

# **PERMANENT VANNTETT TUNNELKLEDNING BASERT PÅ SPRØYTEBETONG OG SPRØYTBAR MEMBRAN**

## **PERMANENT TUNNEL LINING BASED ON SPRAYED CONCRETE AND SPRAYED MEMBRANE**

*Karl Gunnar Holter*

*Institutt for Geovitenskap og Petroleum, Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet NTNU, Trondheim*

Bergsikringskonstruksjoner basert på sprøytebetong kan gjøres permanent vanntette ved å sprøyte en polymerbasert membran på sprøytebetongoverflaten og deretter påføre et deksjikt av sprøytebetong utenpå membranen. Derved fremstilles en flerlags sandwichkonstruksjon der membranen befinner seg mellom to betonglag. Denne tunnelkledningstypen har vært gjenstand for forskningsprosjekt over 4 år ved NTNU

Hovedfunksjonen til en sprøytebar membran er å tette mot vannlekkasjer gjennom riss i betongen. Membranen må ha tilstrekkelig elastisitet til å ta opp deformasjoner som åpning/lukking av riss samt eventuelle skjærtøyninger mellom betonglagene på hver side av membranen. En slik mekanisk kontinuerlig kledningskonstruksjon medfører imidlertid spesielle systemegenskaper til tunnelkledningen som er fundamentalt forskjellige fra tradisjonelle tunnelkledningstyper som f.eks. plaststøpt hvelv med foliemembran, eller det tradisjonelle skandinaviske vann og frostsikringshvelvet. Siden membranen har heft til både underlagsbetongen og deksjiktbetongen er denne konstruksjonen udrenert, dersom ikke spesielle drenstiltak inkluderes. Den mekaniske kontinuiteten mellom membran og betong har konsekvenser for fuktopptak og dampdiffusjon, hvilket gir hele kledningskonstruksjonen spesielle og fordelaktige egenskaper med tanke på fuktinnhold, mulig poretrykk i betong samt in-situ frostbestandighet.

In-situ målinger av sprekkevannstrykk i bergmassen umiddelbart på innsiden av kledningen viser en klar trend med en høyere vanntrykksgradient med fallende vanntrykk inn mot grenseflaten mellom berg og sprøytebetong, enn effekten av bergets naturlige drenering, (hydraulisk konduktivitet av uforstyrret bergmasse) skulle tilsi. Undersøkelsene indikerer en betydelig høyre hydraulisk transmissivitet av bergsprekker de første ca 50 cm av den umiddelbare bergmassen.

In-situ tilstandsundersøkelser av slike tunnelkledninger med alder opp til ca 5 år, viser en trend med en gradient i fuktinnhold i sprøytebetongmaterialet fra ca 100% metning ved bergoverflaten og en reduksjon mot tunneloverflaten. Ved membranens posisjon i kledningen er fuktinnholdet funnet å være tilsvarende en relativ luftfuktighet i variasjonsområdet 85-95% avhengig av sprøytebetongens tykkelse. Dette forklarer de konsekvent høye strekkfasthetene som er målt in-situ mellom sprøytebetong og membran. Ved en slik permanent fukttilstand vil betongmaterialet være frostbestandig selv ved svært lave temperaturer. Membranens elastisitet er temperatursensitiv. Ved temperaturer

lavere enn ca -3 °C i membranmaterialet er det sannsynligvis ikke tilstrekkelig elastisitet i membranen for permanent vanntetting.

De foreløpige resultatene av undersøkelsene av denne tunnelkledningstypen i Norge er såpass lovende at Bane NOR har anbefalt denne teknologien til permanent tunnelkledning under forhold der den er egnet.

## SUMMARY

Sprayed concrete linings (SCL) waterproofed with spray-applied membrane consist of a continuously bonded structure from the rock mass to the lining surface. This tunnel lining method has been subject to a PhD project at NTNU i collaboration with the Norwegian National Rail Administration, the Norwegian Public Roads Administration and two companies from the supplier industry. The main purpose of this research program has been to study the suitability of the waterproof SCL method for modern rail and road tunnels as an alternative to the currently used drainage shield lining systems, as well as the traditional cast-in-place concrete lining systems waterproofed with sheet membranes. Such an undrained lining structure represents a completely different lining system behavior compared to the traditional lining system which are mechanically discontinuous.

The results of the water pressure monitoring in the rock mass behind the undrained lining with a drained invert, show a certain reduction in groundwater pressure compared to the hydrostatic pressure. This effect has been found to depend on the hydraulic conductivity of the rock mass. In rock masses with relatively low hydraulic conductivities significant ground water pressures were measured at 1-3 m distance from the tunnel contour. In the rock mass in the immediate vicinity of the lining, the first 20-30cm, the excavation damaged zone exhibits a much higher hydraulic conductivity than the undisturbed rock mass, which is the likely explanation of the significantly measured low pressures just behind the lining.

Investigations of the moisture properties and the in-situ moisture condition of the sprayed concrete and membrane materials show that there is a moisture transport from the rockmass through the lining to the lining surface, even though the lining is waterproof to the flow of liquid water. The moisture transport takes place as capillary migration in the sprayed concrete material near the rock mass, and as vapor transport through the membrane and the outer part of the concrete lining. The measured moisture condition in the lining, measured at intervals and at ages up to approximately 5 years, can be explained by this moisture transport. The concrete material has been found to have a degree of saturation of approximately 90-95%, corresponding to a relative air humidity in the concrete in the 85-95%, in contact with the membrane. Under such conditions the membrane will exhibit only a fraction of its maximum water uptake and appear dry in-situ in the lining structure. This explains the consistently high measured tensile bond strengths.

The critical performance parameter for the membrane material has been found to be the crack bridging capacity with thermally induced closure and opening of cracks up to approximately 1 mm crack width over the year. The watertightness of the lining depends

on the membrane remaining intact at water exposure with opening and closure of cracks. Crack bridging tests show that this performance is temperature sensitive with decreasing crack bridging at decreasing temperatures. Sufficient crack bridging property for the tested membranes with 4 mm thickness at -3 °C with realistic moisture content could be determined.

The research findings and experiences so far with this technical solution are promising and suggest that under certain conditions it is a suitable method for permanent waterproof tunnel linings.

## TEKNISK BAKGRUNN

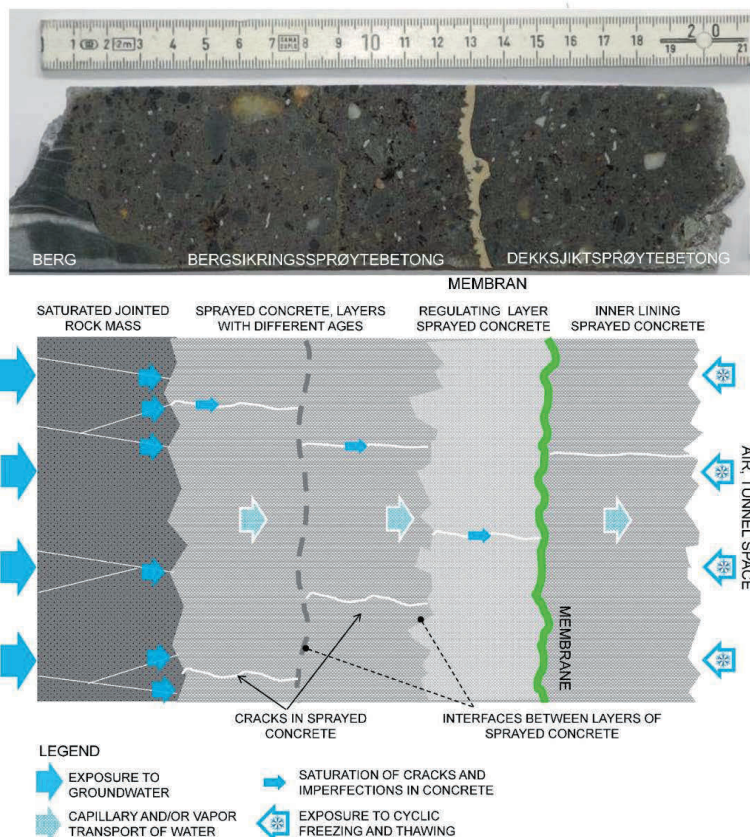
Utgangspunktet for å vurdere tunnelkledning med sprøytebetong og sprøytbar membran er at de eksisterende tekniske løsningene med ulike typer av drenasjehvelv ansees å ha en begrenset levetid, samt flere ulemper som eksempel vis brannfare (ved bruk av PE skum) og inspeksjons-behov bak hvelvet (Statens Vegvesen, 2012), sammenstilling i Holter et al 2013. Den viktigste grunnen for å vurdere denne tunnelkledningsmetoden i typiske Skandinaviske bergforhold med harde krystalline bergarter er at man utnytter berget som konstruksjonselement, og at et konstruksjonsmessig bærende betonghvelv er overflødig. Dette vil i de aller fleste tilfellene muliggjøre en tunnekledningskonstruksjon med betydelig lavere totaltykkelse enn ved bruk av plaststøpt betonghvelv vanntett med PVC membran. For tradisjonelle plaststøpte hvelv vil den totale tykkelsen av sprøytebetongen bli vesentlig høyere enn det som er nødvendig for bergsikring, pga behovet for å jevne ut den sprengte bergoverflaten for montering av foliemembranen.

### Alternativ tunnelkledning med sprøytebetong og sprøytbar membran

Tunnelkledning med sprøytbar membran i kombinasjon med fiberarmert sprøytebetong består av en flerlags konstruksjon der betong og membran utgjør en kontinuerlig konstruksjon uten mekanisk delende eller hydraulisk drenerende lag.



Figur 1. Ferdig bygd tunnelkledning med sprøytebetong og sprøytbar membran. Til venstre: Gevingåstunnelen, 1850 m tunnel av totalt 4200 m (2009). Til høyre: Holmestrandtunnelen, Snekestadsonen, 90 m tunnel av totalt ca 12 km (2015).



Figur 2. Tunnelkledning med sprøytebetong og sprøybar vanntetningsmembran. Foto: Borkjerne av fra Gevingåstunnelen. Grafikk: konseptskisse med systemoppbygning av kledning, grtensebetninger og fukttransportprosesser.

Figur 1 og 2 illustrerer tunnelkledning med sprøytebetong og sprøybar vanntetningsmembran.

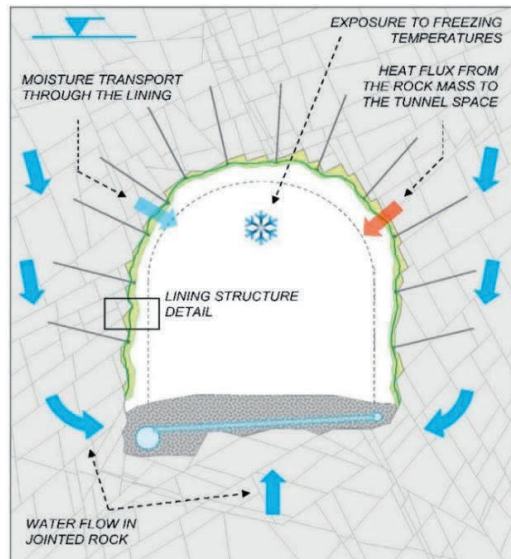
## UTFØRTE UNDERSØKELSER

Dette forskningsprosjektet har vært lagt opp som en konseptstudie, der hele tunnelkledningen betraktes som et sammensatt system av de viktigste konstruksjonsmessige og funksjonelle elementene. Dette er presentert som hovedkonseptmodell der disse elementene er vist i sammenheng, illustrert i Figur 3. Felt- og laboratorieundersøkelsene er utført under typiske skandinaviske bergforhold og

høykvalitets fiberarmert sprøytbetong, utført med våtsprøytemetoden. En sammenstilling av bergforholdene fra forsøksfeltene er vist i tabell 1.

Tabell 1. Ingeniørgeologiske, hydrogeologiske og bergmekaniske forhold for de 4 forsøks-feltene for tunnelkledning med sprøytbar membran og sprøytebetong.

| Parameter  | Karmsund                              | Forsmark                                       | Ulvin                                 | Gevingås           |
|--|---------------------------------------|--|---------------------------------------|--------------------|
| Fjelloverdekning [m]   | 130                                   | 100  | 55                                    | 40-50              |
| Beliggenhet under grunnvannsstand [m]  | 75                                    | 122  | 0                                     | 30-40              |
| Største hovedspenning, verdi, fallvinkel [MPa], [°]  | 8.1 (8)                               | 7.6 (0)  | 7.1 (4)                               | Ikke målt          |
| Bergartstype   | Massiv granittisk gneis               | Middels til finkornet granitt til granodioritt | Båndet amfibolittisk gneis            | Mørk glimmerskifer |
| En-aksiell trykkfasthet av intakt berg [MPa]   | 137-238                               | 139 - 280                                      | 148 – 285                             | Ikke målt          |
| E-modul av intakt berg [GPa]   | 64 – 73                               | 66 – 105                                       | 43 - 49                               | Ikke målt          |
| Antall sprekkesett / typiske sprekkeavstander [m]  | 2 + tilfeldig 0.7 – 1                 | 2 + tilfeldig 0.1 – 0.5                        | 3 0.2 - 0.5                           | 2 -3 0.2 – 0.8     |
| Antall sprekker per m borkjerne  | 1 – 3                                 | 6-9  | 1 - 7                                 | Ikke målt          |
| Bergmassekvalitet Q, variasjonsområde og typisk verdi  | 6 – 66 (23)                           | 5 – 25 (11)                                    | 5 – 12 (8)                            | 3 -17 (5)          |
| Estimert gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet av bergmassen [m/s]                            | 10 <sup>-8</sup> til 10 <sup>-9</sup> | 10 <sup>-8</sup> til 10 <sup>-9</sup>          | 10 <sup>-7</sup> til 10 <sup>-8</sup> | 10 <sup>-7</sup>   |
| Kalkulert hydraulisk transmissivitet av sprekker [m <sup>2</sup> /s] basert på vanntrykkstesting | 10 <sup>-8</sup> til 10 <sup>-9</sup> |  |                                       |                    |



Figur 3. Konseptmodell for tunnelkledning med sprøytebetong og sprøybar membran . Detalj er vist i figur 2.

Feltundersøkelsene omfatter:

- Målinger av in-situ sprekkevannstrykk i bergmassen umiddelbart på innsiden av tunnelkledningen
- Målinger av hydrauliske transmissiviteter i bergmassen
- Tilstandsundersøkelser av in-situ fuktinnhold i sprøytebetong og membran
- In-situ strekkfastheter of membran-betong konstruksjonen
- Sprekkekartlegging av sprøytebetongen
- Monitorering av lufttemperaturer og relative luftfuktigheter i tunnellufta samt temperaturer på ulike dyp i berg og kledning

Laboratorieundersøkelsene omfatter:

Mekaniske egenskaper av membranen som skjærfasthet, skjærdeformabilitet og elastisitet

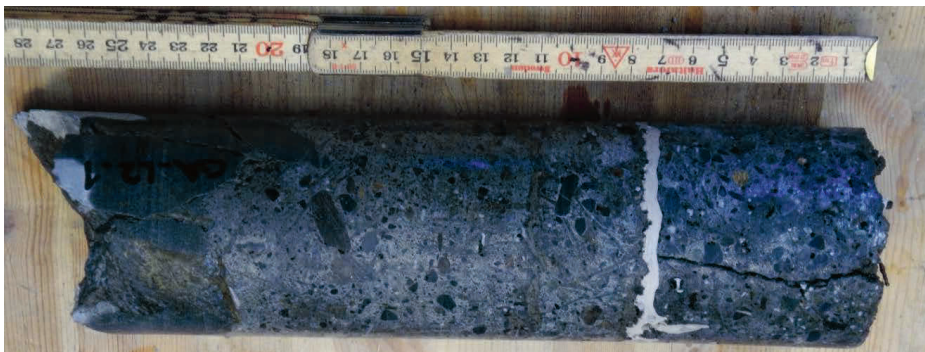
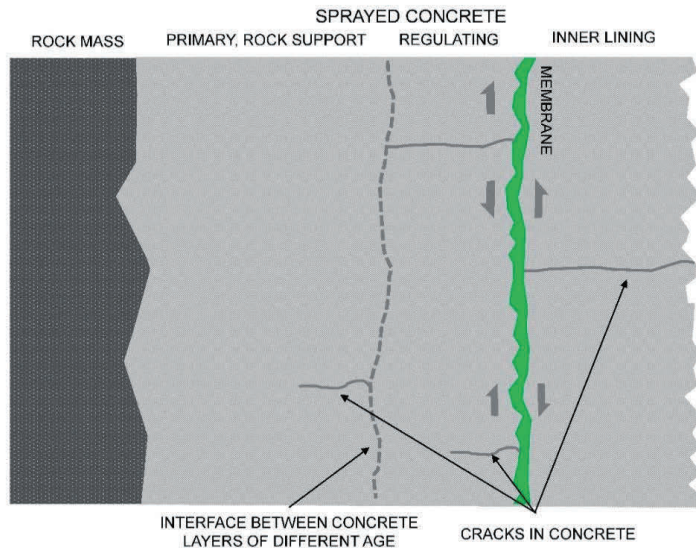
Fukttransportparametere av betong membran som damp-permeabilitet og hydraulisk konduktivitet, og kapillærabsorpsjons egenskaper

Hygroskopisitet av betong og membran (desorpsjons-isotermer)

Frostbestandighet av betong og membran målt med realistisk fuktinnhold

Ut i fra feltundersøkelsene er det etablert en last- og fukttilstandsmodell for tunnelkledningen. Den viktigste belastningen membranen får er tøyning over riss. Dette er illustrert i figur 4.

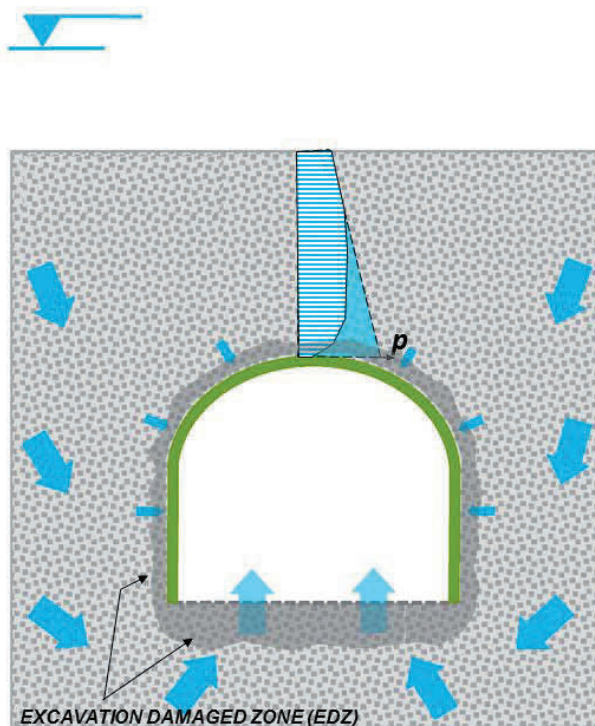




Figur 4. Øverst: Konseptmodell for deformasjoner på membranen i form av tøyning over riss i sprøytebetongen og skjærdeformasjoner mellom betonglagene på hver side av membranen. Nederst: Gjennomsettende riss i deksksjiktssprøytebetongen. Bergflaten sees til venstre.

## Feltarbeid –hydrogeologiske undersøkelser i bergmassen

Fire av forsøksfeltene kunne tilrettelegges for hydrogeologiske undersøkelser. Hovedhensikten med disse undersøkelsene var å verifisere modellen for drenering av bergmassen gjennom en såle uten vanntetting. Hovedkonklusjonen av denne studien er illustrert i figur 5. Det er påvist en betydelig vanntryksreduksjon i bergmassen ved avtagende avstand inn mot tunnelkledningen. Forklaringen til dette er funnet å være økt hydraulisk transmissivitet av riss og sprekker i sprengningsskadesonen. Dette er også et resultat fra en studie ved SKB i Åspølaboratoriet (Ericsson et al. 2015).



Figur 5. Effekt på sprekkevannstrykk av økt hydraulisk transmissivitet i sprengningsskadesonen (Excavation Damaged Zone, EDZ) med udrenert vanntett kledning i vegger og heng, og drenert såle uten vanntetting

## Feltundersøkelser av tunnelkledningenes fuktilstand

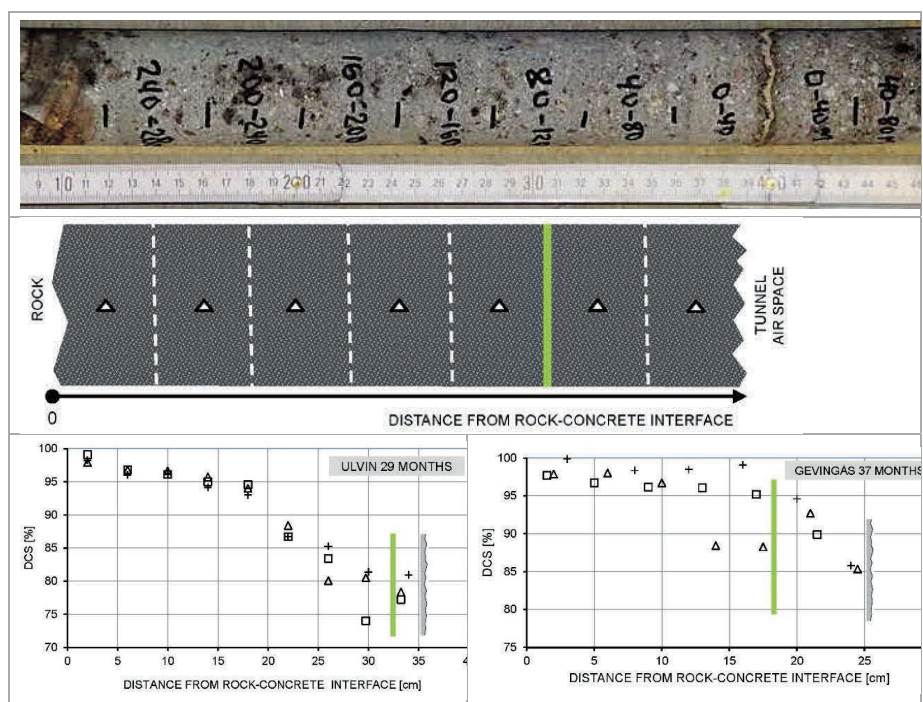
Feltundersøkelsene av tunnelkledningenes fuktilstand omfattet prøvetaking ved kjerneboring av hele kledningskonstruksjonen og undersøkelse av betongmaterialet og membranmaterialet for fukttinnhold. Dette ble gjort ihht til PF metoden, som er



finsk/norsk utviklet metode for pore og fuktinnholdsundersøkelser av betong. Fremngangsmåten er detaljert beskrevet i Holter & Geving (2015). Resultatet av disse undersøkelsene er fuktinnholdsprofiler over kledningens tykkelse. Vanninnholdet i betong er representert som kapillær vannmetningsgrad (Degree of Capillary Saturation DCS), der  $DCS = 100$ , representerer en fullt mettet betong ved neddykking. Ulvinkledningen er bygd med presis oppfølging av utførelsesdetaljene i sprøytebetongarbeidene. Gevingåskledningen representerer en normal kommersiell utførelse. I begge tilfellene observeres følgende viktige trekk:

- Inntil bergoverflaten er sprøytebetongen tilnærmet fullstendig kapillært mettet
- Lavere vannmetningsgrad med økende avstand fra bergoverflaten
- Ingen skarp reduksjon i vannmetningsgrad over membranen

Dette resultatet er typisk for de undersøkte kledningene, og er illustrert i figur 6.

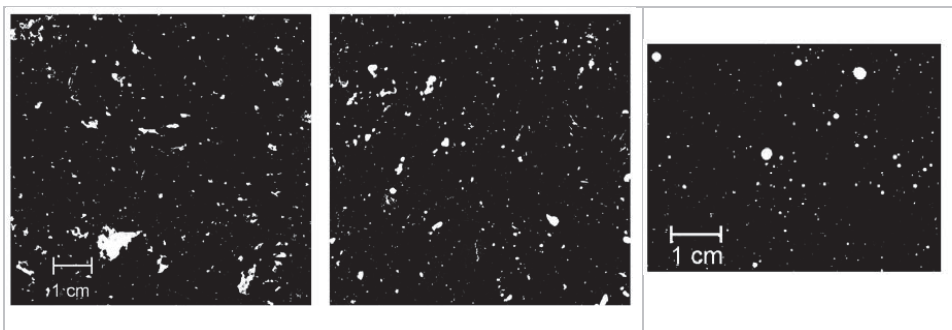


Figur 6. Fuktundersøkelser i sprøytebetong i tunnelkledning tett med sprøybar membran. Øverst: kjerne som er merket for splitting og deretter veiing av hver enkelt bit. Senter: tegning som viser splitting av kjerne og tilordning av målte verdier for fuktinnhold og porositet i senter av biten. Nederst: fuktinnhold i kledningen i Ulvintunnelen ved 29 måneders alder (venstre) og Gevingås ved 29 måneders (høyre).

I tillegg til betongmaterialet ble membranmaterialet også undersøkt for in-situ fukttilstand. Dette ble gjort ved å pirke ut membranbiter fra borkjernene umiddelbart etter uttak, forsegling, og deretter veiing og tørking. Derved fremkommer in-situ fuktinnhold. Dette ble sammenliknet med det maksimale fuktopptaket membranmaterialet viser ved neddykking. Denne undersøkelsen viser at man får et in-situ fuktinnhold på mellom 12 og 17 % av materialets tørrvekt overtid, med tendensiell svakt synkende trend. Membran M1 har et maksimalt vannopptak tilsvarende ca 40% av materialets tørrvekt. Dvs in-situ i tunnelkledningene har membranen en metningsgrad på ca 30%. Dette er en svært viktig observasjon for å vurdere realistisk fuktkondisjonering av membranmaterialer for laboratorietesting.

### Laboratorieundersøkelser av sprøytebetongmateriale

Sprøytebetongen har en helt vesentlig betydning for membranens eksponering til mekaniske laster og vann. Det er derfor nødvendig å se membranens ytelse og egenskaper i sammenheng med sprøytebetongmaterialet som er benyttet. Sprøytebetong er et svært spesielt materiale sett fra et betongteknologisk perspektiv. Dette er illustrert i Figur 7 og tabell 2, der de to bildene til venstre viser luftporestrukturen (hvitt = porer) i sprøytebetong tatt fra Harangstunnelen testfelt, mens bildet til venstre viser en støpt vibrert mørtel med luftinnførende tilsetningsstoff som gir perfekt sfæriske luftporer. Det eksisterer relativt lite data på porøsitet, fuktopptak og frostbestandighet av moderne sprøytebetong. Resultatene fra porøsitetmålinger i denne studien er vist i tabell 2.



Figur 7. Venstre og senter: Typisk luftporestruktur observert i sprøytebetong (prøvestykke fra forsøksfelt E39 Harangstunnelen) som viser tydelige irregulære porer. Høyre: støpt vibrert mørtel med luftinnførende tilsetningsstoff for å produsere perfekte sfæriske luftporer. (høyre bilde: Fonseca & Scherer, 2014)

Hovedhensikten med å fremskaffe detaljerte data for sprøytebetong var både å definere rammebetingelsene for membranen som betongen representerer for fukttransport og fukttilstand og å vurdere frostbestandigheten av sprøytebetongmaterialet i en tunnelkledningskonstruksjon. Betongens fuktegenskaper, spesielt hydraulisk konduktivitet, vanddamppermeabilitet, kapillærabsorpsjon og evne til å holde på vann

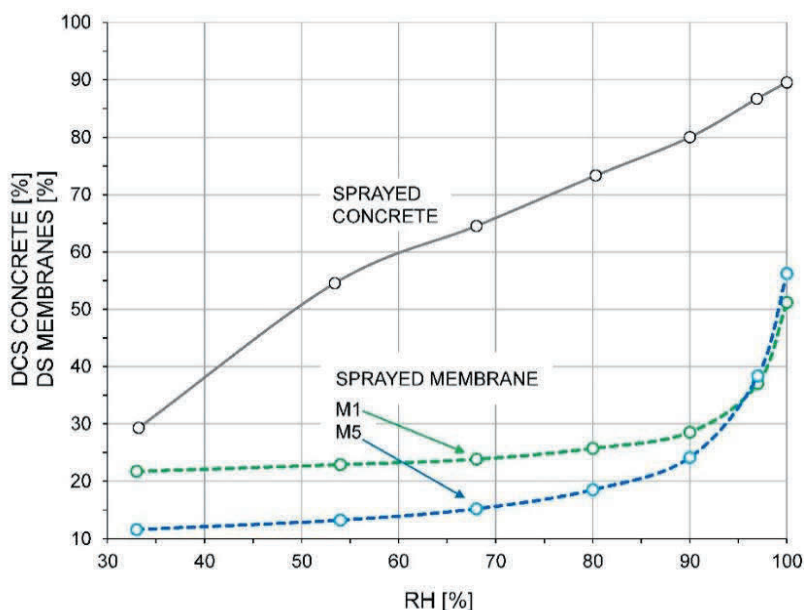
med en viss luftfuktighet (hygroskopisitet) er svært viktige materialparametre, spesielt i samvirke med et polymermaterial. Undersøkelsene viser at hydraulisk konduktivitet for intakt sprøytebetongmateriale er svært lav ( $k < 10^{-14}$  m/s), hvilket vil si vanntett fra et praktisk perspektiv.

Tabell 2. Data for betongsammensetning og målte porøsiteter med PF-metoden for 4 undersøkte tunnelkledninger i dette prosjektet.

| Forsøksfelt                                  | Betongreseptdata  |  | Målte porøsiteter for sprøytebetong <sup>1</sup> |         |   |         | PF verdi |         | Betongens alder ved testing [døgn] | Antall prøvestykker |
|--|---|--|--|---------|---|---------|----------|---------|------------------------------------|---------------------|
|  | Bindelmiddel <sup>2</sup> innhold [kg/m <sup>3</sup> ]<br>Fiberdosering [kg/m <sup>3</sup> , volum %] | Vann/ bindemiddel forhold <sup>3</sup> | Sugporøsitet, $p_{suc}$ [%] <sup>4</sup>         |         | Makro(luft) porøsitet, $p_{air}$ [%] <sup>5</sup> |         | Median   | COV [%] |                                    |                     |
|  |   |  | Median   | COV [%] | Median  | COV [%] |          |         |                                    |                     |
| Ulvin tverrslagsør (U) <sup>6</sup>          | CEM II A-V 42.5: 391<br>CEM I 42.5 : 92<br>Mikrosilika: 26<br>Stålfiber: 35, 0.5                      | 0.45                                   | 19.1<br>(18.7)                                   | 7       | 4.2   | 25      | 0.18     | 24      | 180 - 850                          | 78                  |
| Gevingsås – tunnelen (G) <sup>6</sup>        | CEM II A-V 42.5: 513<br>Micro silica fume: 21<br>PP-fiber <sup>8</sup> : 7, 0.8                       | 0.44                                   | 20.8<br>(19.3)                                   | 12      | 4.6   | 19      | 0.18     | 18      | 360 - 1100                         | 80                  |
| E39 Harangs-tunnelen (H) <sup>7</sup>        | CEM II A-V 42.5 : 502<br>Mikrosilika: 25<br>PP-fiber: 9, 1.0  | 0.46                                   | 21.1<br>(20.2)                                   | 4       | 4.5   | 10      | 0.17     | 9       | 150                                | 27                  |
| Frost-laboratoriet kledning (F) <sup>7</sup> | CEM II A-V 42.5: 489<br>Mikrosilika: 26<br>PP-fiber: 7, 0.8   | 0.47                                   | 20.9<br>(20.5)                                   | 8       | 4.9   | 13      | 0.18     | 14      | 150 - 540                          | 49                  |

<sup>1</sup> Kalkulerte sugporøsiteter ihht klassisk betongteori er vist i parentes  
<sup>2</sup> Sementmaterialer: CEM II A-V 42.5: Norcem Standard FA (flygeaskesement), CEM I 42.5: Norcem Industrisement  
<sup>3</sup> Inkluderer vann tilsatt gjennom sprøytebetongakselleratoren. Inkluderer ekvivalent bindemiddelinnhold: sement + 2-mikrosilika  
<sup>4</sup> Porer som vannmettes ved neddykking ved atmosfærisk trykk i 7 døgn  
<sup>5</sup> Porer som vannmettes i tillegg ved trykkmetning ved 50 bar i 3 døgn  
<sup>6</sup> Nominell blandelogg fra blandeverket (bør-verdier)  
<sup>7</sup> Sanne verdier for betongsammensetning målt på fersk betong ved blandeverket  
<sup>8</sup> PP: Makro polypropylen fiber

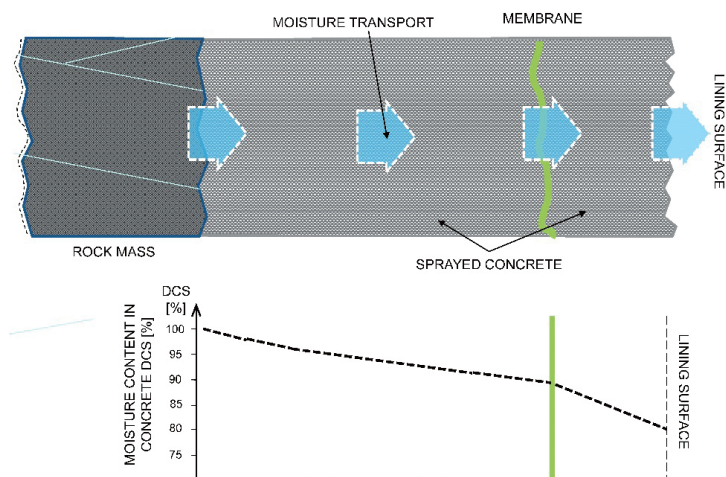
Undersøkelsene av frostbestandighet av sprøytebetong i tunnelkledninger, viste at det er svært usannsynlig at sprøytbetongmaterialet vil få frostska-der i en tunnelkledning. Det er utført en egen omfattende studie av dette. Det henvises til Holter, Smepllass og Jacobsen (2015) for utfyllende detaljer.



Figur 8. Hygroskopisitet representert ved desorpsjonsisotermer ved 25 °C for sprøytebetong og membranmaterialene M1 og M5, som illustrerer hvor mye vann materialene kan holde på (oppgitt som kapillær metningsgrad DCS for betong og metningsgrad for membraner DS) ved en bestemt relativt luftfuktighet (RH)

Vanninnhold ved ulike luftfuktigheter illustrerer materialets hygroskopisitet. Sprøytebetong er funnet å være et mye mer hygroskopisk materiale enn membranene, hvilket er illustrert ved desorpsjonskurver (Figur 8). Dvs at sprøytebetong kan holde på mye mer vann enn membranen, relativt til det maksimale vannopptaket til materialet. Den praktiske betydningen av dette er at membranen vil opptre in-situ med mye lavere vannmetningsgrad i likevekt med en betong som er relativt våt.

En svært viktig observasjon for denne kategorien membraner er de målte vanddamppermeabilitetene (dampdiffusjonskoeffisientene) sammenliknet med tilsvarende for sprøytebetong. Den viktige observasjonen er at membranenes damppermeabilitet ligger innenfor variasjonsområdet for damppermeabilitetene til sprøytebetong. Membranene representerer med andre ord ingen barriere for vanddampdiffusjon gjennom tunnelkledningen. Dette er illustrert i figur 9.







Figur 9. Tolket betydning av dampdiffusjonsåpen membran for å unngå mulig langtidseffekter med øket vannmetning av betongen på bergsiden av membranen, samt unngå høyere vanninnhold i membranmaterialet. Membran og betong har en dampdiffusjonskoeffisient i samme størrelsesorden som resulterer i en langtidssituasjon med relative lave in-situ vannmetningsgrader av betong og membranmaterial.

### Laboratorieundersøkelser av mekaniske egenskaper av membraner

Det ble tatt utgangspunkt i anbefalingene i rapporten ITAtech Design Guidance for spray applied waterproofing membranes (ITA/AITES 2013). I dette prosjektet er det foretatt en evaluering av laboratorieundersøkelsesmetodene ut i fra lastmodellen. Lastmodellen som er fremkommet ved feltundersøkelsene har bl.a. vært benyttet til å etbalere akseptkriterier for de ulike materialparametrene. Det er spesielt realistisk fukt kondisjonering av prøvestykkene som er lagt til som en nødvendig undersøkelsesbetingelse. De viktigste resultatene for laboratoriestesting av membranmaterialer er vist i Tabell 3. For ytterligere detaljer, henvises det til åpen tilgjengelig journalartikkel Holter (2015) i Rock Mechanics and Rock Engineering.



Tabell 3. Sammenstilling av viktigste laboratorietestresultater for to tested sprøytbare membranprodukter M1 og M5, begge basert på EVA-kopolymerer, med tilnærmet likt polymerinnhold

| Utført test                                       |   | Prøvestykker, undersøkelsesforhold  | Membranprodukter, viktigste rsultater  |                       |                          |     |     |
|---|---|---|--|-----------------------|--------------------------|-----|-----|
| Strekk test, strekkfasthet av grenseflatene [MPa] |    | Testing av kjerneprøvestykker.<br>Forkondisjonering <ul style="list-style-type: none"> <li>Tørr lagring</li> <li>Fuktig (lagring under vann 14 dager)</li> <li>Frosset/tint 6 ganger</li> </ul>   | Laboratorieresultater: <div> <div>Tørr</div> <div>Fuktig</div> <div>Frosset/tint</div> </div> <div> <div>M1</div> <div>1.1-1.6</div> <div>0.3-1.15</div> <div>0.3-0.85</div> </div>  |                       |                          |     |     |
|   |    | In-situ test metode for kledningskonstruksjon <ul style="list-style-type: none"> <li>In-situ tunnel</li> <li>Kledning i frostlaboratoriet</li> <li>Sprøytete plater</li> <li>Testing etter ulike frosteksponeringer i full skala</li> </ul> | Resultater fra tunnel og frostlaboratorie: <div> <div>M1, in-situ tunnel:</div> <div>M1, etter 35 sykler til -3°C <sup>1</sup></div> <div>M1, ytterligere 20 sykler til -7 °C <sup>2</sup></div> </div> <div> <div>1.1- 1.6</div> <div>1.1-1.2</div> <div>0.4-0.7</div> </div> Klednings-struktur, sprøytete plater <div> <div>Tørr</div> <div>Våt</div> <div>Frosset/tint</div> </div> <div> <div>M1</div> <div>1.25-1.3</div> <div>0.6-1.1</div> <div></div> </div> <div> <div>M5</div> <div>0.58-0.85</div> <div>0.55-0.7</div> <div>0.4-0.6</div> </div> |                       |                          |     |     |
| Skjær testing                                     |    | Direkte skjærtesting av kjerner i skjærboks <ul style="list-style-type: none"> <li>Forkondisjonering av prøvestykker ved neddykking</li> </ul>  | Skjærdeformasjon ved initielt brudd [mm]   | Skjær stivhet [MPa/m] | Max skjær spenning [MPa] |     |     |
| Tøyning over riss                                 |  | Tøyning over riss (w/t –forhold <sup>3</sup> ved ulike temperaturer)  | Testing temperature [°C]   | 23                    | 0                        | -3  | -8  |
|   |   |   | M1   | 1.2                   | 0.8                      | 0.6 | 0.7 |
|   |   |   | M5   | 1.6                   | 1.4                      | 0.4 | 0.7 |

<sup>1</sup> Minimumstemperatur -3°C og maksimumstemperatur 7°C ved membranens posisjon i kledningen under fryse/tine sykler hver med varighet 48 timer

<sup>2</sup> Etter de første 35 fryse/tine syklene til -3°C ble det kjørt 20 ytterligere sykler med frysing til -7°C ved membranens posisjon

<sup>3</sup> w/t-ratio = forhold mellom rissåpning ved brudd w og membranens tykkelse t

### KONKLUSJONER

Resultatene i denne studien støtter seg på undersøkelser utført på fullskala og realistiske tunnelkledningskonstruksjoner med alder opp til ca 5 år. Den viktigste funksjonen til en sprøytbar membran er at den gir en mekanisk kontinuerlig kledningskonstruksjon. Membranens vanntettingsfunksjon er å hindre konduktiv vanntransport på riss og imperfeksjoner i betongen, samt å tillate en viss damptransport gjennom kledningen.

Undersøkelsene av membranens fukttilstand over tid tilsier at membranen beholder et tilnærmet konstant fuktinnhold, konstant strekkfasthet (heft) i størrelsesorden 1.1 – 1.3 MPa.

Tunnelkledningens evne til å transporte en viss mengde vann i form av damp ansees for å være bestemmende for konstruksjonens frostbestandighet. Med de målte in-situ vannmengdene i sprøytebetong og membran er det svært lite sannsynlig at frostskade som skyldes isdannelse vil kunne oppstå.

## **SLUTTBEMERKNINGER**

Selv om godt teknisk resultat og kostnadseffektivitet har vært demonstrert på flere prosjekter med denne tunnelkledningsmetoden, er det fremdeles flere begrensninger som muliggjør en almann bruk av denne metoden. Under egnede grunnforhold og tilrettelagte spesifikasjoner for sprengning, sikring og injeksjon vil denne metoden med dagens teknologi kunne være et realistisk alternativ til andre kledningsmetoder i hardt berg med strenge krav til levetid og funksjonalitet.

## **ANERKJENNELSER**

Dette forskningsprosjektet ville ikke ha kommet igang eller ha kunnet la seg fullføre uten betydelig bistand i flere ulike sammenhenger fra flere organisasjoner og fagkolleger. Undertegnede ønsker å rette en stor takk til BASF Construction Chemicals Europe AG, Jernbaneverket, Statens Vegvesen, Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk, Orica International Ltd, Wacker Chemie AG og SINTEF Byggforsk for denne bistanden.

## **REFERANSER**

- Ericsson LO, Christiansson R, Hansson K, Butron C, Lehtmäki T, Sigurdsson O, Thörn J & Kinnbom K (2015) A demonstration project on controlling and verifying the excavation-damaged zone. Experience from the Æspø Hard Rock Laboratory. Swedish Nuclear Fuel and Waste Company. Report no R-14-30
- Fonseca PC, Scherer GW (2014) An image analysis procedure to quantify the air void system in mortar and concrete. Materials and Structures. DOI 10.1617/s11527-014-0381-9
- Holter KG, Nermoen B, Buvik H, Nilsen B (2013) Future trends for tunnel lining design for modern rail and road tunnels in hard rock and cold climate. Proceedings of the ITA/AITES World Tunnel Congress 2013, Geneva
- Holter KG (2014) Loads on sprayed waterproof tunnel linings in jointed hard rock: A study based on Norwegian cases. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47:1003-1020
- Holter KG & Geving S (2015) Moisture transport through sprayed concrete tunnel linings. Rock Mechanics and Rock Engineering, Online publisert: DOI 10.1007/s00603-015-0730-1

Holter KG, Smeplass S & Jacobsen S (2015) Freeze-thaw resistance of sprayed concrete in tunnel linings. Online publisert: DOI 10.1617/s11527-015-0705-4

Holter KG (2015) Performance of EVA-based sprayed membranes for SCL in hard rock. Online publisert DOI 10.1007/s00603-015-0844-5

ITA/AITES (2013), ITAtech Guideline for spray-applied watrerproofing membranes

Statens Vegvesen Vegdirektoratet (2012) Etatsprogrammet 2008-2010, Moderne Vegtunneler, rapport nr 127