



BRANDTÅLIG VATTEN- OCH FROSTSÄKRING FÖR TUNNLAR

Provning av termiska- och mekaniska
egenskaper hos sprutbar lättbetong

Thomas Dalmalm
Lars Boström

BRANDTÅLIG VATTEN- OCH FROSTSÄKRING FÖR TUNNLAR

**-Provning av termiska och mekaniska egenskaper hos
sprutbar lättbetong**

FIRE RESISTANT LINING FOR TUNNELS

**-Testing of thermal and mechanical properties of light
weight sprayed concrete**

Tomas Dahlmalm, Vägverket

Lars Boström, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

FÖRORD

Att resa under mark i tunnlar blir allt vanligare i och kring våra större städer i takt med att tillgänglig yta ovan mark blir alltmer utnyttjad. Kraven på tunnelarna är många bland annat ska de vara torra och fria från istappar vintertid, de skall vara ljusa för att ge bra siktförhållanden och inte minst skall de vara säkra om olyckan skulle vara framme och det börjar brinna.

Dagens tunnlar byggs med separata utrymningsvägar var 100:e meter. Vid utrymningsvägarna finns också brandsläckningsutrustning samt kommunikationsutrustning. Utöver detta arbetas det mycket med att göra konstruktionsmaterialen i tunneln säkra vid en eventuell brand. Det är oftast inte tillräckligt att studera ett material i taget utan analyser måste utföras där kombinationen av de olika materialen i samverkan studeras. Detta kan ibland utföras med hjälp av mindre brandtester, men oftast är det nödvändigt utan fullskaletester där hela konstruktionen belastas under realistiska förhållanden utförs för att man med säkerhet skall veta hur konstruktionen beter sig vid brand.

För att uppnå den eftersträvade tunnelmiljön är det vanligt att tunneln förses med någon typ av inklädnad. Föreliggande rapport redovisar en ny typ av inklädnad för tunnlar där en lättbetong utgör såväl det värmeisolerande, den bärande och det brandskyddande skiktet. För att säkerställa dess egenskaper har lättbetongen brandprovats i såväl liten som stor skala.

En referensgrupp har följt arbetet bestående av Tomas Franzén, SveBeFo, Anders Fredriksson, Golder Associates, Kjell Windelhed, Vägverket, Tommy Ellison, Besab, Hans Alstermo, EPSCement, Svein Jonsson, Skumtech och Mikael Hellsten BeFo. Projektet har finansierats genom BeFo med särskilt stöd av Vägverket.

Stockholm i oktober 2009
Mikael Hellsten

Sammanfattning

För att erhålla eftersträvad miljö och låga underhållskostnader kläds allt oftare bergtunnlar in med någon form av inklädnad. Inklädnaden skall vara vattentät samt frost- och brandtålig. Mekaniska egenskaper och brandegenskaper har provats hos en för tunnlar ny typ av inklädnad baserad på lättbetong. Brandprovning utfördes i både liten skala med ISO brandkurvan och i stor skala med HC brandkurvan. Den provade lättbetongen visade mycket god motståndskraft mot brandpåverkan. Brandbelastning under 120 minuter enligt HC brandkurvan resulterade i att endast några små fragment spjätkades loss, dvs materialet har mycket stor motståndskraft mot explosiv spjälkning.

Den provade lättbetongen gick utmärkt att spruta med konventionell betongsprutningsutrustning. Materialegenskaperna hos den färdiga produkten påverkades av sprutningsmetoden. Vid torrsprutning blev ballastspillet mycket större än vid våtsprutning och densiteten ökade från 450 kg/m³ till nästan 1100 kg/m³.

Inklädnadslösningen dimensionerades och provades för dynamisk utmattningslast. Provkroppen klarade en utmattningslast med 50 miljoner cykler där lasten växlade mellan sug 0.8 kPa och tryck 0.5 kPa. För en av provkropparna uppstod brott mycket tidigt, vilket efter analys visade sig bero på bristfälligt åtdragna muttrar inne i konstruktionen.

De genomförda försöken visade också hur viktigt det är att ställa krav på utförandet.

Summary

Rock tunnels are often covered with a lining to receive the appropriate tunnel environment and low maintenance cost. The lining shall be waterproof as well as resistant against frost and fire. Mechanical properties and fire resistance have been tested for a new lining system based on a light weight concrete. The fire tests were performed in small scale with the ISO fire curve and in large scale with the HC fire curve. The tested light weight concrete showed very good resistance against fire. Fire test according to the HC fire curve resulted in only some small fragments spalled after 120 minutes, i.e. the tested sample showed a very good resistance against explosive spalling.

The light weight concrete was easily sprayed with a conventional spray robot, though the properties are dependent of the spray method. While using the dry spray method, the amount of re-bounce was high and the density increased from 450 to almost 1100 kg/m³.

The light weight concrete lining system was designed and tested for dynamic load. The system passed the exhaustion test of 50 million cycles, with load shifting between suction of 0.8 kPa and pressure of 0.5 kPa. One of the tested plates failed early due to improper bolt installation.

The importance of a good workmanship was also demonstrated during the tests.

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Systemidé	2
1.3	Mål och syfte	4
1.4	Genomförande	4
1.5	Krav på inklädnadens egenskaper	4
1.6	Dimensionering av inklädnadslösning	5
2	Etapp 1 (våtsprutad lättbetong)	7
2.1	Metodik och genomförande.....	7
2.2	Provning och resultat	12
2.2.1	Brandmotstånd	12
2.2.2	Tryckhållfasthet.....	16
2.2.3	Böjdraghållfasthet	16
2.2.4	Frostresistens.....	19
2.2.5	Termiska egenskaper.....	20
3	Etapp 2 (torrsprutad lättbetong)	21
3.1	Metodik och genomförande.....	21
3.2	Provning och resultat	21
3.2.1	Brandmotstånd	21
3.2.2	Tryckhållfasthet.....	26
3.2.3	Böjdraghållfasthet	26
3.2.4	Krympmätning	29
3.2.5	Termiska egenskaper.....	30
3.2.6	Dynamiska tester (våt- och torrsprutad lättbetong).....	31
4	Diskussion	33
5	Referenser.....	39

1 Inledning

BeFo har till uppgift att främja och bedriva forskning och utveckling inom området bergteknik med tillämpning på bergarbeten ovan och under mark. Detta projekt ”Brandtålig Vatten- och Frostsäkring för Tunnlrar” har genomförts i BeF:s regi med finansiellt stöd av Vägverket. En projektgrupp och en referensgrupp har genom sina kunskaper och erfarenheter möjliggjort projektet.

Denna rapport är en slutrapport som summerar de arbeten som utförts inom ramen för BeFo projekt 233. Resultat har tidigare delrapporterats i etapprapport K23 samt i artikeln ”Brandtålig Vatten- och Frostsäkring för Tunnlrar som presenterades på Bergmekanikdagen 2008.

Projektgruppen:

Thomas Dalmalm, (Projektledare), Vägverket
Lars Boström, SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Referensgruppen:

Kjell Windelhed, Vägverket
Tommy Ellison, BESAB
Tomas Franzén, SveBeFo
Mikael Hellsten, BeFo
Anders Fredriksson, Golder Associates
Hans Alstermo, EPSCement
Svein Jonsson, Skum Tech

1.1 Bakgrund

När bergtunnlar och berggrum byggs är tätning mot inläckande grundvatten en central fråga. I första hand är det angeläget för miljön att inte rubba grundvattenbalansen. Primär tätning av undermarksanläggningar utförs vanligtvis genom förinjektering, och vid behov kan tätningen efter utsprängning kompletteras genom efterinjektering. Trots att metodiken för tätning har blivit avsevärt mer effektiv under de senaste decennierna så blir resultatet ändå inte en absolut tät berganläggning. I tunnlrar för väg- och järnvägstrafik måste av komfort-, säkerhets- och beständighetskäl i princip allt dropp elimineras. Vattendropp påverkar användare och installationer. Vid kall väderlek kan fritt vattendropp leda till istappar och svallis som medför risk för olycksfall samt ökade drift- och underhållskostnader.



Foto: Andrén, Lundman

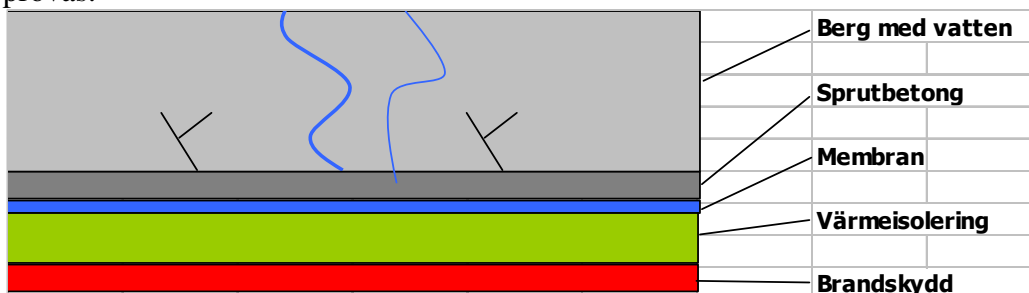
Figur 1-1 Isbildning vid sidan om PE-skum-matta i en järnvägstunnel.

Vatten- och frostsäkring av väggar och tak i tunnlar är därför nödvändigt i vårt klimat. I de nordiska länderna är inklädnad med extruderad polyeten även kallat PE-skum en vanlig metod. PE-skum är ett mycket effektivt och lätt isoleringsmaterial, men det har olägenheten att vara brännbart.

En brand i en tunnel kan bli mycket intensiv. Brännbara material kan vid en brand utveckla giftiga och siktförsämrande gaser som kan försvåra utrymningen. Ansvariga myndigheter har därför satt fokus på tunnelsäkerhet. Nya normer i Norge och inom EU ställer betydligt större krav på brandsäkerhet än tidigare, och dessa kommer att ligga till grund för nya riktlinjer i ett flertal länder. Målsättningen är att fasa ut brandfarliga material.

1.2 Systemidé

För att utveckla nya lösningar som på ett kostnadseffektivt sätt kan uppfylla krav på tätande och isolerande förmåga samtidigt som det är motståndskraftigt mot brand och tillräckligt starkt och beständigt kan okonventionella material och metoder behöva prövas.



Figur 1-2 Principskiss för en brandtålig vatten- och frostisolering.

De brandskyddande och värmeisolerande egenskaperna har traditionellt åstadkommit av två olika material, men beroende av materialegenskaper skulle detta kunna utgöras av ett och samma material som både brandskyddar och värmeisolerar.

En första idé på ett både brandskyddande material och värmeisolerande var lättbetong. En typ av lättbetong tillverkas av ytbehandlade EPS-kulor tillsammans med byggcement och säljs under produktnamnet Isolon Fire Proof. EPS är liktydigt med expanderad polystyren, samma råvara som används i cellplastisolering av typen Frigolit. Produkten kan pumpas och sprutas med traditionell utrustning. Isolon Fire Proof har en densitet på ca 450 kg/m^3 och den blandas i dagens applikationer med en låg halt vatten ($v_{ct}=0,4$), vilket medför att produkten har självuttorkande egenskaper.

Den isolerande förmågan för denna lättbetong är ungefär hälften av den isolerande förmågan hos en polyeten drän. I en tunnel är det vanligt att använda dräner med en tjocklek om ca 50 mm. Om denna ersätts med en 25 mm tjock drän i kombination med ett 50 mm tjockt lager av lättbetong så har mängden brännbart material i tunneln halverats. Man kan även tänka sig lösningar med enbart sprutad lättbetong.

Ett system med lättbetong som en komponent skulle då kunna se ut enligt nedanstående:

1. Ett membran som står för vattentätning placeras närmast berget.
2. Ett värmeisolerande skikt som består av lättbetong eller en kombination av PE-skum och lättbetong (beroende av värmeisolerings- och brandskyddskraven).
3. Ett brandtåligt skikt som består av lättbetong (kan kombineras med det värmeisolerande skiktet).
4. Ett bärande skikt som kan överföra lasterna till bultar som är förankrade i berget. Detta skikt kan i vissa fall bestå av lättbetong men om lasterna är stora kan konstruktionen behöva kompletteras med konventionell sprutbetong. Den senare kan behöva innehålla någon typ av fiber för att inte spjälka vid en brandsituation.

I ett optimalt fall skulle alltså lättbetongen kunna stå för såväl värmeisolering, brandskydd samt den bärande funktionen, vilket skulle kunna bidra till lägre förstärknings- och inklädnadskostnader. De ingående komponenterna kan kombineras efter behov av värmeisolering, bärförmåga och andra egenskaper. Hur den slutliga lösningen skall se ut i olika kravsituationer behöver utredas vidare.

1.3 Mål och syfte

Syftet med projektet var att undersöka hur ett system baserat på lättbetong kan användas för att uppfylla kraven på brandsäkerhet i bergtunnlar. Specifikt syftade detta projekt till att klarlägga värme- och brandisoleringssegenskaper hos en sprutad lättbetongprodukt som komponent i ett system för brandtålig vatten- och frostsäkring. Vattentätheten hos konstruktionen är inte studerad inom ramen för detta projekt.

Mål Etapp 1: Att översiktligt undersöka om sprutad lättbetong är ett lämpligt material som brandskydd och då särskilt materialets isolationsförmåga och förmåga att motstå explosiv spjälkning.

Mål Etapp 2: Att mer ingående studera sprutad lättbetong genom brandtester i stor skala samt dynamiska tester för att studera materialets förmåga att motstå varierande tryck- och suglaster.

1.4 Genomförande

Projektet genomfördes i två etapper och omfattade tester av lättbetong baserade på produkten Isolon Fire Proof.

- Etapp 1. Brandtest i liten skala (våtsprutad lättbetong)
De grundläggande egenskaperna såsom brandmotstånd, tryckhållfasthet, böjdragegenskaper, värmeledningsförmåga och frostbeständighet hos sprutad lättbetong baserad på produkten Isolon Fire Proof provades. Två olika tjocklekar (60 mm och 120 mm) provdes i brandtesten. Resultat från etapp 1 används som underlag för etapp 2.
- Etapp 2. Brandtest i större skala (torrsprutad lättbetong)
Brandtest av provkroppar tillverkade av sprutad lättbetong baserad på produkten Isolon Fire Proof i kombination med ett eller flera tätande material. Test av den dynamisk uthållighet hos materialet.

1.5 Krav på inklädnadens egenskaper

I Vägverkets regler beskrivna i Tunnel 2004, kapitel 4 ställs kravet att material i bärande huvudsystem, inklädnad och installation inte får bidra till brandspridning eller rökspridning. Enligt Tunnel 2004 bör materialet därtill vara obrännbart om inte materialets bidrag till brandspridning kan anses vara försumbart. Bärande huvudsystem, inredning och installationer nödvändiga för säker utrymning och räddningsinsats skall påvisas kunna motstå brandpåverkan under angiven utrymnings- och angreppstid utan att det uppstår lokala skador, t ex i form av nedfall. Säkerhet mot betongavspjälkning skall dokumenteras genom provning eller utredning.

1.6 Dimensionering av inklädnadslösning

Baserat på de provade egenskaperna hos sprutad Isolon Fire Proof beräknades lämpligt centrumavstånd mellan infästningsbultar samt armeringsmängd. Enligt Vägverkets ATB Tunnel 2004 skall inklädnaden i tunnlar dimensioneras för en lufttrycksvariation orsakad av passerande fordon som förutsätts uppgå till 0,8 kPa i sug och 0,5 kPa i tryck. För att dimensionera inklädnadsvalvet kan det statiskt betraktas som en strimla av en balk eller som ett pelardäck. Balksbetraktelsen är lite mer konservativ och ger högre tvärkraft och moment. Med ett bultavstånd på 1,8 meter och ett centriskt placerat armeringsnät 6 mm med delning 200 mm x 200 mm erhålls för pelardäcksfallet ett $M_{\text{brott}} = 0,67$ kNm/m och ett $N_{\text{brott}} = 2,19$ kN. För betongbalkberäkning erhålls $M_{\text{brott}} = 0,77$ kNm/m och $N_{\text{brott}} = 2,5$ kN. Vid dimensionering mot utmattning skall kollektivparametern κ väljas som 1/3 och spänningscykeltalet bestämmas efter aktuell årsdygnstrafik enligt tabell 3.3-1.

Tabell 1-1 Spänningscykeltal enligt Tunnel 2004

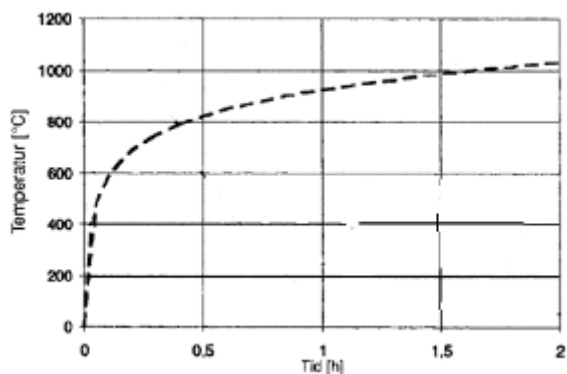
Årsdygnstrafik (ÅDT) per tunnelrör	Spänningscykeltal (N)
under 2 500	$2 \cdot 10^6$
2 500 t o m 10 000	$1 \cdot 10^7$
över 10 000	$5 \cdot 10^7$

För beräkning väljs en årsdygnstrafik över 10 000 fordon, dvs. antalet spänningscykler skall vara $5 \cdot 10^7$. De dimensionerande materialparametrarna reduceras på grund av den dynamiska lasten genom att multiplicera med 0,55. Istället för att utföra 50 miljoner lastcykler kan lasten ökas enligt Betonghandboken och antalet cykler minskas. I detta fall med 0,8 kPa i sug och 0,5 kPa i tryck med bultavstånd 1,8 meter erhöles om antalet lastcykler reduceras till 3 miljoner en belastning +2,85 -1,78 kN. Lasten påfördes som en laststyrd sinuskurva i en ingjuten bult.

2 Etapp 1 (våtsprutad lättbetong)

2.1 Metodik och genomförande

En serie provkroppar tillverkades med konventionell betongsprutning (våtsprutning). Provkropparna testades för såväl mekaniska- som brandegenskaper hos SP Sveriges Tekniska forskningsinstitut i Borås. Brandtesterna genomfördes initialt i liten skala enligt provningsmetoden SP Brand 119, utgåva 3, daterad 2002-01-24 och med brandgastemperatur enligt standardbrandkurvan ISO 834:1975. Kurvan är framtagen för att simulera en brand i ett rum.



Figur 2-1 Gastemperatur vid brand enligt standardbrandkurvan ISO 834:1975.

För brandproverna tillverkades 12 trälådor med innerdimensionen B=600 mm, L=500 mm, H= 100 mm. I lådan placeras termoelement för att mäta temperaturen på olika nivå i materialet. Lådorna sprutades med lättbetong av typen Isolon Fire Proof och de sex olika provuppsättningarna redovisas i Tabell 2-1. Som framgår av tabellen så omfattar brandprovningen två olika tjocklekar, 60 resp. 120 mm av lättbetong.

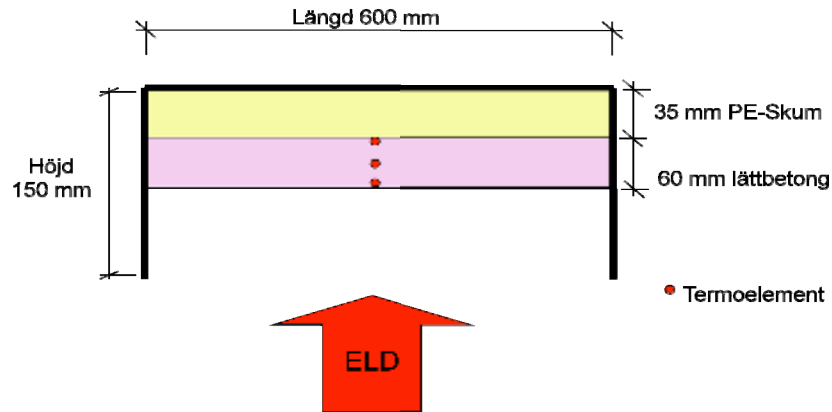
Tabell 2-1 Material och tjocklek hos de ingående skikten för respektive brandprov.

	Tätande skikt	Lättbetong (Isolon Fire Proof)	Ytskikt (brandutsatt yta)
Prov-1	35 mm PEskum	60 mm	-
Prov-2	1,5 mm LLDPE*	60 mm	-
Prov-3	1,5 mm LLDPE	60 mm, armerad (6x150x150 mm)	-
Prov-4	1,5 mm LLDPE	120 mm, armerad (6x150x150 mm)	-
Prov-5	1,5 mm LLDPE	60 mm, armerad (6x150x150 mm)	20 mm sprutbetong med 2 kg/m ³ pp-fibrer (6mm*16µm Rescon)
Prov-6	1,5 mm LLDPE	120 mm, armerad (6x150x150 mm)	20 mm sprutbetong med 2 kg/m ³ pp-fibrer (6mm*16µm Rescon)

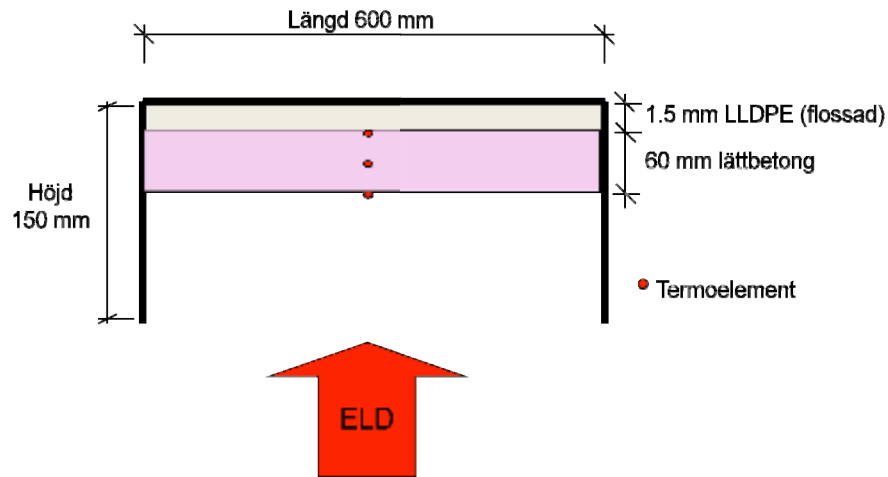
* Membran av flossad LLDPE (linjär lågdensitetspolyeten (Low Density Polyethylene))

I nedanstående 6 figurer redovisas de olika provkropparna för brandtest som vardera tillverkades i 2 omgångar (A och B) för att testerna skall kunna repeteras.

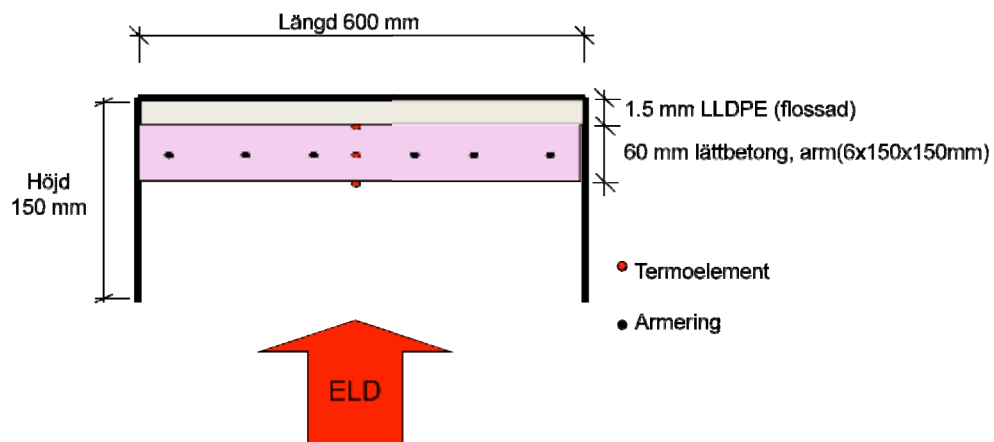
PROV-1



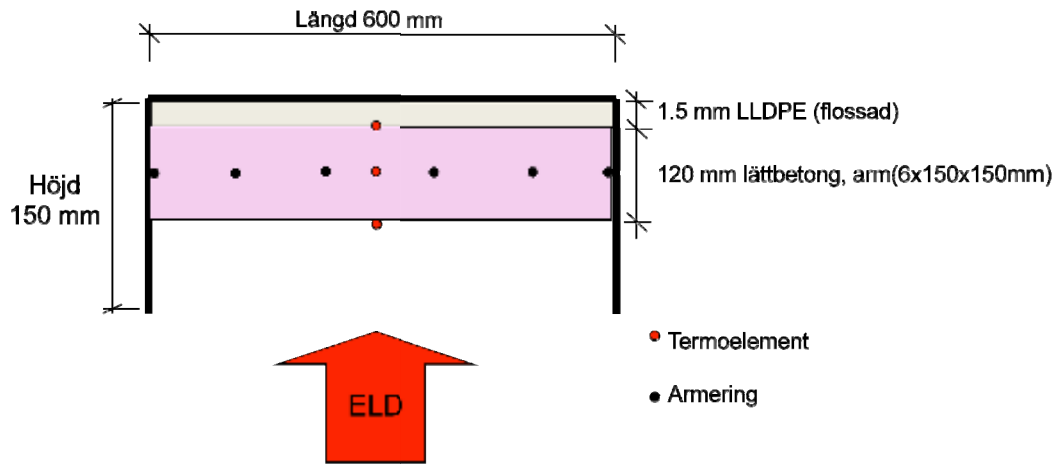
PROV-2



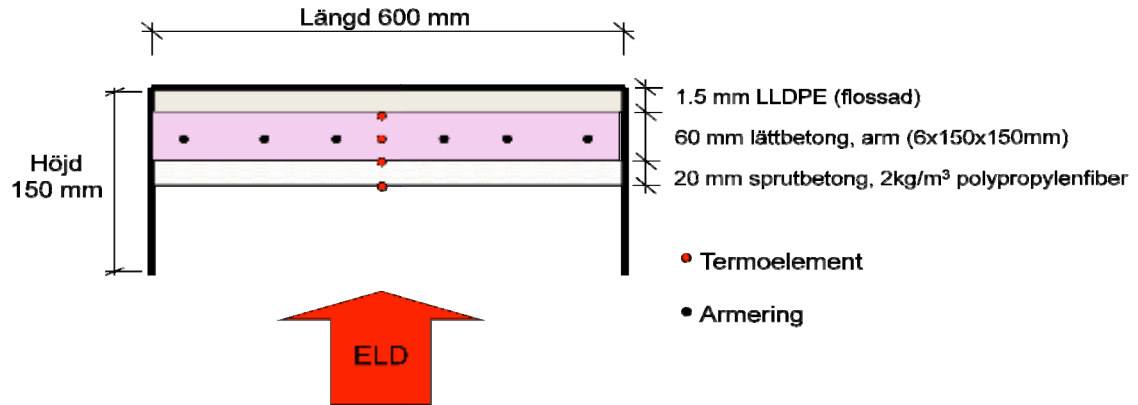
PROV-3



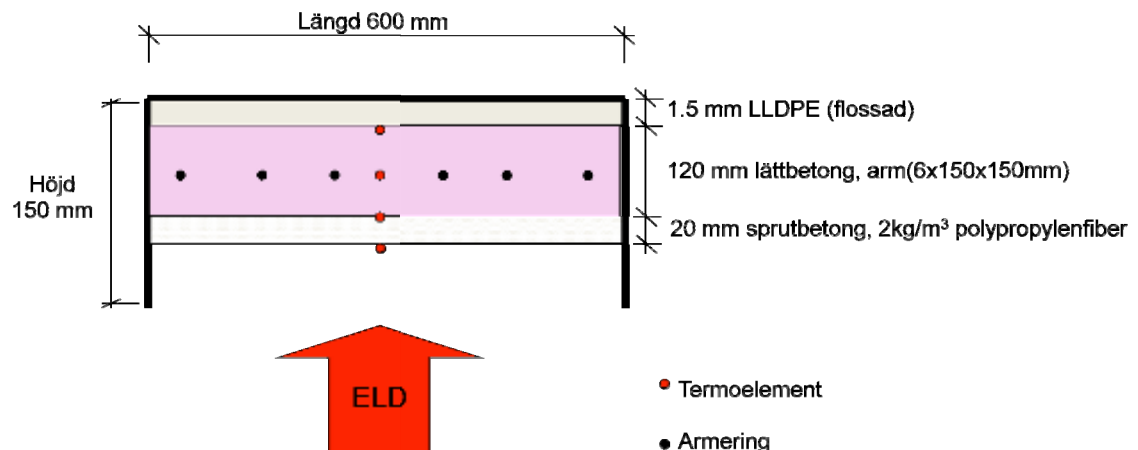
PROV-4



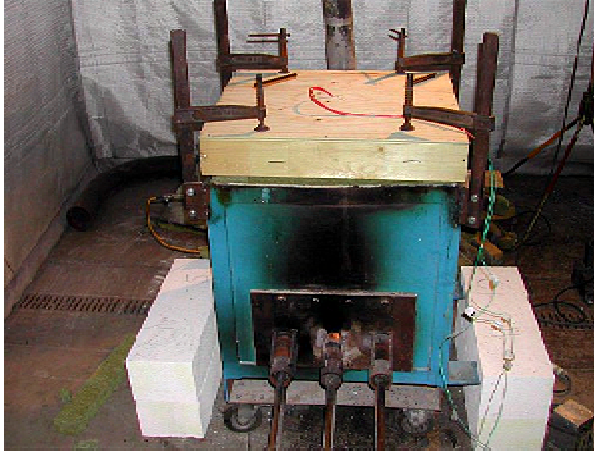
PROV-5



PROV-6

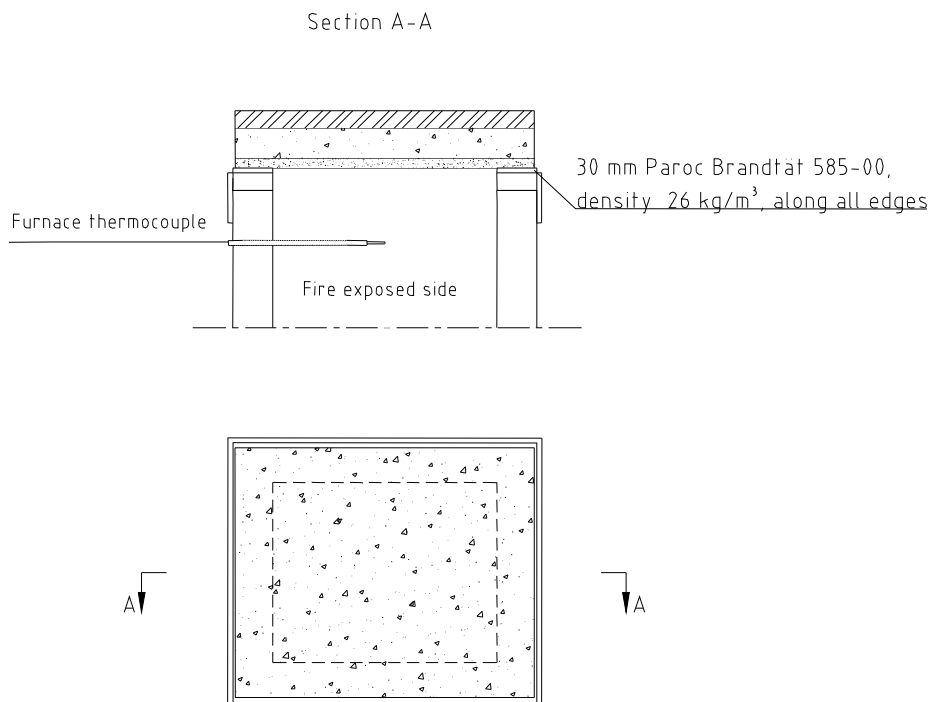


Provkroppen avformades delvis innan montering på ugnen. Endast den nedre delen av formens sidor togs bort vilket innebar att de övre delarna av formen fortfarande fanns kvar vid provningen (se Figur 2-2).



Figur 2-2 Provkroppen ligger på en ugn. Delar av formen finns kvar.

Provföremålen var täckta med plast och förvarades i SPs ugnshall fram till provningen. Temperaturen i ugnshallen var i medeltal 28 °C och den relativa fuktigheten var i medeltal 57 % under denna tid.



Figur 2-3 Provuppställning på liten ugn.

Provkropparna placerades horisontellt över ugnen som hade öppningsmått 360 x 450 mm². Mellan ugnskant och provkropp lades en stenullsisolering, se Figur 2-3. Provkroppen späades fast mot ugnen med fyra tvingar, en vid varje hörn.

Ingen kontroll av egenskaperna hos de brandprovade föremålen utfördes efter brandförsöken.

Mekaniska egenskaper provades på andra plattor som hade sprutats samtidigt som de brandtestade plattorna. Efter härdning sågades dessa provplattor till dimensioner enligt Tabell 2-2 nedan.

Tabell 2-2 Egenskaper och provningsmetod.

Provning	Provningsmetod	Antal prov	Provkroppsstorlek l x b x h (mm)	Krav
Brandtest	SP Brand 119, utgåva 3, daterad 2002-01-24	2	600x500x XX	Ingen spjälkning efter 60 min.
Tryckhållfasthet	SS 13 72 20	3	100 x 100 x 100	-
Böjdragegenskaper	Mod. ASTM C1018	3	550 x 125 x 75	-
Värmeledningsförmåga och värmekapacitet	TPS (Transient Plane Source)	2	150 x 150 x 125	-
Frostbeständighet	SS 13 72 44	3	150 x 150 x 50	God frostbeständighet

Resultat av provningarna sammanställdes och utvärderades i relation till de uppställda kraven. Inga krav ställdes i förväg på tryckhållfasthet, böjdraghållfasthet och värmeledningsförmåga. Dessa egenskaper utvärderades under försöken för att senare kunna användas för dimensionering.

2.2 Provning och resultat

2.2.1 Brandmotstånd

Brandprovningen av lättbetong baserad på Isolon Fire Proof utfördes i liten skala enligt provningsmetoden SP Brand 119, utgåva 3, daterad 2002-01-24.

De våtsprutade provkropparna av lättbetong tillverkades hos BEASB i Sollentuna den 13 juni 2005. Betongreceptet baserades på EPSCement standardblandning för produkten EPSCement EC350K, där 100 liter EPSCement blandas med 12,8 liter vatten. Inget flytmedel eller accelerator användes.

Brandprovningarna utfördes 2005-07-11--13. Proven pågick under minst 60 minuter. Ugnstemperaturen styrdes enligt SIS 02 48 20, utgåva 2, daterad 1977-07-01 (ISO 834-1975). Temperaturen i ugnen mättes med ett termoelement.

I varje provkropp var termoelement ingjutna på olika djup. De var placerade centriskt mot den brandexponerade ytan. Termoelementens djup från den brandexponerade ytan var som följer:

Prov-1, Prov-2, Prov-3

0 mm (precis under ytan)

30 mm

60 mm (skiktet mellan tätskikt och lättbetong)

Prov-4

0 mm (precis under ytan)

60 mm

120 mm (skiktet mellan tätskikt och lättbetong)

Prov-5

0 mm (precis under ytan av sprutbetong)

20 mm (mellan sprutbetong och lättbetong)

50 mm (30 mm in i lättbetong)

80 mm (skiktet mellan tätskikt och lättbetong)

Prov-6

0 mm (precis under ytan av sprutbetong)

20 mm (mellan sprutbetong och lättbetong)

80 mm (30 mm in i lättbetong)

140 mm (skiktet mellan tätskikt och lättbetong)

Inget av de provade föremålen spjälkade under brandprovningen. Fotografierna nedan Figur 2-4 till Figur 2-9 är tagna efter brandprovning. Alla prov utfördes på två likvärdiga provkroppar för att säkerställa resultaten. Nedan redovisas endast ett fotografi från varje unikt prov. Alla prov redovisas i SP rapport BRk 6067.



Figur 2-4 **Provkropp Prov-1:1.**



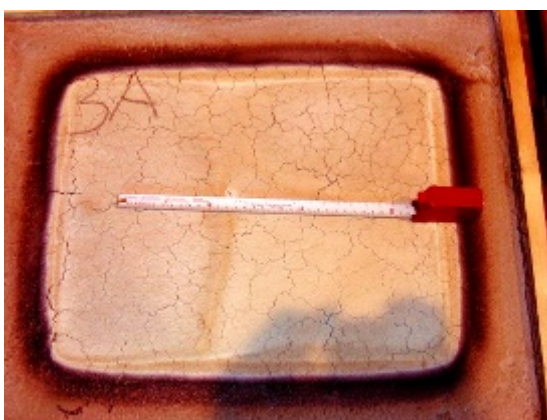
Figur 2-7 **Provkropp Prov-4:1.**



Figur 2-5 **Provkropp Prov-2:2.**



Figur 2-8 **Provkropp Prov-5:1.**

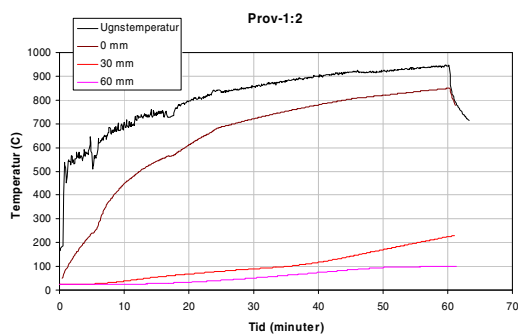


Figur 2-6 **Provkropp Prov-3:1.**

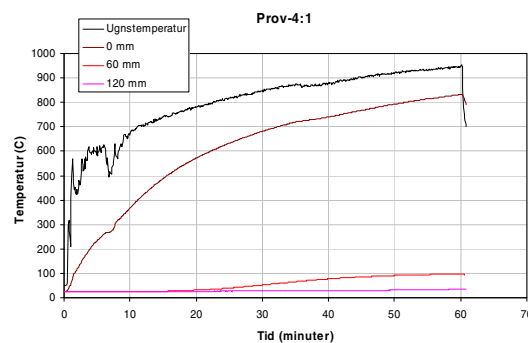


Figur 2-9 **Provkropp Prov-6:1.**

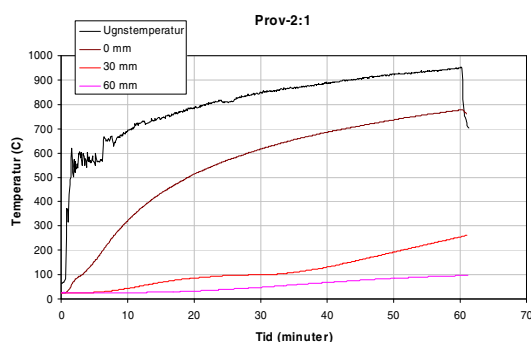
Uppmätta temperaturer under 60 minuters brandbelastning redovisas i Figur 2-10 till Figur 2-15. Efter 60 minuter är ugnstemperaturen 950° C. Temperaturerna inne i provkropparna beror av djupet till den brandutsatta ytan. Att notera är att de givare som placerats längst ifrån den brandutsatta ytan stannar till på nivån 100° C under tiden som vattnet kondenserar. För provkropp nr 6 som utöver 120 mm lättbetong även belagts med 20 mm sprutbetong innehållande polypropylenfiber når temperaturen på 140 mm avstånd från den brandutsatta ytan endast upp till ca 80° C.



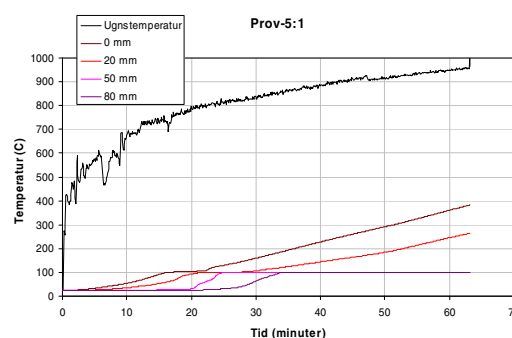
Figur 2-10 Temperaturer vid prov av provkropp Prov-1:2.



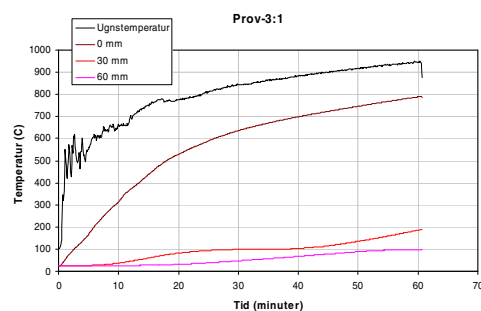
Figur 2-13 Temperaturer vid prov av provkropp Prov-4:1.



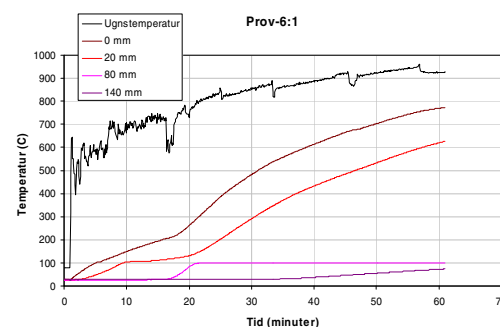
Figur 2-11 Temperaturer vid prov av provkropp Prov-2:1.



Figur 2-14 Temperaturer vid prov av provkropp Prov-5:1.

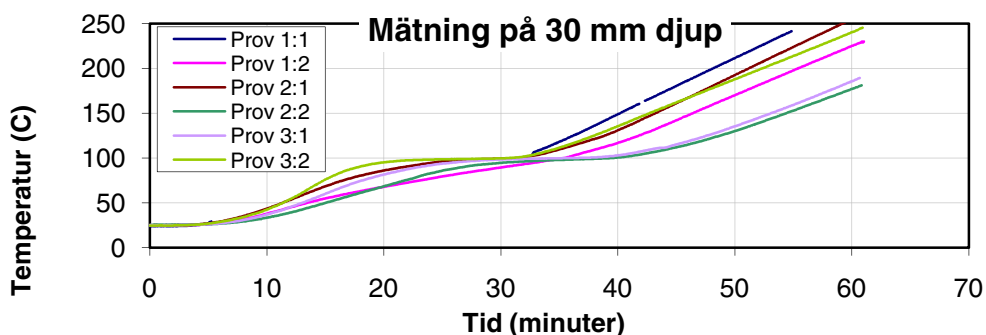


Figur 2-12 Temperaturer vid prov av provkropp Prov-3:1.

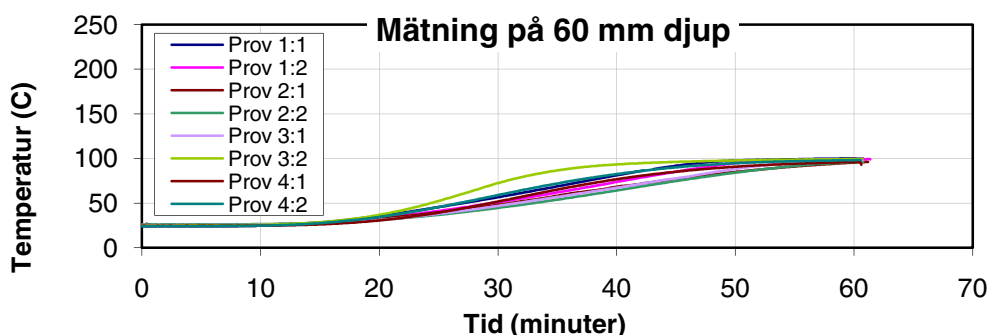


Figur 2-15 Temperaturer vid prov av provkropp Prov-6:1.

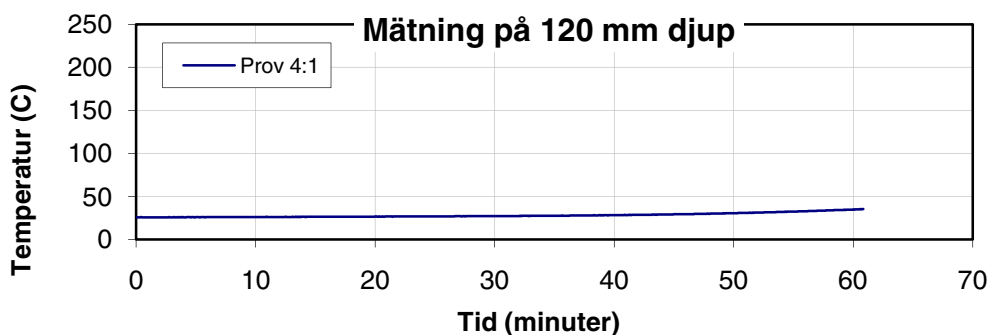
Temperaturstegringen jämfördes även på olika djup i provkropparna. I Figur 2-16, Figur 2-17 och Figur 2-18 redovisas temperaturstegringen på 30 mm, 60 mm och 120 mm djup från den brandutsatta ytan.



På 30 mm djup från den brandutsatta ytan uppnås 100° C efter ca 25 minuter. Temperaturspridningen är större än för 60 mm djup som redovisas nedan. Detta beror på att temperaturgivarna är monterade i en låda som sedan sprutats. Tjockleken på betongen varierar beroende på naturlig variation vid sprutning. Skillnaden blir då störst för den temperaturgivare som monterats närmast den brandutsatta ytan.



På 60 mm djup från den brandutsatta ytan uppnås 100° C efter ca 50 minuter.



Figur 2-16, Figur 2-17, Figur 2-18 Temperaturstegring på 30, 60 och 120 mm djup

På 120 mm djup från den brandutsatta ytan uppnås inte 100° C under de 60 minuter som brandprovet pågick utan här hinner temperaturen bara stiga till 35° C. En längre provtid hade gett högre temperatur.

2.2.2 Tryckhållfasthet

Tryckhållfasthet har bestämts enligt SS 13 72 20 i tillämpliga delar. Tre stycken kuber med sidlängden ca 100 mm sågades ut från en platta tillverkad 050613 därefter planslipades tryckytorna. Provkropparna förvarades i 20 ± 2 °C och 50 % RF fram till provning. Belastningshastigheten var 0,05 MPa/s. Provningsdatum: 050711.

Tabell 2-3 Resultat från tryckhållfasthetsprovning.

Märkning	Höjd (mm)	Area (mm x mm)	Vikt (kg)	Densitet* (kg/m ³)	Brottlast (kN)	Tryckhållfasthet (MPa)
EPS1	98,7	99,9 x 99,1	0,45	463	38,5	3,9
EPS2	99,0	99,7 x 99,2	0,45	463	36,5	3,7
EPS3	98,7	99,9 x 99,5	0,45	462	37,5	3,8
Medelvärde:				463		3,8
Stdav:						0,1

* Densitet på torra provkroppar.

2.2.3 Böjdraghållfasthet

Från en platta tillverkad 050613 sågades tre stycken provbalkar ut med måtten ca 125x75x550mm (bxhxl). Efter utsågning förvarades balkarna i vatten fram till provning. Böjdragprovning genomfördes enligt Svenska Betongföreningens skrift, "Stålfiberbetong - Rekommendationer för konstruktion, utförande och provning" - Betongrapport nr 4. 1995. Provningsdatum: 050711.

Tabell 2-4 Resultat från Böjdragprovningen.

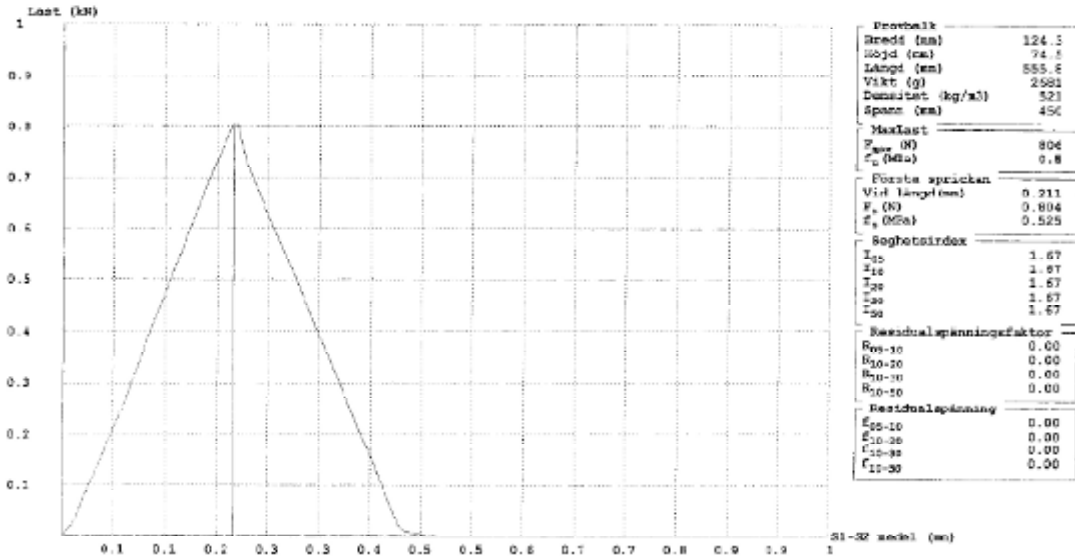
Märkning	Dimension bxhxl (mm)	Vikt (kg)	Densitet* (kg/m ³)	Maximal belastning (kN)	Spänning vid maximal belastning (MPa)
EPS1	124,3x74,5x555,8	2,68	520	0,81	0,53
EPS2	124,5x74,3x552,1	2,68	525	0,75	0,49
EPS3	124,5x74,6x552,8	2,69	525	0,75	0,49
Medelvärde:					0,50
Stdav:					0,02

* Densitet på våta provkroppar.

På grund av materialets sprödhet kunde inte seghetsindex respektive residualhållfasthet bestämmas. Vid provningen erhöles endast maximal belastning. Lastmätningen från de tre böjdragproven redovisas i Figur 2-19, Figur 2-20 och Figur 2-21.

Sveriges Provnings-och Forskningsinstitut AB
 Inerajd - Cyclic - Version 3.39 2005-09-08

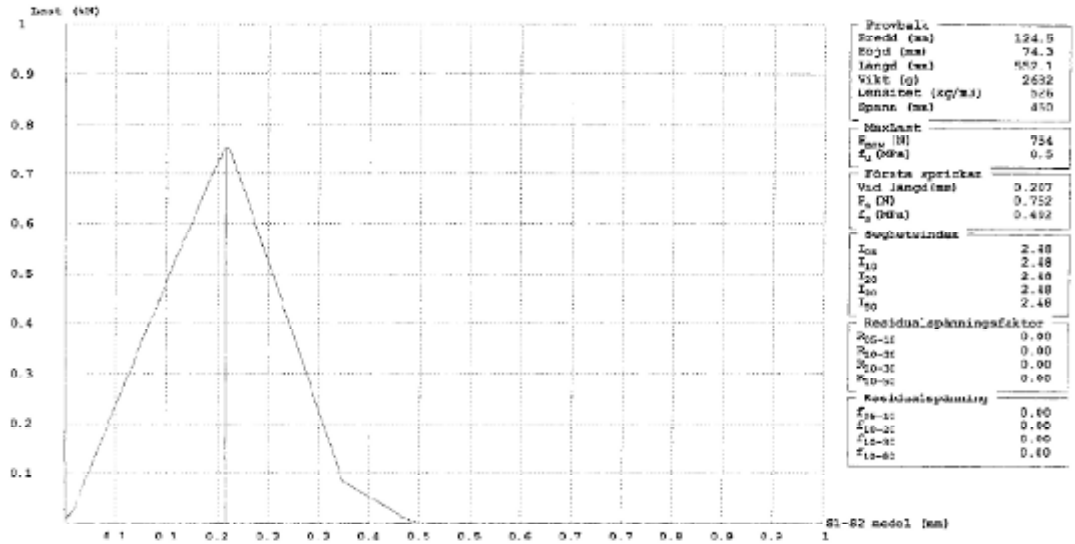
Uppdrag : 895
 Procces : 1
 Resur : 1
 Tillverkningsdatum : - -
 Provningsdatum : 2005-07-11
 Provningsscenari : g)
 Lagringsförhållande : vatten



Figur 2-19 Lastmätning för den första balken.

Sveriges Provnings-och Forskningsinstitut AB
 Inerajd - Cyclic - Version 3.39 2005-09-08

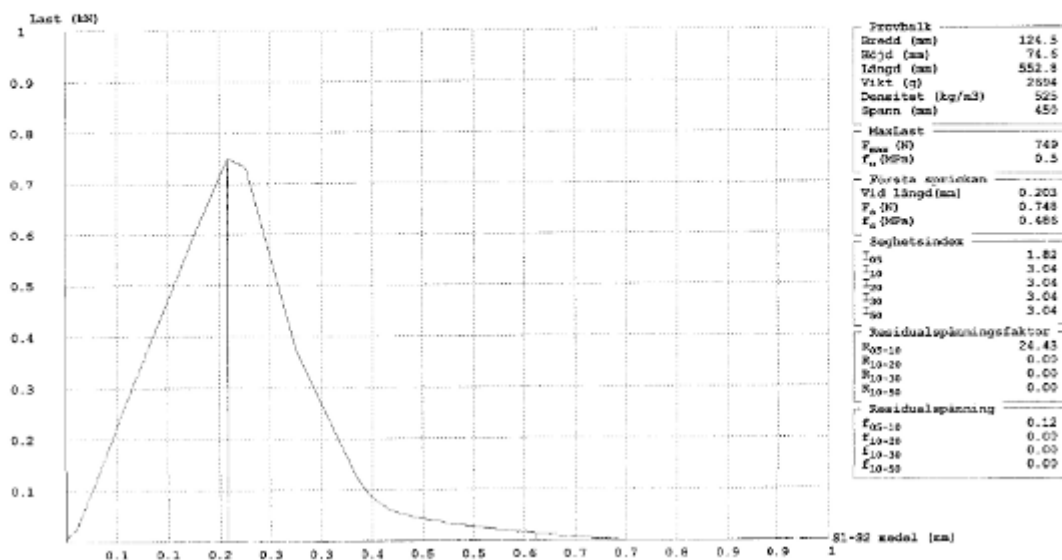
Uppdrag : 896
 Procces : 1
 Resur : 1
 Tillverkningsdatum : - -
 Provningsdatum : 2005-07-11
 Provningsscenari : g)
 Lagringsförhållande : vatten



Figur 2-20 Lastmätning för den andra balken

Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut AB
Innersjö - Cyclic - Version 3.39 2005-09-05

Uppdrag : RT6
Fucosaria : 1
Frömr : 1
Tillverkningsår : -
Förningsår : 2005-07-11
Förningsanläggning : Q3
Lagringförhållande : vatten



Figur 2-21 Lastmätning för den tredje balken.

Elasticitetsmodulen för materialet kan beräknas genom lastmätning till dess att första spricka slår upp. Beräkningsförutsättningarna finns beskrivna i CBI rapport 3:97. I beräkningen skall balkens höjd sättas till 74 mm och dess bredd till 124 mm.

$$E = \frac{23 * (F_2 - F_1) * l^3}{108 * (d_2 - d_1) * b * h^3}$$

Där d_1 och d_2 är mittnedböjningen vid $F_1 = 0.25 * F_{cr}$ och $F_2 = 0.75 * F_{cr}$ där F_{cr} är maxlasten. E-modulen för den våtsprutade lättbetongen utvärderades med deformationer mätta i figuren till 1,4 GPa.

2.2.4 Frostresistens

Frostresistens har bestämts enligt SS 13 72 44, utgåva III, enligt förfarande IA vilket innebar att en sågad yta provas med 3 % - NaCl-lösning. Tre stycken provkroppar med sidlängden ca 150 mm och höjden ca 50 mm sågades ut från en platta tillverkad 050613. Provningsdatum: 050715.

Tabell 2-5 Resultat från frostresistens provning.

Provkropp Märkt	Avskalningar efter antal cykler, (kg/m ²)				
	7	14	28	42	56
EPS1	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33
EPS2	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26
EPS3	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29
Medelvärde:	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29

Provkropparna av lättbetong fick redan tidigt (efter 7 cykler) en avskalning som sedan inte ökar med fler fryscykler. Enligt Vägverkets publikation Tunnel 2004 är sprutbetongens omgivning definierad som vägmiljö med exponeringsklass XF4, enligt Vägverkets publikation Bro 2004, kap 45.512 skall för vägmiljö god frostbeständighet uppfyllas.

Enligt de krav som definierats i standarden SS 13 72 44, utgåva III (Tabell 2-6) uppfylls kravet på god frostbeständighet för den provade lättbetongen.

Tabell 2-6 Frostbeständighet enligt SS 13 72 44, utgåva III

Frostbeständighet enligt provning	Krav
Mycket god	Avflagningarnas medelvärde vid 56 cykler (m56) är mindre än 0,10 kg/m ²
God	Avflagningarnas medelvärde vid 56 cykler (m56) är mindre än 0,20 kg/m ² eller Avflagningarnas medelvärde vid 56 cykler (m56) är mindre än 0,50 kg/m ² samtidigt som m56/m28 är mindre än 2 eller Avflagningarnas medelvärde vid 112 cykler (m112) är mindre än 0,50 kg/m ²
Acceptabel	Avflagningarnas medelvärde vid 56 cykler (m56) är mindre än 1,00 kg/m ² samtidigt som m56/m28 är mindre än 2 eller Avflagningarnas medelvärde vid 112 cykler (m112) är mindre än 1,00 kg/m ²
Inte acceptabel	Om inte kraven för acceptabel frostbeständighet uppfylls

2.2.5 Termiska egenskaper

Bestämning av termiska egenskaper (värmekonduktivitet och värmediffusivitet) utfördes med Transient Plane Source (TPS) vid rumstemperatur. Till provningen användes kuber med sidlängden 150 mm. Provföremålen förvarades i laboratoriet fram till provning. Temperaturen i laboratoriet var 20 ± 1 °C och den relativa fuktigheten var 60 ± 5 %. Transient Plane Source (TPS), 'Slab' modulen, används vid provningar. Tre mätningar utfördes på varje provföremål. Kapton sensor (4922) med 14,9 mm i radie har använts vid alla mätningar. Effekten var 5 W och mättiden var 10 sekunder för alla mätningar.

Mättningsresultaten har presenterats i Tabell 2-7 och Tabell 2-8.

Tabell 2-7 Värmekonduktivitet, värmediffusivitet och beräknad volymetrisk värmekapacitet hos Isolon Fire Proof vid 20 °C.

Provkropp 1	λ (W/mK)	α (mm ² /s)	C (MJ/m ³ K)
Mätning 1	0,177	0,290	0,610
Mätning 2	0,177	0,295	0,601
Mätning 3	0,176	0,288	0,610
Medelvärde	0,177	0,291	0,607
Standardavvikelse	0,001	0,003	0,005
Variationskoef. (%)	0,4	1,2	0,8

Tabell 2-8 Värmekonduktivitet, värmediffusivitet och beräknad volymetrisk värmekapacitet hos EPS Cement vid 20 °C.

Provkropp 2	λ (W/mK)	α (mm ² /s)	C (MJ/m ³ K)
Mätning 1	0,180	0,277	0,650
Mätning 2	0,180	0,283	0,637
Mätning 3	0,181	0,288	0,631
Medelvärde	0,181	0,283	0,639
Standardavvikelse	0,001	0,005	0,010
Variationskoef. (%)	0,3	1,8	1,5

En högre omgivningstemperatur ger en högre uppmätt värmekonduktivitet (λ). Detta förklarar varför värmekonduktiviteten här är högre än den initialt angivna värmekonduktiviteten (0,08 W/mK). Omgivningstemperaturen vid dessa försök var +20°C vilket skall jämföras med omgivningstemperaturen för den initialt angivna värmekonduktiviteten som var mätt vid +10°C.

Värmekonduktiviteten för den provade lättbetongen vid 20 °C är 0,18 W/mK.

Värmediffusiviteten för den provade lättbetongen vid 20 °C är 0,29 mm²/s.

Volymetrisk värmekapacitet för den provade lättbetongen vid 20 °C är 0,62 MJ/m³K.

3 Etapp 2 (torrsprutad lättbetong)

3.1 Metodik och genomförande

Under Etapp 1 konstaterades att den sprutade lättbetongen hade mycket goda egenskaper för att motstå brand. Projekt- och referensgruppen beslutade därför att projektet skulle gå vidare med utökade tester i en etapp 2.

För att sprutbetong baserad på denna typ av lättbetong skall kunna användas i ett större tunnelprojekt måste materialets egenskaper fastställas och verifieras genom försök i större skala. Inom etapp 2 utfördes:

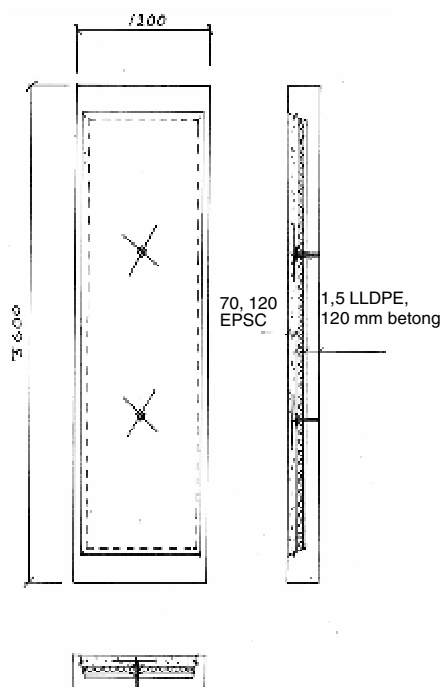
1. Provning av brandmotstånd i större skala.
2. Provning av materialets dynamiska uthållighet

Provningarna utfördes hos SP i Borås under våren 2007.

3.2 Provning och resultat

3.2.1 Brandmotstånd

Provelement för brandtester tillverkades genom konventionell torrsprutning med dimensioner enligt principskiss nedan.



Figur 3-1 Principskiss av brandprovade element i stor skala.

Brandmotståndet mättes på två olika provkroppar med olika tjocklek. Provkropparna hade torrstrutats med en lättbetong baserad på EPS kulor. Sprutformen hade dimensionerna 1200 x 3600 mm². Provkropp 1 var 70 mm tjock och provkropp 2 var 120 mm tjock.

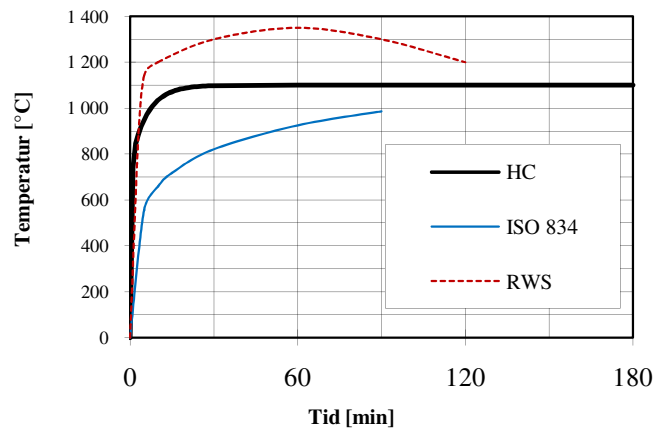
Det vattentätande skiktet utgjordes av ett LLDPE membran vars yta flossats för att öka vidhäftningen mot sprutbetongen. De två provkropparnas uppbyggnad redovisas i Tabell 3-1.

Tabell 3-1 Provkropparnas uppbyggnad

Beteckning	Tätande skikt	Lättbetong	Armering	Bultar
Provkropp 1	1,5 mm LLDPE (flossad)	70 mm	6x200x200 mm, centrisk	12 mm kamstål cc 1,8 m
Provkropp 2	1,5 mm LLDPE (flossad)	120 mm	6x200x200 mm, centrisk	12 mm kamstål cc 1,8 m

* Membran av LLDPE (linjär lågdensitetspolyeten (Low Density Polyethylene))

Den sprutade lättbetongen armerades med ϕ 6 mm armeringsnät, (200mm x 200mm), som placeras centriskt i sprutbetongskiktet. För att förankra upphängningsbultarna användes sprutbetongkors (Blekksprut) som najades till armeringsnätet.



Figur 3-2 Sprutbetongkors och Diagram för gastemperatur vid brand enligt hydrokarbonkurvan, SS-EN 1363-2

Innan sprutningen monterades termoelement i formarna för mätning av temperatur under brandprovningen. I provkropp 1 monterades 6 termoelement och i provkropp 2 totalt 9 termoelement.

Provningen utfördes med brandgastemperatur enligt EN 1363-2, hydrokarbonbrand (HC, Figur 3-2). Provningarna utfördes 070115. Proven pågick under minst 120 minuter.

Temperaturen i ugnen mättes med åtta termoelement. I varje provkropp var termoelement ingjutna på olika djup. De var placerade centriskt mot den brandexponerade ytan.

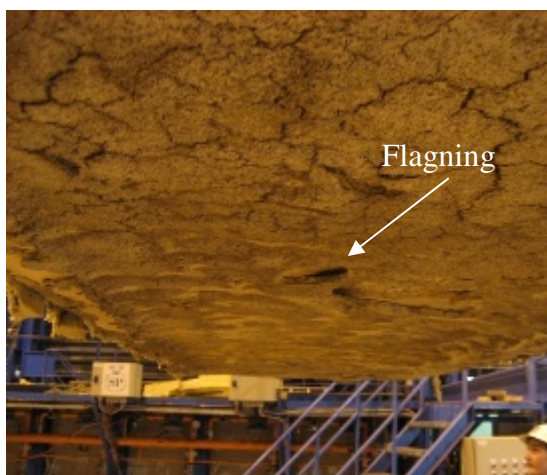


Figur 3-3 Tv. betongelement ovan ugn och T.h. upptändning av ugn

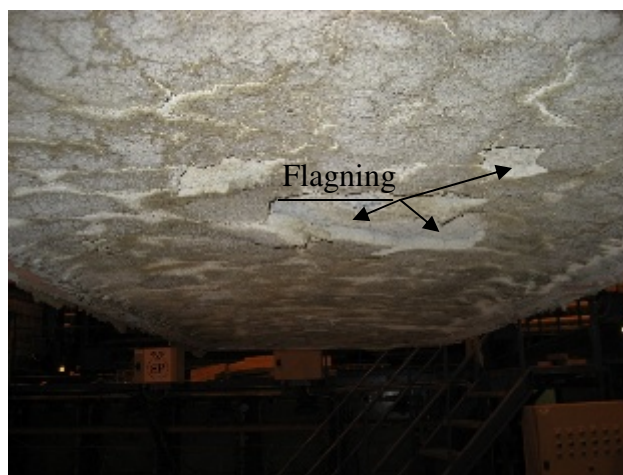
Omkring 3 minuter efter start av brandprovet skedde en mindre avflagning med bitar av storlek 5 mm x 5 mm från provkropp 2.

Omkring 10 minuter efter start av brandprovet lossnade på provkropp 1 en bit med storlek 100 mm x 200 mm och tjocklek omkring 20 mm vid upplaget. Vid samma tid lossnar också en bit med samma storlek från provkropp 2.

Efter provningen noterades att hållfastheten hos provkropp 1 var något sämre än hos provkropp 2. Detta fastställdes genom att med en hammare knacka på den brandutsatta ytan.

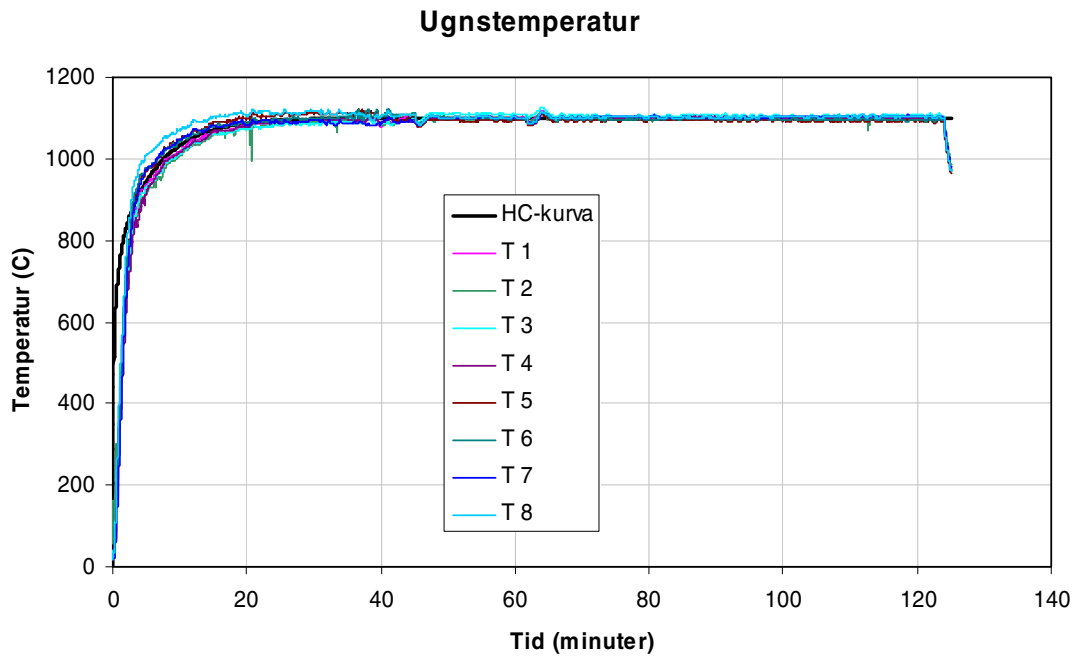


Figur 3-4 Provkropp 1 efter provning.



Figur 3-5 Provkropp 2 efter provning.

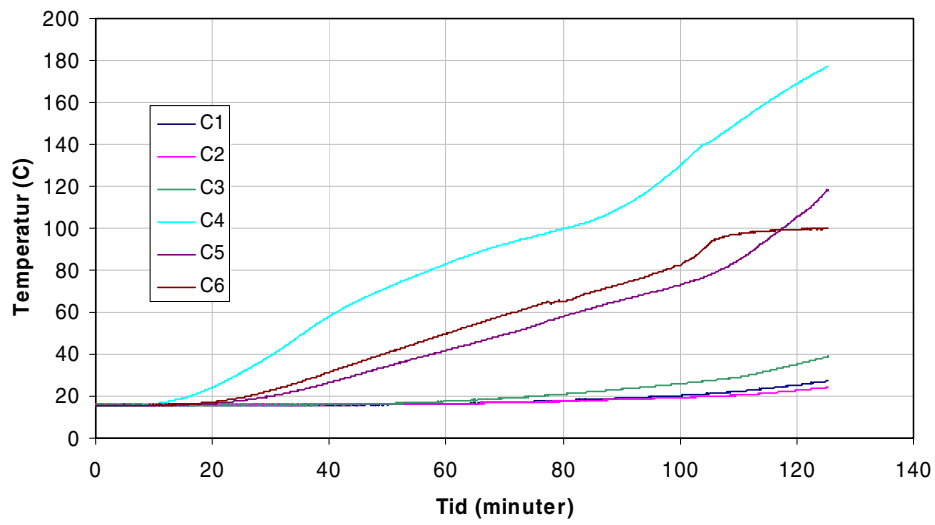
Figur 3-6 till Figur 3-8 visar de uppmätta temperaturerna i ugnen samt i provkropparna.



Figur 3-6 Ugnstemperatur enligt HC kurvan

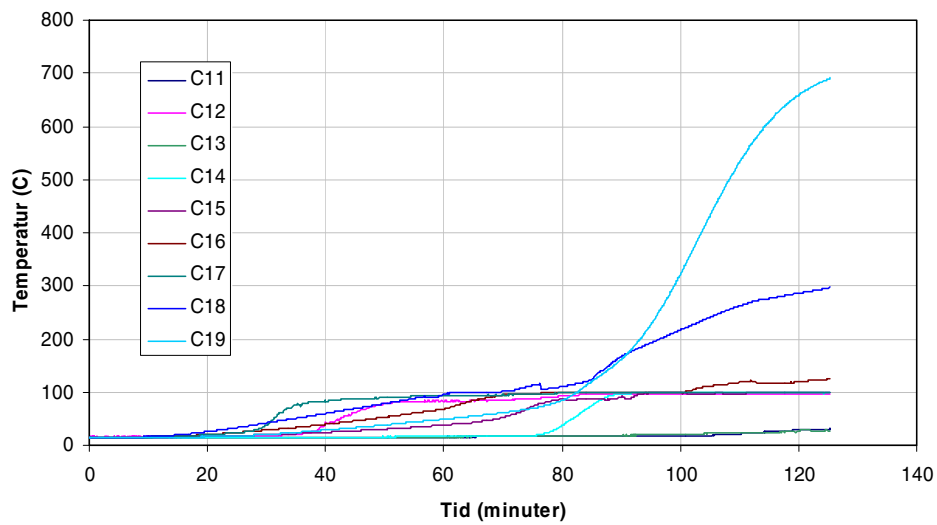
Ugnstemperaturen kurvan följer specificerad HC kurva. Från temperaturkurvorna noteras lättbetongens mycket goda värmeisolerande förmåga. Efter 2 timmars brandbelastning så steg temperaturen inne i provkropparna (närmast rumstemperatursidan) endast till strax över rumstemperatur för både provkropp 1 och 2. De högre noterade temperaturerna varierar mellan 100-700 grader. Temperaturen är mycket starkt påverkad av termoelementets exakta placering som lätt kan rubbas under sprutning av betong. Några vidare slutsatser av de individuella högre temperaturerna kan därför inte göras.

Provkropp 1



Figur 3-7 Temperaturer i provkropp 1, 70 mm.

Provkropp 2



Figur 3-8 Temperaturer i provkropp 2, 120 mm.

3.2.2 Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten bestämdes enligt SS 13 72 20 på kuber som sågades ut ur torrspurtade plattor av lättbetong. Kubernas sidlängd var 100 mm. Totalt tillverkades tre kuber för mätning av tryckhållfasthet.

Provningarna genomfördes den 15 januari, 2007. Resultaten från provningarna redovisas i Tabell 3-2.

Tabell 3-2 Resultat från tryckhållfasthetsprovning för torrspurtad Isolon Fire Proof.

Provkropp	Höjd (mm)	Längd (mm)	Bredd (mm)	Massa (kg)	Brottlast (kN)	Densitet (kg/m ³)	Tryckhållfasthet (MPa)
1	100,3	102,5	101,8	1,140	128,5	1088	12,3
2	100,3	101,8	101,7	0,999	97,0	962	9,4
3	100,0	101,9	101,7	0,932	86,5	899	8,3
Medel	-	-	-	-	-	983	10,0

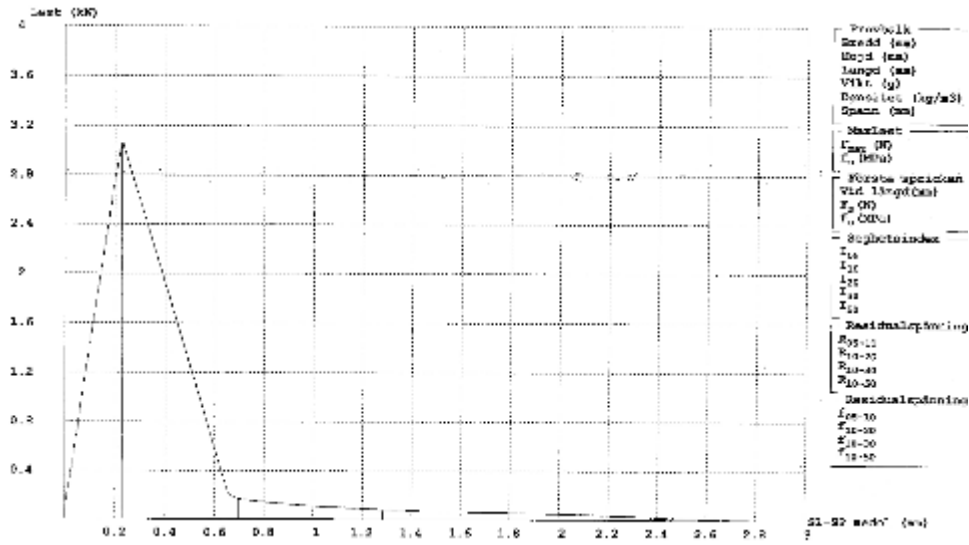
3.2.3 Böjdraghållfasthet

Tre provkroppar sågades ut ur de torrspurtade plattorna av lättbetong baserad på EPS-kulor. Dimensionerna på provkropparna var (längd x bredd x höjd) 550 x 125 x 75 mm³. Böjdraghållfasthet provades enligt ASTM C1018 och "Seghet hos fiberarmerad sprutbetong", 1990-10-31.

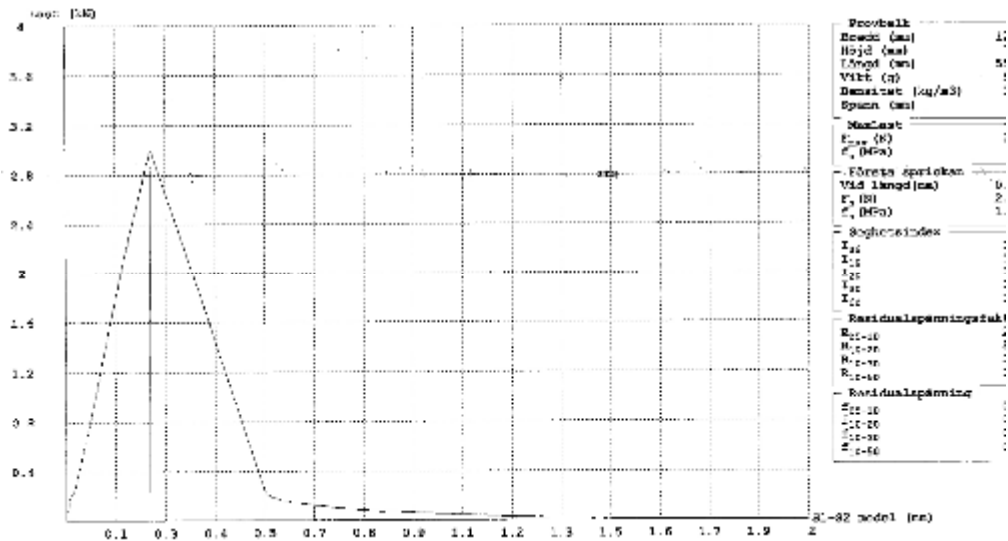
Provningen genomfördes den 15 januari, 2007. I Tabell 3-3 samt i Figur 3-9, Figur 3-10 och Figur 3-11 redovisas resultaten. Elasticitetsmodulen har beräknats genom mätning i figurerna och enligt ekvation i redovisad i kapitel 2.2.3.

Tabell 3-3 Resultat från provning av böjdraghållfasthet för torrspurtad Isolon Fire Proof.

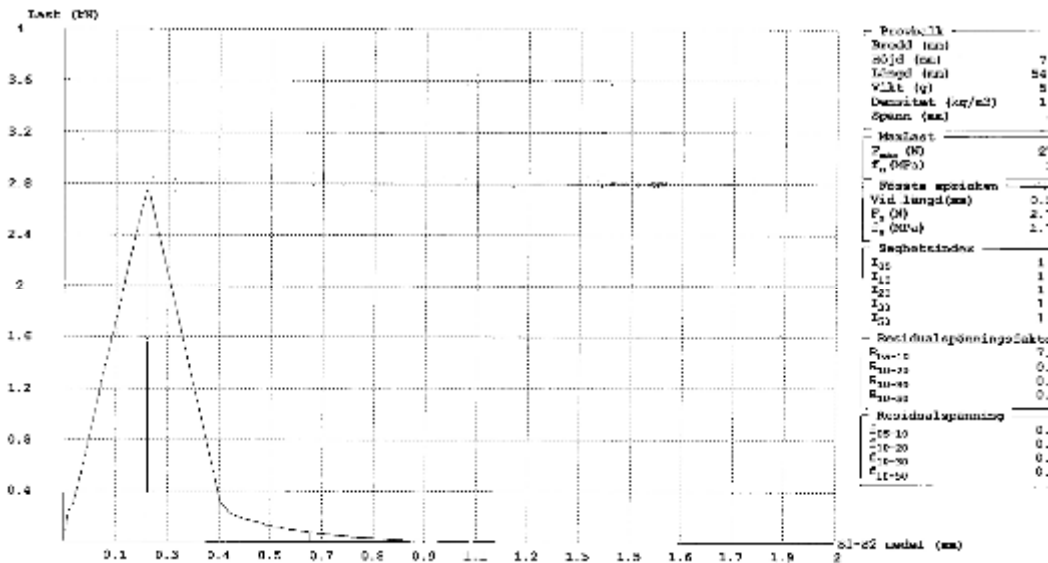
	Prov 1	Prov 2	Prov 3
Bredd (mm)	125,0	124,6	125,0
Höjd (mm)	75,1	75,1	74,7
Längd (mm)	549,3	551,3	548,8
Vikt (kg)	5,286	5,431	5,528
Densitet (kg/m ³)	1026	1053	1079
Hållfasthet (MPa)	2,0	1,9	1,8
E-modul (GPa)	6,6	6,4	5,9



Figur 3-9 Last -deformationskurva för prov 1 vid bestämning av böjdraghållfasthet.

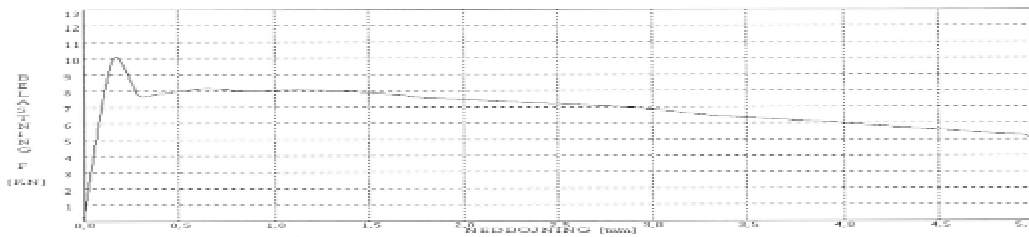


Figur 3-10 Last/deformationskurva för prov 2 vid bestämning av böjdraghållfasthet.



Figur 3-11 Last/deformationskurva för prov 3 vid bestämning av böjdraghållfasthet.

Som jämförelse redovisas i Figur 3-12 en last/deformationskurva för en ”vanlig” fiberarmerad sprutbetong där cementinnehållet var 520 kg/m³, stålfiberinnehållet 50 kg/m³ och polypropylenfiberinnehållet 2 kg/m³.



Figur 3-12 Last/deformationskurva för ”vanlig” stålfiberarmerad sprutbetong

Självfallet är det stor skillnad mellan en oarmerad och en stålfiberarmerad konstruktion vad beträffar segheten. Från figurerna noteras att den oarmerade lättbetongen inte har någon residualhållfasthet, vilket ej heller var förväntat. Elasticitetsmodulen beräknad med mätta värden för den stålfiberarmerade sprutbetongen uppgick till 13,9 GPa. Böjdraghållfastheten hos den ca 1000 kg/m³ tunga lättbetongen ligger är ca 2 MPa.

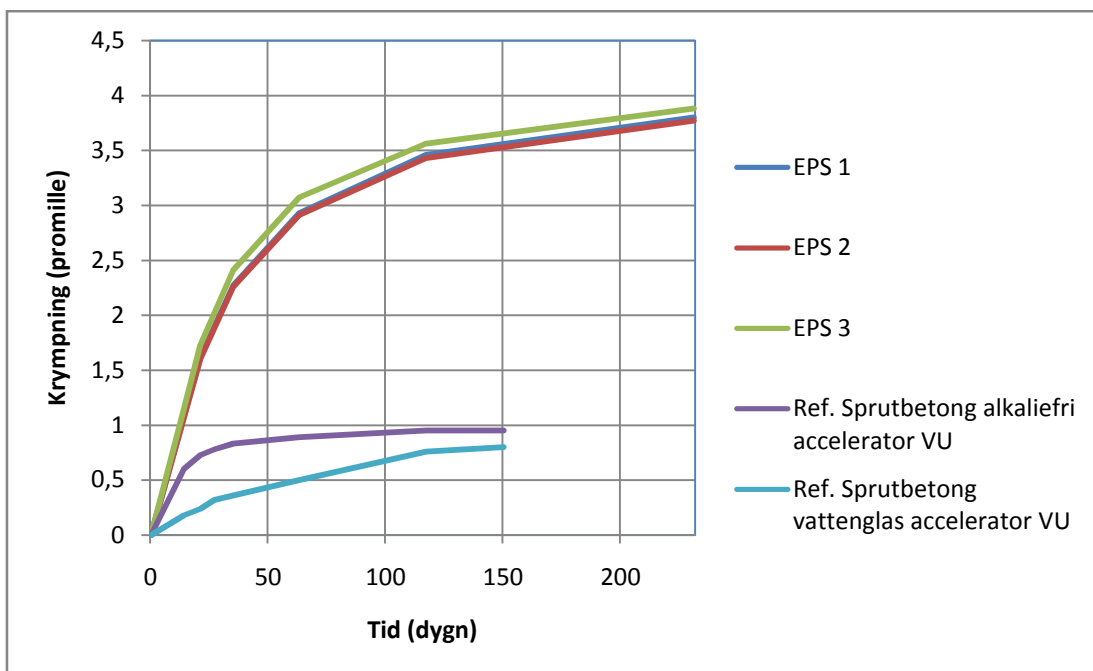
3.2.4 Krympmätning

Tre provkroppar tillverkades på SP den 20 mars, 2007. Vid tillverkningen blandades 6 liter vatten till en säck EPS Cement. Dimensionerna hos dessa provkroppar var 400 x 100 x 100 mm³. Krympmätningen utfördes enligt SS 13 72 15, utgåva 2. Mätningarna på de tre provkropparna och resultaten redovisas i Tabell 3-4 samt i Figur 3-13.

Tabell 3-4 Krympmätning för torrspirad Isolon Fire Proof (promille).

Provkropp	14 dygn	21 dygn	35 dygn	63 dygn	119 dygn	231 dygn
EPS 1	1,08	1,62	2,27	2,93	3,46	3,80
EPS 2	1,07	1,60	2,26	2,91	3,43	3,77
EPS 3	1,15	1,73	2,41	3,07	3,56	3,88

I Figur 3-13 redovisas uppmätt krympning hos sprutad lättbetong (ca 320 kg cement per m³). Som jämförelse redovisas även krympning hos vanlig sprutbetong med acceleratortillsats (480 kg cement per m³). De jämförande kurvorna är hämtade från rapporten "sprutbetongens krympning – modifiering av betongsammansättningen" (Lagerblad, Fjällberg & Westerholm 2007). Från figuren noteras dels att sprutad lättbetong baserad på EPS kulor krymper mer än vanlig sprutbetong, vilket är förståeligt med tanke på den mjuka ballasten (EPS-kulor), dels att krympningen pågår under än längre tidsperiod än vanlig sprutbetong.



Figur 3-13 Krympning hos torrspirad Isolon Fire Proof utan accelerator jämfört med vanlig sprutbetong med accelerator.

3.2.5 Termiska egenskaper

Fyra provkroppar sågades ut med dimensionerna 80 x 80 mm² och tjockleken 70 mm för mätning av de termiska egenskaperna.

Två av provkropparna sågades ut vinkelrätt mot ytan för mätning av de termiska egenskaperna i sprutriktningen. Det andra två provkropparna sågades så att egenskaperna mättes parallellt med ytan. Varje provkropp kapades i mitten för att på så sätt tillverka ett provkroppspar där varje del hade tjockleken 35 mm. De termiska egenskaperna mättes enligt SP metod 3485.

De termiska egenskaperna konduktivitet, diffusivitet och specifik värme mättes vid rumstemperatur. För varje fall gjordes tre mätningar. I Tabell 3-5 redovisas resultaten från dessa mätningar.

Tabell 3-5 Resultat från mätning av termiska egenskaper (Värmeledning, värmediffusivitet och beräknad volymetrisk värmekapacitet) för torrsprutad lättbetong baserad på EPS-kulor.

	λ (W/mK)	α (mm ² /s)	C (MJ/m ³ K)
Mätning i sprutriktning			
Prov 1: mätning 1	0,472	0,427	1,10
Prov 1: mätning 2	0,480	0,442	1,09
Prov 1: mätning 3	0,475	0,431	1,10
Prov 2: mätning 1	0,473	0,425	1,11
Prov 2: mätning 2	0,479	0,454	1,05
Prov 2: mätning 3	0,481	0,476	1,01
Mätning vinkelrätt sprutriktning			
Prov 3: mätning 1	0,544	0,253	2,15
Prov 3: mätning 2	0,541	0,240	2,25
Prov 3: mätning 3	0,541	0,238	2,28
Prov 4: mätning 1	0,577	0,275	2,10
Prov 4: mätning 2	0,541	0,234	2,31
Prov 4: mätning 3	0,543	0,240	2,26

Mätning av termiska egenskaper utfördes med TPS (Transient Plane Source) och visade att materialet var mycket anisotropt. Den specifika värmen är en bulkegenskap hos materialet och skall inte vara beroende av mätriktning. Vid mätningarna framkom att specifika värmen skiljer med en faktor två vid mätning vinkelrätt respektive parallellt med sprutningsriktningen, vilket gör mätresultaten inte helt tillförlitliga.

3.2.6 Dynamiska tester (våt- och torrsprutad lättbetong)

Provelement för dynamiska tester tillverkades med torr- respektive våtsprutning för att kunna jämföra de olika densitetsskillnader som uppkommer beroende av sprutmetod. Utmattningsprov utfördes genom att en cyklisk belastning påfördes på en i lättbetongen ingjuten bult.

Två olika plattor provades för utmattning. Platta 1 hade torrsprutats och platta 2 hade våtsprutats. Lasten påfördes genom en gängad M12 bult som skruvats mot ett sprutbetongkors (Figur 3-2). Sprutbetongkorsen var i sin tur najad till ett centriskt placerat armeringsnät. Kravet var att klara minst 50 miljoner lastcykler. Genom att öka lasten kan antalet lastcykler reduceras till 3 miljoner enligt beräkning som redovisats i kapitel 1.6. Försökupställningen visas nedan.



Figur 3-14 Provupställning

Glappande infästning mellan bult och armering

Platta 1 (torrsprutad)

Innan den dynamiska lasten kunde påföras rätades bulten då den var snett ingjuten. Efter ca 1 miljoner cykler började infästningen att glappa. Vid 1,6 miljoner cykler var glappet 5 mm och provningen avbröts. Efter avslutad provning utfördes statisk belastning till brott. Brottlasten blev 24,5 kN och brottdeformationen 80 mm.

Densiteten för prov 1 var 929 kg/m^3 och tryckhållfastheten 3,8 MPa.

Tryckhållfastheten mättes på cylindrar med höjden 102 mm och diameter 104 mm. Efter den statiska belastningen till brott noterades att glappet uppkommit mellan mutter och sprutbetongkors.

I figuren ovan till höger visas den glappande infästningen mellan bult och sprutbetongkors. Den övre muttern har lossnat och gängat upp sig ca 5 mm.

Platta 2 (våtsprutad)

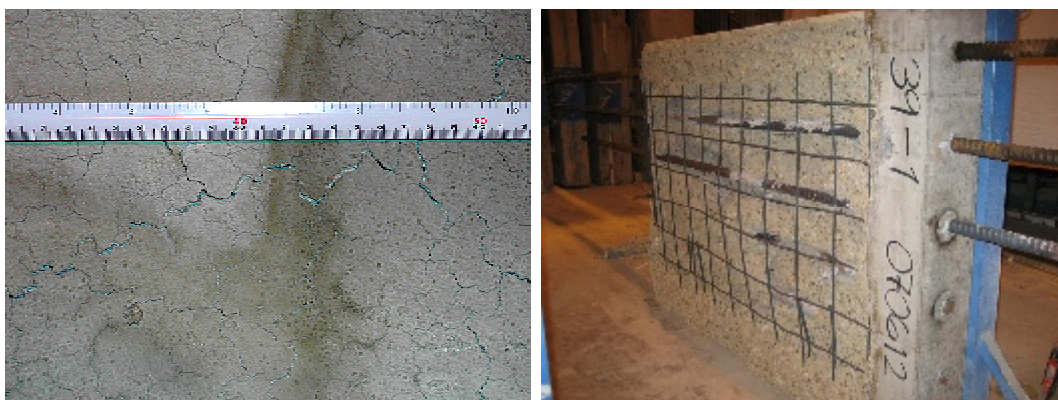
Bulten var vinkelrätt ingjuten i förhållande till provkroppen. Efter 3 miljoner cykler avbröts provningen. Inga synliga skador kunde noteras. Efter avslutad dynamisk provning utfördes statisk belastning till brott. Brottlasten blev 21,0 kN och brottdeformationen 80 mm. Densiteten för prov 2 var 650 kg/m^3 och tryckhållfastheten 2 MPa. Tryckhållfastheten mättes på cylindrar med höjden 102 mm och diameter 104 mm.

4 Diskussion

För att få reda på om systemidén fungerade där en ny typ av lättbetong (Isolon Fire Proof) skulle utgöra såväl isolering som brandskydd undersöktes under etapp 1 materialets mekaniska egenskaper och brandtålighet på ett förenklat sätt.

Sex olika provkroppar brandprovades för att mäta brandisolationsförmågan samt för att studera om de var tillräckligt motståndskraftiga för att stå emot explosiv spjälkning. Explosiv spjälkning kan uppträda inne i en betongkonstruktion på grund av för högt ångtryck, vilket innebär att betongbitar exploderar ut från konstruktionens yta. Tjockleken på provkropparna var 60 respektive 120 mm. Vid provningarna som utfördes enligt SP Brand 119 användes standardbrandkurvan enligt ISO 834:1975.

I figuren nedan visas en av provkropparna med krackelerad yta. Som jämförelse visas också till höger en vanlig betong som spjälkat långt förbi armeringsnätet.

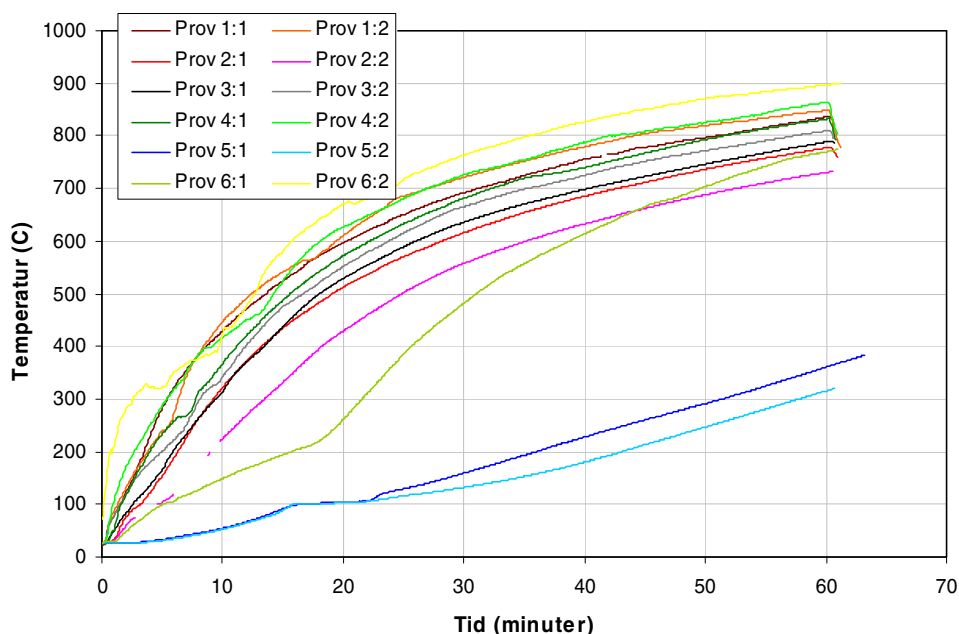


Figur 4-1 Till vänster visas provkropp 2-1 som krackelerar men inte spjälkar. Till höger visas från ett helt annat försök betong som spjälkat in förbi armeringsnätet efter brandtest.

Alla sex provkroppar klarade brandtestet utan att spjälka. Efter provningarna var den brandpåverkade ytan något krackelerad, men inget material hade skalats av. Jämfört med en normal betong var detta en mycket lyckad betongsammansättning om syftet var att framställa en betong som inte spjälkar.

Temperaturen mättes på olika djup i provkroppen under brandprovningarna. Det är dock svårt att direkt tolka resultaten då det exakta djupet från den brandexponerade ytan är osäkert. Detta beror på att den fixpunkt som använts vid montering av termoelementen var tätskiktet (LLDPE membranet som lades i botten av formen innan sprutning). Därefter sprutades betong i formen. Tjockleken på ett sprutat material varierade lite varför termoelementens tätskikt mätt från den brandbelastade ytan också varierar. Av Figur 4-2 framgår den variation i temperatur som uppstod på grund av variation i tätskikt. Om termoelementen hade varit placerade direkt under den brandbelastade ytan hade temperaturen varit densamma som ungstemperaturen.

Vissa kurvor ligger mycket lägre än standardbrandkurvan, Figur 2-1, vilket tyder på att termoelementen har större täcksikt.



Figur 4-2 Temperatur vid ytan på alla provkroppar.

Provkropparna av sprutad lättbetongen fick efter brandbelastning i den lilla ugnen en lätt krackelerad yta efter 60 minuters brandbelastning, detta oberoende om 60 eller 120 mm tjock lättbetong använts. En krackelerad yta borde kunna accepteras i en tunnel så länge som inget nedfall av krackelerat material sker.

De två provkroppar av sprutad lättbetong som belagts med 20 mm sprutbetong innehållande 2 kg/m³ polypropylenfiber uppvisar vare sig krackelering eller spjälkning efter 60 minuters brandbelastning i den lilla ugnen.

Temperaturen i provkroppen på 30 mm djup från den brandbelastade ytan var efter 60 minuters brandbelastning mellan 200 och 300 °C. På 60 mm djup var temperaturen oftast kring 100 °C för såväl de provkroppar med 60 mm respektive 120 mm tjocklek. Att temperaturen under en provning ofta stannar vid ca 100 °C beror på att det finns vatten i konstruktionen som förångas. En längre provtid leder till uttorkning och att temperaturen stiger ytterligare.

Då LLDPE membranet mjuknar vid ca 140 grader, är sannolikt valda tjocklekarna tillräckliga för att ge ett gott brandskydd åt konstruktionen under minst en timme.

Syftet med etapp 2 var att i större skala verifiera resultaten från etapp 1 samt att prova materialets motståndskraft mot dynamisk utmattning.

Två olika provkroppar med 70 mm respektive 120 mm tjocklek brandprovades i SP:s stora ugn. En begränsad avflagnings skedde på båda provkropparna. Denna avflagnings skedde som en delaminering, dvs en skiktning i ytan. I övrigt fanns inga tecken på explosiv spjälkning hos provkropparna.

Den isolerande förmågan hos elementen var mycket god. Efter 120 minuters exponering med hydrokarbonkurvan var temperaturstegringen på 70 mm djup från den brandbelastade ytan mindre än 20 grader.

Baserat på de utförda brandtesterna under etapp 1 och 2 är slutsatsen att den provade lättbetongen har mycket goda brandisolerande egenskaper. Kombinationen av ett obrännbart material, cement, och ett isolerande material, EPS kulor, gav en mycket lyckad blandning för att isolera bort värmen och motstå explosiv spjälkning.

Tryckhållfastheten hos lättbetongen är starkt kopplad till densiteten. Under den inledande etapp 1 användes våtsprutad lättbetong. Den våta betongblandningen håller ihop cement och EPS kulor så att densiteten efter sprutning nästan är densamma som innan sprutning. Under etapp 2 användes istället torrsprutad lättbetong. Vid sprutningen skedde en separation mellan cement och polystyrenkulor vilket innebar att cementshalten i slutprodukten blev högre än förväntat. EPS kulorna avgick i varierade grad som spill vid sprutningen vilket gjorde den torrsprutade lättbetongen tyngre än den våtsprutade. Att detta skulle ske hade inte förutsatts innan försöken. Antalet varianter på lättbetong med olika densitet blev på så sätt stort, vilket måste beaktas vid utvärderingen av de olika egenskaperna.

Uppmätt tryckhållfasthet varierar baserat på densiteten mellan 1,8 MPa och 10 MPa för den provade lättbetongen, resultaten redovisas i Tabell 4-1.

Tabell 4-1 Materialegenskaper för lättbetong med olika densitet baserad på EPS kulor (Isolon Fire Proof).

	EPSCement EC350K (enl. tillverkaren)	Våtsprutad			Torrsprutad		
		Isolon Fire Proof	Isolon Fire Proof	Isolon Fire Proof	Isolon Fire Proof	Isolon Fire Proof	Isolon Fire Proof
Densitet [kg/m ³]	450	463	523	650	929	983	1053
Frostbeständighet	–	GOD	–	–	–	–	–
Tryckhållfasthet [Mpa]	1,8	3,8	–	2*	3,8*	10	–
Böjdraghållfasthet [Mpa]	–	–	0,5	–	–	–	1,9
E-modul [Gpa]	–	–	1,4	–	–	–	6,4
Värmekonduktivitet [W/mK]	0,08 (10°C)	0,18 (20°C)	–	–	0,47-0,57 (20°C)		
Krympning [%]	–	–	–	–	–	3,8	–
Brandmotstånd ISO834,60 min.	–	Ingen spjälkning			–	–	–
Brandmotstånd HC, 120 min.	–	–	–	–	Ingen spjälkning		
Utmattning [lastväxlingar]	–	–	–	> 50 milj.	~27 milj.	–	–

*Tryckhållfastheten för densitet 650 och 929 är mätt på cylindrar, övriga tryckhållfastheter är mätta som kubhållfasthet.

Uppmätt böjdraghållfastheten varierar även den med densiteten från 0,5 MPa till 1,9 MPa. Lättbetongen har ett sprött brottförlopp. Ett sprött förlopp var förväntat med tanke på att den är oarmerad. En vanlig sprutbetongkonstruktion är oftast stålfiberarmerad, något som även skulle kunna provas för lättbetong med syfte att höja segheten.

Inom ramen för detta projekt mättes lättbetongens värmeledningsförmåga med en metod som förutsätter ett isotropt material. Under projektets gång noterades skiktning i sprutbetongen som gör att materialet mer är att betrakta som ett anisotropt material, vilket kräver andra mätmetoder. Resultaten från utförda mätningar avseende värmeledningsförmågan skall därför betraktas med stor försiktighet. Utöver detta bör noteras att uppmätt värmeledningsförmåga beror av omgivningstemperaturen under mätningen. I projektets startskede uppgavs värmekonduktiviteten (λ) för den gjutna lättbetongen till 0,08 W/mK mätt vid 10 °C. Inom ramen för detta projekt uppmättes för den sprutade lättbetongen värmekonduktiviteten (λ) vid 20 °C till 0,18 W/mK. För dimensionering av frostisolering borde det dock vara mer relevant att mäta vid en lägre temperatur strax över fryspunkten, en sådan mätning skulle sannolikt ge ytterligare lägre värde på värmekonduktiviteten.

Lättbetongen visade mycket större krympbenägenhet jämfört med konventionell sprutbetong. Efter 231 dygn hade den provade lättbetongen krympt nästan 4 ‰, vilket skall jämföras med vanlig stålfiberarmerad sprutbetong som krymper ca 1 ‰. Förklaringen till detta är inte utredd, men sannolikt beror det på att EPS kulor är mycket mjukare som ballast jämfört med den sand som ingår i vanlig sprutbetong.

Dynamiska tester utfördes på två olika lättbetongplattor där en bult skruvats fast mot ett centriskt monterat armeringsnät för att prova konstruktionens förmåga att motstå utmattning. Den ena plattan hade en densitet 929 kg/m³ och den andra en densitet på ca 650 kg/m³. Kravet var att konstruktionen skulle motstå 50 miljoner lastväxlingar. Den ena plattan klarade utmattningsprovet medan den andra plattan gick till brott efter halva antalet cykler.

Plattorna analyserades och det visade sig att muttern på den platta med densiteten 929 kg/m³ var lös. Det dynamiska testet visade mycket tydligt på viktigheten med ett korrekt arbetsutförande. Den platta med korrekt monterad bult klarade hela den dynamiska belastningen, medan den platta med bult som inte monterats med samma omsorg lossnade. Eftersom det var den platta med lägre hållfasthet (densitet) som höll genom hela testen kan man dra slutsatsen att en korrekt utförd infästning är viktigare än högre betonghållfasthet inom detta hållfasthetsintervall.

Inom ramen för detta projekt har ett antal grundläggande frågeställningar besvarats avseende möjligheterna att använda en lättbetong baserad på EPS kulor för en tunnel applikation. Under projektarbetet har fler frågor aktualiserats vilka nedan listas som rekommendationer till fortsatt arbete.

- Utföra en fullskaletest av en inklädnadslösning baserad på sprutbar lättbetong.
- Hur kan krympningen hos sprutbar lättbetong motverkas.
- Hur inverkar ett eventuellt vattentryck bakom membranet.
- Uppstår igensättning bakom membran på liknande sätt som igensättning av dräner i vissa miljöer.
- Kan kombinationslösningar baserade på konventionell sprutbetong och sprutbar lättbetong vara ett alternativ.

5 Referenser

1. Dalmalm, T., Boström, L., 2006, Brandtålig vatten- och Frostsäkring för Tunnelar - Etapp 1: Inledande test av Sprutad EPSCement, K23, SveBeFo
2. Dalmalm, T., Boström, L., 2008, Brandtålig Vatten- och Frostsäkring för Tunnelar, SveBeFo Bergmekanikdag, pp 137-152
3. Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels, 2004, International Tunnelling Association – Working Group No. 6 Maintenance and Repair
4. Håndbok 021 Vegtunneler, 2006, Statens Vegvesen, Norge
5. Håndbok 163, Vann- og frostsikring i tunneler, 2006, ISBN 82-7207-597-0, Statens Vegvesen, Norge
6. Häggström, J., Wahlström, B., Hjolman, M., 2007, Brandskydd av Tunnelkonstruktioner, Rapport 82, SveBeFo
7. Kledninger i tunnel, Rapport nr 06/2008, Nordisk Vegteknisk Forbund
8. Persson, L., Nöre, L., Fredriksson, A., 2005, NORRA LÄNKEN INKLÄDNAD - Frystest i arbetstunnel vid Trädkolevägen, Golder Associates AB, Vägverket Region Stockholm
9. SP rapport BRk 6067
10. SP rapport BRk 6067-01
11. SP rapport BRk 6067-02
12. SP rapport BRk 6067-03 (Utmattningsprov)
13. Tunnel 2004, Publ 2004:124, Vägverket



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

tbk.

ISSN 1104-1773