



Statens vegvesen

Brannforsøk Runehamar 24. mai 2006

Befaring og prøvetaking etter brannforsøket

RAPPORT

Teknologiavdelingen

Nr. 2464



Seksjon for materialteknikk
Dato: 2006-07-04



Statens vegvesen

TEKNOLOGIRAPPORT nr. 2464

Tittel

**Brannforsøk Runehamar 24. mai 2006
Befaring og prøvetaking etter brannforsøket**

Vegdirektoratet
Teknologiavdelingen

Postadr.: Postboks 8142 Dep
0033 Oslo

Telefon: 22 07 35 00

www.vegvesen.no

Utarbeidet av

Claus K. Larsen

Dato:

2006-07-04

Saksbehandler

Claus K. Larsen

Prosjektnr:

601350

Kontrollert av

Mona Lindstrøm

Antall sider og vedlegg:

17 + 3 vedlegg

Sammendrag

Det er foretatt en befaring 19. juni 2006 i Runehamar tunnelen etter brannforsøket 24. mai 2006. Brannforsøket ble kjørt på et 15m langt felt med gammelt PE-skum beskyttet i oktober 2005 med sprøytebetong. Sprøytebetongen inneholdt 2 kg PP-fiber og 50 kg stålfiber per m³.

Det er en tydelig inndeling i tre områder i prøvefeltet - ett mørkt og sotet, ett lyst og ett område der betongen har smeltet i overflaten. Dette gir klare tegn på både meget høye temperaturer i feltet, samt relativt store temperaturforskjeller i feltet.

Sprøytebetongen er uten avskalling, nedfall eller store sylinge skader. Det ble observert mange riss og sprekker i forkant av brannforsøket, og disse rissene har blitt større. I tillegg er det kommet flere relativt grove sprekker som følge av brannen. I to små områder er sprøytebetongen i ferd med å falle ned grunnet grove sprekker. Stålfiberene holder betongen sammen og hindrer nedfall i disse tilfellene. Feltet anses som meget usikkert å bevege seg i da det skal lite mekanisk påvirkning til før store biter faller ned.

Det er observert forkullet, helt eller delvis nedsmeltet og intakt PE-skum på baksiden av sprøytebetongen - alt avhengig av tykkelsen av sprøytebetongen og brannbelastningen. I et stort hulrom bak sprøytebetongen og PE-skummet er det observert sot på fjellet noe som indikerer at PE-skummet har brent i dette området. Estimerte betongtemperaturer fra undersøkte biter bekrefter at PE-skum kan ha antent bak sprøytebetongen.

Summary

Emneord:

Brann, PE-skum, tunneler, sprøytebetong, PP-fiber

Innhold

1	INNLEDNING	2
2	BAKGRUNN.....	2
2.1	KARTLEGGING OG PRØVETAKING I FORKANT AV BRANNFORSØKET	2
2.2	BRANNENS PLASSERING OG STØRRELSE	4
3	OBSERVASJONER ETTER BRANNFORSØKET.....	5
3.1	OBSERVASJONER AV SPRØYTEBETONGEN MOT TRAFIKKROMMET	5
3.2	OBSERVASJONER BAK SPRØYTEBETONGEN	9
3.3	REGISTRERINGER GJORT I LABORATORIET	13
3.4	ESTIMERING AV TEMPERATURPROFIL GJENNOM SPRØYTEBETONGEN.....	13
4	DISKUSJON AV OBSERVASJONER OG RESULTATER	14
4.1	TEMPERATURPÅKJENNINGEN I PRØVEFELTET	14
4.2	HAR PE-SKUM BRENT BAK SPRØYTEBETONGEN?	15
4.3	BEREGNEDE TEMPERATURER	16
5	KONKLUSJONER	16

1 Innledning

Etableringen av Runehamar Testtunnel er gjort for blant annet å kunne gjennomføre fullskalaforsøk med ulike brannstørrelser under realistiske forhold. Forsøkene kan ha ulik hensikt, men alle gjennomføres for å skaffe dokumentasjon av ulike løsnings "brannegenskaper", for eksempel i form av slukkeforsøk eller uttesting av brannbeskyttelse. I tillegg vil fullskalaforsøkene gi verdifull kunnskap som skal benyttes i vurderingen av akseptkriterier og tekniske krav for materialer og konstruksjoner i vegtunneler.

Den 24. mai 2006 ble det gjennomført et brannforsøk i Runehamar tunnelen på et 15m langt felt med gammelt PE-skum nylig beskyttet med sprøytebetong. Feltet er 280-295 m fra inngangen til tunnelen. Sprøytebetongen ble sprøytet i oktober 2005, og har 2 kg pp-fiber samt 50 kg stålfiber per m³. Foreskrevet tykkelse av sprøytebetongen var 8 cm, som er i tråd med dagens krav for brannbeskyttelse av brennbart isolasjonsmateriale. Det er den samme betongen som ble benyttet som brannsikring i feltet (519-600m) med slukkeforsøk november/desember 2005 (Gimaex-Schmitz). PE-skummet var montert delvis på profil, delvis på knøl og på enkelte små områder rett mot gammel sprøytebetong (opprinnelig bergsikring?).

Brannforsøket er gjennomført i regi av Statens vegvesen, Teknologivdelingen i Vegdirektoratet som del av FoU-prosjektet "Tunnelutvikling." Se Teknologirapport nr. 2443 for detaljer om dette prosjektet. Hensikten med brannforsøket var å dokumentere sprøytebetongs evne til å brannbeskytte PE-skum brukt som del av vann- og frostsikring i vegtunneler. Valg av plassering og størrelse på prøvefeltet, valg av sprøytebetong og tykkelse på denne, samt oppfølging av sprøytearbeidene ble foretatt av Statens vegvesen. Instrumentering, gjennomføring av selve brannen og datainnsamling under brannen samt rapportering av dette er utført av SINTEF NBL as på oppdrag fra Statens vegvesen.

Denne rapporten beskriver et kartleggings- og dokumentasjonsarbeid etter brannforsøket. Arbeidet ble gjennomført for å gi et bedre grunnlag for evaluering av resultatene fra brannforsøket. Rapporten vil være et supplement til rapporten fra SINTEF NBL as (ikke sluttført i skrivende stund).

Hensikt: Dokumentasjon av sprøytebetongfeltet med tanke på skader på sprøytebetongen og tilstanden til PE-skummet bak sprøytebetongen etter brannforsøket.

Utført av: Claus K. Larsen, Teknologivdelingen, med assistanse av NTNU-student Morten A. Forsberg og Per Fiva, innleid for Statens vegvesen. Utført 19. juni 2006.

2 Bakgrunn

2.1 Kartlegging og prøvetaking i forkant av brannforsøket

Uken før brannforsøket ble det gjort en befarings- og dokumentasjonsreise av prøvefeltet, med fokus på riss, sprekker og eventuelt bom i sprøytebetongen. Dette ble utført av NTNU-student Morten A. Forsberg (del av hans masteroppgave, som ble innlevert 26. juni 2006) og Torkild Åndal, stedlig geolog for Statens vegvesen. Det ble registrert en god del riss og sprekker, men ikke noe bom (men dette er meget vanskelig å oppdage da PE-skummet demper "bomlyd").

Forsberg skriver i sin masteroppgave: " Sprekkene var til dels lange, dype og brede. Den lengste og bredeste gikk fra bakken og til midten av tunneltaket, den var 3 mm bred og på mange steder så dyp at den gikk helt inn til PE-skummet. Årsakene til de mange og store sprekkene kan være svinn og skjøter mellom PE-skumplater. ... Det ble også registrert noe fuktutslag ved enkelte sprekker. Dette betyr at disse sprekker kan med sikkerhet fastslås å være gjennomgående samtidig som at PE-skummet ikke er helt tett i skjøtene." Se bildene i Figur 1 og Figur 2, alle tatt av Morten A. Forsberg.



a)

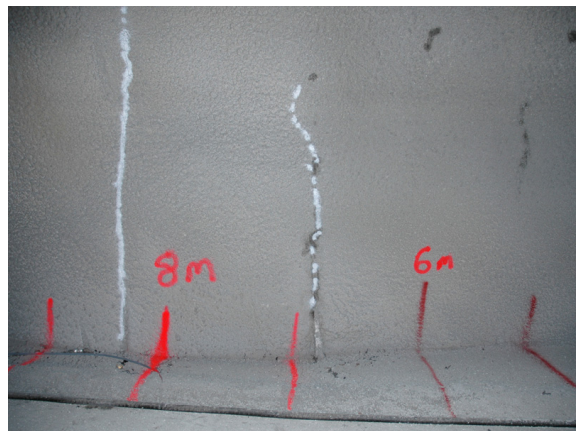


b)

Figur 1 Feltet sett nedstrøms før brannen. Markering av større riss og sprekker. Rissvidder 1-3mm. Vannlekkasjen i a) er ca 2m fra start felt. Foto: Morten A. Forsberg.



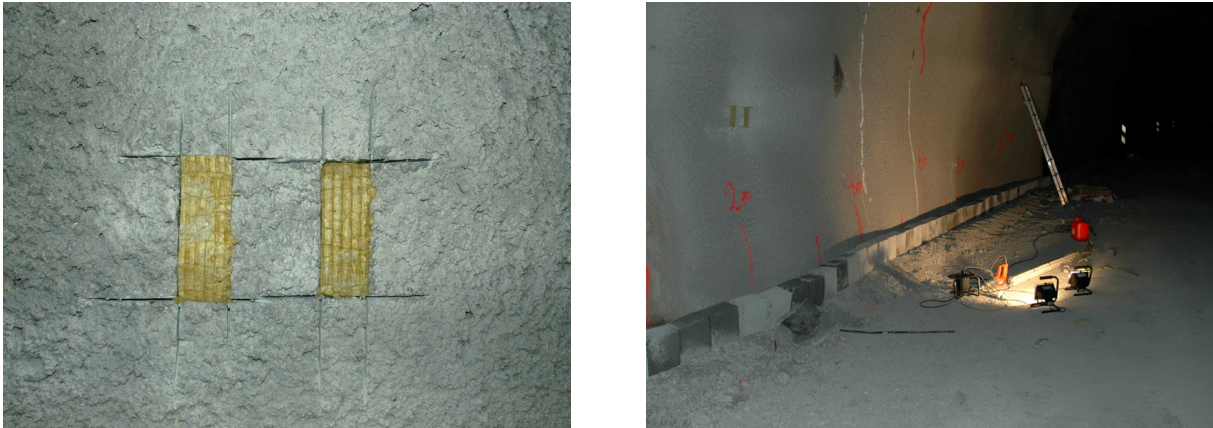
a)



b)

Figur 2 Markering av større riss og sprekker før brannen. Rissvidder 1-3mm. Vannførende riss i a) er ca 8,3m fra start felt, også markert med hvitt i b). Vannlekkasjen er 3-4m over vegbanen på høyre side. Foto: Morten A. Forsberg.

I forkant av brannforsøket ble det tatt ut seks prøver fra sprøytebetongen for å bestemme fuktinnholdet og vannmetningsgraden (DS) til sprøytebetongen. Dette ble utført av student Morten A. Forsberg etter beskrivelse fra undertegnede. Prøveuttaket var på veggen ca 2m fra hver ende av feltet mellom 1,5 og 1,7m over vegbanen. Hullene ble tettet med Rockwool for å beskytte bakenforliggende PE-skum, som vist i Figur 3. Fuktprøvingen utføres av Statens vegvesen, Sentrallaboratoriet. I skrivende stund er ikke prøvingen avsluttet (langvarig prøving), men verdiene vil bli rapportert i en kommende rapport som også tar for seg sprøytebetongens materialegenskaper før og etter brannpåkjenningen.

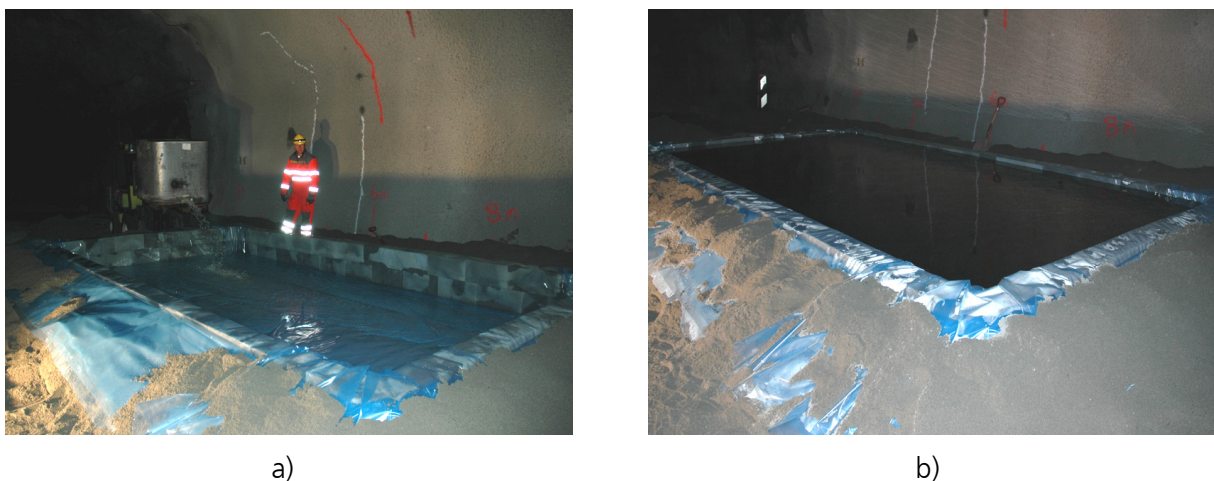


Figur 3 *Uttak av prøver for fuktbestemmelse av sprøytebetongen før brannen. Hullene ble tettet med Rockwool. Foto: Morten A. Forsberg.*

2.2 Brannens plassering og størrelse

Dagen før brannforsøket ble seks termotråder montert inn mot PE-skummet bak sprøytebetongen. Dette ble utført av Morten A. Forsberg etter anvisning og oppsyn av SINTEF NBL as ved Are Brandt. Termotrådene ble montert på venstre vegg i høyde 2 og 3m over kjørebanelen i avstand 4, 7 og 10m fra start prøvefelt. Disse punktene er markert som store sorte prikker i skissen i Figur 5. Plasseringen av termotrådene ble valgt av SINTEF NBL as.

Brannen var en dieselbrann, 20m² og 6000l diesel. Et "basseng" (6 x 3,3m) ble bygget opp inn mot venstre tunnelvegg, i avstand 4-10m fra start prøvefelt (se Figur 4). Brannen varte i ca 1,5 time, og utviklet mellom 45 og 60MW (SINTEF NBL as har estimert HRR basert på målt massestrøm og forbruk av O₂). Endelig brannstørrelse vil rapporteres av SINTEF NBL as.



Figur 4 *Oppbygging av dieselbasseng (6 x 3,3m) med Leca-blokker, plast og sand. I bunn av bassenget fylles vann, a), og deretter 30cm med diesel (6000l), b). Foto: Morten A. Forsberg.*

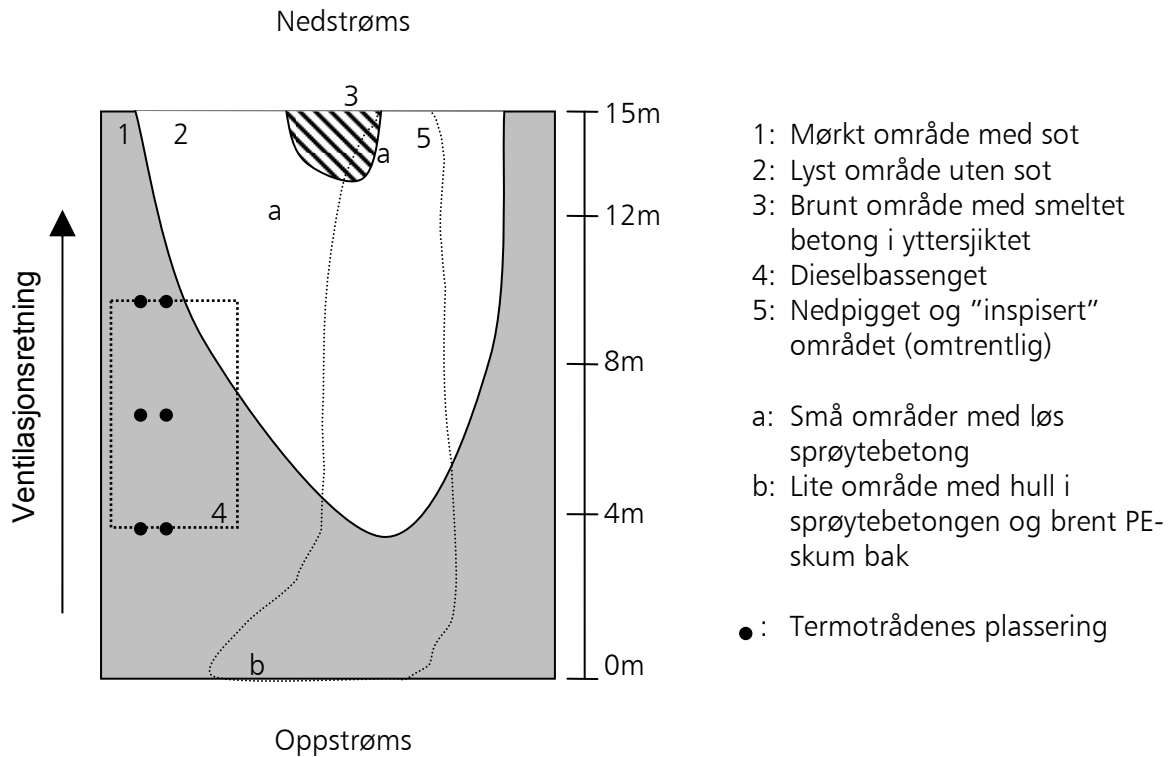
3 Observasjoner etter brannforsøket

3.1 Observasjoner av sprøytebetongen mot trafikkrommet

Sprøytebetongfeltet er helt uten avskallinger, nedfall eller store synlige skader. Det er observert en mengde grove og til dels lange sprekker både på langs og tvers av feltet. I tillegg er det observert et par mindre områder der sprøytebetongen har fått stor påkjenning, og er i ferd med å falle ned. Feltet er intakt, men oppleves som meget usikkert grunnet de grove sprekkenes. Ved nedpigging av sprøytebetongen i hengen i forbindelse med inspeksjon bak sprøytebetongen bekreftes det at sprøytebetongen i det lyse området ikke tåler mye mekanisk påkjenning før den faller ned i store flak. Sprøytebetongen i det sotede området har tydelig større fasthet og høyere "motstand mot nedfall," basert på en kvalitativ vurdering.

Prøvefeltet er tydelig "inndelt" i tre områder – ett sort, ett lyst og ett mørkebrunt. Se skissen i Figur 5 samt bildet i Figur 6. Det sorte området (område 1 i skissen) skyldes at betongen er dekket med sot. Soten dekker all betong i hele tunneltversnittet i de første 4m av prøvefeltet (oppstrøms) og deretter i minkende grad jo lenger nedstrøms man kommer i feltet. I nedstrøms ende av prøvefeltet er det kun 1-1,5m nederst på veggene som er dekket av sot, se Figur 7. Det lyse området (område 2 i skissen) har form som en kjegle, med den bredeste delen mot kanten av feltet nedstrøms. Den "spisse" delen er litt til høyre for midten av hengen, ca 4m fra oppstrøms kant. Dette området har fått langt høyere brannbelastning enn området med sot, da soten har brent bort. Det mørkebrune området (område 3 i skissen) er midt i hengen mot kanten nedstrøms, og skyldes at sprøytebetongen har smeltet i overflaten. Området er ca 1,5-2 x 1,5-2 m stort, se Figur 8. Her har temperaturen vært aller høyest, og antas å ha vært over 1250-1300°C, se Figur 9.

De sprekkenes som ble observert i forkant av brannen har utvidet seg til dels meget kraftig, og det har kommet nye sprekker. Enkelte sprekker er etter brannen i størrelsesorden 1cm brede. Dette gjelder spesielt den store sprekken som går tvers over hele feltet ca 8,3m fra start prøvefelt (se hvitmarkering i Figur 2 b)). Et par områder ca 12-13m fra oppstrøms kant er tydelig løse, og der sprøytebetongen kun henger i stålfibrene (markert som "a" i skissen i Figur 5). Disse områdene falt ned "av seg selv" ved pigging i tilstøtende områder. I kanten oppstrøms er det et lite felt der sprøytebetongen er borte (ca 20x40cm) og PE-skummet på baksiden har brent eller smeltet (markert som "b" i skissen). Bruddkantene ser ikke rene ut, dvs. det er mulig at sprøytebetongen har falt av under brannen og ikke som resultat av fjellrensk i etterkant.



Figur 5 Skisse av prøvefeltet. Feltet er "brettet ut" slik at hele tunnelprofilets bredde tegnes som bredden i rektangelet, mens lengden av feltet (15m) er lengden i rektangelet. Skissen er ikke fullstendig i skala



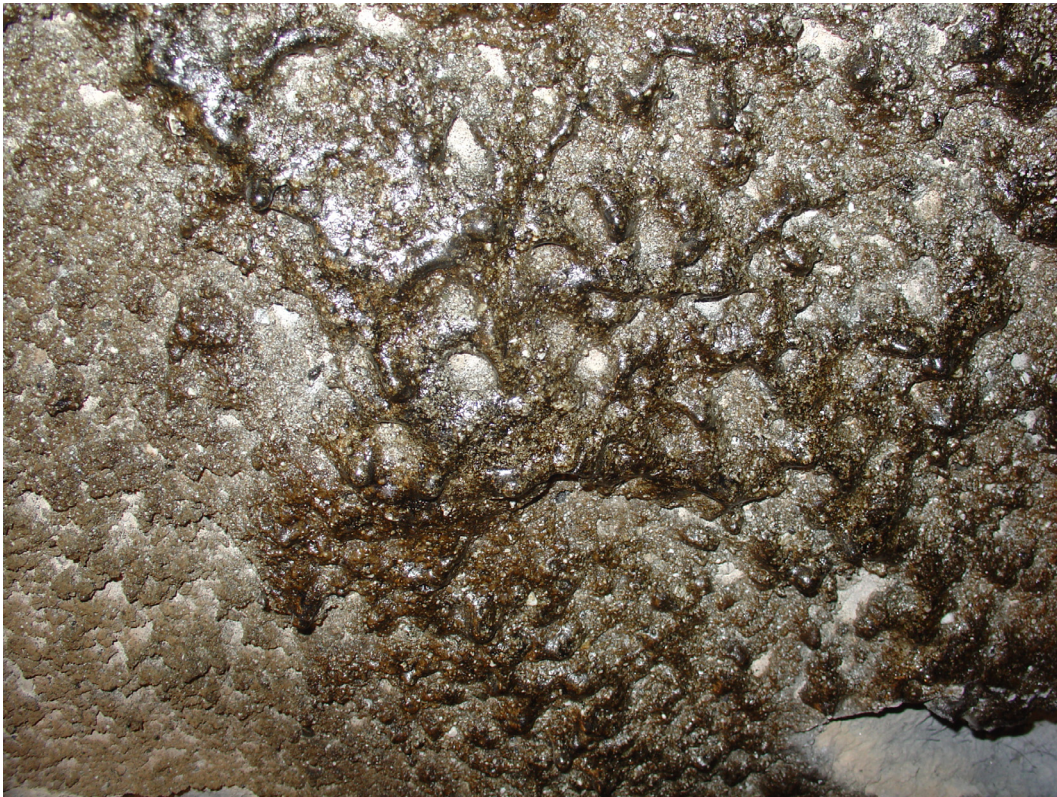
Figur 6 *Sprøytebetongfeltet etter brannen. Bildet er tatt i nedstrøms retning. Gravemaskin i ferd med å pigge opp området med smeltet betong.*



Figur 7 *Sprøytebetongfeltet etter brannen. Bildet er tatt på venstre side nedstrøms ende. Overgang mellom lyst og mørkt parti.*



Figur 8 Område med smeltet betong (til høyre i bilde). Store sprekker i sprøytebetongen (til venstre). Lyse "flekker" er støv på linsen (!).



Figur 9 Smeltet sprøytebetong, der overflatetemperaturen har vært over 1250-1300°C

3.2 Observasjoner bak sprøytebetongen

Området med smeltet sprøytebetong og videre oppstrøms til ca 7m fra oppstrøms ende ble først forsiktig pigget ned (pigghammer på gravemaskin), slik at en kunne se på baksiden av sprøytebetongen. Se område 5 i skissen. I dette området var det hulrom bak PE-skummet, som var montert delvis på profil. Hulrommet var ca 30-50cm dypt, og spredte seg i store deler av hengen fra kanten nedstrøms og oppover. PE-skummet er i relativt store deler av dette hulrommet borte (forkullet/fordampet?) og i resten av feltet smeltet helt eller delvis, se Figur 10 og Figur 11.

Jo lenger oppstrøms en kommer jo mindre er PE-skummet smeltet. Ved systematisk pigging og undersøkelse av PE-skummet bak sprøytebetongen (til å omfatte hele område 5 i skissen), er det relativt klart at det er en sammenheng mellom smelting av PE-skum og fargen på sprøytebetong. I de lyse partiene, de med høyest temperaturpåkjenning, er PE-skummet brent eller helt eller delvis smeltet, mens det i de sotede partiene, med lavere temperatur, er PE-skummet mer eller mindre upåvirket. Det er ikke observert noe smeltet PE-skum bak sotet sprøytebetong, mens det nesten er uten unntak smeltet PE-skum bak den lyse sprøytebetongen.

Sprøytebetongen er generelt relativt tynn, målt til 4-5cm mange steder, men ned i 3cm enkelte steder (få steder) og opp i 13-16cm andre steder (spesielt i forbindelse med overlappskjøter i PE-skummet). Anslått gjennomsnittlig tykkelse i hengen i det mest brannpåkjennte området er 5-6 cm. I hulrommet er det en tydelig effekt av tykkelsen av sprøytebetongen på graden av smelting av PE-skummet. I de tynne (ca 5-6cm) delene av sprøytebetongen er PE-skummet borte eller noe som tolkes som forkullet, mens i de tykke (14-16cm) er PE-skummet kun påvirket i kontaktflaten mot sprøytebetongen (se Figur 12). Dette betyr at det er sprøytebetongtemperaturen som har smeltet/påvirket PE-skummet og ikke lufttemperaturen i hulrommet. I den grad gjennomgående riss og sprekker har hatt en betydning for om PE-skum har smeltet eller antent bak sprøytebetongen er uvisst, da det er meget vanskelig å si dette i etterkant. Det er ikke gjort noen undersøkelser som kan belyse dette i denne omgang.



Figur 10 *Nedpigget sprøytebetong i området med hulrom bak PE-skummet. Feltet med smeltet sprøytebetong nede i venstre del av bildet*



Figur 11 *Nedpigget sprøytebetong i området med hulrom bak PE-skummet. Sprekk i nedkant av bildet er ved X=8,3m. Legg merke til brun farge på brent/smeltet PE-skum i kontaktflaten mot sprøytebetongen*



Figur 12 *Detalj som viser nesten upåvirket PE-skum på baksiden av ca 15cm tykk sprøytebetong fra det mest temperaturpåkjennte området.*

Berget på baksiden av hulrommet er i store trekk sort, noe som kan skyldes sot. Det har ikke vært mulig å fastslå med sikkerhet (ved prøvetaking) at det er sot på berget, grunnet usikker tilgang (med tanke på HMS og manglende sikring av sprøytebetongen). Det er observert en del småfallent berg som ligger oppå rester av PE-skum i dette hulrommet (se Figur 13). Dette kan skyldes temperatur og påkjenninger som følge av brannen. Ved å se på Figur 13 kan det tyde på at bergbiter har falt av under eller etter brannen, slik at lysere partier kommer frem. De lysere partiene er bergartens farge, mens den mørkere fargen høyst sannsynlig er sot som ligger utenpå berget. Alle synlige bergflater etter nedpigging av sprøytebetongen i dette området er tilsynelatende dekket av sot, som vist i Figur 14. Påvisning av sot på fjellet vil bekrefte at PE-skummet har antent og brent (mer eller mindre ufullstendig), sannsynligvis med begrenset tilgang på oksygen.



Figur 13 *Hulrommet bak PE-skummet før nedpigging. Småfallent fjell samt rester av gammel sprøytebetong lå oppå restene av PE-skummet. Bildet er tatt ca 11m fra oppstrøms ende (ser oppstrøms)*



Figur 14 *Fjellet i hulrommet bak PE-skummet etter nedpigging. Fjellet er tilsynelatende dekket av sot (ser nedstrøms)*

3.3 Registreringer gjort i laboratoriet

En mengde biter av sprøytebetong fra området med høyest temperatur og fra områder med lavere temperatur ble plukket opp etter at betongen falt ned som følge av piggingen. Bitene ble pakket i plast og sendt til Oslo for nærmere undersøkelse. Fem av disse bitene, heretter kalt prøver, er logget i mer detalj på laboratoriet. Se vedlegg 1 for detaljer.

Det er observert det som antas å være forkullet PE-skum på baksiden av fire av prøvene, og i alle tilfellene er PE-skummet sterkt smeltet eller brent på baksiden av sprøytebetongen.

For de undersøkte prøvene gjelder generelt at sprøytebetongen har en tydelig fargeforandring gjennom tykkelsen. Fargeforandringen skyldes endring av mineraler og sementhydrater som følge av høy temperatur. Det er kjent fra litteraturen at slik fargeforandring skjer, men forandringen er meget avhengig av tilslaget (bergarten) og sementtype og annet bindemiddel. Det ble derfor gjort et enkelt forsøk der små biter (ca 2x4x1 cm) av sprøytebetong (fra prøvene til fuktbestemmelse tatt ut i forkant av brannforsøket) ble eksponert for temperaturer fra 300 til 1100 °C i intervaller på 100 °C i en glødeovn. Ved å sammenligne fargen på småbitene med fargen på de ulike sjiktene i prøven, kan en på en forenklet måte estimere temperaturen i sprøytebetongen i de ulike tykkelsesintervaller. For en mer nøyaktig undersøkelse må kalibrerte fargemålere eller fotografier tatt under kalibrerte og standardiserte lysforhold eller lignende metoder anvendes (dette er ikke gjort).

3.4 Estimering av temperaturprofil gjennom sprøytebetongen

På basis av de estimerte temperaturene for ulike dybder, kan en beregne temperaturforløpet ved hjelp av ligningen for 1D varmetransport:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

T	temperatur (°C)
t	tiden (s)
x	avstand eller dybde (m)
λ	termisk konduktivitet (W/mK)
ρ	densitet (kg/m ³)
c	spesifikk varmekapasitet (J/kgK)
α	termisk diffusivitet (m ² /s)

Denne ligningen har løsning:

$$T(x,t) = T_s - (T_s - T_0) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha \cdot t}}\right) \quad (2)$$

T(x,t)	temperaturen som funksjon av tid og dybde
T _s	overflatetemperatur
T ₀	bakgrunnstemperatur (initial-/baksidetemperatur)
erf()	feilfunksjonen

For en beregning trenger en altså overflatetemperaturen, tiden denne temperaturen har vært konstant (det antas konstant overflatetemperatur for enkelhetsskyld) og temperaturen på baksiden av sprøytebetongen. Da kan en beregne et teoretisk temperaturprofil gjennom sprøytebetongen, og sammenligne dette med estimerte temperaturer ved ulike dybder. Alternativt kan en beregne overflate- og bakgrunnstemperaturen på basis av en gitt branntid og de estimerte temperaturene ved ulike dybder. Det siste er gjort med valg av 30 minutter eksponering ved den estimerte maksimale overflatetemperaturen. Detaljer finnes i vedlegg 2 og 3.

Tabellen under oppsummerer de beregnede temperaturene i sprøytebetongen for tykkelse 60 og 80mm for prøvene B-E. Valget av disse tykkelsene er gjort ut fra de per i dag godkjente løsningene for brannisolasjon av PE-skum ved bruk av sprøytebetong. Det gjøres oppmerksom på at beregningene er noe usikre, og at de kun gir en formening om hvilken temperatur som har vært i sprøytebetongen i de valgte tykkelsene.

Tabell 1 *Beregnet temperatur i sprøytebetongen for tykkelser 60 og 80mm. Basert på fargeforandring i betongen ved ulike dybder. Prøver fra hengen.*

Prøve	Prøvens tykkelse	Beregnet temperatur, °C		Observasjoner av PE-skum på baksiden av prøven	Plassering av prøven (fra oppstrøms ende)
		60mm	80mm		
B	50-70	387	258	Smeltet/brent, forkulling	10-12m
C	45-70	569	475	Smeltet/brent, forkulling	4-6m
D	45-55	398	268	Tegn på forkulling	10-12m
E	55-110	381	253	Smeltet/brent ikke forkulling	10-12m

For prøve C er det kun estimerte temperaturer fra to dybder, noe som gjør beregningene ekstra usikre

4 Diskusjon av observasjoner og resultater

Nedenfor er det gitt en kortfattet diskusjon av de mest sentrale observasjoner og resultater. Hensikten er ikke å pløye dypt i materien, men gi en oversikt over sikre og usikre momenter.

Generelt må en ha resultater fra minst to relativt like forsøk for å kunne trekke klare konklusjoner. Resultater fra kun ett forsøk vil alltid være beheftet med usikkerhet knyttet til variasjoner i prøveoppsett, målinger og registrering.

4.1 Temperaturpåkjenningen i prøvelfeltet

Ut fra observasjonene synes det klart at det har vært relativt store temperaturforskjeller i prøvelfeltet. Den sterkeste indikasjonen på dette er området med og uten sot på betongoverflaten. Sot i dette tilfellet vil sannsynligvis være delvis uforbrent diesel blandet med karbon i ulike forhold. Dersom en kunne bestemme den temperaturen som medførte forbrenning av soten, kunne en med sikkerhet si hva temperaturen hadde vært i grensesonen mellom det mørke og lyse området i feltet. Karbonholdig sot i avgasser fra dieselmotorer antenner i luft rundt 550-600 °C (<http://www.meca.org/galleries/default-file/diesel.pdf>), mens kull har tenntemperatur på ca 750 °C (<http://logichem.netpower.no/datasheet.aspx?ild=23377&iDepld=2532>). Dersom en antar at

soten i dette tilfellet består av en blanding av disse to "stoffene", betyr det at det mørke området har hatt temperaturer under 550-600 °C, mens det lyse området har hatt temperaturer over 750 °C. For området med smeltet betong vet vi at temperaturene har vært over 1250-1300 °C, noe som altså betyr at temperaturbelastningen har variert mellom under 600 og (kanskje over) 1300 °C i dette forsøket.

Slike store variasjoner i temperaturene i prøvefeltet har selvfølgelig konsekvenser for tolkning av resultater og evaluering av brannforsøket. I denne sammenheng er plassering av termotråder for måling av temperaturen på baksiden av sprøytebetongen meget sentralt. Dette må ses opp mot kravene som stilles til dokumentasjon av løsninger for brannbeskyttelse av PE-skum i HB163. I dette brannforsøket ble termotrådene plassert i et område som ikke hadde en temperaturbelastning som representerer kravene til brannbelastning i HB163. De målte temperaturene bak sprøytebetongen vil således ikke være relevante å sammenligne med kravene.

Kravene sier at gjennomsnittelig temperatur bak sprøytebetongen (eller andre beskyttelsesmaterialer) skal være mindre enn 250 °C etter 60 minutter brannpåkjenning. For tunnelklassene C og E er brannbelastningen 50MW, mens det for tunnelklassene D og E er 100MW. I begge tilfellene er brannbelastningen representert ved HC-kurven, som raskt går opp til 1100 °C og forblir der gjennom hele brannforløpet. Brannforsøket har vist at temperaturene for en 50MW brann kan bli langt høyere enn det HC-kurven gir, noe som kan få konsekvenser for de stillede krav og/eller for gjennomføringen eller oppsettet av brannforsøk.

De beregnede temperaturene i sprøytebetongen ved tykkelse 80mm (fra Tabell 1) er alle over 250 °C, og vil således bety at kravene til brannbeskyttelse ikke er oppfylt. Det må imidlertid understrekes at beregningene er usikre, samt at brannbelastningen i tid og temperatur sannsynligvis har vært større enn kravene tilsier (gastemperaturer i prøvefeltet ble ikke målt av SINTEF NBL as grunnet feil ved måleutstyret). Forsøket viser at det kan være behov for å vurdere de oppsatte krav, både med tanke på brannbelastning og temperatur bak brannbeskyttelsen, mot reelle erfaringer fra store og relevante brannforsøk.

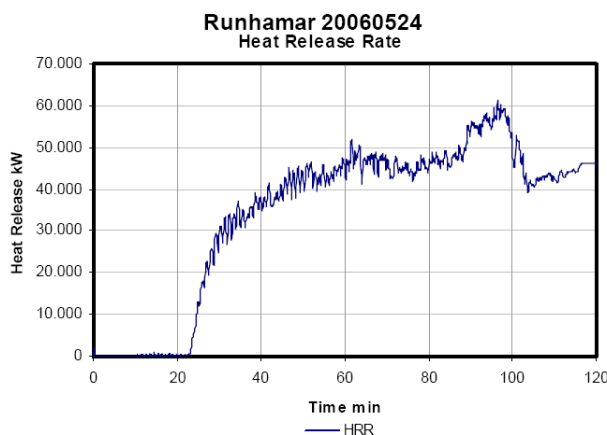
4.2 Har PE-skum brent bak sprøytebetongen?

Antennelsestemperaturen for PE-skum er 380-410 °C, mens smeltetemperaturen er 105-130 °C (avhengig av densitet). Det er gjort et enkelt forsøk i laboratoriet, der biter av det aktuelle PE-skummet (tatt med fra prøvefeltet) ble eksponert for 110, 150, 200, 250 og 300 °C i en ovn. Allerede ved 110 °C er PE-skummet påvirket, ved at overflaten skrumper seg sammen og biten har blitt mindre. Ved 150 °C er PE-skummet smeltet og har flytt ut i prøvebeholderen. Det er ikke gjort forsøk på å antenne PE-skummet i denne undersøkelsen.

Det går altså frem av Tabell 1 at PE-skummet kan antenne bak sprøytebetong med tykkelser på 60mm eller mindre i dette forsøket, da de beregnede temperaturene for dybde 60mm er over 380 °C. Dette støtter opp om observasjonene av det som ser ut som forkullet PE-skum bak sprøytebetongen (se vedlegg 1) og sot på berget i hulrommet bak PE-skummet.

Brannen varte i ca 1,5 time, og utviklet ca 45MW (HRR) etter ca 45min. Dette var konstant i ca 30min. Deretter økte HRR til ca 60MW de neste 10-12min, for deretter å falle tilbake til 40-45MW. Se Figur 15. Dette kan bety at PE-skum har antent og bidratt til brannen. Det vil i så fall falle inn i mønsteret av observasjoner som indikerer at PE-skum har brent i dette forsøket. Det er observert nedsmelting av ubeskyttet PE-skum ca 50m oppstrøms brannen, som indikerer relativt høye temperaturer (over ca 150 °C) et stykke oppstrøms brannen. PE-skum nedstrøms brannen vil være utsatt for enda høyere temperaturer, og det er ikke utelukket at dette PE-skummet kan

ha antent og bidratt til brannen. Det er sannsynligvis også andre årsaker til at HRR kan stige, så en får avvente den endelige rapporten fra SINTEF NBLas når det gjelder vurderinger av denne økningen i HRR.



Figur 15 Utregnet HRR basert på O_2 forbruk og massestrøm, fra SINETF NBL rapporten (utkast fra 29.06.2006)

4.3 Beregnede temperaturer

Valg av verdier på inputparametrene har selvfølgelig stor betydning for resultatene. Spesielt er det varigheten av brannen som påvirker resultatene, i tillegg til overflatetemperaturen. Det er gjort en vurdering av hvordan de estimerte (fargeforskjellene) temperaturene passer inn i en teoretisk temperaturprofil ved varierende brannvarighet. Se vedlegg 2, der målepunktene er plottet inn i teoretiske kurver for 1100 og 1300 °C overflatetemperatur. Valget av disse overflatetemperaturene er gjort ut fra HC-kurven (1100 °C) og observasjonen av smeltet betong (1300 °C). Fargeforskjellene er registrert over et dybdeintervall, noe som kan ha stor innvirkning på beregningene. Ytterpunktene i disse intervallene er plottet inn i de teoretiske kurvene, og det er gjort en vurdering av hva som er det mest relevante tilfellet.

Det er valgt å basere beregningene på intervallets dypeste punkt og en varighet av brannen på 30 minutter ved overflatetemperatur ca 1300 °C. Den reelle brannen varte i ca 1,5 timer, og her har temperaturen steget raskt (tilsvarende HC-kurven). Av den grunn er det ikke urealistisk at de høyeste temperaturene har virket i 30 minutter. Sannsynligvis er varigheten enda lengre.

5 Konklusjoner

Dieselbrannen på ca 50MW har medført temperaturer opp mot og muligens over 1300 °C i ett lite område midt i tunneltaket nedstrøms brannen. Det har vært store temperaturforskjeller i prøvefeltet, med et stort område med temperaturer mellom 750 °C og 1300 °C og et like stort område med temperaturer lavere enn ca 600 °C.

Sprøytebetongen har ikke tegn på avskalling eller nedfall, noe som tilskrives tilsetningen av pp-fiber og stålfiber i betongen. Bortsett fra smeltet betong i ett område, er feltet visuelt intakt. Store og grove sprekker deler imidlertid opp feltet, og det er lite mekanisk påkjenning som skal til før sprøytebetongen faller ned. Stålfiberen har utvilsomt hjulpet til at betong ikke har falt ned

under og etter brannen. Riss og sprekker som var i sprøytebetongen før brannforsøket har utvidet seg til dels meget, og det har kommet nye og grove sprekker som følge av brannen.

PE-skum har høyst sannsynlig antent og brent i store områder bak sprøytebetongen. I andre deler av feltet der temperaturpåkjenningen har vært stor, har PE-skum smeltet helt eller delvis bak sprøytebetongen. Det er generelt tynn sprøytebetong i store deler av hengen (veggene er ikke undersøkt), med tykkelser i området 4-6 cm. Her har PE-skummet bak sprøytebetongen brent og forkullet eller i sterkt grad smeltet. For sprøytebetong med tykkelse over 8-10 cm har PE-skummet smeltet i noen grad. For tykkelser over 12-14 cm er PE-skummet nær upåvirket av brannpåkjenningen. Disse resultatene vil kunne få konsekvenser for hvilke krav som skal stilles til brannbeskyttelse av PE-skum med ordinær sprøytebetong.

Observasjonene og de tilhørende funnene vil kunne få konsekvenser for oppsettet av fremtidige brannforsøk, spesielt med tanke på instrumentering (antall og plassering av temperaturfølere for å måle temperaturer foran og bak sprøytebetong, samt muligens i hulrom bak PE-skum), størrelse og type brann og prøvetaking i for- og etterkant.

Det er viktig med strenge sikringstiltak og inspeksjonsrutiner etter slike brannforsøk. Feltet med sprøytebetong var visuelt intakt, men falt relativt enkelt ned ved mekanisk påkjenning. Sprøytebetongen har grunnet de høye temperaturene fått sterkt redusert fasthet og mekaniske egenskaper. All brannekspontert sprøytebetong må tas ned og erstattes ved branner av slik størrelse som i dette forsøket.

Vedlegg 1

Logging av biter av sprøytebetong

Prosjekt: Runehamar branntest mai 06	Journalnr.:	Side 1 av 3
--------------------------------------	-------------	-------------

Dato: 20.06.2006	Utført av: CKL	Oppdragsgiver: TEK
------------------	----------------	--------------------

Beskrivelse av prøven / betongen

Innpakking ved ankomst:

Merkning ved ankomst: - Merkes A	Er prøven hel?:
----------------------------------	-----------------

Tykkelse (mm):35-45	Lengde (mm):230	Bredde (mm):220
---------------------	-----------------	-----------------

Betongkvalitet:	Tilslag:
-----------------	----------

Sementtype:	Pozzolaner:
-------------	-------------

Er det armering i prøven?:	Annen beskrivelse av armeringen:
----------------------------	----------------------------------

O _d til 1. lag (mm):	Stålfiber
---------------------------------	-----------

Ø arm. i 1. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

O _d til 2. lag (mm):	
---------------------------------	--

Ø arm. i 2. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

O _d til 3. lag (mm):	
---------------------------------	--

Ø arm. i 3. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

Beskrivelse av evt. betongskader (type, omfang, riss, utfellinger, avskallinger, ...):

Prøven tatt fra hengen i området med lys overflate.

X=ca 4-5m (ikke det varmeste området)

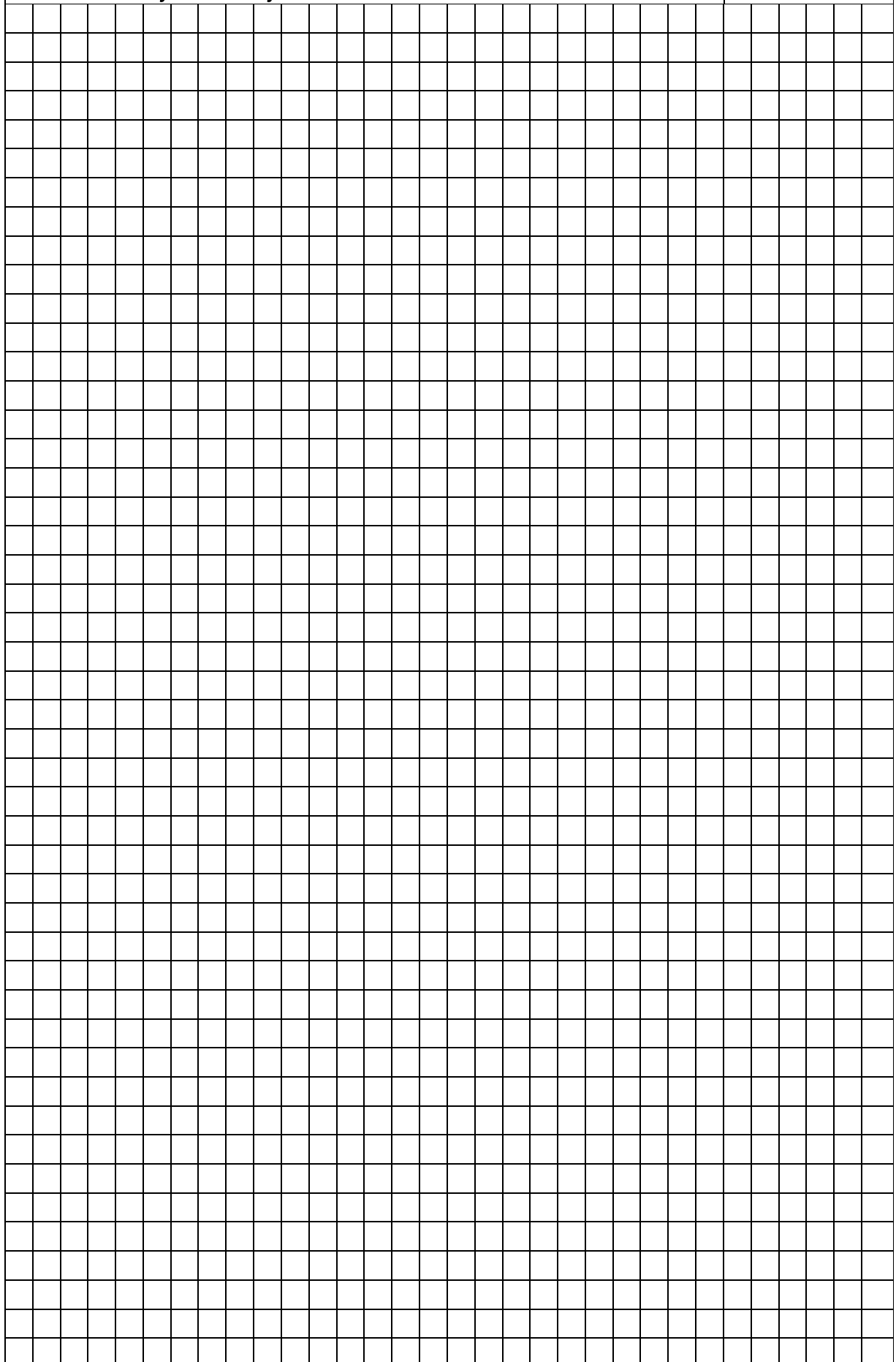
PE-skum har løsnet, og på små områder bak tegn på smeltet PE-skum

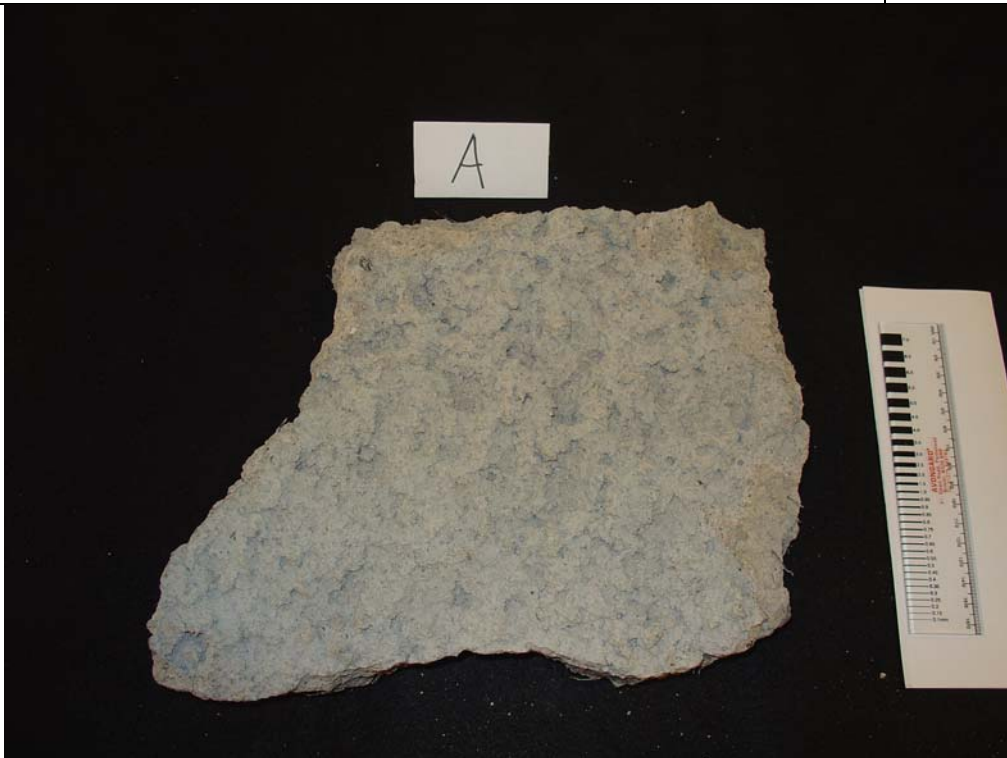
Fargeforandring, lys rosa aktig, 12-15mm fra overflaten.

Hvilke undersøkelser skal utføres på kjernen:

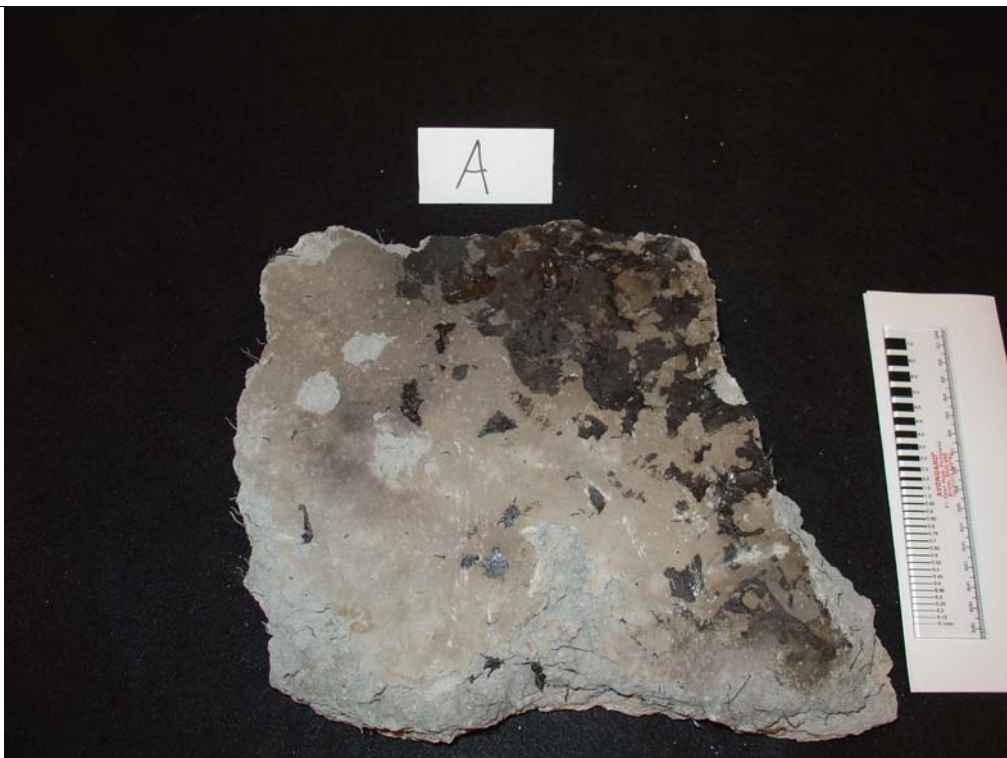
Type undersøkelse	Referanse
_____	_____
_____	_____
_____	_____

Bilder og evt. skisser settes inn fortløpende etter denne siden





Beskrivelse: Fremsiden



Beskrivelse: Baksiden

Logging av biter av sprøytebetong

Prosjekt: Runehamar branntest mai 06	Journalnr.:	Side 1 av 4
--------------------------------------	-------------	-------------

Dato: 20.06.2006	Utført av: CKL	Oppdragsgiver: TEK
------------------	----------------	--------------------

Beskrivelse av prøven / betongen

Innpakking ved ankomst:

Merkning ved ankomst: - Merkes B	Er prøven hel?:
----------------------------------	-----------------

Tykkelse (mm):50-70	Lengde (mm):210-270	Bredde (mm):130-220
---------------------	---------------------	---------------------

Betongkvalitet:	Tilslag:
-----------------	----------

Sementtype:	Pozzolaner:
-------------	-------------

Er det armering i prøven?:	Annen beskrivelse av armeringen:
----------------------------	----------------------------------

O _d til 1. lag (mm):	Stålfiber
---------------------------------	-----------

Ø arm. i 1. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

O _d til 2. lag (mm):	
---------------------------------	--

Ø arm. i 2. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

O _d til 3. lag (mm):	
---------------------------------	--

Ø arm. i 3. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

Beskrivelse av evt. betongskader (type, omfang, riss, utfellinger, avskallinger, ...):

Prøven tatt fra hengen i området med lys overflate.
 X=ca 10-12m (det varmeste området)
 Betongoverflaten viser tegn til å begynne å smelte. De ytterste 1-2mm er mørkere (brunaktig).
 Fargeforandring innover i prøven:

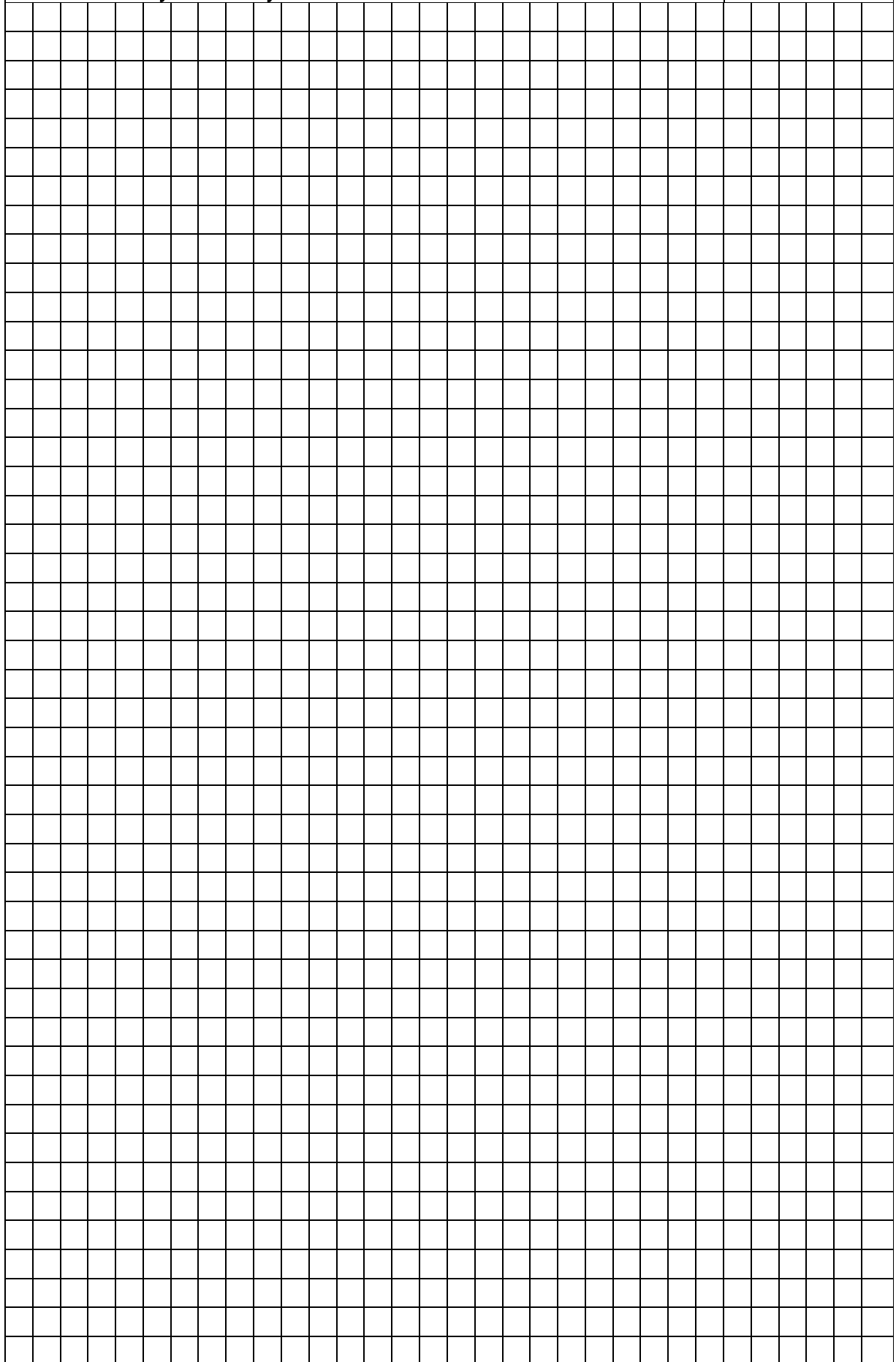
- 0-1/2: mørkere brun
- 1/2-8/10: rosaaktig
- 8/10-20/22: matt gulaktig (overgang mot rosa/gul ytterst og gul/grå innerst)

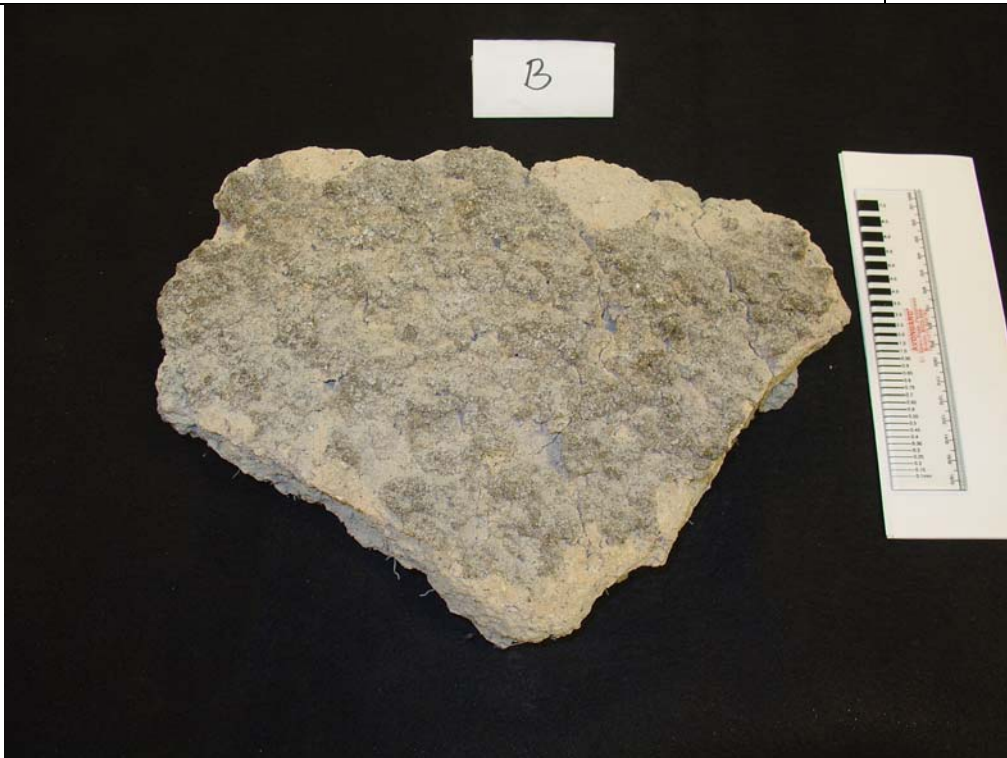
PE-skum har smeltet/brent på hele baksiden, tegn på «forkulling» av PE-skum

Hvilke undersøkelser skal utføres på kjernen:

Type undersøkelse	Referanse
_____	_____
_____	_____
_____	_____

Bilder og evt. skisser settes inn fortløpende etter denne siden





Beskrivelse: Fremsiden



Beskrivelse: Baksiden



Beskrivelse: Forkullet PE-skum (?) på baksiden av sprøytebetongen

Logging av biter av sprøytebetong

Prosjekt: Runehamar branntest mai 06 Journalnr.: Side 1 av 3

Dato: 26.06.2006 Utført av: CKL Oppdragsgiver: TEK

Beskrivelse av prøven / betongen

Innpakking ved ankomst:

Merking ved ankomst: - Merkes C Er prøven hel?:

Tykkelse (mm):45-70 Lengde (mm):90-250 Bredde (mm):110-280

Betongkvalitet: Tilslag:

Sementtype: Pozzolaner:

Er det armering i prøven?: Annen beskrivelse av armeringen:

O_d til 1. lag (mm): Stålfiber

Ø arm. i 1. lag (mm):

Arm.korrosjon:

O_d til 2. lag (mm):

Ø arm. i 2. lag (mm):

Arm.korrosjon:

O_d til 3. lag (mm):

Ø arm. i 3. lag (mm):

Arm.korrosjon:

Beskrivelse av evt. betongskader (type, omfang, riss, utfellinger, avskallinger, ...):

Prøven tatt fra hengen i grenseområdet lys/sort overflate, med et tynt sotlag.
X=ca 6-4m (mot det varmeste området)

Fargeforandring innover i prøven:

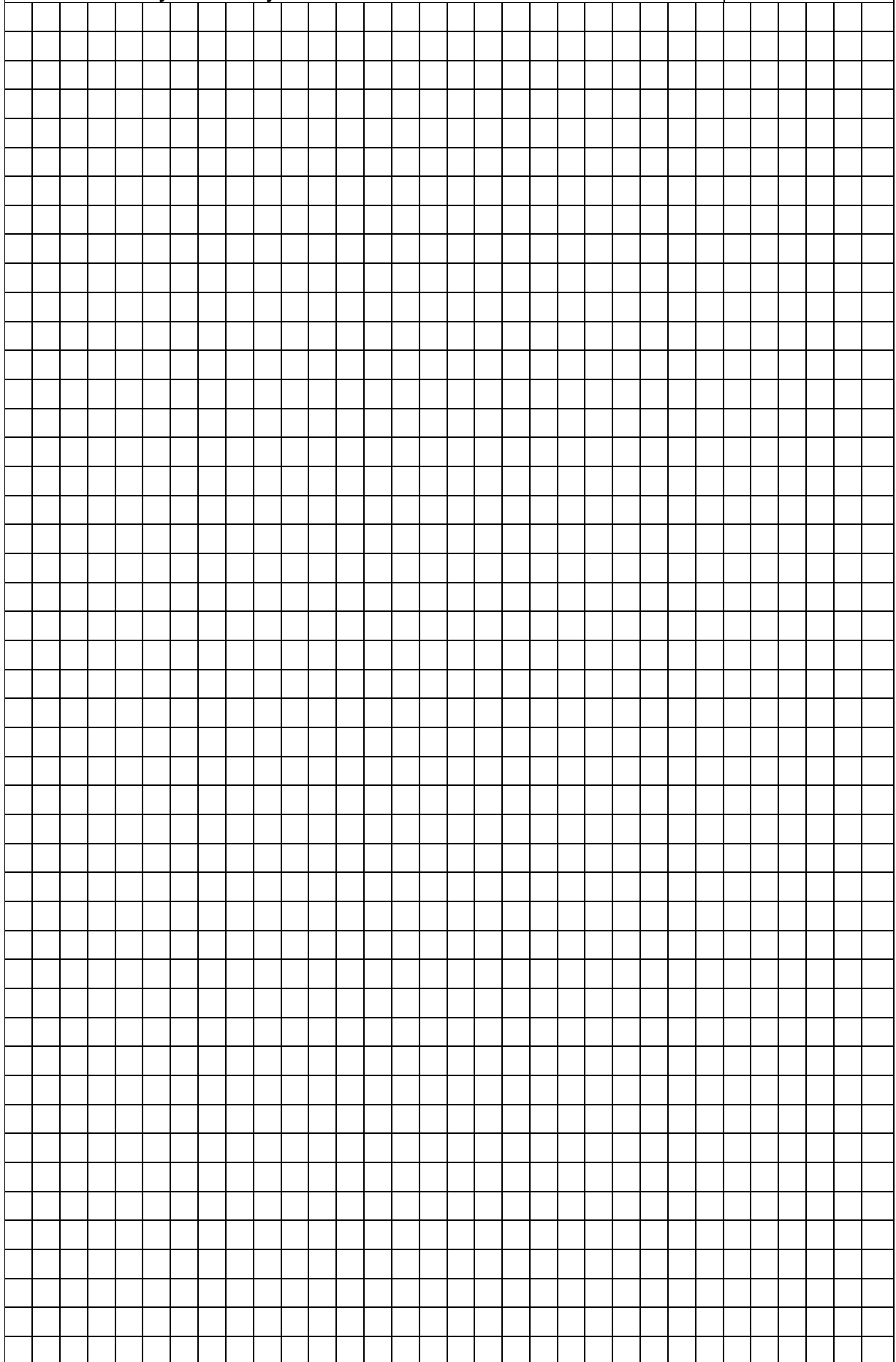
- 0-10: rosaaktig
- 10-25: matt gulaktig (overgang mot rosa/gul ytterst og gul/grå innerst)
- resten grå

PE-skum har smeltet/brent på hele baksiden, tegn på «forkulling» PE-skum

Hvilke undersøkelser skal utføres på kjernen:

Type undersøkelse Referanse

Bilder og evt. skisser settes inn fortløpende etter denne siden





Beskrivelse: Fremsiden



Beskrivelse: Baksiden

Logging av biter av sprøytebetong

Prosjekt: Runehamar branntest mai 06	Journalnr.:	Side 1 av 4
--------------------------------------	-------------	-------------

Dato: 26.06.2006	Utført av: CKL	Oppdragsgiver: TEK
------------------	----------------	--------------------

Beskrivelse av prøven / betongen

Innpakking ved ankomst:

Merkning ved ankomst: - Merkes D	Er prøven hel?:
----------------------------------	-----------------

Tykkelse (mm):45-55	Lengde (mm):140-270	Bredde (mm):100-260
---------------------	---------------------	---------------------

Betongkvalitet:	Tilslag:
-----------------	----------

Sementtype:	Pozzolaner:
-------------	-------------

Er det armering i prøven?:	Annen beskrivelse av armeringen:
----------------------------	----------------------------------

O _d til 1. lag (mm):	Stålfiber
---------------------------------	-----------

Ø arm. i 1. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

O _d til 2. lag (mm):	
---------------------------------	--

Ø arm. i 2. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

O _d til 3. lag (mm):	
---------------------------------	--

Ø arm. i 3. lag (mm):	
-----------------------	--

Arm.korrosjon:	
----------------	--

Beskrivelse av evt. betongskader (type, omfang, riss, utfellinger, avskallinger, ...):

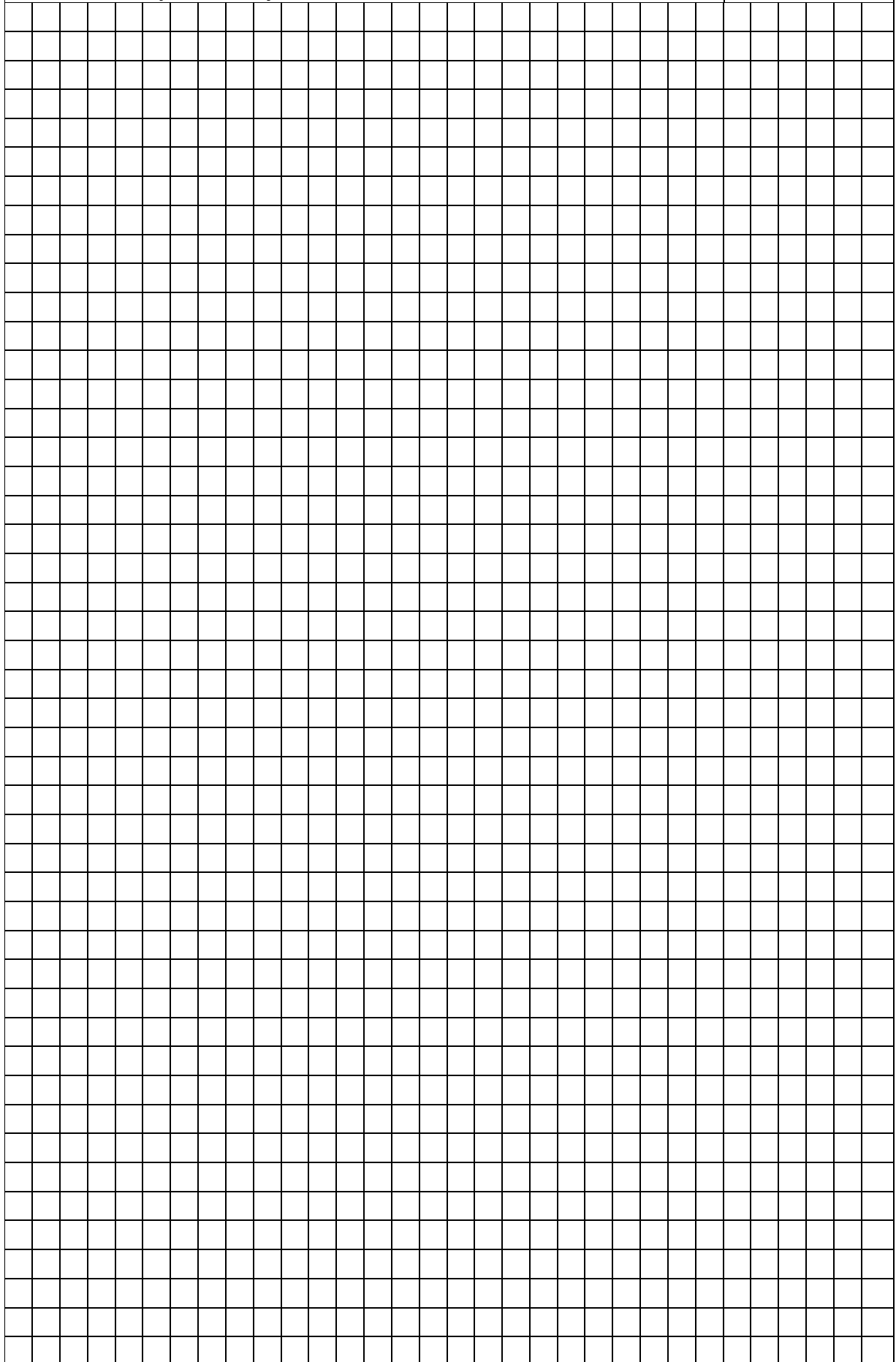
Prøven tatt fra hengen i området med lys overflate.
 X=ca 10-12m (det varmeste området)
 Betongoverflaten viser tegn til å begynne å smelte. De ytterste 1-2mm er mørkere (brunaktig).
 Fargeforandring innover i prøven:

- 0-1: mørkere brun
- 1-10/12: rosaaktig
- 10/12-20/25: matt gulaktig (overgang mot rosa/gul ytterst og gul/grå innerst)

PE-skum har smeltet/brent på liten del av baksiden, tegn på «forkulling» av PE-skum i ett hjørne. Store deler uten PE-skum-rester - har PE-skum falt av, løsnet før det «brant», ...?

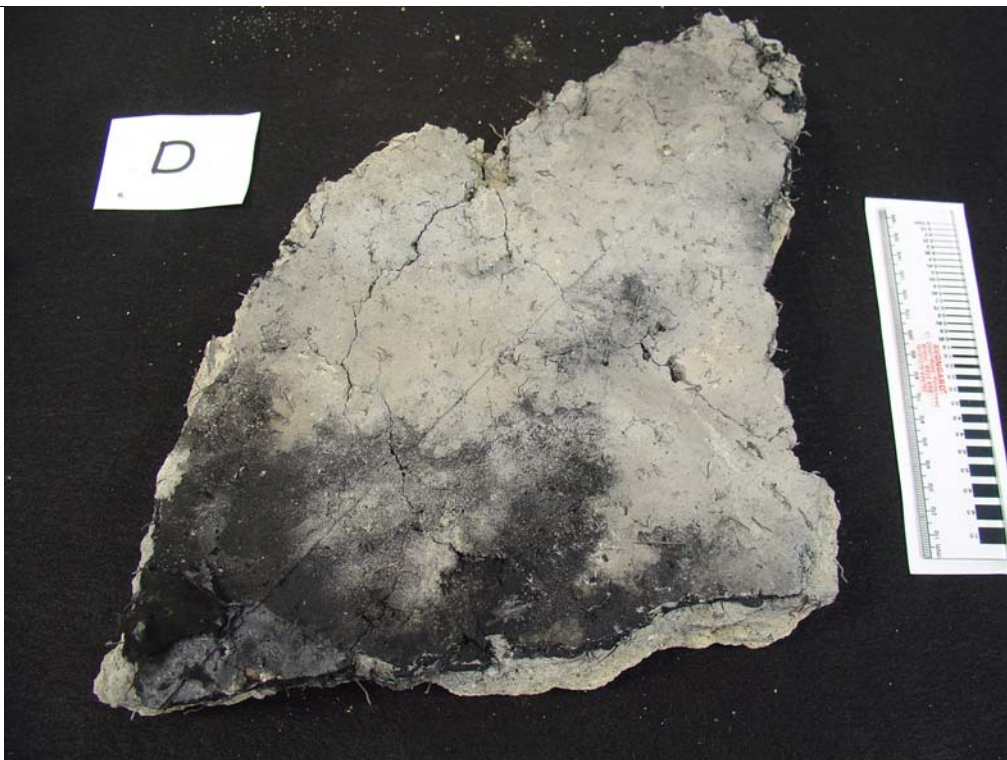
Hvilke undersøkelser skal utføres på kjernen:	
Type undersøkelse	Referanse
_____	_____
_____	_____
_____	_____

Bilder og evt. skisser settes inn fortløpende etter denne siden





Beskrivelse: Fremsiden



Beskrivelse: Baksiden



Beskrivelse: Forkullet PE-skum (?) på baksiden av sprøytebetongen

Logging av biter av sprøytebetong

Prosjekt: Runehamar branntest mai 06	Journalnr.:	Side 1 av 4
--------------------------------------	-------------	-------------

Dato: 26.06.2006	Utført av: CKL	Oppdragsgiver: TEK
------------------	----------------	--------------------

Beskrivelse av prøven / betongen

Innpakking ved ankomst:

Merkning ved ankomst: - Merkes E	Er prøven hel?:
----------------------------------	-----------------

Tykkelse (mm):55-110	Lengde (mm):240-290	Bredde (mm):140-220
----------------------	---------------------	---------------------

Betongkvalitet:	Tilslag:
-----------------	----------

Sementtype:	Pozzolaner:
-------------	-------------

Er det armering i prøven?:	Annen beskrivelse av armeringen:
----------------------------	----------------------------------

O _d til 1. lag (mm):	Stålfiber
---------------------------------	-----------

Ø arm. i 1. lag (mm):	Stålfiber
-----------------------	-----------

Arm.korrosjon:	Stålfiber
----------------	-----------

O _d til 2. lag (mm):	Stålfiber
---------------------------------	-----------

Ø arm. i 2. lag (mm):	Stålfiber
-----------------------	-----------

Arm.korrosjon:	Stålfiber
----------------	-----------

O _d til 3. lag (mm):	Stålfiber
---------------------------------	-----------

Ø arm. i 3. lag (mm):	Stålfiber
-----------------------	-----------

Arm.korrosjon:	Stålfiber
----------------	-----------

Beskrivelse av evt. betongskader (type, omfang, riss, utfellinger, avskallinger, ...):

Prøven tatt fra hengen i området med lys overflate.
X=ca 10-12m (det varmeste området).

Betongoverflaten viser tegn til å begynne å smelte. De ytterste 1-2mm er mørkere (brunaktig).

Fargeforandring innover i prøven:

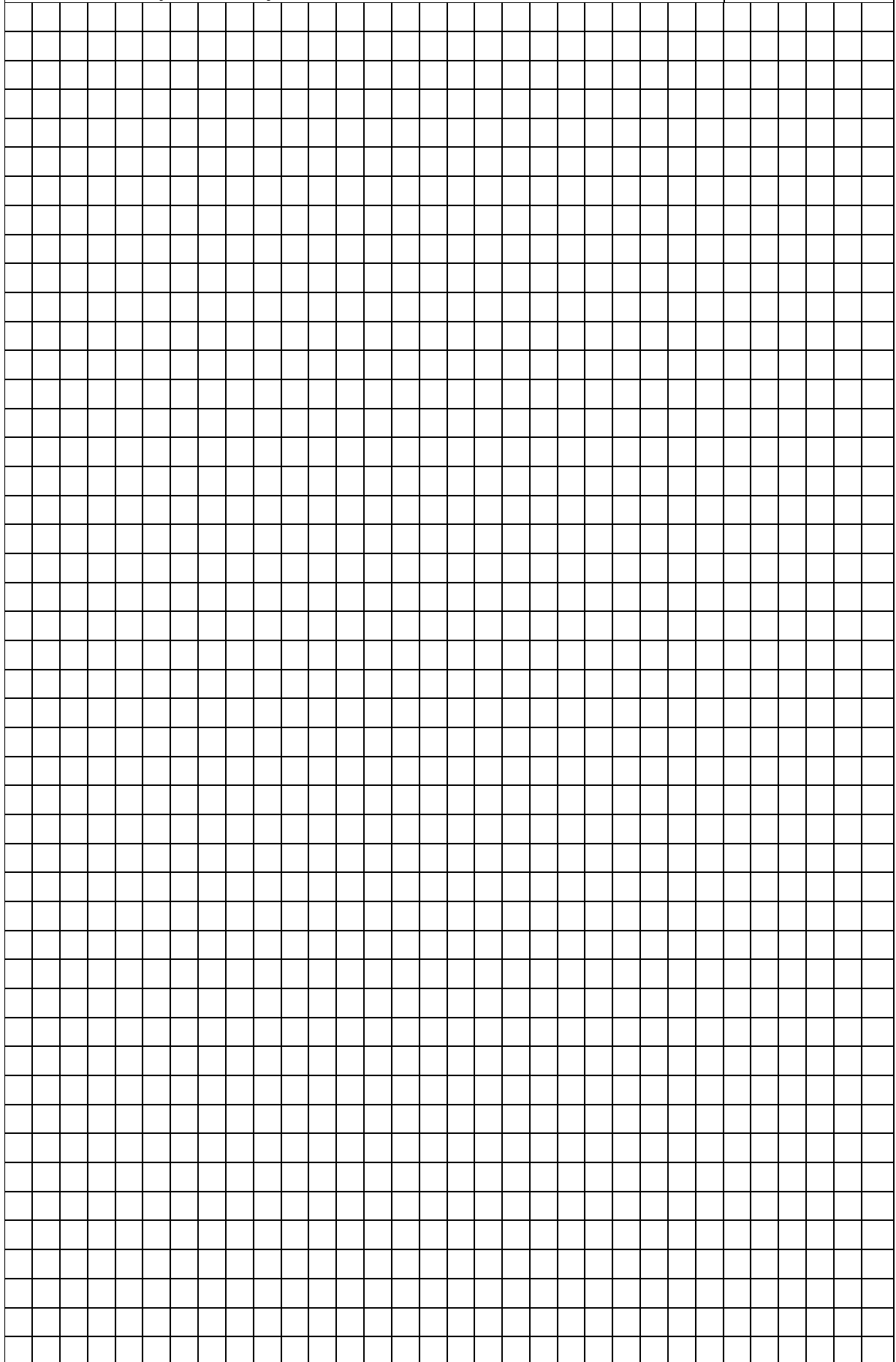
- 0-1: mørkere brun
- 1-5/10: rosaaktig
- 5/10-15/25: matt gulaktig (overgang mot rosa/gul ytterst og gul/grå innerst)

PE-skum har smeltet/brent på hele baksiden, tegn på «forkulling» av PE-skum. Stor bit av smeltet PE-skum henger fast i stålfibrene. Enkelte brune flater inn mot betongen på baksiden (brente rester av PE-skum??)

Hvilke undersøkelser skal utføres på kjernen:

Type undersøkelse	Referanse

Bilder og evt. skisser settes inn fortløpende etter denne siden





Beskrivelse: Fremsiden



Beskrivelse: Baksiden



Beskrivelse: Smeltet/forkullet PE-skum (?) på baksiden av sprøytebetongen. Legg merke til brunt område (tynt brunt lag bak smeltet/brent PE-skum, inn mot betongen).



Beskrivelse: Forkullet PE-skum (?) på baksiden av sprøytebetongen

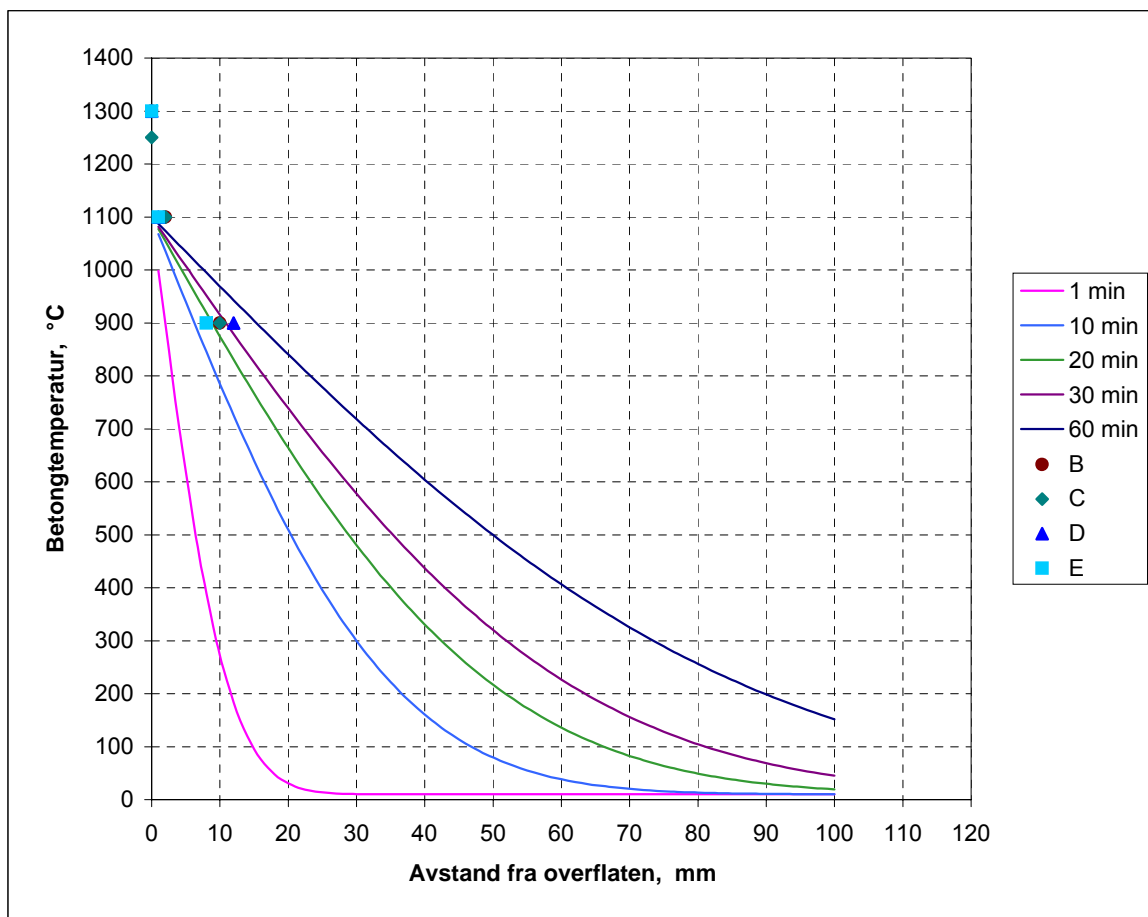
Vedlegg 2

Teoretisk temperaturprofil gjennom betong

Tykkelse		mm	
λ (term.kond.)	1.20	W/mK	0.8-1.4 880
c (spes.varmekap.)	880	J/kgK	
ρ (densitet)	2250	kg/m ³	
$\alpha = \lambda / \rho c$	0.61	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	
Eksponert tid		sekunder	
Bakgrunns temp.	10	°C	
Overflate temp.	1100	°C	

Tid	Temp. ved 80mm
1 min	10
10 min	13
20 min	49
30 min	105
60 min	256

Estimerte temperaturer i betongen basert på den grunneste del av inntervallet med fargeforandring (minst konservativ)

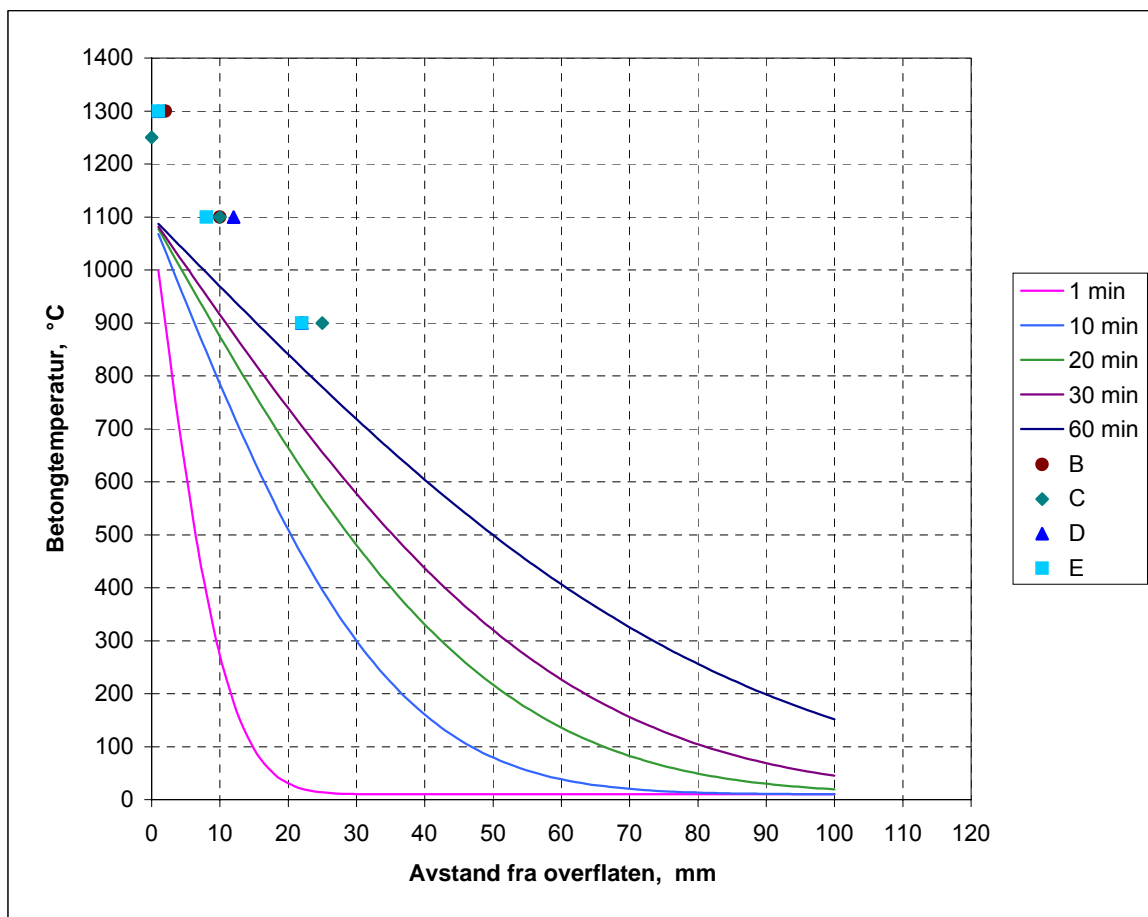


Teoretisk temperaturprofil gjennom betong

Tykkelse		mm	
λ (term.kond.)	1.20	W/mK	0.8-1.4 880
c (spes.varmekap.)	880	J/kgK	
ρ (densitet)	2250	kg/m ³	
$\alpha = \lambda / \rho c$	0.61	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	
Eksponert tid		sekunder	
Bakgrunns temp.	10	°C	
Overflate temp.	1100	°C	

Tid	Temp. ved 80mm
1 min	10
10 min	13
20 min	49
30 min	105
60 min	256

Estimerte temperaturer i betongen basert på den dypeste del av intervallet med fargeforandring (mest konservativ)

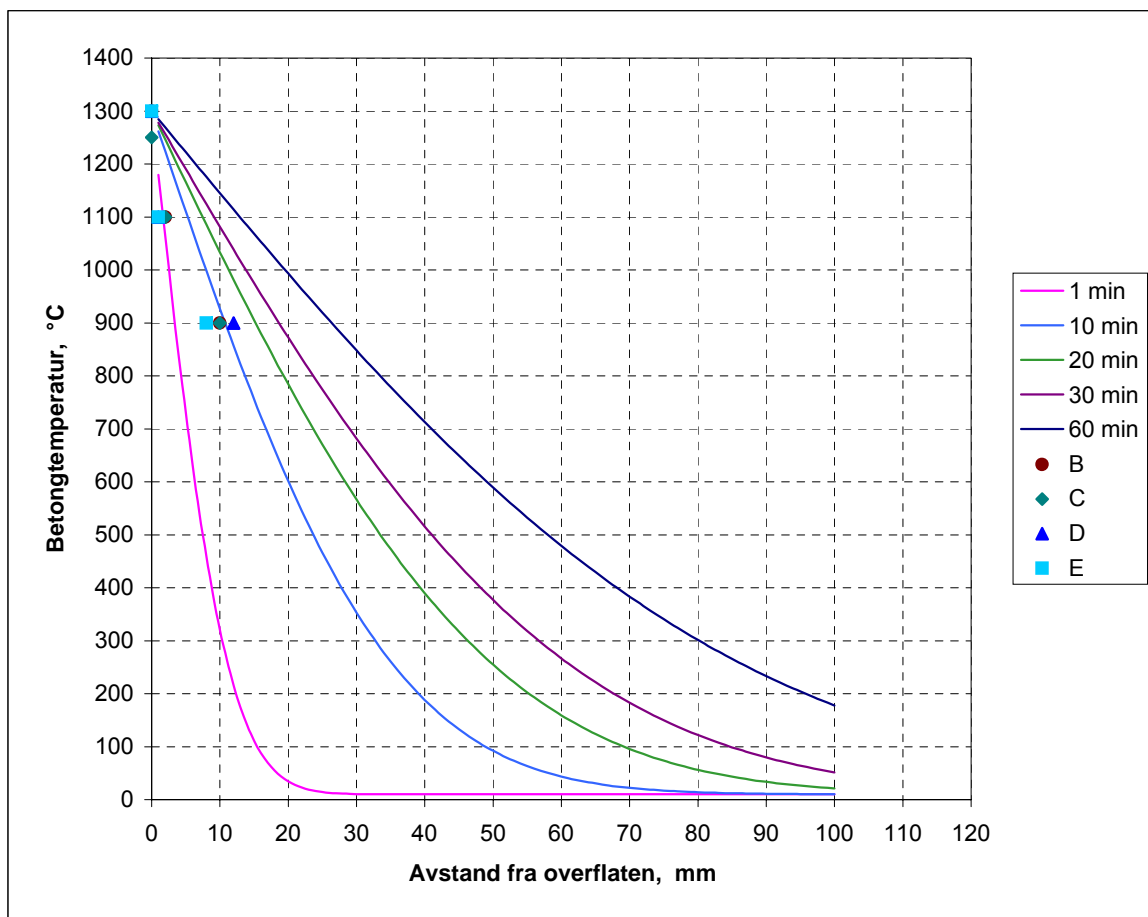


Teoretisk temperaturprofil gjennom betong

Tykkelse		mm	
λ (term.kond.)	1.20	W/mK	0.8-1.4 880
c (spes.varmekap.)	880	J/kgK	
ρ (densitet)	2250	kg/m ³	
$\alpha = \lambda / \rho c$	0.61	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	
Eksponert tid		sekunder	
Bakgrunns temp.	10	°C	
Overflate temp.	1300	°C	

Tid	Temp. ved 80mm
1 min	10
10 min	14
20 min	56
30 min	122
60 min	301

Estimerte temperaturer i betongen basert på den grunneste del av inntervallet med fargeforandring (minst konservativ)

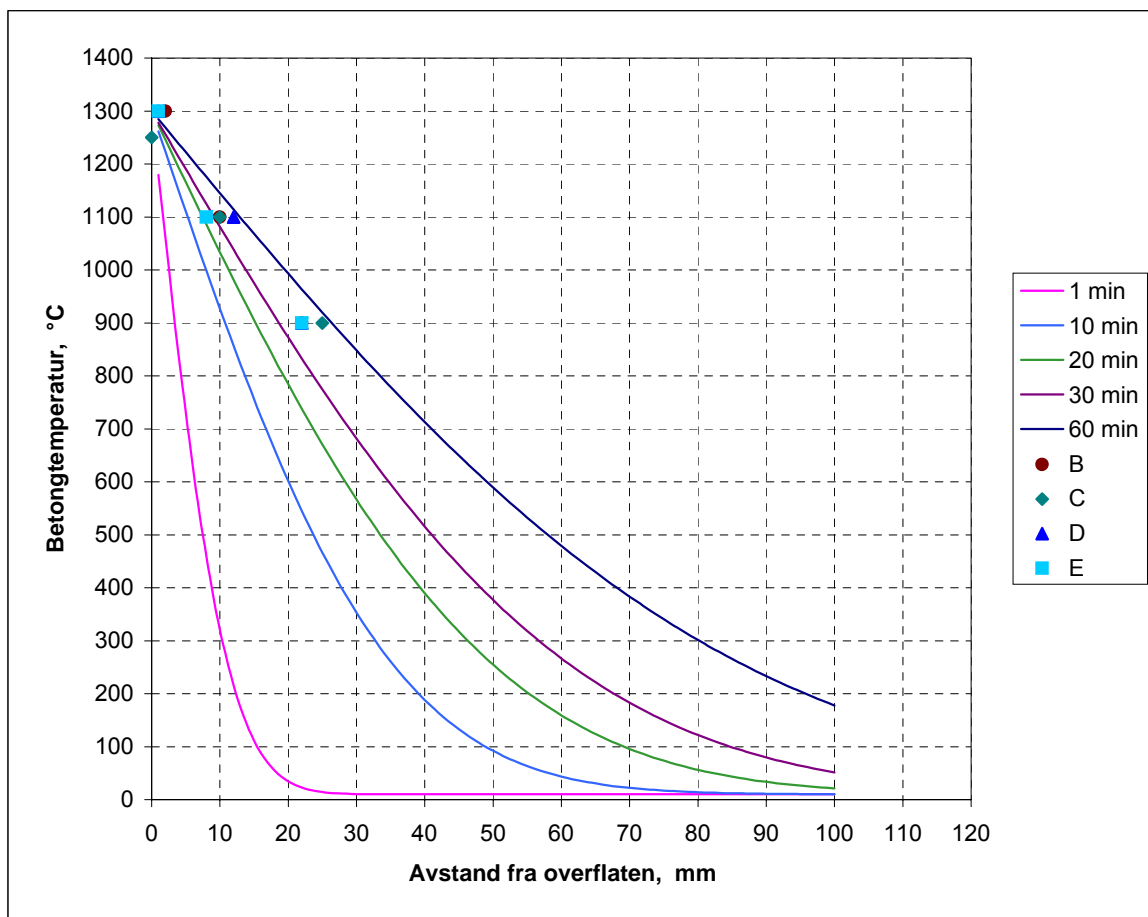


Teoretisk temperaturprofil gjennom betong

Tykkelse		mm	
λ (term.kond.)	1.20	W/mK	0.8-1.4 880
c (spes.varmekap.)	880	J/kgK	
ρ (densitet)	2250	kg/m ³	
$\alpha = \lambda / \rho c$	0.61	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	
Eksponert tid		sekunder	
Bakgrunns temp.	10	°C	
Overflate temp.	1300	°C	

Tid	Temp. ved 80mm
1 min	10
10 min	14
20 min	56
30 min	122
60 min	301

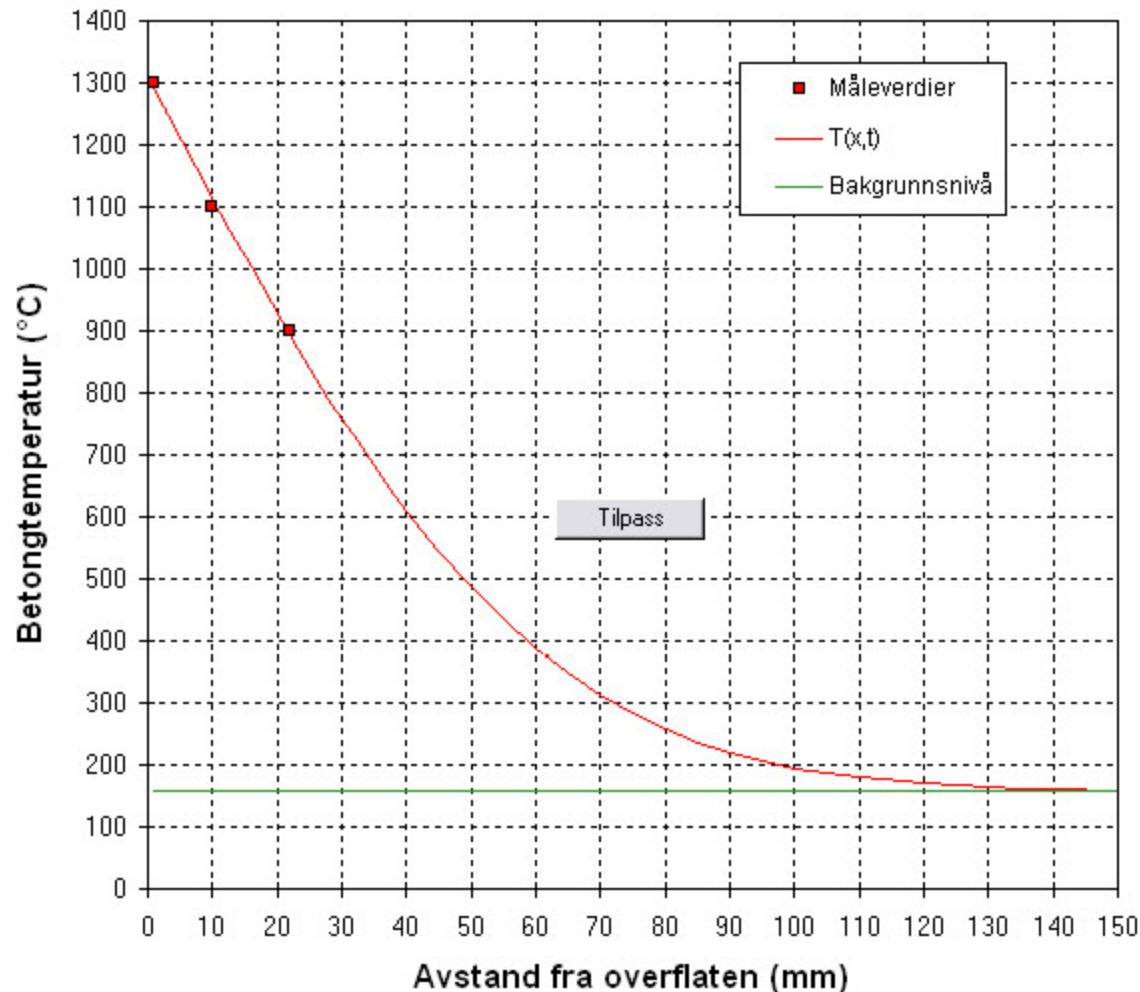
Estimerte temperaturer i betongen basert på den dypeste del av inntervallet med fargeforandring (mest konservativ)



Vedlegg 3

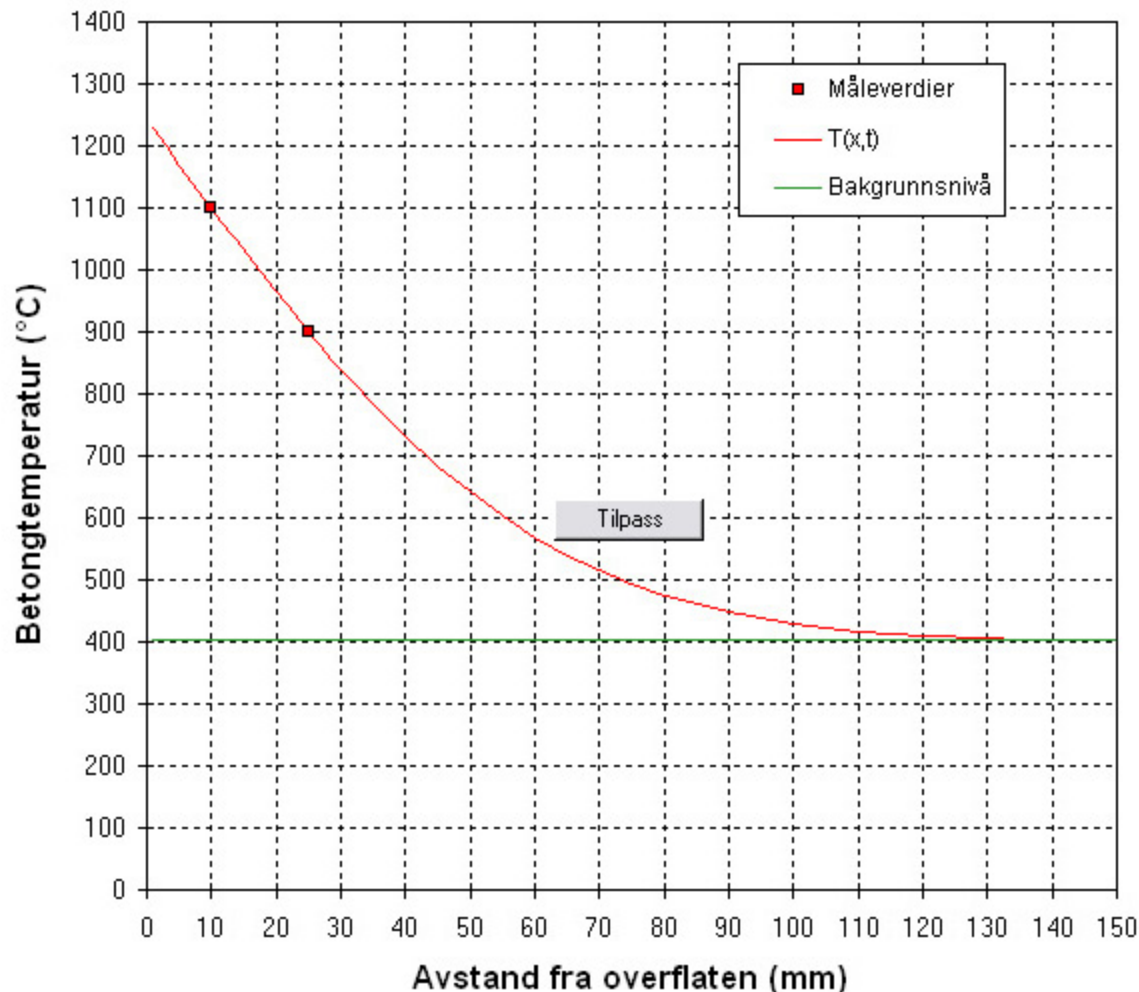
Ekspontert tid	1800	sekunder
Bakgrunns temp.	158	°C
Overflate temp.	1311	°C
$\alpha = \lambda / \rho c$	0.61	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0.9955	
Temp. ved 60mm	387	°C
Temp. ved 80mm	258	°C
λ (term.kond.)	1.20	W/mK
c (spes. varmekap.)	880	J/kgK
ρ (densitet)	2250	kg/m ³

x (mm)	målt	status
1	1300	ok
10	1100	ok
22	900	ok
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
100		
110		
120		
130		
140		
150		



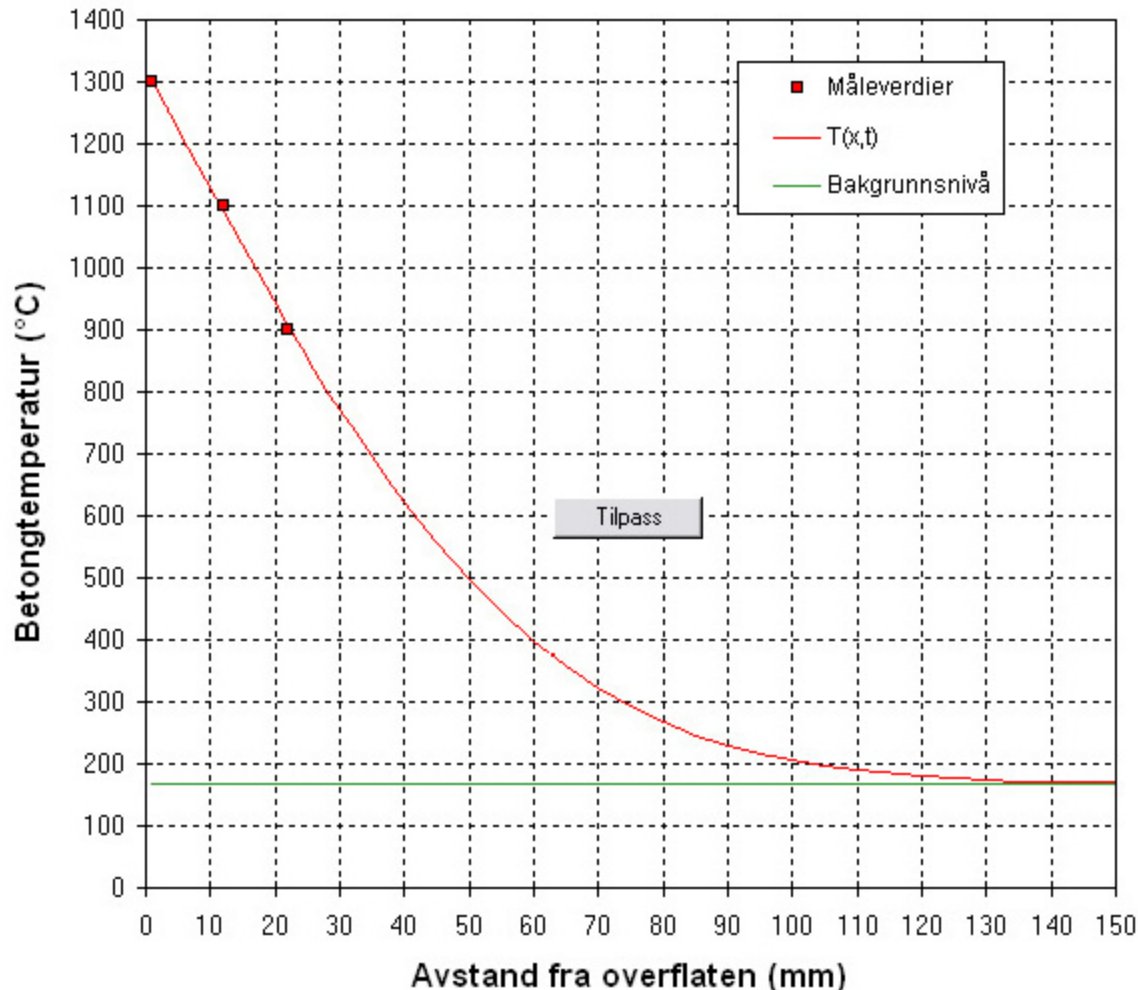
Ekspontert tid	1800	sekunder
Bakgrunns temp.	402	°C
Overflate temp.	1242	°C
$\alpha=Npc$	0.61	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	1.0000	
Temp. ved 60mm	569	°C
Temp. ved 80mm	475	°C
λ (term.kond.)	1.20	W/mK
c (spes. varmekap.)	880	J/kgK
ρ (densitet)	2250	kg/m ³

x (mm)	målt	status
1		
10	1100	ok
25	900	ok
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
100		
110		
120		
130		
140		
150		



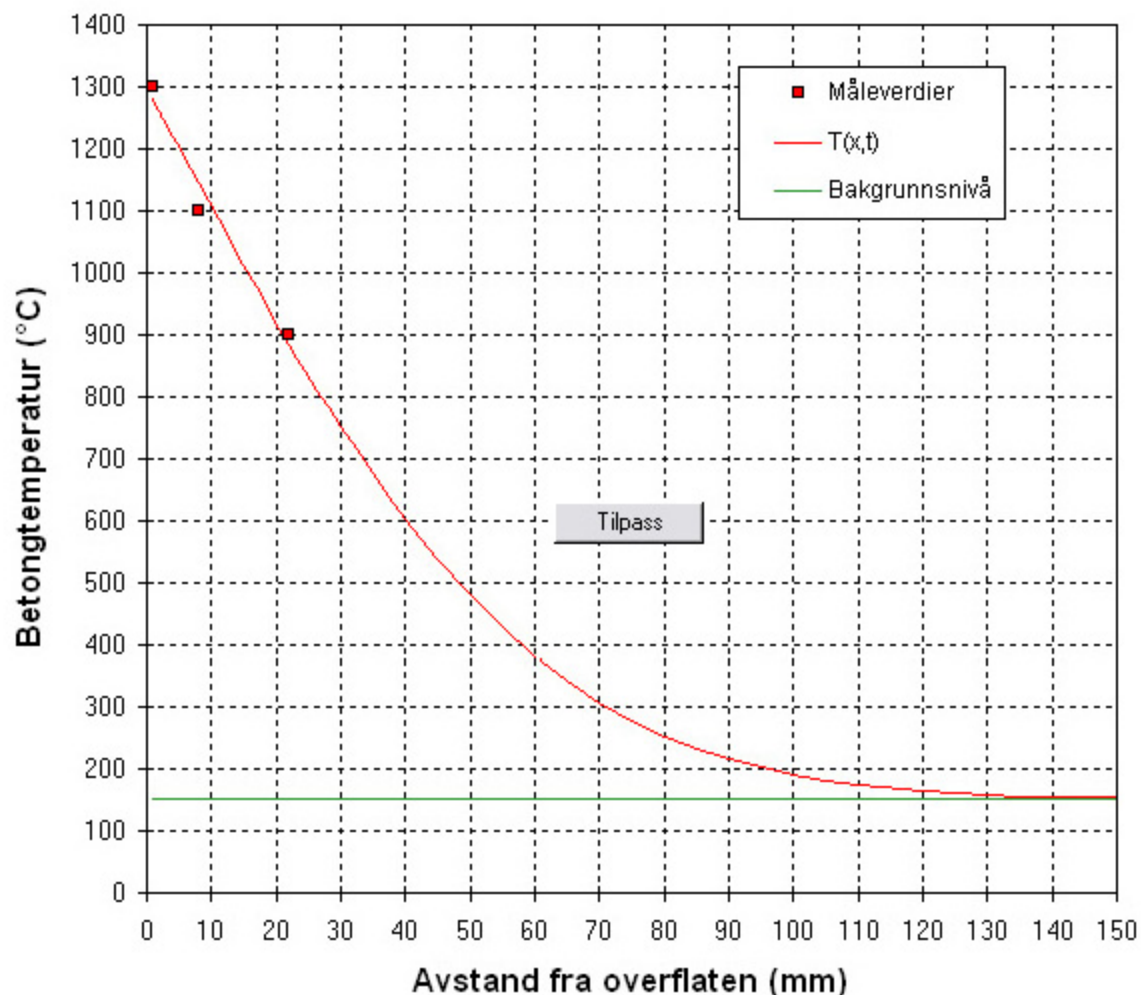
Ekspontert tid	1800	sekunder
Bakgrunns temp.	168	°C
Overflate temp.	1324	°C
$\alpha = \lambda / \rho c$	0.61	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0.9981	
Temp. ved 60mm	398	°C
Temp. ved 80mm	268	°C
λ (term.kond.)	1.20	W/mK
c (spes. varmekap.)	880	J/kgK
ρ (densitet)	2250	kg/m ³

x (mm)	målt	status
1	1300	ok
12	1100	ok
22	900	ok
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
100		
110		
120		
130		
140		
150		



Ekspontert tid	1800	sekunder
Bakgrunns temp.	153	°C
Overflate temp.	1300	°C
$\alpha = \lambda / \rho c$	0.61	$10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
R^2	0.9687	
Temp. ved 60mm	381	°C
Temp. ved 80mm	253	°C
λ (term.kond.)	1.20	W/mK
c (spes. varmekap.)	880	J/kgK
ρ (densitet)	2250	kg/m ³

x (mm)	målt	status
1	1300	ok
8	1100	ok
22	900	ok
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		
100		
110		
120		
130		
140		
150		





Statens vegvesen

Statens vegvesen Vegdirektoratet
Postboks 8142 Dep
N - 0033 Oslo

Tlf. (47) 22 07 35 00
E-post: publvd@vegvesen.no

ISSN 1504-5005