



Statens vegvesen

# Fullskala brannforsøk 50 MW brannsikret PE skum

**RAPPORT**

Teknologiavdelingen

Nr. 2487



Geo- og tunnelseksjonen  
Dato: 2007-05-15



**Statens vegvesen**

Vegdirektoratet  
Teknologiavdelingen

Postadr.: Postboks 8142 Dep  
0033 Oslo

Telefon: (+47 915) 02030

www.vegvesen.no

## TEKNOLOGIRAPPORT nr. 2487

Tittel

**Fullskala brannforsøk 50 MW brannsikret PE skum**

Utarbeidet av

Harald Buvik

Dato:

2007-05-15

Saksbehandler

Harald Buvik

Prosjektnr:

Kontrollert av

Mona Lindstrøm

Antall sider og vedlegg:

### Sammendrag

24. mai 2006 ble det gjennomført fullskala brannforsøk på et 15 m langt felt med gammelt PE-skum beskyttet med sprøytebetong. Sprøytebetongen ble sprøytet i oktober 2005 og er tilsatt 2 kg PP-fiber samt 50 kg stålfiber per m<sup>3</sup>. Foreskrevet tykkelse av sprøytebetongen var 6 cm som tilsvarer tidligere krav til brannbeskyttelse av brennbar isolasjon (revidert i 2004). PE-skummet var montert på knøl etter gammel metode.

Den eksponerte brannen har vært i overkant av 50 MW og varigheten 70 til 80 minutter. Det er observert overflatetemperaturer på over 1200 °C. Temperaturøkningen i tid representerer omtrent samme størrelsesorden som HC-kurven i ca. en time.

Prøveobjektet (tunnelkledningen) var intakt under hele forsøket men var betydelig svekket ut i fra den høye temperatureksposeringen. PE skummet bak sprøytebetonghvelvet var delvis borte i heng og vederlag. Om det skyldes smelting eller antennelse er ikke godt å si men uansett er akseptkravet for maksimal temperatur mot brennbar materiale ikke tilfredsstillt i denne testen. Dette har igjen sin hovedårsak i manglende tykkelse på sprøytebetongbeskyttelsen.

### Summary

Emneord:

Tunnel, vann og frostsikring, sprøytebetong, PE skum, brann



|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INNLEDNING</b> .....                            | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>TESTMETODE - GJENNOMFØRING</b> .....            | <b>3</b>  |
| <b>3</b> | <b>RESULTATER</b> .....                            | <b>4</b>  |
| 3.1      | MÅLING OG BEREGNING AV STØRRELSEN PÅ BRANNEN ..... | 4         |
| 3.2      | MÅLENØYAKTIGHET .....                              | 8         |
| 3.3      | VISUELLE OBSERVASJONER ETTER BRANNTTEST .....      | 8         |
| <b>4</b> | <b>KONKLUSJON</b> .....                            | <b>9</b>  |
| <b>5</b> | <b>REFERANSE</b> .....                             | <b>10</b> |
| <b>6</b> | <b>VEDLEGG</b> .....                               | <b>11</b> |

# 1 Innledning

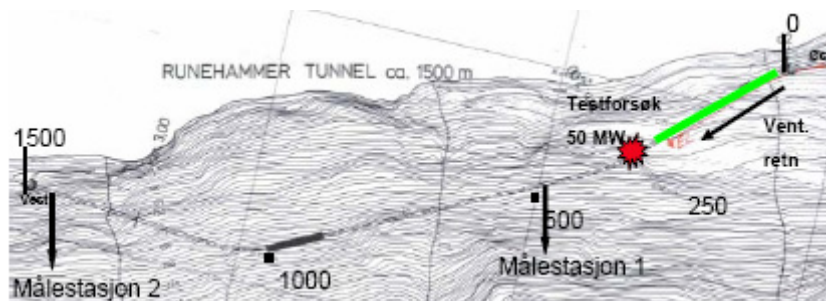
Runehamar testtunnel ved Åndalsnes i Møre og Romsdal ble etablert for å kunne gjennomføre fullskala brannforsøk under mest mulig realistiske omgivelser. Denne testtunnelen som er 1500 m lang kan også benyttes til øvrige tunnelteknologiske forskningsoppgaver alt etter behov og ønsker.

For Statens vegvesens egen del er en slik forskningstunnel både naturlig og nyttig i det arbeidet som nå er i gang gjennom FoU-prosjektet "Tunnelutvikling". I et slikt utviklingsprosjekt vil nettopp branntesting av både nye materialer og konseptløsninger være sentrale arbeidsområder. Kvalitetssikringen i utviklingsarbeidet vil kunne skje ved dokumentasjonskrav oppnådd gjennom fullskalaforsøk.

24. mai 2006 ble det gjennomført fullskala brannforsøk på et 15 m langt felt med gammelt PE-skum beskyttet med sprøytebetong. Sprøytebetongen ble sprøytet i oktober 2005 og er tilsatt 2 kg PP-fiber samt 50 kg stålfiber per m<sup>3</sup>. Foreskreven tykkelse av sprøytebetongen var 6 cm som tilsvarte tidligere krav til brannbeskyttelse av brennbar isolasjon (revidert i 2004). PE-skummet var montert på knøl etter gammel metode.

## 2 Testmetode - gjennomføring

Testfeltet er 15 m langt og befinner seg 280 – 295 m fra inngangen til tunnelen (østenden).



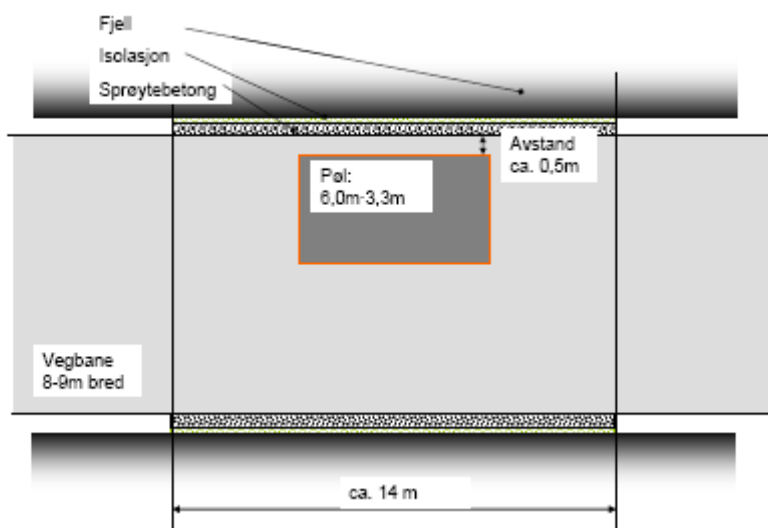
**Figur 1** Oversikt over tunnelen og testfeltet

Sentrisk i lengderetningen av testfeltet ble det bygd et 20 m<sup>2</sup> (3,3 x 6 m) kar. To lag plast ble lagt i bunnen, deretter ble det stablet opp to høyder med lecablokker som fungerte som vegger. Det ble så lagt på et siste lag med plast for å forhindre at vann og diesel skulle trenge inn i lecablokkene. Dette ble til slutt stabilisert ved hjelp av sand som ble plassert rundt hele karet. Før testen ble det fylt ca. 5 cm vann i bunnen av karet, deretter ble karet fylt med 6000 l diesel.

Ventilasjon i tunnelen ble igangsatt ved to fastmonterte vifter i inngangspartiet i tunnelen. Varigheten av brannen er anslått til ca. 70 – 80 minutter.

Dieseloljen ble antent ved å helle ca. 4 liter bensin i karet som så ble antent med en fakkell. Brannutviklingen ble observert ved videoopptak helt til tunnelrommet ble fylt med svart røyk.

I forsøket er varmeavgivelsen beregnet ut fra målinger ved en målestasjon nedstrøms teststedet ved hjelp av den såkalte: "Oxygen Depletion Method". Her beregnes den mengden oksygen som blir forbrukt av brannen basert på måling av gasskonsentrasjoner, hastigheter, luftfuktighet og temperaturer. Varmeavgivelsen beregnes deretter på grunnlag av brennverdien til oksygen.



**Figur 2** Prøveobjektet plassert i tunnelen samt plassering av brannkilden (sett ovenfra).

Alle beregninger er utført av Sintef NBL som også var ansvarlig for gjennomføringen av testen.

### 3 Resultater

Måleresultatene i forsøkene har på grunn av teknisk svikt blitt begrenset. Det gjelder alle målinger av flammtemperaturer, samt at termoelement i selve prøveobjektet ikke har vært optimalt plassert i forhold til å finne maksimaleksponering. På grunn av den kraftige eksponeringen og nedfall av stein i tunnelen falt også hovedkommunikasjonskabelen ut i siste del av forsøket (etter vel 105 minutter etter brannstart).

Det er mulig ut fra tilstand til den eksponerte betongen å reprodusere den virkelige eksponeringen ved hjelp av prøvetaking. Fargenyanser i betongen i dybden kan omtrentlig gi hvilken temperaturgradient prøveobjektet har vært utsatt for. For detaljerte vurderinger av betongresultatene vises til

**Teknologirapport 2464.**

Den eksponerte brannen har vært i overkant av 50 MW. De første 30 MW var nådd før 6 minutter som gir en vekstrate på over 5 MW/min. Det er observert overflatetemperatur på over 1200 °C i betongoverflaten i hengen. Det betyr at maksimaltemperaturen i flammene kan ha vært opp mot 1300 °C. Økningsraten i temperaturen er i samme størrelsesorden som for HC-kurven og RWS-kurven. Den høyeste eksponeringen kan ligge nært opp mot nivået i RWS. Varigheten av brannen er anslått til å ha vært mellom 70 og 80 minutter. Det vil si at branttesten har i hengen gitt tilsvarende eksponering som HC/RWS i ca. en time. Varmeeksponeringen har vært lavere langs sidene av betonghvelvet.

Oppnådd ventilasjonshastighet var vel 1 – 1,5 m/sek oppstrøms brannen. Varme gasser spredte seg langt både oppstrøms og nedstrøms brannen. Tunnelkledningen (prøveobjektet) var inntakt under hele forsøket men var tydelig svekket ut fra den høye temperatureksponeringen.

#### 3.1 Måling og beregning av størrelsen på brannen

Måledataene fra branttesten er gjengitt i form av grafer og tegninger. Alle grafer er vist med original tidsakse. Branttesten startet etter 5 minutter.



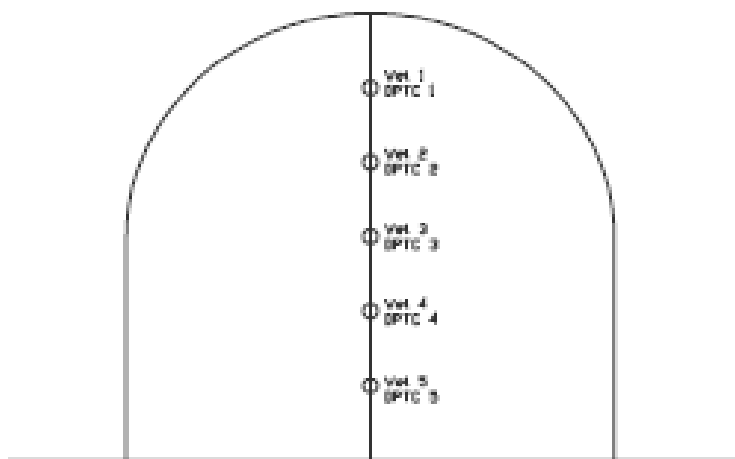
**Figur 3** Varmeavgivelse fra 20 m<sup>2</sup> dieselpøl brann. (Målingen ligger om lag 15 minutter etter brannstart)

Figur 3 viser varmeavgivelsen fra brannen som funksjon av tid, målt 1200 m nedstrøms brannkilden. Denne målingen vil være forsinket i tid i forhold til brannen, anslagsvis 15 minutter. I løpet av den tiden det tar for forbrenningsproduktene å strømme fra brannstedet til nedre målestasjon kjøles røyken ned til temperaturer mellom 15 og 25 °C. De høyeste temperaturene er målt øverst i tverrsnittet. I tillegg vil det kunne bli en viss forandring i konsentrasjonen av gasser, idet gradienter vil kunne utjevnes når gassene transporteres ned til nedre målestasjon. Mot slutten av forsøket (etter at dieselbrannen hadde sloknet) ble det brudd i kommunikasjonen med nedre målestasjon (vel 105 minutter etter brannstart) noe som medførte at det ikke er mulig å beregne den totale varmeavgivelsen nøyaktig.

Mot slutten av forsøket ble det registrert en økning i varmeavgivelsen målt nedstrøms for brannen. Det er i hovedsak tre årsaker som kan ha bidratt til dette. Det første er at temperaturen rundt brannområdet synker når brannen er i ferd med å brenne ut noe som kan medføre endring i strømningsbildet gjennom tunnelen. Det andre er mulighet for oppvarming og koking av vannlaget under dieselen når diesellaget blir tilstrekkelig tynt. Dette vil da igjen føre til økt overflate på dieselen og derfor økt avdampning og større brann. Den tredje mulige kilden til økning i målingen av varmeavgivelsen er mulig begrenset brann i PE-skum nedstrøms for brannen.

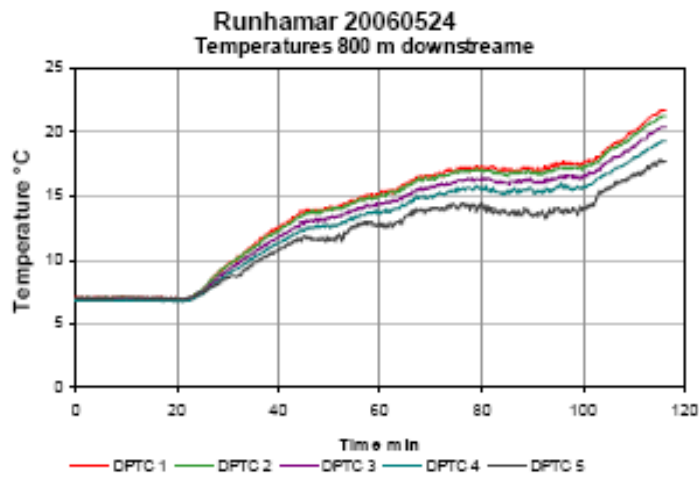
Det er registrert nedsmelting og forkulling av PE-skummet bak betonghvelvet og det er antatt at dette er hovedårsaken til økning i varmeavgivelse på slutten av forsøket (beskjedent bidrag på 10 MW).

Den eksponerte brannen har vært i overkant av 50 MW. De første 30 MW var nådd innen 6 minutter som gir en vekstrate på minst 5 MW/min. Ved ventilasjonshastighet på 1,3 m/sek, 40 m<sup>2</sup> tunneltverrsnitt og en brann på 50 MW, vil dette gi en teoretisk snitttemperatur på om lag 500 °C. Når det er observert overflatetemperatur på over 1200 °C i betongoverflaten i hengen, betyr det at maksimaltemperaturen i flammen kan ha vært opp mot 1300 °C. Økningen i varmeavgivelsen følger økningen i temperaturen (gastemperatur ved brannen er ikke målt) og vil her være i samme størrelsesorden som HC-kurven. Den høyeste eksponeringen kan ligge nært opp mot nivået i RWS-kurven og det vil gradvis gå ned til vesentlig mindre eksponering i og med at snitttemperaturen teoretisk er på om lag 500 °C. For homogen eksponering over tverrsnittet antas at gjennomsnittstemperatur opp mot 900 °C er nødvendig, noe som ikke ble oppnådd i dette forsøket.

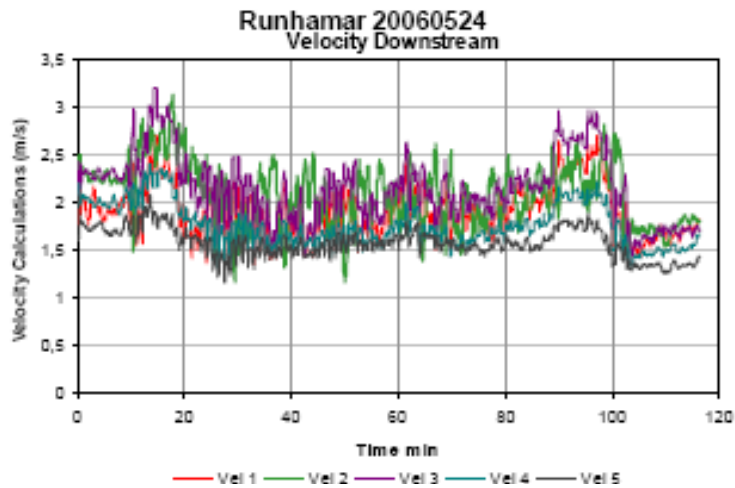


Figur 4 Plassering av målepunkter ved nedre målestasjon

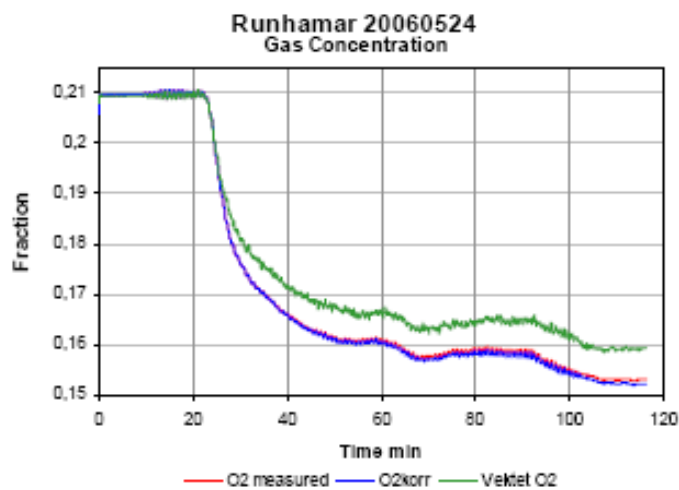




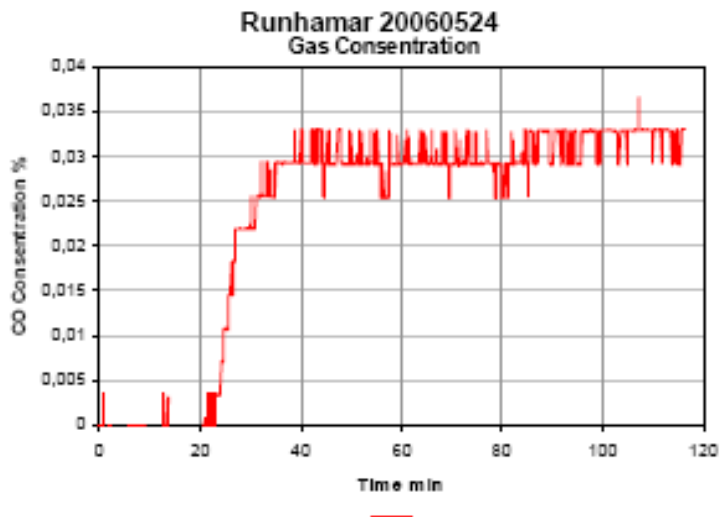
Figur 5 Temperaturer i tunnelverrsnittet målt ved målestasjonen 1200 m nedstrøms brannkilden. DPTC1 er målt 1 m fra hengen, de øvrige med 1 m avstand.



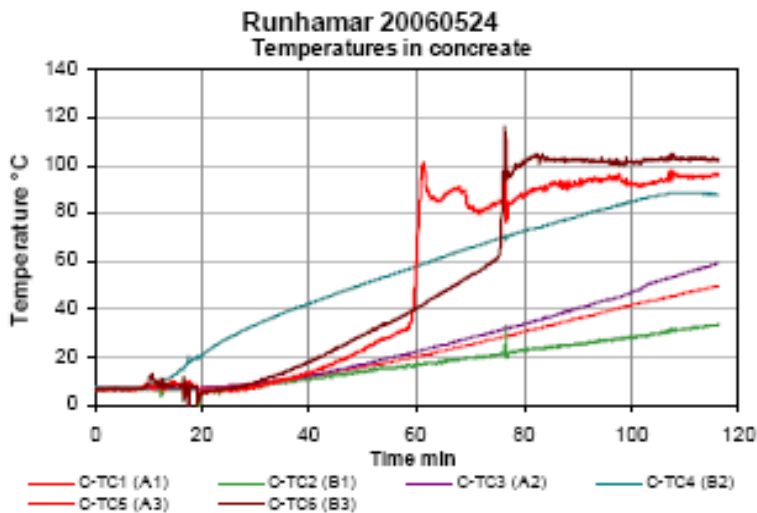
Figur 6 Lufthastigheter i tunnelverrsnittet målt ved målestasjonen 1200 m nedstrøms brannkilden.



Figur 7 Konsentrasjon av oksygen ved målestasjonen 1200 m nedstrøms brannkilden.



Figur 8 Konsentrasjon av CO målt ved målestasjonen 1200 m nedstrøms brannkilden.



Figur 9 Temperaturen målt mellom sprøytebetongen tilsatt PP-fiber og PE-skummet

Termoelementene ble montert inn på venstre side av tunneløpet sett fra østre tunnelåpning. Element A1 og B1 ble montert 4 m inne på prøveobjektet på nivå henholdsvis 2 og 3 m over vegbanen. Termoelement A2 og B2 ble montert 7 m inne på prøveobjektet (senter av området) og A3 og B3 ble montert 10 m inne på prøveobjektet, alle på nivå henholdsvis 2 og 3 m over vegbanen. Termoelementene ble montert inn etter at sprøytebetongen tilsatt PP-fiber var påført. Dette medførte at det knytter seg en viss usikkerhet til den nøyaktige plasseringen av disse i forhold til skillet mellom sprøytebetong og PE-skum.

A3 og B3 gir spesielle resultat i og med at det går svært raskt opp til 100 °C og holder seg konstant. Dette kan tyde på kokende vann i området der termoelementene er plassert eller at det er oppstått skade på termoelementtråden slik at fuktighet har gått inn i selve ledningsparet fram til termoelementene.

### 3.2 Målenøyaktighet

Måling av temperaturer er direkte målinger basert på kapsla 1,5 mm termoelement av type K. Nøyaktigheten i selve termoelementet er bedre enn +/- 1 %, men ved høy temperatur i og omkring flammer utsettes termoelementene utenfor den varme sonen for termisk stråling. Slik stråling kan gi betydelig avvik idet termoelementtemperaturen ikke da nødvendigvis representerer gasstemperaturen. Ved total omhylling av flammer og mye sot vil denne feilkilden bli vesentlig mindre. Slike gasstemperaturer er ikke rapportert i denne testen.

Måling av hastigheter er basert på trykkdifferanse over bidireksjonale prober. Nøyaktigheten er innenfor +/- 5 % for hastigheter mellom 1m/s og 20 m/s. Alle trykkmålinger er direkte og det benyttes trykktransmittere tilpasset de ulike måleområdene. Trykktransmittere er nøyaktige og normalt bedre enn +/- 2 %. Nøyaktigheten ved store transienter i trykket er usikre.

Måling av oksygenkonsentrasjoner er basert på ”Servomex 575 Oxygen analyser”. Gassen blir rensset, tørket og trykknøytralisert før den føres inn i selve analysatoren. Denne type målere er avhengig av jevnlig kontroll med kjent referanse-gass. Slik kontroll ble gjennomført like før test og nøyaktigheten på differansekonsentrasjonen i forhold til atmosfæren har en nøyaktighet innenfor +/- 5 % i forhold til måleområdet.

Måling av relativ fuktighet baserer seg på direktemåling av oppvarmet gass (150 °C) for så å beregne konsentrasjonen i det aktuelle målepunktet korrelert i forhold til temperaturen.

Målingene av massestrøm og gasskonsentrasjoner er basert på relativt få målepunkt. Antagelser om hastighetsprofil er basert på erfaringer fra forsøk utført i andre tunneler. På bakgrunn av korrelasjoner til temperaturprofilen er massestrømmen i tunnelen beregnet. Den utregnede massestrømmen vil generelt for slike målinger ha et avvik på +/- 10 - 20 % og beregnede varmeavgivelse noe høyere avvik +/- 20 – 30 %. Nøyaktigheten avhenger også av at man kjenner totalmengden brensel som er inngått i forsøket.

Beregning av varmeavgivelse er direkte proposjonalt med massestrømmen og redusert oksygenkonsentrasjon. I brannforsøk er det vanlig å måle de nødvendige størrelsene for å beregne varmeavgivelsen nedstrøms der temperaturen er lav nok til at instrumentene beskyttes. Den reduserte oksygenkonsentrasjonen som oppstår i selve flammene blir ikke registrert i måleinstrumentene før den er transportert ned til målestasjonen. Endring i massetransporten vil normalt bli observert tidlig i og med at trykkendringene går med lydets hastighet, mens endring i oksygenkonsentrasjonen må transporteres ned til målestasjonen. Det er derfor to ulike mekanismer som transporterer tilstanden i brannen ned til målestasjonen og dette gir en faseforskyvning som det er vanskelig å rette opp. Noe blir rettet opp med å kompensere for antatt transporttid ned til målestasjonen (oksygen) samt midling av hastighetsmålingene. Formen på varmeavgivelseskurven vil ikke kunne representere direkte det som foregår i brannen, men den vil kunne gi riktig bilde av størrelsen og varigheten av brannen forutsatt at målinger gjennom hele brannforløpet foreligger. I dette forsøket ble det brudd i kommunikasjonskabelen etter om lag 105 minutter slik at slutten av brannforløpet ikke er registrert i målingene.

### 3.3 Visuelle observasjoner etter branntest

Det er i denne rapporten ikke foretatt kvantifisering av skadene på PE-skummet bak sprøytebetongen. Skadene er gjengitt i form av bilder og observasjoner i forbindelse med opprenskingsarbeid. Prøvetaking av sprøytebetongen før og etter branntest er gjort separat av Materialeseksjonen ved Teknologivdelingen og rapportert i Teknologirapport nr. 2464.

Det ble observert nedsmelting av et ubeskyttet felt PE-skum som lå ca. 60 m oppstrøms for brannstedet. Dette indikerer en røyktemperatur mellom 120 – 150 °C i dette området. Det ble observert utvidelse av sprekker i betongen gjennom branntesten i forhold til målinger før test. Det ble ikke observert noe nedfall eller avskalling av sprøytebetong i det beskyttede området. Deler av sprøytebetongen var smeltet ca. 4 - 5 m nedstrøms brannområdet, noe som indikerer en temperatur over 1200 °C.

I forbindelse med opprenskingsarbeidet viste det seg også at mye av PE-skummet bak sprøytebetongen var smeltet og noe var forkullet. Det var høyest eksponering i hengen noen meter bak senter av dieselpølen og mindre langs tunnelsidene. Selve sprøytebetongkledningen var intakt etter testen. Bærevnen til kledningen er ikke vurdert men anses som meget dårlig da den var lett å pigge ned maskinelt.

Nedstrøms brannstedet var det betydelige mengder nedfall av småfallent bergmasse og store deler av ubeskyttet PE-skum som befant seg om lag 100 m nedstrøms brannstedet var smeltet. Det er ikke fullstendig dokumentert i hvilken grad PE-skummet har deltatt i brannen. Målingene av varmeavgivelsen viser heller ikke betydelig bidrag fra andre kilder enn brannkilden. Tidligere målinger viser at PE-skum kan avgi vel 0,5 MW/m<sup>2</sup> ved god ventilering. Ut i fra slike vurderinger kan et slikt bidrag fra PE skummet maksimalt utgjøre 10 MW. Større brann bak sprøytebetonghvelvet har ikke vært mulig på grunn av manglende oksygentilførsel i dette området slik konstruksjonen er utformet med PE-skummet lagt på knøl.

## 4 Konklusjon

Den eksponerte brannen har vært i overkant av 50 MW og varigheten 70 – 80 minutter. Det er observert overflatetemperaturer på over 1200 °C. Temperaturøkningen i tid representerer omtrent samme størrelsesorden som HC-kurven i ca. en time.

Prøveobjektet (tunnelkledningen) var intakt under hele forsøket men var betydelig svekket ut i fra den høye temperatureksponeringen. PE-skummet bak sprøytebetonghvelvet var delvis borte i heng og vederlag. Om det skyldes smelting eller antennelse er ikke godt å si men uansett er akseptkravet for maksimal temperatur mot brennbart materiale ikke tilfredsstilt i denne testen. Dette har igjen sin hovedårsak i manglende tykkelse på sprøytebetongbeskyttelsen.

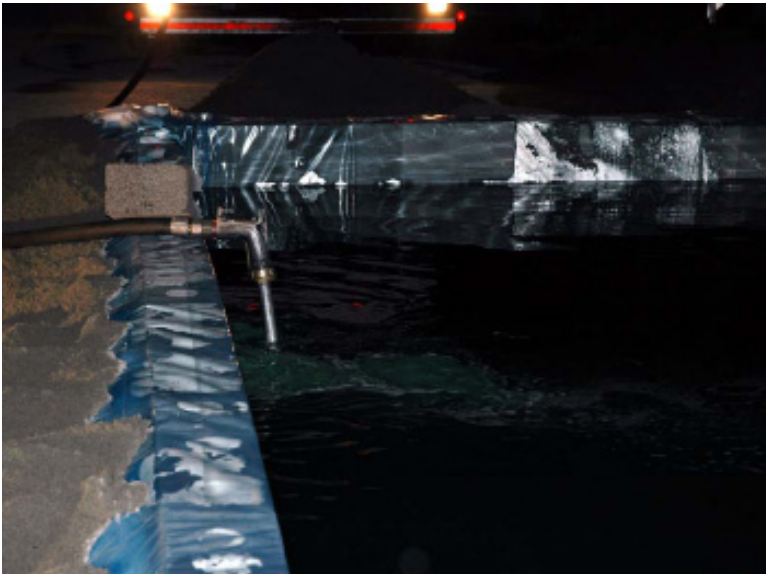
## 5 Referanse

Larsen, C.K. (2006): *Brannforsøk Runehamar 24. mai 2006. Befaring og prøvetaking etter brannforsøket*. Teknologirapport nr. 2462. Teknologidivisjonen, Vegdirektoratet.

## 6 Vedlegg



**Figur 10 Karet på 20 m<sup>2</sup> fylles med ca. 5 cm vann**



**Figur 11 Karet blir fylt med 6000 l diesel på et sjikt med vann (5 cm)**



**Figur 12 Karet ferdig fylt med 600 l diesel**



**Figur 13 Brannen rett etter antennelse**



**Figur 14 Brannen ca. 45 sekunder etter antennelse, røyken begynner å spre seg oppstrøms**



**Figur 15** Brannen ca. 1 minutt etter antennelse, røyken har passert 50 m oppstrøms.



**Figur 16** Smeltet ubeskyttet pE skum 60 m oppstrøms brannen



**Figur 17** Sprekkdannelse etter brannpåkjenning





**Figur 18 Smeltet PE-skum bak sprøytebetonghvelv**



**Figur 19 Smeltet/forkullet PE-skum bak sprøytebetonghvelv**



**Figur 20 Smeltet/glassert sprøytebetong etter brannpåkjenning**



**Figur 21 Nedfall rett nedstrøms brannstedet**



**Figur 22 Nedfall nedstrøms brannstedet**



**Statens vegvesen**

Statens vegvesen Vegdirektoratet  
Postboks 8142 Dep  
N - 0033 Oslo

Tlf. (+47 915) 02030  
E-post: [publvd@vegvesen.no](mailto:publvd@vegvesen.no)

ISSN 1504-5005