



# Tilstandskontroll av sprøytebetong i sju tunneler

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 475



Foto: Mannvit



## Tittel

Tilstandskontroll av sprøytebetong i sju tunneler

## Undertittel

Baneheia-, Flekkerøy-, Frøya-, Grua-, Sløverfjord-, Ekeberg- og Svartdalstunnelene

## Forfatter

Börge Johannes Wigum (Mannvit)

## Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og teknologiavdelingen

## Seksjon

Tunnel og betong

## Prosjektnummer

603242

## Rapportnummer

Nr. 475

## Prosjektleder

Synnøve A. Myren / Alf Kveen

## Godkjent av

Per Hagelia

## Emneord

Varige konstruksjoner, tilstandsutvikling tunneler, bestandighet, sprøytebetong

## Sammendrag

Denne rapporten gir en oppsummering av resultater fra undersøkelse av bestandigheten til sprøytebetong brukt som bergsikring i sju tunneler. Undersøkelsene har omfattet visuelle registreringer, utboring av kjerner for videre undersøkelser, samt prøvetaking av utfelling-sprodukter og vann. Laboratorieundersøkelse av betongkjerner omfattet trykkfasthet, fiberinnhold, densitet, full PF, DS/fukt, karbonatisering, fiberkorrosjon og strukturanalyse med plan- og tynnslip. I tillegg ble det laget kloridprofiler fra prøver fra de undersjøiske tunnelene.

Resultatene viste at sprøytebetongen generelt var i god stand, men med varierende grad av heft til berget. I noen av tunnelene var det enkelte områder der sprøytebetongen var noe nedbrutt, bl.a. grunnet thaumasittangrep.

## Title

Durability investigation of sprayed concrete in seven tunnels

## Subtitle

The Baneheia, Flekkerøy, Frøya, Grua, Sløverfjord, Ekeberg and Svartdal tunnels

## Author

Börge Johannes Wigum (Mannvit)

## Department

Traffic Safety, Environment and Technology Department

## Section

Tunnel and concrete

## Project number

603242

## Report number

No. 475

## Project manager

Synnøve A. Myren / Alf Kveen

## Approved by

Per Hagelia

## Key words

Durable structures, existing tunnels, durability, sprayed concrete

## Summary

This report summarizes the results from investigations on durability of sprayed concrete used for rock support in seven tunnels. The investigations comprised visual registrations, sampling of concrete cores for further investigations, and also sampling of surface precipitates and water. Laboratory investigations of concrete cores comprised compressive strength, fibre content, density, porosity, moisture, carbonation, fibre corrosion and structural analysis using plan and thin sections. In addition, chloride profiles were made on samples from the subsea tunnels.

The results show that the sprayed concrete is generally in good condition, but the adhesion to the rock surface varied. In restricted areas in some tunnels, the sprayed concrete started to degrade, amongst other due to thaumasite sulphate attack.

## 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 *Börge Johannes Wigum, Mannvit* på oppdrag fra Varige konstruksjoner





MANNVIT

TILSTANDSKONTROLL SPRØYTEBETONG

**SAMLERAPPORT FRA TUNNELENE;  
FRØYA-, SLØVERFJORDEN-, GRUA-,  
SVARTDAL/EKEBERG-, BANEHEIA-  
OG FLEKKERØY-**

STATENS VEGVESEN

SAMLERAPPORT

PROSJEKTNUMMER: 1-900-016						
DOKUMENTNUMMER: MV-2015-016						
GJELDENDE VERSJON: 2.0						
2.0	2015.10.16	Rapport	BJW	ÞHó	BJW	Statens Vegvesen
1.0	2015.8.31	Rapport	BJW	ÞHó	BJW	Statens Vegvesen
REV.	DATO REV.	ENDRING	UTFØRT	KONTROLLERT	ANSVARLIG	OPPDRAGSGIVER



## Innholdsfortegnelse:

<b>Sammendrag .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Innledning .....</b>	<b>3</b>
1.1 Hensikten med oppdraget .....	3
<b>2 Gjennomføring .....</b>	<b>3</b>
2.1 Oversikt over undersøkte tunneler .....	3
2.2 Oversiktsundersøkelser og registreringer .....	4
2.3 Detaljerte undersøkelser av sprøytebetong som bergsikring .....	5
2.4 Prøvetaking - Utboring av betongkjerner .....	5
2.5 Laboratorieundersøkelser på betongkjerner .....	6
2.6 Problemer relatert til undersøkelsene .....	6
<b>3 Resultater .....</b>	<b>6</b>
3.1 Resultater fra laboratorietesting .....	6
<b>4 Konklusjon .....</b>	<b>14</b>
4.1 Frøyatunnelen .....	14
4.2 Sløverfjordtunnelen .....	14
4.3 Gruatunnelen .....	14
4.4 Svartdaltunnelen .....	14
4.5 Ekeberg tunnelen .....	16
4.6 Baneheiatunnelen .....	16
4.7 Flekkerøytunnelen .....	16
<b>5 Referanser .....</b>	<b>17</b>





## Sammendrag

Denne rapporten oppsummerer gjennomføringen og resultatene vedrørende tilstandskontroll av bestandighet av sprøytebetong i 6 utvalgte vegtunneler til oppdragsgiver; Statens vegvesen.

Arbeidet presentert i denne samler rapporten, og underliggende rapporter, for hver tunnel, inngår som et sentralt nytt grunnlagsmateriale i en samlet vurdering av sprøytebetongbestandigheten, basert på tidligere prosjekter og andre aktiviteter. Dette er en del av Statens vegvesen sitt etatsprogram; Varige konstruksjoner - Tilstandsvikling tunnel, TT5 Sprøytebetong (2012-2015).

[www.vegvesen.no/Fag/Fokusomrader/Forskning+og+utvikling/Varige+konstruksjoner](http://www.vegvesen.no/Fag/Fokusomrader/Forskning+og+utvikling/Varige+konstruksjoner)

Kontaktperson hos Statens vegvesen har vært Per Hagelia.

I forbindelse med tunnelbefaring og inspeksjon nattestid, har oppdraget omfattet:

- Oversiktsundersøkelser og registreringer, samt detaljerte undersøkelser av sprøytebetong som bergsikring.
- Utboring av betongkjerner, der betongkjerner ble prøvetatt iht. Statens vegvesen HB R211 - 15.516 Utboring av betongkjerner<sup>1</sup>
- Prøvetaking av utfellingsprodukter og vann som ble levert oppdragsgiver for videre undersøkelser.

I etterkant har det vært gjennomført:

- Laboratorieundersøkelser på betongkjernene.

Tester som ble utført på prøvene fra alle tunnelene var visuell beskrivelse av kjerner, trykkfasthet<sup>2</sup>, fiberinnhold<sup>3</sup>, densitet<sup>4</sup>, full PF<sup>5</sup>, DS/fukt, karbonatisering og fiberkorrosjon<sup>6</sup> og strukturanalyse med plan og tynnslip (fluorescens-impregnerte). I de undersjøiske tunnelene Frøya, Sløverfjord, Grua og Flekkerøy ble det også undersøkt kloridprofiler<sup>7</sup>. Etter avtale med oppdragsgiver (e-post 12.03.15), ble det bestemt å utelate utregninger av masseforhold basert på porøsitetsmålinger, da dette vil kunne gi forvirrende resultater i en del tilfeller. Oversikt over resultatene for hver enkelt tunnel er i tabellene Tabell 3 til Tabell 9.

- Detaljert rapportering for hver enkelt tunnel:
  - Frøya (Rapport 2015.4.7: MV-2015-011)
  - Sløverfjord (Rapport 2015.3.18: MV-2015-007)
  - Grua (Rapport 2015.5.17: MV-2015-012)
  - Svartdal/Ekeberg (Rapport 2015.7.16: MV-2015-013)
  - Baneheia (Rapport 2015.7.17: MV-2015-014)
  - Flekkerøy (Rapport 2015.8.24: MV-2015-015)

Oversiktsundersøkelser og registreringer i tunnelene viste at disse i all hovedsak ser bra ut. Kun i avgrensede områder ble det observert noen skader i sprøytebetongen. Av de undersøkte tunnelene var Grua tunnelen merkbart i best stand, der skader kun ble observert på noen få mindre steder. Generelt kan man si at den bergsikring som ble valgt i tunnelene er av god kvalitet og virker etter sin hensikt.

Videre undersøkelser av uttatte prøver på laboratoriet gikk i hovedsak etter planen. Prøver ble videre undersøkt fra to lokaliteter i Frøya-, Sløverfjord- og Svartdal-tunnelen og fra én lokalitet i Grua- og Ekeberg-tunnelen. Ihht til konkurransegrunnlaget var det planlagt å ta ut prøver fra to lokaliteter i Gruatunnelen, men det var av praktiske hensyn kun mulig å ta prøver fra én lokalitet. I Baneheiatunnelen ble det tatt ut prøver fra to lokaliteter, og i Flekkerøytunnelen ble det tatt ut prøver fra to lokaliteter. Oversikt over antall betongkjerner pr. lokalitet/analysemetode er vist i Tabell 2.

Til tross for at oversiktsundersøkelser og registreringer i tunnelen gav stort sett indikasjoner på sprøytebetong i god tilstand, fikk man et mye mer nyansert bilde når sprøytebetongen ble analysert nærmere vha. strukturanalyser. Eksempelvis ble det funnet klumper av silikastøv i sprøytebetongen i Frøyatunnelen. Det ble også registrert varierende grad av vedheft mellom sprøytebetongen og bergoverflaten i flere av tunnelene. Mer alvorlig nedbrytningsmekanismer ble observert i Svartdaltunnelen, der det ble registrert thaumasitt-angrep. I Ekeberg-tunnelen var enkelte områder av sprøytebetongen totalt omdannet og nedbrutt til en løs masse, uten sammenliming. Også i Flekkerøytunnelen ble det funnet thaumasitt og betydelig nedbrytning av sprøytebetongen.

Dette viser viktigheten av detaljerte analyser vha. strukturanalyse, der man får et annet bilde av tilstanden til sprøytebetongen, sammenlignet med kun inspeksjon av overflaten.

## 1 Innledning

På oppdrag fra Statens Vegvesen har konsulentfirmaet Mannvit utført vurderinger av tilstanden av sprøytebetong i 6 utvalgte vegtunneler. Dette ble gjennomført via inspeksjoner utført på nattetid i de ulike tunnelene. I første omgang ble de 4 tunnelene undersøkt; Frøya, Sløverfjord, Gruatunnelen og Svartdal/Ekeberg. Dette var de 4 første tunnelene som beskrevet i konkurransegrunnlaget. I neste fase ble de 2 tunnelene undersøkt; Flekkerøy og Baneheia. Disse 2 tunnelene ble bestemt i etterkant, da det opprinnelig var lagt opp til å undersøke 2 andre tunneler i Konkurransegrunnlaget.

### 1.1 Hensikten med oppdraget

Formålet med oppdraget har vært å få utført tilstandsundersøkelser av sprøytebetong i totalt seks ulike vegtunneler, med vekt på bergsikring. En hovedhensikt har vært å sammenligne materialeegenskapene i intakt og nedbrutt sprøytebetong. Undersøkelsene har omfattet visuelle registreringer, utboring av betongkjerner og etterfølgende laboratorieundersøkelser. I tillegg ble det samlet inn vannprøver som blir analysert av oppdragsgiver. Eventuelle observasjoner av skader på sprøytebetong til brannsikring av PE-skum ble også dokumentert visuelt, uten prøvetaking/testing. Oppdraget inngår i etatsprogrammet; Varige konstruksjoner - Tilstandsvikling tunnel, TT5 Sprøytebetong (2012-2015).

## 2 Gjennomføring

### 2.1 Oversikt over undersøkte tunneler

Da det var ønskelig at samtlige befaringer ble utført av samme personell, ble det satt sammen en gruppe fra Mannvit bestående av:

- Betongteknolog; Sveinbjörn Sveinbjörnsson [SS]
- Betongteknolog og geolog; Gísli Guðmundsson [GG]
- Geolog / ingeniørgeolog; Guðjón Helgi Eggertsson [GHE]
- Laboratorietekniker Sigurjón Árnason [SÁ].
- I tillegg deltok ingeniørgeolog Atli Karl Ingimarsson [AKI] på den første befaringen.

Representanter fra Statens vegvesen deltok også på noen av inspeksjonene. Per Hagelia deltok på inspeksjonen i Frøya-tunnelen, Svartdal/Ekeberg-tunnelen, og Flekkerøy-tunnelen. Jon Gulland deltok i inspeksjon i Frøya-tunnelen, Gruatunnelen og Svartdaltunnelen, mens Arnhild Fjose deltok i inspeksjon i Frøyatunnelen og Sløverfjordtunnelen.

Arbeidet med de ulike testene på Mannvits laboratorium ble ledet av geolog Guðrún Eva Jóhannsdóttir.

Prosjektleder har vært ingeniørgeolog Børge Johannes Wigum, og har han sammen med Fagansvarlig for Mannvits laboratorium; Þorbjörg Hólmgeirsdóttir, hatt ansvaret for gjennomføring av rapporteringen.

I Tabell 1 er det presentert en oversikt over alle undersøkte tunnelene.

**Tabell 1. Oversikt over tunnelene som ble undersøkt.**

Tunnel	Befarings-dato (1 natt pr tunnel)	Utførende Personell	Veg/åpningsår/lengde	Type eksponering/tidligere undersøkt mht. sprøytebetong
Frøya	13.- 14.08.14	[SS] [GG] [GHE] [SÁ] [AKI]	Fv 714 S-Trøndelag /2000/5305 m	Undersjøisk/2007/2008: Bare bergsikring, omr. med bom registrert  2013 områder med bakteriebelegg observert
Sløverfjord	26.- 27.08.14	[SS] [GG] [GHE] [SÁ]	E10-12 Nordland/1998/3370 m	Undersjøisk/2011 hoved- ettersyn
Grua	24.- 25.09.14	[SS] [GG] [GHE] [SÁ]	Rv 4 Oppland /1992/ 1390 m	Landtunnel – frost etc. /2009 Bergsikring samt vann og frost oppgradert
Svartdal	25.- 26.09.14	[SS] [GG] [GHE] [SÁ]	E6 & E18 Oslo /2000/1500 m	2000, 2006 fokus på alun-strekninger. Tidligere undersøkte lokaliteter fulgt opp.
Ekeberg	29.- 30.09.14	[GG] [SÁ]	E6 Oslo /1995/1500 m	Landtunneler, delvis m/alunskifer/ Tidligere undersøkte lokaliteter fulgt opp. Tidlig sulfatangrep påvist året 2000 <sup>8</sup> .
Flekkerøy	25. - 26.11.14	[SS] [GG] [GHE] [SÁ]	Fv 457/1989/2321 m	Undersjøisk. Tidligere undersøkte lokaliteter fulgt opp; (1996) <sup>9</sup> og (2001 og 2003) <sup>9</sup> . Noe nedbrutt betong påvirket av bakteriebelegg og saltvann.
Baneheia	27. – 28. 11.14	[SS] [GG] [GHE] [SÁ]	E18/1999-2000/2940 m	Landtunnel

## 2.2 Oversiktsundersøkelser og registreringer

I forbindelse med dette arbeidet ble det i de natlige tunnelinspeksjonene gjennomført oversiktsundersøkelser og registreringer. Dette ble gjennomført ved en rask rekognosering i hver enkelt tunnel, med vekt på ytre tegn til nedbryting av sprøytebetong (utfellinger, sprekker, vann, etc.). Denne innledende fasen omfattet både sprøytebetong brukt som bergsikring og som brannsikring av PE-skum, og det ble foretatt registreringer kun av det som var synlig fra tunnelrommet. Enkle

registreringer ble gjennomført, inklusive fotodokumentasjon av steder med tegn på fysisk eller kjemisk nedbryting. Eventuell sammenheng med vannbelastning og/eller annet ble registrert og fotografert. Alle observasjoner ble knyttet til pel nr. og høyre/venstre side i den enkelte tunnel.

### 2.3 Detaljerte undersøkelser av sprøytebetong som bergsikring

I neste fase av tunnelinspeksjonen ble det gjennomført en mer detaljert undersøkelse av sprøytebetong som bergsikring. Det ble lagt hovedvekt på utvalgte mindre strekninger/lokaliteter med tegn på nedbryting (en til to lokaliteter i hver tunnel), noe som ble utført i samarbeid med kontaktperson hos oppdragsgiver.

Detaljerte undersøkelser av sprøytebetong som bergsikring, ble gjennomført etter følgende prosedyre:

- Det ble foretatt en nøye beskrivelse av de enkeltlokaliteter, der det enkelte ganger ble foretatt fotodokumentasjon i forkant av at prøver ble tatt ut. Dessverre ble dette ikke gjennomført i alle tilfellene.
- Utfelling og løs betong ble samlet inn før utboring av betongkjerner. Det ble ikke i noen tilfeller funnet bakterielt materiale.
- I de få tilfellene der dette var mulig ble det samlet inn lekkasjevann. pH-verdier og redox potensiale ble målt direkte der det var lekkasjevann (Sløverfjord-tunnelen og Grua-tunnelen). Oppdragsgiver ved Per Hagelia utførte selv disse målingene der han var representert (Frøya-tunnelen, Ekeberg/Svartdal-tunnelen, og Flekkerøy-tunnelen).

### 2.4 Prøvetaking - Utboring av betongkjerner

Detaljert lokalitet for prøveuttak ble valgt av Mannvit's representanter på stedet, og ble dokumentert med nøyaktige registreringer og foto. Mange strekninger/lokaliteter var forhåndsdefinerte på basis av tidligere utførte undersøkelser på stedet.

Det ble foretatt utboring av betongkjerner, både fra tilsynelatende intakt og påvirket/nedbrutt sprøytebetong. Det ble forsøkt å bore gjennom betongen og noen cm inn i berget på baksiden, men som oftest ble det brudd i heftsonen mellom betong og berg. I noen tilfeller var det mulig å ta med prøver av deler av berget bak betongen. Det ble benyttet anbefalte borediametere i forhold til type analyser og anbefalt antall kjerner, der dette var mulig. Kjernene ble forsøkt tatt ut der det var mest hensiktsmessig med tanke på sammenligning av påkjent betong og intakt betong. De detaljerte prøvestedene ble avmerket på foto. Enkelte områder var med svært tynn sprøytebetong, noe som gjorde det vanskelig å ta ut relevante prøver.

Det ble lagt opp til at fotodokumentasjonen dekket hver lokalitet så fullstendig som praktisk mulig (inklusive foto av vederlag, heng samt baksiden av hvelv der en kommer til m.m.). Alle prøvene ble nummerert systematisk og alle prøvelokaliteter vises på foto.

Umiddelbart etter utboring ble betongkjernene tørket av på sidene, merket og pakket i flere lag med plastfolie og ble lagt i plastposer som ble forseglet med tape (for å bevare fukt). Det ble passet på å unngå tørke vekk svakt materiale på endestykkene.

## 2.5 Laboratorieundersøkelser på betongkjerner

Oversikt over laboratorieundersøkelser på betongkjernene er vist i Tabell 2. De 4 første tunnelene er som opprinnelig beskrevet i Konkurransesgrunnlaget, mens de 2 siste tunnelen ble bestemt etter hvert. Det var for enkelte av testene ikke mulig å utføre ønsket mengde analyser, da det ikke var prøvetatt tilstrekkelig prøvemateriale. Dette var grunnet tynn sprøytebetong etc.

**Tabell 2. Antall betongkjerner pr. lokalitet/analysemetode (antall i parentes, som oppgitt i konkurransesgrunnlaget).**

Tunnel	Fasthet, fiberinnh. og densitet	Klorid-profil	Full PF-metode	DS/fukt	Karbonatisering og fiberkorrosjon	Strukturanalyse (plan/ tynnslip)
Frøya	7 (6)	2 (2)	4 (8)	3 (2)	2 (2)	2/3 (1/2)
Sløverfjord	6 (6)	2 (2)	7 (8)	5 (2)	2 (2)	1/6 (1/2)
Grua	6 (6)	1 (2)	2 (8)	2 (2)	1 (2)	1/2 (1/2)
Ekeberg/ Svartdal	3 (3)/ 4 (6)	0	1 (4)/ 4 (8)	1 (2)/ 3 (2)	4 (3)	2/7 (3/6) 2/6
Baneheia	6	0	2	2	2	2/5 (2/4)
Flekkerøy	6	2	6	3	3	2/6 (2/4)

## 2.6 Problemer relatert til undersøkelsene

Det var i enkelte av tunnelene periodevis trafikk, mens undersøkelser pågikk, men dette var alltid kun i et felt der trafikken ble kontrollert av en person på stedet. Arbeidsmiljø ble opplevd trygt da hastigheten på bilene igjennom tunnelen var kontrollert og lav, noe som økte sikkerheten.

Arbeidet ble ofte utført bak støpt betongdekker eller bak duk, noe som både begrenset arbeidsmiljøet og områdene som kunne inspiseres.

Dersom man hadde hatt mere tid til inspeksjonen ville dette ha ført til en grundigere inspeksjon og muligheter for flere prøvetatte kjerner.

Det var ofte vanskelig å prøveta vann-prøver, da nødvendig vannlekkasje ofte ikke var tilstrekkelig.

# 3 Resultater

## 3.1 Resultater fra laboratorietesting

En oversikt over alle testene og resultatene fra utført laboratorietesting er presentert i Tabell 3 til Tabell 9, for de ulike tunnelene.

**Tabell 3. Frøyatunnelen, oversikt over resultater fra utførte laboratorieundersøkelser.**

Prøvningsmetode	Verdier fra tester (verdier er gjennomsnitt av alle målinger unntatt kloridinnhold hvor verdier er maksimum verdi i kloridprofilen)	Måleenhet	Resultater	
			Pel nr./meter 4795 venstre	Pel nr./meter 6600 høyre
Trykkfasthet Statens vegvesen HB014 - 14.631	Trykkfasthet	MPa	32,3	42,3
Densitet Statens vegvesen HB014 - 14.632	Densitet	kg/m <sup>3</sup>	2295	2291
Fiberinnhold EN 14488-7	Fiberinnhold	kg/m <sup>3</sup>	32,3	40,1
Full PF Statens vegvesen HB014 - 14.637	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2040	2078
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2714	2715
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,22	0,21
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,03	0,03
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,25	0,23
	Topp absorpsjons tidspunkt ( $t_{kap}$ )	vs	184,99	168,75
	Topp absorpsjonsverdi ( $Q_{kap}$ )	kg/m <sup>2</sup>	4,28	4,03
	Motstandstallet ( $m$ )	s/m <sup>2</sup>	79,10	66,22
	Kapillaritetstallet ( $k$ )	kg/m <sup>2</sup> vs	0,02	0,02
DS/Fukt	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2035	2002
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2767	2732
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,25	0,25
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,01	0,02
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,26	0,27
	DS		94,65	93,14
	In-situ fuktinnhold		11,76	11,69
Karbonatisering Statens vegvesen HB015: 15.554	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot luft	mm	2	1
	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot fjell	mm	0	0
Visuell beskrivelse	Stålfiberkorrosjon		Ingen visuell fiberkorrosjon	Ingen visuell fiberkorrosjon
Klorid Statens vegvesen HB014: 14.643	Maximum kloridinnhold i kloridprofilen	% av betongvekt	0,99	0,57

14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder

14.632 Densitet

"EN 14488-7 Prøving av sprøytebetong Del 7: Fiberinnhold i fiberarmert betong"

Statens vegvesen HB014 - 14.637 Kapillær sugehastighet og porøsitet, full PF metode

Statens vegvesen Håndbok 015: 15.554 Karbonatiseringsdybder i betong.

Statens vegvesen HB014: 14.643 Kloridinnhold i betongpulver ved potensiometrisk titrering

**Tabell 4. Sløverfjordtunnelen, oversikt over resultater fra utførte laboratorieundersøkelser<sup>1</sup>.**

Prøvningsmetode	Verdier fra tester (verdier er gjennomsnitt av alle målinger unntatt kloridinnhold hvor verdier er maksimum verdi i kloridprofilen)	Måleenhet	Resultater	
			Pel nr./meter 1800 høyre	Pel nr./meter 2500 høyre
Trykkfasthet Statens vegvesen HB014 - 14.631	Trykkfasthet	Mpa	36,6	50,3
Densitet Statens vegvesen HB014 - 14.632	Densitet	kg/m <sup>3</sup>	2336	2324
Fiberinnhold EN 14488-7	Fiberinnhold	kg/m <sup>3</sup>	51,9	40,3
Full PF Statens vegvesen HB014 - 14.637	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2147	2132
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2713	2708
	Sug porøsitet ( $p_s$ )		0,17	0,18
	Makro porøsitet ( $p_m$ )		0,04	0,04
	Total porøsitet ( $p_1$ )		0,21	0,21
	Topp absorpsjons tidspunkt ( $t_{kap}$ )	vs	223,41	206,33
	Topp absorpsjonsverdi ( $Q_{kap}$ )	kg/m <sup>2</sup>	3,30	3,50
	Motstandstallet (m)	s/m <sup>2</sup>	114,18	97,70
	Kapillaritetstallet (k)	kg/m <sup>2</sup> vs	0,01	0,02
DS/Fukt	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2132	2103
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2727	2751
	Sug porøsitet ( $p_s$ )		0,19	0,20
	Makro porøsitet ( $p_m$ )		0,02	0,03
	Total porøsitet ( $p_1$ )		0,22	0,24
	DS		92,65	88,95
	In-situ fuktinnhold		8,44	8,52
Karbonatisering Statens vegvesen HB015: 15.554	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot luft	mm	2	2
	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot fjell	mm	0	0
Visuell beskrivelse	Stålfiberkorrosjon		Ingen visuell fiberkorrosjon	Ingen visuell fiberkorrosjon
Klorid Statens vegvesen HB014: 14.643	Maximum kloridinnhold i kloridprofilen	% av betongvekt	0,49	0,01

<sup>1</sup> Se fotnote i Tabell 3



**Tabell 5. Gruatunnelen, oversikt over resultater fra utførte laboratorieundersøkelser<sup>2</sup>.**

Prøvningsmetode	Verdier fra tester (verdier er gjennomsnitt av alle målinger unntatt kloridinnhold hvor verdier er maksimum verdi i kloridprofilen)	Måleenhet	Resultater
			Pel nr./meter 650 høyre
Trykkfasthet Statens vegvesen HB014 - 14.631	Trykkfasthet	MPa	33,2
Densitet Statens vegvesen HB014 - 14.632	Densitet	kg/m <sup>3</sup>	2241
Fiberinnhold EN 14488-7	Fiberinnhold	kg/m <sup>3</sup>	7,4*
Full PF Statens vegvesen HB014 - 14.637	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2035
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2664
	Sug porøsitet ( $p_s$ )		0,20
	Makro porøsitet ( $p_m$ )		0,03
	Total porøsitet ( $p_1$ )		0,24
	Topp absorpsjons tidspunkt ( $t_{kap}$ )	vs	208,20
	Topp absorpsjonsverdi ( $Q_{kap}$ )	kg/m <sup>2</sup>	3,77
	Motstandstallet (m)	s/m <sup>2</sup>	98,67
	Kapillaritetstallet (k)	kg/m <sup>2</sup> vs	0,02
DS/Fukt	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2051
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2599
	Sug porøsitet ( $p_s$ )		0,20
	Makro porøsitet ( $p_m$ )		0,01
	Total porøsitet ( $p_1$ )		0,21
	DS		91,78
	In-situ fuktinnhold		8,84
Karbonatisering Statens vegvesen HB015: 15.554	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot luft	mm	7
	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot fjell	mm	0
Visuell beskrivelse	Stålfiberkorrosjon		Polypropylen-fiber i betongen
Klorid Statens vegvesen HB014: 14.643	Maximum kloridinnhold i kloridprofilen	% av betongvekt	0,17

\* polypropylenfiber

<sup>2</sup> Se fotnote i Tabell 3

**Tabell 6. Svartdaltunnelen, oversikt over resultater fra utførte laboratorieundersøkelser<sup>3</sup>.**

Prøvningsmetode	Verdier fra tester (verdier er gjennomsnitt av alle målinger unntatt kloridinnhold hvor verdier er maksimum verdi i kloridprofilen)	Måleenhet	Resultater	
			Pel nr./meter 370 venstre	Pel nr./meter 385 høyre
Trykkfasthet Statens vegvesen HB014 - 14.631	Trykkfasthet	MPa	41,4	46,3
Densitet Statens vegvesen HB014 - 14.632	Densitet	kg/m <sup>3</sup>	2310	2284
Fiberinnhold EN 14488-7	Fiberinnhold	kg/m <sup>3</sup>	35,2	20,7
Full PF Statens vegvesen HB014 - 14.637	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2059	2108
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2696	2665
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,21	0,18
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,02	0,03
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,24	0,21
	Topp absorpsjons tidspunkt ( $t_{kap}$ )	vs	138,94	118,30
	Topp absorpsjonsverdi ( $Q_{kap}$ )	kg/m <sup>2</sup>	4,40	3,24
	Motstandstallet (m)	s/m <sup>2</sup>	41,76	37,57
	Kapillaritetstallet (k)	kg/m <sup>2</sup> vs	0,03	0,03
DS/Fukt	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2062	2089
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2716	2681
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,23	0,20
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,01	0,02
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,24	0,22
	DS		96,09	91,86
	In-situ fuktinnhold		10,75	8,74
Karbonatisering Statens vegvesen HB015: 15.554	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot luft	mm	0	1
	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot fjell	mm	0	0
Visuell beskrivelse	Stålfiberkorrosjon		Ingen visuell fiberkorrosjon	Ingen visuell fiberkorrosjon

<sup>3</sup> Se fotnote i Tabell 3

**Tabell 7. Ekebergtunnelen, oversikt over resultater fra utførte laboratorieundersøkelser<sup>4</sup>.**

Prøvningsmetode	Verdier fra tester (verdier er gjennomsnitt av alle målinger unntatt kloridinnhold hvor verdier er maksimum verdi i kloridprofilen)	Måleenhet	Resultater
			Pel nr./meter 1705 høyre
Trykkfasthet Statens vegvesen HB014 - 14.631	Trykkfasthet	MPa	35,8
Densitet Statens vegvesen HB014 - 14.632	Densitet	kg/m <sup>3</sup>	2271
Fiberinnhold EN 14488-7	Fiberinnhold	kg/m <sup>3</sup>	46,6
Full PF Statens vegvesen HB014 - 14.637	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2032
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2690
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,21
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,04
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,24
	Topp absorpsjons tidspunkt ( $t_{kap}$ )	vs	132,75
	Topp absorpsjonsverdi ( $Q_{kap}$ )	kg/m <sup>2</sup>	4,16
	Motstandstallet (m)	s/m <sup>2</sup>	40,54
	Kapillaritetstallet (k)	kg/m <sup>2</sup> vs	0,03
DS/Fukt	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2121
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2704
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,20
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,01
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,22
	DS		91,90
	In-situ fuktinnhold		8,90
Karbonatisering Statens vegvesen HB015: 15.554	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot luft	mm	2
	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot fjell	mm	0
Visuell beskrivelse	Stålfiberkorrosjon		Ingen visuell fiberkorrosjon

<sup>4</sup> Se fotnote i Tabell 3

**Tabell 8. Baneheiatunnelen, oversikt over resultater fra utførte laboratorieundersøkelser<sup>5</sup>.**

Prøvningsmetode	Verdier fra tester (verdier er gjennomsnitt av alle målinger unntatt kloridinnhold hvor verdier er maksimum verdi i kloridprofilen)	Måleenhet	Resultater	
			Pel nr./meter 405 høyre	Pel nr./meter 590 venstre
Trykkfasthet Statens vegvesen HB014 - 14.631	Trykkfasthet	MPa	59,1	66,9
Densitet Statens vegvesen HB014 - 14.632	Densitet	kg/m <sup>3</sup>	227	2288
Fiberinnhold EN 14488-7	Fiberinnhold	kg/m <sup>3</sup>	36,7	42,2
Full PF Statens vegvesen HB014 - 14.637	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2087	2084
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2682	2694
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,19	0,20
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,032	0,031
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,22	0,23
	Topp absorpsjons tidspunkt ( $t_{kap}$ )	vs	116,30	118,17
	Topp absorpsjonsverdi ( $Q_{kap}$ )	kg/m <sup>2</sup>	3,36	3,45
	Motstandstallet ( $m$ )	s/m <sup>2</sup>	35,42	38,12
	Kapillaritetstallet ( $k$ )	kg/m <sup>2</sup> vs	0,03	0,03
DS/Fukt	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2068	2077
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2671	2664
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,21	0,20
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,020	0,016
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,23	0,22
	DS		89,98	93,30
	In-situ fuktinnhold		8,95	9,17
Karbonatisering Statens vegvesen HB015: 15.554	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot luft	mm	5	6
	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot fjell	mm	0	0
Visuell beskrivelse	Stålfiberkorrosjon		Ingen visuell stålfiberkorrosjon	Det virker som at det er litt korrosjon av stålfiber, rett under overflaten til sprøytet flate

<sup>5</sup> Se Se fotnote i Tabell 3

**Tabell 9. Flekkerøytunnelen, oversikt over resultater fra utførte laboratorieundersøkelser<sup>6</sup>.**

Prøvningsmetode	Verdier fra tester (verdier er gjennomsnitt av alle målinger unntatt kloridinnhold hvor verdier er maksimum verdi i kloridprofilen)	Måleenhet	Resultater	
			Pel nr./meter 885 høyre	Pel nr./meter 1380 høyre
Trykkfasthet Statens vegvesen HB014 - 14.631	Trykkfasthet	MPa	36,9	Trykkfasthet ble ikke målt fordi prøvestykkenes høyde/diameterforhold var mindre en 1 (h/d<1)
Densitet Statens vegvesen HB014 - 14.632	Densitet	kg/m <sup>3</sup>	2231	2240
Fiberinnhold EN 14488-7	Fiberinnhold	kg/m <sup>3</sup>	40,3	37,4
Full PF Statens vegvesen HB014 - 14.637	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2019	2017
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2701	2725
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,22	0,23
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,033	0,025
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,25	0,26
	Topp absorpsjons tidspunkt ( $t_{kap}$ )	vs	171,15	210,24
	Topp absorpsjonsverdi ( $Q_{kap}$ )	kg/m <sup>2</sup>	3,73	4,34
	Motstandstallet (m)	s/m <sup>2</sup>	80,12	115,77
DS/Fukt	Kapillaritetstallet (k)	kg/m <sup>2</sup> vs	0,022	0,021
	Tørr densitet ( $\rho_1$ )	kg/m <sup>3</sup>	2003	1972
	Fast stoff densitet ( $\rho_{fs}$ )	kg/m <sup>3</sup>	2714	2708
	Sug porøsitet ( $\rho_s$ )		0,24	0,26
	Makro porøsitet ( $\rho_m$ )		0,025	0,007
	Total porøsitet ( $\rho_1$ )		0,26	0,27
	DS		92,36	96,01
In-situ fuktinnhold		10,97	12,92	
Karbonatisering Statens vegvesen HB015: 15.554	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot luft	mm	12	1
	Gjennomsnitt karbonatiseringsdybde mot fjell	mm	0	0
Visuell beskrivelse	Stålfiberkorrosjon		Noen stålfibre er rustet, ned til ca. 8 mm nedenfor sprøytet flate.	Ingen visuell fiberkorrosjon
Klorid Statens vegvesen HB014: 14.643	Maximum kloridinnhold i kloridprofilen	% av betongvekt	0,61	1,35

<sup>6</sup> Se fotnote i Tabell 3

## 4 Konklusjon

### 4.1 Frøyatunnelen

Inspeksjonen viste at den bergsikring som ble valgt i tunnelen er av god kvalitet og virker etter sin hensikt. Generelt viser inspeksjonen mange utfellinger, både gjennom sprøytebetong og fra tidligere borhull. Vannlekkasje er utbredt, men ingen store lekkasjer ble observert. Vannlekkasje var, for de fleste deler, svært lik den tilordnede/beregnete lekkasje, da tunnelen ble bygget. I tilknytning til vannlekkasjer ble det stedvis observert bakteriebelegg (biofilm) på sprøytebetongoverflata. Men det var ingen opplagte tegn på at disse hadde ført til svekkelse av betongen. Andre områder er fuktige. Sammenbrudd i sprøytebetong ble ikke observert under befaringen, og ingen visuell fiberkorrosjon, kun rustne stålfibre i overflaten, dvs. kun de som stikker ut i luft.

Strukturanalysen viste at den generelle tilstanden til sprøytebetongen er god. Det er observert porøse områder, noe som er vanlig i sprøytebetong. Disse områdene er trolig grunnet dårlig kompaktering i forbindelse med utførelsen av sprøytingen av betongen. Det ble ikke funnet sekundære faser i porer eller sprekker i sprøytebetongen. Heften mellom berget og sprøytebetongen er generelt svak, basert på de få lokaliteter som ble undersøkt. Det har blitt benyttet silikastøv sammen sementen. Klumper av silikastøv er utbredt i sprøytebetongen. Disse klumpene er opptil 500 mikron i diameter. Klumpene viser ofte oppsprekking, noe som er vanlig i slike klumper av silikastøv og er trolig opprinnelige, og ikke forårsaket av senere reaksjoner. Klumpene er interte og har ikke reagert med sementpastaen.

### 4.2 Sløverfjordtunnelen

Basert på feltinspeksjonen og påfølgende laboratorietesting og strukturanalyser kan man generelt si at bergsikringen som er i tunnelen er av god kvalitet og virker etter sin hensikt. Det ble ikke funnet noen tegn som indikerer tidlig nedbrytning av sprøytebetongen. Vedheft mellom berg og sprøytebetong er god de steder som dette ble analysert. Overflateavskalling ble funnet i noen av prøvene. Dette var ikke utbredt, og ble kun funnet i begrensede områder og kun i tilknytning til overflatesprekker, og det er konkludert med at dette ikke vil være til skade. Overflateavskallingen inneholder gips og magnesiumhydroksid, i tillegg til kalsiumkarbonat.

### 4.3 Gruatunnelen

Basert på feltinspeksjonen og påfølgende laboratorietesting og strukturanalyser kan man generelt si at bergsikringen som er i tunnelen er av god kvalitet og virker etter sin hensikt. Hoveddelen av tunnelen er kledd med betonghvelv og sprøytebetong i dette området er derfor ikke tilgjengelig for inspeksjon. Tunnelportalen viser sprekker i betongen på begge sider. Armeringsjern stikker også ut som er blitt rusten. Inne i tunnelportalen har vann fra utsiden sivet gjennom betongelementer og viser utfellinger fra sprekker og vannlekkasje.

Strukturanalysen viser at tilstanden til sprøytebetongen i pel nr. 650 høyre er generelt god. Det ble ikke observert noen nedbrytende prosesser. Sprøytebetongen er normalt tett, men porøse områder med svinnriss eksisterer. Det ble ikke observert sekundære reaksjoner som kunne lede til nedbrytning. Heften mellom berget og sprøytebetongen er relativt svak.

### 4.4 Svartdaltunnelen

Generelt kan man si at den bergsikringen som er valgt i tunnelen er av god kvalitet og virker etter sin hensikt. Generelt viser inspeksjon mange utfellinger, både gjennom sprøytebetong og fra tidligere borehull. Vannlekkasje er utbredt, andre områder er fuktige. Lekkasje er spesielt stor rett under

grensene mellom alunskifer og prekambrisk berg. Utfellinger er også veldig vanlige i dette området. Sammenbrudd i sprøytebetong ble observert på en lokalitet under befaringen og rustne stålfibre i overflaten.

Det ble tatt prøver for videre strukturanalyse fra områder i tunnelen der bergarten var alun-skifer. Visuelt virket sprøytebetongen uskadet. Sammenlignet med forholdene ellers i tunnelen, da var tilstanden til sprøytebetongen i dette området meget god. Det var ingenting på overflaten som indikerte eller gav til kjenne at destruktiv thaumasitt-angrep fant sted i kontaktsonen mellom bergoverflaten og sprøytebetongen. Benevnelsen thaumasitt-angrep er her brukt i den videste forstand, dvs. det indikeres bare at denne nedbrytende prosessen finner sted. Det er tydelig at nedbrytende prosess her inkluderer mer enn bare thaumasitt-angrep, der også dannelse av gips, kalsium utlutning og karbonatisering spiller en avgjørende rolle<sup>8</sup>. Sulfat-angrep er trolig en mer passende definisjon.

Flere prøver fra tre steder (pel. 370 (til høyre), 370 (til venstre) og 385) ble analysert både vha. optisk mikroskop og vha. SEM. Det ble observert thaumasitt-angrepet i alle prøvene, i kontaktsonen mellom bergartsoverflaten og sprøytebetongen. Det ble ikke observert indikasjoner på thaumasitt-angrep i overflaten på sprøytebetongen (sprøytet flate) i de innsamlede prøvene. Graden av thaumasitt-angrep varierte mellom prøvene. I enkelte prøver ble thaumasitt kun funnet i mindre porer, der dette ikke har forårsaket noen skade. I andre prøver (hovedsakelig tynnslip "16 Bunn") ble det observert alvorlig angrepet områder i en inntil ca. 20 mm tykk sone, ut fra bergarten. Prøve "16 Bunn" er veldig unik og gir muligheter for en detaljert studie av thaumasitt-angrep, i en mye mer detaljert grad enn det som ble gjort her. Thaumasitt-angrepet starter i kontaktsonen mellom alun-skiferen og sprøytebetongen og utvikler seg utover i sprøytebetongen, tilslutt mot overflaten. Dette totale scenariet er dog langt fra virkeligheten i Svardal-tunnelen. I de mest nedbrutte prøvene, har det funnet sted alvorlige kalsium utvasking fra sementpastaen nær alun-skiferen. I dette området er det observert gips i sprekker og porer. Sprekkene kan gå igjennom tilslagspartikler. Lenger bort fra alun-skiferen, ut i sprøytebetongen, er det observert kalsiumkarbonat i sameksistens med gips. Enda lengere bort forsvinner gips og thaumasitt observeres. Det ble ikke funnet noen tegn på reaksjoner mellom tilslagspartiklene og de sekundære faser (gips, kalsiumkarbonat og thaumasitt). I sonen med gips og kalsiumkarbonat var stålfibre rustne, mens stålfibre var ikke korrodert i sonen med thaumasitt. Dette samsvarer med tidligere funn på stedet<sup>8</sup>.

Geldannelse i porer synes å være forbundet med thaumasitt-angrep. Denne gelen er silika- og kalsium rik og er ofte krystallisert. Geldannelsen involverer ikke tilslags-reaksjoner, og det er ingen tegn på ekspansjon eller dannelse av sprekker i forbindelse med dette. Gelen dekker normalt innersiden av porene. Gel-dannelsen er trolig relatert til den omfattende kalsium utlekking som har funnet sted i sprøytebetong nærmest bergoverflaten.

I et område ved siden av den skadede sonen, ble det observert «ettringitt-thaumasitt»-lignende mineral i mikro-riss og mindre porer. Disse «ettringitt-thaumasitt»-lignende mineral ble i kjemiske analyser analysert til å ligge midt i mellom ettringitt og thaumasitt. Dette området kan tolkes som initiering av den nedbrytende prosessen. Nedbrytnings-prosessen starter med dannelse av «ettringitt-thaumasitt»-lignende mineral, som utvikler seg til thaumasitt, og deretter, etter hvert som prosessen fortsetter, omdannes thaumasitt til kalsiumkarbonat og gips. Basert på de analyserte prøvene, kan det konkluderes at thaumasitt-angrepet i sprøytebetongen i Svartdal-tunnelen, som er i kontakt med alun-skifer, ikke forårsaker alvorlige skader på sprøytebetong. Men dersom større skadeområder utvikler seg i kontaktsonen mellom alun-skifer og sprøytebetongen, slik som observert i tynnslipet "16 Bunn", spesielt dersom disse områdene forekommer i hengen, kan heftstyrken mellom sprøytebetong og bergarten reduseres noe som kan føre til en svakhet i sprøytebetong.

#### 4.5 Ekeberg-tunnelen

Nedbrytnings-prosessen i Ekeberg-tunnelen er noe annerledes enn i forhold til Svartdals-tunnel. Det ble observert tydelige tegn på skader i tunnelen, der sprøytebetongen hadde blitt omdannet til en løs masse, uten sammenliming. Tilsynelatende relativt store områder hadde blitt skadet. Prøvene som ble tatt med til laboratoriet for videre analyser var dessverre ikke var så interessante som prøvene fra Svartdals-tunnelen. En kjerne har en meget interessant sprekk nær bergoverflaten, som indikerer tilsvarende skader som ble observert i Svartdals-tunnelen, men denne prøven ble ikke analysert i videre detaljer. De skadede prøvene viste ikke mye informasjon om de nedbrytende prosessene. Sement-pasta var fullstendig ødelagt og de sekundære mineralene var kun karbonater. Det er imidlertid påvist ved petrografiske undersøkelser at thaumasitt kan omdannes fullstendig til kalsiumkarbonat, som et endeprodukt i sulfatangrepet<sup>8</sup>. I de delvise uskadede prøvene ble det kun observert ettringitt-thaumasitt.

#### 4.6 Baneheiatunnelen

Basert på feltinspeksjonen og påfølgende laboratorietesting og strukturanalyser kan man generelt si at bergsikringen som er i tunnelen er av god kvalitet og virker etter sin hensikt. Dette tiltross for at det er observert nettriss i sprøytebetongen. Hoveddelen av tunnelen er kledd med betongelementer i veggen og sprøytebetong i hengen, med PE skum i de fleste steder. Strukturanalysen viser at tilstanden til sprøytebetongen i pel nr. 405 høyre og 590 venstre er generelt god. Det ble ikke observert noen nedbrytende prosesser. Sprøytebetongen er normalt tett, men porøse områder med svinnriss eksisterer. Det ble ikke observert sekundære reaksjoner som kunne lede til nedbrytning. Det er observert god kontakt mellom berget og sementpastaen, men denne kontakten er kun undersøkt på et relativt lite område.

#### 4.7 Flekkerøytunnelen

Basert på feltinspeksjonen og påfølgende laboratorietesting og strukturanalyser kan man generelt si at bergsikringen som er i tunnelen er av god kvalitet og virker etter sin hensikt. Det ble i feltinspeksjonen, i utgangspunktet, ikke funnet noen tegn som indikerer tidlig nedbrytning av sprøytebetongen, utenom i området ved pel nr. 1380, som senere omtalt. Vedheft mellom berg og sprøytebetong er god de steder som dette ble analysert. Overflateavskalling ble funnet i noen av prøvene. Dette var ikke utbredt, og ble kun funnet i begrensede områder og kun i tilknytning til overflatesprekker, og det er konkludert med at dette ikke vil være til skade. Overflateavskallingen inneholder gips og magnesium karbonat, i tillegg til kalsiumkarbonat.

Det ble målt høyt kloridinnhold i sprøytebetongen, spesielt i området ved pel nr. 1380 høyre, og i begge områdene ble dette målt høyest ved bergoverflaten. Tilstanden til sprøytebetongen i området ved pel nr. 885 høyre virker å være god. Det var dog mulig å observere korrosjon i stålfibre som lå 10 mm fra sprøytebetongens overflate. Dette indikerer at porevannets pH i sprøytebetongen har blitt betydelig redusert, såpass lavt at stålfibrenes korrosjon kan starte. Dette kan være en indikasjon på starten av mer alvorlig nedbrytning.

I området ved pel nr. 885 høyre er kontaktsonen mellom bergoverflaten og sprøytebetongen svak. Heftsonen er åpen og det har funnet sted en utvasking fra sementpastaen. Kalsium har blitt vasket ut og det har kommet inn magnesium i stedet. I tillegg har magnesium-rike mineraler (brusitt) blitt dannet i kontaktsonen. Magnesium gjør sementpastaen svakere og brusitt kan bidra til nedbrytning, dvs. bidra til ekspansjon som fører til oppsprekking og nedbrytning.

I området ved pel nr. 1380 høyre ble det observert betydelige overflateskader på sprøytebetongen, og det er tydelig at disse skadene har ført til en betydelig nedbrytning i sprøytebetongen. Sprøytebetongen er oppsprukket med sprekker som ligger parallell med overflaten. Det er mest



utbredt at sprekke starter ved overflaten og utvikler seg videre innover i betongen. Sprekkene er med utfelling som hovedsakelig er gips, men også kalsiumkarbonat og trolig thaumasitt. Hoved nedbrytningen er forårsaket av gips som fører til ekspansjoner i betongen og fører til avskalling. I tillegg har det blitt tatt opp magnesium i sprøytebetongen og det har blitt utvasket kalsium, noe som fører til redusert styrke i sprøytebetongen. Dannelse av thaumasitt er i en tidlig fase og har trolig ikke ført til noen skade. Dette er nedbrytning, kjent som sulfat angrep, der svovel og magnesium, med opprinnelse fra sjøvann er medvirkende faktorer. Dette er tidligere påvist i denne tunnelen<sup>8</sup>, som er en undersjøisk tunnel, og sjøvann kommer inn i betongen via sprekker.

I området ved pel nr. 1380 høyre var stålfiber mye korrodert og virker trolig ikke lenger etter sin hensikt, heller motsatt, da fører disse fibrene til ekspansjon og sprekke dannelse i sprøytebetongen. I området ved pel nr. 1380 høyre var heften mellom bergoverflaten og sprøytebetongen åpen og svak.

## 5 Referanser

- <sup>1</sup> Statens vegvesen HB R211 - 15.516 Utboring av betongkjerner.
- <sup>2</sup> Statens vegvesen HB 014: 14.631 Trykkfasthet, terning og sylinder.
- <sup>3</sup> NS-EN 14488-7 Prøving av sprøytebetong Del7: Fiberinnhold i fiberarmert betong.
- <sup>4</sup> Statens vegvesen HB 014: 4.632 Densitet.
- <sup>5</sup> Statens vegvesen HB014 - 14.637 Kapillær sugeshastighet og porøsitet, full PF metode.
- <sup>6</sup> Statens vegvesen Håndbok 015: 15.554 Karbonatiseringsdybder i betong.
- <sup>7</sup> Statens vegvesen HB014: 14.643 Kloridinnhold i betongpulver ved potensiometrisk titrering.
- <sup>8</sup> Hagelia, P., 2011: Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels. PhD thesis, TU-Delft, 205 sider + appendix.
- <sup>9</sup> Statens vegvesen, 1997: Riktig bruk av sprøytebetong, rapport B Undersjøiske tunneler.



Statens vegvesen  
Vegdirektoratet  
Publikasjonsekspedisjonen  
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO  
Tlf: (+47 915) 02030  
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

**Trygt fram sammen**