calcium (Ca)	22000	33000	mg/kg dw	RA3000
Cobalt (Co)	380	190	mg/kg dw	RA3000
Chromium (Cr)	30	19	mg/kg dw	RA3000
Copper (Cu)	200	440	mg/kg dw	RA3000
Lead (Pb)	13	13	mg/kg dw	RA3000
Magnesium (Mg)	1700	820	mg/kg dw	RA3000
Manganese (Mn)	16000	4600	mg/kg dw	RA3000
Molybdenum (Mo)	390	180	mg/kg dw	RA3000
Sodium (Na)	<100	240	mg/kg dw	RA3000
Nickel (Ni)	1200	900	mg/kg dw	RA3000
Silicon (Si)	68000	60000	mg/kg dw	RA3000
Iron (Fe)	240000	130000	mg/kg dw	RA3000
Sulfur (S)	3400	2500	mg/kg dw	RA3000
Zinc (Zn)	810	1300	mg/kg dw	RA3000
Strontium (Sr)	580	670	mg/kg dw	RA3000
Thorium (Th)	1,7	4,8	mg/kg dw	RA3000
Uranium (U)	98	140	mg/kg dw	RA3000
Vanadium (V)	36	14	mg/kg dw	RA3000

The results apply solely to the samples analyzed. The certificate may only be copied as whole.

Ramboll Analytics  
Niemenkatu 73, FI-15140 Lahti  
Kiltienkuja 2, FI-01600 Vantaa  
Tel +358 20 755 611  
Business ID 0101197-5  
www.ramboll-analytics.fi  
Domicile Espoo



Ramboll Analytics

Sami Tyrväinen  
M.Sc., chemist, +358 50 434 4092

The certificate has been accepted electronically.

Delivery per.hagelia@vegvesen.no

# Alunsskifermiljø – forhold under tunneldriving

## Samtale med Ole Fromreide 2000-10-25 (tlf) (sulfat etc)

Per Hagelia presenterte at vi ser på sulfatresistens på nytt i lys av erfaringar ved bruk av SR sement silika m.m.

Fromreide var byggeleiar på Ekeberg tunnelen (ferdig ca. -94, ferdigsprengt for nær 10 år sidan, NB! sto ubrukt og ferdig i ca. 1 år på grunn av omlegging ved Sørenga; T12 men har mange forgreiningar; største spenn 23 m).

**1) Sluttrapport.** Finst (mykje dokumentasjon er på fjernlager og noko kan ha komme bort) Birkeland skreiv geologisk kap. til sluttrapport (fyldig ca 10 sider, bilag med tunneølkart etc) I bilaga er det stuffregistrering (kart trur eg det var) per 5 m.

**2) Geologi etc.** . Oppsummering med kart Det er alunskifer i to variantar; Ei hovudsone + alunskifer som linser (igneis frå ca. 8-9 m til ca. 50 m inn frå Sørenga). Grensa gneis/ "linsealun" var eit enkelt sleppeplan.

Alunskiferen: Testa for svelling etter vanleg svovel metode (truleg NOTEBY) Hovudsone (ca 100 m) ikkje av den mest hissige (massen blei plukka rett frå røysa), medan alunskiferlinsene er svært hissige (liknar på steinkol).

Elles gneis: Grense mot gneis ei kjempesone m/opne sprekkar (sone 2 m?) med store mengder vatn (her er også leire etc); desse var også hissige (sjekk likevel dette med Ole F seinare). Her blei det injisert ca. 200-300 tonn sement (også SR sement).

I overgangen mellom alun og svart skifer var det injisert ca 5 tonn. her ko det 2000l/min under 8 bars trykk (brukte manometer) artesisk (overdekning lokalt ikkje så mykje (10 m

*Vatn: pH i vassprøve* frå alunskifer var (meinte han å hugse omkring 4-4,5, medan vassprøve frå gneis (fleire 100 m frå alunskifer) hadde pH ca. 2,5-3 (Ole litt usikker på tala, men pH i gneis var ca. 2 einheter under vatn i alun, begge klart på den sure sida). Dei hadde problem med å tolke dette, men kom fram til at det måtte vere grunnvassig frå alun og langt inni gneis. alunskifer er "tett" gneis er "open"

Rampekryss opp til Konows gate (Lodalen): 23 m spenn; her er det sulfidførande svart skifer (kvit strek). Ein nyt Stabben blei svært dårleg og ein måtte støype ny til topps (er dette også med SR?)

### 3) Sement:

-SR sement med min 8% mikroslika på alunskifer, samt på svart sulfidførande skifer (ikkje alunskifer). SR er også nytte for innstøyping av fjell boltar (i boltemørtel; tok ikkje sjansen på ) i alunskifer (ca. 1,5 m lange etter sprøyting (cc 2 m), samt også for oppheng av hvelv (same boltelengder i alun). Silika: ein fekk her omlegging frå silikastøv til silika slørry i byggetida; silika støvet blei blanda med vatn og sement og deretter tilsett tilslag mm. C40. Slørry, sjekk framgangsmåten elles) (VI BØR vel finne ut kor dei to metodane er brukte).

-Sement i gneis er vanleg type (noterte meg ikkje spesielt om dette)

**Sprøyting:** Erfaring frå Fjellinja tilsa at ein ikkje fekk tidleg heft i alunskifer der ein hadde vaska før våtsprøyting. Hadde også sett i bomberom på Youngstorget at spr bet (tørresprøyta rett

nok) opp til 4 cm ikkje sto, medan > 4 cm sto) I Ekeberg blei det derfor ikkje vaska, men “renska” ved bruk av trykkluft (blåste tørt med 10 bar = 10 kg trykk)

a) Alunskifer hovudsona Det er sprøyta i to lag (ca. 5 + 5 cm) og 12 timar mellom. Traubunn; Høvla; (h son og gneise også (?) eller heilt fram til gn?) Det blei så lagt ca. 1 m 20-120 mm lag som dempar for eventuelt framtidig svelling

b) Alunskiferlinsene er det også sprøyta 15 cm i botn mot fjell (fekk ikkje med meg om det også her var eit lag av 20-120).

Akselerator: Dette var før alkalifri akselerator (implisitt vannglass, og derfor spr i to omgangar).

Tilslag: glømte å spør om dette.

Heft: Ole F sa ein hadde forsøkt å teste dette, men fekk ikkje noko ut av det (sjekk seinare) Vanskeleg å finne riktig uttrykk for heft.

4) Sprenging:

Alunskifer sona (hovudsona) fekk uvanleg god kontur (det beste han hadde sett) trass i relativt låge Q (0,1 ca meinte Ole å hugse) : Alunskifer gir her likevel “hårete berg” ; svært ru overflate (likna litt på sprøytebetong!) krev meir sprut enn vanleg (“gorillafaktor” ca. 1.8).

Alun h sone blei sterkt fragmentert; ofte ca 20 mm fragment, medan sprenging i linsene også gav blokker.

Stikk (få m mellom); retning fordelaktig (tvers av tunnelakse gir god kontur), andre retningar mindre fordelaktige.

Praktisk

Inspeksjonsluker ved kvar SOS stasjon

Avstand hvelv-spr.betong omkring 40 cm (ikkje send inn den feitaste på kontoret)

Ut boring best ved insp. luker pga av plass

Neppe behov for å stenge tunnelen under arbeid; nisjer/tverrslag etc kan nyttast

Pelnummer: Vegkilometrering stemmer ikkje med Pelnummer i tunnel (vist per 10 lm);

Pelnummer i geologisk sluttrapport stemmer derimot med det vi ser i tunnelen.

**Konowgate 2; Stor fjellskjæring der ein ser hovud alun sona som går gjennom. Oppe på Ekeberg er det teikn på meir aktiv svelling (buklete kjellarar etc) i hovudsona (dvs h alunskifersona. Ikkje sålar med masse under. Det er neppe blotningar av linseforma alunskifer ved Sørenga lenger.**

# Tidlige funn av Geologi og tunnelkontoret (2000)

Behov for ny viten:

## ALUNSKIFER KAN SKADE SULFATRESISTENT BETONG

AV ARNE GRØNHAUG OG PER HAGELIA, STATENS VEGVESEN, VEGTEKNISK AVDELING

*I 1930-årene ble man klar over at skader på betong oppsto der den var støpt i kontakt med alunskifer eller alunskifer var brukt som tilslag. «Alunskifer-utvalget» ble etablert i 1943 for som det het å «bidra til belysning av visse byggetekniske problemer ved Oslo-områdets alunskifere». Da det i de siste årene er påvist skader også på sulfatresistent betong, er det behov for ny viten om skadeprosesser og løsninger.*

I forbindelse med bygging av tunneler gjennom alunskifer i Oslo i 1999 er spørsmål om retningslinjer for utførelse blitt stilt. Det viste seg at det ikke fantes retningslinjer, men derimot en gammel hevdvunnet praksis. Det bør imidlertid nå stilles spørsmål om de gamle løsningene er i pakt med nye og strengere krav til kvalitetssikring og levetid av konstruksjoner.

### **Alunskiferutvalgets arbeid**

Alunskiferutvalget satte igang innsamling av informasjon om skader på bygg. Det ble utført undersøkelser av alunskifer og dens forvitningsprodukter ved polarisasjonsmikroskopi, røntgen-, kjemiske og differential-termiske (DTA) analyser. Dessuten ble det tidlig utført laboratorietester for å klarlegge problemene.

Etter hvert ble et stort antall betongprøver av ulik sammensetning satt ned i en tunnel i alunskifer under Wessels plass ved Stortinget (Blindtarmen). Undersøkelsene og analysene av dette materialet ga verdifulle bidrag til å klarlegge fysisk/kjemiske betingelser for skadene og graden av skader på ulike betongblandinger. Sluttrapport ble utgitt i 1973, men de mest holdbare prøver ble satt tilbake i Blindtarmen.

### **Magnetkis fører til ødeleggelser**

Det ble fastslått at innholdet av magnetkis (FeS, pyrrhotitt, monoklin varietet) er avgjørende for alunskiferens reaktivitet. Andre typer av kiser, som svovelkis (FeS<sub>2</sub>, pyritt), ble funnet i liten grad skadelige i ren tilstand. Men en liten imp-



*Skjæring i alunskifer sikret med sprøytebetong. Oksidasjon av svovelkis i skiferen har ført til rustutfelling og frigjøring av sulfationer. Det er stedvis registrert oppsmuldring ved sulfatangrep, samt utfelling av kalsiumkarbonat.*

regnasjon av magnetkis i svovelkisen viste seg å ha en katalytisk virkning på reaktiviteten.

Således viste det seg at kisholdig skifer med innhold av bare 0.001 vekt-% svovel i form av magnetkis ble antatt å føre til skader, og innhold på 0,05 vekt-% ble funnet meget skadelige. Undersøkelsene var imidlertid ikke omfattende nok til å etablere grenseverdier for klassifisering etter grad av skadevirkning.

### **Betong sveller og desintegrerer ved angrep av alunskifer**

Forvitring av alunskifer foregår først og fremst ved at kismineralene oksideres til svovelsyrer og jernoksider (rust) ved tilgang på luft og vann. Skadene på betong ble funnet å bestå i at vann fra forvitrende alunskifer, som inneholder sulfat og 2-verdig jern, trenger inn i betongen. Sementpastaen vil reagere kjemisk med denne oppløsningen og nye mineraler vil dannes.

Alunskifer-utvalget kom til at forvitningsproduktet som ble dannet sannsynligvis besto av det sulfatholdige mineralet ettringitt. Dette har et volum som er 330 % større enn utgangsmaterialet. Betongen vil derfor delvis sprenges istyk-

ker og delvis omdannes til et pulver.

### **Betongprøving**

Allerede i 1946 ble det utført laboratorieforsøk i en første forsøksserie ved Betonglaboratoriet ved Norges Tekniske Høgskole (NTH). I 1952 ble det satt igang langtidforsøk med betongprismer i naturlig forvitningsvann fra alunskifer i Blindtarmen. Denne forsøksserien ble siden supplert med prøver lagt ned i 1957, 1960 og 1963. Ialt ble det satt ned 212 betongprismer gruppert i 16 serier. Disse prismene ble innsisert og testet 5 ganger i løpet av en 12-årsperiode. En avsluttende inspeksjon ble utført i 1971, og av ialt 170 prøver manglet 6. Siden disse var av de mest korroderte etter inspeksjonen i 1963, ble det antatt at prøvene var desintegrert totalt.

### **Betongkvalitet og skadeomfang**

Prøvene av betong viste stor variasjon med hensyn til skadeomfang. Betong av vanlig Portland-sement ble sterkt skadet. Det samme var tilfelle med prøver som inneholdt kalktilslag og poredannende tilsetninger. Betongprøver med amerikansk «type V High sulphate resistant», Finsk ferrisement, og med innhold av

BETONGindustrien NR 3 - 2000

pozzolaner som silikastøv (Fiskaa), moler (fra Danmark) og trass (fra Eifel, Tyskland) ble funnet mest motstandsdyktige.

Forskning på betong utsatt for sulfatløsninger har i de 50 år som nå har gått gitt en mere detaljrik forestilling om hvorledes forvitningsprosessene går for seg. Mye tyder på at det også dannes forvitningsmineraler som i like høy grad kan angripe sulfatresistente betongtyper. Når de såkalte sulfatresistente betongblandinger som ble undersøkt av Alunskiferutvalget viste bedre resultater, kan det komme av at de hadde høyere fasthet og var tettere enn dem av vanlig betong.

#### Analysemetoder for vurdering av skadevirkning

Alunskiferutvalget forutsatte at det ikke bare er nødvendig å registrere innholdet av svovel i alunskiferen, men også innholdet av svovel i form av magnetkis for vurdering av skadeeffekten. Klassifisering av alunskiferens reaktivitet mot betong er etter utvalgets metode således vanskelig.

Det er behov for et bedre grunnlag for klassifisering av den potensielle skadevirkning alunskiferen har på det enkelte anleggssted. Andre kriterier enn Utvalgets er foreslått, men en enkel og signifikant testmetode synes å mangle på dette området.

I de siste årene er det påvist at også så-



Eksempel på sulfatangrep i sprøytebetong. Det er sterk oppsmuldring i et ca. 1-2 cm tykt skikt mellom fiberarmet betong og overflatebetong. Merk også avskallingen og fiberkorrosjonen.

kalte sulfatresistente betongtyper er utsatt for dannelse av mineralet thaumasitt ved angrep av sulfatholdig vann. Denne typen sulfatangrep kan føre til enda stør-

re skader enn ettringittdannelse. Utenlandske forskningsresultater viser at de vanlige sulfatresistente betongtyper som inneholder sement med lavt innhold av C3A (trikalsiumaluminat) ikke gir bedre beskyttelse mot skader. En foreløpig undersøkelse tyder på at det som tidligere er blitt identifisert som ettringitt, viser seg iallfall for en del å bestå av thaumasitt. Omfanget av skader fra denne prosessen er ikke klarlagt i Norge.

#### Retningslinjer for utførelse må etableres

Nye krav til kvalitet og levetid til konstruksjoner gjør det nødvendig å foreta videre undersøkelser av prosessene som fører til skader. I denne forbindelse er det foretatt befaringer og litteraturstudier. Et program for å undersøke betong som har vært utsatt for reaktiv alunskifer med hensyn på forvitningsprodukter og ødeleggelse er under vurdering.

Spesielt kreves det et utviklingsarbeid for å finne frem til et bedre klassifiseringsgrunnlag for skadevirkningen av den aktuelle forekomsten av alunskifer. Dermed må det utarbeides retningslinjer for beskyttelse av bygg og betong mot skadevirkninger.

Referanse: Vegdirektoratet. Vegteknisk avdeling. Intern rapport nr 2167

Fotos: Per Hageli






**VI LEVERER.....**

- SEMENTSKRUER
- SILICASKRUER
- FILTER
- VENTILER
- SPJELD
- AKTUATORER
- VENTILER
- NIVÅMÅLING
- SILOER

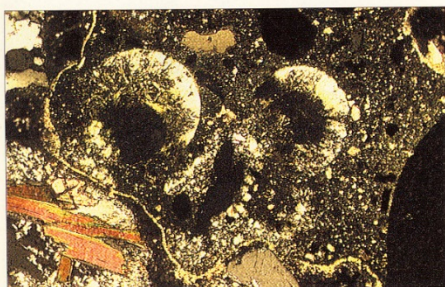
**ASFALT & BETONG MASKINER AS**

HEGGSTADMOEN 5, 7080 HEIMDAL  
 TLF: 72 89 44 00 FAX: 72 89 44 10  
 www@abm.as



# Thaumasitt

## – infeksjon som fører til betongskader



Thaumasitt i mikroskopet (grått mineral) erstatter sementlimet ved nedbryting av CSH-gelen, og danner fibrige utfellingar i luftporer. Ettringitt er ikkje observert.

### Bakgrunn

Sulfatangrep på betong er velkjent i dei fleste land. Her i landet er det særleg bygningsmessige skader knytta til alunskifer i austlandsområdet som er mest kjent. Betongkonstruksjonar i kontakt med denne skiferen blei tidlegare ofte kraftig oppsmuldra og utluta ved angrep på sementlimet. Heving av fundament og kjellargolv med oppsprekking på bygningar er også typiske trekk som er knytta til reaksjonar i sjølve

alunskiferen. Det er også eksempel på inaktiv alunskifer.

I 1947 blei Alunskiferutvalet oppnemnt for å finne årsaker og botemiddel mot alunskifer-skader. Alunskiferen her inneheld svovelkis og magnetkis. Ved oksidasjon av desse minerala blir det frigjort sulfationar. Sulfationar reagerer med sementpasta og danner forvitningsprodukt. Sulfatmineralet ettringitt har hittil blitt rekna som årsaka til svelling og nedbryting av betong. Undersøkingar av forsøksbetong med ulike reseptar viste at vanleg Portlandsement blei sterkt skadd. Det same var tilfelle med prøver som inneheld kalktilslag eller poredannande tilsetningsstoff. Betongprøver med amerikansk type «V High sulphate resistant», finsk ferrisement og prøver med innhald av pozzolanar som silikastøv

(Fiskaa), moler (dansk) og trass (frå Eiffel i Tyskland) synte seg å vere mest motstandsdyktige.

Etter forslag frå Alunskiferutvalet har i ein ettertida vanlegvis nytta sulfatresistent sement der det er fare for sulfatangrep. Alternativt har ein også nytta standard Portlandsement tilført ca. 10 % mikrosilika. Dette gir ofte ein langt tettare betong som er mindre utsett for aggressive komponentar i grunnvatnet. Det viser seg likevel at det ikkje finst klare retningslinjer på dette området. Sprøytebetong blir til dømes påført direkte på alunskifer.

### Thaumasitt i Oslo

I løpet av dei siste 10 åra har det komme stadig fleire rapportar frå utlandet om at sulfat-mineralet thaumasitt også kan føre til betongskade. Det er særleg etter at tynnslipmikroskopi (betongpetrografi) kom i vanleg bruk at dette har komme klart fram.

## Funksjonskontrakt for lavtrafikkveg – ny p

Rv 169, Stensrud–Midtskog, representerer den første parsellvise funksjonskontrakten for vegdekker i Akershus. Kontrakten om en 5 års avtaleperiode ble inngått mellom Statens vegvesen Akershus og Veidekke Asfalt i 1994. Tilbuds- og kontraktsgrunnlaget ble utarbeidet av ViaNova AS i samarbeid med Statens vegvesen Akershus. I 1999 ble det gjennomført endelig oppgjør for kontrakten basert på parsellens tilstand ved utløpet av avtaleperioden. Publikasjonen redegjør for bakgrunnen for funksjons-

kontrakten, gjennomføringen og sluttresultatet.

Status for parsellen for rehabilitering var kjennetegnet av:

- store variasjoner i tilstand og tilstandsutvikling på langs av parsellen med omfattende dekkeskader
- dårlig geometri, spesielt store mangler med hensyn på tverrfall
- manglende drenering på store deler av parsellen
- omfattende årlige vedlikeholdsarbeider i form av lapping, forsegling av sprekker og flatelapping

- høye årlige vedlikeholdskostnader.

Følgende mål ble satt opp for funksjonskontrakten:

- ensartet tilstandsutvikling over hele parsellen
- dekkelevetid på 10 år
- tverrfall etter vedlikeholdsstandarden
- rehabiliteringskostnader under kostnad for ordinære forsterkningstiltak
- reduserte årlige vedlikeholdskostnader.

Ved avslutningen av funksjonskontrakten var situasjonen i relasjon til disse målene følgende:

**Tilstandsutvikling:** Det er ikke oppnådd ensartet tilstandsutvikling over hele parsellen sett under ett. Tilstandsutviklingen er imidlertid ensartet innenfor to separate delstrekninger på henholdsvis 1,7 km og 3,1 km.

**Dekkelevetid:** Det er grunn til å anta at dekkelevetiden på delstrekningen på 1,7 km vil bli 10 år. På den lengste delstrekningen vil dekkelevetiden bare bli i overkant av 5 år.

Tverrfallet på parsellen ble

Undersøkingar utført av Geologi og tunnelkontoret, Vegteknisk avdeling har nyleg dokumentert at thaumasitt er årsak til oppsmuldring og avskaling av sprøytebetong laga med sulfatresistent sement (sjå foto 1, 2 og 3). Rapportane frå Alunskiferutvalet viser faktisk også at det var ein viss tvil om ettringitt aleine var årsak til skadene.

Thaumasitt blei oppdaga i 1878, og namnet kjem av gresk thaumazein, som betyr «å undre seg», eller «å bli overraska». Mineralet minner om ettringitt, men angriper også sulfatresistent betong. Sulfatresistent sement inneheld lite C<sub>3</sub>A (trikal-siumaluminat), noko som motverkar vekst av ettringitt, men samtidig favoriserer thaumasitt. I motsetnad til ettringitt, som ved krystallvekst fører til svelling på riss, blir thaumasitt danna på bekostning av heile sementpastaen (CSH gelen). Den karakteristiske oppsmuldringa av betong i Oslo-området er reint visuelt mykje meir typisk for thaumasittangrep enn ettringittskade. Thaumasitt har særleg gode «vekstvilkår» ved ca. 2–10°C, dersom det er høgt

fuktivå og god tilgang på sulfationar og karbonationar.

Ein bør merke seg at alunskifrane inneheld vekslende mengder kalsiumkarbonat (kalkspat), og forholda ligg dermed godt til rette for thaumasittangrep. Det er derfor stort behov for å undersøke alunskiferproblematikken på nytt, særleg i lys av erfaringane ved bruken av sulfatresistent betong dei siste 30 åra. Internasjonalt er ein etterkvart komne langt i retning av å utvikle betongreseptar også for å motverke thaumasittangrep. Riktig diagnose gir grunnlag for relevant «medisinering».

*Per Hagelia og Arne Grønhaug,  
Geologi- og tunnelkontoret*

**Referansar**

- 1) Grønhaug, A.: *Vern av betong mot alunskifer*. Intern rapport nr. 2167. Vegdirektoratet, Vegteknisk avdeling. Oslo 2000.
- 2) Grønhaug, A. og Hagelia, P.: *Alunskifer kan skade sulfatresistent betong*. I: *Betongindustrien* nr. 3, 2000.
- 3) Department of Environment, Transport and the Regions: *The Thaumasite form of sulphate attack; risks, diagnosis, remedial work and guidance on new constructions*. Report of the Thaumasite Expert Group. London 1999.



Skjæring i alunskifer sikra med sprøytebetong. Oksidasjon av magnetkis og svovelkis har ført til rustutfelling; frigjering av sulfationer og lokal nedbryting ved sulfatangrep.



Thaumasittangrep har ført til avskaling og fiberkorrosjon i sulfatresistent sprøytebetong på alunskifer i Oslo. Sementlimet er fullstendig oppsmuldra i eit 1–2 cm skikt.

## publikasjon

gjennom rehabiliteringstil-taket brakt innenfor kravene gitt i vedlikeholdsstandarden. Kravene i vedlikeholdsstandarden overholdes i rimelig grad ved kontraktsperiodens utløp.

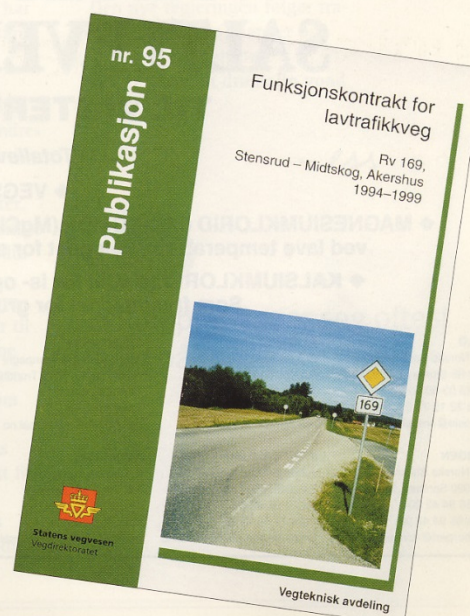
Rehabiliteringskostnadene beløper seg til 70 kr/m<sup>2</sup> pluss tiltak på drenering for 10 kr/m<sup>2</sup>; klart lavere enn kostnad for tradisjonelle forsterkingstiltak (200–250 kr/m<sup>2</sup>).

Årlige vedlikeholdskostnader for parsellen er redusert fra omlag 85.000 kr til omlag 70 000 kr.

Gjennomføringen av funk-

sjonskontrakten på Rv 169 har gitt verdifull erfaring både når det gjelder kontraktsutforming, dimensjonering og gjennomføring av tiltak samt oppfølging av slike kontrakter. Den har vist at det er mulig å forbedre tilstanden på lavtrafikkvegnettet selv med svært begrensede midler til rådighet. Publikasjon nr. 95 kan fås ved henvendelse til Vegteknisk avdeling, tlf. 22 07 39 18.

*Helge Holte*





# Samarbeidsprosjekt med Building Research Establishment



## Centre for Concrete Construction

BRE, Garston, Watford, WD2 7JR  
Telephone: 01923 664363 Fax: 01923 664786 E-mail: sibbickt@bre.co.uk

Mr. Per Hagelia (Senior Engineer)  
Geology and Tunnelling Division  
Gautstaddalleen 25  
P.O. Box 8142 Dep  
N-0033 OSLO  
Norway.

Your reference

Our reference: CV4134

7<sup>th</sup> August 2000

Dear Per

### **NORWEGIAN INVESTIGATIONS INTO THAUMASITE FORM OF SULPHATE ATTACK (TSA).**

Sorry for the long time to respond to you, but what with holidays and other work commitments its taken till now to reply. Thank you for the copy of the paper, which I have passed around to my colleagues at BRE working on the Thaumaside problem. I was particularly taken with the image of the degraded concrete containing the Alum shale, which was extremely reminiscent of TSA and not normal sulphate attack.

I have spoken to Dr Norah Crammond regarding your e-mailed questions who confirmed that it is the present view that a 70% ground granulated blast furnace slag (ggbs) / 30% Ordinary Portland Cement (OPC) mix is TSA-resistant and we have a number of papers on this topic confirming this. Additionally in order to help you with your investigations into the subject, I enclose a copy of the Thaumaside Expert Group report, which I believe represents the current level of knowledge on the subject.

Regarding your proposed investigations into the new concrete tunnel linings within the Alum shale and the investigations into the older age concrete samples placed within the sewer. We would very much like to contribute what we can in advice and possibly help in the examination of these materials on site and / or by petrography methods (Optical and petrographical). This of course assumes we would be free to discuss any joint findings. Any contributions by BRE would be funded as part of our program on the subject. We would fund any investigations into the materials concerned by ourselves whilst on any site and / or within the BRE laboratories. We should also be able to provide you with a copy of those findings.

If this is the sort of direction in which you felt our collaboration could proceed please let me know so we might progress slightly further with this joint area of interest and concern.

Yours sincerely

Dr. Ted Sibbick BSc. PhD, CGeol FGS  
Petrographic Consultant, Materials Laboratory Services

cc. Dr Norah Crammond

Building Research Establishment Ltd, trading as BRE. BRE is wholly owned by the Foundation for the Built Environment  
Registered in England, No 331 9324. Registered Office: Garston, Watford WD2 7JR

September 28th - 2000

## **Concrete deterioration in Norway caused by sulfate attack. A program for collaboration between NPRA and Building Research Establishment (BRE)**

### **Background**

The present program has been developed through communications between NPRA (Geology and Tunnel Division and Concrete Division) and BRE during August and September 2000.

Sulfate attack on concretes represents a series of mechanisms. Its severity is influenced by aggregate-type, cement-types, ground conditions and construction techniques. In Norway, and notably in the Oslo region, sulfide bearing alum shales have caused many problems over the years.

In 1947 the semi-official "Alum Shale Committee" was set up, and reports were published until 1973. The aim was to unravel the complex interplay between concrete and ground conditions, among others through testing of several concrete mixes. Concrete prisms were stored in a "natural environment" (alum shale + aggressive water) at "Blindtarmen" in the centre of Oslo. Prisms were made with many cements and monitored for over 20 years. Sulfate resisting cements with low  $C_3A$  resisted the attack but air entrainment had an adverse effect. Acid attack also represented a problem in some instances.

Since the introduction of sulfate resisting cements (usually with low  $C_3A$  contents and/or pozzolana) the focus on the sulfate problem has not been very sharp. Assessment of aggregates in accordance with the procedures of the Norwegian Concrete Society involves quantitative DTA for pyrite and pyrrhotite contents, and two tolerance classes have been established (until 1999 three classes). However, limiting values with respect to ground characteristics have not been introduced, and documentation is as yet insufficient to do so. In practice sulfate resisting cements are prescribed, and concretes are then frequently placed directly on the reactive rock surfaces or by using membranes between concrete and ground.

Although ettringite was thought to represent the main problem in the past, reports from the Alum Shale Committee clearly indicates the presence of an unidentified mineral. In view of recent experience, notably in the UK, both mode of deterioration and some analytical results may well be compatible with thaumasite sulfate attack (TSA) being part of the local sulfate problem. Yet this needs to be confirmed. If so, concrete mix design for the particular problems in the Oslo region and elsewhere may in part be insufficient.

In fact TSA has recently been identified in a ca. 30 year old Oslo-concrete made with sulfate resisting cement, thus lending some support to the above notion. (unpublished data of P. Hagelia and A. Grønhaug, Norwegian Public Roads Administration, August 2000). The TSA problem has recently been brought to light by the report "The thaumasite form of sulfate attack: Risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction" by the Thaumasite Expert Group (1999). The Expert Group, headed by Professor L. Clark former president of the Institution of Structural Engineers, was set up in 1998 after an initiative by the Minister for Construction, DETR, UK.

In a longer term perspective it is important to:

- a) classify ground conditions (rock composition, water chemistry etc) with respect to sulfate reactivity of concretes
- b) improve relevant sampling- and analytical techniques for classification purposes.
- c) compile data from concretes (bridges, tunnels etc.) of different ages, locations and performance in relation to lifetime studies
- d) establish specifications and recommendations for classification of ground conditions
- e) optimise construction methods and concrete mix design, as based on national and international experience.

Activities both at Road Technology Department, Norwegian Public Roads Administration (NPRA), Oslo Norway and British Building Research Establishment (BRE), Watford, UK currently focus on sulfate resistance of concretes.

The Norwegian activities, motivated by remaining problems mentioned above, have just started, and no formalised project has as yet been initiated. A short summary of previous work in the Oslo Region has been completed (Internal report 2167). Work is continuing with sampling of concrete constructions in road tunnels as well as others (see below).

BRE has carried out investigations into the TSA problem since 1990 and contributed significantly to the above mentioned expert report on TSA in conjunction with other studies of concrete deterioration. In a communication between Per Hagelia (NPRA) and Dr. Ted Sibbick (at BRE), it has become apparent that BRE is willing to cover expenses related to analyses of Norwegian concretes as well as some field work in Norway (enclosure 1, and further details therein). Thus there should be a real basis for collaboration.

## **Proposal of a joint project (BRE - NPRA)**

We here propose to initiate a two-phase project in collaboration with BRE, Watford.

Phase 1) Screening stage (2000-2001)

Phase 2) In depth project? (2001?- )

It is necessary to characterise the performance of concretes in a variety of sulfate environments before further steps can be made. Phase 1 is required in order to summarise the status of sulfate attacks on Norwegian concretes. The scope of a possible Phase 2 will depend on the results from Phase 1 and is only treated in brief herein.

### **Phase 1**

#### ***Objective***

Overview of sulfate problems encountered, primarily related to Alum shale in the Oslo region, but also other places in Norway; mechanisms, notably significance of TSA, effects of various concrete mixes etc.

## ***Funding***

*Norwegian Public Roads Administration* (Geology and Tunnel Division & Concrete Division):  
-Expenses related to core drilling, sampling, field work, preparation of plane and thin sections of concretes and rocks; petrography, chemical analysis etc.

*BRE*: Expenses related to own fieldwork, preparation and analytical work on their own samples and samples provided by NPRA in joint activities.

Present budgets and “manpower” at BRE and NPRA allow for at least a preliminary investigation this year and early next year. It is hoped to establish a related project at NPRA (2001-2002), but this may not be finalised before early next year. Regardless of the outcome, NPRA (Geology and Tunnel Division and Concrete Division) shall provide BRE with samples and/or relevant field sites, for their own or joint investigations, at least through 2001.

## ***Samples, ownership, etc***

Samples collected by BRE are BRE’s own property, but should be stored according to further agreement between BRE and NPRA in such a way that they can be made available for reference and possible future projects. Samples collected by NPRA belong to NPRA, but should be stored and made available for BRE on the same premises.

BRE will be given opportunities to do field work and sampling in Norway, as well as any analytical work considered important within BRE laboratories. NPRA will contribute with practical issues, such as sites and preliminary site documentation, personnel for core drilling etc. in particular when relevant for Norwegian sulfate problems. If possible NPRA also wish to analyse some samples at BRE within joint activities. NPRA will continue searching for TSA and other sulfate attacks, and intends to do this in close collaboration with BRE.

## ***Themes***

- a) Investigate old concrete prisms (“Alum shale committee”-samples from “Blindtarmen”): further characterisation of the reaction patterns: TSA? others, long term effects on various mixes etc),
- b) Experience from field concretes older than and younger than 1965-1970

## ***Sample locations***

September-November 2000:

- 1) Samples from “Blindtarmen” (remaining concrete prisms stored for ca 40 years; some over 50 years).(current problem due to oil leakage, but samples will be available at least for petrography)
- 2) Samples from old tunnels and rock caverns sitting in alum shale (>25 yrs) (Some shelters etc)
- 3) Samples from new concrete constructions in alum shale (< 1 yr) (samples cored in a tunnel)
- 4) Samples from quite young concretes in alum shale (5-10 yrs) (sites to be decided, 1-2 alternatives)

5) Samples of various ages sitting in environments with suspicious performance or known sulfate ground or groundwater strongly affected by seawater (several sub sea tunnels available).

It is implicit that samples must be representative of both well known as well as potential sulfate problems in Norway. Sampling must be continued, and done in conjunction with a sufficiently detailed assessment of the ground conditions at each site.

### ***Reports and publication of results***

Joint publications of reports and papers as well as independent publications from each of the two organisations are encouraged. An agreement between BRE and NPRA should be made at each step to distinguishing between joint findings and individual findings. As agreed upon at each step, publications may appear in the BRE series, the NPRA series or both, as well as in journals or conference proceedings.

Results and interpretations of joint findings should be discussed by BRE and NPRA together before any kind of publication. This principle should be preferred also for individual findings. All BRE reports should be made available for the NPRA in at least two copies (free). Similarly, all NPRA reports will be made available for BRE. It is to be understood that all results from Phase 1 finally will be summarised in an authorised report from NPRA (in Norwegian with English summary) which will be made available for the Norwegian engineering community (preferably BRE - NPRA joint authorship).

### **Phase 2 (later on)**

This phase should involve a broader scope, involving reactivity rating of sulfate bearing rocks (+soils?) in relation to oxidation rates, hydro-geochemistry etc; Testing of relevant mixes, monitoring of new structures (for future reinvestigation) etc. This phase must be discussed in detail later, and requires funding which is for the moment not available.

# Rapportar frå samarbeidet med BRE

Materials Laboratory Services

BRE, Garston, Watford, WD2 7JR

Telephone: 01923 664363 Fax: 01923 664786 E-mail: [sibbickr@bre.co.uk](mailto:sibbickr@bre.co.uk)

---

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 1 of 15**

Commercial-in-confidence

## Petrographic Description of concrete

### Sample Description

Selected concrete cores taken from sprayed concrete tunnel lining mainly in the Oslo area of Norway.

### Testing

Tested by: Materials Laboratory Services, Microscopy Laboratory  
Test standard/method: ASTM C856-95  
Date samples received: 20/12/2000  
Thin sections prepared on: 10/1/2001  
Number of sections: 14  
Dimensions of sections (mm): 110 x 75  
Date of examination: various

### Results Summary

Petrographic description attached.

Tested by: Position: Petrographic Consultant  
Name: Dr Ted Sibbick Date:

Final approval by: Position: Laboratory Manager  
Name: Dr. Martyn Webb Date:

---

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 2 of 15**

Commercial-in-confidence

### Introduction

As part of a collaborative program of investigation between the BRE Limited and Norwegian Roads Administration (NRA) selected cores were taken from a series of sprayed concrete tunnel linings. These were collected from locations known to be close to the high sulfide Alum shales from the Oslo area, which have in the past been frequently associated with major cases of sulfate related degradation problems.

### Method

This core samples listed below were prepared as large are thin sections. The core sample images are shown in appendix 1.

Sample reference number	Location	Material	Comments
P00/1570/1	Harpefoss Kraft tunnel, Nr Ringebu, Southern Norway Core 1	15-20mm thin concrete overlying alum shale	Heavy precipitation of sulfate minerals 'Thernadite' + calcite
P00/1570/2	Harpefoss Kraft tunnel, Nr Ringebu, Southern Norway Core 2	100-120mm. 1/2 layers of sprayed concrete with small area of contact shale	Close to previous NRA core 5 site.
P00/1570/3	Harpefoss Kraft tunnel, Nr Ringebu, Southern Norway Core 3	Thin layer of concrete with shale still attached	Close to previous NRA core 5 site.
P00/1570/21	Young's Torget, Underground tunnel system, Oslo central.	Sprayed concrete lining in contact with shale Upstairs sample	Concrete hard. White layers included which later were confirmed as lime wash
P00/1570/25	Young's Torget, Underground tunnel system, Oslo central.	Sprayed concrete lining with loose samples of shale. No actual contact with shale Downstairs sample.	Same location on first corner as Jarrowsite deposits
P00/1570/27	Akerbergveien road cutting, Oslo central - Core 1	Two concrete layers in contact with syenite.	Apparently sound. Lower layer with steel fibres.
P00/1570/28	Akerbergveien road cutting, Oslo central - Core 2	Concrete to shale interface with fine parallel cracking. Corroded steel fibers	Microcrack and entrapment voids at interface filled with white deposits
P00/1570/29	Akerbergveien road cutting, Oslo central - Core 3	Core was only part collected due to hitting a rock bolt. Taken close to core 2	Outer surface has vertical microcrack and water flow. Contains degraded cement paste and steel fibers.

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 3 of 15**

Commercial-in-confidence

P00/1570/30	Akerbergveien road cutting, Oslo central - Core 1		
P00/1570/42	Akerbergveien road cutting, Oslo central - Outer concrete layer	Previously collected by Per Hagelia	
P00/1570/37	Ekeberg Tunnel, North bound SOS station 1730: Core 1	Thin sprayed concrete on veined syenite	8 years old. Not on Alum shale and no calcite
P00/1570/40	Ekeberg Tunnel, North bound SOS station 1730: Core 2	Concrete in contact with Alum shale. Interface intact.	Close to core 1 but located on the Alum shale.
P00/1570/46	Svartdaltunnelen, 370A	Interface to Alum shale intact	2 years old
P00/1570/48	Svartdaltunnelen, 370B/2	Crack at interface of two layers	2 years old
P00/1570/49	Svartdaltunnelen, 320B	Interface of sprayed concrete to Alum shale intact	2 years old

SEM examination was undertaken on selected samples. Discussions on the findings from these are reported throughout this report.

#### Sample preparation

On receipt the specimen was dried at 40°C for 24 hours and vacuum impregnated with a low viscosity epoxy resin containing a fluorescent dye. This process consolidates the material and allows the easy detection of paste porosity, voids and micro-cracks under the microscope. The impregnated samples were then lapped to a flat surface and bonded to a glass slide. Excess material was then removed by saw and the sample lapped to a thickness of ~35µm. The thin section was finished to a final thickness of 30µm by hand. After thorough cleaning a glass cover slip was bonded to the top surface of the specimen which was then ready for examination in transmitted light using a polarizing microscope. Large area thin sections were used on these samples as required.

#### Microscopy

##### **General observations regarding sprayed concretes (P00/1570/42) Akerbergveien cutting.**

##### **Aggregate:**

Coarse (5mm down wards) angular to sub angular Granite fairly fresh.

Fine aggregate consists of a quartz sand with sub-arkosic sandstone, meta-greywacke, acid igneous (coarse grained), individual crystals of hornblende, garnet, Feldspar (slightly sericitised) and biotite. There was also a noticeable abundance of uniform rounded non-crystalline brown isotropic particles. These were felt to possibly represent concretions of microsilica (70-300µms diameter).

Aggregate bond to cement paste generally good.



Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 4 of 15**

Commercial-in-confidence

**Cement paste:**

Cement paste was dark grey with an abundance of residual cement clinker grains. The cement type determination on these was inconclusive, however, general colour and appearance suggested they were probably SRPC clinker grains. The residual clinker grains have some reaction rims indicating modest levels of hydration. The cement paste hydrated matrix is largely isotropic with lack of Portlandite. Low apparent matrix capillary porosity. The presence of relatively abundant carbonate fines may account for the rarity of Portlandite. Steel fibers not corroded in cross-section throughout the cement paste matrix.

At greater depth the air voids and adhesion cracks on the aggregate particles are partially filled with secondary Portlandite (well away from affected surfaces). Sprayed concrete appears as a series of different layers with some carbonation and entrapment voidage at the boundaries.

Tabulated condition of samples with respect to TSA development

Nos.	TSA comments	General comments
42	Akerbergveien cutting. Substantial TF is occurring near the contact with underlying material. Cement paste around the thaumasite deposits was depleted in Portlandite. Slight TSA zone 2 degradation in parts + (Air voids with low birefringence Thaumasite) including within the carbonated zone. Thaumasite deposit within a vertical crack.	Outer surface heavy secondary calcite precipitation. Calcite fines observed rather than Cornflake calcite deposition (CCD).
28	Akerbergveien cutting. No deleterious processes observed. Calcite fines in cement paste (<80µms). Possible CCD and secondary calcite deposition at boundary with shale.	Core contains a vertical crack to surface. 3 layers apparent with in concrete. Steel fibers largely intact. Corrosion between layers 1 and 2. No carbonation except along M/C's. Early layer heavy paste shrinkage M/C's and lower aggregate content. Surface carbonation >3mm.
30	Akerbergveien cutting. Massive thaumasite mainly as entrapment void fill (TF), close to a fully carbonated microcrack (1-2mm depth of carbonation). Microcrack associated with thaumasite and corrosion products. Evidence of TSA zones 1 to 3 in selective areas. The sprayed concrete nature (i.e. entrapment voidage) does not allow perfect zonal formation. Massive sulfate attack. Basically everything is occurring: <ul style="list-style-type: none"> <li>Gypsum and Portlandite crystallization within the air voids as well as some thaumasite and ettringite</li> <li>Depleted cement paste in areas adjacent to carbonation</li> <li>All concrete has some sulfate mineralisation</li> <li>Close affinity of Thaumasite with carbonation.</li> <li>Heavy Portlandite and gypsum crystallization indicating high moisture flow</li> <li>Some TSA zone 3 type development</li> </ul>	Microcrack associated with degradation features. Steel fiber corrosion. Surface carbonation 2 to 10 mm (very variable). Some cornflake calcite deposits. Thaumasite filled M/C surrounding reinforcement potential for slippage.
37	Ekeberg Tunnel. No TSA or TF detected.	Interface to syenite represented by

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 5 of 15**

Commercial-in-confidence

	Apparently sound, secondary edge deposits of ettringite within air voids at depth. Voids edged with carbonate near the outer surface	a crack Outer surface carbonation 1 to 5mm
49	Svartdaltunnelen. Uneven shale to concrete interface. Poor sugary textured carbonation of the concrete adjacent to the thaumasite at this interface. Thaumasite is observed within the shale up to 600µms depth. TSA is developing within the concrete adjacent to the shale.	
1	Harpefoss Kraft tunnel. TSA zone 2 and 3 types found below the carbonated outer layer. Some associated ettringite also present. Central concrete with some zone 1 TF and ettringite deposition in air voids. Thaumasite deposits in air voids associated with carbonated zone show evidence of carbonation / conversion or inter-growth of the thaumasite to calcite. Interface to shale represented by open microcrack containing some thaumasite (TF, zone 1) and secondary calcite deposits. Thin layer of cornflake calcite affected cement paste found adjacent to this microcrack. <b>Some zone 3 type orientated microcracks found within the carbonated zone, but now not containing any sulfate minerals.</b>	Thick uneven outer surface carbonation (10 to 15mm) also associated with large entrapment voids near interface with country rock. This was composed of a coarser granular quartzitic shale / sandstone, with slight metamorphic texture.
2	Harpefoss Kraft tunnel. Interfacial crack with two types of carbonate deposits and corrosion product. <b>No deleterious sulfate or other-related process</b> observed at this surface or within the concrete.	Thicker concrete layer than 1. Separate layers not immediately apparent. Abundant secondary Portlandite in voids, adhesion cracks and pre-existing cracks.
3	Harpefoss Kraft tunnel. Slight carbonate deposits at interface crack with debris and secondary Portlandite crystals. No deleterious TSA or TF observed. Ettringite with air voids non-deleterious.	Thin concrete layer at interface with shale. Abundant secondary Portlandite in voids, adhesion cracks highly porous cement paste and pre-existing cracks.
21	Young's Torget. Inter-face to shale thin zones of TSA 2-3 = 1-2mm (plus some halos) and zone 1 in a patchy manner to some depth (40mm+), Thaumasite plus ettringite as void fill with associated paste shrinkage cracks, also filled with sulfate minerals (carbonated in parts). Not typical sulfate attack.	Lime wash layers noted within the concrete, associated with carbonation. Mottled and full carbonation of cement paste in some areas of the cement paste away from the interface.
25	Young's Torget. Clear development of TSA within microcracks also containing carbonate. One developing into the other. Locally different sulfate minerals. Thaumasite, ettringite and gypsum all clearly present (cohabitation). Internal aggregate particles also clearly delaminated by associated	Layer of concrete 2 to 5mm thick at the interface to the shale affected by TSA and TF.

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 6 of 15**

Commercial-in-confidence

	microcracks. All within a zone only 5mm thick. Strong evidence again of pre-existing degradation due to sulfate attack now carbonated.	
27	Akerbergveien Cutting. Boundary with country rock represented by open microcrack containing thaumasite (TF) carbonate and corrosion products. Underlying air voids contains TF deposits to 1mm depth. Non deleterious.	Carbonate fine in the cement paste. Contact with syenite apparently sound. Contact cement paste shows slight carbonation.

### Mechanisms to explain the closely associated calcite and thaumasite deposits.

1. The abundant entrapment voids within the Akerbergveien cutting samples are filled with secondary coarse sparitic calcite deposits, the surrounding cement paste matrix being carbonated to a shallow depth. These voids are subsequently filled with secondary non-deleterious thaumasite (TF).
2. Within modestly porous cement paste with low void content, full TSA develops to form uneven entrapment-like voids, which are subsequently carbonating the thaumasite and cement paste to different generations of calcite. Conversion / replacement of thaumasite by calcite was implied at a number of locations (P00/1570/42)?.

### Conclusions

The thaumasite form of sulfate attack (TSA) was identified as having occurred at all sites included in the BRE / NRA collaborative program. Some associated gypsum and ettringite crystallisation was also found in the older Young Torget samples.

The main form of failure appears to be the development of fine semi-parallel microcracks filled with thaumasite developing at the interface with the alum shale or other sulfate source. The progressive sequence of TSA forms observed in the UK high quality structural bridges was not as pronounced within these samples. The main interfacial crack is often open and filled with varying proportions of carbonate, corrosion product (presumably derived from the underlying steel netting) and full thaumasite mush as a filling material (zone 4 type).

Deeper into the sprayed concrete the development of TF to a limited degree was also noted. However, this degradation was never observed to penetrate more than a few millimeters into the concrete. The usual presence of a microcrack at the boundary between the Alum shale's and the sprayed concrete frequently results in an abundance of secondary calcite precipitation associated with the TSA and TF induced products. There was also a close affinity of the newly identified cornflake calcite deposition (CCD) within areas of the concretes cement paste matrix affected by TSA and TF.

There are some localities where the thaumasite deposits within entrapment voids and microcracks contain fine well formed rhombi of presumably secondary calcite which is either replacing / converting the thaumasite to calcite as the concretes pH drops in a mechanism similar to alkali carbonation.

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 7 of 15**

Commercial-in-confidence

## Images

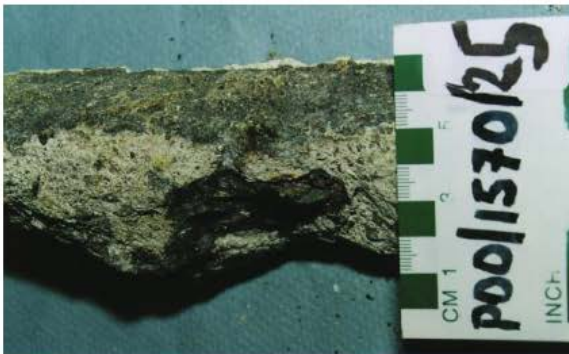


This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 8 of 15**

Commercial-in-confidence

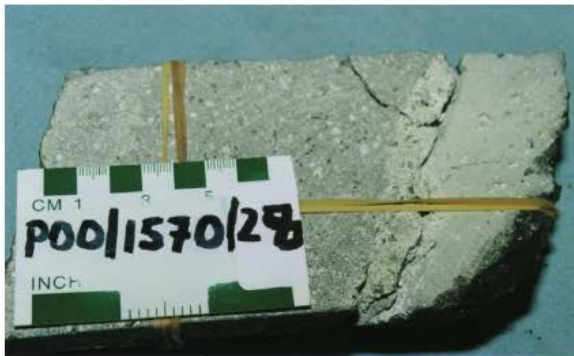


This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 9 of 15**

Commercial-in-confidence



This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 10 of 15**

Commercial-in-confidence



**VISIT BY BRE TO THE NORWEGIAN PUBLIC ROADS ADMINISTRATION (NPRA) IN OSLO**  
(includes initial XRD results)

Ian Longworth, Ted Sibbick and Norah Crammond visited Per Hagelia of the Road Technology Department of the Norwegian Public Roads Administration (NPRA) between 20/11/00 and 24/11/00. The Norwegian name for NPRA is 'Statens Vegvesen'.

**20<sup>th</sup> November 2001- Harpefoss Tunnel**

Per Hagelia took us north from Oslo along the E6 express way. We passed Lillehammer on route and just north of Ringebu, we turned off the E6 into Harpefoss Kraft (hydropower station). We were joined by Claus K Larsen (recently completed his PhD on reinforcement corrosion at Trondheim) and Ian Willoughby (Essex man providing technical support), who also worked for NPRA.

We were taken to a short access tunnel owned by the hydro power plant. This tunnel had been blasted through the rock of a hillside and was downward-sloping at about 5° and 400 m long. A black shale was one of the rock stratum exposed during blasting. This black shale is not unlike the Alum Shale of Oslo in appearance but may not contain as much pyrite. The exposed rock (including the black shale) had been sprayed with concrete (shotcrete) in about 1985. It is unknown whether the concrete contained OPC or SRPC – a job for Ted. It contains local sandstone aggregates and sodium sulfate was added as a setting accelerator. (Current practice for shotcrete using the Norwegian Tunneling Method (NWT) is to use 3-7% sodium silicate as the setting accelerator) ref brochure 'Shotcrete Technology' given to IL at NPRA). The sprayed tunnel lining was investigated four years ago by NPRA. At the time they were checking for ASR but they only found insignificant traces of gel. Per has the report from this investigation and was keen that we take at least one core from the same area.

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 11 of 15**

Commercial-in-confidence

There were patches of efflorescence on 5 to 10% of the concrete surface. This consisted of 'runs' of calcite and white 'cotton wool' deposits of thenardite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Samples of the efflorescence have been brought back to BRE for XRD analysis. Three water samples were also collected; one from a trickle of clear groundwater percolating through the tunnel walls and two from areas of the walls where the groundwater was heavily contaminated with rust-coloured sludge. According to NPRA, the groundwater is sulfate-rich.

The first core was taken near the bottom of the tunnel (LHS moving down the tunnel) in the vicinity of the 1996 NPRA samples. The second and third cores were taken about halfway down the tunnel (RHS moving down the tunnel). This location was chosen because excessive thenardite precipitation had occurred and the rock behind the concrete was the black shale. In places, where this black shale had become excessively wet, it could be crumbled by hand. As it turned out, it was only the 3<sup>rd</sup> core, which struck the black shale. Samples of a yellow deposit, resembling jarosite were collected from the roof of a small recess near the top of the tunnel (RHS moving down the tunnel).

#### Samples taken from Harpefoss Tunnel:

Core 1 (P00/1570/1) Thin layer of concrete, some white deposits along concrete/shale interface. Taken from site of one of the 1996 NPRA samples.

Core 2 (P00/1570/2) Thicker layer of concrete, possibly 2 layers. Small contact piece of shale but not black shale.

Core 3 (P00/1570/3) Thin layer of concrete sprayed on top of black shale. Taken just above and to one side of Core 2.

Water 1 (P00/1570/4) Brown-coloured water from water seep, collected from base of wall practically at the end of the tunnel (LHS moving down the tunnel).

Water 2 (P00/1570/5) Clear groundwater sample collected by Norah – recorded on video (LHS moving down the tunnel).

Water 3 (P00/1570/6) Water from seep collected by Ian on RHS, 0.4m above tunnel floor.

Sample 1 (P00/1570/7) White, crystalline efflorescence collected by Norah as in Photo 1.

Sample 2 (P00/1570/8) Thenardite sample taken in vicinity of Core 1.

Sample 3 (P00/1570/9) Sprayed concrete/rock interface, close to Core 1.

Sample 4 (P00/1570/10) Fe-rich, brown sludge exuding from tunnel wall. See photo for location.

Sample 5 (P00/1570/11) Classic 'cotton wool' thenardite taken from the vicinity of cores 2 and 3.

Sample 6 (P00/1570/12) Degraded black shale, taken from very wet, lower part of wall about 3 metres from location of core 2.

Sample 7a (P00/1570/13) Sample of mortar used to plug the 1996 core holes which has changed to an orange colour.

Sample 7b (P00/1570/14) Spherulitic white deposits on surface of 1996 plug mortar.

Sample 8 (P00/1570/15) Concrete from adjacent to Sample 4.

Sample 9 (P00/1570/16) sample of jarosite from roof of recess.

Sample 10 (P00/1570/17) Country rock collected from tunnel entrance.

Sample 11 (P00/1570/18) Black shale collected by Ian on LHS?? of tunnel (moving down tunnel), 2m above floor.

Sample 12 (P00/1570/19) Second sample of possible jarosite collected by Per.



Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 12 of 15**

Commercial-in-confidence

#### Initial XRD Results:

Sample 1 (P00/1570/7)	Pure thenardite
Sample 5 (P00/1570/11)	Pure thenardite
Sample 12 (P00/1570/19)	Mainly gypsum and quartz with minor jarosite
Sample 7b (P00/1570/14)	Possibly dawsonite $\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$

#### 21<sup>st</sup> November 2001- Youngs Torget

In the 1950s a civil defence underground shelter was built under Young's Torget Square in the centre of Oslo. The local rock, which included Alum Shale had been excavated in order to construct the 2-storey underground complex. The exposed rock face had been sprayed with concrete and in places, the surface of the concrete was covered with what looks like thick (order of a few mm) whitewash. We accessed the underground complex via a restaurant called Spansk Spekemat, which used to be a police station.

We went down two floors to start with, where we examined a severely bulged wall at the corner of two corridors running perpendicular to each other. It became apparent almost immediately that this spectacular cracking was not caused by sulfate attack of the sprayed concrete as Per expected but by expansion of the underlying Alum Shale. The telltale signs of large quantities of yellow jarosite and glistening gypsum crystals indicated that oxidation of pyrite or pyrrhotite was to blame. The sprayed concrete was obviously cracked but it was mostly unattacked. There was one area where the concrete was friable and split parallel to the surface of the bulging wall (sample 1).

At the end of the corridor, which starts at the bottom of the stairs, the facing end wall was coated with a thin layer of white mushy material. This has the appearance of thaumasite. We then went up one set of stairs (still underground) and here the concrete was coated with a hard, white, thin layer of what looks like whitewash. In fact, some of the concretes contained two layers of this material about one inch apart. From the evidence so far, it is possible that the hard white material found upstairs has degraded to a mushy, white layer in the much wetter lower level.

#### Samples taken from Young's Torget :

Bag 1 (P00/1570/20)	Sprayed concrete layer from first corner of lower basement. Some Alum Shale attached.
Bag 2 (P00/1570/21)	Sprayed concrete containing hard white coating from bulging wall to upstairs basement.
Bag 3 (P00/1570/22)	White mushy layer coating end wall of first corridor of lower basement. Could be thaumasite.
Sample 1 (P00/1570/23)	Small sample of suspected thaumasite for XRD from Bag 3 location.
Bag 6 (P00/1570/24)	Corner of precast concrete column. Crumbled in bag. From lower basement at end of first corridor.
Bag 7a (P00/1570/25)	Back to first corner of lower basement. Assorted sprayed concrete and loose material.
Bag 7b (P00/1570/26)	Same location as 7a, only this is the associated Alum Shale.

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 13 of 15**

Commercial-in-confidence

Bag 4 (P00/1570/43) Jarosite

**Initial XRD Results:**

Bag 3 (P00/1570/22) Mainly calcite and dolomite with minor quartz – NO THAUMASITE  
Sample 1 (P00/1570/23) Mainly calcite and dolomite with minor quartz – NO THAUMASITE

**22<sup>nd</sup> November 2001– Akerbergveien Cutting**

This is another example of Alum Shale (Alun Skifer) in Oslo being sprayed with concrete. The Alum Shale has here locally been intruded by sills and dykes of Syenite and has been thermally metamorphosed (baked) to a degree dependant on proximity to the intrusive rock. This contact metamorphism has probably affected pyrite/pyrothite distribution resulting in concentration in veins and nodules rather than being well disseminated.

As the sprayed wall forms a cutting, it has subsequently been fully exposed to the harsh Norwegian climate. Apparently there are three layers of concrete, which were sprayed in the 1960s, 1970 and 1987. In one lower part of the sprayed wall, the concrete has started to spall and soft white material is evident at the intersection between spalling concrete and sound concrete. Per has already examined this material and has identified it as thaumasite. In fact he has written an article about it for a Norwegian journal. He has found a layer of thaumasite between the 1987 concrete layer and the underlying 1970 layer. We collected a similar sample of this thaumasite (sample 2) and also a water sample from a drainage hole just above the spalled area.

The first core was taken from just above the spalled area. The second core was taken further down the hill in an area where the sprayed concrete was cracked. The rock behind the first core was syenite and behind the second core, it was Alum Shale. The 1970s concrete has metal fibres in it and in core 2, there is a very porous area adjacent to the Alum Shale in which these fibres have rusted. There were also a small number of white void in fillings. We took a third core very close to the second in an area where water had been streaming down the outside of the cutting, making sure we incorporated a crack. Core 4, again in the vicinity of cores 2 and 3, contained quite a lot of thaumasite-like material in the deep crack, which runs perpendicular to the wall surface.

Ian and Ted had a good look at the smaller cutting wall on the other side of the road, which had not been sprayed with concrete. They found numerous large nodules (up to 150 mm diameter) and veins of pyrite in the Alum Shale.

**Samples from the Akerbergveien cutting**

Core 1 (P00/1570/27) Two layers of sprayed concrete on top of syenite. Location near spalled concrete as on photo.  
Core 2 (P00/1570/28) Contains a surface crack which runs deep into concrete. Corroded steel fibres in porous zone of concrete near interface with Alum Shale. Location further down cutting from core 1, where sprayed concrete is cracked.  
Core 3 (P00/1570/29) Only short core as hit a rock bolt head.

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 14 of 15**

Commercial-in-confidence

- Core 4 (P00/1570/30) Also short core as hit bolt head. Similar location to core 3, ie further down cutting from core 1 where concrete is cracked. Interesting degraded concrete near interface with Alum Shale and plenty of white mushy reaction products lining crack.
- Water 1 (P00/1570/31) Taken from a drainage hole near location of core 1.
- Sample 1 (P00/1570/32) Spalled outer layer of sprayed concrete near location of spalled concrete. This is a sample that Per collected previously, which is similar to the sample studied in his article.
- Sample 2 (P00/1570/33) Mushy concrete from behind outer 1987 skin. Collected from spalled area by Norah.
- Core 4 additional sample (P00/1570/34) Concrete and Alum Shale debris from back of core hole.
- Sample 3 (P00/1570/35) Black shale from cutting on other side of road?? Collected by Ian.
- Sample 4 (P00/1570/42) Outer surface of concrete sample. Collected previously by Per.

#### Initial XRD Results:

- Core 4 additional sample (P00/1570/34) Thaumasite plus unknown compound – possibly  $K_2Ca(CO_3)_2$
- Sample 4 (P00/1570/42) Mainly calcite plus some quartz, gypsum and thaumasite

#### 23<sup>rd</sup> November – Ekeberg Tunnel

The night workers experiences:-

Per, Claus, Ted and Norah started off in the Northbound tunnel section of the E18 heading out of Oslo towards Stockholm. We then had to move into the Southbound tunnel because of a technical hitch. The traffic was redirected through the Northbound and we scoured the Southbound tunnel for signs of the Alum Shale. We could access the larger rock-lined tunnel behind the neat pre-cast concrete tunnel through the SOS telephone recesses. We couldn't get access to the Alum Shale stretch of the southbound tunnel but did take one sample (sample 1) of a white pop-out material on surface of concrete sprayed on claystone. The exact location of sample 1 was not recorded.

The Northbound tunnel was eventually closed and we transferred across. Next to the SOS telephone booth at location 1730, we discovered Alum Shale in the primary tunnel. This had been sprayed with steel fibre containing concrete. The concrete surface was patchily coated with rust- and white-coloured efflorescence. We collected a couple of debonded slabs of concrete and then took our 2 cores. The first core hit syenite and the second Alum Shale. We also took two water samples, one of which was near the area of coring. We looked in all of the SOS recesses and between carriageway recesses trying to locate further examples of sprayed primary tunnels. However, in most of these locations the country rock had not in fact been sprayed.

#### Samples from the Ekeberg Tunnel :

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Norah Crammond  
Centre for Concrete Construction

**Report Number:** P00/1570/R1  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 15<sup>th</sup> May 2001  
**Page 15 of 15**

Commercial-in-confidence

Sample 1 (P00/1570/36) White material from pop-out on surface of sprayed concrete coating  
Southbound primary tunnel  
Sample 2 (P00/1570/39) Stalactites from above location of core 1  
Sample 3 (P00/1570/41) Broken off section of concrete overlying Alum Shale from location of core 1  
Waters 1&2 (P00/1570/38) Collected from water drips at area of coring, water associated with alum  
shale.  
Core 1 (P00/1570/37) Thin concrete passing into veined syenite from SOS Station at Northbound  
precast tunnel location 1730  
Core 2 (P00/1570/40) Concrete passing into Alum Shale. Core in good condition. Taken very close  
to Core 1.

**Initial XRD Results:**

Sample 1 (P00/1570/36) Thaumasite plus calcite

**Freifjord tunnelen – additional sample from Per:**

Sample 1 (P00/1570/44) Sub-sea degraded concrete from West Norway. Contains white deposits.

**Initial XRD Results:**

Sample 1 (P00/1570/44) Mainly gypsum and calcite with minor thaumasite and quartz

**ADDITIONAL SAMPLES FROM THE GEOLOGICAL MUSEUM OF OSLO**

Collected by Norah on 23/11/00. Site additionally visited by Ian Longworth on the 22/11/00 and Ted  
Sibbick on the 24/11/00.

**XRD results:**

Geolmus1 Sample from alum shale exhibit of a white material within a deteriorated mortar bar,  
which looks very much like a Blindtarmen test sample. This exhibit has been on  
display for decades. There are no records or analyses available at the museum. XRD  
detected mainly calcite and quartz plus a lesser amount of unknown material. Minor  
thaumasite was also detected.

Geolmus2 Sample from lower basement of museum. The senior curator Inge Bryhni took me  
down to look at the degraded plaster/render on the walls just above floor level. White  
material was forming on the surface of the walls as efflorescence but was also  
forming within the body of the plaster/render thereby causing it to crumble. XRD of  
the white material forming within the plaster/render found it to contain mainly  
thenardite plus calcite and minor quartz.

Prepared for:  
Ted Sibbick

**Report Number:** P00/1570/R2  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 18/04/02  
**Page 1 of 1**

Commercial-in-confidence

## pH of water samples

### Sample Description

Client specimen reference: 4 No. Water Samples from Harperfoss  
Sampled by: Client  
MLS specimen reference: P00/1570/01-04  
Project Number: CV4143

### Testing

Tested by: Jacqui Hardcastle, Chemical Analysis Laboratory  
Test standard/method: In-house method. The pH values were determined using a Jenway PHM 10 pH meter.  
Date samples received: 08/04/02  
Date and place of analysis: 18/04/02, Chemical Analysis Laboratory

### Results Summary

Sample Number	Client Reference	pH
P00/1570/04		5.70
P00/1570/05		5.67
P00/1570/06/1		5.66
P00/1570/06/2		6.06

Final approval by:  
Name: Martyn Webb

Position: Laboratory Manager  
Date:

Prepared for:  
Ted Sibbick

**Report Number:** P00/1570/R3  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 20/3/01  
**Page 1 of 1**

Commercial-in-confidence

### Analysis of water samples by ion chromatography

#### Sample Description

Client specimen reference: 3 No. water samples, Norwegian Tunnelling Collaboration  
MLS specimen reference: P00/1570/31, 38/1, 38/2  
Project name: CV4134

#### Testing

Tested by: Margaret Gavin, Chemical Analysis Laboratory  
Test standard/method: In-house method. Water samples analysed by ion chromatography.  
Date samples received: 7/3/01  
Date and place of analysis: 8-16/3/01, Chemical Analysis Laboratory

#### Results Summary

Results are given as mg/l of ion in solution.

Sample Number	Customer Reference	Cl	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Na+	K+	Mg2+	Ca2+
P00/1570/31	Ekeberg tunnel 1730 Stalagtite water	29	25	1841	274	26	22	110	615
P00/1570/38/1	Ekeberg tunnel water from core sites 1 + 2 in Alum shale	10	18	592	100	25	16	20	106
P00/1570/38/2	Akergergue in cutting, core area 1	10	14	2031	56	43	22	74	574

Final approval by:  
Name: Martyn Webb

Position: Laboratory Manager  
Date:

Materials Laboratory Services

BRE, Garston, Watford, WD25 9XX

Telephone: 01923 664000 Fax: 01923 664010 E-mail: [enquiries@bre.co.uk](mailto:enquiries@bre.co.uk)

Prepared for:  
Ted Sibbick

**Report Number:** P00/1570/R4  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 20/3/01  
**Page 1 of 1**

Commercial-in-confidence

**pH Determination**

**Sample Description**

Client specimen reference: 3 No. water samples, Norwegian Tunnelling Collaboration  
MLS specimen reference: P00/1570/31, 38/1, 38/2  
Project name: CV4134

**Testing**

Tested by: Margaret Gavin, Chemical Analysis Laboratory  
Test standard/method: The pH of the water samples was determined using a Jenway PHM 10 pH meter where there was sufficient sample. Where only limited sample was available the pH was estimated using pH indicator papers  
Date samples received: 7/3/01  
Date and place of analysis: 14/3/01, Chemical Analysis Laboratory

**Results Summary**

Results are given as mg/l of ion in solution.

Sample Number	Customer Reference	pH
P00/1570/31	Ekeberg tunnel 1730 Stalagmite water	7.6
P00/1570/38/1	Ekeberg tunnel water from core sites 1 + 2 in Alum shale	~7
P00/1570/38/2	Akergergue in cutting, core area 1	~7

Final approval by:  
Name: Martyn Webb

Position: Laboratory Manager  
Date:

This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

Ted Sibbick  
Mat Analys

**Report Number:** P00/1570/R5  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 30/03/01  
**Page 1 of 2**

Commercial-in-confidence

### X-Ray Diffraction analysis

#### Sample Description

Client specimen reference: Akerbergveien Cutting Sample 2 Mushy debris behind outer layer  
MLS specimen reference: P00/1570/33  
Project name: CV4134

#### Testing

Tested by: Roger Bollinghaus, Chemical Analysis Laboratory  
Test standard/method: Sample on a silicon slice was analysed by X-Ray Diffraction using a Siemens D500 Diffractometer from 5-50 degrees 2 $\theta$ .  
Date samples received: 29/03/01  
Date and place of analysis: 30/03/01, Chemical Analysis Laboratory

#### Results Summary

Sample	Compounds identified
AKERBERGVEIEN CUTTING SAMPLE 2 P00/1570/33	CALCITE THAUMASITE QUARTZ

Plots for the above specimens are given in Figure 1.

Final approval by:

Date:

Name: MARTYN WEBB

Position: Laboratory Manager

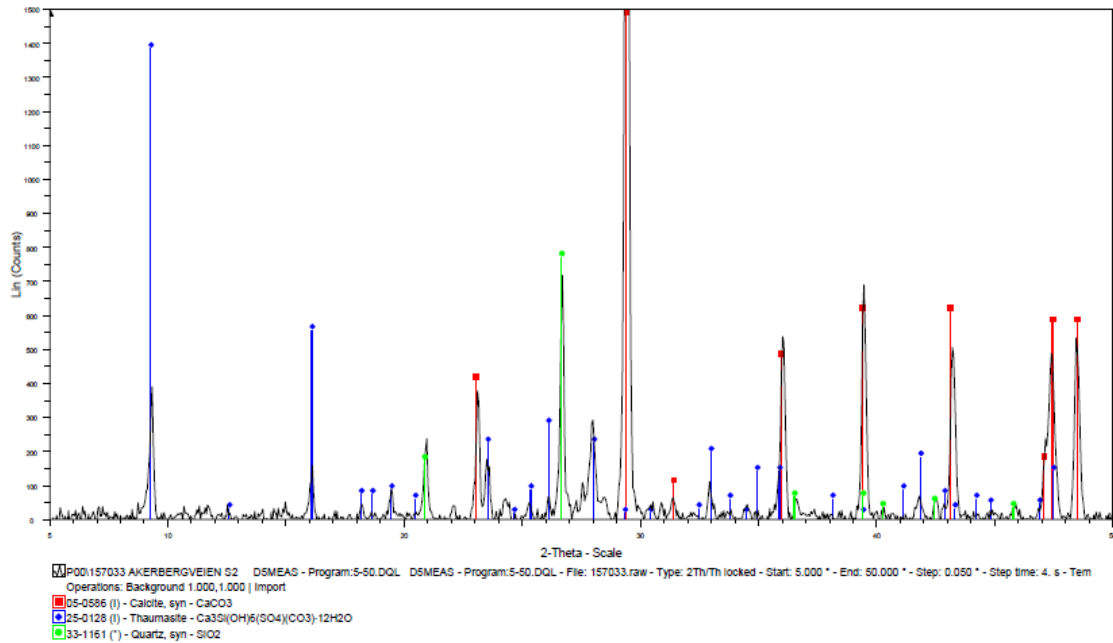


Ted Sibbick  
Mat Analys

**Report Number:** P00/1570/R5  
**MLS Reference:** P00/1570  
**Date of Issue:** 30/03/01  
**Page 2 of 2**

Commercial-in-confidence

Figure 1. XRD plot for Akerbergveien Cutting Sample 2



This report may only be distributed in its entirety and in accordance with the terms and conditions of the contract.  
Test results relate only to the items tested.  
BRE has no responsibility for the design, materials, workmanship or performance of the product or items tested.  
This report does not constitute an approval, certification or endorsement of the product tested.  
©Building Research Establishment Ltd 2001

# Vedlegg 4 – Sprøytebetong i undersjøisk miljø

---

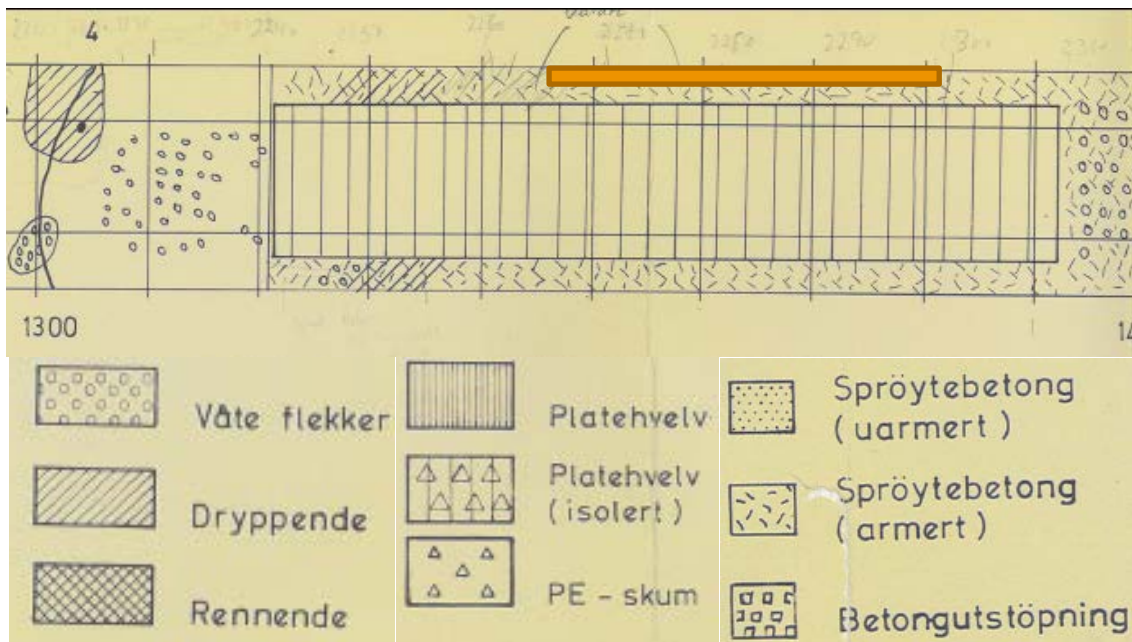
# Flekkerøytunnelen – undersjøiske strekningar

## Tunneldokumentasjon

Flekkerøytunnelen har blitt undersøkt i fleire omgangar:

- 1989: Tunnelkartlegging av sprøytebetong og lekkasjar m.m. (Kveen og Pedersen 1990).
- 1991: Hydrogeologiske egistreringar av sprekkfrekvensar og lekkasjar i undersjøisk strekning (Hagelia 1992).
- 1996: Kartlegging av utfellingar; kjerneprøver for betonganalyse og analyse av vatn (Røhrsveen og Lygre 1996, Davik 1997b) (Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler).
- 2002-2003: Undersøking av skadd sprøytebetong, utfellingar på overflata, kjerneprøver for strukturanalyse/diagnose og analyse av vatn (Hagelia 2011b).
- 2014: Kjerneprøver for strukturanalyse og betonganalyse (Mannvit 2015f).

### 1989 – Samanlikning av kartagd sprøytebetong med funn i 2014



V4.1. Utsnitt av tunnelkart P461-06 frå pelnummer 1300-1400 m. Kartlagt i 1989 same år som tunnelen blei opna for trafikk (Kveen og Pedersen 1990). Betongalder ca. 1 år. Den stålfiberarmerte sprøytebetongen gjekk heilt ned til sålen på begge sider og var prega av våte flekker og drypplekkasjar. (Kveen og Pedersen 1990). Registreringar 1991 viste at lekkasjane lokalt hadde auka, med jamt over våtare sprøytebetong ned til sålen. I 2002 – 2003 var bildet omtrent det same, men i 2014 viste seg at dei nedre delane (1-1,5 m) av sprøytebetongen på venstre side (oransje felt) hadde tæra heilt vekk (sjå foto V4.10 og analyseresultat frå XRD under).

Den lokale utviklinga på pelnummer 1300-1400 er interessant fordi deler av sprøytebetongen her hadde tæra heilt bort ein gong mellom 2003 og 2014. Sjølv om betongsjiktet her neppe var meir enn 1-2 cm tjukt seier dette noko om prosessar som går føre seg, og fortel at tverrsnittet til sprøytebetongen kan bli sterkt svekka eller redusert.

### ***1991 - Hydrogeologiske undersøkingar***

Med bakgrunn i utført tunnelkartlegging (Kveen og Pedersen 1990) blei det registrert sprekkefrekvensar av sprekkar med fall mellom 60-90 grader i heile den undersjøiske tunnelstrekningen. Sprekkefrekvensar pr. m<sup>2</sup>, eit uttrykk for hydraulisk konduktivitet, blei tald opp på begge sider av tunnelen for kvar 10. løpemeter. Gjennomsnittleg sprekkefrekvens for kvar 50 løpemeter (basert på ti individuelle teljingar), blei deretter samanlikna med a) lekkasjeomfanget i tunnelen, b) tunneldjup for kvar 50 løpemeter og c) med bergoverdekninga for kvar 50 løpemeter.

På dette grunnlaget blei det etablert eit empirisk-teoretisk rammeverk og ei førebels empirisk likning for å estimere lekkasjeomfang i undersjøiske tunnelar (Hagelia 1992, 1994). Hovudresultata er referert i Kapittel 2.

### ***1996 - Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar***

I samband med etatsprogrammet blei det bora ut 29 kjerner for ulike betongundersøkingar ved dei gamle pelnummera 1770, 1930, 2030 og 2800 (Røhrsveen og Lygre 1996).

Røhrsveen og Lygre (1996) samla inn vassprøver for kjemisk analyse ved pelnummera 2140 og 2710. I tillegg blei det samla inn sjøvatn frå Vestergapet ved Flekkerøya.

Hovudresultata frå desse undersøkingane går inn i tabellane i Kap 4.6.

### ***2002 – Rekognosering og innsamling av overflateprøver og vatn***



V4.2. Eksempel på kvit sprøytebetong som er påverka av vatn frå bergsida. Venstre: Lange stalaktittar av kalsitt med brucitt ( $Mg(OH)_2$ ) og destruktiv stålfiberkorrosjon i overflata. Høgre: tilsvarande med omfattande fuktgjennomslag i 0 - 1 m over sålen. Område nær pumpeumpen. September 2002. Betongalder 14 år. Foto: Per Hagelia.

Rekognosering i tunnelen avdekte ein god del kvitforvitra betong. Vidare blei det konstatert nokre område med omfattande nedbryting under rustbrun (jernrik) og mørk (manganrik) biofilm, bl.a. omkring pelnummer 1350-1390. Dette bekrefta observasjonar av Hansen (1996) som først rapporterte om teikn på biologisk nedbryting av sprøytebetong.

Det blei samla inn ein del overflatemateriale. Ved pelnummer 1373 blei det oppdaga eit hard krystallin brunleg skorpe under relativt tykk og våt biofilm (sjå V. 4.3.). Prøva måtte hamrast laus, og seinare undersøkingar av tynnslip (sjå Tabell 4.21 og Hagelia 2011b) viste at dette er gips med innslag av jernoksid.



*V4.3. Svært tykk og hard rusta gipsutfelling (Prøve F8-1373) danna på sprøytebetongoverflate under biofilm av jernbakteriar og manganbakteriar. Rusta er danna ved destruktiv stålfiberkorrosjon i ytre sprøytebetong. Prøva er hamra laus frå betongoverflata ved betongalder 14 år. Foto: Per Hagelia.*

Vassprøver: Det blei samla inn vatn frå følgjande pelnummer: 1000, 1095, 1240 og 1306. Dei kjemiske analysane er rapporterte i Kapittel 4.6 (sjå Hagelia 2011b).

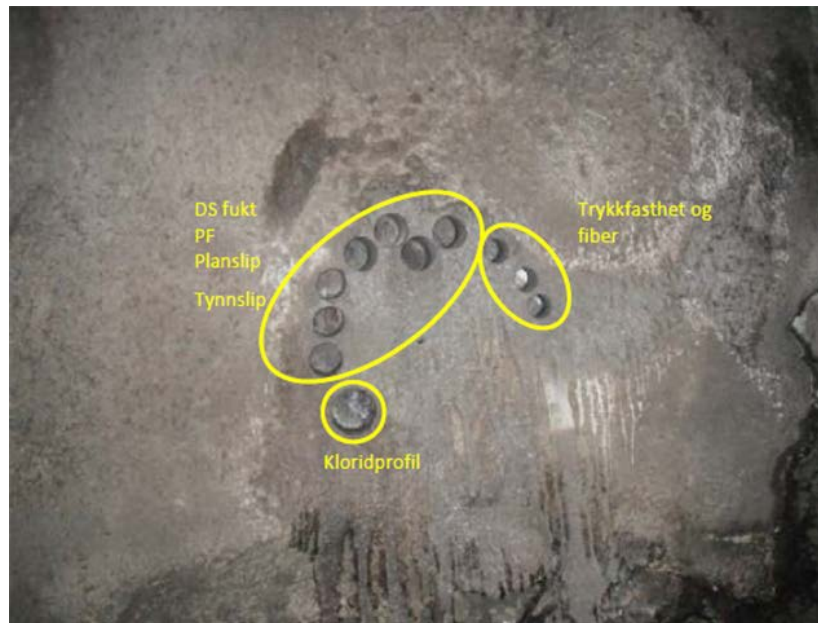
### **2003 – Kjerneboringar i den undersjøiske strekningen**

Det blei bora ut betongkjerner frå pelnummer 974, 1069, 1070, 1071, 1074, 1200, 1314 og 1373 (sjå Kapittel 4.6).



*V4.4. Biofilm av jernoksiderande bakteriar (brun) over bakterielt utfelt manganoksid (mørk). Under var det var utfelt gips danna ved syreangrep på sementlimet. Rusta er danna ved destruktiv stålfiberkorrosjon. Høgre foto viser borepunkt for kjerneprøve 1373H bora ut i 2003. Betongalder 15 år. Foto: Dag Øystein Løyning.*

## 2014 – Varige konstruksjonar



V4.5. Flekkerøytunnelen, pelnummer 885H (Tilsvavar tidlegare pelnummer 1770 i Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler). Bergoverflata var relativt tørr. Betongalder 26 år: Foto: Mannvit.



V4.6. Flekkerøytunnelen, pelnummer 1380H. Bergoverflata var våt, delvis med biofilm. Kjernene blei bora ut 4 meter over vegbana. Betongalder 26 år: Foto: Mannvit.



*V4.7. Flekkerøytunnelen, pelnummer 1380H. Bergoverflata var vår med biofilm. Betongalder 26 år: Foto: Mannvit.*



*V4.8. Flekkerøytunnelen, pelnummer 1380H med avskaling: området for tynnslip 1380-9. Bergoverflata var vår utan biofilm. Betongalder 26 år: Foto: Mannvit.*



V4.9. Flekkerøytunnelen, pelnummer 1380H med avskaling: området for tynnslip ST1380 (gul pil) og tidlegare kjerneboring. Bergoverflata var våt delvis med biofilm. Betongalder 26 år: Foto: Mannvit.



V4.10 Flekkerøytunnelen, pelnummer 1360V med sterkt nedbroten og bortøra sprøytebetong. Området hadde tidlegare tynn sprøytebetong heilt ned til sålen, med biofilm. Ved betongalder 26 år var det bare bassanitt og litt gips spreidd over deler av overflata. Foto: Per Hagelia.





V4.11 Flekkerøytunnelen i området omkring pelnummer 1360-1380, med sterk nedbryting og tap av tverrsnitt i overflata. Betongalder 26 år. Foto: Per Hagelia.

### **Sprøytebetongprøver med plassering av tynnslip**

**1996**

Det blei ikkje laga tynnslip frå Flekkerøytunnelen i «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar».

**2003**

Nokre av kjernene blei ikkje fotografert.



V4.12. Kjerne 974 med tynnslipområder. Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.



V4.13. Kjerne 1070 med tynnslipområder. Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.



V4.14. Kjerne 1071 med tynnslipområder. Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.



V4.15. Kjerne 1074 med tynnslipområder. Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.



V4.16. Kjerne 1314 med tynnslipområder. Merk svært tynn og kvit sprøytebetong. Muleg er noko av betongen tæra bort. Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.



V4.17. Kjerne 1375 med tynnslipområder. Tynn betong med omfattende stålfiberkorrosjon (sett i tynnslip). Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.



V4.18. Kjerne 1800 med tynnslipområde. Svært tynn betong under biofilm. Muleg at noko av betongen er tæra bort. Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.

**2014- Varige konstruksjonar**



V4.19. Kjerne 885H med tynnslipområde. Muleg er noko av betongen tæra bort. Betongalder 26 år. Foto: Mannvit.



V4.20. Kjerne 1380-7 med tynnslipområde. Betongalder 26 år. Foto: Mannvit.



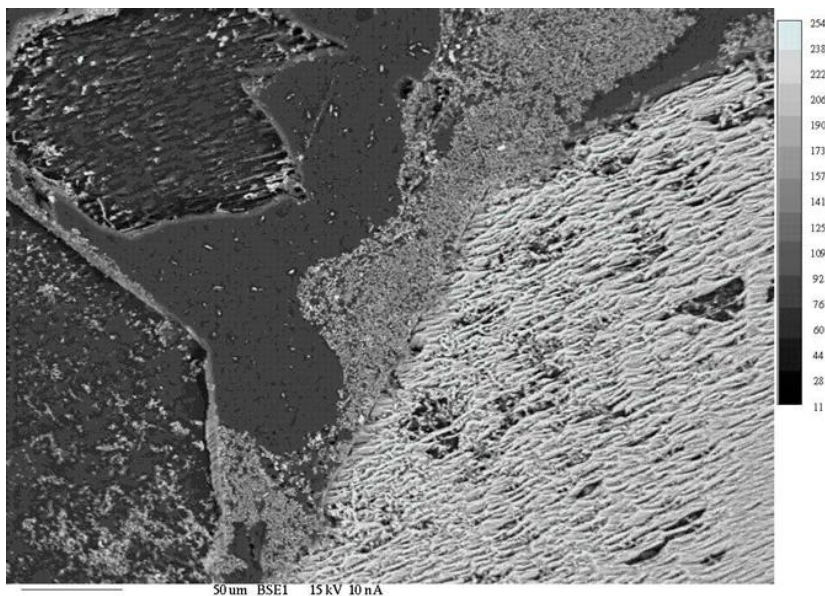
V4.21. Kjerne 1380-9 med tynnslipområde. Avskaling og fiberkorrosjon. Muleg er noko av betongen tæra bort. Betongalder 26 år. Foto: Mannvit.



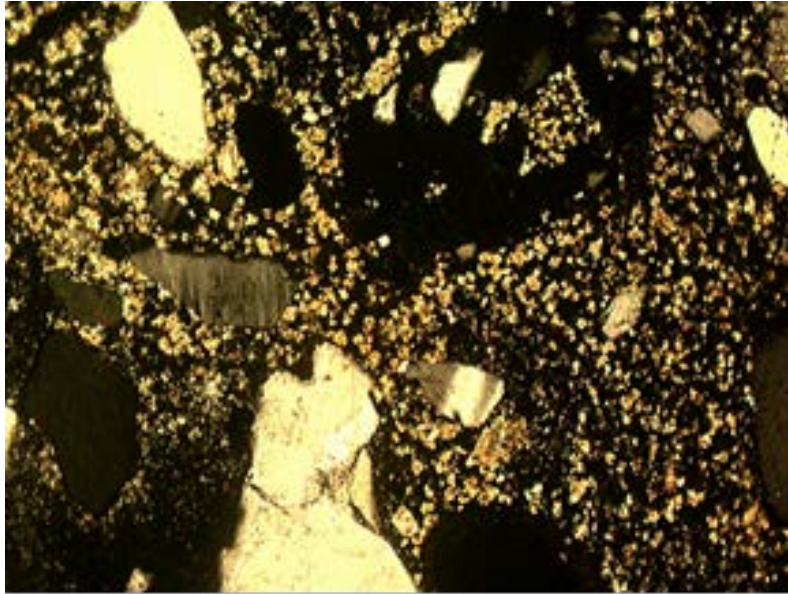
V4.22. Prøve ST1380 med tynnslipområde. Området hadde kraftig avskaling. Noko av betongen tæra bort. Betongalder 26 år. Foto: Mannvit.

### Eksempel frå mikroskopering av tynnslip

2003

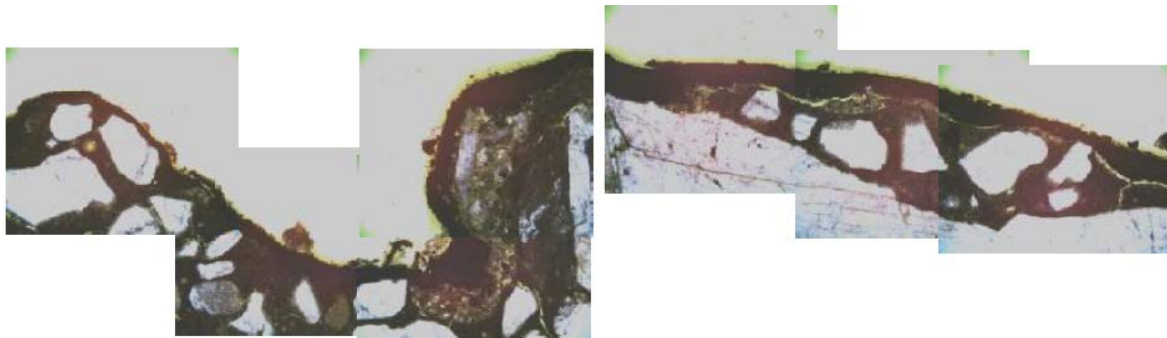


V4.23. SEM foto av hard gipsskorpe ved pelnummer 1373. Gips viser teikn på oppløysing. Betongalder 14 år. Foto: Per Hagelia.

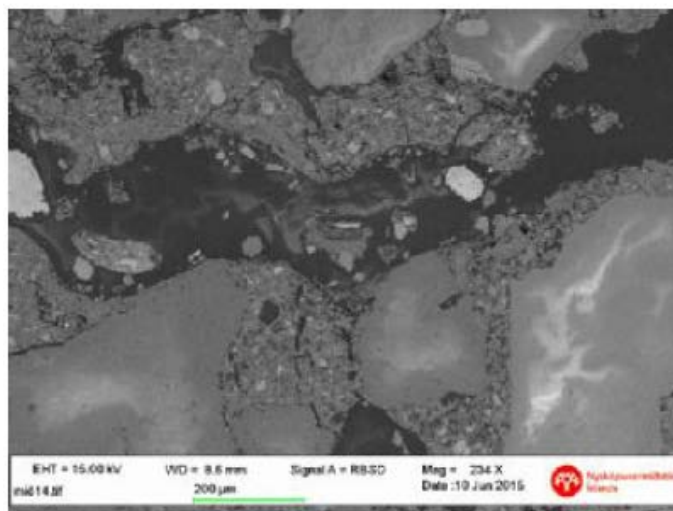


*V4.24. Kraftig utlutning av sementpasta med Popcorn kalsitt utfelling i kjerneprøve 1373. Under biofilm. Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.*

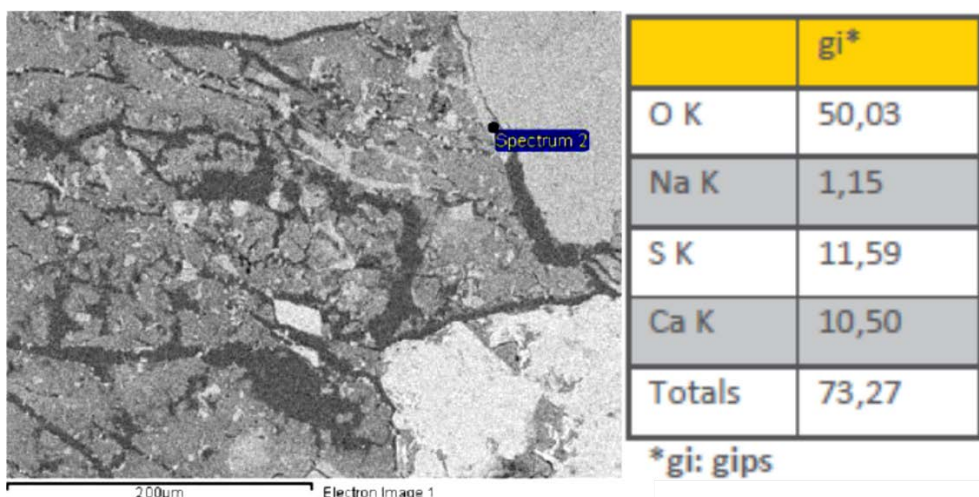
**2014**



*V4.25. Tynn biofilm på overflata av kjerne 885H. Betongalder 26 år. Foto: Gisli Gudmundsson, Mannvit.*



V4.26. Utluting i overflata i kjerne 885H. SEM-foto. Betongalder 26 år. Foto: Gisli Gudmundsson, Mannvit.



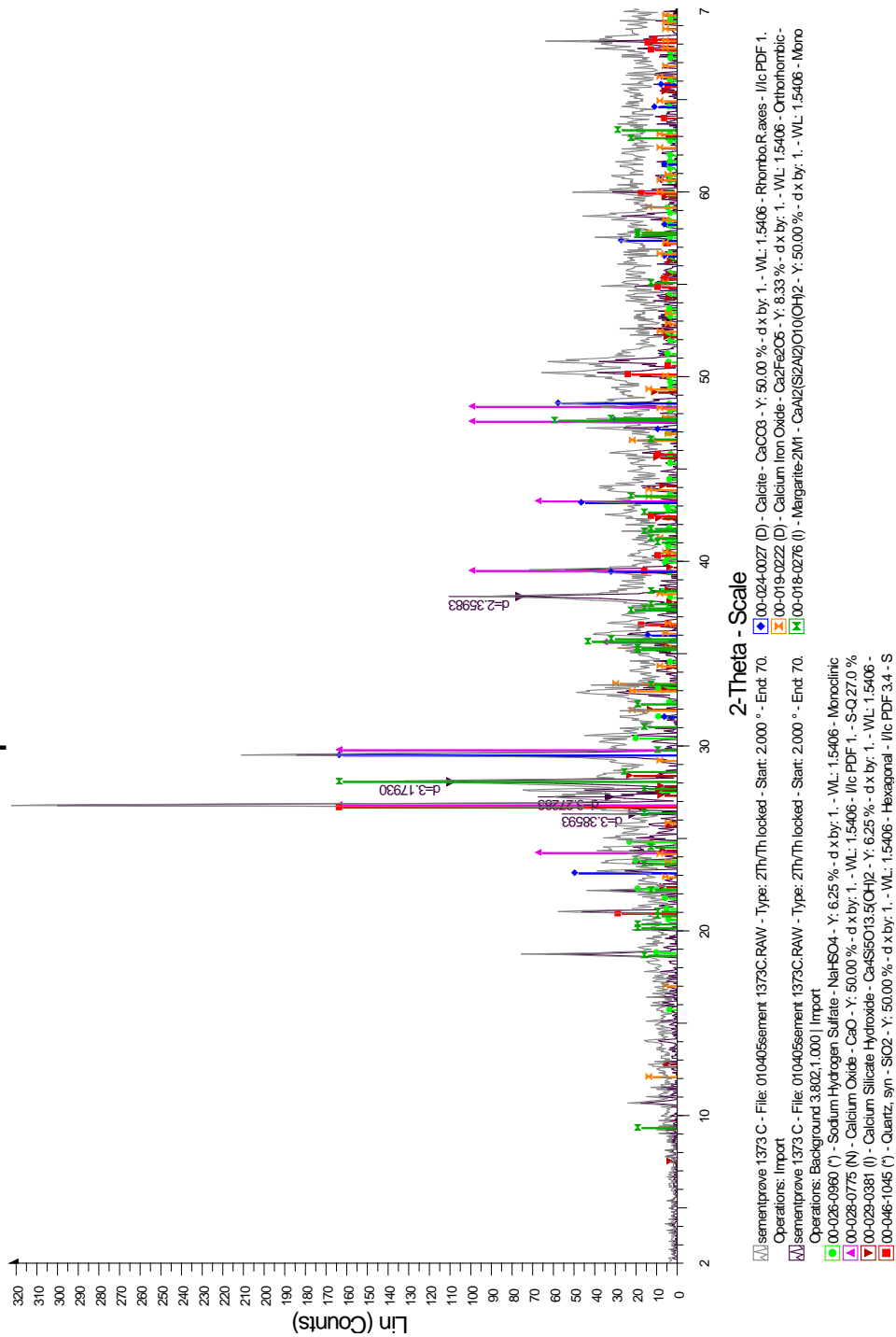
V4.27. Gips utfelt på mikroriss (lyse striper) i ST1380, vitnar om angrep av svovelsyre. Betongalder 26 år. Foto: Gisli Gudmundsson, Mannvit.

Mannvit (2015f) har rapportert svært detaljerte mikroanalysar av nedbroten sprøytebetong i Flekkerøytunnelen, men er ikkje tema i denne rapporten.



## Røntgenopptak (XRD)

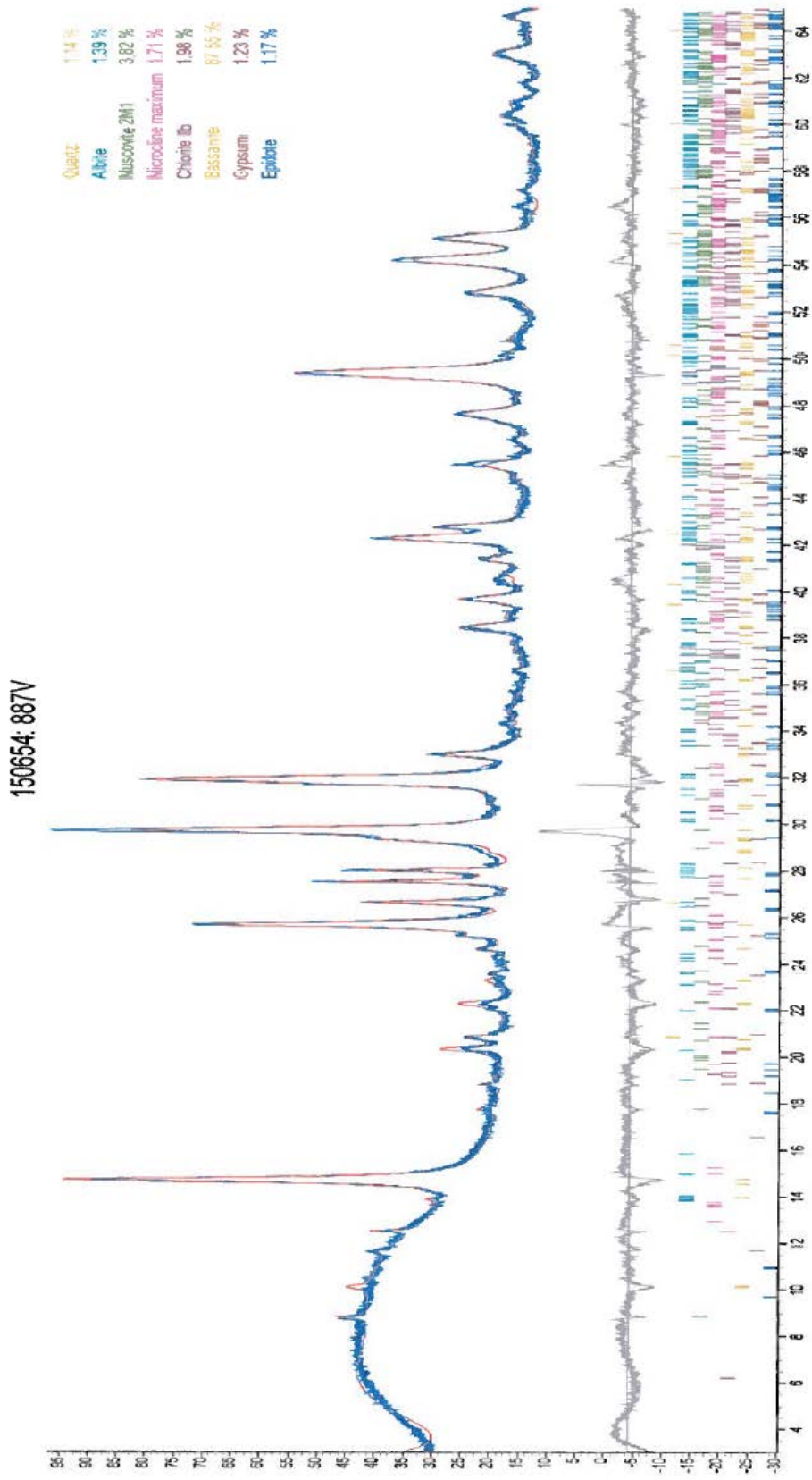
### sementprøve 1373 C



V4.28. Natrium hydrogen bisulfat (lys grøn) med utfelling av kalsiumkarbonat og Ca-Fe-oksyd i C-S-H, danna på heftsona til sprøytebetong under syregivande biofilm i Flekkerøy-tunnelen. Betongalder 15 år. Utført av Hans-Jørgen Berg, Naturhistorisk museum, Universitetet i Oslo.

Vår dato 27.10.2015 Vår referanse LT / 15-112

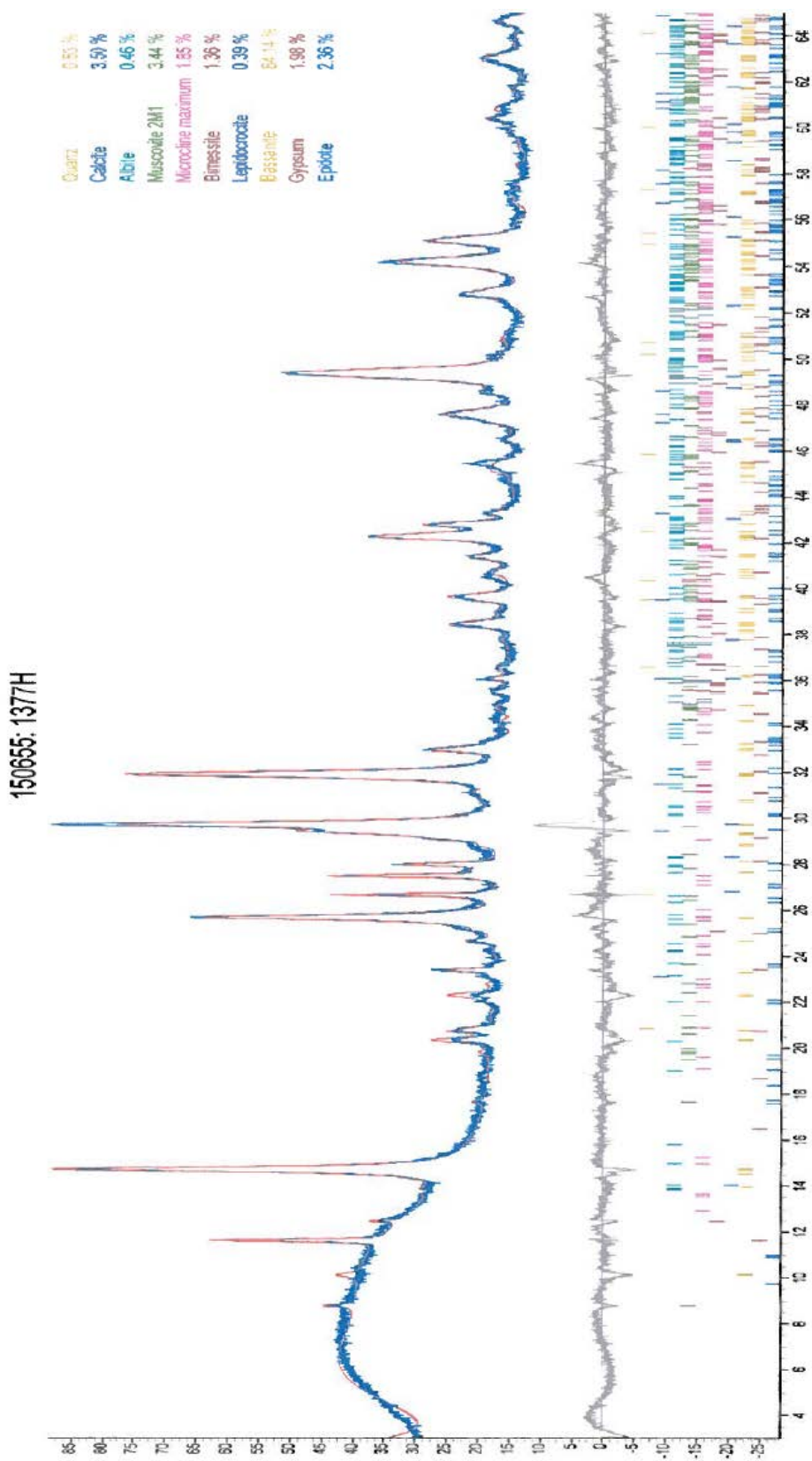
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet



V4.29. Pelnummer 887V: Utfelling av bassanitt med litt gips. Restprodukt etter nedbryting av tynn sprøytebetong under syregivende biofilm. Betongalder 26 år. Utført av NTNU.

Vår dato 27.10.2015 Vår referanse LT / 15-112

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet



V4.30. Pelnummer 1377H (foto V4.10): Utfelling av bassanitt med litt gips, kalsitt, lepidokrositt ( $\text{FeOOH}$ ) og birnessitt ( $\text{Mn}$ -oksyd). Restprodukt etter nedbryting av tynn sprøytebetong under syregivende biofilm. Betongalder 26 år. Utført av NTNU.

## **Sprøytebetongresept – Flekkerøytunnelen**

Resepten i undersjøisk del er den same som i ferskvassonene (sjå Vedlegg 1).

## **Analysar av vatn frå den undersjøiske delen av Flekkerøytunnelen**

Analyseparametrane er summerte i Tabell 4.20 (Kjelde: Hagelia 2011b).

# **Byfjordtunnelen – undersjøiske strekningar**

## **Tunneldokumentasjon**

Byfjordtunnelen er undersøkt i fleire omgangar:

- 1992: Registrering av sprekkfrekvensar og lekkasjar i undersjøisk strekning under bygging
- 1996: Kartlegging av utfellingar, kjerneprøver for betonganalyse og analyse av vatn (Røhrsveen og Lygre 1996, Davik 1997b) (Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler)
- 2004: Utboring av kjerneprøver for strukturanalyse og diagnose (Hagelia 2011b)

### ***1992 – Sprekkfrekvensar***

Det blei utført teljingar av sprekker (parameteren  $J = \text{steilståande sprekker/m}^2$ ) gjennom heile den undersjøiske strekningen, på same måten som i Flekkerøytunnelen. Dette er ikkje publisert. Det var generelt ganske låge sprekkfrekvensar gjennom heile tunnelen og i gjennomsnitt omkring 5 sprekker/m<sup>2</sup>. Dette talet tilsvarar stikkprøvemålingar i Mastrafjordtunnelen i same området. Sprekkfrekvensar blir brukt i Kapittel 5 Hydrogeologiske og bergmekaniske forhold.

### ***1996 - Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar***

I samband med dette FoU-programmet blei det bora ut 16 kjerner ved pelnummera 2862 og 2868 (Røhrsveen og Lygre 1996). Røhrsveen og Lygre (1996) samla også inn vassprøver for kjemisk analyse ved pelnummera 3050 og 3650. Hovudresultata frå desse undersøkingane går inn i tabellane i Kap 4.6.

Det blei også utført omfattande registreringar av utfelt kalk, biofilm samt vatn på betongoverflater. Dette går inn i grunnlaget for Kapittel 5 Hydrogeologiske og bergmekaniske forhold.

### ***2004 – Kjerneboringar i den undersjøiske strekningen***

Det blei bora ut 6 kjerner i den undersjøiske delen ved pelnummer 2862 og 2868.



V4.31. Lokalisering av kjernene (Core-) 1-1, 1-2, 1-3 og 1-4 på pelnummer 2862 i relativt tørt område (midt på bildet: nedre del vått etter utboring i 2004). Tidlegare kjerneboring av Røhrsveen og Lygre (1996); 5 kjerner lengre opp, blei bora ut medan det fortsatt var vått (mørkt område). Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.



V4.32. Lokalisering av kjernene (Core-) 2-1 og 2-2 på pelnummer 2868 i relativt tørt område. Dei øvste åtte kjernebola er frå Røhrsveen og Lygre (1996). Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.



V4.33. Eksempel på biofilm i Byfjordtunnelen i 2004 (pelnummer ca. 3000-3200). Det er generelt svært lite omfang av biofilm i denne tunnelen. Vekstvilkåra er likevel til stades og kjem til syne på relativt tynn betong med gjennomsettande riss. Det blei ikkje bora ut kjerner av dette. Betongalder 13 år. Foto. Per Hagelia.

### **Sprøytebetongprøver med plassering av tynnslip**

**1996**

Det blei ikkje laga tynnslip i FoU-programmet «Riktig bruk av sprøytebetong i tunnelar».

**2004**



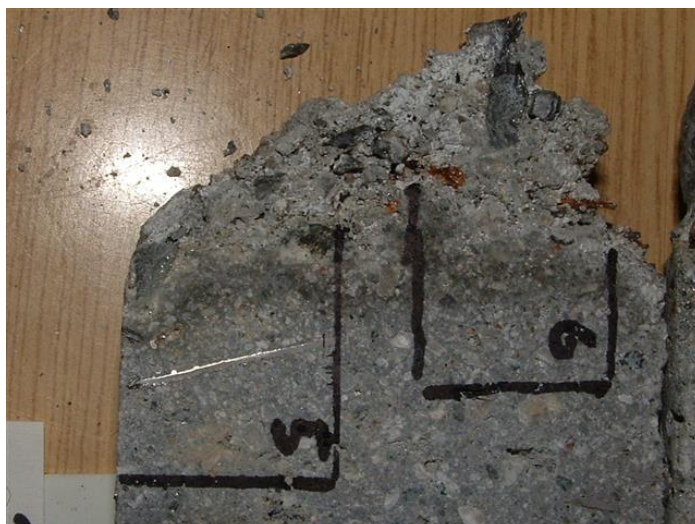
V4.34. Kjerne Core 1-1 med tynnslipområder. Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.



V4.35. Kjerne Core 1-1 sett frå heftsona med karbonatisering og stålfiberkorrosjon. Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.



V4.36. Kjerne Core 1-2 med tynnslipområder. Omvandling av sementpasta og stålfiberkorrosjon i karbonatisert sone 20-30 mm inn frå berg (venstre ende). Heftsona inneheld nokre fragment av fyllitt. Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.



V4.37. Kjerne Core 1-2, detalj av heftsona. Merk: frisk ukorrodert stålfiber rett innanfor den karbonatiserte sona. Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.



V4.38. Kjerne Core 2-1 (pel 2868) med tynnslipområder. Stålfiberkorrosjon 20-30 mm inn frå bergsida (venstre ende) og ytre avskaling (høgre). Betongalder 13 år. Foto: Per Hagelia.



## **Mikroskopering av tynnslip**

Resultata er dokumentert i Tabell 4.21.

## **Sprøytebetongresept – Byfjordtunnelen**

Resepten i undersjøisk del er den same som ferskvassonene (sjå Vedlegg 1).

## **Analysar av vatn frå den undersjøiske delen av Byfjordtunnelen**

Dei sentrale analyseparametrane med tanke på eksponeringsmiljø for betong er summerte i Tabell 4.20.

## **Freifjordtunnelen – undersjøiske strekningar**

Freifjordtunnelen har blitt undersøkt i fleire omgangar:

- 1996: Kartlegging av utfellingar, kjerneprøver for betonganalyse og analyse av vatn (Røhrsveen og Lygre 1996, Noteby 1996, Davik 1997b) (Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler).
- 2000: Prøvetaking av skadd sprøytebetong og utfellingar på overflata (Hagelia mfl. 2003)
- 2003: Utboring av kjerneprøver for strukturanalyse og diagnose og innsamling av vatn (Strømme 2003, Hagelia 2011b)
- 2006: Uttak av overflateprøver og supplerande innsamling av vassprøver (Hagelia 2011b).
- 2009: Utboring av kjerneprøver for strukturanalyse og betonganalysar (Holm 2011b)

### **1996. «Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler»: Prøvetaking av sprøytebetong og vatn i**

I samband med etatsprogrammet blei det bora ut 29 kjerner ved pelnummera 3780, 3940, 4920 og 5780 (Røhrsveen og Lygre 1996), samt 10 kjerner frå to lokalitetar nær pumpesumpen ved pelnummer ca. 4900 (Noteby 1996).

Røhrsveen og Lygre (1996) samla inn vassprøver for kjemisk analyse ved pelnummera 3155, 4200, 5020 og 5920.

Hovudresultata frå desse undersøkingane går inn i tabellane i Kap 4.6.

### *Oppsmuldra sprøytebetong*


I etatsprogrammet Riktig bruk av sprøytebetong i tunneler (Davik 1997b,f) blei det rapportert om oppsmuldra sprøytebetong på fleire profilnummer (4050, 5260, 5700, 5950, 6080, 6180, 6420, 6660). Davik (1997b, f) konkluderte med at dette truleg er prelletap, men presiserte at dette må verifiserast ved seinare oppfølging.

## 2000. Prøvetaking av oppsmuldra sprøytebetong – Betongalder 9 år

Statens vegvesen region Midt, ved Ove Lars Strømme, samla i 2000 inn materiale av oppsmuldra betong og avskalingar frå fleire av dei tidlegare nemnte lokalitetane.

Undersøkingar i laboratoriet (tynnslip, røntgendiffraksjon) av Geologi og tunnelseksjonen – Vegteknisk avdeling og Building Research Establishment – Garston, Storbritannia viste at dette er danna ved kjemisk nedbryting og utfelling, i og nær overflata, og ikkje ved prelletap. Materialet inneheld gips, kalsiumkarbonat, thaumasitt og magnesiumhydroksid (brucitt), og er danna ved kraftig utluting av sementlimet med djup inntrenging av aggressivt grunnvatn (BRE rapport P00/1570/R1, 2001, Hagelia mfl. 2003, Hagelia 2011b).

## 2003. Prøvetaking av sprøytebetong og vatn – Betongalder 12 år. Rapport frå Region Midt

 <b>Statens vegvesen</b> Region midt Ressurs	HOVUDARKIV: 452.070 OPPDRAGSNR.: LH03062 LAB.ARKIV: Rv70 HP 9 KOMMUNE: KARTREFERANS E:		
TITTEL:	<b>Nedbrytingsmekanismer i sprøytebetong. Utboring i Freifjordtunnelen.</b>		
SAKSBEH.:	Ove Strømme	RAPPORT NR.:	
KONTAKT:	Per Hagelia	1	
DATO:	2003-10-29	VÅR REF.:	200374714-001
SENDT TIL:	Per Hagelia		
VEGTEKNISK SEKSJON:			

### Utboring av kjerner

Utboringa vart gjort ut frå oppsett liste. Lokalisering vart gjort med utgangspunkt i km-stolpane. Når det gjeld boring der det var utført boring før, fann vi ingen hol på dei oppgitte profilnumra, men 20 – 50 m før, så vi bora ved dei gamle hola. Ved km 5,780 fann vi ingen tidlegare boring, så der vart det ikkje teke ut noko. Eg har berre 4 sider av studentrapporten frå 1996 ( sendt som faks ), så eg har ikkje noko spesifisering av kvart enkelt punkt. Eg er ikkje sikker på om det var km-stolpar i tunnelen i 1996, så det kan vere ei forskyving i forhold til det som er oppgitt i studentrapporten.

Referanseprøvene nær endane av tunnelen vart utbora km 3,132 og 6,935 i staden for 3,000 og 7,000. Ved km 3,000 er det ikkje sprøytebetong og km 7,000 er i område med isolert platekvelv som går heilt ned.

Nokre stader er det mykje fiber i overflata. Sjå særleg på bilde frå km 6,935. Om dette kjem av betong som er erodert vekk er vanskeleg å seie.

Det var lite å sjå av den lause oppsmuldra betongen som det var ein del av i 1996. Sannsynlegvis er det som var laust blitt spyla vekk. Ved km 6,150 gjekk det an å skrape opp ei overflateprøve.

Det er teke bilete av borepunkta med filmbasert kamera. Bileta er scanna etterpå.

### **Vassprøver**

Det ser ut til at tunnelen har blitt tettare etter kvart og det var vanskeleg å finne drypp som var som store at ein fekk samla eit glas på rimeleg tid. Å ta vassprøve direkte frå borhol, var umogleg. Ein del vassprøver har vi fått likevel. Vi har brukt urinprøveglas, som er mindre enn det som sto i oppdragsspesifikasjonen. Distriktskontoret stadfester at lekkasjane i tunnelen er blitt mindre. I 1993 vart lekkasjane målte til vel 280 l/min. Over nokre år gjekk det ned til 230–240 l/min, som det såg ut til å stabilisere seg på. Våren 2003 vart det målt 130 l/min over 14 dagar etter ein tøkeperiode. Nedbør verkar inn på innsiget i endane av tunnelen, særleg på Bergsøysida.

Det er teke nokre prøver av algeførekomstar. Det subjektive inntrykket er at det er mindre algar enn før. Det har vel samanheng med mindre lekkasjevatn.



Km 3,132 h.s. God betong.



Km 3,730 h.s. Tidlegare boring til høgre.



Km 3,910 h.s. Tidlegare boring under takrenna.



Km 4,032 h.s. før og etter boring.



Km 4,890 i nisje h.s. før og etter boring. Tidlegare boring i nedre høgre hjørne.



Km 5,245 h.s. før og etter boring.





Km 5,700 h.s. før og etter boring.



Km 5,800 h.s. Algevekst midt på biletet.



Km 6,080 h.s. etter boring.



Km 6,150 h.s. ved tidlegare boring.

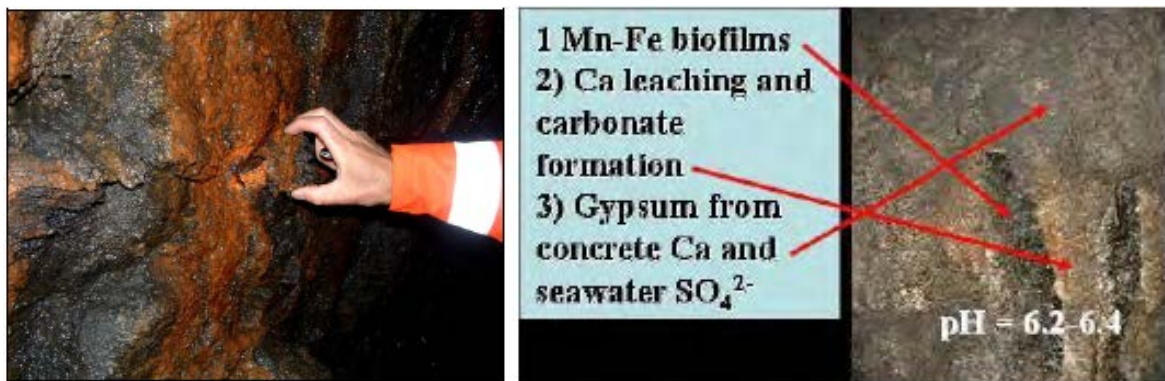


Km 6,650 h.s.



Km 6,935 h.s. Det kvite er støv etter boring for festebolt.

## Sprøytebetongobservasjoner og prøvetaking i 2006 (Hagelia 2011b)



V4.39. Eksempel på fullstendig nedbroten rest av sprøytebetong i samband med biofilm (venstre). pH i biofilmen var 5,8. Høgre bilde viser eksempel på at biofilm etablerte seg før utlutning av sementpasta med kalsiumkarbonat utfelling over biofilm. Til slutt utfelling av gips (typisk for surt sulfatangrep på betong). Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.



V4.40. Laus betong på sprøytebetongoverflater og bankett var svært vanleg i den undersjøiske delen av Freiffjordtunnelen i 2006 (Betongalder 15 år). Dette er ikkje prelltap, men gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). I samband med rehabiliteringa i 2006-2007 blei dette bellegget spylt vekk før påsprøyting av ny betong for å unngå sulfatangrep og avskaling langs ny heftsone. Foto: Per Hagelia.

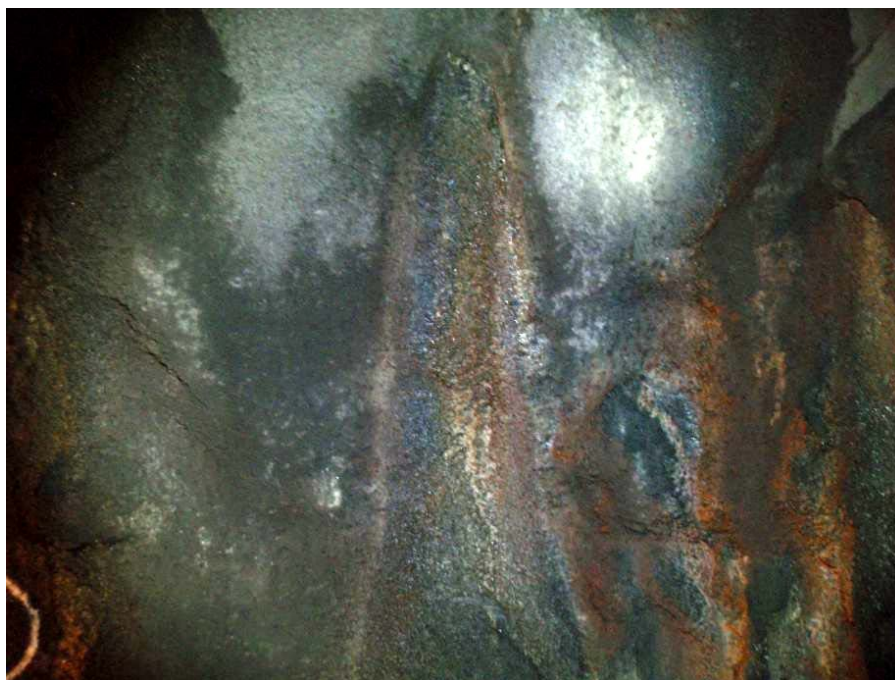


V4.41. Prøvetaking av vatn ved pel 4930. Vatnet rann langs biofilm bak platetaket. Høgre bilde viser kraftig nedbryting under syregivande biofilm (rusta) og med utfelling av gips på kvar side (grå-svart). Betongalder 15 år. Foto: Per Hagelia.

## Ut boring i 2009 (Holm 2011a) – Moderne vegtunneler



V4.42. Kjerne 3790-fk3 bora ut i litt vått område med moderat kalkutfelling. Stålfiberkorrosjon var avgrensa til overflata. Betongalder 18 år. Foto: Jan Viggo Holm.



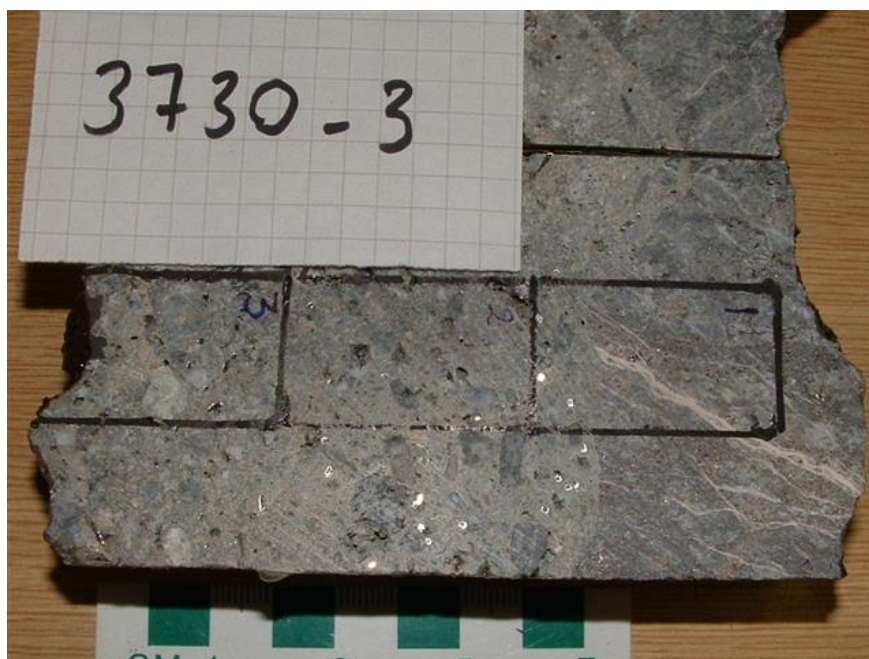
V4.43. Kjerne 5450-fk17 bora ut i lekkasje med litt biofilm (mørk manganutfelling og rustfarga jernbakteriar): lyse mineralutfellingar i kanten av lekkasjen. Stålfiberkorrosjon var avgrensa til overflata. Betongalder 18 år. Foto: Jan Viggo Holm.

## Sprøytebetong med plassering av tynnslip

2003



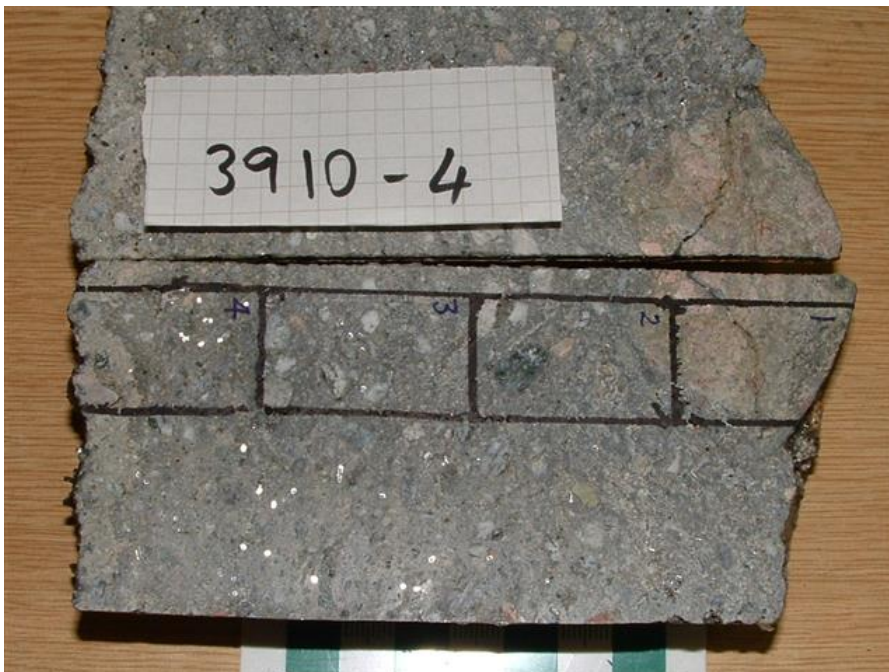
V4.44. Kjerne 3730-1 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia.



V4.45. Kjerne 3730-3 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia.



V4.46. Kjerne 3910-1 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia.

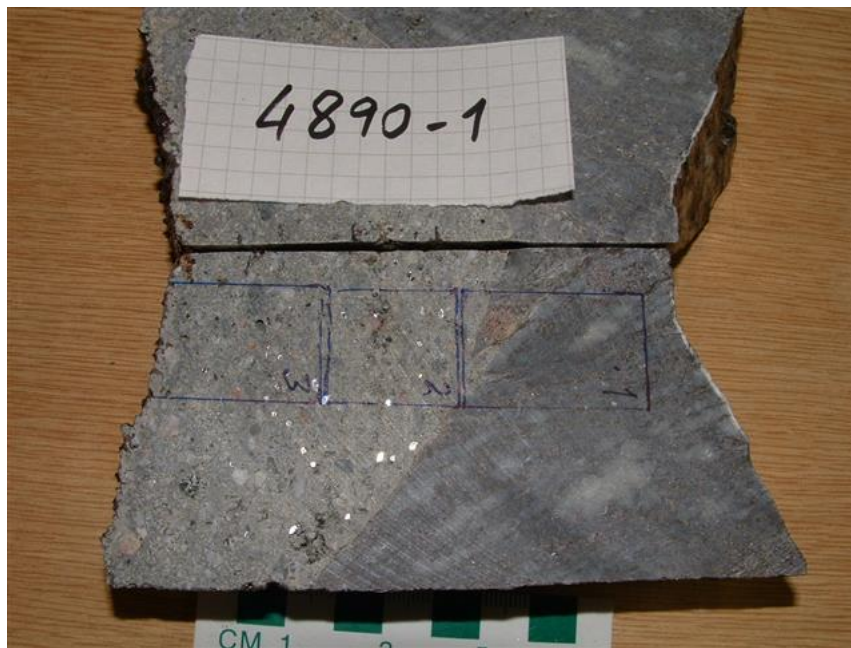


V4.47. Kjerne 3910-4 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia.





V4.48. Kjerne 4032-1 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia



V4.49. Kjerne 4890-1 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia



V4.50. Kjerne 4890-3 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia



V4.51. Kjerne 5245 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia



V4.52. Kjerne 5800 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia



V4.53. Kjerne 6150 med tynnslipområder. Merk kraftig utluting og nedbryting med destruktiv fiberkorrosjon inntil 40 mm fra heftsona. Årsaka var i dette tilfellet innverknad av syrer frå biofilm som hadde trengt inn på heftsona (Hagelia 2011b). Dette er svært uvanleg. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia



V4.54. Kjerne 6935-1 med tynnslipområder. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia

### Sprøytebetong med plassering av tynnslip 2009 (Holm 2011a)

Det blei laga to tynnslip av kjerne fk3 frå hhv ytre del og indre del mot berg. Frå Kjerne fk17 blei det laga eitt tynnslip frå ytre del. SINTEF undersøkte tynnslipa petrografisk ved polarisasjons mikroskopi og SEM.

Tabellen under her henta frå Holm (2011a).

**Tabell 11 Visuell undersøkelse av borkjernene**

Kjerne merket	Diameter, mm	Lengde, mm	Riss i overflaten	Riss i betongen	Kommentar
”fk3”	54	110-130	Ikke observert	Ikke observert	Kjernens indre 30-40 mm består av fjell. Stålfiber i betongen
”fk17”	54	85-110	Ikke observert	Ikke observert	Stålfiber i betongen

Foto nr 1-6 i vedlegg 4 viser bilder av de undersøkte borkjernene.



Foto nr 1-3. "fk3", henholdsvis hel kjerne (med overflaten mot venstre og fjell i indre del), overflate (mot tunnel) og endeflate (fjell). Det kan observeres stålfiber i betongen.

V4.55. Kjerne fk3.



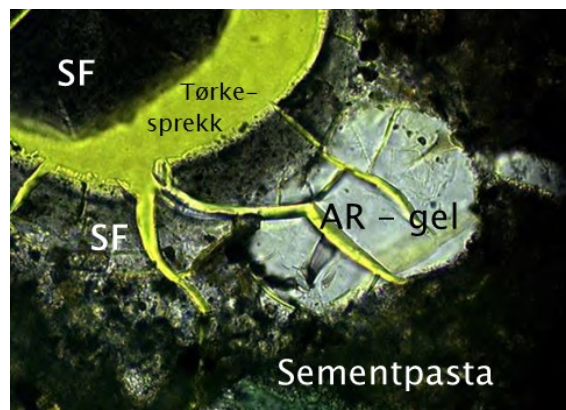
Foto nr 4-6."fk17", henholdsvis hel kjerne (med overflaten mot venstre), overflate (mot tunnel) og endeplate (fjellkontakt). Det kan observeres stålfiber i betongen, også på endeplaten.

V4.56. Kjerne fk17.

## Eksempel frå mikroskopering av tynnslip og analyse av betong

1996

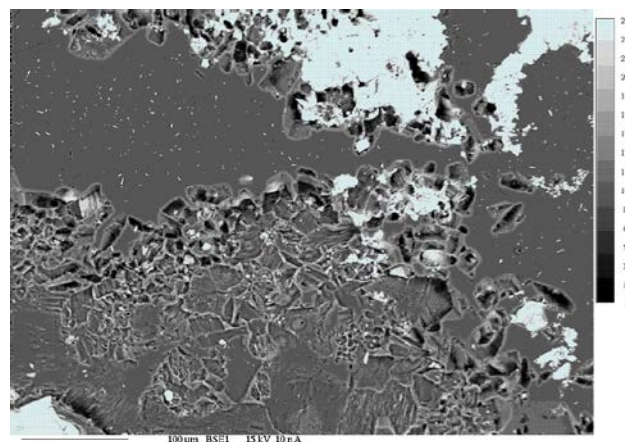
Noteby (1996) preparerte eitt tynnslip av intakt sprøytebetong frå eit område rett ved inngangen til pumpesumpen. Ein rapporterte førekomst av udispergert silikastøv i elles intakt sprøytebetong. Seinare undersøkingar av tynnslipet ved Veglaboratoriet (tynnslip nr. 204/96 frå kjerne 1D; Noteby 1996) viste at det var danna alkali-silika gel lokalt på silikastøv (Figur V4.53). Inspeksjon av denne betongen 10 år seinare (23 juni 2006 ved betongalder 15 år) viste ingen teikn til opprissing. Denne type lokale alkalireaksjonar vil neppe føre til strukturelle skader.



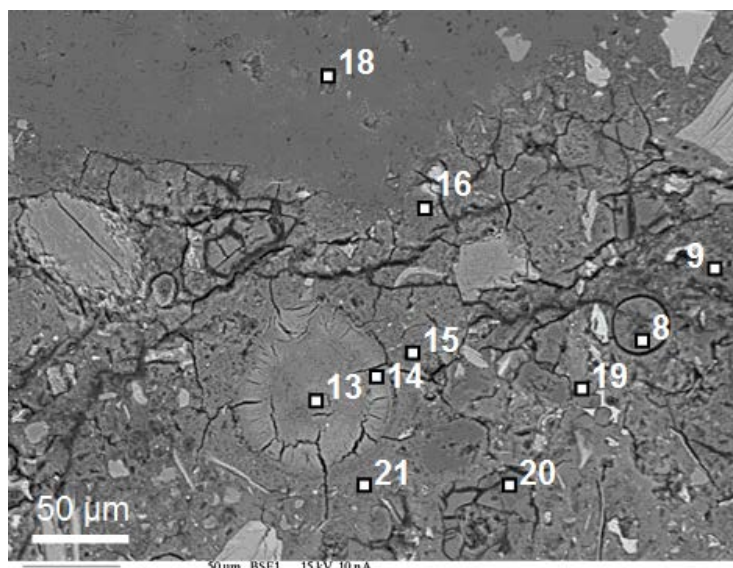
V4.57. Betongalder 5 år. Lokalt danna alkali silika gel på udispergert silika (SF). Tynnslip av sprøytebetong ved pumpesump. Lengste bildekant = 150  $\mu\text{m}$  (Foto: Per Hagelia).

## 2000 Utdrag av resultat frå svak overflatebetong

Nokre småprøver av svak overflatebetong blei undersøkt i tynnslip og viste sterk påverknad frå grunnvatnet, med utluting og nedbryting til kalkspat og gips i overflata, inklusive ytre kraftig fiberkorrosjon). Lenger inn i betongen var det omvandling knytta til magnesium angrep og litt thaumasitt.



V4.58. SEM-Backscatter Eksempel på overflatebelegg (Frei Pr-3, samla år 2000) ved pelnummer. Nedre grå med høgt relieff er gips. Lyse område øvst er utluta pasta med utfelling av jernoksid danna ved fiberkorrosjon i overflatenært område.,



V4.59. SEM-Back scatter bilde frå tynnslip Freiffjord Pr-3 (samla år 2000) ca 30 mm under betongoverflata mot tunnelrommet påverka av magnesium frå sjøvattn. Punkt 18 er nokså reint  $Mg(OH)_2$ . Elles magnesium-substituert C-S-H og innslag av thaumasitt (8, 9).

TabV4.1. Analyseresultat (vekt % oksid) på tynnslip Pr-3 frå elektronmikrosonde (Hagelia 2011b): OM = “other minors” =  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$  and  $P_2O_5$ . Analysepunkta er vist i V4.59.

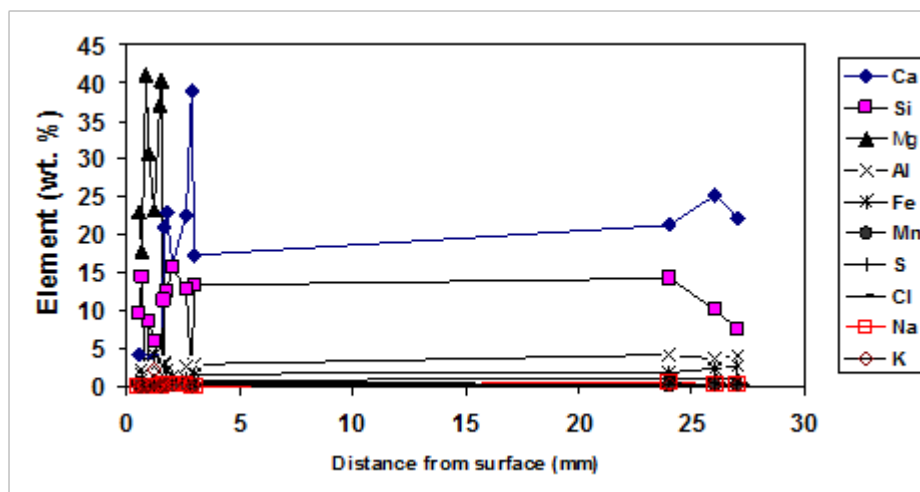
Anal. Pt.	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	FeO	OM	Total
8 void	0.03	0.69	1.63	8.80	8.96	0.95	0.02	23.08	0.00	0.11	0.13	44.39
9 paste	0.14	5.20	3.95	11.20	7.80	0.81	0.30	16.67	0.03	2.24	1.66	49.98
13 glob.	0.00	30.30	0.79	8.51	8.95	0.31	0.01	24.64	0.00	0.14	0.03	73.69
14 glob.	0.02	20.32	1.27	12.19	10.46	0.37	0.02	27.70	0.01	0.16	0.07	72.58
15 paste	0.04	30.88	2.00	25.68	1.46	0.29	0.32	3.12	0.00	1.21	0.16	65.16
16 paste	0.03	33.55	3.07	19.89	1.73	0.26	0.14	3.33	0.02	0.90	0.14	63.07
18 paste	0.00	39.76	0.13	3.53	3.76	0.37	0.00	10.14	0.00	0.09	0.08	57.88
19 paste	0.10	1.29	2.99	21.04	4.07	0.67	0.47	22.84	0.06	2.66	0.41	56.59
20 paste	0.01	17.54	4.66	27.73	0.70	0.21	0.02	6.23	0.08	4.36	0.55	62.08
21 paste	0.00	4.73	3.70	24.65	4.63	0.58	0.57	21.87	0.06	1.56	0.27	62.62

Litt overflatemateriale blei undersøkt ved røntgendiffraksjon (XRF) av BRE-Garston. Dette viste at laus betong bestod av kalsitt og gips med mindre mengder thaumasitt (Sjå BRE rapport P00/1571/R1 i Vedlegg 3). Hypotesen om at laus betong i overflata representerte prelltetap kunne dermed avkreftast.

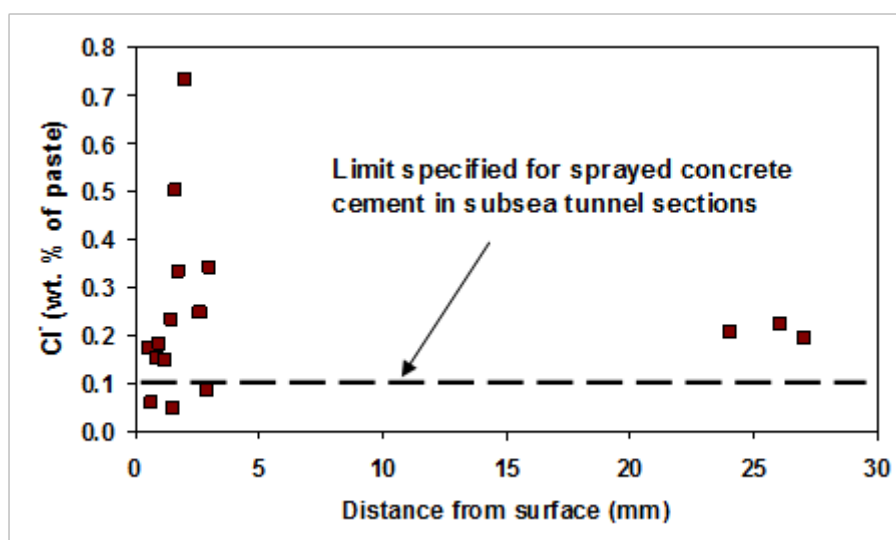
### 2003.

Tynnslip frå ytre del av kjerne 5800 (betongalder 12 år, sjå V4.52) blei analysert med elektronmikrosonde frå ytre kant til 27 mm innover (enkeltpunkt, Hagelia 2011b). Denne kjerna representerer intakt sprøytebetong med litt ytre påverknad frå tynn biofilm av mangan- og jernoksiderande bakteriar. Indre delar har Ca og Si konsentrasjonar tilsvarande upåverka C-S-H med svært lite Mg. I dei ytre 2 mm er Ca i stor grad erstatta av Mg (V4.60). Kloridanalysane viste høge verdiar i dei ytre ca 4 mm med omfattande stålfiberkorrosjon. Kloridkonsentrasjonane låg også litt høgt (0,2 vekt % av pasta) 25 mm under overflata (V4.61), men var utan fiberkorrosjon.





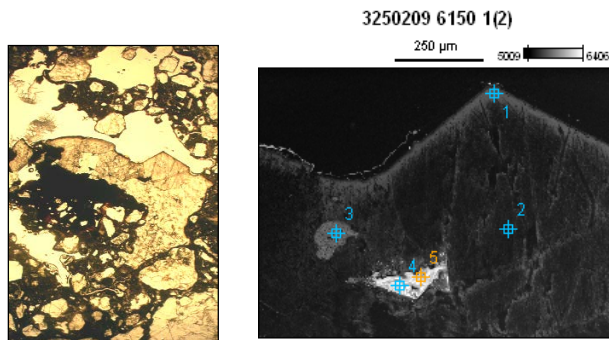
V4.60. Elementvariasjon i tynnslip frå ytre 30 mm av relativt intakt kjerne 5800. Sone C strekte seg inn til 3-4 mm.



V4.61. Kloridinnhald i pasta frå ytre 30 mm av kjerne 5800 (same tynnslip og analysepunkt som i V4.60). Stålfiberkorrosjon i ytre 4 mm av porøs betong med høge kloridnivå og tilgang på oksygen.

Kjerne 6150 av 12 år gammel betong (V4.53) viste tydeleg *innverknad frå bakteriell verksemd frå heftsona*. Dette er det einaste eksempelet på at biofilm hadde trengt inn på heftsona, og er derfor ikkje tatt med i grunnlaget for dimensjonering av tykkelse.

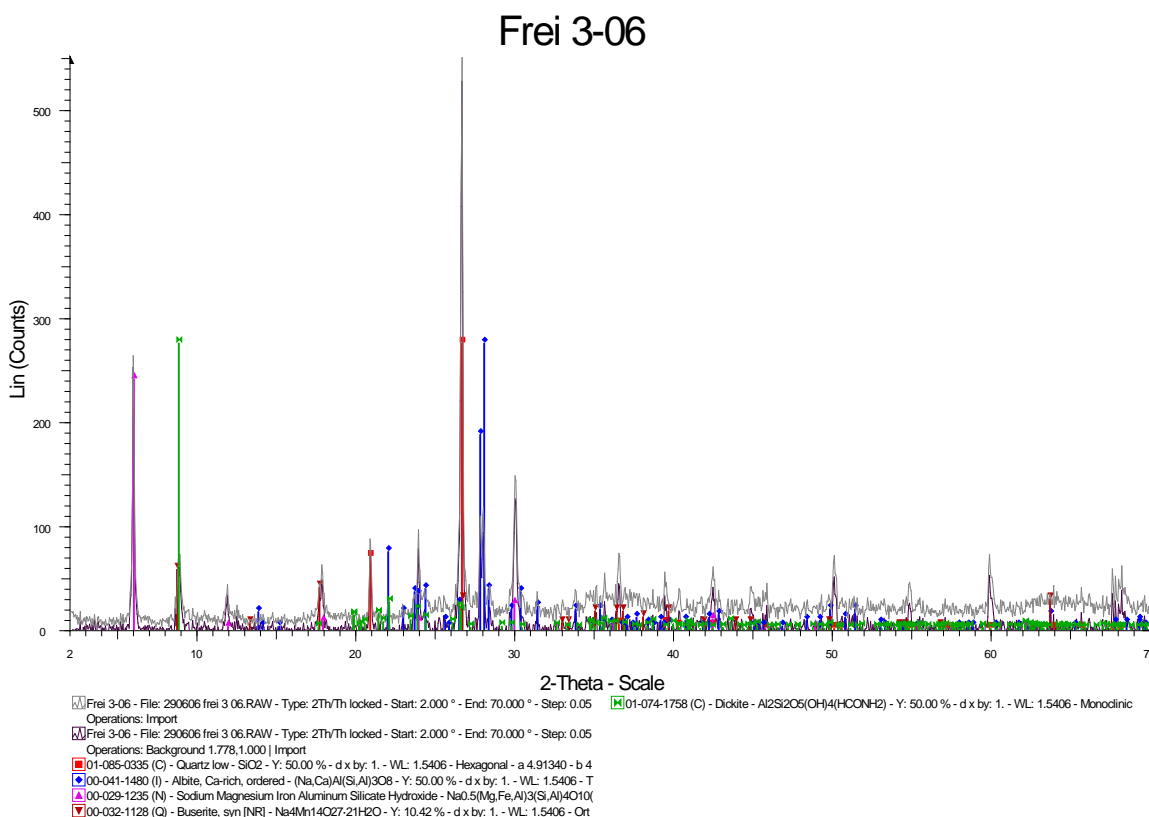
Sone A var her omtrent 40 mm brei med omfattande nedbryting av sementpastaen. Alle fibrane var sterkt korroderte med utfelling av rust i sementpastaen. Den biologiske aktiviteten hadde ført til utfelling av eit organisk mineral (liknar litt på karboksylatet mellitt; V4.62), saman med fosfatmineral, karbonatmineral og aluminiumhydroksid (detaljar i Hagelia 2011b).



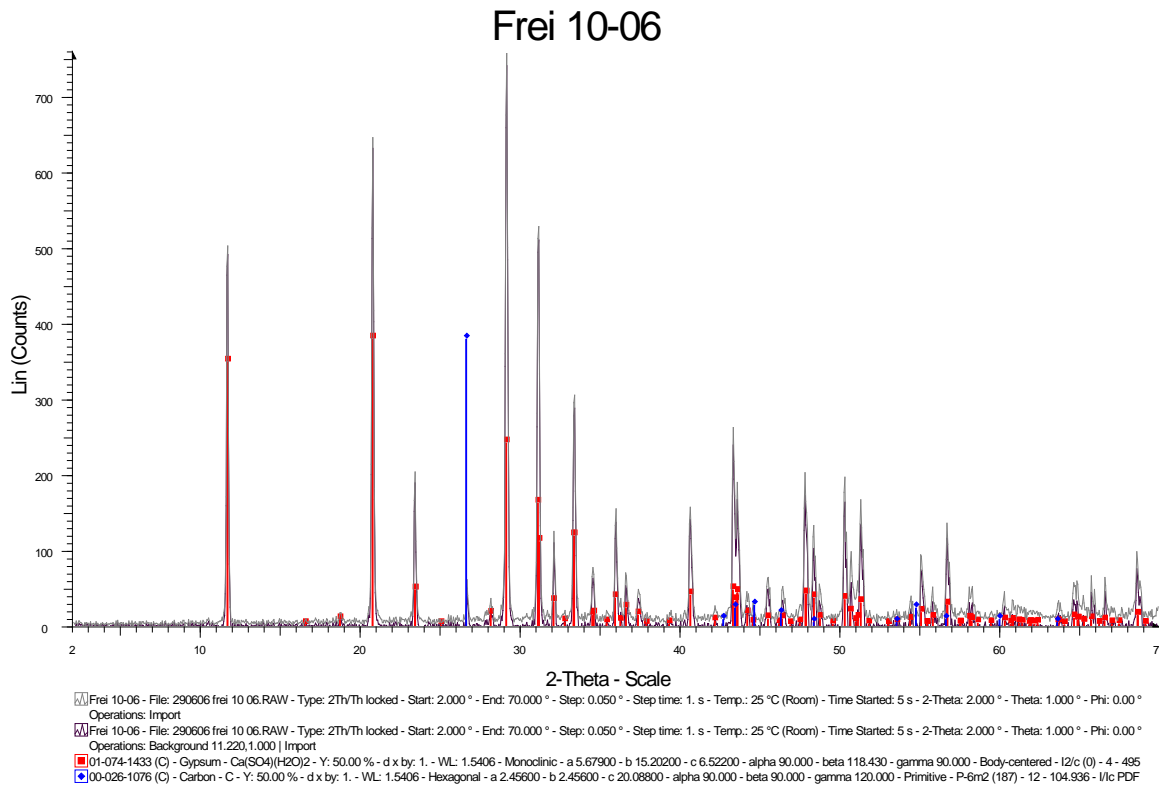
V4.62. Kjerne 6150 frå Sone A, 2-3 mm frå heftsona (sjå V.4.53 ). Tynnsnip (venstre) og SEM-Back scatter (høgre) viste utfelling av eit organisk materiale (karboksylat) som er danne ved metabolisme eller nedbryting av bakteriar med utluting på grunn av bl.a. organiske syrer. Betongalder 12 år. Foto: Per Hagelia.

## 2006 Sprøytebetong undersøkt med røntgendiffraksjon (XRD) og SEM

Desintegrrert tynn sprøytebetong med rødrusta og mørk biofilm, prøve Frei 3-06 (sjå V4.39), undersøkt ved XRD viste innhald av biomineralet buseritt (Mn-oksidd) og dickitt med HCONH<sub>2</sub>, der nitrogen er derivert frå biofilmen (V4.63). pH i lokalt lekkasjevattn var 5,8.



V4.63. XRD opptak av prøve Frei 3-06 av nedbroten betongrest i ytterflate med rusta biofilm. Manganoksidet buseritt er eit biomineral danna frå Mn-oksiderande bakteriar. Rustfarga biofilm er med i opptaket og er ikkje-krystallin (amorf) truleg Fe(OH)<sub>3</sub>; merk høg bakgrunn. Na-førande jern-aluminium-silikat-hydroksid representerer ein variant av leirmineralet vermiculitt. Mineralet dickitt er ein variant av kaolinitt med substituert HCONH<sub>2</sub>, der nitrogen er derivert frå biofilmen. Betongalder 15 år



V4.64. XRD opptak av prøve Frei 10-06 fra grått overflatebelegg av gips (foto V4.40). Innehold også litt krystallint karbon. Gipsbelegget blei forsøkt fjerna ved oppgradering av sprøytebetongen i tunnelen for å motverke sulfatangrep på heftsona mellom gammel og ny sprøytebetong.

Grå utfellingar var vanlege på betongoverflater i den undersjøiske strekninga i Freifjordtunnelen i 2006 og er stort sett gips med innslag av karbon (V4.64) og knytta til nedbrytingsreaksjonar.

**2009.**

### Mikroskopering av tynnslip

Norconsult undersøkte sprøytebetong i Freifjordtunnelen i 2009. Det blei rapportert petrografisk undersøkning av kjerne fk3 (pel 3790) og fk17 (Pel 5450) (Vedlegg i Holm 2011a). Merk at masseforholdet i Freifjordtunnelen opprinneleg er oppgitt som  $v/b = 0,42$ , men i følge Davik (1997b) var det også prøver som indikerte  $v/b < 0,40$ .

Begge kjernene blei også analysert i SEM og viste påverknad av saltvatn ved inntrenging av klorid, sulfat og magnesium i dei delar av betongen som var eksponert (både i Sone A og Sone C).

**Tabell 12 Observasjoner i tynnslip**

Tynnslip fra kjerne merket "fk3"	Ytre tynnslip	Indre tynnslip
Oppgitt masseforhold	0,45	0,45
Vurdering av masseforhold <sup>vii</sup>	Det oppgitte masseforhold synes å være for høyt (synes å ligge nærmere 0,35)	Det oppgitte masseforhold synes å stemme
Porøsitet i mørtelfasen	Litt inhomogen. De ytterste ca 1-1,5 mm av betongen har stedvis lav porøsitet. Innenfor dette sjiktet er det et ca 3 mm tykt sjikt med høyere porøsitet, foto nr 7 i vedlegg 4). Videre innover er det lav porøsitet med unntak av mindre områder med høyere porøsitet	Hovedsakelig homogen porøsitet
Luftinnblandet	Nei	Nei
Mikroriss	Hovedsakelig meget høyt innhold	Høyt innhold
Fine riss i betongen	En del (spesielt i de ytterste ca 20 mm)	En del
Grove riss	Enkelte (spesielt i de ytterste ca 20 mm)	Ingen
Utfelling	Noe ettringitt observert i luftporer (foto nr 9 i vedlegg 4), lite i de ytterste ca 20 mm. Litt portlanditt i indre halvdel av tynnslipet	Ettringitt og portlanditt observert i luftporer
Kommentar	Karbonatisering i overflaten: 5-20 mm (foto nr 10 i vedlegg 4). Utfelling av kalsiumkarbonat i luftporer og riss i karbonatisert sone. En del luftlommer i betongen (foto nr 11 i vedlegg 4). Stålfiber	Det synes å være god heft til fjell. I ca 3 mm av kontaktsonen kan det observeres riss/høyere porøsitet. En del luftlommer i betongen (noe mindre enn i ytre tynnslip)

**Tabell 13 Observasjoner i tynnslip**

Tynnslip fra kjerne merket "fk17"	Ytre tynnslip
Oppgitt masseforhold	0,45
Vurdering av masseforhold <sup>vii</sup>	Det oppgitte v/c-forhold synes å være for høyt (synes å ligge nærmere 0,35)
Porøsitet i mørtelfasen	Homogen
Luftinnblandet	Nei
Mikroriss	Meget høyt innhold
Fine riss i betongen	En del
Grove riss	Ingen
Utfelling	Noe ettringitt observert i luftporer (foto nr 21 i vedlegg 4)
Kommentar	Karbonatisering i overflaten: 3-6,8 mm (foto nr 24 i vedlegg 4). En del luftlommer i betongen (foto nr 22 i vedlegg 4), spesielt i overflaten. Stålfiber

V4.65. Petrografi av kjernene fk3 og fk17. Betongalder 18 år (Holm 2011a).

## Sprøytebetongresept – Freifjordtunnelen

Resepten i undersjøisk del er den same som ferskvassonene (sjå Vedlegg 1).

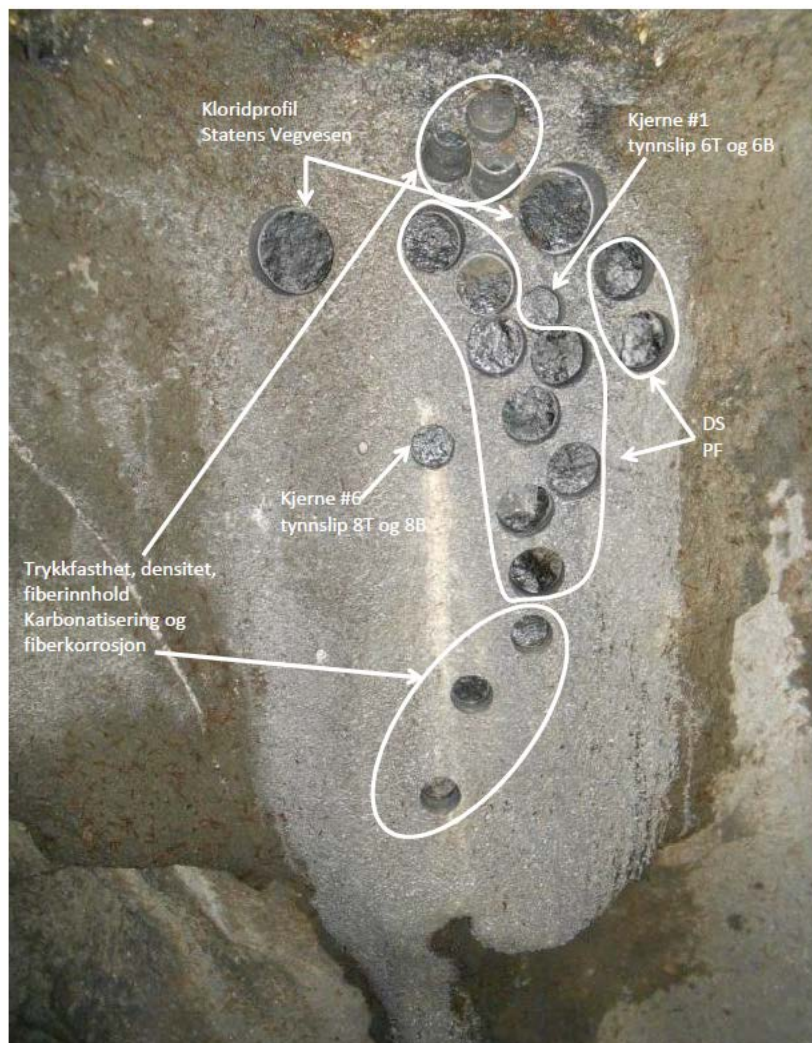
## Analysar av vatn frå den undersjøiske delen av Freifjordtunnelen

Dei viktige analyseparametrane med tanke på eksponeringsmiljø for betong er summerte i Tabell 4.20.

## Sløverfjordtunnelen – undersjøiske strekningar

Sløverfjordtunnelen blei undersøkt av Mannvit (2015a) i 2014. Ein av lokalitetane var i undersjøisk område (pelnummer 1800).

## Tunneldokumentasjon



V4.66. Sløverfjordtunnelen, pelnummer 1800 (høgre side) med lokalisering av kjernene #1 (tynnslip 6T og 6B) og #6 (tynnslip 8T og 8B). Betongalder 18 år. Foto: Mannvit.

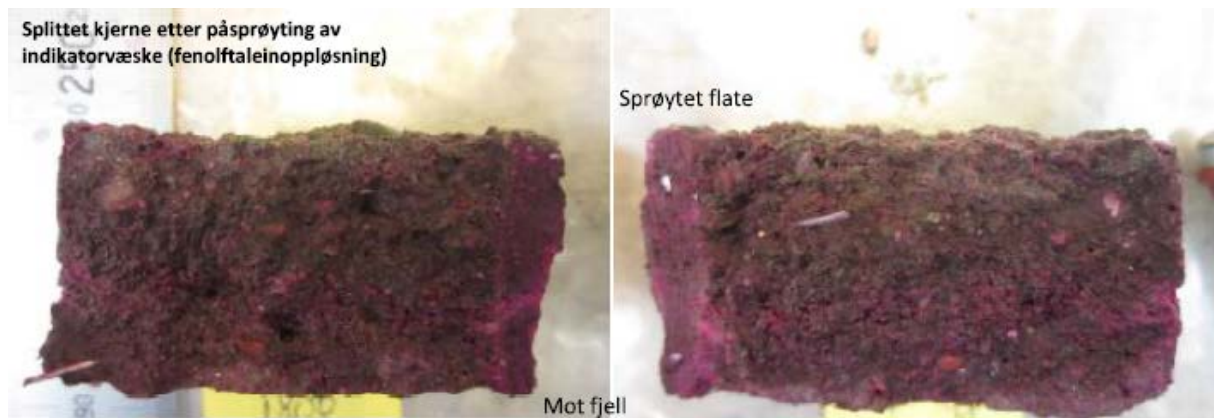


Figur 71: Sløverfjord\_1800 (2)

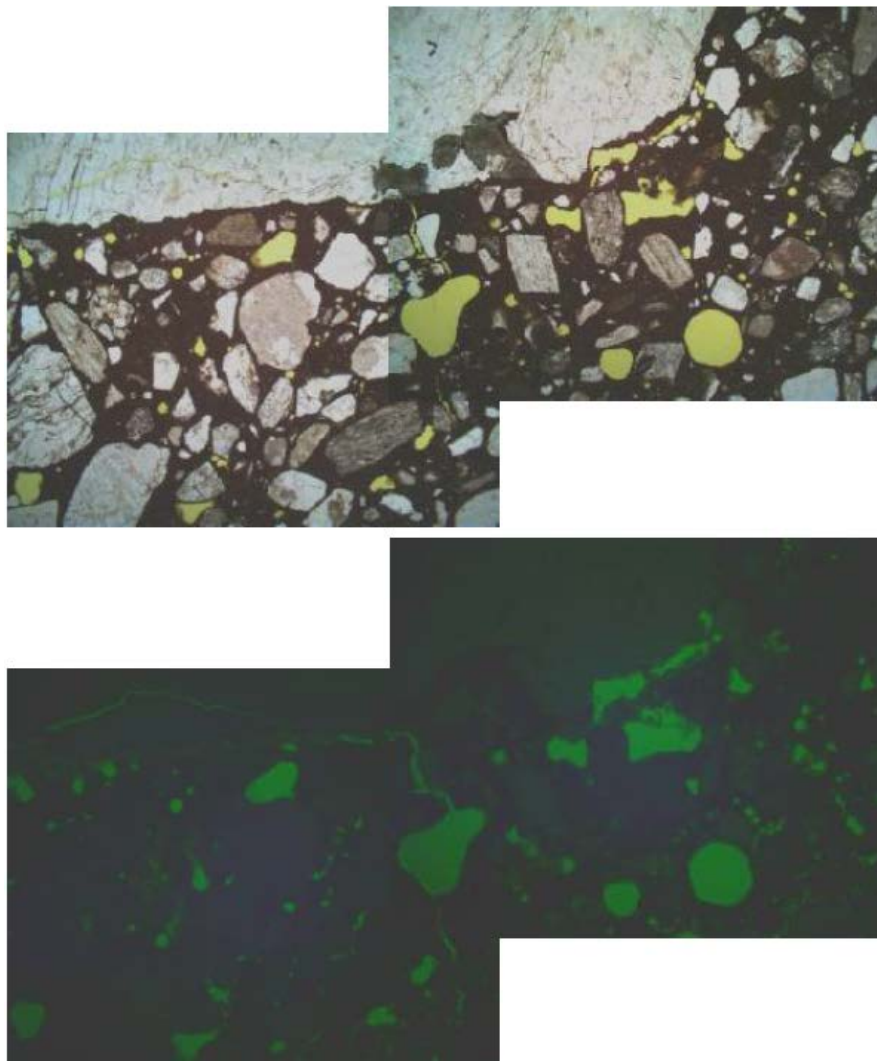


V4.67. Kjerner frå pel 1800. Foto: Mannvit.

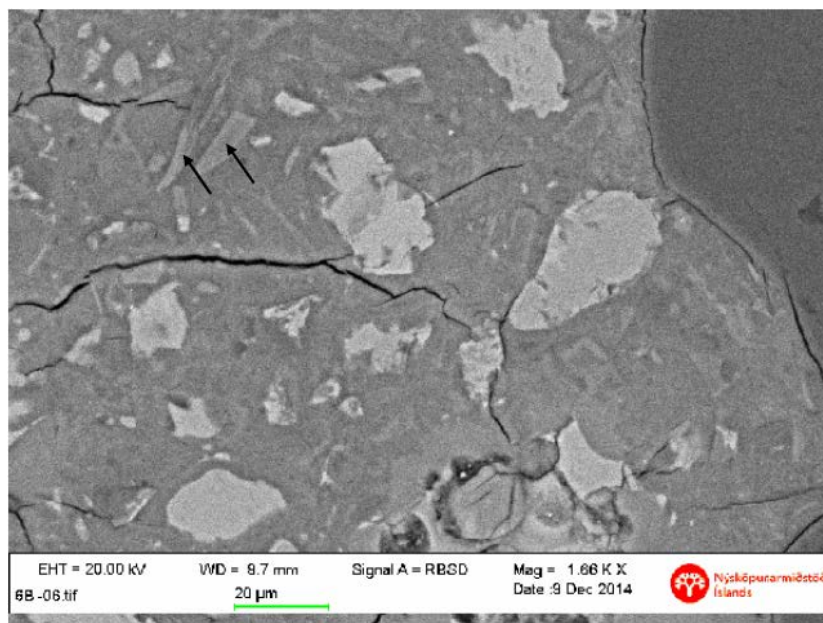
## Analysar av betong



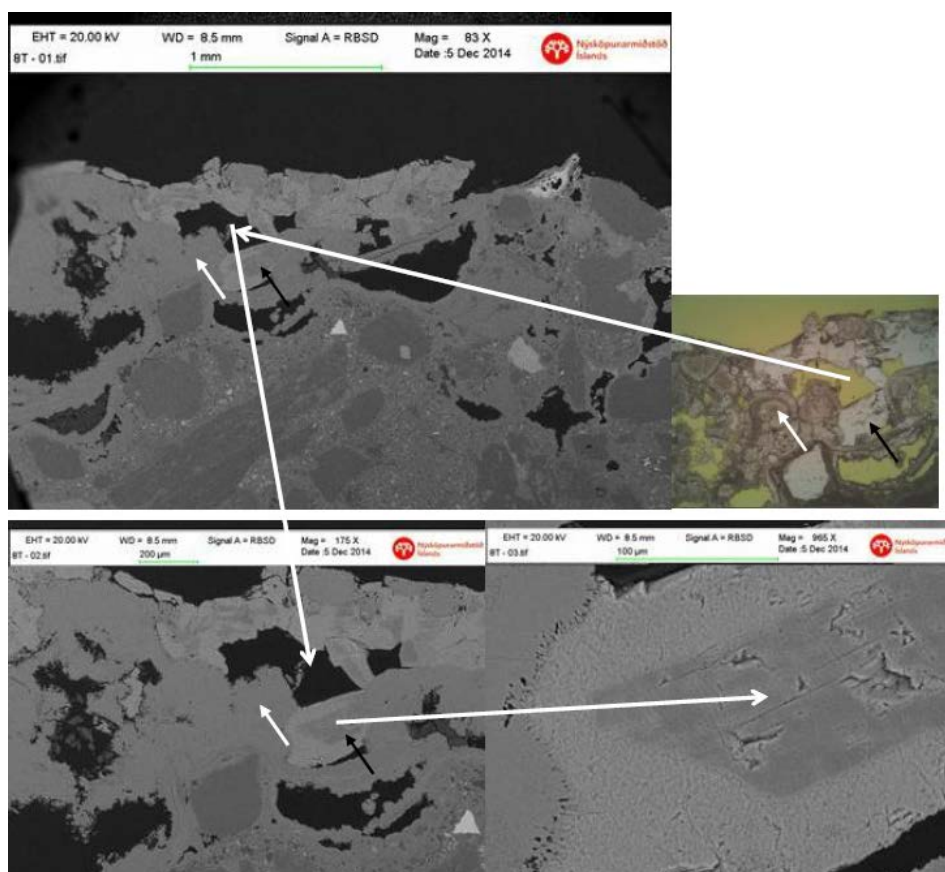
V4.68. Karbonatiseringa var avgrensa til 2 mm i overflata. Kjerne nr 4. Betongalder 18 år. Foto: Mannvit.



V4.69. God kontakt mellom betong og bergmasse i kjerne #1 ved pelnummer 1800. Same utsnitt sett i planpolarisert lys og fluorescens. Tynnslip 6B. Lengte bildekant 5,2 mm. Foto: Gisli Gudmundsson, Mannvit.

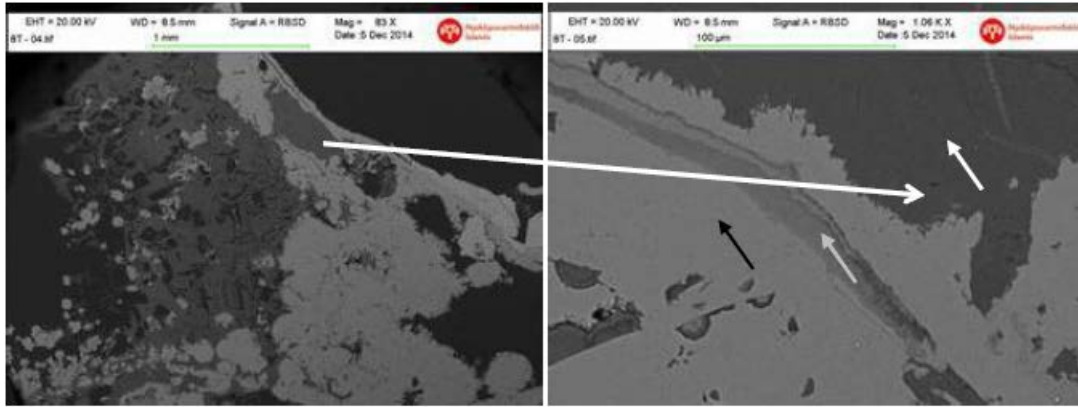


V4.70. Mannvit (2011a) rapporterte at betongen i Sløverfjordtunnelen kan innehalde slagg (pilar). Tynnslip 6B. Foto: Gisli Gudmundsson, Mannvit.



V4.71. Pelnummer 1800. Ufellingar av karbonat (kvite piler) og gips (svarte piler). Tynnslip 8T. Foto: Gisli Gudmundsson, Mannvit.





V4.72. Pelnummer 1800. Utfellingar av karbonat (lys grått) og brucitt (mørk grått) på ytterflata. Tynnslip 8T. Foto: Gisli Gudmundsson, Mannvit.

Mannvit (2015a) har rapportert svært detaljerte mikroanalysar av nedbroten sprøytebetong i Sløverfjordtunnelen, men er ikkje tema i denne rapporten.

### **Sprøytebetongresept – Sløverfjordtunnelen**

Vi har ikkje funne resepten. Tabell 4.19 gir ein omtrentleg resept som var i vanleg bruk på omkring midten av 1990-talet.

### **Analysar av vatn frå den undersjøiske delen av Sløverfjordtunnelen**

Det blei ikkje samla inn vassprøver frå den undersjøiske delen av tunnelen.

## Frøyatunnelen – undersjøiske strekningar

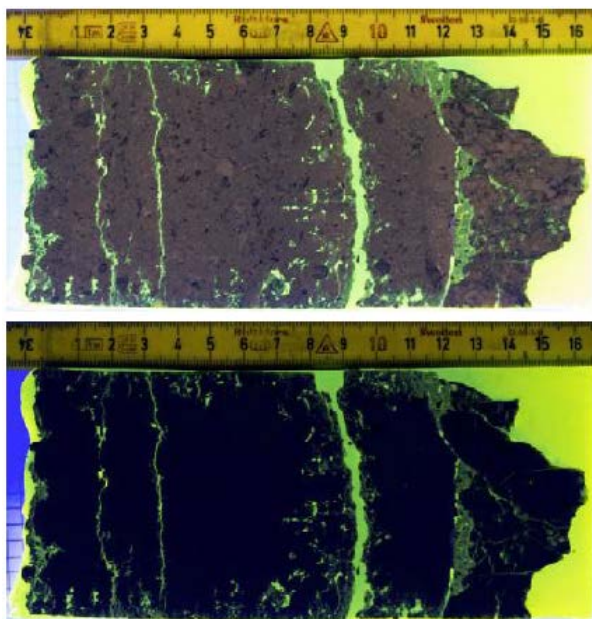
Frøyatunnelen er undersøkt av Mannvit (2015b). Undersøkinga omfatta to lokalitetar, begge i den undersjøiske strekninga. Sprøytebetongen var 15 år og i svært god tilstand med god heft mot bergmassen, ingen stålfiberkorrosjon og med få unntak låg porøsitet. Det var ein del udispert silikastøv i betongen.

### Tunneldokumentasjon

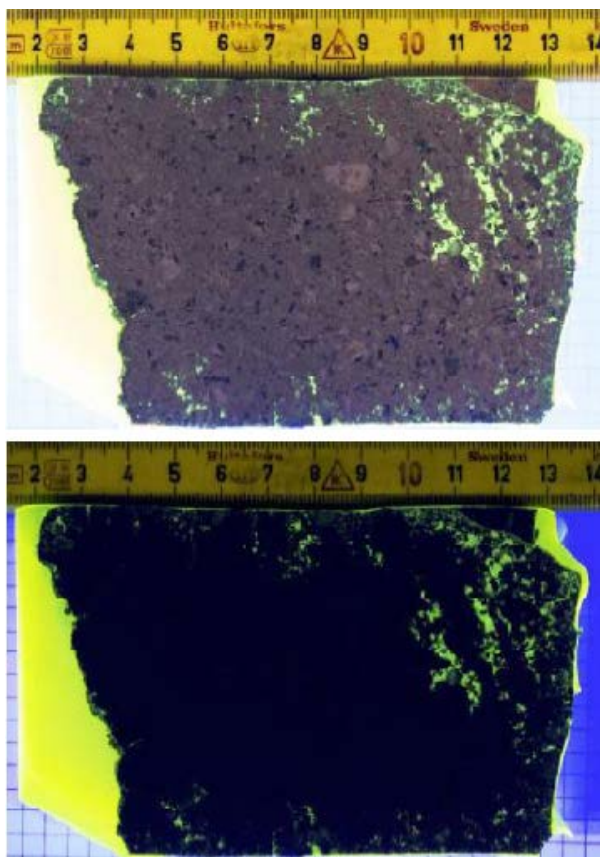


V4.73. Pelnummer 4795V, borkjerner frå område med fuktig jernrik biofilm og 6660H (høgre) frå område med både tynn biofilm (høgre del av bildet) og fuktig betong utan biofilm (venstre del). Betongalder 15 år. Foto: Mannvit.

## Planslip

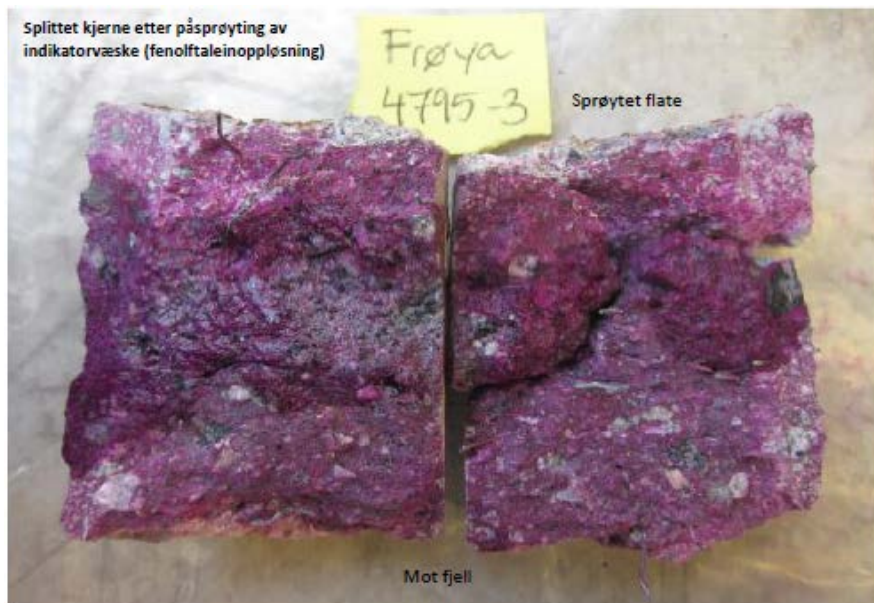


V4.74. Planslip av kjerne 8 ved pelnummer 4795V i ordinært lys (oppe) og fluorescerande lys (nede). Betongen viste mange overflateparallele riss/spekkar med utfelling mot berg (høgre ende). Foto: Mannvit.



V4.75. Planslip av kjerne 6 ved pelnummer 6660H i ordinært lys (oppe) og fluorescerande lys (nede). Betongen var delvis porøs i området mot berg (høgre ende). Foto: Mannvit.

## Karbonatisering



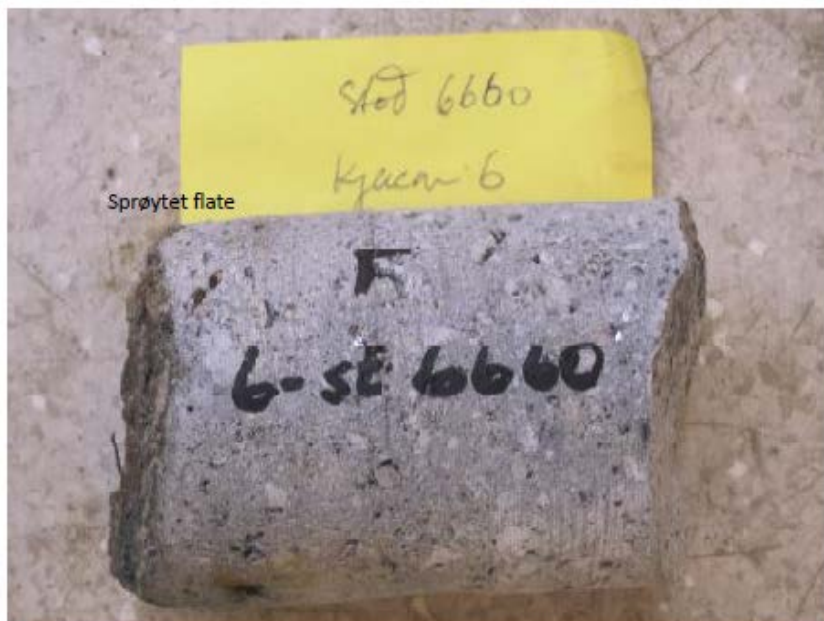
V4.76. Kjerne 3 frå pel 4795 viste i gjennomsnitt 2 mm karbonatisering frå tunnelsida utan karbonatisering mot berg.



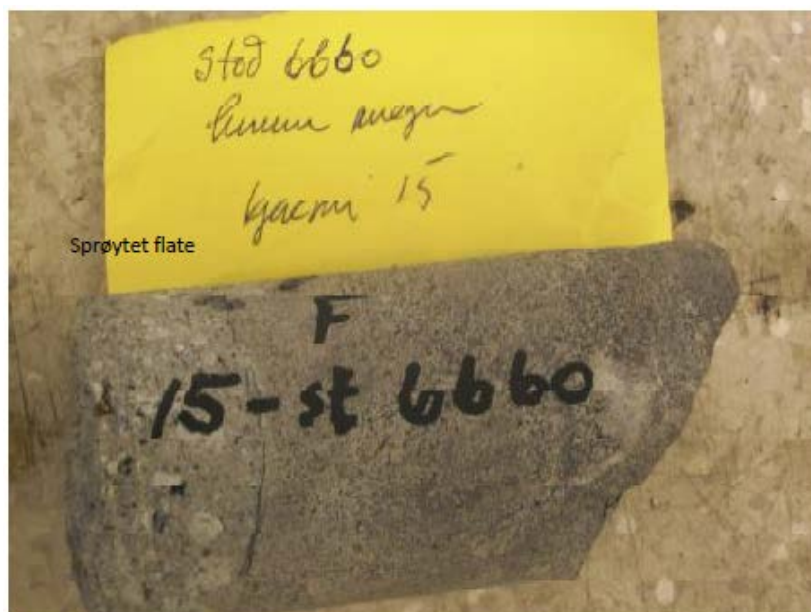
V4.77. Kjerne 1 frå pel 6660 viste i gjennomsnitt 1 mm karbonatisering frå tunnelsida utan karbonatisering mot berg.

## Kjerner med tynnslip

Det blei laga tre tynnslip frå lokalitet 6660 (kjerne 6 og kjerne 15).



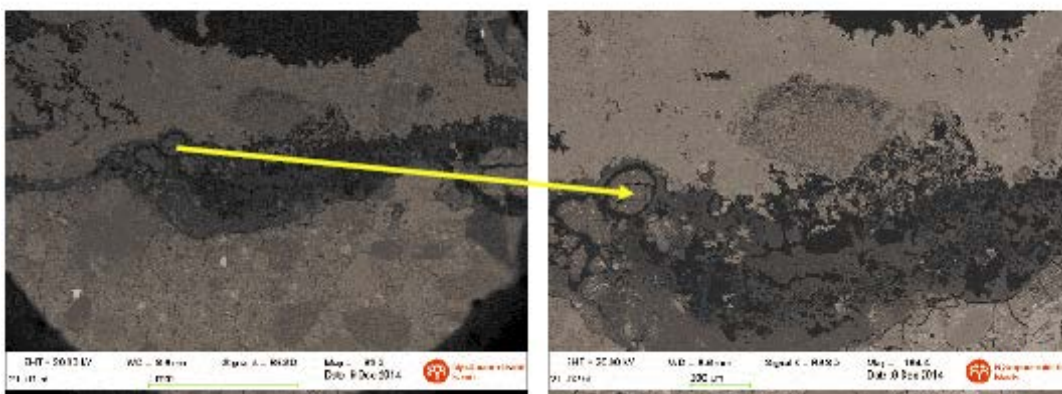
V4.78. Kjerne 6. Det blei laga tynnslip både frå overflata («sprøytet flate») og frå kontakt mot berget (høgre ende). Foto: Mannvit.



V4.79. Kjerne 15. Det blei laga 1 tynnslip av området frå overflata. Foto: Mannvit.



Figur 9. Frøyatunnelen, pel nr. 6660 til venstre, tynnslip «2 Topp». Mikroskop-bilde av gel-aktig karbonat. Begge bildene er 0,46 x 0,70 mm.



V4.80. Mannvit (2015b) beskriver førekomst av gel-aktig karbonat i kjerne 6 frå pel 6660. Dette er bare eit overflatefenomen.

Mannvit (2015b) har rapportert svært detaljerte mikroanalysar av nedbroten sprøytebetong i Frøyatunnelen, men er ikkje tema i denne rapporten.

# Sprøytebetongresept – Frøyatunnelen

Kopi: JEL, SVS, SBY, THH, SLL, KHH  
AMU, JAK

Notat 19/10 98  
Rve

Selmer ASA  
St. Olavsgt. 25  
Postboks 1175 Sentrum  
0107 Oslo  
  
Telefon 22 03 08 06  
Telefax 22 36 20 15  
(Mobil 90 85 12 10)  
e-mail : eivind.heimdal@selmer.no

Kopi: SVU / A. Mehlum  
- A. Mehlum  
- Fem. Dolmas / TRØYH  
- LITMA  
- H.B.B + LITMAVE SEMENTSR.  
- B. KIELAND  
- R. SVE  
**Notat**



---

Dato : 15.10.98  
Til : Roar Sve, Selmer Frøyatunnelen  
Fra : Eivind Heimdal, Betongavdelingen

---

Merknader: Prøvesprøyting av alkaliefri aksellerator 12-14.10.98

I løpet av denne perioden ble det sprøytet fem varianter med alkaliefri sprøytebetongaksellerator. Det ble benyttet to reseptvarianter og to forskjellige doseringer av aksellerator. Tabell 1 nedenfor viser reseptene. Utgangspunktet er resept 42 som benyttes av Uthaug Sementstøperi på Frøyasiden (samme bindemiddelmengder, tilslagsmengder og masseforhold som denne i Resept 1).

Materialer	Resept 1 [kg/m <sup>3</sup> ]	Resept 2 [kg/m <sup>3</sup> ]
Standard sement	477	500
Silika (7% av sementvekten)	33	35
Glenium 51 (SP-stoff)	1.8	1,85
Meyco TCC 735 (intern curing)	5	5
Sand 0-10 mm	1530	1508
Dramix fiber	44	44
<b>Totalt vanninhold (eks. aksellerator)</b>	<b>223</b>	<b>223</b>
V/c+2s (eks. aksellerator)	0,41	0,39

Tabell 1: Resepter brukt ved prøvesprøyting

Glenium 51 er av den nyeste typen av SP-stoffer på markedet idag og er av co-polymer typen. Stoffet benyttes i dag i Lærdalstunnelen og i Elgskauåsen tunnel på Oslofjordforbindelsen (spesielt i forbindelse med Vegvesenets store prøveprogram på støvmålinger under sprøytebetongarbeider).

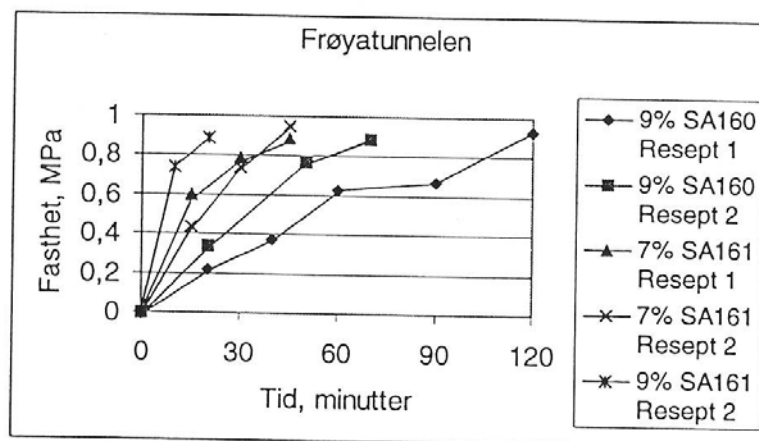
Meyco TCC 735 er en interncuring og tilsettes i betongen på blandeverket. Denne skal hindre uttørking av betongen i tidlig alder og er en erstatning for bruk av membranherdner på sprøytede overflater.

Under prøvingen ble betongens konsistens holdt i området 18-20 cm og med naturlig temperatur (10-12°C). Akselleratoren var lagret utendørs og hadde utetemperatur (6-8°C).

Følgende kombinasjoner av resepter og akselleratorer og -doseringer ble prøvd:

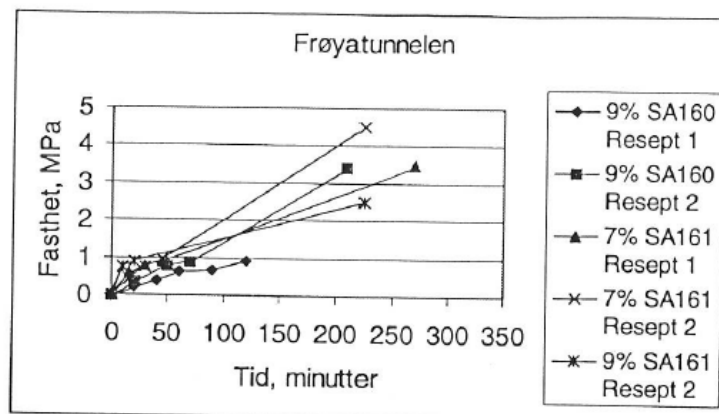
- Resept 1, SA 160 aksellerator, 9% dosering
- Resept 2, SA 160 aksellerator, 9% dosering
- Resept 1, SA 161 aksellerator, 7% dosering
- Resept 2, SA 161 aksellerator, 7% dosering
- Resept 2, SA 161 aksellerator, 9% dosering

Målt fasthetsutvikling er gitt i figur 1 og figur 2.



Figur 1: Fasthetsutvikling frem til 2 timer





Figur 2: Fasthetsutvikling ut over 2 timer

Basert på disse erfaringene er forslag til resept ved bruk av alkaliefri aksellerator gitt i tabell 2:

Materialer	Resept Forslag [kg/m <sup>3</sup> ]
Standard sement	475
Silika (7% av sementvekten)	33
Glenium 51 (SP-stoff)	1.8
Meyco TCC 735 (intern curing)	5
Sand 0-10 mm	1530
Dramix fiber	44
<b>Totalt vanninnhold (eks. aksellerator)</b>	<b>216</b>
V/c+2s (eks. aksellerator)	0,40

Tabell 2: Forslag til resept for sprøytebetong med alkaliefri aksellerator

Siden blandeverket på Hitra og på Frøya bruker forskjellige sandtyper, vil sandmengden variere noe fra det oppsatte på de to fabrikkene (kommer av forskjell i egenvekt, og derav justering for å oppnå 1 m<sup>3</sup>). Individuell justering av Glenium mengden kan også være aktuelt for å oppnå ønsket konsistens.

Det anbefales at det benyttes en akselleratordosering på 7% av typen SA 161. Resultatene viser at denne gir bedre fasthetsutvikling enn SA 160 med 9% dosering, samt at erfaringene med å sprøyte på armering er bedre med bruk av SA 161.

Oslo 15.10.1998  
Eivind Heimdal

## Analysar av vatn frå den undersjøiske delen av Frøyatunnelen.

Dei viktige analyseparametrane med tanke på eksponeringsmiljø for betong er summerte i Tabell 4.20.

Tabell V4.2. Feltmålingar. Prøve med kjemisk analyse av vatn og partiklar (\*).

PeInr.	Eh (ORP)	pH	Merknader
4795V	+ 135 mV	7,81	Dryp frå vegg med
6670 H	- 40 mV	7,5	Dam rett under drypp frå sprøytebetong med biofilm (*)

Ramboll Analytics  
Certificate  
Project: 1510001389/27

Date: 28.8.2014  
1/2



Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Sondre Meland  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO

Sample information:	Statens vegvesen Vegdirektoratet, Kjemiske analyser av kontaminert vegvann, sedimenter og		
Place of sampling:	6670	Date of sampling:	
		Date of arrival:	19.8.2014
		Research started	19.8.2014

### Water analyce

Analysis	14SL05586	Unit	Method
Pretreatment, filtration	ok		
Turbidity	<0,20	NTU	RA2024*
pH	7,5		RA2000*
Alkalinity	4,0	mmol/l	RA2001*
Dissolved Organic Carbon (DOC)	4,3	mg/l	RA2007*
Chloride (Cl)	19000	mg/l	RA2018*
Fluoride (F)	2,6	mg/l	RA2050
Sulphate (SO4)	2500	mg/l	RA2018*
Nitrate (NO3)	12	mg/l	RA2018*
Ammonium (NH4)	0,16	mg/l	RA2046*
Metals 1 diss	ok		
Aluminium (Al), diss	<50	µg/l	RA3000*
Arsenic (As), diss	<2,0	µg/l	RA3000*
Barium (Ba), diss	24	µg/l	RA3000*
Boron (B), diss	2700	µg/l	RA3000*
Mercury (Hg), diss	<0,20	µg/l	RA3000*
Phosphorus (P), diss	<1000	µg/l	RA3000
Cadmium (Cd), diss	<0,20	µg/l	RA3000*
Potassium (K), diss	140000	µg/l	RA3000*
Calcium (Ca), diss	720000	µg/l	RA3000*
Cobalt (Co), diss	<2,0	µg/l	RA3000*
Chromium (Cr), diss	<5,0	µg/l	RA3000*
Copper (Cu), diss	<10	µg/l	RA3000*
Lead (Pb), diss	<2,0	µg/l	RA3000*
Magnesium (Mg), diss	1300000	µg/l	RA3000*
Manganese (Mn), diss	180	µg/l	RA3000*
Molybdenum (Mo), diss	<5,0	µg/l	RA3000*
Sodium (Na), diss	11000000	µg/l	RA3000*
Nickel (Ni), diss	<10	µg/l	RA3000*
Silicon (Si), diss	3600	µg/l	RA3000
Iron (Fe), diss	<50	µg/l	RA3000*
Sulfur (S), diss	800000	µg/l	RA3000
Zinc (Zn), diss	<20	µg/l	RA3000*
Strontium (Sr), diss.	27000	µg/l	RA3000
Thorium (Th), diss.	<1,0	µg/l	RA3000
Uranium (U), diss	31	µg/l	RA3000*
Vanadium (V), diss	<5,0	µg/l	RA3000*

The results apply solely to the samples analyzed. The certificate may only be copied as whole.

Ramboll Analytics  
Niemenkatu 73, FI-15140 Lahti  
Kiltterinkuja 2, FI-01600 Vantaa

Tel +358 20 755 611  
Business ID 0101197-5  
www.ramboll-analytics.fi  
Domicile Espoo



## Certificate

Project: 1510001389/28

Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Sondre Meland  
Postboks 8142 Dep  
0033 OSLO

Sample information:	Statens vegvesen Vegdirektoratet, Kjemiske analyser av kontaminert vegvann, sedimenter og		
Reference:	Projektnummer 603245/ Synnøve Adelheid Myre	Date of sampling:	
		Date of arrival:	18.8.2014
Sampling by:		Research started:	18.8.2014

## Results

		Unit	Method
Sampling point	6670, filtra- ted par- ticles		
Sample ID	14SS 01717		
<b>ANALYSIS</b>			
Pretreatment, filtration	ok		
Pretreatment, microwave oven (HNO <sub>3</sub> /HF)	ok		RA3009
Metals 1	ok		
Aluminium (Al)	920	mg/kg	RA3000
Arsenic (As)	20	mg/kg	RA3000*
Barium (Ba)	27	mg/kg	RA3000
Boron (B)	110	mg/kg	RA3000
Mercury (Hg)	<0,10	mg/kg	RA3000*
Phosphorus (P)	170	mg/kg	RA3000
Cadmium (Cd)	<0,20	mg/kg	RA3000*
Potassium (K)	560	mg/kg	RA3000
Calcium (Ca)	10000	mg/kg	RA3000
Cobalt (Co)	<1,0	mg/kg	RA3000*
Chromium (Cr)	2,1	mg/kg	RA3000*
Copper (Cu)	<10	mg/kg	RA3000*
Lead (Pb)	39	mg/kg	RA3000*
Magnesium (Mg)	2300	mg/kg	RA3000
Manganese (Mn)	380	mg/kg	RA3000*
Molybdenum (Mo)	<2,0	mg/kg	RA3000
Sodium (Na)	9400	mg/kg	RA3000
Nickel (Ni)	<2,0	mg/kg	RA3000*
Silicon (Si)	23000	mg/kg	RA3000
Iron (Fe)	120000	mg/kg	RA3000*
Sulfur (S)	200	mg/kg	RA3000
Zinc (Zn)	170	mg/kg	RA3000*
Strontium (Sr)	670	mg/kg	RA3000
Thorium (Th)	<1,0	mg/kg dw	RA3000
Uranium (U)	11	mg/kg	RA3000
Vanadium (V)	3,3	mg/kg	RA3000*

The results apply solely to the samples analyzed. The certificate may only be copied as whole.

# Oslofjordtunnelen – undersjøiske strekningar

## Tunneldokumentasjon

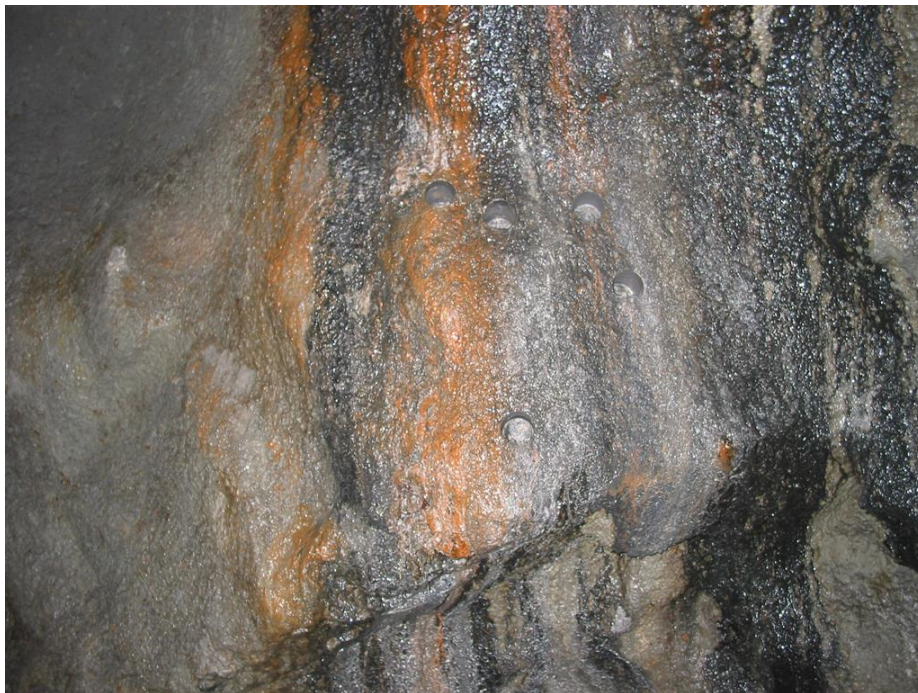
Sprøytebetongen i Oslofjordtunnelen har blitt undersøkt i fleire omgangar:

- 2004: Ingeniørgeologisk kartlegging bak hvelv av nesten heile tunnelen etter raset i 2003
- 2004-2008: Utboring av kjerneprøver for strukturanalyse/diagnose, analyse av mineralutfellingar og biofilm, samt vatn (Hagelia 2011b)
- 2009: Utboring av kjerneprøver for strukturanalyse og betonganalysar (Holm 2011b,c)
- 2015 (til 2019): Prøvetaking og feltmålingar i samband Varige konstruksjonar (Statens vegvesen) og forskingsprosjekt på biofilm ved Chalmers – Gøteborg (Karačić m fl. 2016).

Raset i 2003 er beskrevet i andre rapportar frå Statens vegvesen. Dokumentasjonen her legg vekt på betongundersøkingar utført i tida 2004 til 2015 med vekt på kjerner bora ut i 2004, 2009 og 2015. Hovudvekta er lagt på ein lokalitet ved pumpestasjonen (Pel 16060-16070 venstre side, retning Hurum) og ein lokalitet bak hvelv nær «frysesona» (Pel 15925 og 15930 høgre side, retning Hurum).

Det er elles etablert eit testfelt for nye sprøytebetongreseptar i omløpstunnelen ved pelnummer 15905 venstre side. Etablering i 2010 og hovudprogram er dokumentert av Hagelia (2011a) og oppfølging etter 5 ½ års eksponering blir gitt ut som Statens vegvesen rapport.

### **2004 – Utboring av kjerner ved pel 15925 og pel 15930 bak hvelv inn mote «frysesona»**

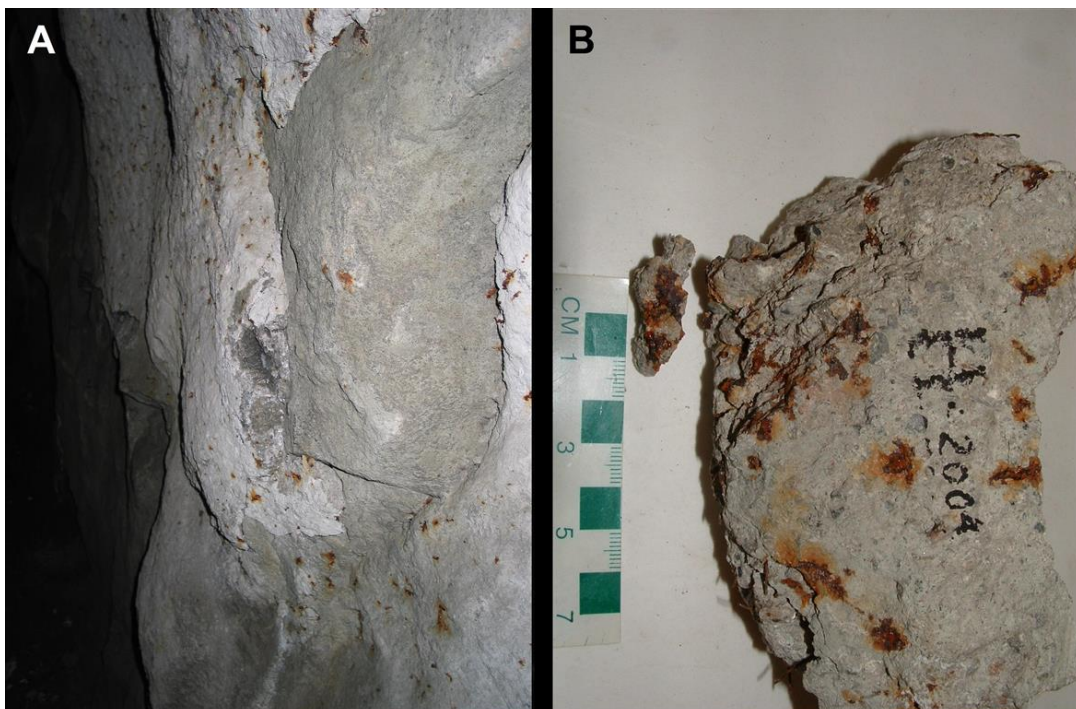


V4.81. Pel 15925 i mars 2004 etter utboring av kjernene 1 t.o.m. 5. Vekst av tynn Mn-Fe biofilm. Merk at den ru overflate for typisk upåverka sprøytebetong er jevna ut noko som indikerer litt tap av tverrsnitt (her estimert til minst 1 mm, kanskje litt meir). Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.82. Pel 15930 i mars 2004 etter utboring av kjernene 6 t.o.m. 10 i område med fuktig overflate og lokal utfelling av kalsiumkarbonat utan biofilm (litt biofilm til venstre og høgre side). Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.

**2004 – Prøver av forvittra betong ved pel 16060 og utboring av kjerner ved pel 16070 og i service tunnel ved pumpeumpen**



V4.83. Pel 16060 mars 2004 med prøvestykke H-2004 hamra laus av kvit forvittra sprøytebetong med omfattande fiberkorrosjon. Kvit forvittra betong var utbreidd i store deler av tunnelen ned til pumpeumpen, særleg på høgre side. Blei meisla bort og erstatta av ny sprøytebetong våren 2004. Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.84. Pel ca. 16055 mars 2004. Prøve («Spall 1») av avskala fullt intakt sprøytebetong utan fiberkorrosjon, samla inn utan hamring frå venstre side av tunnelen ned til pumpesumpen. Denne betongen blei i stor grad meisla bort og erstatta av ny sprøytebetong våren 2004. Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.

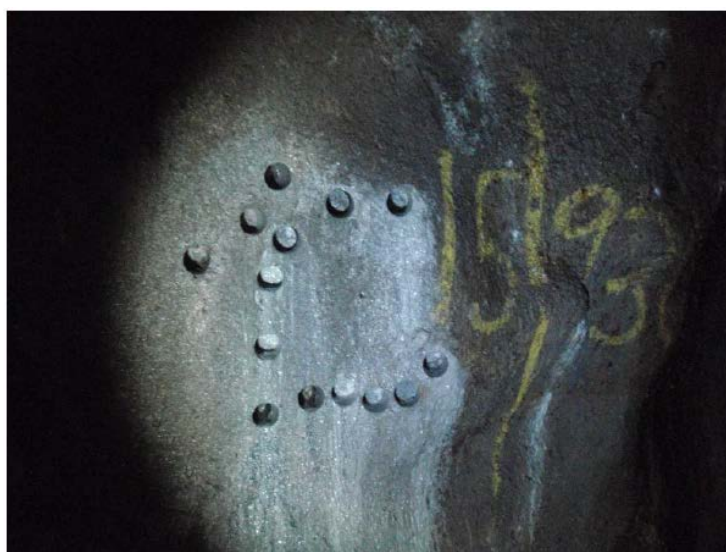


V4.85. Pelnummer 16060 vis a vis inngangsdøra til transformatoriosk ved servicetunnelen ned til pumpesumpen. Utvikling av lagdelt biofilm med tykk slimete jernbakteriar over mørk manganrik biofilm. Betongalder 5 år, mars 2004. Foto: Per Hagelia.



V4.86. Pelnummer 16060 vis a vis inngangsdøra til transformatoriosk med lokaliteter for KJ I, II, II, IV og V. Utboring av kjernene april 2004 ved betongalder 5 år. Fotoet er frå vinter 2005/2006 ved betongalder 6 år. Foto: Per Hagelia.

**2009 – Utboring av kjerner ved pel 15930 bak hvelv inn mote «frysesona»**



V4.87. Pelnummer 15930 med nye utboringar i desember 2009 (Holm 2011b). Betongalder 10 år. Foto: Jan Viggo Holm, Norconsult.

**2015 – Utboring av kjerner ved pel 15925 og pel 15930 bak hvelv inn mote «frysesona»**



V4.88. Pelnummer 15925 etter utboring av fire nye kjerner i samband med Varige konstruksjonar ved betongalder 16 år i 2015 (større diameter enn kjernene frå 2004). Foto frå mars 2016 ved betongalder 17 år. Område har vore svært fuktig sidan 1999. Merk utfelling omfattande utluting av kalsium og utfelling av kalsiumkarbonat (har litt Mg) som har auka på med tida (sjå V4.81). Kalsiumkarbonatet er utfelt over eldre mørk biofilm, med nye striper av mørk biofilm utanpå. Foto: Per Hagelia.



V4.89. Pelnummer 15930 . Tre nye kjerner (størst diameter) i høgre del av bildet blei bora ut i 2015 i Varige konstruksjonar ved betongalder 16 år. Generelt vedvarande fuktig område sidan 1999, med tydeleg auka utluting og utfelling av kalsiumkarbonat sidan 2004 (sjå V4.82). Utvikling av biofilm lokalt i små lekkasjar frå borehol. Foto frå betongalder 17 år: Per Hagelia.



## Karbonatisering ved fenolftaleintest

Majoriteten av karboniseringsomfanget er undersøkt ved petrografiske undersøkingar av tynnslip. Nokre prøver blei undersøkt ved fenolftaleinoppløysing:

2009 ved Pelnummer 15930 (Holm 2011c)

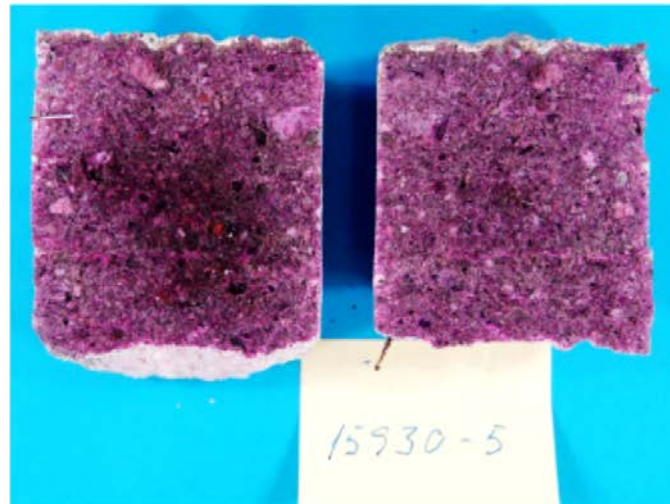


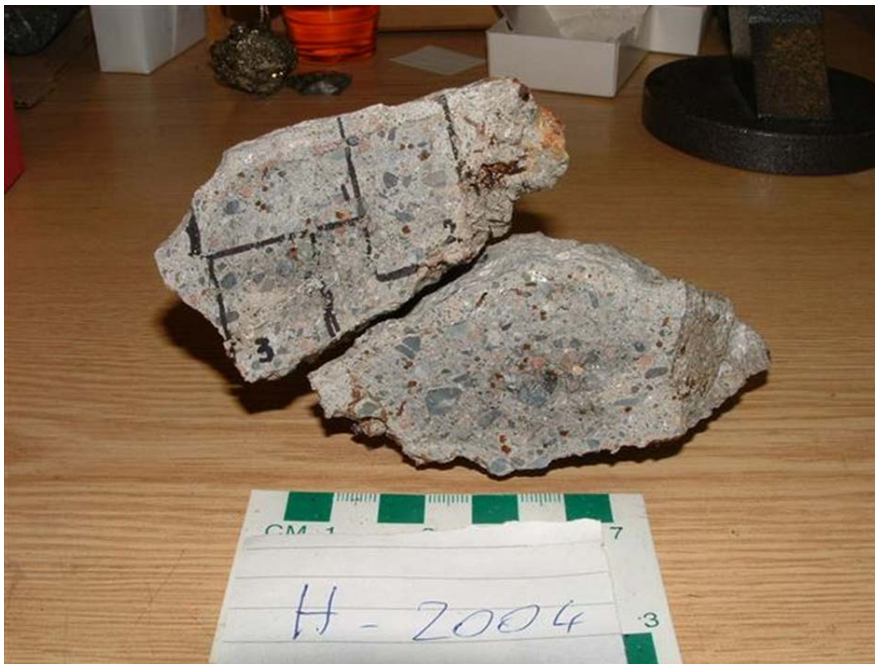
Foto 1 Provelegeme "15930-5"



Foto 2 Provelegeme "15930-8"

V4.90. Pelnummer 15930 ved betongalder 10 år viser bare marginal overflatekarbonatisering (Holm 2011c). Foto: SINTEF.

## 2004 – Prøver med tynnslip



V4.91. Prøve H-2004 av sterkt forvittra og svekka sprøytebetong utan biofilm frå pelnummer 16060 med omfattande fiberkorrosjon. Innteikna tynnslipområde. Blei meisla bort i 2004 (sjå V4.83). Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.92. KJ II av sprøytebetong under tykk syregivande biofilm med litt tap av tverrsnitt (estimert til 1 mm). Tynnslip viste utluting av sementlimet med intern karbonatisering (Popcorn kalsitt), magnesiuminntrenging, thaumasitt sulfatangrep og fiberkorrosjon. Dårlig heft med utfelling av brucitt på kontakt med berg (høgre). Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.93. Kjerne KJ III av sprøytebetong under tykk syregivande biofilm. Merk rustutfellingar frå biofilmen på overflata (venstre). Kjerna blei tatt frå stripe med biofilm som hadde danna eit søkk i overflata med tap av tverrsnitt estimert til 5 mm. Intern nedbrytingsmekanisme tilsvarande KJ II. I dette tilfelle god heft mot berg (høgre). Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.94. Kjerne KJ IV (gjenverande fragment) under tykk syregivande biofilm: Utboring inntil ca. 60 mm mot berg førte til full nedknusing av kjerna. Estimert tap av tverrsnitt før utboring ca. 25 mm. Resten av kjerna var svært svak og bare to fragment blei bevart. Intern nedbrytingsmekanisme tilsvarande KJ II og KJ III. Ingen heft mot berg. Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.95. Kjerne KJ V under tykk syregivande biofilm hadde mista svært mykje av overflata. Merk den svake overflata (venstre): mykje av kjerna i denne delen fragmenteret og gjekk tapt under utboring (estimert tap ca. 20 mm). Resten av betongen hadde stort omfang av thaumasitt sulfatangrep, magnesiumangrep og utfelling av Popcornkalsitt. Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.96. Kjerneprøve Kj 1 ved pelnummer 15925 under tynn biofilm utan særleg syreverknad., med innteikna tynnslipområde. Det er utfelt tynn mørk Mn-rik biofilm på ytterflata. Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.97. Kjerneprøve Kj 2 ved pelnummer 15925 under tynn biofilm (Mn-Fe skorpe) utan særleg syreverknad. Innteikna tynnslipområde. Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.98. Kjerneprøve Kj 5 ved pelnummer 15925 under tykk opprinneleg våt Mn-Fe biofilm (restar på kjerneenden viser lagdeling (venstre). Høgre bildet viser grå utfelling av kalsiumkarbonat (kalsitt og aragonitt) på heftsona. Det blei preparert tre tynnslip på langs av kjerna. Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.99. Kjerneprøve Kj 9 ved pelnummer 15930 utan biofilm. Innteikna tynnslipområder. Middels heft med utfelling av kvit  $Mg(OH)_2$  (brucitt) og kalsiumkarbonat (magnesium kalsitt, kalsitt og aragonitt). Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.



V4.100. Kjerneprøve Kj 10 ved pelnummer 15930 utan biofilm. Innteikna tynnslipområder. Middels heft med utfelling av  $Mg(OH)_2$  (brucitt) og kalsiumkarbonat (kalsitt). Betongalder 5 år. Foto: Per Hagelia.

## 2009 Kjerner med tynnslip (Holm 2011c)



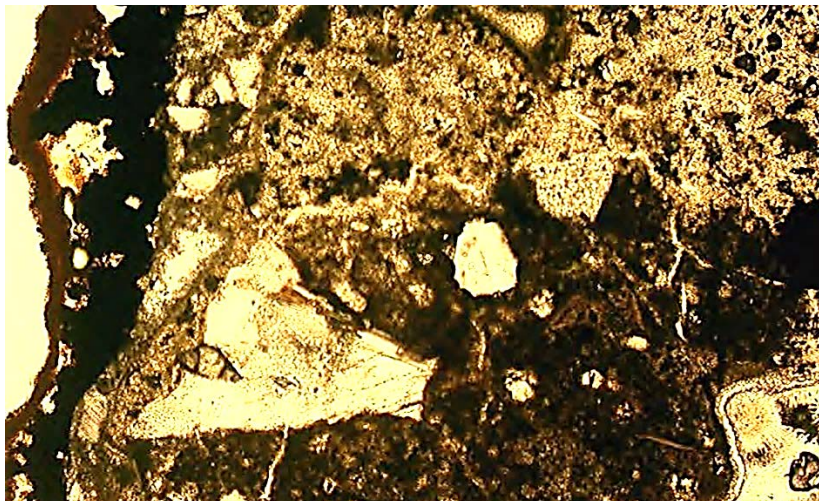
V4.101. Kjerneprøve 15930-3. Det blei laga to tynnslip, eitt frå området ved overflata og eitt i området mot heftsona. Betongalder 10 år. Foto: SINTEF.

## 2015 Kjerner med tynnslip

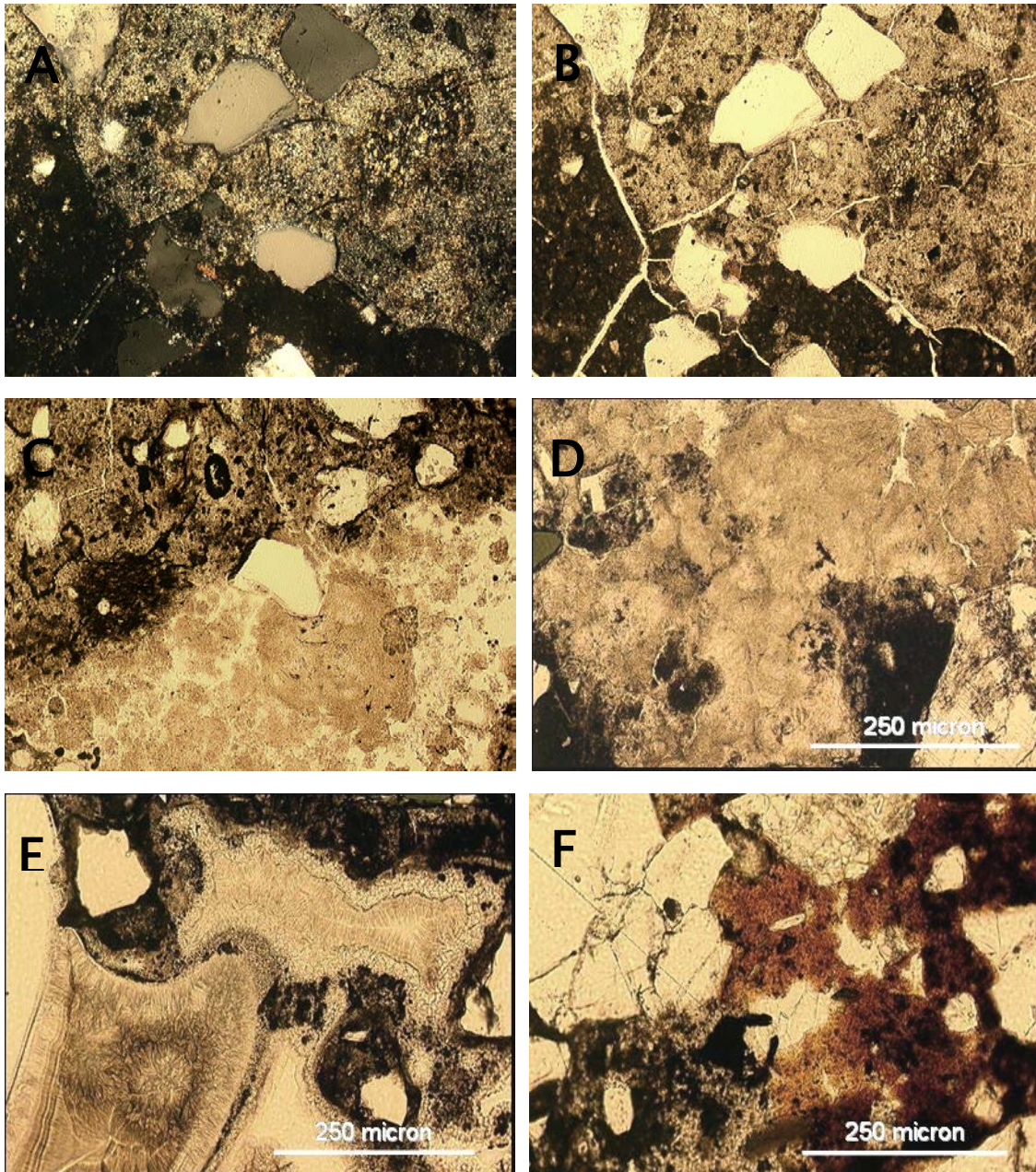
Det blei preparert to tynnslip av kjerne 15925-1 frå henholdvis overflate området og området mot heftsona. Tilsvarande for kjerne 15930-1. Resultat av mikroskopering er tabulert i Tabell 4.21 i kapittel 4.6.

## Eksempel på mikroskopering av tynnslip og analysar av utfellingar, biofilm m.m.

2004-2006

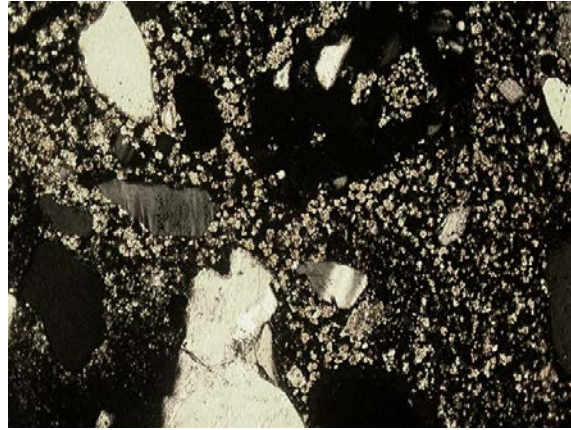


V4.102. Tynnslipfoto kjerne Kj 2 frå pel 15925 (sjå V4.81 og V4.96). Viser ytre tynn lagdelt biofilm (venstre) av brun jernbakterie (*Mariprofundus ferrooxidans*) og Mn-oksiderande bakterie under mot betongen (muleg *Leptothrix* sp.). Lys utluta pasta med utfelling av kalsitt og intakt sementpasta (mørk). Lengste bildekant = 0,6 mm. Foto: Per Hagelia.

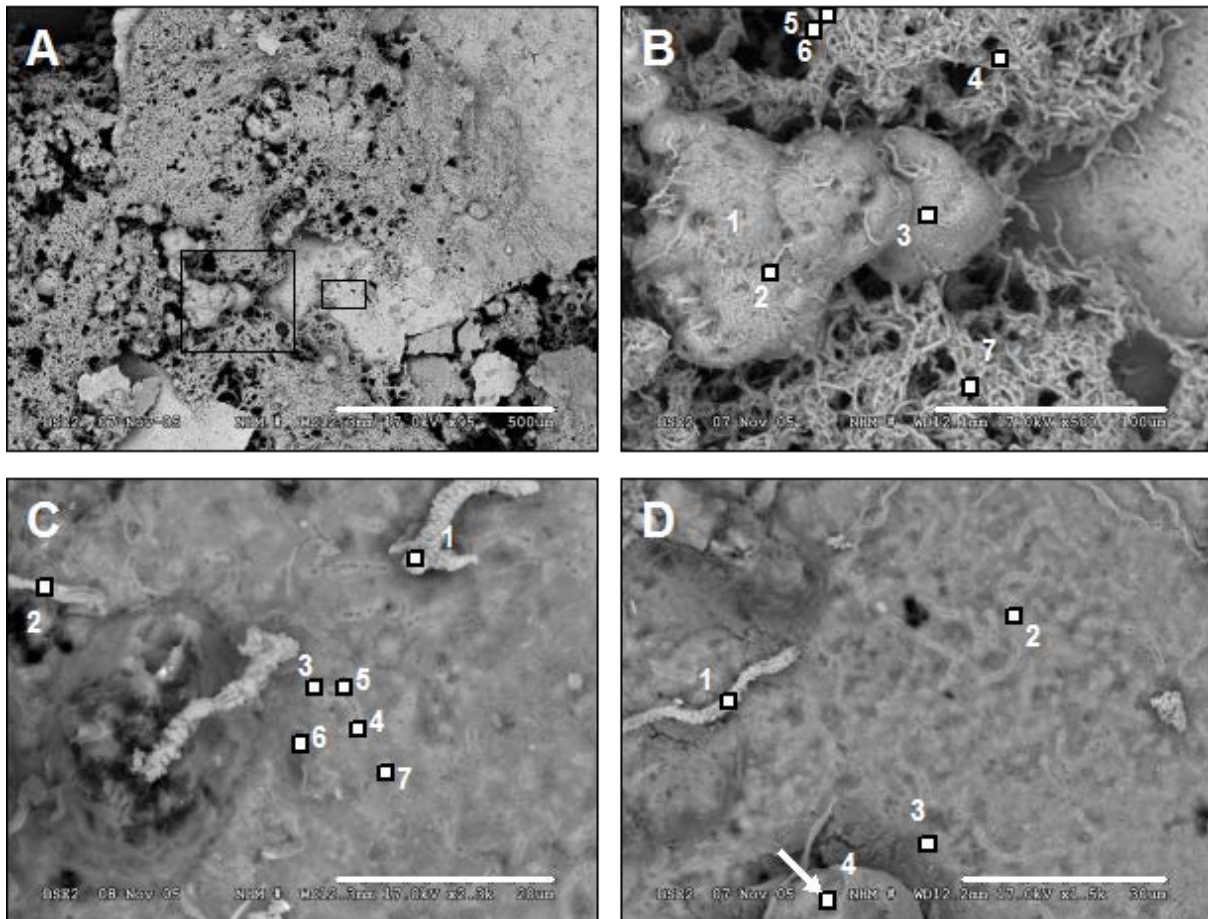


V4.103. Nedbrytingsreaksjonar i undersjøisk sprøytebetong (abiotiske) i polarisasjonsmikroskop. A og B (same utsnitt hhv dobbeltpolarisert og planpolarisert lys) viser mørk frisk sementpasta og omvandla sementpasta ved Mg inntrenging og utvikling av svinnriss (Oslofjordtunnelen, prøve H-2004; betongalder 5 år). C og D viser fullskala thaumasitt sulfatangrep (beige farge) i hhv Oslofjordtunnelen (kjerne Kj V, 5 år) og Freifjordtunnelen (Kjerne 6150, betongalder 12 år). E: utfelling av brucitt ( $Mg(OH_2)$ ), F: utfelling av rusta korrosjonsprodukt i sementpasta (begge Kjerne 6150). C t.o.m. F i planpolarisert lys. Foto: Per Hagelia.

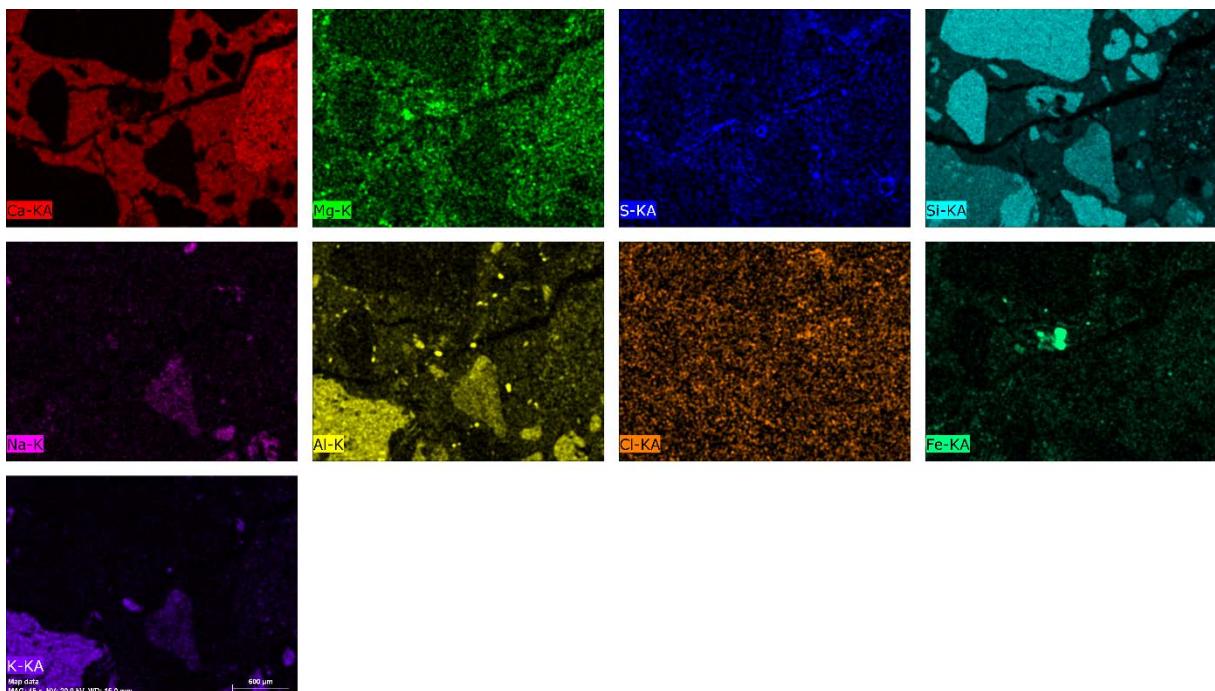
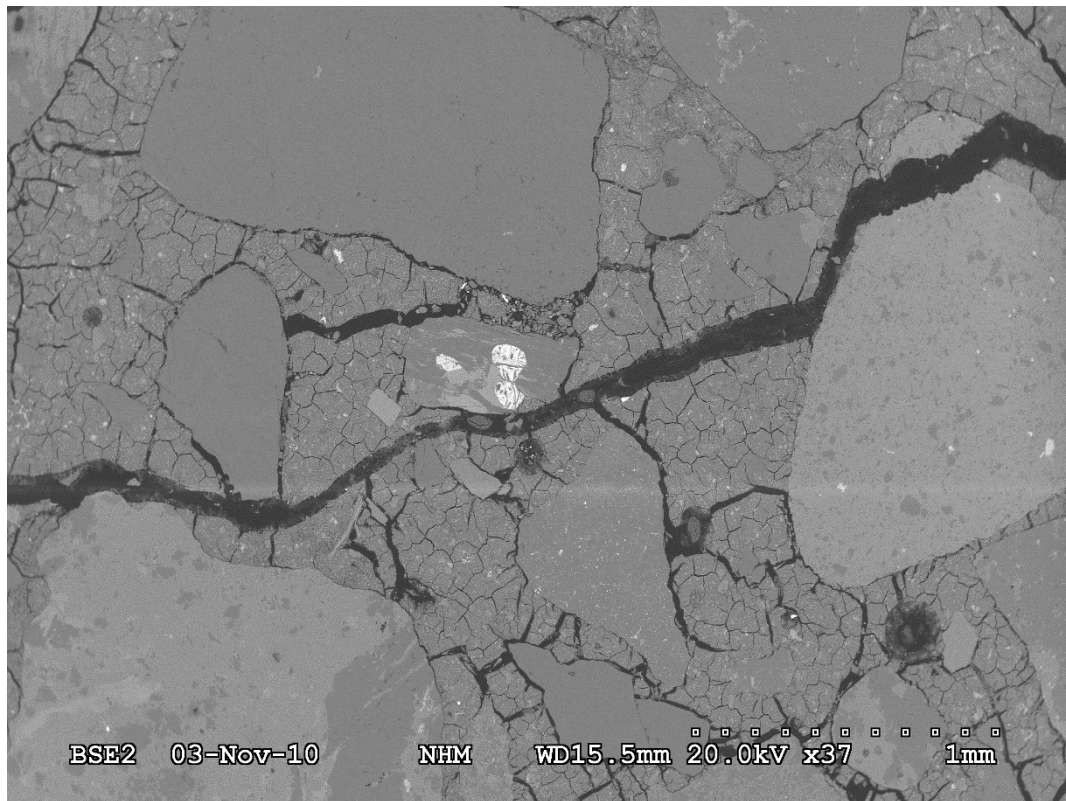




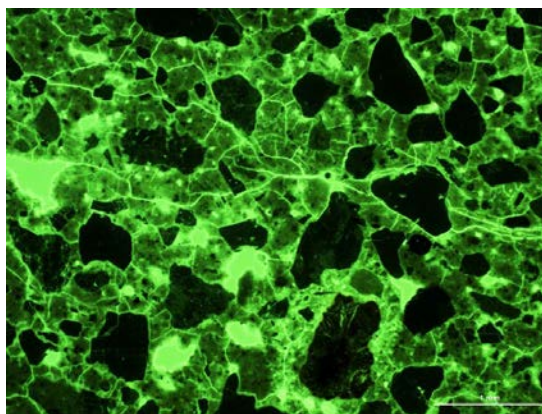
V4.104 Klassisk Popcorn kalsitt utfelling (PCD) som små lyse korn i mørk utluta pasta (eksempelen er henta frå Flekkerøy-tunnelen (Kjerne 1374, betongalder 15 år). PCD fører til svekking av betongen. Dobbelpolarisert lys. Lengste bildekant = 650  $\mu\text{m}$ . Foto: Per Hagelia.



V4.105. Undersøking av biofilm i SEM (Hagelia 2011b). A) viser slimete jernbakteriar som ligger utanpå skorper av manganoksid. B) viser eit utsnitt med nøsteforma manganførande bakteriar (hittil uidentifisert) omgitt av helix-forma jernbakteriar nyleg identifisert som *Mariprofundus* sp: Karačić m.fl. 2016). Små utsnitt med høg forstørring (C og D) viser at manganskorpene inneheld bakteriar (muleg *Leptothrix* sp, men ennå uidentifisert) og med jernbakteriar spreidde omkring. Undersøkingar ved DNA-teknikkar viser at biofilmene inneheld svært mange andre mikrobar som ikkje er opplagt synlege ved SEM-analyse (Karačić m.fl. 2016). Kjemiske reaksjonar knytta til mikrobane i biofilm er viktige bidragsytarar til nedbrytinga. Foto: Hans-Jørgen Berg (†), Naturhistorisk museum, Universitetet i Oslo.



V4.106. Prøve H-2004 frå servicetunnelen for pumpeumpen (betongen som var så forvitra at han blei meisla bort og erstatta). SEM-Backscatter (øvt) viser mikro-krakelert sementpasta på grunn av nedbryting. Det er også riss med opning mellom 0.1 og 0.2 mm. som forklarar den observert omfattande stålfiberkorrosjonen: Elementfordelinga (under) viser at kalsium i opprinneleg C-S-H sementpasta delvis er erstatta med magnesium. Det er også registrert høgt innhald av klorid og også svovel. Betongalder 5 år. Foto: Hans-Jørgen Berg (†), Naturhistorisk museum, Universitetet i Oslo.



V4.107. Fluorescensimpregnert tynnslip av 10 år gammel sprøytebetong. Pel/prøvenummer 15930-3. Område ca. 20 mm inn fra overflata mot tunnelrommet (Holm 2011b), med typisk eksempel på korresponderande mikroriss (Varige konstruksjonar definerer dette som mikroriss i klasse 3).

**Tabell 11 Observasjoner i tynnslip**

Tynnslip fra kjerne merket "15930-3"	Ytre tynnslip	Indre tynnslip
Oppgitt masseforhold	0,45	0,45
Vurdering av masseforhold <sup>v</sup>	Det oppgitte masseforhold synes å være for lavt (synes å ligge nærmere 0,55)	Det oppgitte masseforhold synes å være for lavt (synes å ligge nærmere 0,55)
Porøsitet i mørtelfasen	De ytterste ca 1,4-2,4 mm av betongen har lavere porøsitet enn den øvrige (foto nr 5 i vedlegg 3). Innenfor dette sjiktet er porøsiteten homogen	Homogen porøsitet
Luftinnblandet	Nei	Nei
Mikroriss	Meget høyt innhold	Meget høyt innhold
Fine riss i betongen	Enkelte	En del
Grove riss	Ingen	Enkelte
Utfellinger	Svovelforbindelser (ettringittlignende) observert i luftporer gjennom hele tynnslipet med unntak av de ytterste ca 3 mm (foto nr 8 og 9 i vedlegg 3)	Svovelforbindelser (ettringittlignende) observert i luftporer/riss gjennom hele tynnslipet, mest innerst mot fjellkontakten
Kommentar	Karbonatisering i overflaten: 1,4-2,4 mm (foto nr 4 i vedlegg 3) En del mindre luftflommer i betongen (foto nr 6 og 9 i vedlegg 3). Stålfiber	Karbonatbelegg med tykkelse 0,2-1,8 mm mot fjell (foto nr 10 og 13 i vedlegg 3) En del luftflommer i betongen (se foto nr 11 og 15 i vedlegg 3). Stålfiber

V4.108. Oppsummering av tynnslipobservasjoner fra kjerne 15930-3 (Holm 2011b). Betongalder 10 år.

belegg.

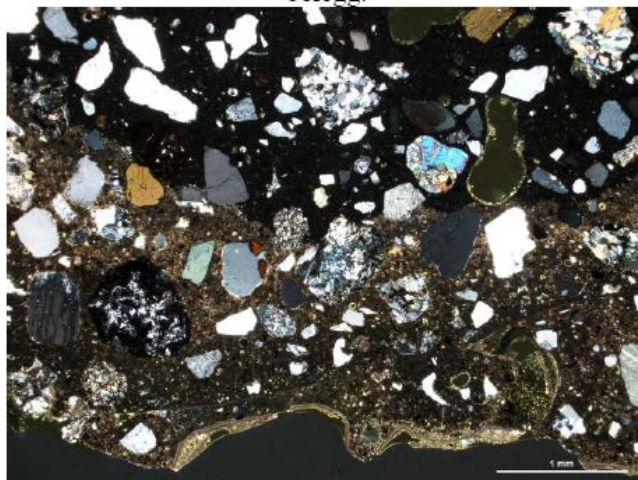


Foto nr 4. Ytre tynnslip fotografert i polarisert lys. Bildet viser overgangen mellom karbonatisert (nederst) og ikke karbonatisert betong i betongens overflate (mot tunnelen).

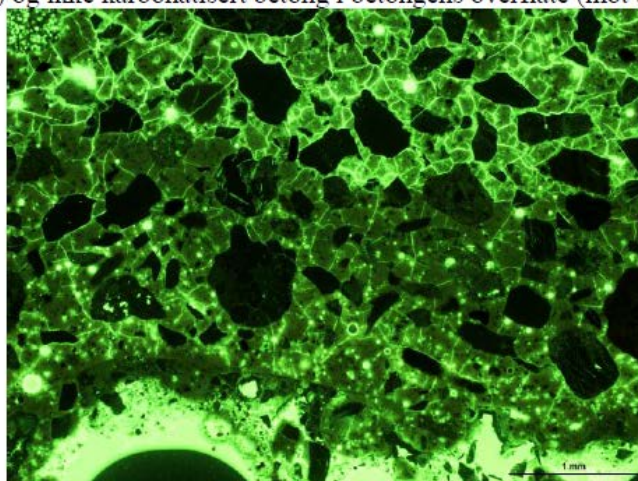


Foto nr 5. Ytre tynnslip fotografert i fluorescerende lys (overflaten er nederst på bildet). Lys grønn sementpasta er mer porøs enn mørk grønn sementpasta, og bildet viser at sementpastaen ved overflaten er mindre porøs enn sementpastaen videre innover.

V4.109. Tynnslipobservasjonar frå ytre del av kjerne 15930-3 (Holm 2011b). Betongalder 10 år.

15 mm fra fjellkontakten.



Foto nr 13. Indre tynnslip. Bildet viser ettringittlignende utfelling i riss øverst på bildet (pil). Nederst på bildet ses det lyse karbonatlaget mot fjellkontakten.

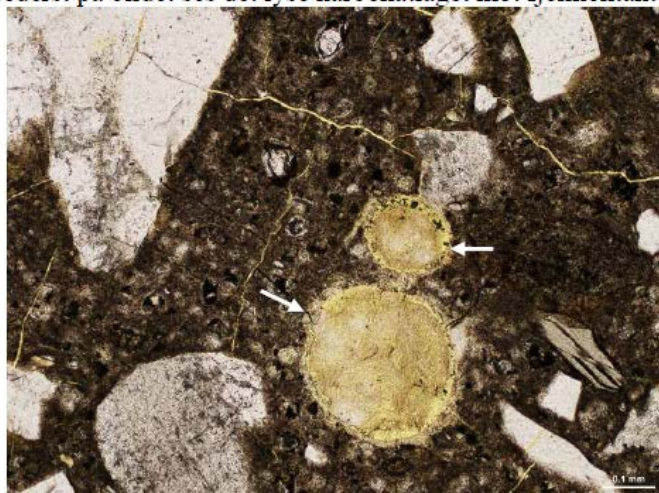


Foto nr 14. Indre tynnslip. Bildet viser ettringittlignende utfelling i luftporer ved fjellkontakten (piler).

*V4.110. Tynnslipobservasjonar frå indre del av kjerne 15930-3 nær bergkontakt (Holm 2011b). Dei ettringitt-liknande utfellingane er thaumasitt. Betongalder 10 år.*

fjellkontakten.

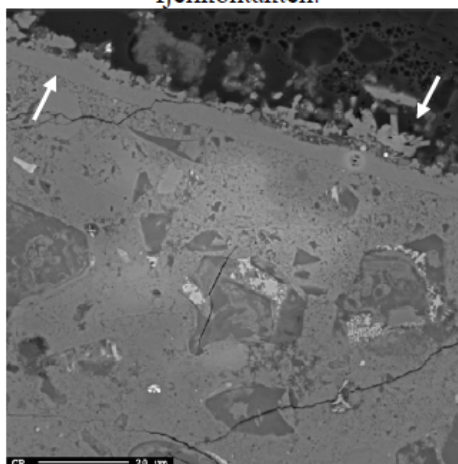


Foto nr 16. Ytre tynnslip. Bildet viser karbonatutfelling (ca 92 % CaO og ca 3 % MgO) samt karbonatlag (ca 97 % CaO og ca 1 % MgO) på sprøytebetongens overflate mot tunnelen (piler). Forstørrelse 1000x.

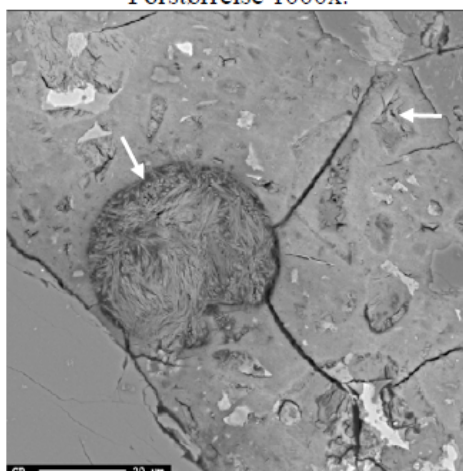


Foto nr 17. Ytre tynnslip. Svovelforbindelse i luftpore (trolig en blanding av taumasitt og ettringitt med ca 43 % CaO, ca 38 % SO<sub>3</sub>, ca 12 % SiO<sub>2</sub> og ca 4 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ca 3 mm inn fra overflaten (pil). Merk også riss samt svovelforbindelser (taumasitt/ettringitt, pil) i sementpastaen. Forstørrelse 950x.

V4.111. Observasjoner i SEM frå ytre del av kjerne 15930-3 nær overflate (Holm 2011b). Betongalder 10 år.

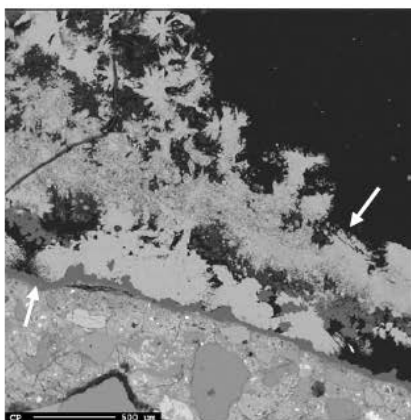


Foto nr 22. Indre tynnslip. Bildet viser karbonatbelegg (ca 98 % CaO) på betongens kontaktflate mot fjell (pil). Det mørke grå sjiktet (pil) under karbonatbelegget består av ca 93 % MgO. Forstørrelse 40x.

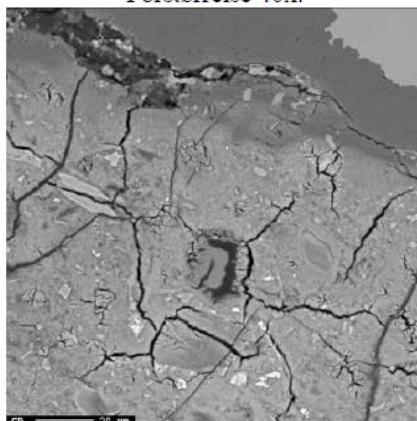


Foto nr 23. Indre tynnslip. Svovelforbindelser (trolig en blanding av taumasitt og ettringitt bestående av ca 44 % SO<sub>3</sub>, ca 31 % CaO, ca 10 % SiO<sub>2</sub> og ca 8 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) i sementpastaen ved fjellkontakten. Merk også kraftig opprissing i sprøytebetongen. Forstørrelse 700x.

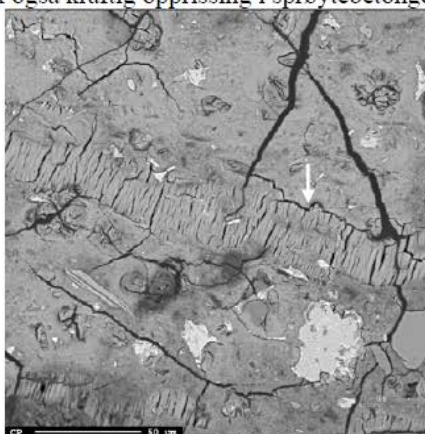


Foto nr 24. Indre tynnslip. Utfelling av taumasitt i riss (ca 38 % CaO, ca 36 % SO<sub>3</sub> og ca 20 % SiO<sub>2</sub>) i riss (pil) ca 1 mm fra fjellkontakten. Forstørrelse 500x.

V4.112. Observasjoner i SEM frå indre del av kjerne 15930-3 nær berg (Holm 2011b). Betongalder 10 år.

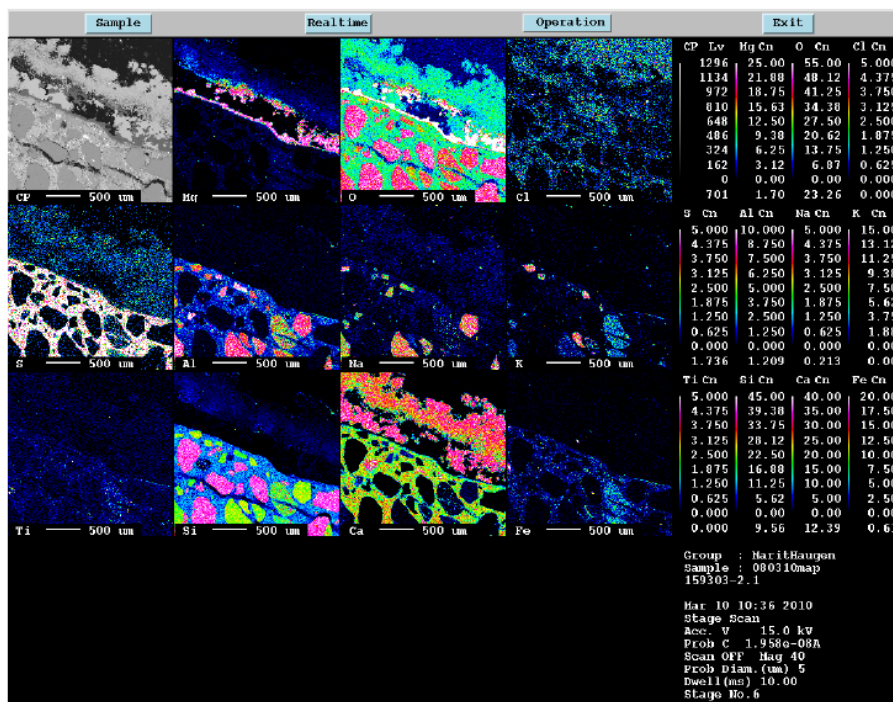


Foto nr 33. Indre tynnslip. Konsentrasjon av ulike elementer i sprøytebetongen fra fjellkontakten.

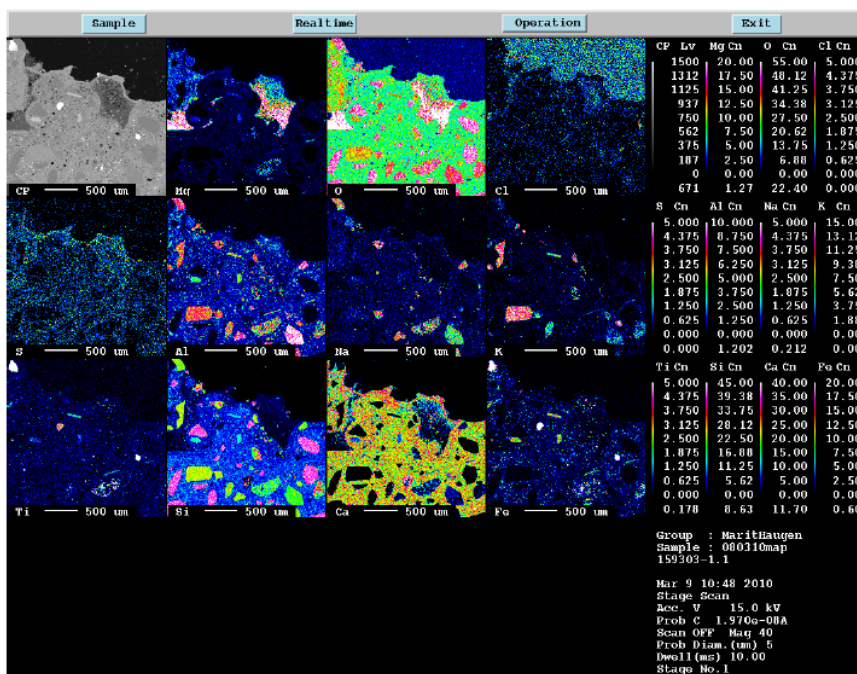


Foto nr 28. Ytre tynnslip. Konsentrasjonen av ulike elementer i sprøytebetongen fra overflaten mot tunnelen.

V4.113. Elementfordeling i indre del med bergkontakt og ytre del til overflate av kjerne 15930-3 nær berg (Holm 2011b). Betongalder 10 år.

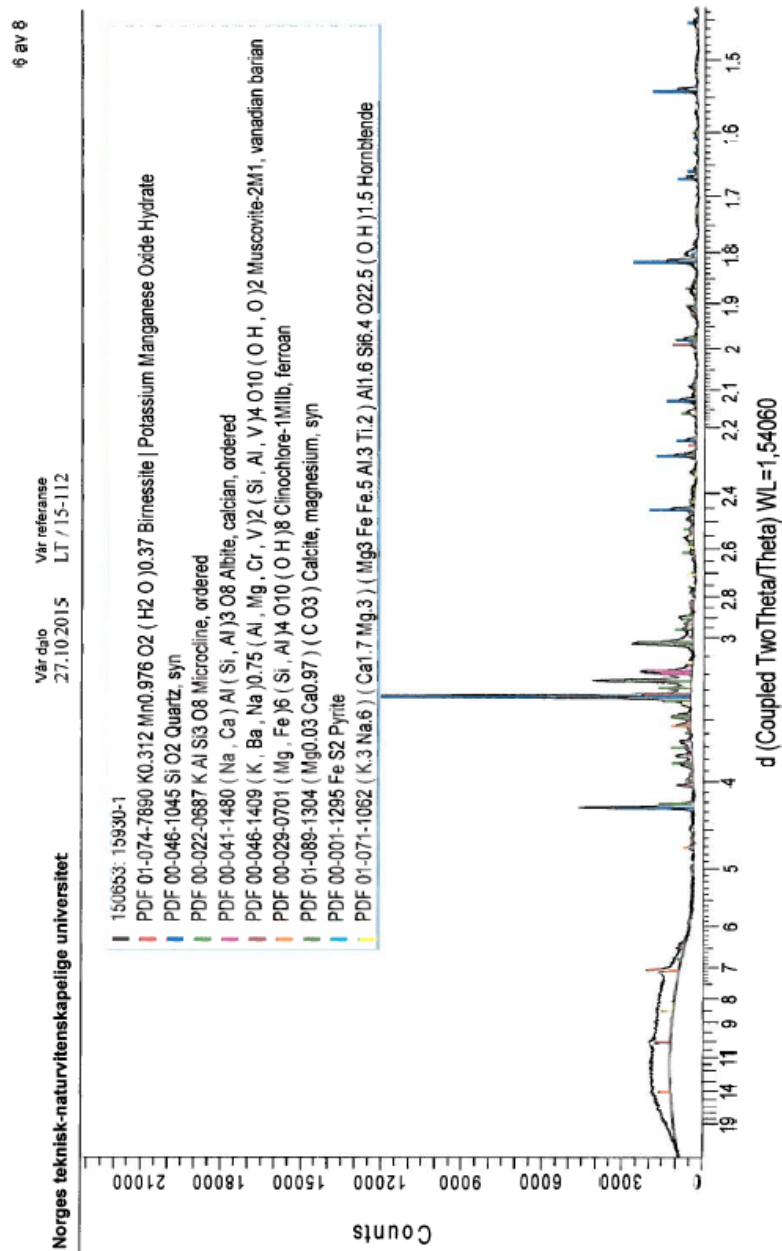


## Røntgenopptak (XRD)

2004-2007

Identifikasjonen av mineraler i utfellingar og biofilm i undersjøisk betong er tidlegare dokumentert (Hagelia 2011b: Tabulert i Appendix 5).

2015



V4.114. Røntgenopptak av overflatebelegg på kjerne 15930-1 i Varige konstruksjonar. Utfelling av manganoksidet birnessitt er danna som biomineral. Magnesium- førande kalsitt er typisk i utfellingar i kontakt med sjøvattn. Også førekomst av pyritt (svovelkis). Betongalder 16 år. Utført av NTNU.

## Kapillær vassmettingsgrad

Data er henta frå rapportar som er referert til i teksten, med unnatak av resultat frå 2015 utført av Sentrallaboratoriet Statens vegvesen.

*Pelnummer 15925 i område med biofilm*



Statens vegvesen

**Region Øst**  
**Sentrallaboratoriet / Regionlaboratoriet**  
Arbeidsskjema for laboratorieanalyser

<b>Kapillær vannmetningsgrad og porøsitet, utvidet PF</b>		<b>Side 1 av 2</b>
Oppdragsnr. 6150021-2	Utført dato 30.11-09.12.2015	Signatur BMG

rosjekt: Varige konstruksjoner, Oslofjordtunnelen

Prøve er merket: Utborret i brunt område, pel-15925-3(2B,2C,2D,2E)

Prøvens alder: 1999

pel-15295-5(2F,2G,2H,2I)

tart forsøk:            dato: 30.11.2015            tid (tt:mm): 12:35            Trykkmetning: Start-07.12.2015, kl.12:00 Slutt-09.12.2015, kl.12:05

Dato	Kl	Vekt (0,01 g) etter:	Prøvestykket merket							
			2B	2C	2D	2E	2F	2G	2H	2I
30.11.15	12:30	<b>Initiell vekt - g<sub>0</sub></b>								
		Vannlagring - g	130,41	160,15	138,25	142,02	62,40	115,34	118,08	109,96
07.12.15	11:38	1 uke vannsug - g	143,00	175,74	153,75	157,52	72,24	129,03	130,35	120,93
		2 uker vannsug - g								
		3 uker vannsug - g								
07.12.15	11:52	<b>Vannmetning (luft) - g<sub>4</sub></b>	143,00	175,74	153,75	157,52	72,24	129,03	130,35	120,93
		<b>Vannmetning (vann) - g<sub>5</sub></b>	80,77	99,01	85,29	88,29	38,61	71,09	73,09	67,94
09.12.15	12:12	<b>Trykkmetting (luft) - g<sub>6</sub></b>	144,87	178,10	156,10	159,19	72,35	130,85	132,03	122,68
09.12.15	12:20	<b>Trykkmetting (vann) - g<sub>7</sub></b>	82,51	101,22	87,52	89,86	39,21	72,87	74,61	69,57
		<b>Tørking - g<sub>3</sub></b>	130,41	160,15	138,25	142,02	62,40	115,34	118,08	109,96
Mål		sidekant a / diameter d (mm)	60,5	60,6	60,6	60,5	60,5	60,5	60,6	60,6
		sidekant b (mm)								
		høyde (mm)	22,2	27,0	24,3	27,0	21,1	21,6	21,6	21,4
<b>For utregninger, se formler på side 2</b>										
Prøvestykkets volum - V <sub>3</sub> (cm <sup>3</sup> )			62,36	76,88	68,58	69,33	33,14	57,98	57,42	53,11
Densitet faststoff - ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )			2723	2718	2725	2723	2691	2716	2716	2722
Sug porøsitet - p <sub>s</sub> (%)			20,19 %	20,28 %	22,60 %	22,36 %	29,69 %	23,61 %	21,37 %	20,66 %
Makro porøsitet - p <sub>m</sub> (%)			3,00 %	3,07 %	3,43 %	2,41 %	0,33 %	3,14 %	2,93 %	3,30 %
Total porøsitet - p <sub>t</sub> (%)			23,19 %	23,35 %	26,03 %	24,77 %	30,02 %	26,75 %	24,29 %	23,95 %
Kapillær vannmetningsgrad - DS (%)			<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
Beregnet v/c etter Powers			1,07	1,08	1,52	1,46	43,87	1,81	1,26	1,14

<b>Kapillær vannmetningsgrad og porøsitet, utvidet PF</b>		<b>Side 2 av 2</b>
---	--	--------------------



Statens vegvesen

**Region Øst**  
**Sentrallaboratoriet / Regionlaboratoriet**  
 Arbeidsskjema for laboratorieanalyser

Kapillær vannmetningsgrad og porøsitet, utvidet PF		Side 1 av 2
Oppdragsnr. 6150021-1	Utført dato 30.11-09.12.2015	Signatur BMG

prosjekt: Varige konstruksjoner, Oslofjordtunnelen

Prøve er merket: Utborret i grått område, pel-15930-1

Prøvens alder: 1999

tart forsøk:

dato: 30.11.2015

tid (tt:mm): 12:35

Trykkmetning: Start-07.12.2015, kl.12:00 Slutt-09.12.2015, kl.12:05

Dato	Kl	Vekt (0,01 g) etter:	Prøvestykket merket						
			1C	1D	1E	1F			
30.11.15	12:30	<b>Initiell vekt - g<sub>0</sub></b>							
		Vannlagring - g	122,15	126,34	120,84	96,69			
07.12.15	11:38	1 uke vannsug - g	134,60	138,43	132,03	107,62			
		2 uker vannsug - g							
		3 uker vannsug - g							
07.12.15	11:52	<b>Vannmetning (luft) - g<sub>4</sub></b>	134,60	138,43	132,03	107,62			
		<b>Vannmetning (vann) - g<sub>5</sub></b>	75,42	77,67	75,14	59,69			
09.12.15	12:10	<b>Trykkmetting (luft) - g<sub>6</sub></b>	136,27	140,46	133,32	109,08			
09.12.15	12:17	<b>Trykkmetting (vann) - g<sub>7</sub></b>	76,96	79,60	76,23	61,10			
		<b>Tørking - g<sub>3</sub></b>	122,15	126,34	120,84	96,69			
Mål		sidekant a / diameter d (mm)	60,5	60,4	60,4	60,4			
		sidekant b (mm)							
		høyde (mm)	21,3	21,4	20,0	19,5			
<b>For utregninger, se formler på side 2</b>									
Prøvestykkets volum - V <sub>3</sub> (cm <sup>3</sup> )			59,31	60,86	57,09	47,98			
Densitet faststoff - ρ <sub>k</sub> (kg/m <sup>3</sup> )			2703	2703	2709	2717			
Sug porøsitet - p <sub>s</sub> (%)			20,99 %	19,87 %	19,60 %	22,78 %			
Makro porøsitet - p <sub>m</sub> (%)			2,82 %	3,34 %	2,26 %	3,04 %			
Total porøsitet - p <sub>t</sub> (%)			23,81 %	23,20 %	21,86 %	25,82 %			
Kapillær vannmetningsgrad - DS (%)			<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>			
Beregnet v/c etter Powers			1,19	1,02	0,99	1,56			

Kapillær vannmetningsgrad og porøsitet, utvidet PF		Side 2 av 2
--	--	-------------

## Trykkstyrke

Data er henta frå rapportar som er referert til i teksten, med unnatak av resultat frå 2015 utført av Sentrallaboratoriet Statens vegvesen.

Pelnummer 15930 i område utan biofilm



Statens vegvesen

**Region Øst**  
**Sentrallaboratoriet / Regionlaboratoriet**

Arbeidsskjema for laboratorieanalyser

### 14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder

Oppdragsnr. 6150021-1

Utført dato 26.11.2015

Signatur KBK

PROSJEKTNR.: Varige konstruksjoner, Oslofjordtunnelen, felt 1	LEVERANDØR:
BYGGEPLASS:	RESEPTNR.:
ENTREPRENØR:	FØLGESEDELNR.:
KONSTRUKSJON: Kjerner Utboret i tunnel i grått område	STØPEDATO: 1999
	SIGN.:

Fasthet- og bestandighetsklasse:

Dmaks:                      Synk:                      Luft:                      Bet.temp.:                      °C    Lufttemp.:                      °C

#### Prøving av trykkfasthet

Prøve nr.	Vekt i luft g	Vekt i vann g	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Trykkflate		Høyde mm	Bruddlast kN	Trykkfasthet MPa	Gj.snitt trykkfasthet MPa
				Ø(mm) a (mm)	Ø(mm) b (mm)				
1G 15930-4	483,1	270,1	2268	60,4	60,4	75,9	128,9	45,0	
1H 15930-5	485,2	268,2	2236	60,4	60,4	76,4	71,9	25,1*	

Merknader (bøyningsbruddets karakter, uregelmessigheter ved prøvestykkene, m.v.):

Ikke lagret i vann før trykking, fuktet

\*med dårlig område i kjernen

## Fiberinnhold

Data er henta frå rapportar som er referert til i teksten, med unnatak av resultat frå 2015 utført av Sentrallaboratoriet Statens vegvesen.

Pelnummer 15930 i område utan biofilm



Statens vegvesen

Region Øst

Sentrallaboratoriet / Regionlaboratoriet

Arbeidsskjema for laboratorieanalyser

### NB7/NS-EN 14488-7 Bestemmelse av fiberinnhold i herdet sprøytebetong

Oppdragsnr: 6150021-1 23.11.2015 Signatur: KBK

Prosjekt: Varige konstruksjoner, Oslofjordtunnelen, Pel,15930  
Resept: B35 M40 S  
Støpedato: 04.03.2010 (kjerner)  
Type fiber:  
Tilsiktet dosering:

Prøve nr	Prøve merket	Vekt i luft (g)	Vekt i vann (g)	Volum (l)	Densitet (kg/m <sup>3</sup> )	Fiber (g)	Fiberinnhold (kg/m <sup>3</sup> )
1H	4	483,100	270,100	0,21	2268,08	4,71	22,43
1G	5	485,200	268,200	0,22	2235,94	5,72	26,34

Gjennomsnittlig fiberinnhold (kg/m<sup>3</sup>):

## Kloridinnhold

Data er henta frå rapportar som er referert til i teksten, med unnatak av resultat frå 2015 utført av Sentrallaboratoriet Statens vegvesen.

Pelnummer 15925 i område med biofilm



Statens vegvesen

Region Øst

Sentrallaboratoriet / Regionlaboratoriet

Arbeidsskjema for laboratorieanalyser

### 210.432 Kloridinnhold i betongpulver ved potensiometrisk titrering

Oppdragsnr.: 6150021-2 Utført dato: 14.03.2016 Signatur: TROLOR

Prosjekt: Varige konstruksjoner - Oslofjordtunnelen, bak hvelv Prøve/Resept: Prøve 2A/M45 Sprøytebet Støpedato: År 2000

Prøvenr.	Sjikt (x-y mm)		Dybde	Klorider i % av betongvekten	Merknader
	x	y			
2A-1	0	5	2,5	0,58	Brunt område, Pel 15925-2
2A-2	5	10	7,5	0,89	
2A-3	10	15	12,5	0,99	
2A-4	15	20	17,5	0,82	
2A-5	20	25	22,5	0,72	
2A-6	25	30	27,5	0,71	
2A-7	30	35	32,5	0,76	
2A-8	35	40	37,5	0,80	

## Pelnummer 15930 i område utan biofilm



Statens vegvesen

Region Øst

Sentrallaboratoriet / Regionlaboratoriet

Arbeidsskjema for laboratorieanalyser

### 210.432 Kloridinnhold i betongpulver ved potensiometrisk titrering

Oppdragsnr.:	6150021-3	Utført dato:	11.05.2016	Signatur:	Benteg
--------------	-----------	--------------	------------	-----------	--------

Prosjekt:	Varige konstruksjoner - Oslofjordtunnelen, bak hvelv	Prøve/Resept:	Prøve 3/M45 Sprøytebet	Støpedato:	År 1999
-----------	--	---------------	------------------------	------------	---------

Prøvenr.	Sjikt (x-y mm)		Dybde	Klorider i % av betongvekten	Merknader
	x	y			
3-1	0	5	2,5	0,12	Pel 15930
3-2	5	10	7,5	0,10	
3-3	10	15	12,5	0,09	
3-4	15	20	17,5	0,06	
3-5	20	25	22,5	0,06	
3-6	25	30	27,5	0,08	
3-7	30	35	32,5	0,10	
3-8	35	40	37,5	0,12	

### Sprøytebetongresept – Oslofjordtunnelen

Vi legg til grunn at resept brukt i undersjøisk delstrekning var ei blanding av 75 % Standard sement og 30 % Industrisement, dvs. resepten som var i bruk etter 1-2 år. E-post frå Trond Lorentzen, Sentrallaboratoriet 06.03.2017:

Hei Per!

Sprøytebetong resepten som ble brukt til Oslofjordtunnelen var litt todelt ettersom hvor langt uti prosjektet man var kommet.

#### De første 1-2 åra ble det brukt:

Standard sement 470 kg

22 kg silica

Scancem tilsetningsstoff (husker ikke akkurat type, men antar at også P-stoff ble brukt i tillegg til SP og akselator)

Tilslag 0/8 mm ca. 1640 kg

Masseforhold 0,42

#### Resten av tiden ble resepten endret til:

Standard sement / Industri sement totalt 470 kg hvor industri andelen var 30 %

Scancem ble byttet ut til Sika, type sikament 92.

Tilslag 0/8 mm ca. 1640 kg

Masseforhold 0,42

Vannmengde må ha ligget rundt 215 liter / m3.....

Hvis du har prøver fra mer i senter av tunnelen tror jeg mest sannsynlig at det er den siste resepten som gjelder, med 30 % industri.

Industri var vel høy alkalisk (?) mener vi tok hensyn til det i regnskapet.

Jeg blandet noen lass fra et backupverk i 98-99, men det var Inge Olav Dalen som var produksjonssjef – han kan finne detaljer hvis du ønsker Per

Han treffes på tlf. 909 60956, skulle hilse deg fra han også

Hs Trond v/lab

### **Analysar av vatn**

Analysedata er henta frå Hagelia (2011b).

I samband med undersøkingar av Oslofjord testfelt og PhD i samarbeid med Chalmers – Göteborg er det utført fleire nye analysar som vil bli publiserte i eigne rapportar og fagartiklar.



Statens vegvesen  
Vegdirektoratet  
Publikasjonsekspedisjonen  
Postboks 6706 Etterstad 0609 OSLO  
Tlf: (+47) 22073000  
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

**Trygt fram saman**