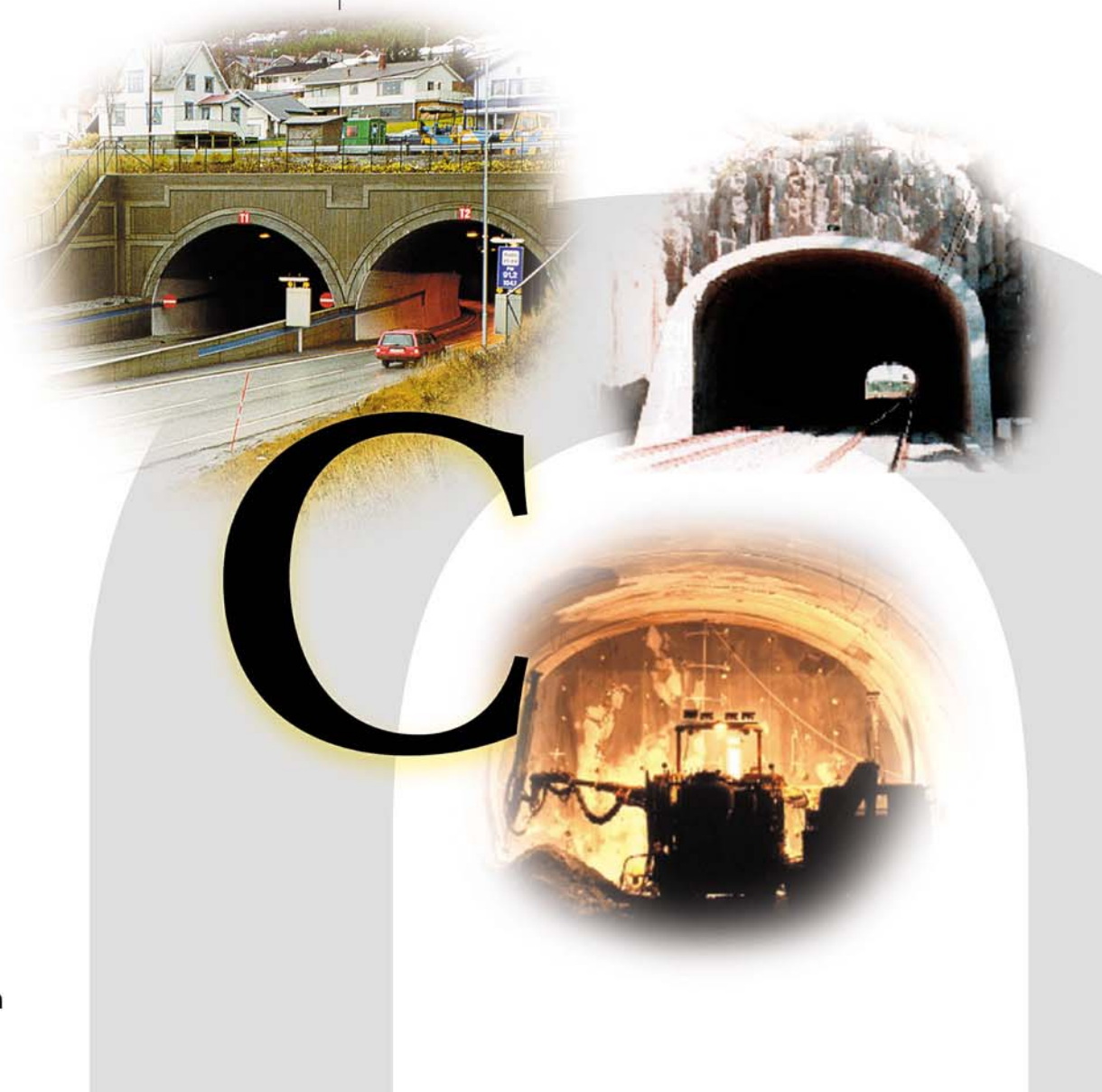


MILJØ- OG SAMFUNNSTJENLIGE TUNNELER

Rapport nr: **28**

Sluttrapport sprekkesmodellen



Intern rapport nr. 2321



Statens vegvesen



SINTEF Bygg og miljø
Berg og geoteknikk

Postadresse: 7465 Trondheim

Besøksadresse: RICH Birkelands vel 3
Telefon: 73 59 46 00
Telefaks: 73 59 71 36

Besøksadresse: Høgskoleringen 7a
Telefon: 73 59 46 00
Telefaks: 73 59 53 40

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

SINTEF RAPPORT

TITTEL

Sluttrapport sprekkemodellen,
Prosjekt C1 Injeksjonssementer.

FORFATTER(E)

Per Nilssen / Anders Beitnes

OPPDRAKSGIVER(E)

Statens Vegvesen, Vegdirektoratet

RAPPORTNR. STF22 F03122	GRADERING Fortrolig	OPPDRAKSGIVERS REF. Alf T. Kveen	
GRADER. DENNE SIDE Åpen	ISBN	PROSJEKTNR. 22B250.01	ANTALL SIDER OG BILAG 10/1
ELEKTRONISK ARKIVKODE Document#	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Anders Beitnes	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.)	
ARKIVKODE 571	DATO 2003-04-05	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Anders Beitnes	

SAMMENDRAG

Rapporten gir et sammendrag av hva som er utført i prosjekt C1 Injeksjonssementer, ved SINTEF avd. Berg og geoteknikk og avd. Sement og betong.

Det blir lagt vekt på å forklare hvilke krav man satte til modellen for utviklingsarbeidet ble satt i gang. Målet var å finne et materiale med egenskaper så likt det man finner i bergsprekker som mulig. Samtidig må materialet kunne bearbeides for å skape kunstige "sprekker". Materialet må i tillegg være av en beskaffenhet som gjør reproduserbarhet med stor nøyaktighet mulig. Det ble også lagt vekt på at modellen skulle la seg injisere ved bruk av konvensjonelt injeksjonsutstyr.

Det er ønskelig å lage modellen så stor at sprekkeflaten blir av samme størrelsesorden som det aktuelle injeksjonsareal i en sprekk omkring ett av borhullene i en praktisk injeksjon, men begrensninger på grunn kapasitet ved produksjonsutstyret gjør at modellens størrelse er 0,7m x 1,0m.

Rapporten forteller hvordan den endelige sprekkemodellen ble utseende, med en kort forklaring på hvordan et forsøk gjennomføres. Det blir også gitt et eget kapittel som beskriver de erfaringer man har høstet underveis i utviklingsarbeidet og under forsøkene som hittil er utført med modellen.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Berg og geoteknikk	Rock and Soil Mechanics
GRUPPE 2	Tunnel	Tunnel
EGENVALGTE	Injisering / tetting i berg	Grout injection

1 Innledning

Bygghefter og samfunnet stiller stadig nye og strengere krav til tetting av berget i tunneler og andre underjords anlegg for å unngå å påvirke grunnvannsbalansen lokalt i området rundt anlegget. I tillegg stilles det sterkere fokus på uheldige sider ved de ulike “kjemiske” injiseringsmidler. Sementsuspensjon er fortsatt akseptert og anerkjent som et velegnet injiseringsmiddel, når det blir lagt stor vekt på arbeidsmiljø og forurensing. Men det er bred aksept for at det er en grense for hvor stor tetthet man kan oppnå ved bruk av sementinjeksjon. I enkelte tilfeller oppnås ikke tilfredsstillende resultater ved bruk av forinjeksjon med sement, og mye mer kostnadskrevenne alternativer må tas i bruk for å gi en tilfredsstillende innlekkasje. Det er derfor et sterkt ønske om å utvikle metoden slik at man kan oppfylle strengere tettingskrav ved bruk av mineralske suspensjoner/ement.

Imidlertid mangler man fremdeles kunnskap om parametre som er signifikante for egenskapene sementsuspensjonen har for å trenge inn i tynne sprekker. Erfaringer fra feltstudier kan selvsagt gi en indikasjon av hva som har god effekt på tetting av berget og hva som ikke har effekt, men forholdene ute i felt forhindrer muligheten for å dokumentere effekten av enkle variable. Dette kan kun oppnås under laboratorieforhold der man har mulighet for å kjøre reproduerbare forsøk holde enkelte parametre konstant og variere andre.



Figur 1. Sprekkemodell i bergmekanisk laboratorium

På grunn av manglende forståelse og dokumentasjon av hvordan de enkelte parametre influerer på resultatet ved injeksjon, baseres utførelsen av injiseringen ofte på antakelser, tro og personlige oppfatninger. For å øke forståelsen og dermed optimalisere prosedyrene ved berginjeksjon har SINTEF Bygg og miljø, avdeling Berg og geoteknikk, utviklet en fysisk sprekkemodell i sine laboratorier, se fig. 1. Utviklingen av modellen er et delprosjekt under hovedprosjektet “Miljø- og samfunnstjenlige tunneler”, med Statens Vegvesen, Vegdirektoratet som oppdragsgiver.

2 Målet for studien

Det er i første rekke to målsettinger man har sett for seg ved utvikling av sprekkemodellen, der det er mulig å overvåke injeksjonssuspensjonens penetrasjon i tynne kanaler eller sprekker:

- Observere hvordan faktorer som sementtype, kornstørrelse og –fordeling, w/c-forhold, bearbeidelsesgrad av suspensjonen, tilsetningsstoffer og temperatur separat eller sammen virker inn på inntrengningsevne og styrke. Resultatene skal gjøre det mulig å forbedre materialene og bearbeidelsesprosedyrene av sementsuspensjonen.
- Ved å utføre parallelle forsøk og sammenligning av resultater vil man kunne utvikle optimale metoder for testing av injeksjonsmasse i felt. Gjennom dette er det et mål å finne en eller noen få parametre som representerer inntrengningsevnen, og å gjøre det mulig å benytte disse for spesifisering av utførelsen av injiseringsarbeidet.

3 Krav til modellen

Før byggingen av sprekkemodellen startet ble det fastlagt en del krav til utførelse og funksjonalitet. Kravene er blitt noe tillempet og modifisert etter hvert som modellen er blitt utviklet, og man har fått erfaringer etter gjennomførte forsøk.

Innspenning: Den sprekke eller spalte som skal illustrere en bergsprekk må ligge inne i en stiv, innspent kropp. Dvs. det må stå en normal trykkraft noenlunde jevnt fordelt over sprekkeflaten, tilsvarende en reell bergspenning. Denne må kunne varieres, gjerne i form av enten en bestemt stivhet eller en konstant kraft.

Sprekkeflatenes materiale: Materialet bør ha en kjemisk sammensetning og en affinitet til vann (fuktevinkel) som ligger nært opp til de vanligste bergartsmineraler. Det må videre kunne bearbeides og reproduseres med stor nøyaktighet. Gjennomsiktig materiale muliggjør visuell registrering.

Sprekkeflatene: Det er viktig å kunne skape en viss ruhet. For det første bør overflaten ha en viss detaljruhet i skala f.eks. 1 μ m. Dertil bør avstanden mellom veggene (kanalåpningen) variere, slik at det blir et system med trangere og videre åpninger i begge retninger, og med gradvise overganger både i kanalenes bredde og lengderetning. Denne variasjonen må en forsøke seg frem til, men den kan antagelig komme å ligge i området 20 – 200 μ m. Nøyaktighetskravet for reproduksjon av to like flater kan måtte være ned mot 10 μ m. For det tredje må det være tilstrekkelig og godt fordelt areal med direkte anlegg mellom de to veggene for å overføre aktuelle trykkspenninger uten knusing eller varig deformasjon.

Dimensjon: Det er ønskelig med en så stor modell som mulig, helst slik at sprekkeflaten blir av samme størrelsesorden som det aktuelle injeksjonsareal i en sprekke omkring ett av borhullene i praktisk injeksjon. På en annen side må en kunne reprodusere sprekkes vegger i en nøyaktig nok maskineringsbenk, noe som setter klare begrensninger. Dertil er det grenser for hvor store krefter en kan ta opp i en modell, og de største aktuelle injeksjonstrykk som man ønsker å studere, vil gi enorme hydrauliske krefter på en stor sprekkeflate. Som kompromiss, bør en ha en modell med dimensjoner mellom 0,5 og 1,0 m. Den bør videre være symmetrisk omkring en akse eller et plan normalt på sprekkeflaten.

Randbetingelser: Det er stor fordel om modellen kan etterligne en situasjon som starter med vannfylt sprekke under et visst trykk, og at dette mottrykket opprettholdes som en randbetingelse. Det må være lukkede kanaler ved “utløp” langs randen, slik at en kan ha god

kontroll med gjennomstrømmende væske. Det kan være en fordel om man etter injeksjonsforsøk kan måle restlekkasje, f.eks. ved vannstrømning fra en side til den andre i modellen.

Temperatur: Hele modellen bør kunne ha en valgt temperatur som holdes innenfor variasjon på maks. 2 grader opp og ned. Dette bør kunne styres med gjennomstrømmende, temperaturregulert vann i egne kanaler. Det viktigste i dette forsøket er å holde en temperatur som kan etterligne nordiske forhold, f.eks. 8°C, men det kan være interesse for å se på effekten av andre temperaturområder.

Måleinstallasjoner: Nøyaktige, løpende registreringer av trykk og væskestrøm ved inn- og utløp av strømningsveien er selvfølgelig. Dertil bør en kunne måle utviklingen av trykk på flere punkter i sprekkeflaten. Trykkområdet for giverene vil være f.eks. 0 – 50 bar, med høy oppløselighet. Det må settes inn noen kontrollpunkter på sprekkeåpning og den omgivende rammen instrumenteres for tøying og kraft.

4 Utvikling av modellen

Dette prosjektet har krevd store ressurser både som investering i penger og i tidsforbruk. Spesielt forarbeidet før de første forsøkene kunne settes i gang tok lang tid. Planlegging, prøving, feiling og endringer av opprinnelige planer har tatt vesentlig mer tid enn det som var planlagt på forhånd. Dette er kanskje ikke så overraskende da det ikke har vært konstruert lignende modeller før og man derfor ikke har hatt tidligere erfaringer å støtte seg til under utviklingsarbeidet.

Nedenfor blir det gitt et kort resymè av utviklingen av sprekkemodellen:

Arbeidet den første tiden (okt. 2000 – sept 2001) gikk for det meste ut på å planlegge utforming og funksjonkrav for sprekkemodellen. Søk etter egnet utstyr for instrumentering av modellen tok også lang tid. I løpet av november og desember 2001 ble støpingen av den første modellen utført etter en del prøving for å begrense krymping av betongen og tilpassing av utstyret som modellen skal inneholde. Den første glassplata ble frest opp med fire ulike spordybder, disse hadde et gjennomsnittlig dyp på hhv. 0.046, 0.086, 0.133 og 0.191 mm.

Etter at betongen var herdet ble det i januar 2002 registrert av glassplatene er blitt bøyd til konveks form på grunn av krymping i betongen. Bøyningen ble forsøkt kompensert på forskjellige måte:

- det ble lagt porøs trefiberplate bak betongblokkene for å fordele trykkreftene langs ytterkantene og derved tvinge tilbake plan form når glassplatene ble spent sammen,
- det ble lagt plastfolie mellom glassene for å tette i anleggsflatene der det enda var sprik og
- det ble lagt o-ring av gummi i utfrest spor rundt kanten av glassplatene (for så vidt i hht plan, men med ekstra evne til å tilpasse seg lokalt sprik.

Etter en del prøving og feiling ble modellen tilstrekkelig tett til at forsøk kunne kjøres.

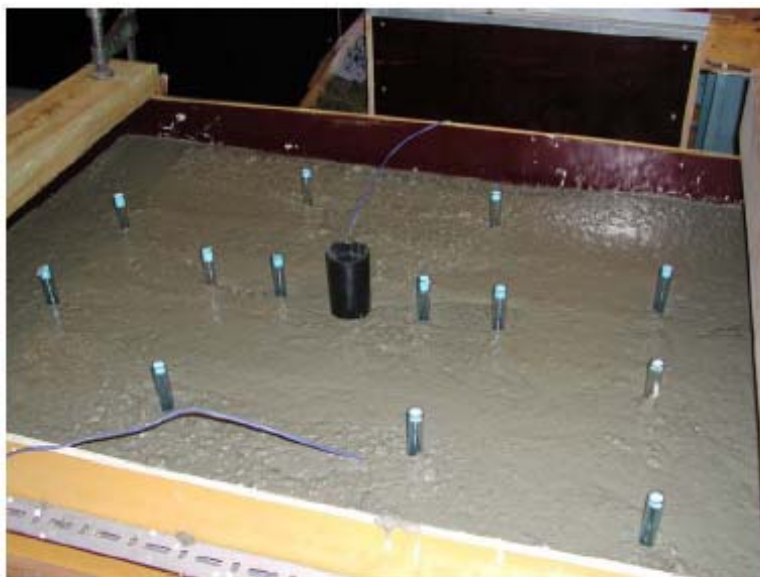
I løpet av februar 2002 var modellen ferdig instrumentert og klar til forsøk, men på grunn av noe venting på lån av kolloidmikser og injiseringspumpe ble første forsøk med sement først utført den 30. april i 2002. Det ble registrert at sprekkeåpningen var for stor og det lot seg ikke gjøre å opparbeide forventet mottrykk ved injisering. Senere, i mai ble plastfolien fjernet og sprekkeåpningen ble dermed redusert betraktelig. Ved

neste forsøk ble effekten av ulike omrøringshastigheter av massen før injisering testet, og det ble gjennomført to forsøk med Ultrafin 12 -sement og Injektering 30 og omrøringssturtall på hhv. 1450 og 2500 RPM. Det oppnådd begrenset mottrykk også ved dette forsøket, og en kunne konstatere at det ikke simulerte en fin nok sprekk til å studere grensen for inntrengning. Imidlertid kunne en se en klar effekt av omrøringshastigheten, noe som ikke har vært så tydelig demonstrert tidligere. Dermed kunne en konstatere at modellen er relevant for å studere enkelte parametres effekt på inntrengning.

I løpet av disse forsøkene så en at det oppsto brudd i glassplatene. Så lenge disse bruddene ikke medførte skjærbevegeleser, fikk det ikke noen stor praktisk betydning, men det ville bli en økende risiko for funksjonssvikt. Resultatene fra de siste to forsøkene er beskrevet i rapport nr. STF22 F02138. Det ble også utarbeidet en rapport som beskriver prosedyre ved gjennomføringen av forsøk med sprekkemodellen, se rapport nr. STF22 F02147.

Det ble besluttet å få laget nye glassplater med mindre åpning av sprekken og bedre kontroll med formendring under herding. I august 2002 ble de nye glassplatene levert til et lokalt firma som skulle utføre fresing av sprekkekanaler med grunnere sprekkedyp enn de første. En av glassplatene ble imidlertid knust ved fresing, og det måtte skaffes ny. Etter at fresinga var ferdig ble sprekkedybden kontrollert og funnet for dyp. Atter en gang ble nye glass bestilt og ny fresing utført, denne gangen med tilfredsstillende resultat. Utover høsten ble glassplatene sendt frem og tilbake mellom bedrifter som skulle utføre fresing, boring av hull for innfesting av glass mot betong, kutting av glassplater med vannjet, montering av muttere for instrumentering osv.

Ny innstøping av glass ble utført i løpet av januar 2003, se fig. 2. Det ble i den forbindelse gjort en del forandringer både på selve utformingen av betongklossen, og på riggen som klossene står fastspent i under forsøkene. Etter herding av betongen ble det satt i gang instrumentering av de nye glassplatene. Det meste av instrumenteringen ble demontert på den første modellen og overført på den nye, men det ble i tillegg montert ytterligere to trykksensorer, og flowmetere på utløpene fra modellen. I løpet av mars 2003 er modellen på ny klar for å utføre nye forsøk.



Figur 2. Første støpeskikt utføres liggende.

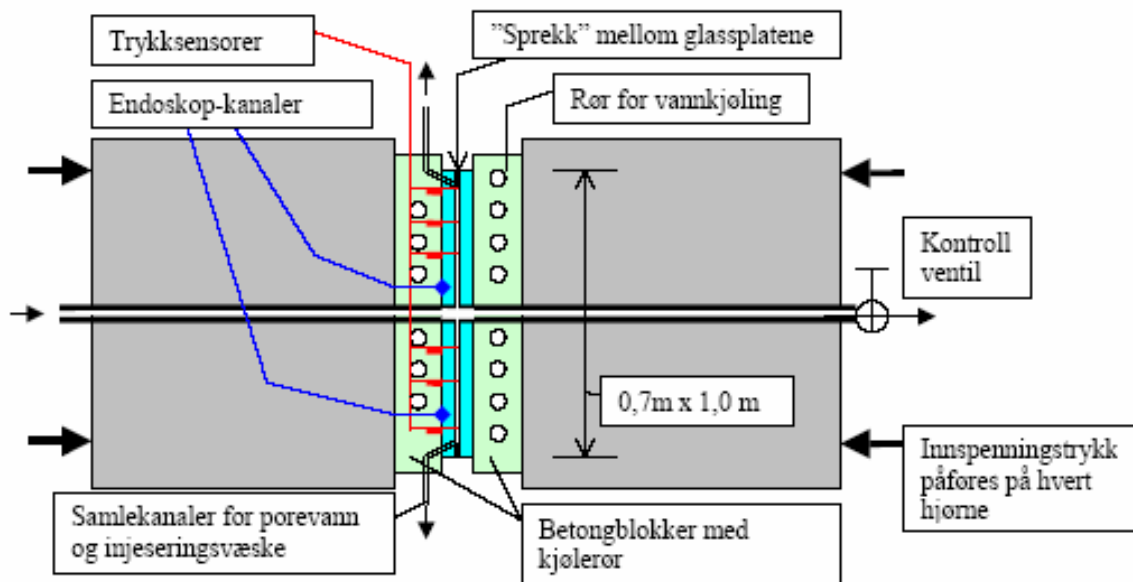
Injiseringpumpe og kolloidmikser var lånt fra Atlas Copco, og ble sendt tilbake mens den nye sprekkemodellen var under oppbygging. En venter nå på en gunstig anledning til lån eller leie av tilsvarende utstyr, som fortsatt bør være av samme type som en benytter i praktisk injeksjonsarbeid i tunneler.

5 Endelig modell

Sprekkemodellen gjør det mulig å gjennomføre reelle injiseringsforsøk med originalt injiseringsutstyr, slik det gjøres ved ordinær tetting, under kontrollerte forhold. Modellen er utviklet over tid, og den har undergått kritiske vurderinger og forbedringer underveis.

Den endelige utgaven består av to glassplater med størrelse 1 x 0,7 m, der det er frest "spor" i den ene. Sporene skal simulere sprekker når glassplatene blir presset sammen mellom to betongklosser, se fig. 3. Etter at det ble erfart av "sprekkeåpningen" i den første modellen var for stor, er åpningene i den nye modellen redusert med ca. 40%. Den gjennomsnittlige åpningen for sprekkekanalene i den nye modellen er dermed henholdsvis ca: $A = 0.053$, $B = 0.077$, $C = 0.114$ og $D = 0.138$ mm, se bilag 1. Det viser seg at det er vanskelig å oppnå tilfredsstillende reproduksjon av utfresingen av sprekkekanalene med de maskinene som er benyttet i dette tilfellet. Glassplata som står inntil den utfreste er instrumentert med trykksensorer, lysdioder og gjennomsiktige kanaler for innføring av endoskop som gjør det mulig å overvåke utbredelsen av injeksjonsmassen.

Betongklossene, hver på ca. 1 m³, forspennes med bolter i hvert hjørne for å sikre at trykket, som kan nå opp mot 50 bar, ikke utvider sprekken under injiseringen. Denne innspenningen fører til at injiseringsmassen arbeider mot et mekanisk bergtrykk under injisering, som tilsvarer en bergspenningskomponent som står normalt på sprekkeflaten. Innspenningen kan varieres ved å regulere forspenningsboltene.



Figur 3. Prinsippskisse over sprekkemodellen

På grunn av maskineringen av glassplatene er det ikke mulig å få produsert ruhet i sprekken, foruten den grovheten som etterlates på overflaten etter fresingen av sprekkesporene. En eventuell fresing av ruhet i glasset ville medført meget høyt tidsforbruk og ville vanskelig latt seg reproducere ved senere produksjoner av glassplater med annen spordybde.

Injeksjonsmasse føres i rør og presses inn via en åpen pakke i et senterhull i sprekkeflaten. Injeksjonsmassen presses så utover i sprekkesystemet, og utstrømmende masse som går gjennom modellen samles opp på hver side i rør med gjennomstrømsmåling (flow-meter). Forløpet og utbredelsen av injeksjonsmassen overvåkes av trykksensorer, lysdioder og endoskop som føres inn i gjennomsiktige rør på siden av glassplatene. Alle data fra forsøket registreres opp mot tid fra oppstart. Signalene fra gjennomstrømningsmålere, trykksensorer og lysdioder blir registrert med datalogger knyttet til PC, mens bildene fra endoskopet vises på en TV-skjerm, som er tilknyttet en videoopptaker.

I betongklossene som glassplatene er festet til, er det innstøpt et rørsystem som fungerer som kjølerør med vanngjennomstrømning, se fig. 4. Dette vil sikre kontroll over omgivelsestemperaturen, eller "bergtreperaturen", rundt sprekken. I tillegg til å holde temperaturen stabil, kan man også velge ulike temperaturer for de enkelte forsøk for å undersøke hvilken innvirkning dette har på injeksjonsresultatet.



Figur 4. Glassplate med kjølerør klar til innstøping.

6 Erfaringer

Den første sprekkemodellen ble utviklet i løpet av vinteren 2001/2002 og de første injiseringsforsøkene ble utført 29.05.2002. Dette forsøket hadde som formål å studere hvilken effekt ulike omdreiningsstall på omrøreren, har på injiseringsresultatet. Resultatene fra dette forsøket er beskrevet i rapport nr. STF22 F02138. Denne rapporten gir også en vurdering av forsøksopplegget og av forsøksutstyret som benyttes, og det blir påpekt behov for forbedringer av både utstyr og forsøksprosedyre. De viktigste endringene som ble påpekt i denne rapporten er oppgitt punktvis nedenfor:

- For å registrere væskestrømmen ut av utløpet fra modellen ble det ved første forsøk benyttet 10 liters oppsamlingskanner hvor det var mulig å lese av mengden etter hvert som massen stiger i kannene. De ble imidlertid for fort fulle, og forsøket måtte dermed avsluttes etter kort tid. Det var dessuten vanskelig å gjøre nøyaktige registreringer underveis. For å løse problemet ble det foreslått å montere flow-meter, dvs en enhet som registrerer l/min underveis i forsøkene, og som også gir total gjennomløpt mengde. Dermed kan massen kjøres rett ut i avgangsfatet. Dette gir også registrering av l/min pr. min., slik at endringen underveis blir klarlagt. Ved å bruke flow-meter kan en kjøre all injiseringsmassen gjennom systemet, slik at en får se utviklingen over noe lengre tid, dvs om sprekkesystemet tettes stadig mer igjen.
- På grunn av at det måtte monteres minst to flow-metere, ett på hver side av modellen, ble det for liten logge-kapasitet med den dataloggeren som ble benyttet. Det ble derfor foreslått å kjøpe tilleggskort til loggeren for å utvide dens kapasitet.
- Ved innstøpingen av glassplatene første gang ble det registrert krymping av betongen, noe som medførte at glassplatene ikke ble liggende helt inntil hverandre på kantene. Dette ble forsøkt kompensert ved å legge trefiberplater på baksiden av glassplatene før de ble spent sammen, men likevel var det knyttet usikkerhet i om injiseringsmasse kunne trykkes inn mellom glassplatene utenfor de oppfreste sporene. Resultatene fra forsøket indikerte også at den valgte sprekkåpningen var for stor, slik at det ikke var mulig å opparbeide mottrykk ved injisering. Dette førte til at det ble bestemt å få produsert nye glassplater. Foruten grunnere sprekker ble det også foretatt en del andre endringer på de nye platene. Det ble montert to ekstra trykksensorer, det ble valgt å gi kanalene for endoskopene en annen plassering og glassplatene ble laget slik at de lett kunne byttes ut uten at de behøvde å støpes inn på nytt.
- Før det startes forsøk, bør instrumenteringen kalibreres ved å kjøre vann gjennom sprekkesystemet. Under kalibreringen bør det oppnås et visst trykk i systemet.
- Lysdiodene som registrerer utbredelsen av injeksjonsmassen i sprekkesystemet, var på den første modellen plassert i skjæringspunktene mellom de utfreste sporene som skal simulere sprekken. På ny modell er det plassert dioder også midt mellom kryss, f.eks. i de tynneste kanalene.
- Det er montert et termoelement på hvert glass, og to elementer i betongen mot glassene, se fig. 5. Ved de første forsøkene ble "berg"-temperaturen kontrollert manuelt før forsøket startet, men for senere forsøk bør det vurderes å registrere (logge) temperaturen med gitte tidsintervall gjennom hele forsøket.
- Prøvetaking av injiseringsmassen for å finne Marsh-kon-tid og densitet før injisering, bør gjøres i innløps-strømmen inn til omrøreren, dvs. før massen går gjennom pumpe.
- For å kunne reproducere forsøkene på best mulig måte bør tidsintervallet fra avsluttet omrøring til forsøket starter, bestemmes på forhånd og gjennomføres likt ved hvert forsøk.



Figur 5. Termoelement for overvåking av temperaturutvikling i glassene under forsøket.

7 Salg av modellforsøk

Etter at den nye modellen er ferdig utprøvd, gjenstår selve salgsarbeidet ut mot eksterne kunder. Det er allerede gjort en del markedsføring av modellen på diverse arenaer, og flere bedrifter både i inn- og utland har vist interesse av å få testet sine produkter. Det vil bli utarbeidet skreddersydde forsøksprogram, der en varierer de parametre som er mest relevant for vedkommende leverandør. SINTEF vil forsøke å oppnå avtaler som frigir data av allmen interesse, men her må en underkaste seg bedriftenes behov for beskyttelse av egne data under produktutviklingen. En vil også søke samarbeid med organisasjoner og leverandører som har behov for å teste andre injeksjonsmaterialer enn sement. Det har meldt seg en interessant mulighet for å delta i utviklings og dokumentasjonstesting for tettingskonsepter for atomavfallslagring, der det er spesielle krav til tetthet og bestandighet.

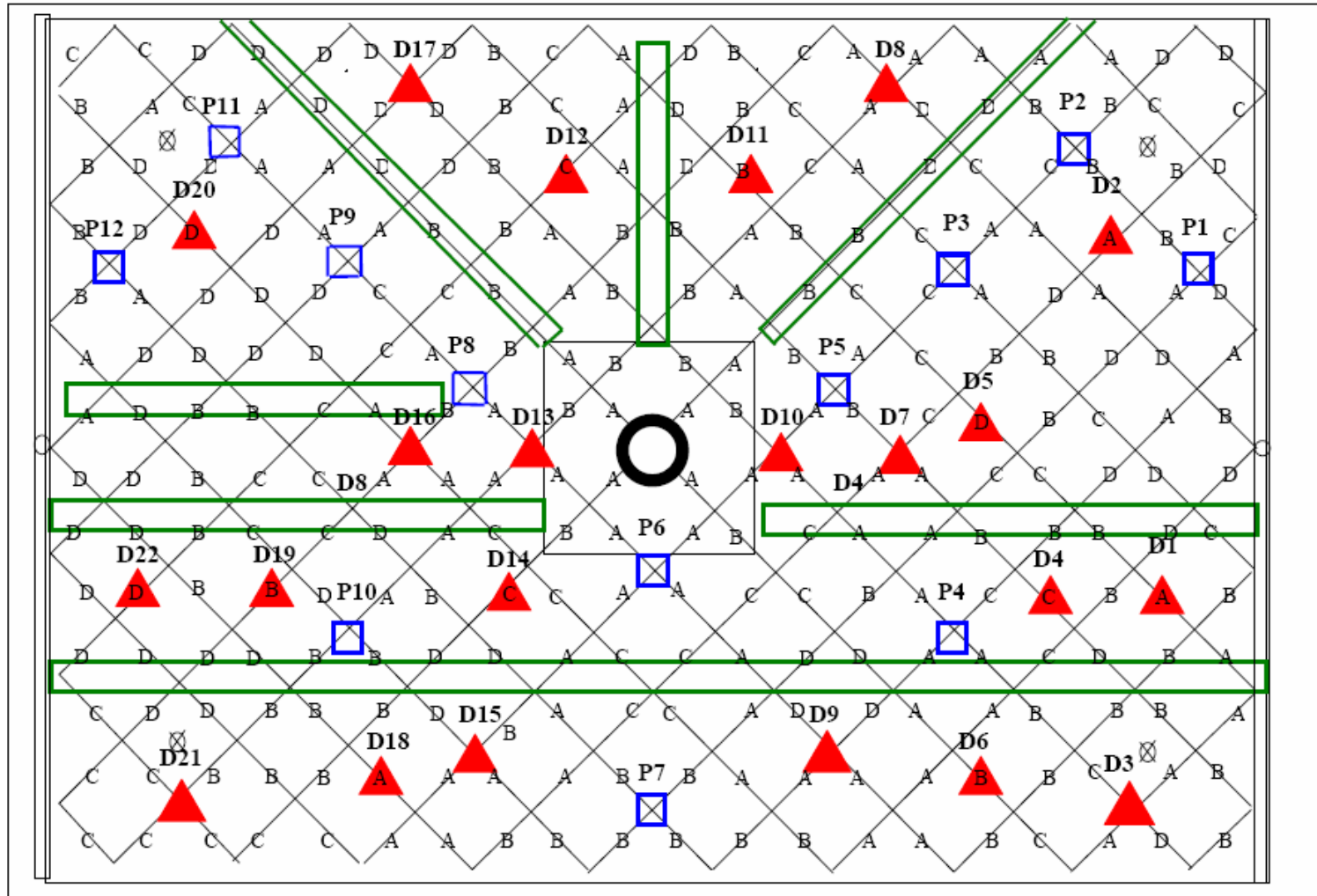
8 Parallell forskning og utvikling

To typer parallelle tester eller utviklingsprosjekter kan med fordel kjøres parallelt med videre kjøring av modellen:

- utvikling av en mulig felt-metode for injeksjonsbrukets inntrengningsevne, og
- testemetode for å måle utvikling av skjærstyrke på tilsvarende tynn og kald sprekk.

Begge ambisjoner er vel egnet for utvikling i tett samarbeid med SINTEFs laboratorium for semetteknologi, der en har moderne viskosimeterutrustning og høy relevant kompetanse for å studere de reologiske egenskapene til sementsuspensjon under tidlig fasthetsutvikling.

Instrumentplassering M≈1:500 Sementside, instrumentert seksjon



- trykksensor
- diode
- ▲ aktiv diode
- kanal for skop