

BYG · DTU

DANMARKS  
TEKNISKE  
UNIVERSITET



Finn Kristiansen  
Kristian Hertz  
Lars Schiøtt Sørensen

## EKSPLOSIV AFSKALNING AF BETON

Nyudviklet prøvningsmetode

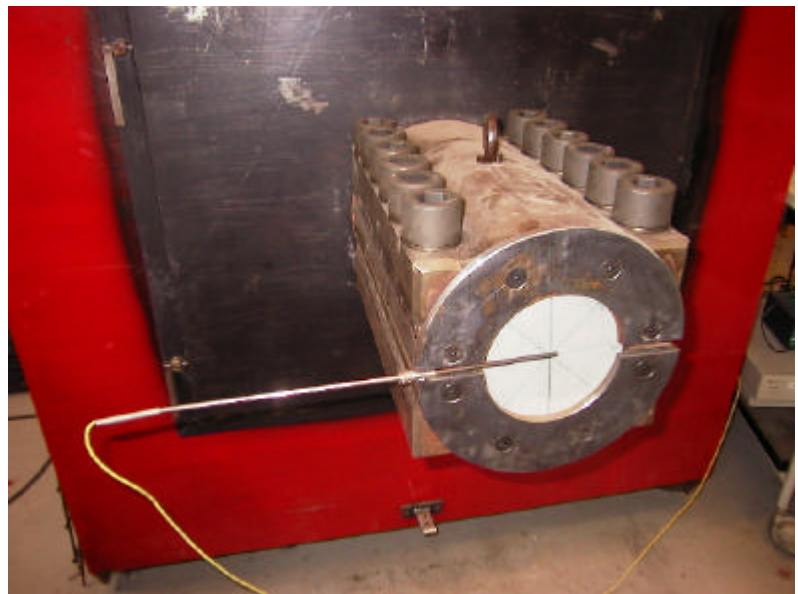
Rapport  
BYG · DTU R-050  
2003

ISSN 1601-2917  
ISBN 87-7877-110-2

# EKSPLOSIV AFSKALNING AF BETON

Nyudviklet prøvningsmetode

Finn Kristiansen  
Kristian Hertz  
Lars Schiøtt Sørensen



Department of Civil Engineering  
DTU-bygning 118  
2800 Kgs. Lyngby  
<http://www.byg.dtu.dk>

2003

## **PROJEKTDELTAGERE**

Finn Kristiansen,	civilingeniør, lektor
Kristian Hertz,	civilingeniør, lektor
Lars Schiøtt Sørensen,	civilingeniør, lektor
Michael Ramskov,	maskinarbejder, ingeniørassistent
Poul Dedenroth,	maskinarbejder
Mogens Jørgensen,	elektronikmekaniker, ingeniørassistent

## FORORD

Denne rapport afslutter BYG•DTU's del af projektet "BK2 Brand", der er finansieret af Erhvervsfremme Styrelsen. Projektet er et delprojekt af "Centerkontrakt – ressourcebesparende betonkonstruktioner" (kaldet "Grøn Beton").

Projektets formål har været at udvikle en ny og forholdsvis simpel prøvningsmetode til eksplosiv afskalning af beton, som kunne give en førstehånds indikation af om forskellige betontyper og især om de foreslåede betontyper i Grøn Beton projektet er kritiske mht. eksplosiv afskalning. Tanken var at metoden skulle være nemmere og hurtigere at anvende end fuldskalaforsøg. Desuden var det formålet at forsøge at finde årsager til hvorfor nogle betoner udviser eksplosiv afskalning og andre ikke. De foreslåede og nyudviklede betoner i Grøn Beton projektet vurderes desuden ud fra blanderecepter, med henblik på at forudse eventuelle brandtekniske problemer.

Flere nye betontyper er afprøvet i den nye prøvestand og nogle fuldskala betonvægge er afprøvet på Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI) til en mulig verificering af den nye prøvningsmetode.

Som forudsagt ved projektets begyndelse udgør projektet på ingen måde en tilbundsgående undersøgelse og problemstillingen om eksplosiv afskalning løses ikke generelt i dette projekt.

Nærværende rapporten indledes i kapitel 1 med en kort beskrivelse af baggrunden for projektet. Herefter beskrives projektførelsen kronologisk fra kapitel 2 til og med kapitel 4. Kapitel 5 beskriver den endelige forsøgsopstilling samt den procedure der er kommet frem til, og sluttelig i kapitel 6 konkluderes på hele projektet samt den endelige procedure.

## RESUMÉ

Dette projekt BK2 er et delprojekt af ”Centerkontrakt - Ressourcebesparende betonkonstruktioner” også kaldet ”Grøn Beton”. Projektet var opdelt i 3 faser: Grund Pakke, Stor Pakke og Udvidet Pakke.

Dette delprojekt har beskæftiget sig med at udvikle en ny prøvningsmetode for eksplosiv afskalning af beton. Metoden skulle være forholdsvis simpel og kunne give en forhåndsindikation af om forskellige betontyper er kritiske mht. eksplosiv afskalning. Fordelen ved denne metode er at prøveemnerne af beton er forholdsvis små, Ø 150 mm x 300 mm standardcylindre. Metoden er hurtigere og nemmere af anvende end et fuldskalaforsøg.

Projektet var delt op i flere dele. Først blev selve forsøgsopstillingen opbygget, testet og modificeret vha. nogle betoncylindre fra BYG•DTU’s lager og ud fra nogle cylindre som blev støbt på Teknologisk Institut fra en recept for højstyrkebeton samt fra nogle boreprøver og én betonflise fra en test i en tidligere opstilling. Herefter blev forskellige betontyper fra Grøn Beton projektet samt en enkelt fra DTU testet i Stor og Udvidet Pakke.

Forsøgsopstillingen består af en todelt stålkappe ca. 50 mm tyk som spændes sammen om betoncylinderen vha. 12 stk. Ø 36 mm bolte. Da cylinder og stålkappe ikke kan forventes at passe fuldstændigt til hinanden, er der mellem cylinder og stålkappe lagt et trykfordelingsmateriale der er volumenkonstant og som udfylder unøjagtighederne. Stålkappen er dimensioneret efter at kunne modstå det samme tryk fra temperaturudvidelserne som vil opstå i og tæt ved overfladen af en væg som brandpåvirkes. Trykket fra de termiske udvidelser er formodet at være en af forudsætningerne for om der opstår eksplosiv afskalning. Desuden består opstillingen af en mobil ovn, hvor ovnåbningen, efter opvarmning af ovnen til 1000°C, føres hen til eksponeringsfladen (endefluden, støbebunden) af betoncylinderen. Endefluden af cylindre eksponeres centralt på et areal på Ø 100 mm, og lyde fra evt. afskalninger og andet noteres med tidspunkt m.m. Efter en time afsluttes forsøget, og ovnen fjernes, og endefluden inspiceres.

I næste fase, Stor Pakke, blev 6 betoner i aggressiv miljøklasse og 6 i passiv miljøklasse testet mht. eksplosiv afskalning. Desuden blev en betontype, der erfaringsmæssigt ikke vil vise tegn på eksplosiv afskalning, testet som sammenligningsgrundlag. 6 aggressive og 4 passive, alle med mikrosilica, viste sikre tegn på afskalning mens 3 betontyper uden mikrosilica kan betragtes at være uden risiko for eksplosiv afskalning. Ved disse prøvninger blev der observeret 4 forskellige revnetyper på betonen. To revnetyper, afskalninger og trækrevner, er revner som kan forventes ved brandpåvirkning mens de 2 andre typer, ”tophat” og midtrevner, er typer som er uønskede og som er resultat af opstillingen. De sidstnævnte revnetyper er søgt elimineret dels ved at montere et endestop på stålkappen, således at trykfordelingsmaterialet ikke trykkes ud ved enden af cylinderen, og dels ved at afmontere overdelen af stålkappen umiddelbart efter forsøget, hvilket skulle give betoncylinderen fri bevægelighed mht. temperaturbevægelser.

I Udvidet Pakke blev der kun udvalgt 4 betontyper i passiv miljøklasse til test for eksplosiv afskalning. Dette skyldes dels tids- og dels budgetmæssige forhold. Det blev fra Centerkontraktens ledelse besluttet at der skulle testes 4 betonvægge på Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI) af samme type som cylindrene, som et sammenligningsgrundlag til den nye testmetode.

Ved at anvende en forholdsvis tyk væg vil der, ifølge beregninger, kunne opbygges et tryk i overfladen ved brandpåvirkning da midten af væggen er kold og holder igen på udvidelserne. 3 vægge blev støbt hos Unicon i Jylland, og én blev støbt hos Sydsten i Sverige. Herefter blev de transporteret til BYG•DTU. De 4 vægge, 1,2 m lang x 1,2 m høj x 0,3 m tyk, blev udtørret i BYG•DTU's forsøgshal i ca. 5,5 måneder til et fugtniveau på ca. 5 vægt %. På DBI blev væggene brandprøvet i en stor ovn, 6 m lang, ved en standardbrand i en time. Ingen af væggene viste tegn på eksplosive afskalninger, men der kunne konstateres en del revner i overfladen, og ved nærmere overvejelser kunne det konstateres at der var en del gennemgående revner. Disse gennemgående revner skyldes at der opstår så store trækspændinger i væggene at de revner i midten pga. udvidelserne i overfladen. Hermed aflastes trykspændingerne i overfladen, og der opstår ingen afskalninger, altså en ny erkendelse. Ved afkøling opstår der revner i overfladen, da midten nu er varm og holder igen på sammentrækningen. Alt i alt vil dette tilsammen give gennemgående revner, men ingen afskalninger pga. for små trykspændinger.

Det blev besluttet at anvende et opvarmningsforløb af ovnen til prøvning for eksplosiv afskalning af cylindrene, som nogenlunde svarer til standardbrandkurven. Ved disse prøvninger blev der ikke konstateres nogen afskalninger. Ved nærmere analyse af forsøgsresultaterne viste det sig at temperaturen ved endeflader af cylindrene var en del lavere end ovnens temperatur, hvilket givetvis var årsag til de manglende afskalninger. Desuden var afstanden fra ovn til endeflader af cylinderen også 10 mm længere end i Stor Pakke pga. endestoppets tykkelse.

Revnetyperne "tophat" ser ud til at være elimineret ved at montere et endestop. Derimod opstår midtrevner stadig, selv om betoncylinderen aflastes umiddelbart efter forsøget, men denne revnetype er harmløs for resultatet.

Resultaterne viser at den nye testmetode kan anvendes til en grov vurdering af om en given betontype med en given aktuel fugtighed har risiko for eksplosiv afskalning.

For at være sikker på at den nye opstilling "fanger" alle betoner med risiko for afskalning, foreskrives det at anvende temperaturbelastningen som er anvendt i Stor Pakke, dvs. en momentan påvirkning af betoncylinderoverfladen fra en 1000°C varm ovn der giver 800°C ved cylinderendeflader.

## SUMMARY

This project BK2 is a part of the larger project “Centre Contract – Resource Saving Concrete Structures”, also called “Green Concrete”. The large project was split into 3 phases: Ground Package, Big Package and Enhanced Package.

This part of the project BK2 has been occupied with developing a new test method for explosive spalling of concrete. The method should be relatively simple and should give an indication beforehand if different types of concrete were critical in terms of explosive spalling. The advantage of this method is that the test specimen is relatively small, Ø 150 mm x 300 mm standard cylinder. The method is faster and easier to use than tests in full scale.

The project BK2 was split into several parts. First the experimental arrangement was constructed, tested, and modified by means of some concrete cylinders from the stock on BYG•DTU and some cylinders made at Danish Technological Institute from a recipe of high strength concrete and some drill samples and a flag of concrete from a test in an earlier test facility. After this, several types of concrete from the “Green Concrete” project and a single concrete from BYG•DTU were tested in the Big Package and in the Enhanced Package.

The experimental arrangement includes a steel mantle, 50 mm thick in two parts, surrounding the concrete cylinder by means of 12 pieces of Ø 36 mm steel bolts. Between the concrete cylinder and the steel mantle a pressure distributing material is placed, which is volume constant, to fill out the space between the cylinder and the mantle because they do not fit exactly into each other. The steel mantle is constructed in such a way that it can resist the same pressure from the thermal expansion that will develop at the surface of a concrete wall in a fire. The pressure from the thermal expansion is one parameter that is assumed necessary to give an indication of explosive spalling. Besides, the arrangement contains a mobile oven. After heating the oven to 1000°C, the end surface of the concrete cylinder is exposed. The cylinder end is centrally exposed in an area of Ø 100 mm and sounds from spalling etc. are noted with time etc. After one hour the test is terminated, the oven is removed, and the end of the cylinder is examined.

In next phase, Big Package, 6 types of concrete in class aggressive environment and 6 types in class passive environment were tested for spalling. Furthermore, one concrete type was tested that should not explode. 6 types in class aggressive environment and 4 in class passive environment, all with micro silica showed clear sign of spalling while 3 types without micro silica can be considered to be without risk of explosive spalling. After the tests, 4 types of cracks on the concrete were obtained. Two types of cracks; spalling and stretch cracks, are cracks that are expected at fire while the other two types, “tophat” and mid crack, are not wanted and may be considered as a result of the arrangement. The 2 last crack types are sought to be eliminated partly by mounting an “end stop” on the steel mantle, so that the pressure distributing material will not be forced out at the end of the steel mantle, and partly by means of demounting the upper part of the steel mantle just after the end of the test, which should give free expansion of the concrete cylinder by means of temperature movement.

In Enhanced Package only 4 concrete types in class passive environment were chosen for test of explosive spalling. It was because of time and budget circumstances. The management of the centre contract decided that 4 concrete walls should be tested at Danish Institute of Fire

Technology (DBI) of the same concrete type as the cylinders as standard of comparison for the new test arrangement.

By use of a relatively thick wall there will, in accordance with the calculations, be built up a pressure in the surface of the wall in a fire situation because the middle of the wall is cold and therefore makes a force against the expansion in the surface. 3 walls were cast at Unicon in Jutland and one was cast at Sydsten in Sweden. Thereafter they were transported to BYG•DTU. The 4 walls 1.2 m long x 1.2 m high and 0.3 m thick were dried up in the test building at BYG•DTU in about 5.5 months to a moisture level of about 5 weight %. At DBI the walls were tested in a 6 m large oven, at a standard fire in one hour. None of the walls showed signs of explosive spalling, but there were a lot of small cracks in the surface and by an analysis it was concluded that there were several perforating cracks. These cracks are developed in two steps: At first some cracks are developed in the middle of the wall because there is tensile stress because of the expansion of the surface due to the fire. In the cooling phase the surface will contract, but is hindered as the middle is warm, and cracks at the surface will develop. All in all there will be cracks all way through the wall, but no spalling because of the minimal compression stress.

It was decided in Enhanced Package to use a heat curve of the oven for explosive spalling that was of the same shape and level as the standard fire curve. At these tests there was no sign of spalling. The temperature was lower at the surface of the concrete cylinder than in the oven shown in a further analysis which certainly was the reason why no spalling was observed. Furthermore the distance from the oven to the surface of the concrete cylinder was also 10 mm longer than in Big Package.

Crack type “tophat” seemed to be eliminated after mounting the “end stop”. On the other hand mid cracks still develop, even if the concrete cylinder is relieved from the pressure after one hour. But this crack type is harmless to the result.

The results show that this test method can be used to give a rough estimation if a concrete with given moisture content has a risk of explosive spalling.

To be certain that the new developed arrangement “catch” all concretes with the risk of explosive spalling, a temperature load is prescribed as in Big Package i.e. a momentary influence on the concrete cylinder surface from a 1000°C oven that gives about 800°C at the concrete surface.



## INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD.....	4
RESUMÉ.....	5
SUMMARY .....	7
INDHOLDSFORTEGNELSE .....	9
1. INDLEDNING.....	10
2. INDLEDENDE FORSØG.....	12
2.1 Opbygning af forsøgsopstilling .....	12
2.2 Forforsøg.....	16
2.3 Sammenfatning.....	24
3. STOR PAKKE .....	25
3.2 Resultater A-betoner .....	28
3.2 Resultater P-betoner .....	29
3.3 Revnetyper .....	31
3.4 Sammenfatning af resultater i Stor Pakke .....	33
4. UDVIDET PAKKE.....	35
4.1 Udtørring .....	37
4.2 Prøvning på DBI.....	40
4.3 Prøvning på DTU .....	45
4.4 Sammenfatning af forsøgene i Udvidet Pakke .....	47
5. ENDELIG FORSØGSOPSTILLING OG PROCEDURE.....	48
6. KONKLUSION.....	54
REFERENCER .....	57
LITTERATURLISTE .....	58
APPENDIKS A Skemaer til måleprocedure og dataopsamling for eksplosiv afskalning .....	60
APPENDIKS B Betonrecept for DTU-cylindre (mærket IBE xx).....	68
APPENDIKS C Detaljerede resultater fra Stor Pakke .....	71
APPENDIKS D Måling og beregning af fugt i cylindre og betonvægge i Udvidet Pakke .....	74

# 1. INDLEDNING

## Baggrund

Ved brandpåvirkning af betonkonstruktioner har man til tider konstateret, at betonen springer af i flager ved en voldsom kraft, hvilket i fagsproget benævnes eksplosiv afskalning.

Eksempelvis har man ved branden i det ene tunnelrør under Storebælt (under anlægsarbejdet) og ved en vejbro over en motorvej [1] konstateret dette fænomen i praksis. Denne form for afskalning kan være alvorlig, da konstruktionen bliver svækket dels ved at der er mindre betonareal til at optage konstruktionens spændinger, og dels ved at armeringen kan blive blotlagt og dermed miste sin styrke ved de høje temperaturer (ca. 600°C til 1000°C), som opstår ved en "almindelig" brand. Fænomenet er, dog i mindre målestok, blevet observeret af håndværkere, der som led i deres arbejde har anvendt gasflammer, der har været tæt på betongulv, som hermed har vist tegn på eksplosiv afskalning.

I takt med at man er blevet bedre til at beregne bæreevnen af betonkonstruktioner samt øge styrken af betonen, er betonkonstruktionerne blevet slankere. Hermed er brandmodstandsevnen blevet mindre og det er derfor blevet mere nødvendigt at styre betonsammensætningen. Ved at gøre betonen stærkere og dermed tættere, har man ved brande kunne konstatere øget risiko for eksplosiv afskalning af betonen. Hvad grunden nøjagtig er til den eksplosive afskalning er endnu et åbent spørgsmål. Én teori er, at det er det naturlige vandindhold i betonen som ikke kan slippe væk som damp under en brand. Der opstår dermed et stort damptryk inde i betonens porer som til sidst får betonen til at springe af. Et forhold som givetvis forstærker denne tendens er mikrosilica, som tilsættes betonblandingen, idet denne øger tætheden og dermed risikoen for afskalning [2].

## Tunnelement (Storebælt)

I juni 1994, i forbindelse med boringen af tunnelen under Storebælt, opstod der brand i det ene tunnelrør. Tunnelrørene består af en tæt højstyrkebeton. Da linieføringen af tunnelen er under havbunden er den påvirket af et ydre vandtryk. Ved branden blev der observeret eksplosionsagtige lyde, som senere viste sig at stamme fra kraftige afskalninger fra betonen (tunnelvæggen). Der var tale om eksplosiv afskalning. Grunden(e) til fænomenet er stadig ikke fuld fastlagt.

## Fliser i stor ovn

I et afsluttet eksamensprojekt på DTU [3] er der blevet støbt nogle betonfliser med dimensionerne 0,55 m x 0,55 m x 0,1 m med en beton nogenlunde mage til den som blev brugt til tunnelelementerne under Storebælt, dog med et lidt varierende luftindhold i de forskellige fliser. Fliserne blev delvis isoleret, på siden der vendte ind mod ovnåbningen, således at et eksponeringsareal på 200 mm x 200 mm fremkom, på midten af fliserne. Fliserne blev monteret i et stativ som passer til lågeåbningen i ovnen. De forskellige fliser blev prøvet ved 700°C og 800°C. Alle viste tegn på eksplosiv afskalning. Afskalningerne, for fliser ved den lave temperatur (700°C), forekom dog lidt senere end for fliserne ved den høje temperatur (800°C). Efter ca. en halv time revnede fliserne og afskalningerne ophørte hermed.



Figur 1.1. Foto af brandprøvet flise nummer 6 fra afgangprojektet [3]. En trækrevne, øverst midt for og ned til afskallet område, kan anes.

### Hvorfor ny prøvningsmetode

Det er projekts formål at udvikle en simpel prøvningsmetode til undersøgelse af betoner for eksplosiv afskalning, således at man på et tidligt tidspunkt i f.eks. en byggesag kan fastslå om betonen er modstandsdygtig over for brand eller om betonen skal gennem andre prøvningsmetoder inden den kan godkendes eller kasseres. Det er intentionen at prøvningsmetoden kan bruges i stedet for prøvning i fuldskala, i hvert fald som en første indikation af, om betonen rent brandteknisk er i orden eller om den skal gennemgå yderligere tests f.eks. i fuldskala. Metoden vil være langt mindre arbejdskrævende og billigere end en fuldskalatest. Desuden er projektets formål at forsøge at finde en del af forklaringen til denne eksplosive afskalning.

### Grøn Beton projektet

Nærværende projekt (BK2 brand) er en mindre del af projektet ”Centerkontrakt – ressourcebesparende betonkonstruktioner” som for nemheds skyld i det efterfølgende benævnes Grøn Beton. I Grøn Beton projektet blev der foretaget prøvninger i 3 faser: Grund Pakke, Stor Pakke og Udvidet Pakke.

I første fase, Grund Pakken, blev mange forskellige betontyper underkastet forskellige prøver. Ud fra udfaldet deraf blev nogle typer fravalgt f.eks. pga. at de ikke kunne opfylde styrkekrav, frostbestandighed e.l. I næste fase, Stor Pakke, blev de resterende betoner udsat for mere omfattende undersøgelse/prøvning for evt. at finde yderligere betoner der kunne fravælges. I denne fase blev 12 betontyper (6 i aggressiv miljøklasse og 6 i passiv miljøklasse) udvalgt, af ledelsen af projektet, til brandtest i prøvestanden for eksplosiv afskalning. Desuden blev der på DTU støbt én type beton som erfaringsmæssigt ikke skulle udvise tegn på eksplosiv afskalning. På baggrund af forsøgene i Stor Pakke blev prøvestanden modificeret. I Udvidet Pakke blev der udvalgt 4 forskellige betontyper i passiv miljøklasse til nye test for eksplosiv afskalning. Betontyperne blev dels afprøvet som cylindre i den nye prøvestand og dels som vægelementer på Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI).

## 2. INDLEDENDE FORSØG

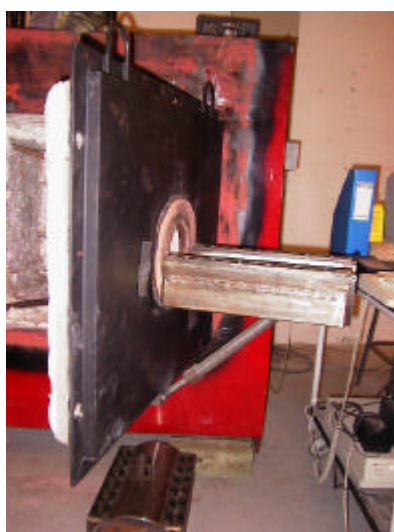
I den indledende fase af dette delprojektet, BK2 brand, blev en forsøgsopstilling til eksplosiv afskalning af beton opbygget. Tanken var, at der i opstillingen, skulle anvendes standardcylindre til afprøvningerne. Det blev besluttet at prøveopstillingen blev opbygget, således at standardcylindre med dimensionen  $\text{Ø } 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  kunne anvendes til forsøgene. Princippet er at endeflader af cylinderen udsættes for brand, hermed vil cylinderendeflader virke som en lille del af f.eks. overfladen af en væg som brandpåvirkes. En væg som udsættes for brand er i de fleste tilfælde påvirket af belastninger fra ydre laste fra f.eks. et betondæk, bjælkelag eller andet. Ved at omgive betoncylinderen med en todelt stålkappe, som sammenspændes med stålbolte vil det være muligt at opbygge et vist tryk på cylinderen, således at trykforholdene bliver som i f.eks. en betonvæg. Stålkappens primære mål er dog at sikre opbygningen af de langt større termiske trykspændinger i overfladelaget, som også vil optræde i en brandpåvirket konstruktion som f.eks. en væg, en søjle eller et tunnelrør.

### 2.1 Opbygning af forsøgsopstilling

Indledningsvis blev en stor elovn med de udvendige dimensioner 1,3 m høj x 1,4 m bred x 1,3 m dyb på BYG.DTU anvendt til temperaturlastning på cylindrene. En ny ovnlåge til den store elovn, med en fastmonteret underdel af en stålkappe samt hul til betoncylinder, blev opbygget.

#### Opbygning af ovnlåge

Ovnlågen er varmeisoleret af to grunde; dels for at mindske varmetabet fra ovnen og dels af sikkerhedsmæssige grunde for at hindre for høje temperaturer på lågeoverfladen. Ovnlågen som yderst består af 2 mm stål blev isoleret indvendigt med et brandbestandigt isoleringsmateriale af fabrikatet Keranap som kortvarigt kan tåle temperaturer op til ca.  $1250^{\circ}\text{C}$ . Isoleringen på i alt 110 mm er opbygget af fire lag. Lagene er henholdsvis 15 mm, 20 mm, 25 mm og 50 mm tykke og limet sammen vha. en speciel lim (fiberklæber) som er højtemperaturbestandig. Herefter er isoleringen fastgjort til stållågen vha. tynde gevindstænger af stål med skive og møtrik.



Figur 2.1. Foto af ny ovnlåge med nedre stålkappe



Figur 2.2. Foto af ny ovnlåge set fra bagsiden med isolering (hvid) og 8 stålskiver.

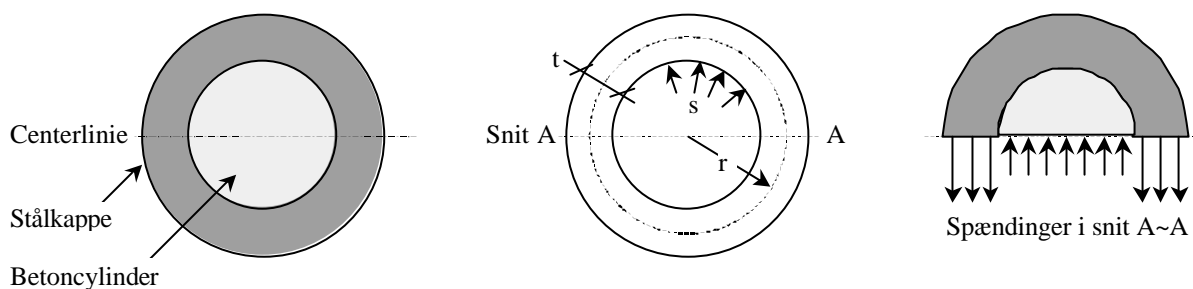
Af praktiske grunde er der lagt nogle mellemlægsskiver i alt 3 stk. (15 mm) mellem låge og stålkappe. Dvs. at der er 125 mm fra ovnkammer og ud til den eksponerede overflade af betoncylinderen. Vha. et indbygget føringsrør (kanylerør) til et termoelement i ovnlågen måles temperaturen ca. 55 mm fra betonoverfladen. Senere revideres forsøgsopstillingen og temperaturmåling sker tættere på betonoverfladen. Eksponeringsområdet og dermed det gennemgående hul fra ovn til betoncylinder er ca. Ø140 mm.

### Dimensionering af stålkappe

Ved en brand vil der f.eks. i en væg opbygges et tryk i overfladen af væggen på grund af den termiske udvidelse af betonen. For at sikre at endeflader af betoncylinderen udsættes for et tryk, som svarer til den termiske udvidelse, er der konstrueret en stålkappe som omkranser cylinderen. Stålkappen består af 2 dele, en under- og overdel, der sammenholdes med stålbolte. Dimensionen af kappe og bolte er beregnet ud fra at trykket fra de termiske udvidelser af cylinderen (ringtrykket) kan overføres til kappe/bolte. Den termiske spænding påvirker dog kun cylinderen i en dybde af få centimeter, men af hensyn til spændingsfordelingen gives kappen samme stivhed i hele dens længde.

Ringtrykket som opstår i et cirkulært område på Ø 150 mm i en væg ved en brand er først beregnet overslagsmæssigt og herefter mere detaljeret vha. et program udviklet på BYG•DTU, se figur 2.4.

Nedenstående figur 2.3 viser en principskitse af stålkappen til brug ved beregning af stålkappens dimension.



Figur 2.3. Principskitse til brug ved beregning af stålkappe til omkransning af betoncylinder.

Hvor  $t$  er den tykkelse af stålkappen, som skal beregnes.

$r$  er radius til midt af stålkappe.

$s$  er radiære spændinger mellem beton og stålkappen eller det samme som spændinger i et snit gennem betoncylinderens diameter.

A~A er et snit gennem kappe og betoncylinder, som anvendes ved beregningen.

Det udadrettede tryk, der opstår i et cirkulært udsnit i en væg ved en brand og som betoncylinderen udsættes for vha. de to stålkappehalvdele, beregnes først vha. følgende overslagsberegning:

Ved ca. 500°C opstår erfaringsmæssigt det største tryk, hvor en 40 MPa betons E-modul er faldet til omkring 20 GPa.

Overslagsmæssigt beregningsudtryk:

Spænding = temperatur · konstant · E-modul ved 500°C.

$$s = T \cdot 1,1e-5 \cdot E_{c,500}$$

$$s = 500^\circ\text{C} \cdot 1,1e-5 \cdot 20 \text{ GPa} = 100 \text{ MPa}$$

Herefter er der foretaget en mere detaljeret beregning. Beregningerne viser, at for beton med et E-modul ved 20°C,  $E_{c,20}$  på 30 GPa, fås et maksimalt ringtryk pga. de termiske udvidelser på 106 MPa mens et E-modul på 40 GPa,  $E_{c,20}$  giver et maksimalt tryk på 141 MPa. Aggressiv beton med en trykstyrke på 35 MPa har et begyndelseselasticitetsmodul på ca. 37 GPa mens passiv beton med en trykstyrke på 15 MPa har et begyndelseselasticitetsmodul på ca. 27 GPa ifølge Norm for betonkonstruktioner DS 411 [4].

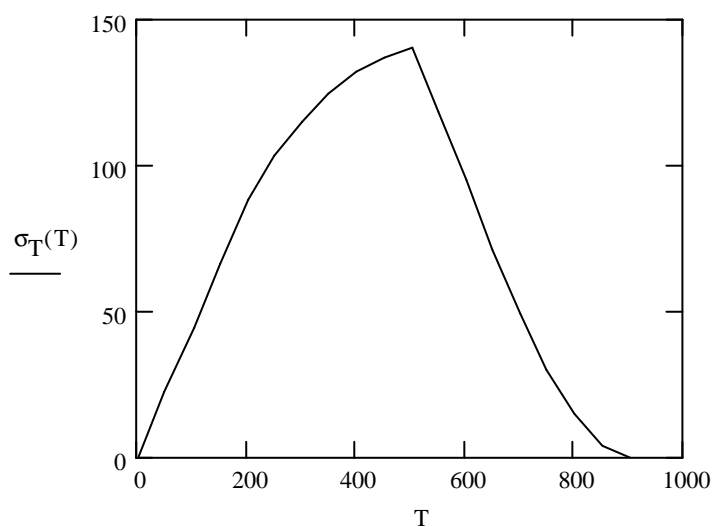
The reduction of the compressive strength of a Danish concrete is:

$$\xi_c(T) := \text{if}(T \leq 200, 1, 0) + \text{if}\left[200 < T \leq 500, \left[1 - 0,2 \cdot \frac{(T - 200)}{300}\right], 0\right] + \text{if}\left[500 < T < 900, 0,8 - 0,8 \cdot \frac{(T - 500)}{400}, 0\right]$$

Original E-modulus of concrete  $E_{c20} := 40000$

Thermal pressure of a concrete with restrained expansion but without creep and transiens:

$$\sigma_T(T) := T \cdot 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot E_{c20} \cdot (\xi_c(T))^2 \quad T := 0, 50.. 1000$$



Figur 2.4 Tryk i beton under opvarmning ved forhindret ekspansion. E-modul ved 20°C  $E_{c,20}$  på 40 GPa. Udskrift af beregning.

Beregningen er på den sikre side, da den ikke medtager krybning og transiens.

Herefter beregnes den tykkelse t af stålkappen, som skal til for at kunne holde til dette udadrettede tryk fra cylinderens termiske udvidelse ved brandbelastning:

s = 141 MPa er det radiære udadrettede tryk

r = 105 mm er ca. radius fra midten af stålkappen til centrum af betoncylinderen

$t$  = tykkelsen af stålkappen, som er den ubekendte  
 $f_{yk}$  = 335 MPa (Fe 510) er stålets karakteristiske flydespænding ( $t > 16$  mm) [5]

Snit A~A:

$$f_{\text{træk}} = s \cdot r$$

$$f_{\text{træk}} = 141 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot 0,105 \text{ mm} = 14,81 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

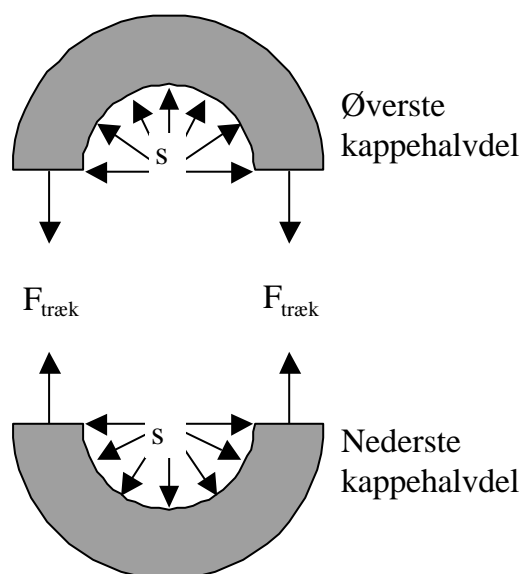
nødvendig tykkelse  $t$  for stål Fe510:

$$\frac{f_{\text{træk}}}{t} \leq 335 \text{ MPa} \Rightarrow t \geq \frac{14,81 \cdot 10^6 \text{ N/m}}{335 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2} = 44 \text{ mm}$$

Stålkappen er hermed på den sikre side beregnet til at skulle have en godstykkelse på ca. 45 mm bestående af stål Fe 510.

### Dimensionering af stålbolte

De to halvdele af stålkappen skal holdes sammen af stålbolte. Beregningsmæssigt og på den sikre side forudsættes det, at cylinderen opvarmes til maksimaltemperaturen i hele dens længderetning. Hermed kan boltestørrelsen forudsættes at være ens. Bolteantallet på hele kappelængden kan nu findes.



Figur 2.5. Principskitse af øvre og nedre stålkappehalvdele til brug ved beregning af bolte.

Kraften på de to kappehalvdele:

$$F_{\text{træk}} = 2 \cdot f_{\text{træk}} \cdot l$$

Hvor  $l$  er længden af den del af cylinderen der kan regnes som varmpåvirket. I praksis er det kun de yderste 3 – 6 cm af cylinderen som er varmpåvirket, men da afstanden er afhængig af



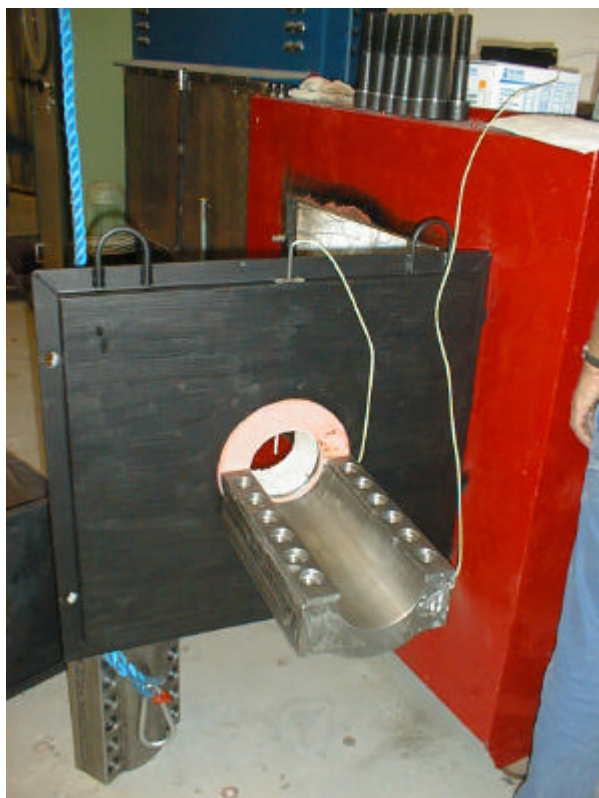
temperaturbelastningen, regnes hele cylinderen for varmepåvirket ( $l = 0,300\text{ m}$ ), således at det bliver samme størrelse bolte som vælges at anvende i hele stålkapens længde.

$$F_{\text{træk}} = 2 \cdot 14,81 \cdot 10^3 \text{ N/m} \cdot 0,300\text{ m} = 8,88 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Der vælges M36 bolte type 12.9, dvs. bolte med en nominal flydespænding på 883.000 N [6]. Antallet af bolte, som skal til for at kunne holde til trækket på 141 MPa beregnes.

$$\text{Antal} = \frac{8,88 \cdot 10^6}{883.000} = 10,06 \text{ bolte}$$

Der vælges at anvendes 12 stk. M36 bolte type 12.9 til at holde de to kappehalvdele sammen. Dvs. at på hver side af kappen placeres 6 bolte.



Figur 2.6. Foto af stor ovn, åben ovnlåge med stålkappeunderdel og overdel placeret på gulv.



Figur 2.7. Foto ved montering af beton-cylinder i underdel af stålkappe.

## 2.2 Forforsøg

I forbindelse med opbygningen af forsøgsopstillingen blev der fremskaffet forskellige beton-cylindre i rette dimension. Cylinderne blev anvendt til nogle forforsøg for at opnå erfaringer med opstillingen mht. testforberedelse, procedure og forsøgsresultater. Erfaringerne kunne give indikationer på om der var noget som skulle ændres.



### Betoncylinder ”Øresundsbeton”

Det første testforsøg af opstillingen blev foretaget med en cylinder af en beton som var nogenlunde af samme type som der blev anvendt til sænkekasserne til tunnelen under Øresund fra Kastrup til den kunstigt anlagte ø Peberholmen. Betoncylinderen blev anbragt i underdelen af stålkappen. Herefter blev overdelen af stålkappen monteret oven på cylinderen og fastspændt med stålbolte. Den store ovn blev tændt og indstillet med et setpunkt på 800°C.



Figur 2.8. Foto af ovnlåge med fastmonteret nederste stålkappehalvdel samt på gulv øverste stålkappehalvdel og afprøvet betoncylinder.

Prøven viste ingen tegn på afskalning efter 4 timer. Det viste sig at den store ovn var forholdsvis lang tid ca. 2 timer og 40 minutter om at nå op på den ønskede temperatur på 800°C. Desuden viste temperaturmålingen 55 mm fra cylinderoverfladen en maksimal temperatur på kun 590°C efter små 4 timer. Betonoverfladens temperatur er hermed en del lavere end de 590°C.

På grundlag af erfaringerne med ovenstående forsøg blev følgende ændret:

- 1) En mindre ovn blev fremskaffet (lille ovn), hvor det kun tager ca. 50 minutter at nå op på 800°C. Desuden kan denne ovn opnå en maksimal temperatur på ca. 1050°C efter ca. 90 minutter, hvilket senere viste sig at være en fordel.
- 2) Mellem ovnlåge og den lille ovn anbringes et isoleringsskot som fjernes momentant når ovnen er varmet op, således at cylinderen får en større temperaturpåvirkning dvs. en større temperaturgradient end ved første forsøg.
- 3) Tilspændingsmomentet af boltene blev forsøgsvis valgt til 300 Nm.

Den modsatte ende af den samme ”Øresundcylinder” blev brandpåvirket i opstillingen under de nye forsøgsforhold.

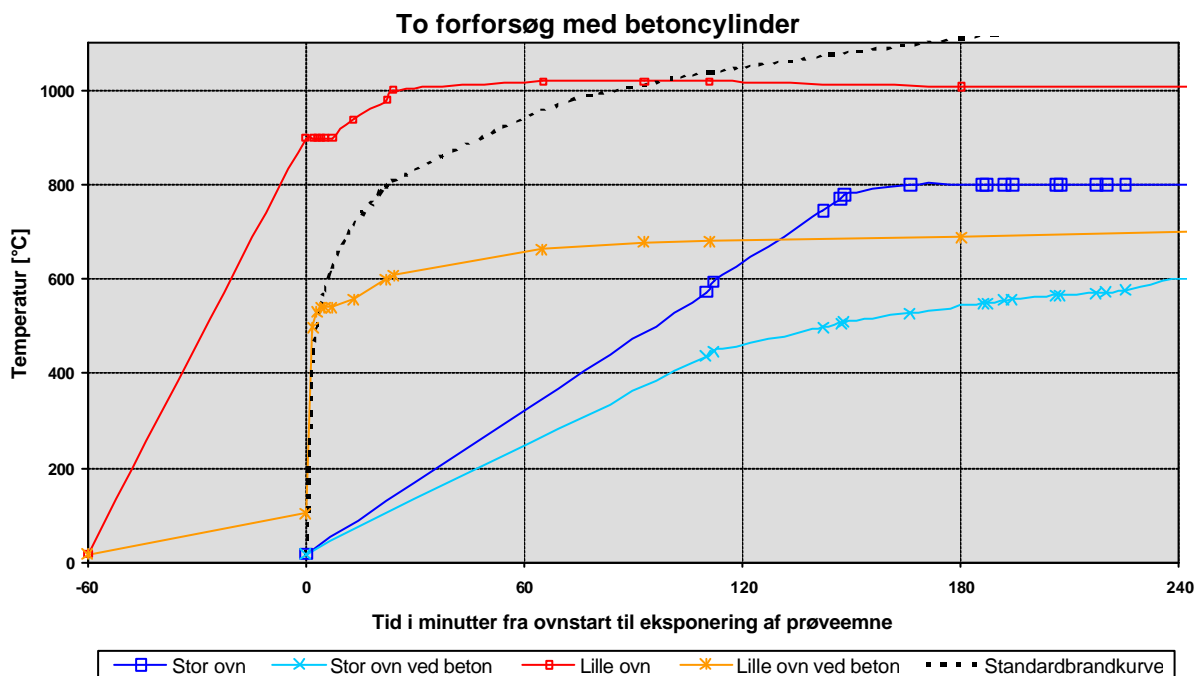


Figur 2.9. Foto af lille ovn (sølvfarvet) mod åben ovnlåge på stor ovn (rød) samt stålkappe.



Figur 2.10. Stor ovn med lukket ovnlåge og lille ovn.

Prøven viste nu sikre tegn på eksplosiv afskalning, dvs. der forekom afskallede betonstykker, ca. 13 minutter efter at skottet blev fjernet. Temperaturen 55 mm fra den eksponerede betonoverflade var på det tidspunkt ca. 560°C altså et meget hurtigere opvarmningsforløb i forhold til forløbet for den store ovn. I nedenstående figur ses temperaturforløb for stor og lille ovn samt temperaturen 55 mm fra den eksponerede betonoverflade.



Figur 2.11. Temperaturforløb ved de to tests. Ovnstemperatur samt temperatur 55 mm fra eksponeret betonoverflade.

Af ovenstående figur ses at den store ovn var ca. 160 min om at nå op på 800°C (mørkeblå). Temperaturen 55 mm fra eksponeringsflade af betoncylinder nåede kun op på en maksimal

temperatur på ca. 600°C (lyseblå) efter 240 min. Ved at forvarme den lille ovn en time før start fås en temperatur på ca. 900°C i ovnen (rød kurve) ved start (0 minutter) og den maksimale temperatur 55 mm fra betonoverfladen efter en times eksponering blev ca. 650°C (orange kurve). Altså et betydeligt hurtigere temperaturforløb end med den store ovn. Desuden ligger temperaturen 55 mm fra betonoverfladen i de første minutter tæt på forløbet af Standardbrandkurven.

### **Trykfordelingsmateriale**

Efter de to indledende tests blev det påpeget at betoncylinder og stålkappe ikke passer fuldstændigt til hinanden og at det påtrykte tryk samt trykket fra den termiske udvidelsen derfor ikke vil blive jævnt fordelt over betoncylinderen. Unøjagtighederne skyldes dels at støbeforme til betoncylindre ikke er helt ens, da der er en tolerance på diameteren på formen på  $\pm 2$  mm [7] og dels at stålkappen også har en tolerance som nok er noget mindre. Desuden er svindet forskelligt alt afhængig af betontypen.

På baggrund af dette er der fundet frem til følgende løsning:

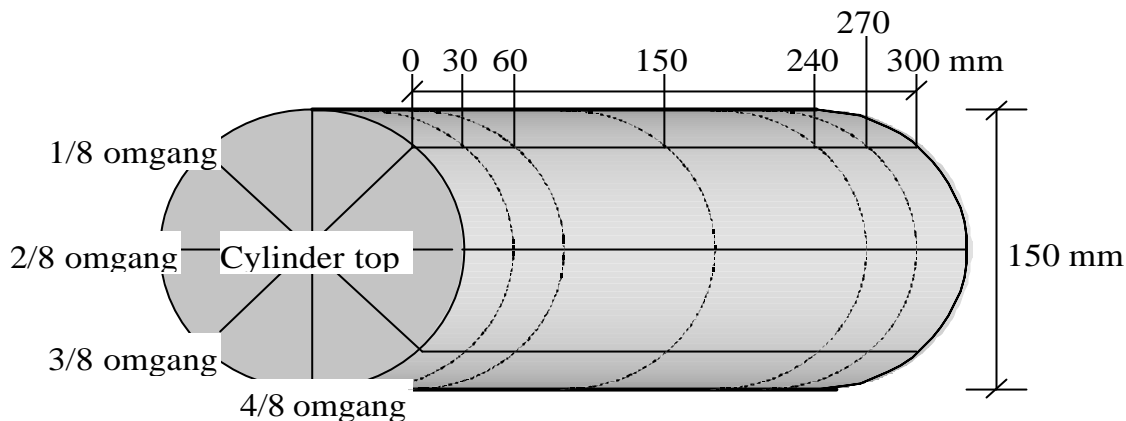
For at få en mere ensartet trykfordeling på betoncylinder blev der fremskaffet et trykfordelingsmateriale af en form for gummi Neopren som er volumenstabil dvs. at ved en sammentrykning i to dimensioner vil det udvide sig tilsvarende i den tredje dimension. Desuden kan Neopren tåle forholdsvis høje temperaturer. Neopren i 3 forskellige tykkelser 1,0 mm, 1,5 mm, 2,0 mm samt en Nitrilgummi i tykkelse 0,5 mm blev fremskaffet. Neopren i 0,5 mm tykkelse kunne ikke fremskaffes derfor blev en Nitrilgummi valgt.

De følgende tests blev derfor udført med trykfordelingsmateriale, som blev lagt omkring betoncylinderen. En nøjere opmåling af betoncylindrene blev foretaget for at finde den tykkelse af trykfordelingsmaterialet Neopren/Nitril som i hvert forsøg vil passe mellem cylinder og kappe. Til beregning af trykfordelingsmaterialets tykkelse, betonens fugtindhold, registrering af temperaturforløb samt afskalningstidspunkter m.m. er der udfærdiget en beregningsfil i Excel med et antal beregningsark. Et eksempel på en beregningsfil er angivet i Appendix A.

Da brandeksponeringen kun foretages i den ene ende af cylinderen er kun halvdelen af cylinderen opmålt mht. diameteren. Det er skønnet at diameteren i den anden ende af cylinderen kun har meget ringe eller ingen indflydelse på resultaterne samt at der ved denne udeladelse spares tid ved opmålingsproceduren. Det skønnes, at det hovedsagelig er vigtigt, at trykfordelingsmaterialet er i korrekt tykkelse nær eksponeringsfladen. Nedenstående opmålingsprocedure er herefter anvendt ved de senere prøvninger af betoncylindre for eksplosiv afskalning.

I nedenstående figur 2.12 er beregningsark fra Excel med principskitse til opmålingsproceduren vist.

Opmåling af diameter af prøveemnet ved 7 forskellige steder i længderetningen.  
Hvert sted foretages 4 målinger ved at dreje cylinderen 4 gange 1/8 omgang.



Figur 1. Principskitse af opmålingspunkter på betonprøveemne

Målepunkt i længderetning fra top af cylinder (med tekstidentifikation)	Omgang				Gennemsnit
	1/8	2/8	3/8	4/8	
mm	mm	mm	mm	mm	mm
0.0					
30.0					
60.0					
(B) Gennemsnit af 0, 30 og 60					#DIVISION/0!
150.0	149.6	150.7	150.7	149.3	
240.0	148.9	150.5	150.9	149.5	
270.0	148.6	150.6	151.0	149.7	
300.0	148.9	151.0	151.4	150.0	
(C) Gennemsnit af 240, 270 og 300	148.8	150.7	151.1	149.7	150.1
Største diameter	149.6	151.0	151.4	150.0	151.4
Mindste diameter	148.6	150.5	150.7	149.3	148.6

Tabel 2. Skema til opmåling af diameter af betonprøveemne

Tykkelse af trykfordelingsmateriale ved top (153.0 mm - B)/2:	[mm]	#DIVISION/0!
Tykkelse af trykfordelingsmateriale ved bund (153.0 mm - C)/2:	[mm]	1.46
Valgt tykkelse:	[mm]	1.50
Dimension af trykfordelingsmateriale:	300 mm x 471 mm	
Trykfordelingsmateriale (Neopren/Nitril) og betonprøveemne monteres i stålkappe. De to stålkappe omkring betonprøveemnet fastgøres ved hjælp af bolte som krydsspændes.		
Tilspændingsmoment af bolte Ø 36 mm:	[Nm]	(160) 80
Ovnstype:	lille ovn = ca. 0.1 m x 0.2 m x 0.3 m [højde x bredde x dybde]	
	[højde x bredde x dybde]	

Figur 2.12. Principskitse til brug ved opmåling af cylinder samt beregning af trykfordelingsmaterialets tykkelse (1,46 mm).

### Betencylindre ”KER 10.11.99 xx”

Ud fra ovenstående erfaringer blev der foretaget yderligere forførsøg, da 2 forsøg er et meget lille grundlag at basere sig på. Ud fra en af de betonrecepter som blev anvendt i eksamensprojektet (blanding 3,4 og 5, side 12 i appendix B i [3]) fik BYG•DTU støbt 3 fliser og 9 betoncylindre på Teknologisk i Taastrup. Fliser og cylindre blev herefter henholdsvis forsejlet og vandlagret i ca. 3 måneder. Betontypen har en høj styrke (ca. 85 MPa) og en tæt struktur. 6 af betoncylindrene benævnt KER 10.11.99 med nummer 5, 25, 39, 41, 44 og 50 blev brandtestet. 3 af cylindrene blev udtørret i forsøgshallen på BYG•DTU i godt en måned og herefter brandtestet og 3 stk. blev testet umiddelbart efter optagning fra vandkar. Betonen indeholder 37,8 kg/m<sup>3</sup> mikrosilica (10 % af pulvermængden), 340,1 kg/m<sup>3</sup> lavalkali cement, v/c = 0,37 og luftindholdet var 3,8 %. De 3 ovennævnte fliser blev ikke brandtestet da man senere i stedet valgte at teste en flise fra eksamensprojektet [3], se afsnit ”Boreprøver af fliser” på næste side.

Betontype Miljøklasse	Nummerering af prøveemner	Eksponeringsområde af cylinder	Bemærkninger
Aggressiv	KER 10.11.99 5	top	Udtørring i forsøgshal.
Aggressiv	KER 10.11.99 25	top	Udtørring i forsøgshal.
Aggressiv	KER 10.11.99 39	top	Udtørring i forsøgshal
Aggressiv	KER 10.11.99 41	top	Prøves umiddelbart efter optagning fra vandkar
Aggressiv	KER 10.11.99 44	bund	Prøves umiddelbart efter optagning fra vandkar
Aggressiv	KER 10.11.99 50	bund	Prøves umiddelbart efter optagning fra vandkar

Tabel 2.1. Betontype, nummerering, eksponeringsområde og udtørningsforhold for KER 10.11.99 betoncylindre.

Toppen af betoncylindrene er i nogle af prøvningerne anvendt som eksponeringsflade, da man ikke på dette tidspunkt i projektet havde overvejet/gjort sig klart, hvilke ende som ville være den mest relevante at anvende. Senere er bunden af cylindrene anvendt da denne er støbt mod en forside som det også vil være tilfældet i praktiske betonkonstruktioner.

Ved de 6 tests var ovntemperaturen ca. 1010°C og 55 mm fra prøveemnet var temperaturen ca. 630°C efter 1 times eksponering. Nedenstående tabel 2.2 viser resultaterne fra prøvningerne.

Nummerering af prøveemner	Fugtindhold før prøvning	Tilspændings- moment	Afskalninger				Sluttemperatur	
				Vægt	Dybde max.	Andel af eksponeret flade	i ovn	ved beton
	vægt %	Nm	Ja/nej	gram	mm	%	°C	°C
KER 10.11.99 5	3,7	300	Nej	-	-	-	1000	630
KER 10.11.99 25	3,8	200	Nej	-	-	-	1000	629
KER 10.11.99 39	3,9	200	Nej	-	-	-	1020	637
KER 10.11.99 41	4,6	200	Nej	-	-	-	1010	630
KER 10.11.99 44	4,5	200	Nej	-	-	-	1010	625
KER 10.11.99 50	4,5	200	Nej	-	-	-	1005	630

Tabel 2.2. Resultater fra afprøvning af KER 10.11.99 cylindre for eksplosiv afskalning.

Der forekom ikke nogen form for afskalninger ved disse tests, selv for de 3 cylindre som var fuldt opfugtede (ca. 4,5 vægt %). Spørgsmålet var om temperaturbelastningen på cylindrene var stor nok og da ovnsens maksimaltemperatur ligger på ca. 1050°C kan temperaturen ved beton-

overfladen ikke forøges med mere end ca. 40 K. Der blev derfor foretaget en ændring i prøvningsmetoden, således at betoncylinder og den lille ovn blev placeret i den anden ende af stålkappen. Dermed vil afstanden fra ovn til eksponeringsoverfladen kunne gøres mindre og dermed vil det være muligt at forøge temperaturen ved overfladen af betonen en del. Desuden blev eksponeringsområdet reduceret til Ø100 mm, idet den yderste rand af betoncylinderen dvs. 25 mm da ikke vil blive varmepåvirket og derfor vil virke som en slags ekstra indspænding af den inderste eksponerede del af cylinderen.



Figur 2.13. Foto af de 6 testede KER 10.11.99 betoncylindre.

For at få reduceret eksponeringsområdet blev der udarbejdet et overgangsstykke ca. 0,3 m x 0,3 m mellem ovn og cylinder af 25 mm tyk brandisolering med et Ø100 mm hul centreret, således at cylinderens inderste Ø100 mm bliver eksponeret. Desuden blev temperaturen målt ca. 12 mm fra betonoverfladen og ikke 55 mm fra overfladen som ved de foregående forsøg.

### **Boreprøver af fliser**

For at være nogenlunde sikker på at have sammenlignelige prøvninger samt den samme beton (dog med forskellig alder) blev det valgt at foretage prøvninger af boreprøver af en betonflise, flise nr. 9, som havde været afprøvet for eksplosiv afskalning i den store ovn ved et tidligere eksamensprojekt [3]. Betonen til fliserne var blandet og udstøbt på Teknologisk Institut i Taastrup. Betonen (blanding 1, side 11 i appendix B i [3]) kan styrke- (ca. 90 MPa) og tæthedsmæssigt sammenlignes lidt med den beton som blev anvendt til tunnelen under Storebælt, dog med et lidt varierende luftindhold i de forskellige fliser.

Ved eksamensprojektet blev fliserne på midten, på et areal af 0,2 m x 0,2 m, eksponeret i den store ovn ved en ovntemperatur på henholdsvis 700°C og 800°C. Resten af fliseoverfladen ind mod ovnen blev delvist isoleret med 100 mm brandisolering. I eksamensprojektet viste alle fliserne tegn på eksplosive afskalninger indtil de revnede. Når først fliserne revnede ophørte afskal-



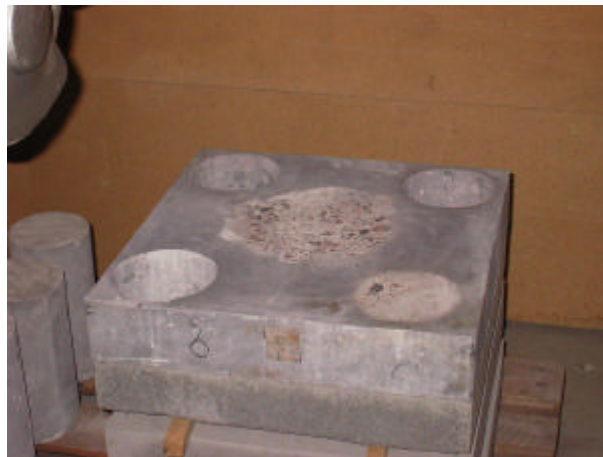
ningerne da de termiske spændinger dermed forsvandt. Flise nr. 9 var lagret ved 100 % RF i 31 døgn og derefter 41 døgn ved 60 % RF. I forbindelse med eksamensprojektet blev de brandprøvede betonfliser med dimensionen 0,55 m brede x 0,55 m lange x 0,1 m tykke efter afprøvning opbevaret i kælderen på DTU til evt. senere dokumentation.

Ud af flise nr. 9 fra ovennævnte eksamensprojekt, blev der, uden for det afskallede område på midten og udenfor revner (dvs. omkring hjørnerne af flisen), udboret 3 stk. Ø 143 mm x 100 mm borekærner. Kærnerne blev vandlagret i ca. 3 uger. Hermed havde man betonkærner der i den nye opstilling kunne sammenlignes med fliseforsøgene. Desuden blev flisen uden indspænding afprøvet mht. eksplosiv afskalning i en midlertidig opstilling, hvor eksponeringsareal og temperatur var som under kerneprøvningerne. Flisen blev monteret foran ovnåbningen på den lille ovn. Afprøvningen af flisen (nederste højre hjørne, se figur 2.14 og 2.15) viste afskalning, på ca. 25-30 % af eksponeringsarealet, ca. Ø 140 mm (hvidt område), men ophørte da der opstod gennemgående revner i flisen.

Betonen indeholder  $37,0 \text{ kg/m}^3$  mikrosilica (10 % af pulvermængden),  $333,2 \text{ kg/m}^3$  lavalkali sulfatbestandig cement,  $v/c = 0,37$  og luftindholdet var 4,4 % for flise nr. 9.



Figur 2.14. Foto af betonflise nr. 9 med 3 huller fra udborede betonkærner. Afskallet område på midt samt cirkulært område ø 140 mm i nederste højre hjørne med afskalning (30 %).



Figur 2.15 Foto af samme betonflise nr. 9 som i figur 2.14.



Figur 2.16. Foto af de 3 afprøvede borekærner Ø 143 mm x 100 mm fra flise nr. 9.

Betonkærnerne blev afprøvet i prøvestanden til eksplosiv afskalning. Borekærne nr. 1 blev afprøvet uden tilspænding ved en ovntemperatur på ca. 890°C, hvilket resulterede i en temperatur 12 mm fra overfladen på ca. 655°C. Ved fliseprøverne i afgangprojektet var temperaturen i den store ovn ved en del af prøvningerne 800°C og da eksponeringsarealet var 200 mm x 200 mm og 100 mm fra ovnkammeret er det antaget at temperaturen tæt ved overfladen af betonen var nær ved de 800°C. På grundlag af det antagede temperaturniveau i den store ovn blev de to sidste borekærner nr. 2 og nr. 3 udsat for en ovntemperatur på ca. 1000°C i den nye prøvestand, hvilket resulterede i en temperatur på ca. 830°C 12 mm fra overfladen af betonen, altså omkring samme temperatur som antaget i den store ovn. Borekærne nr. 2 og nr. 3 blev afprøvet ved henholdsvis et tilspændingsmoment på 200 Nm og 40 Nm.

Alle borekærner viste, som under fliseforsøgene, afskalninger under prøvningen, dog i mindre grad (mindre dybde af afskalningen pga. mindre eksponeringsareal og prøveemne) end fliserne. Altså samme tendens som ved fliseprøvningerne. Dette understøtter, at prøvestanden er brugbar, da denne viser samhörørende resultater med testen af fliserne, og især at stålkappen kan sikre opbygningen af de termiske trykspændinger, som givetvis er nødvendige for afskalninger af disse betontyper.

I nedenstående tabel er forsøgsresultaterne for flise og borekærnerne angivet og sammenholdt med resultaterne for KER 10.11.99 cylindrene.

Nummerering af prøveemner	Fugtindhold før prøvning	Tilspændingsmoment	Afskalninger				Sluttemperatur	
				Vægt	Dybde max.	Andel af eksponeret flade	i ovn	ved beton
	vægt %	Nm	Ja/nej	gram	mm	%	°C	°C
KER 10.11.99 5	3,7	300	Nej	-	-	-	1000	630
KER 10.11.99 25	3,8	200	Nej	-	-	-	1000	629
KER 10.11.99 39	3,9	200	Nej	-	-	-	1020	637
KER 10.11.99 41	4,6	200	Nej	-	-	-	1010	630
KER 10.11.99 44	4,5	200	Nej	-	-	-	1010	625
KER 10.11.99 50	4,5	200	Nej	-	-	-	1005	630
Hjørne af flise	Skønnet ca. 4	*---	ja	Ikke målt	5	30	Ca. 890	Ikke noteret
Borekærne 1	3,4	0	Ja	26.5	4	50	890	653
Borekærne 2	3,7	200	Ja	27.5	4	85	1010	857
Borekærne 3	3,7	40	Ja	32.5	6	85	980	817

\* Kun indspænding fra den omkransende beton, dvs. forholdsvis lille indspænding.

Tabel 2.3. Resultater fra afprøvning af borekærner og betoncylindre for eksplosiv afskalning.

For at beskytte varmelegeme samt termoelementer i ovnen blev der konstrueret en lille stålskærm på fod, som i de følgende forsøg blev anbragt i ovnen ca. 5 cm fra ovnåbningen.

## 2.3 Sammenfatning af de indledende forsøg

Ud fra de indledende forsøg og ændringer blev det skønnet at man nu havde en anvendelig forsøgsopstilling og prøvningsmetode der kunne anvendes til afprøvning af de betontyper som foreslås i Stor Pakke. Der var dog stadig forhold som f.eks. opspænding, temperaturbelastning og fugtindholdets indflydelse der var åbne spørgsmål.



### 3. STOR PAKKE

I Grund Pakken blev der udvalgt betontyper til yderligere tests i Stor Pakke. I denne fase, Stor Pakke, foretog BYG•DTU tests for eksplosiv afskalning.

Der blev af Styregruppen udvalgt 12 forskellige betontyper, 6 i aggressiv og 6 i passiv miljøklasse fra Grund Pakken til test for eksplosiv afskalning i den nye prøvestand under Stor Pakke. Desuden blev der, for at verificere prøvestanden, på DTU støbt 12 stk. DTU-cylindre (mærket IBE xx) af en beton som ikke ansås for at ville give afskalning. Betonrecepten er angivet i appendix B. De aggressive betontyper blev vandlagret i ca. 28 døgn og derefter testet. De passive betontyper blev vandlagret i ca. 28 døgn og konditioneret i ca. 28 døgn ved ca. 60 % RF og ca. 23°C. 3 stk. DTU-cylindre til prøvning i forbindelse med Stor Pakke blev opbevaret under samme betingelser som de aggressive betontyper og 3 stk. DTU-cylindre blev opbevaret som de passive betoner. Dvs. samme konditionering og prøvningsforhold som de udvalgte betontyper i Stor Pakke.

I nedenstående tabel 3.1 er betontyperne beskrevet.

Betontypen Miljøklasse	Cement- type	Nummerer- ing af prøveemner	Tryk- styrke MPa	v/c- forhold -	Luft- indhold %	Tilsatte restprodukter i betonen samt evt. bemærkninger
Aggressiv	SAC	AR-150-x	46	0,45	8,2	9,9 % flyveaske og 5,1 % mikrosilica. Referencebeton
Aggressiv	NRC	A0-150-x	49	0,47	7,2	9,6 % flyveaske og 5,1 % mikrosilica
Aggressiv	NRC	A1-150-x	57	0,46	6,4	40,0 % flyveaske og 5,1 % mikrosilica
Aggressiv	NRC	A3-150-x	54	0,45	7,8	5,2 % mikrosilica og 10,6 % Slammaske (Lynetten). Slammaske fra forbrænding af spildevandsslam
Aggressiv	ANL	A5-150-x	64	0,38	6,2	4,2 % betonslam. Al vand tilsættes i form af beton- slam, hvilket udgør ca. 12 % tørstof i blandevand
Aggressiv	ANL	A6-150-x	66	0,37	4,7	53,8 % stenmel eller 19,6 % i fht. den samlede betonvægt. (50 % Hardeberga stenmel og 50 % sand)
Passiv	ROC	PR-150-x	27	0,73	5,0	24,8 % flyveaske og 5,1 mikrosilica. Referencebeton
Passiv	NRC	P2-150-x	25	0,66	4,8	49,7 % flyveaske og 5,2 % mikrosilica + 10,1 % specialfiller.
Passiv	NRC	P3-150-x	19	0,78	7,0	7,9 % flyveaske og 5,2 % mikrosilica + 16,9 % Slam- maske fra Lynetten fra forbrænding af spildevandsslam
Passiv	NRC	P5-150-x	21	0,77	6,8	22,6 % flyveaske og 4,2 % mikrosilica + 11,5 % tør- stof af betonslam som har 20 % tørstof i blandevand
Passiv	BYGG	P6-150-x	30	0,72	2,0	78,6 % stenmel eller 43 % i forhold til den totale betonvægt. (Al sand er erstattet med Dalby stenmel)
Passiv	BYGG	P7-150-x	29	0,69	3,4	29,2 % alternativ flyveaske. Alternativ flyveaske fra forbrænding af biobrændsel
Passiv	Basis	IBE xx	*20	0,87	0,5	Ingen flyveaske, mikrosilica eller andre restprodukter er iblandet. Betonrecept fra DTU og støbt på DTU

\* Ikke målt. For en næsten tilsvarende beton er trykstyrken målt til 20 MPa.

Tabel 3.1. Betontyper i Stor Pakke og DTU beton afprøvet i prøvestand for eksplosiv afskalning.

I nummerering af de udvalgte betoncylindre i Stor Pakke angiver det første bogstav om det er en beton i aggressiv (A) eller i passiv (P) miljøklasse.

Hvor intet andet er anført er fordelingerne af flyveaske, mikrosilica samt andre tilsatte restprodukter angivet som procentdel af den totale pulverblanding.

### **Forklaring til forkortelser i ovenstående tabel:**

SAC: Lavalkali, sulfatbestandig cement – Aalborg Portland

NRC: Ny rapid cement - Aalborg Portland

ANL: Degerham Anlægningscement – Cementa

ROC: Rapid cement - Aalborg Portland

BYGG: Byggcement, Svensk ny kalkfillercement – Cementa

De detaljerede blanderecepter kan findes i [8], [9], [10] og i appendix B.

### **Fugtindhold**

I Stor Pakke blev betoncylindrene umiddelbart efter afformning vandlagret i 28 døgn i nogle vandkar indkøbt til formålet.



Figur 3.1 Foto af vandkar med 3 cylindre tv. og vandkar med låg th.

Betoner i aggressiv miljøklasse (A-betoner) anvendes hovedsageligt i udendørs anlægskonstruktioner f.eks. til broer og tunneler. I tunneler forudsættes beton til tunnelvægge normalt at være vandmættede pga. et ydre vandtryk. Derfor afprøves, i Stor Pakke, de udvalgte betoner i aggressiv miljøklasse umiddelbart efter optagning fra vandkar.

Betoner i passiv miljøklasse (P-betoner) anvendes i indendørs konstruktioner og vil normalt udtørre til et ligevægtsfugtindhold med omgivelserne som vil tage adskillige år. For at efterligne udtørringen for betoner i passiv miljøklasse blev det valgt at optage de vandlagrede cylindre efter 28 døgn og konditionere dem ved en fugtighed på ca. 60 % RF og en temperatur på ca. 23°C som er typiske indendørs forhold. En brand kan opstå den første dag et byggeri er færdigt (høj betongfugtighed) eller dagen før nedrivning (lav fugtighed). For at gøre prøvningsproceduren praktisk anvendelig blev det valgt at foretage afprøvningsproceduren for eksplosiv afskalning efter en konditionering på kun 4 uger.

### **Klimakammer og evt. fortørring i hal**

Til betoncylindrene i passiv miljøklasse er der opbygget et klimakammer med dimensionerne ca. 1,2 m lang x 0,8 bred x 1,0 m høj bestående af et træskelet beklædt med klar plastic. I kammeret er placeret en befugter som reguleres af en Danfoss hygrostat som har en start/stop differens på ca.  $\pm 6$  %RF. Fugtigheden i klimakammeret kan holdes "konstant" når fugtigheden skal være større end omgivelserne til klimakammeret. Da der ikke er køling i klimakammeret følger klimakammeret forsøgshallens temperatur, men ligger ca. 1 K over temperaturen i forsøgshallen, hvilket skyldes at befugteren afgiver lidt varme, når den er i drift. I forsøgshallen ligger temperaturen inden for ca. 20-25°C og fugtighed på mellem ca. 20-60 % RF i løbet af et år. Ved forsøgene har fugtigheden i klimakammeret været ca. 60 %RF og temperaturen ca. 23°C.

Det har vist sig, at placeres betoncylindrene i passiv miljøklasse i hallen i ca. 3 dage efter optagning fra vandkar, inden de skal i klimakammer, så minimeres risikoen for, at fugtigheden i klimakammeret stiger uacceptabelt højt pga. de "våde" cylindre.



Figur 3.1. Foto af klimakammer med betoncylindre for neden og hygrometer på hylde.

### **Forsøg**

Der blev testet 3 stk. cylindre af hver betontype for at have et lille statistisk materiale. Da hver prøvning tager ca. én dag er prøvningsantallet begrænset dels af budget og dels af tidsmæssige betingelser.



Figur 3.2. Oversigtsfoto af brandprøvede betoncylindre. Cylindre med P-beton på venstre bord og A-beton på højre.

### 3.1 Resultater A-betoner

I nedenstående tabel 3.2 er hovedresultaterne for betonerne i aggressiv miljøklasse (A-beton) vist. Desuden er prøvningsresultater, fra boreprøver af flise nr. 9, fra de indledende forsøg angivet.

Nummering af prøveemner	Fugtindhold før prøvning	Tilspændingsmoment	Afskalninger				Sluttemperatur	
				Vægt	Dybde max.	Andel af eksponeret flade	i ovn	ved beton
	%	Nm	Ja/nej	gram	mm	%	°C	°C
AR-150-7	6.0	200	Nej	0.0	0	0	990	661
AR-150-8	6.5	200	Ja	55.3	8	33	985	640
AR-150-9	6.4	200	Nej	* 37.1	0	0	980	663
A0-150-6	5.6	200	Nej	0.0	0	0	990	661
A0-150-7	6.0	200	Nej	* 26.5	0	0	1000	664
A0-150-8	5.9	200	Nej	* 7.5	0	0	995	667
A1-150-6	5.6	100	Ja	27.0	4	50	1000	840
A1-150-7	6.3	200	Ja	61.0	4	60	995	830
A1-150-8	6.1	200	Ja	72.0	9	nær 100	1015	818
A3-150-6	6.7	200	Ja	107.0	5	95	1015	799
A3-150-7	6.6	200	Ja	93.5	7	95	1010	801
A3-150-8	6.2	200	Ja	54.0	5	85	1021	811
A5-150-6	6.9	200	Ja	137.5	18	100	1017	803
A5-150-7	6.3	200	Ja	65.5	8	100	1014	820
A5-150-8	6.4	200	Ja	94.0	5	95	1005	815
A6-150-6	6.2	80	Ja	122.5	13	90	1018	820
A6-150-7	5.8	80	Ja	45.5	9	93	1016	812
A6-150-8	5.6	80	Ja	47.5	10	90	1023	809
Borekærne 1	4.1	----	Ja	26.5	4	50	890	653
Borekærne 2	4.4	200	Ja	27.5	4	85	1010	857
Borekærne 3	4.6	40	Ja	32.5	6	85	980	817

\* De små afskalninger er af Styregruppen vurderet til at være negligable. En del af vægtmængden hidrører givetvis også fra udglødning af stålskærmen som er placeret i ovnen.

Tabel 3.2. Resultater af prøvning for eksplosiv afskalning af betoner i aggressiv miljøklasse.

Af skemaet ses, at betontype A0 (aggressiv miljøklasse) ikke viser tegn på afskalning mens AR kun viser afskalning i et ud af 3 forsøg. Resten af betontyperne viser sikre tegn på afskalning. I AR og A0's tilfælde var temperaturen ved overfladen af betonen (ca. 12 mm fra overfladen) kun oppe på ca. 650°C mens ved resten af prøvningerne var temperaturen omkring eller over 800°C. For at teste om det var temperaturen som var årsag til at AR og A0 kun viste moderat afskalning blev der foretaget et forsøg med betoncylinder A0-150-10. Cylinderen blev testet ved en temperatur nær betonen på ca. 800°C, men uden tilspænding. Prøven viste tegn på afskalning. Det konkluderes hermed at det lavere temperaturniveau for de to første betontyper var årsagen til den manglende afskalning.

Desuden ses, at der også forekom afskalninger for betontype A6 selvom tilspændingen (80 Nm) var under halvdelen end ved de foregående prøvninger (200 Nm).

Yderligere ses af skemaet at fugtindholdet lå omkring de 6 vægt % for alle prøveemnerne i Stor Pakke, hvilket er noget højere end de 3 vægt % man som håndregel har for den øvre fugtgrænse,

under hvilken der ikke vil opstå afskalning, for traditionelle betontyper. Det har dog ikke været hensigten at prøverne skulle ligge omkring eller under de 3 vægt %.



Figur 3.3. Foto af de afprøvede betoncylindre med A-betoner. I første venstre søjle ses 3 cylindre med betontype AR dernæst A0, A1, A3, A5 og A6.

### 3.2 Resultater P-betoner

Alle betoncylindrene i passiv miljøklasse har været vandlagret i 28 dage og er herefter konditioneret i 4 uger ved ca. 60% RF og ca. 23°C. Herefter er de afprøvet i opstillingen for eksplosiv afskalning.

I nedenstående skema 3.3 er hovedresultaterne for betonerne i passiv miljøklasse angivet.

Af skema 3.3 ses, at betontyperne PR, P2, P3 og P5 viser sikre tegn på eksplosiv afskalning mens der for betontype P7 kun er afskalning på én ud af tre cylindre. For P6 og IBE betontyperne konstateres kun meget ringe afskalning, da den maksimale afskalningsdybde kun var 2 til 6 mm og kun udgør 5 - 30 % af den eksponerede overflade. For betontype IBE's vedkommende ville man ikke forvente eksplosiv afskalning da betonen er forholdsvis porøs og uden flyveaske og mikrosilica og da denne type erfaringsmæssigt ikke har vist afskalning tidligere.

Tilspændingsmomentet har under de første 6 prøvninger været lidt varierende for at fastlægge om der kunne konstateres en forskel i afskallingsarealer og -dybde. Det er konstateret at boltens moment er faldet inden cylinderen er blevet brandpåvirket dvs. under opvarmningen af ovnen, hvilket dels skyldes at trykfordelingsmaterialet under trykket fra stålkappen har udfyldt evt. støbehuller på den krumme del af cylinderen og dels er blevet trykket ud ved enderne. Derfor er proceduren ændret således at tilspændingsmomentet i parentes i skemaet (160) er den tilspænding som er foretaget ca. 15 - 30 minutter før prøvning. Lige før prøvning, når trykfordelingsmaterialet har fordelt sig i støbehuller m.m. er boltene løsnet og spændt til 80 Nm, således at begyndelsesbetingelser er nogenlunde ens.

Ved alle prøvningerne er temperaturen ved betonoverfladen nået op på ca. 825 - 860°C.



Desuden ses af skemaet, at fugtindholdet i betoncylindrene lige før prøvning lå mellem 3,7 og 5,3 vægt %, efter 4 ugers konditionering.

Nummerering af prøveemner	Fugtindhold før prøvning	Tilspændingsmoment	Afskalning				Sluttemperatur	
			Ja/nej	Vægt af gram	Dybde max. mm	Andel af eksponeret flade %	i ovn °C	ved beton °C
	%	Nm						
PR-150-5	4.2	200	Ja	26.5	5	50	995	847
PR-150-6	5.3	200	Ja	141.5	8	65	1000	861
PR-150-7	4.5	100	Ja	52.0	18	over 50	1005	846
P2-150-4	4.8	Ikke noteret	Ja	47.0	11	80	1015	838
P2-150-5	4.6	80	Ja	36.5	5	75	1015	846
P2-150-6	4.7	80	Ja	48.5	7	60	1010	845
P3-150-5	3.9	(160) 80	Ja	28.5	8	10	1010	844
P3-150-6	3.8	(160) 80	Ja	30.0	19	15	1009	847
P3-150-7	3.7	(160) 80	Ja	27.0	8	30	1007	837
P5-150-4	4.8	(160) 80	Ja	17.5	5	40	1010	842
P5-150-5	4.9	(160) 80	Ja	32.5	12	30	1013	829
P5-150-6	4.9	(160) 80	Ja	26.5	6	50	1013	832
P6-150-4	5.2	80	* (Ja)	14.5	3	10	1020	834
P6-150-5	5.2	(160) 80	* (Ja)	14.5	5	20	1012	825
P6-150-6	5.3	(160) 80	* (Ja)	19.0	4	30	1021	831
P7-150-4	4.6	(160) 80	Nej	0.0	0	0	1023	842
P7-150-5	4.4	(160) 80	Nej	0.0	0	0	1015	832
P7-150-6	4.6	(160) 80	Ja	36.5	7	50	1018	827
IBE -150 -1	4.0	(160) 80	* (Ja)	9.0	4	ca. 5-10	1016	832
IBE -150 -2	4.0	(160) 80	* (Ja)	9.0	2	5	1010	834
IBE -150 -3	4.1	(160) 80	* (Ja)	20.0	6	25	1009	836

\* Ud fra de små afskalningsmængder og dybder er det skønnet at betontypen kan betragtes som værende uden afskalningsrisiko.

Tabel 3.3. Resultater af prøvning for eksplosiv afskalning af betoner i passiv miljøklasse.



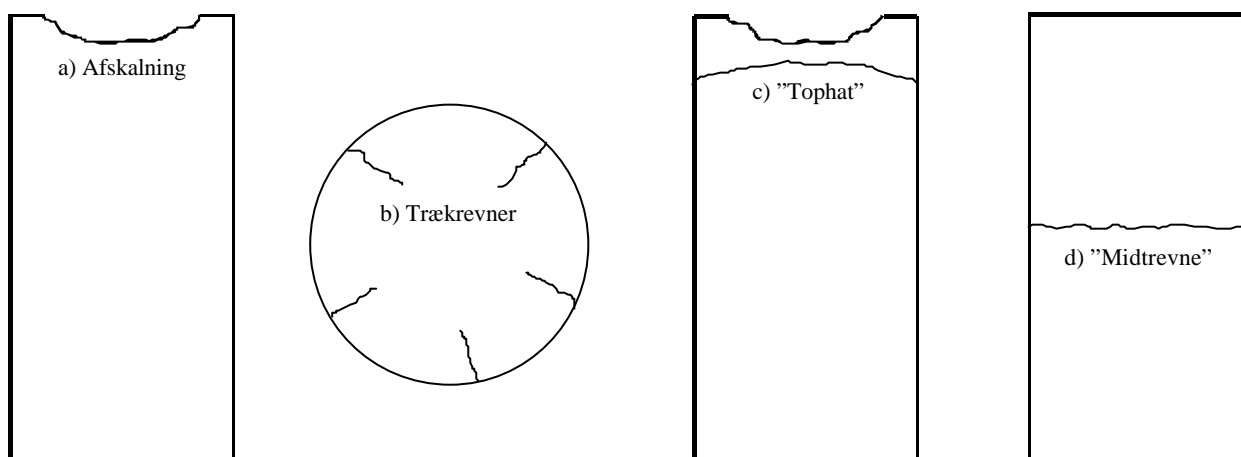
Figur 3.4. Foto af de afprøvede betoncylindre med P-betoner. I første venstre søjle ses 3 cylinder med betontype PR dernæst P2, P3, P5, P6, P7 og DTU.

### 3.3 Revnetyper

Ved brandprøvningerne af de 13 forskellige betontyper blev der konstateret følgende 4 forskellige revnetyper, som opstod på en del af betoncylindrene:

- Afskalning, på plan flade dvs. endeflade som blev eksponeret, efterladende et skålformet krater.
- Radiære revner ("trækrevner"), i den yderste 2½ cm tykke del af cylinderen, gående fra eksponeret flade og ud til rand ("termorevne").
- Gennemgående revneflade, nær eksponeret flade (ca. 20 – 30 mm fra eksponeret flade), med krumning bagud i yderzonen ("tophat").
- Gennemgående revne længere inde i cylinderen (typisk ca. midt på cylinderen "midtrevne").

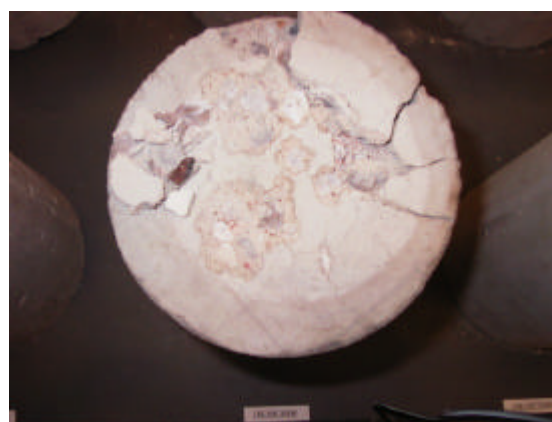
I nedenstående figur 3.5 er principskitser af de observerede revnetyper i betoncylindrene angivet.



Figur 3.5. Principskitser af de observerede revnetyper a), b), c) og d) i betoncylindrene.



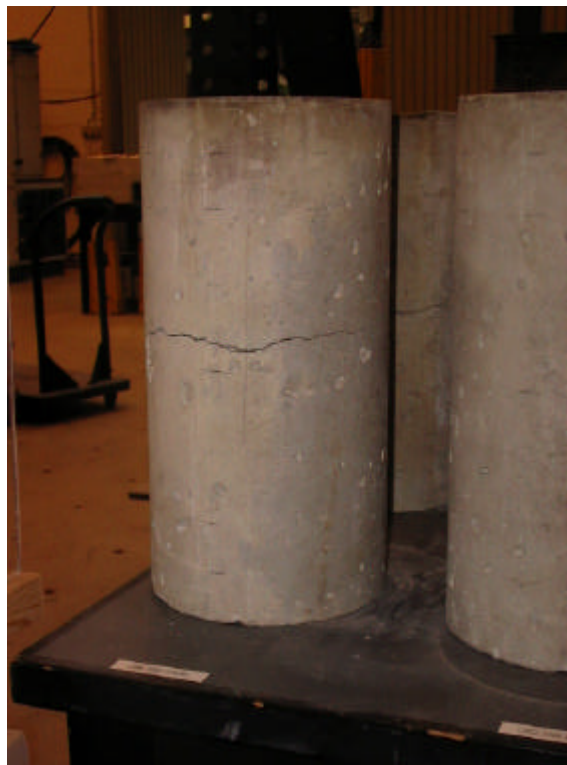
Figur 3.6. Foto af cylindre med revnetype a) "eksplosiv afskalning".



Figur 3.7. Foto af revnetype b) "trækrevne".



Figur 3.8. Foto af cylindre med revnetype c) "Tophat".



Figur 3.9. Foto af cylinder med revnetype d) "Midtrevne".

Revnetype a) er forventelig og den type, som man må forestille sig vil være resultat af testen. 8 af de testede betontyper skallede af med sikkerhed mens 4 kun i mindre grad viste tegn på afskalning. Yderligere 1 betontype, AR skallede ikke af ved en lavere temperaturpåvirkning på ca. 660°C; men én cylinder af denne type AR skallede af ved en påvirkning på ca. 800°C uden opspænding ved en senere afprøvning (ikke i skema). Dette indikerer, at temperaturniveauet på ca. 800°C måske er rigtigt, og at det ikke kan være mekaniske påvirkninger, der forårsager denne type afskalning.

Revnetype b) er forventelig og helt i overensstemmelse med den ydre betoncylinderdels deltagelse i optagelsen af termospenninger. De fleste af cylindrene, 31 stk. havde synlige revner af type b) mens det på de sidste 8 stk. cylindre var svært at konstatere om denne revnetype var opstået. Generelt er type b) revnerne for A-betonerne tyndere/finere end revnerne som opstår på cylindrene af P-beton.

Revnetype c) ("tophat") kunne tyde på, at laget af Neopren nærmest den eksponerede overflade gav efter for det radiære udadrettede tryk, idet brudfiguren kan fremkaldes af radiære forskydningspændinger som de også kendes fra gennemløkningsforsøg. Dette underbygges af, at brudformen c) generelt forekommer for de svage betontyper med en ringe forskydningsstyrke. Denne brudform forekommer, i visse tilfælde, at kunne sløre resultatet og bør så vidt muligt elimineres. Årsagen kan være at Neoprenen lader sig trykke ud nærmest endefluden som følge af at den frie Neoprenkant kan deformeres udad. Dette er afhjulpet senere i projektet.

Revnetype d) kan tyde på, at der opstår forskydningspændinger som følge af termobevægelser mellem kappe og cylinder. Den forekommer uafhængigt af om betonen skaller af med type a) revner eller ej, og synes ikke at influere på resultatet, men hvis den kunne undgås, vil det at være



at foretrække. For én type beton er der udført en test ved ca. 800°C uden opspænding; og ved ca. 660°C med opspænding. Dermed fik man revne d) som er en tværgående revne på midten af cylinderen med opspænding og lav temperatur, men ingen revne ved høj temperatur uden opspænding. Dette indikerer, at den tværgående revnedannelse af type d) er mekanisk og ikke et afskalningsfænomen.

### **Tørreovn og tørvægt af betoncylinder**

Når betoncylinderen er afkølet efter brandprøvning, efter ca. 1 døgn, afmonteres den øverste stålkappe og trykfordelingsmateriale. Betoncylinderen vejes og anbringes i en tørreovn ved ca. 105°C.



Figur 3.11 Foto af lukket tørreovn t.v. og åben tørreovn med betoncylindre th.

Herefter vejes cylinderen ca. en gang om ugen. Når vægttabet er under ca. 3 gram om ugen blev prøven betragtet som værende tør og udtages af tørreovnen. Ifølge en europæisk standard [11] kan en prøve med tæt struktur betragtes som værende tør, når vægtændringen på ca. 3 døgn er mindre end 0,1 % af totalvægten. De ovenfor nævnte betoncylindre vejer typisk ca. 12 kg, dvs. kravet om højst 0,1 % vægtændring vil være 12 gram på 3 døgn. Dette er altså rigeligt opfyldt ved de aktuelle udtørringer af betoncylindrene.

Tørvægt og fugtindhold i betoncylinder umiddelbart før brandprøvning kan nu findes. Fugtindholdet har som før nævnt måske en indflydelse på om betontypen får afskalninger ved brand.

## **3.4 Sammenfatning af resultater i Stor Pakke**

Generelt viste alle betoner i aggressiv miljøklasse tegn på afskalning dog med undtagelse af AR og A0, hvilket sandsynligvis skyldes at de blev prøvet ved en lavere temperatur. Senere prøvning har vist at AR også skaller af ved den højere temperatur, hvilket også må formodes at være gældende for A0 betonen. Desuden var mange af cylindrene revnet nær midten dvs. ca. 150 mm fra den eksponerede flade, dvs. revnetype d).

Betonerne i passiv miljøklasse viste også tegn på afskalninger dog i lidt mindre grad men yderligere var cylindrene generelt revnet ca. 2-3 cm fra den eksponerede flade.

Generelt er det afskallede fladeareal og vægten af den afskallede beton noget mindre for P-betonerne end for A-betonerne, hvilket var forventeligt da A-betonerne er fugtigere og tættere.

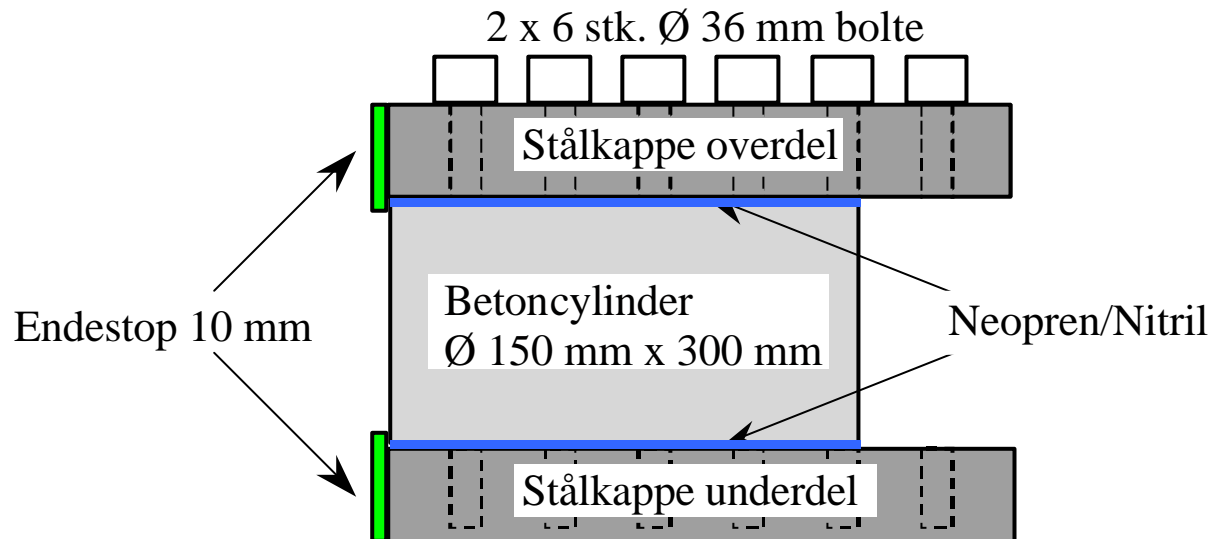
Der har ikke kunnet konstateres nogen ændring i afskalningerne pga. ændrede tilspændingsmomenter.

### Ændring af opstilling og procedure

For at forsøge at eliminere revnetype c) og d) i de efterfølgende prøvninger i Udvidet Pakke blev der foretaget følgende ændringer af forsøgsproceduren:

- Der blev monteret et endestop af stål med en tykkelse på 10 mm for enden af stålkapen, der hermed skulle forhindre trykfordelingsmaterialet i at blive trykket ud ved den eksponerede ende af betoncylindren. Dette skulle mindske risikoen for at revnetype c) "Tophat" opstår.
- Umiddelbart efter at brandprøvning af betoncylindrene (ca. efter en time) er færdig fjernes overdelen af stålkapen således at betoncylindren ikke er fastholdt. Dette tiltag skulle bevirke at betoncylindren kan bevæge sig frit mht. temperaturbevægelser i længderetningen og forhindre at revnetype d) opstår.

Nedenstående figur 3.10 viser en principtegning af endestoparrangementet.



Figur 3.10. Principskitse af endestop monteret på ende af stålkappe. Tværsnit.

I forbindelse med montering af endestoppet blev temperaturregistreringen ved betonoverfladen flyttet hen til 5 mm fra betonoverfladen og ikke som ved Stor Pakke ca. 12 mm fra overfladen.

## 4. UDVIDET PAKKE

Ud fra de afprøvede betontyper i Stor Pakke skulle der findes frem til, hvilke typer betoner der skulle undergå yderligere tests. Pga. budget og tidsspørgsmål kunne kun 4 betontyper testes i Udvidet Pakke og ikke alle 12 typer beton, som blev udvalgt og afprøvet i Stor Pakke. Den største del af den beton, som produceres i Danmark, er betoner i passiv miljøklasse (P-beton). Derfor er betoner i aggressiv miljøklasse (A-beton) fravalgt i Udvidet Pakke mht. prøvning for eksplosiv afskalning. Desuden er P2 og P6 betonerne fravalgt. P2 betonen som indeholder specialfiller er fravalgt pga. uafklarede aspekter vedrørende logistik og afsætning af specialfilleren. P6 betonen som indeholder stenmel er i overensstemmelse med DS 481 og vil således kunne anvendes i produktion allerede i dag.

### Valgte betontyper

Følgende betontyper er valgt at brandprøve i Udvidet Pakke mht. eksplosiv afskalning: PR, P3, P5 og P7. PR er en referencebeton, der er medtaget som et referencegrundlag. Desuden afprøves betontyperne på DBI som 4 betonvægge som sammenligningsgrundlag.

Betontypen Miljøklasse	Cement- type	Nummerer- ing af prøveemner	Tryk- styrke MPa	v/c- forhold -	Luft- indhold %	Tilsatte restprodukter i betonen samt evt. bemærkninger
Passiv	ROC	PR xx	31	0,58	4,1	24,9 % flyveaske og 5,1 mikrosilica. Referencebeton
Passiv	NRC	P3 xx	15	0,91	6,0	7,9 % flyveaske og 3,9 % mikrosilica + 12,9 % Slam- aske fra Lynetten fra forbrænding af spildevandsslam
Passiv	NRC	P5 xx	28	0,67	3,9	21,6 % flyveaske og 4,3 % mikrosilica + 13,1 % tør- stof af betonslam som har 20 % tørstof i blandevand
Passiv	BYGG	P7 xx	28	0,71	2,0	28,9 % alternativ flyveaske. Alternativ flyveaske fra forbrænding af biobrændsel

Tabel 4.1. Betontyper i Udvidet Pakke afprøvet i prøvestand for eksplosiv afskalning.

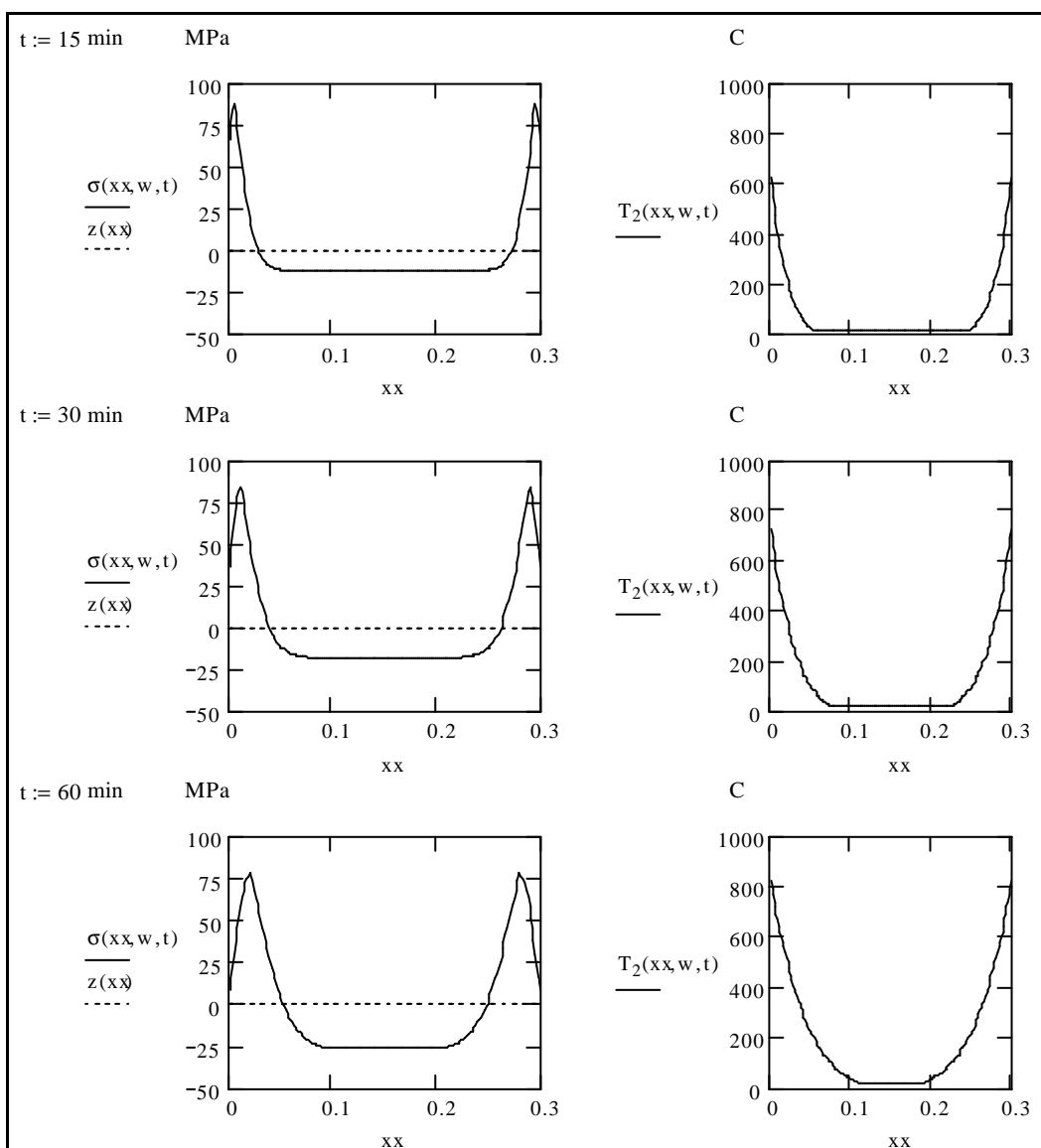
Forklaring til forkortelser i tabel 4.1: ROC: Rapid cement - Aalborg Portland  
NRC: Ny rapid cement - Aalborg Portland  
BYGG: Byggcement, Svensk ny kalkfillercement - Cementa

Hvor intet andet er anført er fordelingerne af flyveaske, mikrosilica samt andre tilsatte restprodukter angivet som procentdel af den totale pulverblanding.

I prøvestanden for eksplosiv afskalning blev testet 2 x 4 stk. betoncylindre med dimension Ø 150 mm x 300 mm. Desuden blev der prøvet 4 stk. "vægelementer" med dimension 1,2 m x 1,2 m x 0,3 m (bredde x højde x tykkelse) hos Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut (DBI) som sammenligningsgrundlag for prøvningerne i den nye prøvestand for eksplosiv afskalning. Væggene skulle brandpåvirkes på begge sider så de ikke krummede, og det var hensigten at de med den store tykkelse skulle kunne opbygge tilstrækkelige termiske trykspændinger i overfladen som i en virkelig vægkonstruktion. Det var foreslået at anvende en forspænding til at modvirke trækrevner, men dette blev ikke valgt, efter samråd på et møde i Lund. Ved at udelade forspænding i vægelementerne undgår man en ekstra parameter samt budgetforøgelse. Desuden gør det støbning m.m. noget nemmere. Der blev ilagt et trådnæt i hver vægelement, således at der f.eks. ved løft og flytning af væggene var en vis form for sammenhæng i betonen, især efter brandprøvning.

For at få en idé om hvor meget spændingerne i overfladen kunne øges ved brand, blev der foretaget beregninger af spændinger og temperaturer for to forskellige vægtykkelser på henholdsvis 0,20 og 0,30 m. Af beregninger foretaget med et program til styrke og temperaturberegning af brandbelastede konstruktioner [12] forøges temperaturen i midten af en 0,30 m tyk betonvæg med begyndelsestemperaturen 20°C ikke efter en times Standardbrand (se nedenstående figur 4.1). Dermed har man en form for modhold (indspænding) af betonvæggens yderste lag ved brandpåvirkning. Af beregningen ses at trykstyrken reduceres væsentligt i de yderste lag (50 mm) af betonvæggen. Ud fra beregningerne blev vægelementer med en tykkelse på 0,3 m valgt til brandprøvningerne.

Spændings og temperaturfordelinger i 0,30 m tyk væg af danske sømaterialer med et oprindeligt E- modul på 30 Gpa er beregnet ved at opdele væggen i 200 lameller og for hver er fundet tøjning, svækkelse og bidrag til kraftopbygningen etc.



Figur 4.1. Temperatur- og styrkeprofil, efter 1 times standardbrand, af betonvæg eksponeret på begge sider. Beton med dansk søtilslag.

## 4.1 Udtørring

De afsluttede brandprøvninger i Stor Pakke blev foretaget ved et gennemsnitligt fugtindhold i cylindrene på ca. 4,5 vægt-% for P-betonerne og ca. 6,5 vægt-% for A-betonerne. Betoncylindrene blev for P-betonernes vedkommende udtørret, fra alle sider, i et klimakammer i 1 måned ved ca. 60 % RF og ca. 23°C.

I Udvidet Pakke foreslås det, at betonprøverne udtørres til et fugtindhold på ca. 3 vægt-%. Erfaringer siger [13], at der sandsynligvis ikke vil ske afskalning af "almindelig" beton ved et fugtniveau på eller under 3 vægt-%. Prøvningerne kan måske be- eller afkræfte denne tommelfingerregel og afdække dele af afskalningsfænomenet.

Udtørringen skal for "vægelementernes" vedkommende kun ske fra de 2 store plane flader, således at udtørringsforløbet svarer til en væg i praksis.

For at finde udtørringsniveauet for "vægelementerne" er der udstøbt 3 stk. kontrolelementer med dimensionerne Ø 150 mm x 300 mm for hver betontype ud af samme betonstøbning som væggene. Kontrolelementerne forseglede på den krumme flade og placeres ved samme klimaforhold som "vægelementer" og "prøvecylindrene". Ved at veje med passende mellemrum (f.eks. ca. hver måned) og derefter udtørre et kontrolelement helt (0 vægt-%), for hver betontype, kan fugtindholdet af "vægelementer" estimeres til de givne tidspunkter.

For at finde det korrekte udtørringsniveau for prøvecylindrene blev disse vejet med samme interval som kontrolelementerne. For at bestemme fugtindholdet af prøvecylindrene skal tørvægten kendes, men da prøvecylindrene ikke må udtørres helt, da de skal prøves ved et givet fugtniveau må tørvægten estimeres på anden måde. Tørvægten findes for kontrolelementerne ved udtørring til 0 vægt % som angivet i ovenstående afsnit. Tørvægt korrigeret for forskellen i vægten af kontrol- og prøvecylinder og er herefter anvendt til beregning af fugtindholdet i prøvecylindrene. I Appendix C er regnearket til bestemmelse af fugtindholdet vist.

Det vil måske være rimeligt at fastlægge brandprøvningen til et tidspunkt hvor udtørringsniveauet er 3 vægt-% i en dybde af 5 cm af "vægelementerne" da fugten længere inde i elementerne ikke har så stor indflydelse på brandprøvningerne. Det har været overvejet, om man skulle måle den relative fugtighed i 5 cm dybde i én af hver type af kontrolelementerne vha. en indboret fugtføler. Herved vil det være muligt at finde fugtniveauet i denne dybde (krav 3 vægt-%) vha. sorptionsisotermerne for betonerne. Fastlæggelsen af sorptionsisotermerne for de "nye" betoner er imidlertid i sig selv et omfattende og tidskrævende arbejde og er derfor udelukket i dette projekt.

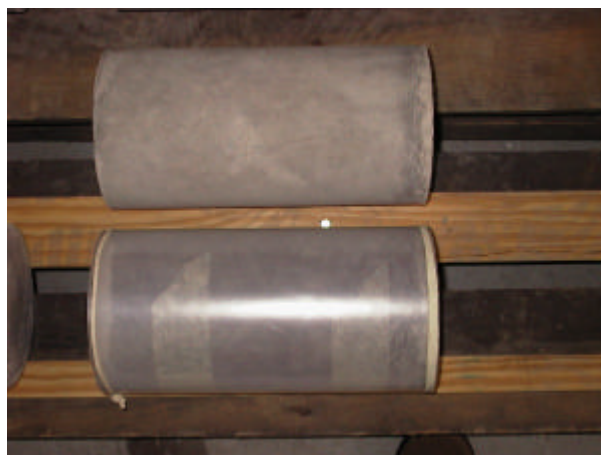
Efter nærmere overvejelser blev der ikke udboret betonkærner af betonvæggene, da man ved denne udboring skal bruge vand og dermed får opfugtet betonoverfladen, hvilket er meget uhenigtsmæssigt da det er her brandpåvirkningen vil foregå. Det var måske muligt at udføre udboringen uden vand, men så bliver boreprøven opvarmet og en del af vandindholdet vil fordampe og man får et for lavt målt fugtindhold. Derfor bruges kontrolelementerne og prøvningscylindrene som et mål for det totale fugtindhold i betonvæggene.

Viser det sig, at udtørringstiden vil blive forholdsvis lang, kan alternative udtørringsforsøg komme på tale. En mulighed kunne være, at det er udtørringstiden (måske 3 måneder), som bliver

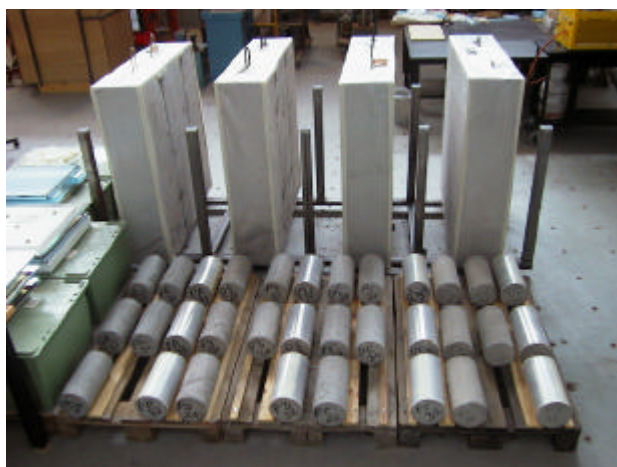
bestemmende for, hvornår der skal brandprøves og ikke fugtindholdet. En anden mulighed er at "vægelementerne" og cylindrene udtørres fra alle sider (ingen forsegling), hvorved udtørningstiden reduceres. Hermed får man et tredimensionalt fugtprofil, som måske vil gøre analyse og tolkning af resultaterne vanskeligere. Evt. vil et udtørningsarrangement til "vægelementer" og cylindre være nødvendigt for at få en acceptabel udtørningstid. Mulighederne er fortløbende blevet overvejet.



Figur 4.2. Foto af cylindre under udtørring i forsøgshal. P3 med forsegling på krum flade og P5 uden forsegling.



Figur 4.3. Øverst cylinder uden forsegling. Nederst cylinder med forsegling af flere lag plastfolie.

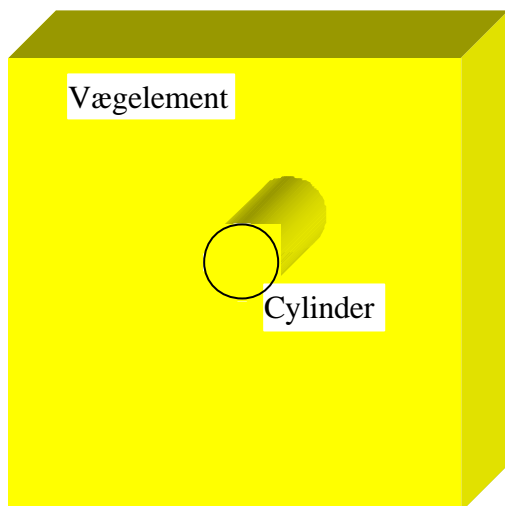


Figur 4.4. Foto af vægelementer og cylindre under udtørring i forsøgshal.



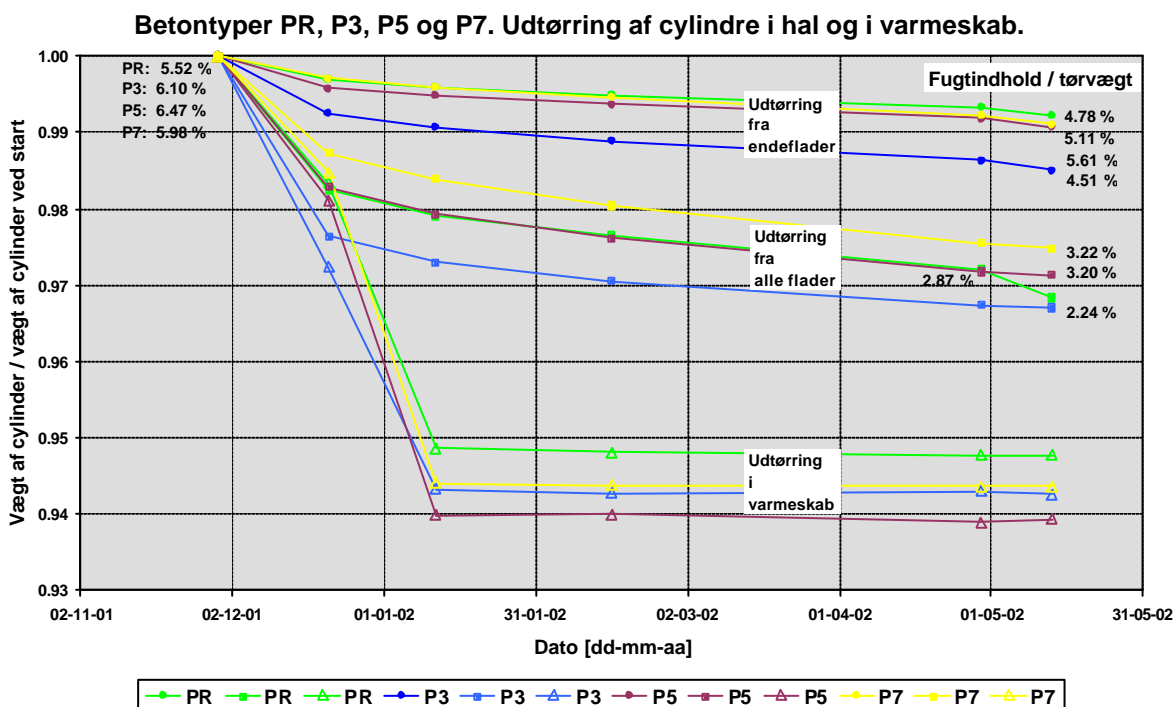
Figur 4.5. Vægelementer med forsegling med gennemsigtig plast på korte sider.

Vægelementerne med betontyperne PR, P3 og P5 blev støbt hos Unicon i Jylland i en standardforskalling mens vægelement med betontype P7 blev støbt hos Sydsten i Sydsverige i en træforskalling opbygget til formålet. P7 havde en noget jævnere og pænere overflade end de tre andre vægelementer. Vægelementerne fra Jylland havde også gennemgående huller fra trækstængerne fra forsikalingssystemet. Disse huller blev efter levering til BYG•DTU udstøbt, således man kun brandpåvirker væggene i overfladen. Desuden var vibreringen og dermed udstøbningen bedre for vægelementet fra Sverige.



Figur 4.6. Skitse af princip i udtørring af cylindre som mål for udtørring af betonvæg. Væg fugtforsegles med plast på de korte sider.

I nedenstående figur 4.7 er udtøringsforløbet vist for betoncylindre i Udvidet Pakke før brandprøvningserne. Kurverne viser de relative udtøringsforløb mens talangivelserne ved kurverne viser fugtindholdet i vægt-% for hver cylindertype.



Figur 4.7. Udtørring af betoncylindre.

De cylindre som er forseglet på den krumme flade (udtørring fra endeflader) er også indirekte et mål for udtøringsforløbet af de 4 stk. betonvægelementer.

Fugtniveauet (1,00) ved start af udtøringsforløbet, foregik fra et niveau på ca. 5,5 til 6,5 vægt-%. De 4 øverste kurver viser udtøringsforløbet for de 4 forskellige betontyper ved udtørring kun fra endefladerne af cylindrene, dvs. cylindrene er forseglet på krum



flade. Efter ca. 5,5 måned er fugtindholdet faldet til ca. 4,5 – 5,6 vægt-% (ca. 0,99). De 4 mellemste kurver viser forløbet ved udtørring fra alle overflader af 4 andre cylindre. Fugtindholdet er efter ca. 5,5 måneder omkring 3 vægt-% (ca. 0,97). De nederste 4 kurver viser udtørningsforløbet ved udtørring i varmeskab i ca. 4,5 måned. Ud fra de 4 øverste kurver ses, at det vil tage meget lang tid at nå et fugtniveau på 3 vægt-% (0,97) for cylindre som er forsejlet på krum flade og dermed for vægelementerne. Derfor blev det besluttet af tidsmæssige grunde at foretage brandprøvningerne af vægge og cylindre ved de aktuelle fugtniveauer.

Fugtniveau, før brandprøvning, for betoncylindre og dermed vægelementer er angivet i nedenstående tabel. Af tabellen ses, at intention/håndregel med de 3 vægt-% ikke er opfyldt. Tallene for betonernes fugtindhold i vægt-% genfindes også i ovenstående figur 4.7, øverst til højre.

Betontype	PR	P3	P5	P7
Fugtindhold/tør vægt vægt-%	4,8	4,5	5,6	5,1

Tabel 4.2. Fugtindhold i vægt-% for betoncylindre og dermed vægelementerne.

## 4.2 Prøvning på DBI

Betonvæggene med betontype PR, P3, P5 og P7 blev brandprøvet på Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI). Vægelementerne blev placeret i en 6 m lang ovn. I nedenstående figur 4.8 ses vægelementerne i den nævnte ovn. Ovnloft og endevæg er, på billedet, ikke monteret. De hvide stænger øverst i ovnen er faste termoelementer til regulering af ovntemperaturen. Brandprøvningen på DBI er foretaget med et temperaturforløb i ovnen som følger Standardbrandkurven (ISO 834).



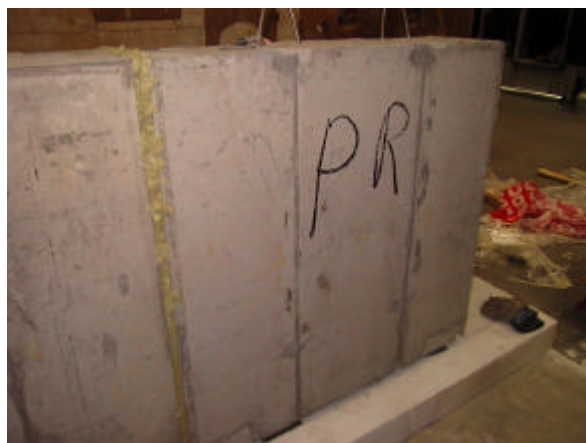
Figur 4.8. Foto af 6 m lang ovn hos Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI).

Elementerne blev opstillet på én lang række med 25 mm isolering imellem for at forhindre utilsigtet varmepåvirkning mellem elementerne. Desuden blev væggene isoleret med 100 mm isolering på overside og på de to endesider således at brandpåvirkningen praktisk taget kun forekom på de 8 store vægelementflader. Den 6. maj 2002 blev de 4 stk. betonvægge (PR, P3, P5 og P7) brandprøvet i en time med standardbrand.





Figur 4.9. Foto af vægelementer før brandprøvning med isolering på de korte sider. Der ses lodrette stålrør inde holdende termoelementer til måling af temperatur i ovn. Termoelementerne er placeret ca. 5 – 10 cm fra betonoverfladerne.



Figur 4.10. Foto af vægelement af beton PR og P3. Desuden ses isoleringen mellem de to vægelementer.

### Forsøgsresultater fra DBI

Efter ca. 15 minutters opvarmning var ovntemperaturen så høj at det var muligt at se vægelementerne gennem skueglas på ovnen pga. den høje strålingstemperatur.



Figur 4.11. Foto af vægelementer under brandprøvning. Foto taget gennem skueglas.

Efter en time blev ovnen slukket og afkølede i ca. en time i lukket tilstand som en ekstra varmebelastning. En tilsvarende form for ekstra varmebelastning er ikke foretaget i lille skala da den evt. eksplosive afskalling typisk opstår inden for den første halve time. Dagen efter blev vægelementerne transporteret tilbage til DTU.



Figur 4.12. Foto fra DTU af de fire betonvægelementer efter endt brandprøvning på DBI. Bemærk revner på tværs af væggene.



Figur 4.13. Foto af brandpåvirkede overflade af vægelement af beton PR



Figur 4.14. Foto af brandpåvirkede vægelement med betontype P3.

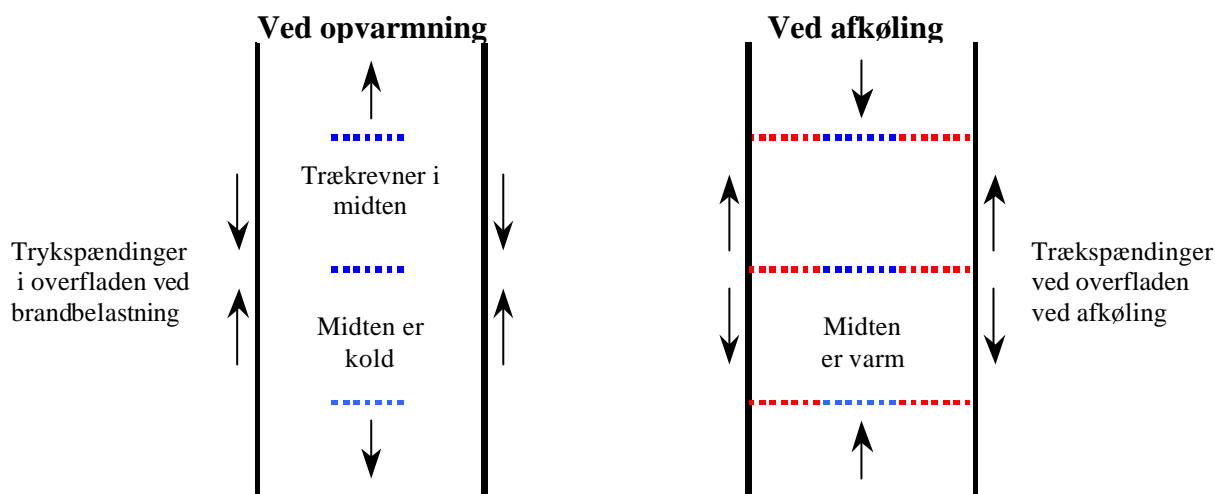


Figur 4.15. Foto af brandpåvirket overflade af vægelement P5 med betontype P5.



Figur 4.16. Foto af brandpåvirket overflade af vægelement med betontype P7.

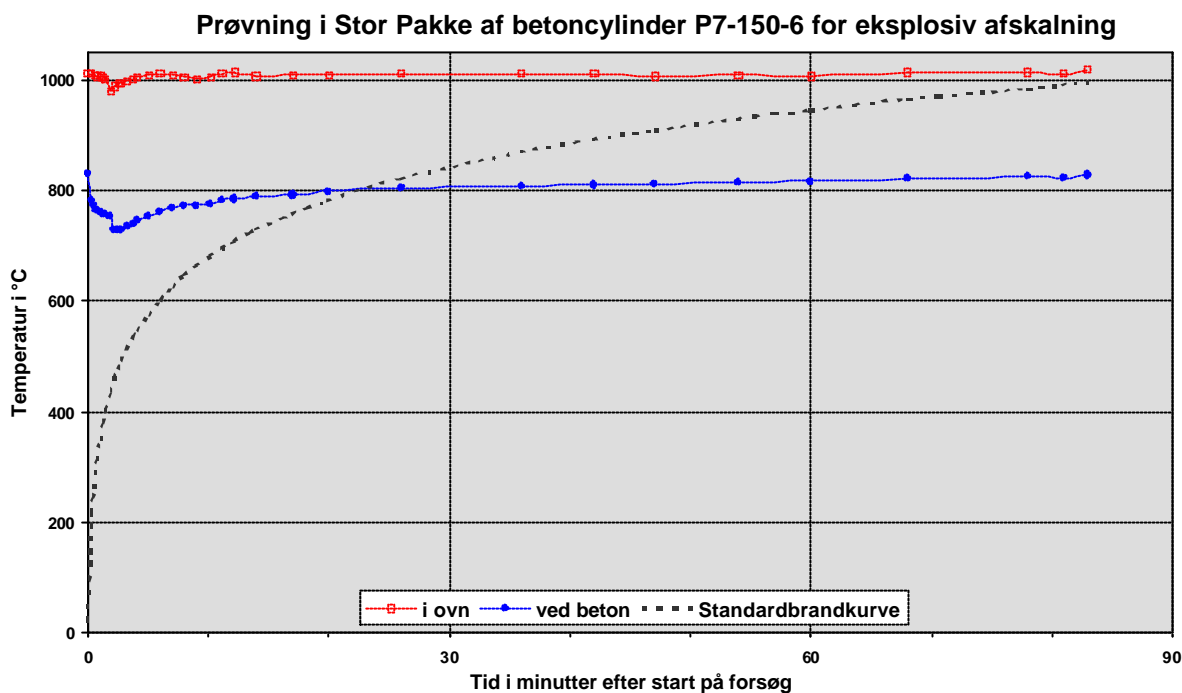
Væggene viste ingen tegn på eksplosiv afskalning efter 1 times standardbrandpåvirkning. På alle flader konstateredes en del trækrevner. Betontype P7 havde efter prøvning de færreste og mindste revner og havde en overraskende ”pæn” overflade sammenlignet med de andre tre.



Figur 4.17. Principskitse af revneforløb i betonelementerne.

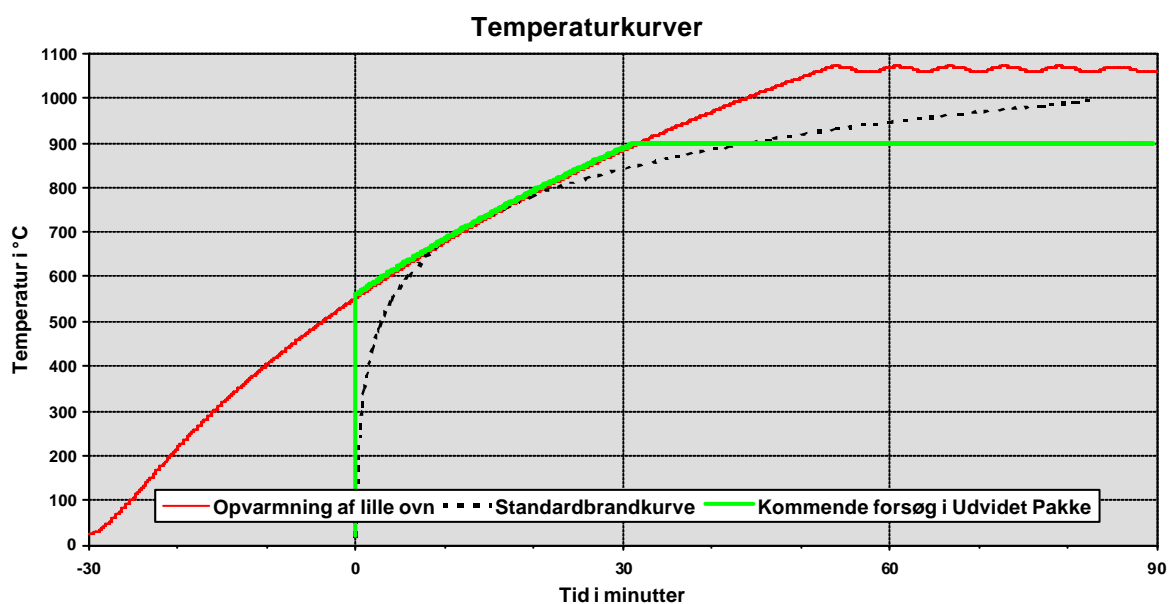
Af ovenstående principskitser ses, at ved brandbelastning af en betonevæg udvider overfladen af betonevæggen sig meget mere end betonekernen da varmen er længere tid om at nå ind til midten, dels pga. væggenes varmekapacitet og dels dens varmeledningsevne. Herved revner væggen først i midten (blå stiplede linier) pga. trækspændingerne og dermed bliver trykspændingerne i overfladen aflastet og risikoen for eksplosiv afskalning mindskes. Når væggene afkøler efter brandpåvirkning vil den yderste beton trække sig sammen, men er fastholdt af den inderste del som er længere pga. den langsommere nedkøling og den yderste beton revner (røde stiplede linier) idet trækstyrken er nedsat her. Samlet effekt bliver at betonevæggen er revnet hele vejen igennem og at der er en del overfladiske revner.

Brandprøvningerne er på DBI foretaget med en temperaturbelastning som følger Standardbrandkurven. På denne baggrund er temperaturpåvirkningen i den nye prøvestand for prøvning for eksplosiv afskalning i Stor Pakke undersøgt nærmere. I nedenstående figur er temperaturen i den lille ovn og tæt på betoneoverfladen (ca. 12 mm) sammenlignet med Standardbrandkurven. Af figuren ses, at temperaturen tæt på betoneoverfladen ligger over brandkurven i de første 20 min. For at muliggøre den bedste sammenligning af prøvningerne på DBI og DTU i Udvidet Pakke, er det besluttet at reducere temperaturen i den lille ovn, således at den nogenlunde følger Standardbrandkurven og at temperaturen derfor også reduceres tæt på betoneoverfladen. Det er her spørgsmålet om reduktionen er korrekt da der er en vis afstand (35 mm) fra ovn og ind til betoneoverflade pga. overgangsstykke af isolering med Ø 100 mm hul og endestop.



Figur 4.18. Målte temperaturer i Stor Pakke sammenlignet med Standardbrandkurven.

Nedenstående figur viser opvarmningsforløbet for den lille ovn (rød kurve). Efter en halv times opvarmning af ovn startes forsøget og setpunktstemperatur på ovnen sættes til 900°C, derved kommer temperaturforløbet i ovnen under prøvning til at forløbe efter den grønne kurve. Den stiplede kurve viser Standardbrandkurven.



Figur 4.19. Opvarmningsforløb til maksimaltemperatur for lille ovn og forløb ved de kommende prøvninger i Udvidet Pakke samt Standardbrandkurven.

### 4.3 Prøvning på DTU

Det var meningen at prøve 3 stk. betoncylindre for hver af betontyperne PR, P3, P5, P7 for at have et nogenlunde statistisk materiale at basere resultaterne på. For at kunne sammenholde resultaterne med brandprøvningen på DBI, blev det besluttet at afprøve 1 stk. cylinder uden og 2 stk. med opspænding. Ved denne procedure var det muligt at se om opspænding under disse betingelser var af betydning, da betonvæggene ikke var opspændt, men kun havde en slags indspænding i form af deres tykkelse.

Først blev der afprøvet 2 stk. cylindre af hver betontype med opspænding af bolte til 80 Nm. Umiddelbart efter prøvning dvs. 1 time efter start blev den øverste stålkappe afmonteret for at forsøge at undgå revnetype d) ("midtrevne").

I nedenstående figur er resultaterne af prøvningerne i Udvidet Pakke samt resultaterne for de tilsvarende betoner i Stor Pakke angivet.

De afprøvede betoncylindre i Udvidet Pakke har nummereringen Px – xx, mens cylindrene i Stor Pakke har nummereringen Px - 150 - x.

	Nummerering af prøveemner	Fugtindhold før prøvning	Tilspændingsmoment	Afskalning			Sluttemperatur		
					Vægt af	Dybde max.	Andel af eksponeret flade	i ovn	ved beton
		%	Nm	Ja/nej	gram	mm	%	°C	°C
Udvidet Pakke	PR - 32	4.8	(160) 80	Nej	-	-	-	942	647
	PR - 33	4.8	(160) 80	Nej	-	-	-	933	645
Stor Pakke	PR -150 -5	4.2	200	Ja	26.5	5	50	995	847
	PR -150 -6	5.3	200	Ja	141.5	8	65	1000	861
	PR -150 -7	4.5	100	Ja	52.0	18	over 50	1005	846
Udvidet Pakke	P3 - 32	4.6	(160) 80	Nej	-	-	-	930	657
	P3 - 33	4.4	(160) 80	Nej	-	-	-	942	669
Stor Pakke	P3 -150 -5	3.9	(160) 80	Ja	28.5	8	10	1010	844
	P3 -150 -6	3.8	(160) 80	Ja	30.0	19	15	1009	847
	P3 -150 -7	3.7	(160) 80	Ja	27.0	8	30	1007	837
Udvidet Pakke	P5 - 32	5.6	(160) 80	Nej	-	-	-	929	653
	P5 - 33	5.6	(160) 80	Nej	-	-	-	944	654
Stor Pakke	P5 -150 -4	4.8	(160) 80	Ja	17.5	5	40	1010	842
	P5 -150 -5	4.9	(160) 80	Ja	32.5	12	30	1013	829
	P5 -150 -6	4.9	(160) 80	Ja	26.5	6	50	1013	832
Udvidet Pakke	P7 - 32	5.1	(160) 80	Nej	-	-	-	920	646
	P7 - 33	5.1	(160) 80	Nej	-	-	-	924	643
Stor Pakke	P7 -150 -4	4.6	(160) 80	Nej	-	-	-	1023	842
	P7 -150 -5	4.4	(160) 80	Nej	-	-	-	1015	832
	P7 -150 -6	4.6	(160) 80	Ja	36.5	7	50	1018	827

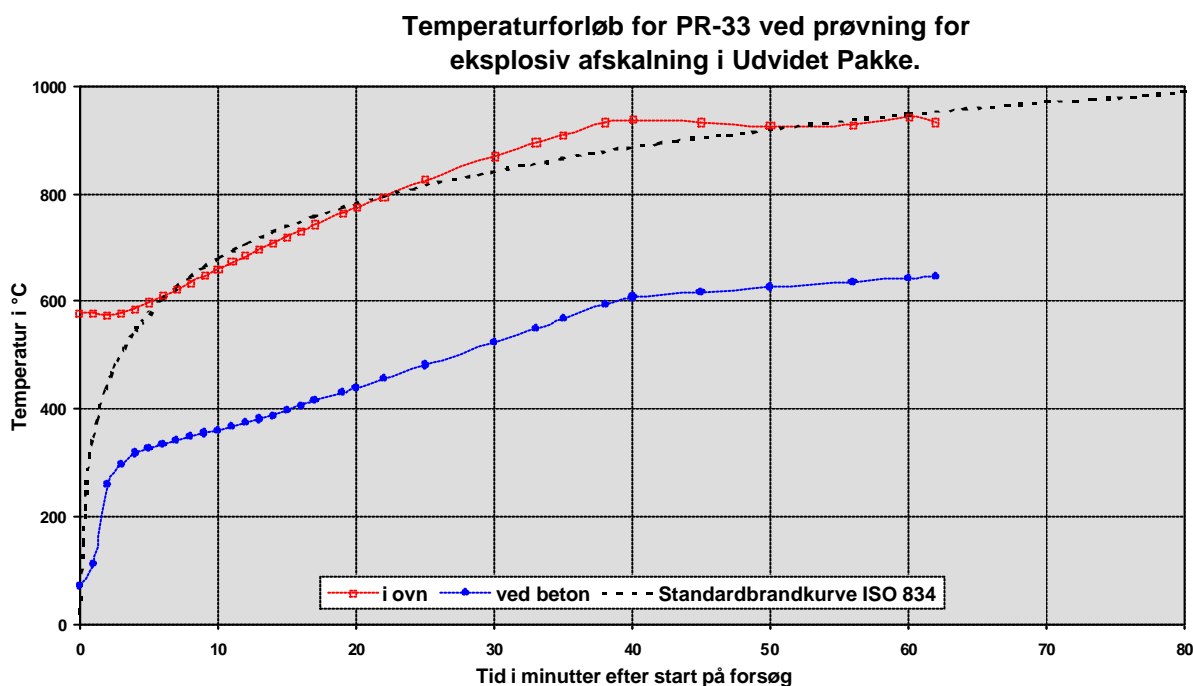
Figur 4.20. Skema med resultater fra Udvidet Pakke sammenlignet med Stor Pakke.

Ingen af betoncylindrene PR, P3, P5 og P7 i Udvidet Pakke viste tegn på eksplosiv afskalning. Derfor blev den tredje (sidste) cylinder af hver type ikke afprøvet uden opspænding da sandsynligheden for afskalning er mindre end ved opspænding.

Der konstateres ingen afskalning dvs. revnetype a) på nogle af cylindrene, givetvis fordi temperaturen ved betonoverfladen (slut temperatur ca. 650°C) ikke var så høj som i Stor Pakke for de samme betontyper.

Derimod observeres en del af cylindrene at havde revnetype d) ("midtrevne"), hvilket ellers ikke var forventet da den øverste stålcappe blev afmonteret umiddelbart efter forsøget. Revnerne type d) var dog en del tyndere end dem der blev observeret i Stor Pakke.

Der var ingen af cylindrene som havde revnetype c) ("tophat"), hvilket ellers var normalt for P-betontyperne i Stor Pakke.



Figur 4.21. Temperaturforløb i lille ovn og ved overflade af betoncylinder PR 33 samt Standardbrandkurven. Udvidet Pakke.





Figur 4.22. Foto af de brandprøvede betoncylindre. I første venstre søjle ses 2 cylindre med betontype PR dernæst P3, P5 og P7.

#### **4.4 Sammenfatning af forsøgene i Udvidet Pakke**

Ingen af de 4 betontyper PR, P3, P5 og P7 viste tegn på eksplosiv afskalning i den nye prøvestand. Dette skyldes givetvis at temperaturbelastningen har været noget mindre end under Stor Pakke hvor PR, P3 og P5 viste sikre tegn på afskalning mens P7 kun viste afskalning i mindre grad (én cylinder ud af 3).

Ved efterrationalisering af prøvningerne i Udvidet Pakke er der nået frem til følgende:

Den anvendte temperaturkurve for den lille ovn ligger nær Standardbrandkurven, som er anvendt ved prøvningerne på DBI, men her har vægelementerne givetvis haft en større konvektiv og strålingsmæssig temperaturpåvirkning da elementerne har stået frit i et stort ovnkammer. Ved den nye prøvningsmetode har der været en vis afstand 25 mm fra ovn til prøve i Stor Pakke og 35 mm i Udvidet Pakke og en indsnævring på  $\varnothing$  100 mm, som givetvis giver en noget mindre temperatur ved overfladen af betoncylinderen i forhold til overfladen af vægelementerne. Det er skønnet at overfladetemperaturen ved DBI prøvningen har været en del større end under prøvningerne i den nye prøvestand.

Ud fra resultaterne i Udvidet Pakke er det derfor besluttet, at for at være på den sikre side, dvs. få indikationer på eksplosiv afskalning for alle relevante tilfælde, at anvende temperaturbelastningen som er anvendt i Stor Pakke ved den endelige anbefalede prøvningsprocedure, som er beskrevet i næste kapitel.



## 5. ENDELIG FORSØGSOPSTILLING OG PROCEDURE

Forsøgsopstillingen består af en ovn og en stålkappe. Stålkappen har en godstykkelse på ca. 50 mm med en indvendig diameter på 153 mm samt en længde på 400 mm, og består af to dele. En underdel som er fastmonteret samt en løs overdel som anbringes oven på cylinderen og spændes fast vha. 12 stk. Ø 36 mm stålbolte til underdelen. Imellem cylinderen og holderen er lagt et trykfordelingsmateriale af Neopren/Nitril som fordeler trykket fra holderen nogenlunde jævnt på betoncylinderen. Desuden udjævner trykfordelingsmaterialet unøjagtigheder mellem stålkappe og betoncylinder samt virker som fugt- og dampbremse. Neopren er anvendt, da materialet er volumenkonstant og kan holde til de temperaturer som opstår under prøvningen. Nitril anvendes når afstanden mellem kappe og cylinder er mindre end 0,75 mm da det kun har været muligt at få neopren fra 1,0 mm og opefter.

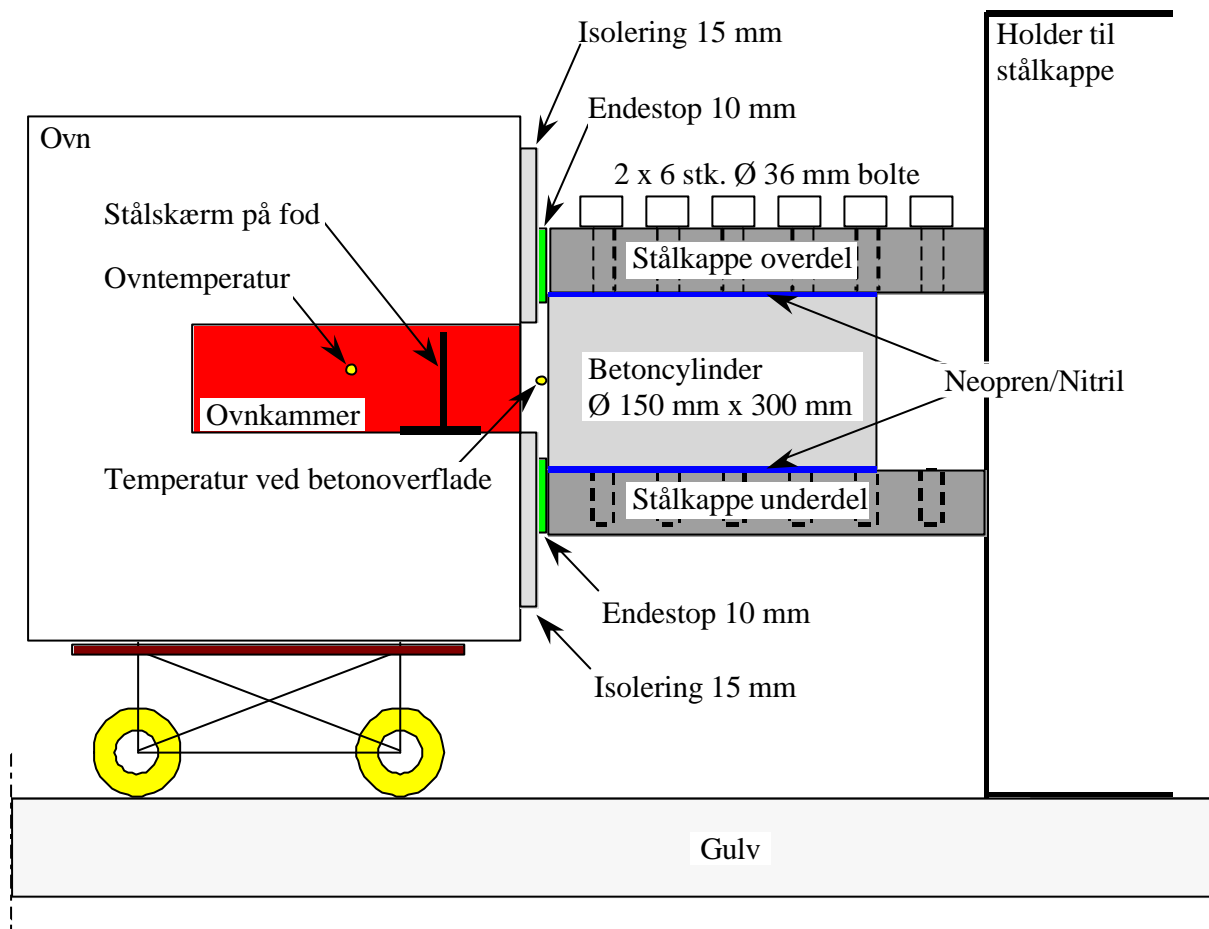
Det har som udgangspunkt i projektet været formålet at udvikle en prøvningsmetode, til undersøgelse af beton for eksplosiv afskalning, som var enkel og hurtig at anvende. Derfor er det i prøveopstillingen valgt at anvende betoncylindre på Ø 150 mm x 300 mm, som er en af de mest almindelige størrelse af standardcylinder i Danmark. Desuden er en sådan cylinder nemmere at håndtere og billigere at brandpåvirke end f.eks. et helt væg- eller loftelement.

Endeflader af cylinderen skal gøre det ud for en lille del af f.eks. en vægflade. En betonvæg kan være udsat for et tryk, fra permanent og variabel last samt fra egenvægten. For delvis at kunne efterligne dette tryk på betoncylinderen i forsøgsopstillingen, er cylinderen omgivet af en stålkappe, således at et ønsket tryk på cylinderen kan etableres, og så der i lighed med væggen kan opbygges termiske trykspændinger i overfladen.

Der lægges en blende af 15 mm isolering med et Ø 100 mm hul mellem ovnhul og betoncylinder, således at man får et Ø 100 mm eksponeringsområde på betoncylinderen. Den yderste krans på 25 mm af betoncylinderen bidrager til modhold for de termiske spændinger, da denne del ikke varmpåvirkes.

For at beskytte varmelegeme samt termoelementer i ovnen, for evt. sprængstykker af beton ved prøvningerne, er der opbygget en lille stålskærm på fod som anbringes i ovnen ca. 5 cm fra ovenåbningen.

Nedenstående figur 5.1 viser princippet i prøvningsopstillingen til eksplosiv afskalning.



Figur 5.1. Principtegning af forsøgsopstilling til prøvning for eksplosiv afskalning (lodret længdesnit).

På nedenstående figur 5.2 er et foto af opstillingen vist ved et forsøg. Ved brandprøve-standen for eksplosiv afskalning er der etableret en punktudsugning med en trinløs regulering af ventilator og dermed udsugningsflow. Evt. afgasninger, fra isolering, trykfordelingsmateriale og betonprøve m.m., til forsøgshallen, mindskes vha. punktudsugningen som ses øverst i billedet.



Figur 5.2. Foto af opstilling til forsøg for eksplosiv afskalning.

## Måling af temperaturer

Temperaturen i ovnen måles med et termoelement og aflæses på et digitalt instrument. Desuden er der i ovnen monteret et fast termoelement med aflæsning på et viserinstrument. Ca. 5 mm fra den eksponerede betonoverflade måles temperaturen vha. et termoelement og aflæses på et digitalt instrument. Alle termoelementer er af K-typen (NiCr/Ni). De 2 digitale instrumenter benyttes ved prøvning da disse er nemmere og hurtigere at aflæse end et viserinstrument.



Figur 5.3. Foto af 2 stk. digitale termometre og PC til dataindtastning og dataopsamling.

## Forsøgsprocedure

Forsøgsproceduren er følgende:

1. Først udtørres betoncylinderen til et ønsket niveau. Ideelt skal opmåling af diameteren af betoncylinderen foretages først i denne periode for ikke at udtørre cylinderen unødigt lige før brandprøvning.
2. Trykfordelingsmateriale vælges ud fra opmålingen af diameteren.
3. Ovn tændes ca. 1 time før prøvning og setpunkt sættes til 1000°C.
4. Cylinderen vejes lige før den placeres i stålkappe.
5. Trykfordelingsmateriale og betoncylinder lægges i nederste stålkappe.
6. Øvre stålkappe monteres med 12 stk. stålbolte som spændes til et ønsket niveau (f.eks. 160 Nm).
7. Umiddelbart før prøvning løsnes bolte og spændes til et ønsket niveau (f.eks. 80 Nm).
8. Når ovntemperaturen er 1000°C fjernes isoleringsskot på ovnen og ovnåbning med 15 mm isoleringsovergangsstykke med Ø 100 mm hul placeres foran betoncylinder. Stålkappe fastspændes (fikseres) til ovn.
9. Temperatur i ovn og nær betoncylinder samt evt. afskalninger, vanddamp m.m. noteres hvert minut i de første ca. 20 minutter herefter med 2 til 5 min. mellemrum.
10. Efter 1 time slukkes ovn, og den fjernes fra betonoverfladen.
11. Betono verfladen observeres og evt. revner m.m. beskrives.
12. Opstillingen afkøler til næste dag.
13. Øverste stålkappe afmonteres.
14. Evt. afskalninger vejes.
15. Betoncylinder vejes og placeres i tørreskab.
16. Med ca. en uges mellemrum vejes betoncylinder og ved en vægttabsændring på mindre end 0,1 % af totalvægten [7] regnes cylinderen for at være udtørret og fugtprocenten ved start og slut af prøvning kan beregnes.



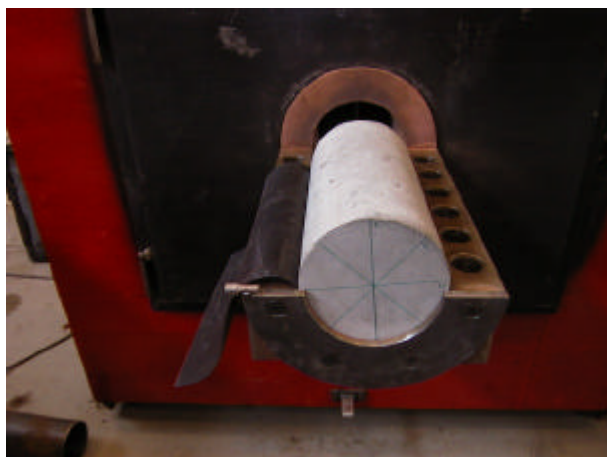
Figur 5.4. Foto af opmåling af cylinder.



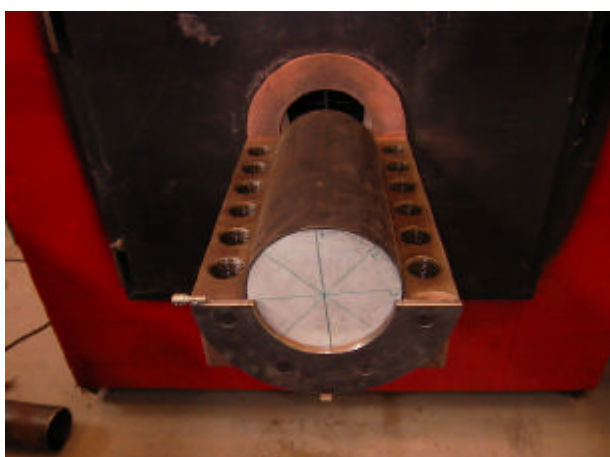
Figur 5.5. Foto af stor ovn med ovnlåge og fastmonteret underdel af stålkappe.



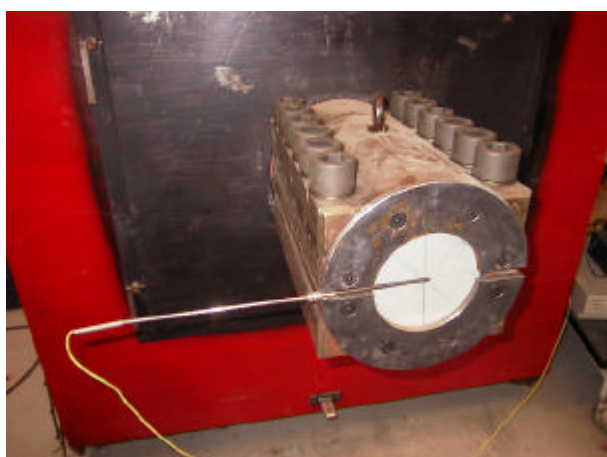
Figur 5.6. Foto af underdel af stålkappe med ilagt trykfordelingsmateriale.



Figur 5.7. Foto af ilagt betoncylinder.



Figur 5.8. Foto af underdel af stålkappe med ilagt betoncylinder og trykfordelingsmateriale

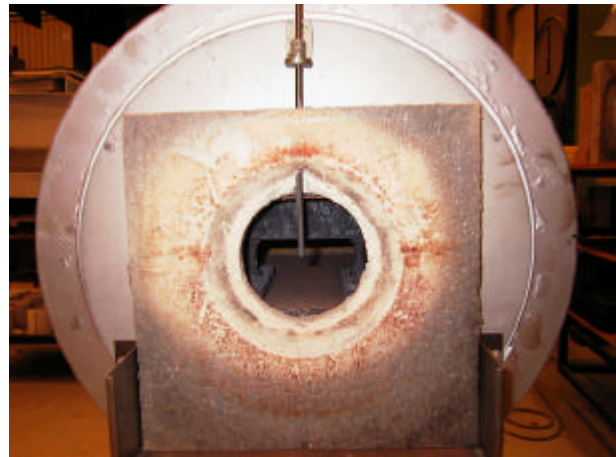


Figur 5.9. Foto af overdel af stålkappe med endestop og temperaturføler. Stålkappe er monteret med 12 stk. stålbolte.

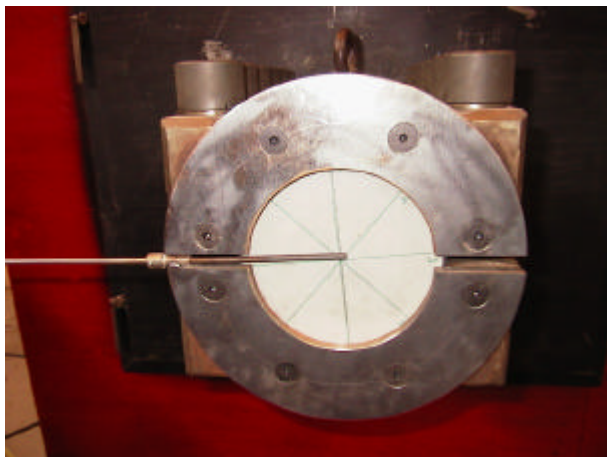




Figur 5.10. Foto af ovnhul på lille ovn.



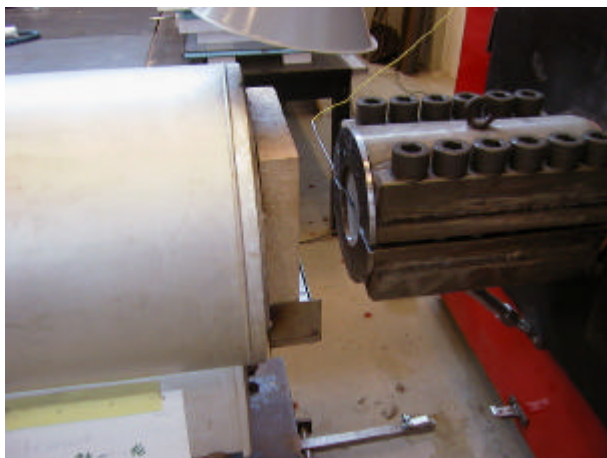
Figur 5.11. Foto af isolering med  $\varnothing$  100 mm hul foran ovnhul.



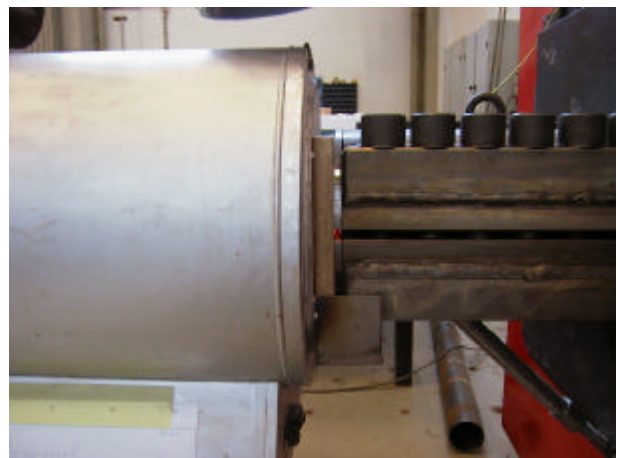
Figur 5.12. Foto af stålkappe. Bemærk endestop som går ca. 10 mm ind foran cylinder samt termoelement.



Figur 5.13. Lille ovn under opvarmning. Bemærk isoleringsskot (isolering med rundt hvidt område) som anvendes under opvarmning af ovn.



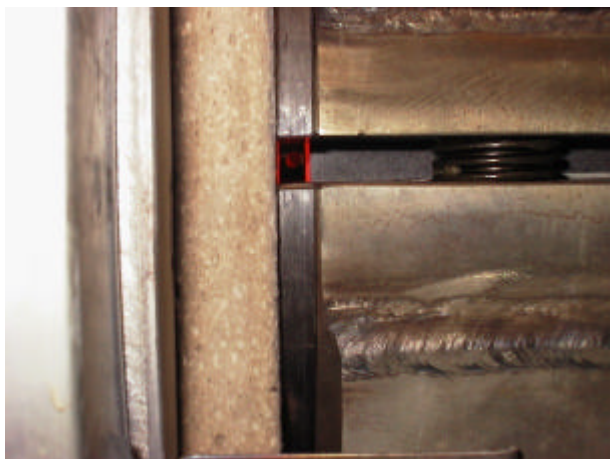
Figur 5.14. Foto af ovn lige før isoleringsskot på 50 mm fjernes



Figur 5.15. Foto efter skot er fjernet og cylinder ekponeres gennem  $\varnothing$  100 mm hul i isolering.

### **Eksponeringsareal**

En ovn med et ovnhul på ca. 100 x 200 mm er anvendt. I midten af en ca. 0,3 m x 0,3 m og 15 mm tyk brandisoleringsplade skæres et Ø 100 mm hul. Denne plade monteres foran ovnens åbningshul, således at hullet er i centrum af ovnhullet. Under opvarmning af ovnen placeres et 50 mm tykt isoleringsskot mellem ovn og betoncylinder. Når ovnen har nået en stabil temperatur på ca. 1000°C fjernes skottet og eksponeringshullets centrum rykkes hen til cylindercentrum. Nu startes stopuret og temperaturen ved beton og i ovn noteres. Herefter noteres tidspunkter, temperaturer med jævne mellemrum samt bemærkninger om afskalninger m.m. Det har vist sig at generelt er afskalningerne forekommet inden for de første ca. 20 min. Derfor slukkes ovnen og denne fjernes fra cylinderen med stålkappen ca. en time efter at isoleringsskottet er fjernet. Betonoverfladen observeres og evt. revner m.m. beskrives. Cylinder og kappe afkøles til næste dag, hvor overdelen af kappen fjernes. Evt. afskalningsarealer, -dybder, revner m.m. på cylinderen opmåles og noteres. Cylinderen vejes og anbringes i tørreskab for senere at kunne beregne fugtindhold.



Figur 5.16. Nærbillede af ovn, isoleringsplade, 10 mm endestop og under- og overdel af stålkappe.



Figur 5.17. Foto af betoncylinder efter prøvning for eksplosiv afskalning. Bemærk at betonen er blevet lysere på det eksponerede område.

Som tidligere beskrevet i kapitel 2 anvendes der trykfordelingsmateriale mellem betoncylinder og stålkappe for at det påtrykte tryk (tilspænding) samt trykket fra de termiske udvidelser kan overføres nogenlunde jævnt fordelt.

Alt afhængig af diameteren af betoncylindrene ilægges Neopren/Nitril i den tykkelse som udfylder rummet mellem cylinder og kappe.

## 6. KONKLUSION

Der er udviklet en testmetode til eksplosiv afskalning, hvor der anvendes betoncylindre med standarddimensionerne Ø150 mm x 300 mm. De små betonemner, gør prøvningerne nemmere at foretage end fuldskalaforsøg. Metoden kan tilnærmelsesvis efterligne trykforhold f.eks. i en betonvæg under brand.

Der er enkelte forhold ved metoden som kan vælges at blive ændret/varieret eller at indgå som faste parametre, herunder prøvelegemets fugtforhold og udtørningsgrad, og hvilken størrelse de initiale tværtrykspændinger skal have.

Grøn Beton projektet var opdelt i 3 faser: Grund-, Stor- og Udvidet Pakke. Der blev ikke udført forsøg i delprojekt BK2 i Grundpakken, da de nye betontyper først skulle bestå grundlæggende tests. I denne periode blev testmetoden opbygget og indledningsvis afprøvet med få andre betontyper.

### STOR PAKKE

Der er udført prøvninger for eksplosiv afskalling af 12 forskellige betontyper foreslået i projektet og prøvning af én betontype fra DTU. Betonemner i aggressiv miljøklasse blev efter støbning lagret i vand i mindst 28 døgn indtil umiddelbart før prøvning (5,6 – 6,9 vægt %) for at efterligne forholdene ved en brand eksempelvis i en tunnel. Alle betontyper (6 stk.) i aggressiv miljøklasse, viste tegn på afskalning, på nær én, hvilket kunne skyldes at temperaturpåvirkningen var for lav (ca. 660°C ved betonoverfladen) for denne beton.

Betontyperne i passiv miljøklasse blev efter støbning først lagret i 28 døgn i vand og derefter konditioneret i klimakammer ved ca. 23°C og 60 % RF (3,7 – 5,3 vægt %) i en måned for at efterligne forhold i en nyopført bygning. Det er navnlig i bygninger de passive betoner forventes anvendt, hvor de aggressive betoner ofte finder anvendelse i anlægskonstruktioner, eksempelvis tunneler. Af 7 stk. betontyper i passiv miljøklasse viste 4 typer tegn på afskalning (PR, P2, P3 og P5 alle med 4,2 – 5,2 % mikrosilica) mens de sidste 3 kun viste svage tegn på afskalning (P6, P7 og DTU alle uden mikrosilica).

Afskalningerne for både de aggressive og passive betoner forekommer i forsøgsopstillingen typisk inden for den første halve time. Generelt var afskalningerne mere markante for betoncylindrene i aggressive miljøklasse end i passiv miljøklasse.

Efter forsøgene observeredes 4 forskellige revnetyper:

- a) Afskalninger, på plan eksponeret endeflade, der efterlader et skålformet krater som et forventeligt resultat af testen for beton med afskalning.
- b) Radiære revner (trækrevner) gående fra eksponeret flade og ud til rand. Som forventet i den yderste ikke eksponerede zone.
- c) Gennemgående revneflade, nær eksponeret endeflade (ca. 20 – 30 mm) med krumning bagud i yderzonen ("Tophat").



- d) Gennemgående revne ca. midt på cylinderen. Dvs. langt (ca. 150 mm) væk fra eksponeringen.

En del tyder på at revnetype c) og d) ikke har noget at gøre med selve den afskalning, som skal konstateres, men skyldes mekaniske påvirkninger fra forsøgsopstillingen. Disse revner er søgt elimineret.

### **UDVIDET PAKKE**

For at søge at undgå revnetype c) blev et endestop monteret på forsøgsopstillingen, for at hindre at trykfordelingsmaterialet Neopren/Nitril presses ud ved enden af betoncylinderen. Revnetype d) er forsøgt elimineret ved at afmontere den øverste stålkappe umiddelbart efter forsøgene.

I Udvidet Pakke er 4 forskellige betontyper (PR, P3, P5, P7) i passiv miljøklasse blevet testet med den nye testmetode med 2 prøvelegemer af hver type. Betontyperne er tillige blevet brandprøvet, ved et fuldskala forsøg med en standardbrand, som 4 vægelementer med dimensionerne højde x bredde x tykkelse 1,2 m x 1,2 m x 0,3 m på Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut (DBI). Denne geometri var vedtaget efter anmodning fra projektets ledelse, idet man ønskede at kunne sammenligne effekten af materialeprøvningen med en fuldskalaprøvning. Man forestillede sig at trækspændinger i den kolde kerne i de tykke tosidigt påvirkede vægge ville yde en termisk tryktilstand i hver sideflade uden at give anledning til krumning af væggene.

For at eliminere fugtens indflydelse på afskalningsforsøgene, var det hensigten at udtørre betonemnerne til et fugtniveau på ca. 3 vægt %, hvor der erfaringsmæssigt ikke sker afskalning pga. fugt for traditionelle betoner. Det viste sig at udtørningsperioden for de forholdsvis tykke vægelementer ville blive meget lang, omkring 1,5 – 2 år, så vægelementer og betoncylindre blev afprøvet efter ca. 6 måneder ved et fugtniveau på ca. 4,5 – 5,5 vægt %. Udtørringen foregik i en forsøgshal ved ca. 20°C og 25 – 50 % RF.

Væggene viste ingen tegn på eksplosiv afskalning efter 1 times standardbrandpåvirkning. På alle flader konstateredes en del trækrevner. Betontype P7 havde efter prøvning de færreste og mindste revner og havde en overraskende ”pæn” overflade sammenlignet med de andre tre, hvilket måske kan forklares med den bedre udstøbning samt en anden betonrecept.

De tykke vægelementer var alle gennemskåret af revner i deres centrale dele, og det var tydeligt, at disse revner kunne aflaste det termiske tryk i overfladen, som tidligere er påvist [3] [13] at være en forudsætning for en eksplosiv afskalning af disse betontyper, og som netop af samme grund etableres i materialetestmetoden. Der er således ikke grundlag for yderligere sammenligninger mellem den foretagne fuldskalatest og materialetesten, men fuldskalatesten har givet det resultat, at den har demonstreret hvordan en dybtliggende revnedannelse kan aflaste overfladetrykket og derved modvirke afskalning, og denne nye teori kan igen forklare bl.a. hvorfor polypropylenfibre kan synes at modvirke afskalning for ikke trykbelastede overflader, da fibrene bevirker at betonen får en lavere trækstyrke [13].

Efter evalueringen af forsøgene på DBI blev det besluttet at forsøgene i prøvestanden skulle foregå ved en lidt lavere temperaturpåvirkning end ved forsøgene i Stor Pakke, således at temperaturforløbet i den lille ovn nogenlunde vil svare til en standardbrand. Temperaturforløbet star-

ter ved en ovntemperatur på ca. 600°C og følger herefter nogenlunde standardbrandkurvens temperatur i omkring en time.

Betonprøverne Ø150 mm x 300 mm blev testet med en vis trykpåvirkning, men viste ingen tegn på eksplosiv afskalning. Dette skyldes en lavere temperatur ved betonoverfladen end i ovnen ved materialetesten og dermed også lavere end ved overfladen af vægelementerne ved fuldskaletesten.

Der var flere cylindre (5 stk.) som havde en ikke gennemgående revne type d) ca. 20 cm fra eksponeret flade.

Revnetype c) ser ud til at være elimineret ved at montere et endestop. Derimod opstår revnetype d) stadig, selv om betoncylinderen aflastes umiddelbart efter forsøget, men denne revnetype er harmløs for resultatet.

### **Generelt**

Resultaterne viser at den nye testmetode kan anvendes til en grov vurdering af, om en given betontype med en given aktuel fugtighed har risiko for eksplosiv afskalning.

Alle aggressive betontyper (6 typer) fra Stor Pakke og de 4 passive typer (PR, P2, P3 og P5) viste tegn på afskalning, hvis de har et fugtindhold svarende til en konditionering i en måned ved 60 % RF og 23°C.

De fire passive betontyper PR, P3, P5, P7 fra Udvidet Pakke forekom ikke at vise tegn på afskalning, ved udtørring til samme fugtniveau som fuldskala væggene, hvis varmepåvirkningen blev nedsat til kun 600°C ved cylinderendeflader, hvilket er urealistisk lavt.

Betontyperne P6, P7 og DTU kan anvendes uden at risikoen for afskalning undersøges yderligere.

For at være sikker på at den nye opstilling ”fanger” alle betoner med risiko for afskalning foreskrives det at anvende temperaturbelastningen, som er anvendt i Stor Pakke, dvs. en momentan påvirkning af betoncylinderoverfladen fra en 1000°C varm ovn, der giver 800°C ved cylinderendeflader.

## REFERENCER

- [1] Bro 4-0031 UF af Holbækmotorvejen – Reparation af brandskade. Tilsynsrapport oktober 2000. Cowi.
- [2] AFSKALNING. Styregruppen Brand-Beton. 1999-11-23. KHZ. Notat af KHZ om afskalninger, beskrivelse af problemområdet og delprojekter.
- [3] Eksplosiv afskalning af beton. Johann Gunnar Gunnarsson. Afgangsprojekt fra Institut for Bygninger og Energi, DTU. 1998.
- [4] Norm for betonkonstruktioner DS 411 (4,1). 4. udgave 1999.
- [5] Teknisk Ståbi. 1986.
- [6] Boskin 92. Nekton værktøj - Arvid Nilsson Boskin A/S.
- [7] DS 423.20 "Betonprøvning. Hærdnet beton. Prøvelegemers form og mål".1984.
- [8] Planlægning og tidsplan for Stor Pakke. DMA. 2000.05.01. (145 Dokument. SP-koordineringsnotat-rev2.doc 2000-05-01).
- [9] Receptoversigt.doc. DMA. 2000-09-30. (173. Dokument. Betonrecept Stor Pakke)
- [10] recepter 12.xls. (234. Dokument. Recepter i udvidet pakke.)
- [11] EUROPEAN STANDARD. FINAL DRAFT prEN ISO 12570. January 1999. Hygrothermal performance of building materials – Determination of moisture content by drying at elevated temperature (ISO/FDIS 12570:1999).
- [12] Calculations of fire exposed concrete structures. K. Hertz 2000-09-11. Temperature profile after 0.5h and 1h standardfire in a two sided exposed concrete wall of a concrete based on Danish sea gravel. BYG•DTU.
- [13] Kristian. Hertz. Limits of Spalling of Fire Exposed Concrete. Department of Buildings and Energy. Technical University of Denmark. November 1998. (Accepted for publication by Fire Safety Journal, August 2002.)

## LITTERATURLISTE

- 1 Samarbejdsaftale vedr. udførelse af centerkontrakt, Ressourcebesparende betonkonstruktioner. 1998.06.04
- 2 Centerkontrakt. Ressourcebesparende betonkonstruktioner. Projektplan. 1998.06.04
- 3 Bilag C. Beskrivelse af universiteternes del af centerkontrakten.
- 4 Skitse for forsøgsostilling. 22.12.1998/L.Schiøtt
- 5 SV: Tryk fra betoncylinder.  
E-mail fra KHZ den 10. marts 1999 kl. 09:32
- 6 Beregning af kappetykkelse. 16.03.99/L. Schiøtt
- 7 Skemaer til prøvning for eksplosiv afskalning. Excel fil med 7 ark.
- 8 Styregruppen Brand-Beton. Dansk Standard. AFSKALNING. 1999-11-23. Kristian Hertz.
- 9 Projekt-web for Grøn Beton: [http://212.88.92.124/GB/prjweb.dll?\\_sog?](http://212.88.92.124/GB/prjweb.dll?_sog?)
- 10 STOR PAKKE. Planlægning og tidsplan for Stor Pakke. 2000.05.01 DMA. TI.
- 11 Tidsplan for blanding af beton til Stor Pakke. 2000-05-17. (Teknologisk).
- 12 BLANDERECEPT (revideret 5/10 1979).  
(Blanderecept til DTU betoncylindre, mærket IBE-xx dateret den 24/5-2000).
- 13 DTU blanderecept. Excel fil med 2 ark.
- 14 REDEGØRELSE FOR AFSKALNINGSDELEN AF BK2 GRØN BETON.  
2000-11-15. KHZ
- 15 Referat fra mødet den 8/12-2000 kl. 9.00-11.00 på DTU bygning 118 møderum 224, dateret 19/12-2000. Mødedeltagere KHZ, LSS, FK, EST fra TI og PFH fra AaU.
- 16 Status for BK2 efter brandprøvninger i Stor Pakke. Notat 14-2-2001. Finn Kristiansen.
- 17 Oplæg til prøvninger i Udvidet Pakke i delprojekt BK2 (brand). Notat 19-03-2001. Finn Kristiansen.
- 18 Skema side 10 i Referat fra Styregruppemøde 8/01. 2001-12-03 MTJ. TI.
- 19 Resultater fra Udvidet Pakke. Fugtmåling og beregning. Eksempel fra Excel fil, Vejning-fugtindhold 07.
- 20 BK2 (brand), oplæg til prøvninger i Udvidet Pakke.

BYG•DTU, Grøn Beton, NOTAT 25-09-2001. (udfærdiget af Finn Kristiansen).

- 21 Grøn Beton, redegørelse. 12. marts 2002 kl. 09:57.  
E-mail fra Lars Schiøtt Sørensen
- 22 Dansk Standard DS 481.

## **Appendiks A**

### **Skemaer til måleprocedure og dataopsamling for eksplosiv afskalning**

Eksempel:

”Skemaer til prøvning for eksplosiv afskalning.  
Kendenavn PR-33”.

# Skemaer til prøvning for eksplosiv afskalning.

Kendenavn

**PR-33**

---

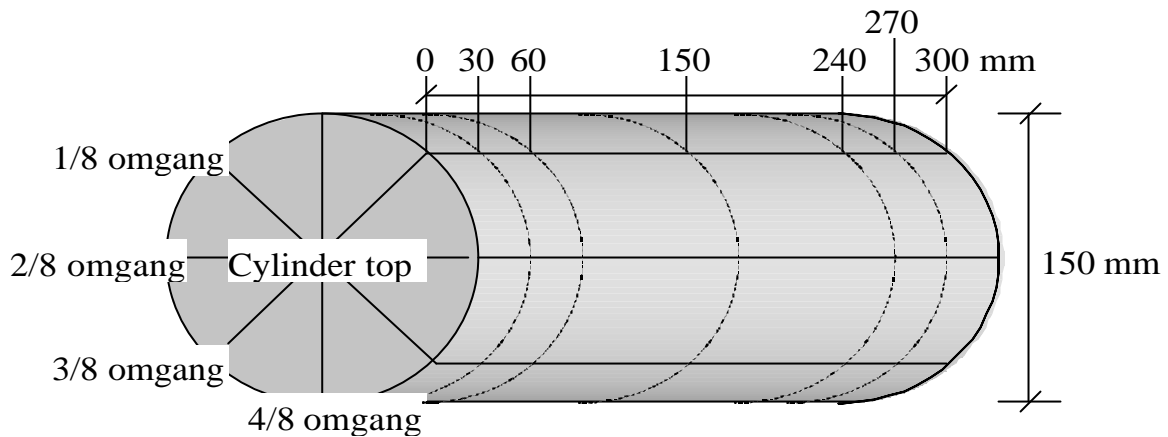
---

---





Opmåling af diameter af prøveemnet ved 7 forskellige steder i længderetningen.  
Hvert sted foretages 4 målinger ved at dreje cylinderen 4 gange 1/8 omgang.



Figur 1. Principskitse af opmålingspunkter på betonprøveemne

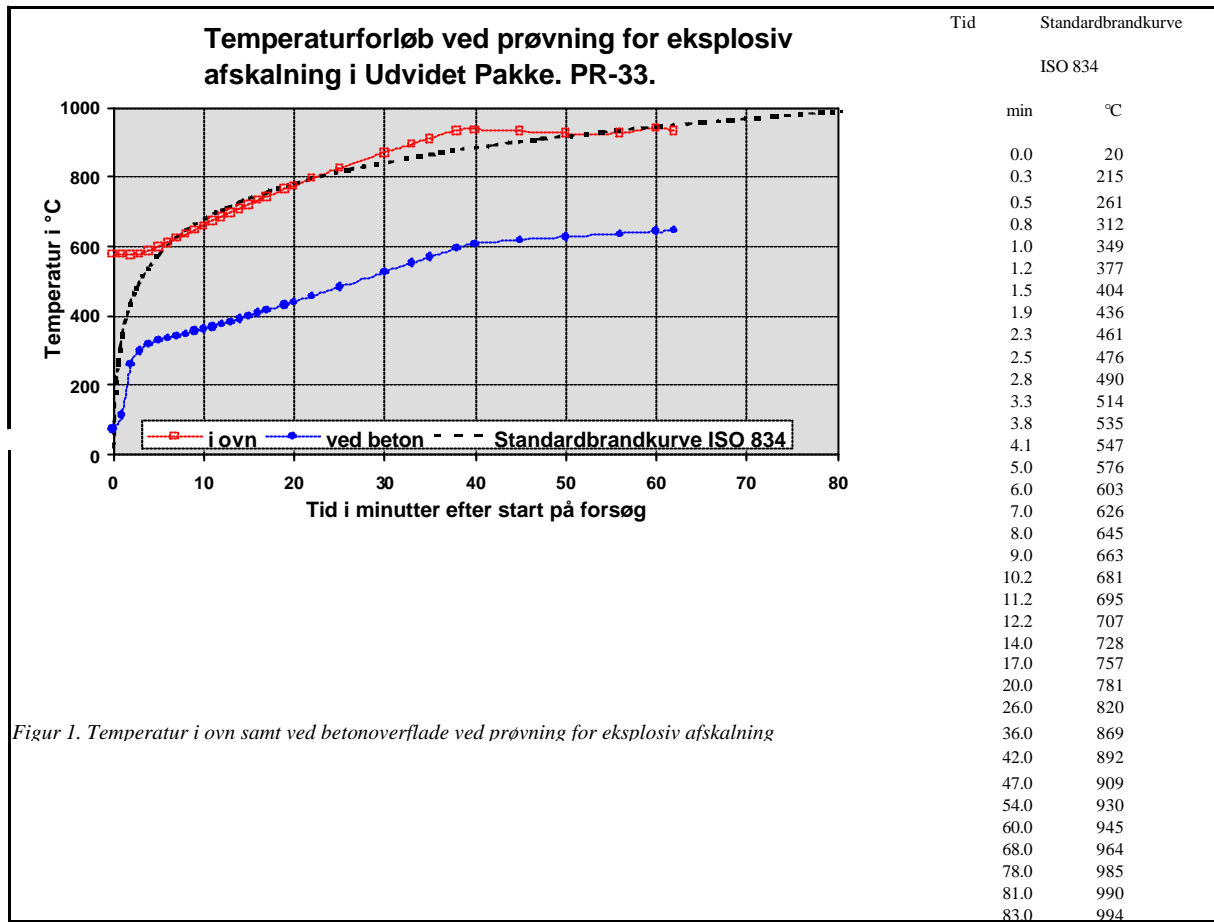
Målepunkt i længderetning fra top af cylinder (med tekstidentifikation)	Omgang				Gennemsnit
	1/8	2/8	3/8	4/8	
mm	mm	mm	mm	mm	mm
0.0					
30.0					
60.0					
(B) Gennemsnit af 0, 30 og 60					#DIVISION/0!
150.0	149.6	150.7	150.7	149.3	
240.0	148.9	150.5	150.9	149.5	
270.0	148.6	150.6	151.0	149.7	
300.0	148.9	151.0	151.4	150.0	
(C) Gennemsnit af 240, 270 og 300	148.8	150.7	151.1	149.7	150.1
Største diameter	149.6	151.0	151.4	150.0	151.4
Mindste diameter	148.6	150.5	150.7	149.3	148.6

Tabel 2. Skema til opmåling af diameter af betonprøveemne

Tykkelse af trykfordelingsmateriale ved top (153.0 mm - B)/2:	[mm]	#DIVISION/0!
Tykkelse af trykfordelingsmateriale ved bund (153.0 mm - C)/2:	[mm]	1.46
Valgt tykkelse:	[mm]	1.50
Dimension af trykfordelingsmateriale:	300 mm x 471 mm	
Trykfordelingsmateriale (Neopren/Nitril) og betonprøveemne monteres i stålkappe.		
De to stålkappe omkring betonprøveemnet fastgøres ved hjælp af bolte som krydspændes.		
Tilspændingsmoment af bolte Ø 36 mm:	[Nm]	(160) 80
Ovntype:	lille ovn = ca. 0.1 m x 0.2 m x 0.3 m [højde x bredde x dybde]	
	[højde x bredde x dybde]	

Eksponeringsflade bund:		Glat med mange små lufthuller. Et enkelt hul på ca. Ø 5 mm			
Udseende af eksponeringsoverflade:					
Bemærkninger:		Stålmellemlæg mellem stålkappedele			
Ca. 1 time før prøvning spændes boltene til 160 Nm og ca. 5 min før løsnes og spændes boltene til 80 Nm.					
Start når ovntemperatur er 560°C. Setpunkt sættes til 900°C ved start.					
Ovntype: lille/stor		Lille		Prøvningsdato [dd-mm-aa]:	
				19-07-2002	
Klokke- slæt	Tid (stopur)		Temperatur		Bemærkning: f.eks. afskalning, lyde, vanddamp og -dryp m.m.
tt:mm	tt:mm:ss	min	ved beton °C	i ovn °C	
14:00:00			25	25	Ovn tændes.
					Setpunkt skal være ca. 460 så bliver temp. ca. 570°C
15:13:00	00:00:00	0	72	577	skot fjernes
15:14:00	00:01:00	1	112	578	
15:15:00	00:02:00	2	260	575	
15:16:00	00:03:00	3	297	578	
15:17:00	00:04:00	4	317	586	
15:18:00	00:05:00	5	328	598	
15:19:00	00:06:00	6	334	609	
15:20:00	00:07:00	7	341	622	
15:21:00	00:08:00	8	347	634	
15:22:00	00:09:00	9	354	647	
15:23:00	00:10:00	10	360	659	
15:24:00	00:11:00	11	367	672	
15:25:00	00:12:00	12	375	684	rødgløder svagt
15:26:00	00:13:00	13	382	696	
15:27:00	00:14:00	14	389	708	
15:28:00	00:15:00	15	397	719	
15:29:00	00:16:00	16	406	732	knitre lidt
15:30:00	00:17:00	17	415	743	knitre lidt
15:32:00	00:19:00	19	430	764	knitre lidt
15:33:00	00:20:00	20	439	774	
15:35:00	00:22:00	22	456	795	knitre lidt
15:38:00	00:25:00	25	482	824	knitre lidt
15:43:00	00:30:00	30	524	869	knitre lidt
15:46:00	00:33:00	33	550	894	knitre lidt
15:48:00	00:35:00	35	567	910	knitre lidt
15:51:00	00:38:00	38	593	933	knitre lidt
15:53:00	00:40:00	40	607	936	knitre lidt
15:58:00	00:45:00	45	617	932	knitre lidt
16:03:00	00:50:00	50	626	925	
16:09:00	00:56:00	56	636	927	knitre lidt
16:13:00	01:00:00	60	643	941	knitre lidt
16:15:00	01:02:00	62	645	933	ovn slukkes og fjernes fra cylindre

Tabel 3. Skema til brandprøvning af betonprøveemne for eksplosiv afskalning.







## **Appendiks B**

**Betonrecept for DTU-cylindre (mærket IBE xx). Excel fil.**



**Kontrol af beton under** \_\_\_\_\_ Sagsnr. \_\_\_\_\_ IBE

Støbested: BKM Støbedato: 30.05.00 Ansvarlig: EC-FK

Betontype: Passiv Fibertype: [ ] vol % = [ ]

HUSK at angive vol%

Sats [I] [85] Ækv.v/c = 0.871

Materiale	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Recept a. fibre (VOT) [kg/m <sup>3</sup> ]	Aktuel recept (VOT) [kg/m <sup>3</sup> ]	Fugtindhold [%]	Korrektion for fugt [kg/m <sup>3</sup> ]	Korrigeret recept [kg/m <sup>3</sup> ]	Aktuel sats [kg]
basis Cement	3100	194	194			194	16.49
Flyveaske	0	0	0			0	0.00
*Microsilica	0	0	0		0.00	0.0	0.00
**Vand	1000	169	169		13.8	182.8	15.54
Luft				0		0	0.000
Plast				0		0	0.000
Superpl.				0		0	0.000
bak 0-4 Sand	2585	690.0	690.0	0.3	-8.59	681.4	57.92
Sand	0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.00
sø 4-8 Sten	2642	493.0	493.0	0.1	-2.35	490.6	41.70
sø 8-16 Sten	2637	788.0	788.0	0.1	-2.87	785.1	66.74
Sten	0	0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.00
Fiber				0		0	0.00

Hjælpekolonner  
MA IKKE SLETTES !

0.062580645  
0  
0  
0.169  
0  
0  
0  
0.266924585  
0  
0.18660106  
0.298824422  
0  
0  
0

HUSK at angive densi

HUSK at angive densi

HUSK at angive densi

HUSK at angive absor

fugtindholdsbestemme

eller fugtindholdet dire

HUSK at angive densi

\*: Mængde af microsilica skal ALTID angives som pulver i kolonne 2, uanset om slurry bruges.

I så fald angives fugtindholdet i kolonne 4.

\*\* : Mængde af vand skal angives UDEN korrektion for vand i tilsætn.stoffer (dvs. som om de ikke indeholder vand)

Absorptionsevne [%]	Sand	1.6	Forventet densitet [kg/m <sup>3</sup> ]:	2334
	Sand	[ ]	Forventet luftindhold [%]	1.6
	Sten	0.6	Målt densitet [kg/m <sup>3</sup> ]:	2397.7
	Sten	0.5	Målt luftindhold [%]	0.5
	Sten	[ ]	Sætmål _____ mm	80mm
			Vebetalt _____ sek	

Hjælperubrik; må IKKE røres !

Densitet MS (slurry eller pulver)

2200

**Bestemmelse af fugtindhold**

	Sand	Sand	Sten	Sten	Sten
Tom skål [g]				240.37	232.88
Skål + vådt mat. [g]	223.39	804	1094.9	1111.67	
Skål + tørt mat. [g]	802.06		1093.88	1110.49	

Teoretisk sammensætning af 1 m<sup>3</sup> beton 8. januar 2003 EdP  
 Afsluttende udregninger og oversigt  
 - udvidet udgave af tabel 8.2-8 i Beton-Bogen

Komponent	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Masse kg/m <sup>3</sup>	Volumen m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Cement	3100	194	0.06
Flyveaske	2250	0	0.00
Microsilica	2250	0	0.00
Vand	1000	169	0.17
Luft		0	0.010
Sand 1	2585	690	0.27
Sand 2	0	0	#####
Sten 1	2642	493	0.19
Sten 2	2637	804	0.30
Sten 3	2618	0	0.00
Beton frisk	2350	2350	#####
tørdensitet, hærnet	2181		

FORUDSÆTNINGER		SKRIV KUN HER !!	
Cement	Mængde	194	kg/m <sup>3</sup>
	Densitet	3100	kg/m <sup>3</sup>
Flyveaske	Mængde	0	kg/m <sup>3</sup>
	Densitet	2250	
Microsilic	Mængde	0	kg/m <sup>3</sup>
	Densitet	2250	kg/m <sup>3</sup>
Vand	Mængde	169	l/m <sup>3</sup>
	Densitet	1000	kg/m <sup>3</sup>
Luftindhold		1	%
Sand	Sand procent	35.2	%
	Sand1 i % af Sand	100	%
	Densitet af Sand1	2585	kg/m <sup>3</sup>
	Densitet af Sand2	0	kg/m <sup>3</sup>
Sten	Sten1 i % af Sten	38	%
	Densitet af Sten1	2642	kg/m <sup>3</sup>
	Sten2 i % af Sten	62	%
	Densitet af Sten2	2637	kg/m <sup>3</sup>
	Densitet af Sten3	2618	kg/m <sup>3</sup>
	Hydratiseringsgrad	-	
(behøver ikke udfyldes; kun betydning for beregning af tørdensitet)			

Mængde af vand skal angives som om eventuelle tilsætningsstoffer IKKE indeholder vand

## **APPENDIX C**

**Detaljeret resultater fra Stor Pakke. Excel fil.**

# A-beton.

Grøn Beton.

Sammenfatning af prøvningsforløb for Stor Pakke m.m

Aggressive betoner

Betontype	Betonsammensætning	Tilspændingsmoment Nm	Start temperatur		Slut temperatur		Bemærkning	Afskalninger			Bemærkning	
			ved beton °C	i ovn °C	ved beton °C	i ovn °C		på eksp. endeflade %	Vægt g	dybde max mm		på ikke eksp. endeflade %
AR-150-7	Rapid cement. FA 10 %. MS 5 %	200	195	1000	661	990	Lav sluttemp.	0	0.0	0	0	fine små revner
AR-150-8		200	284	995	640	985	Lav sluttemp.	33	55.3	8	0	
AR-150-9		200	304	990	663	980	Lav sluttemp.	0	37.1	0	0	fine små revner
A0-150-6	Ny rapid. FA 10 %. MS 5 %	200	312	995	661	990	Lav sluttemp.	0	0.0	0	0	fine revner
A0-150-7		200	289	980	664	1000	Lav sluttemp.	0	26.5	0	0	en del fine revner
A0-150-8		200	425	1000	667	995	Lav sluttemp.	0	7.5	0	0	få og fine revner
A1-150-6	Ny rapid. FA 40 %	100	807	1015	840	1000		50	27.0	4		
A1-150-7		200	793	1020	830	995		60	61.0	4		
A1-150-8		200	824	1021	818	1015		nær 100	72.0	9	5	
A3-150-7	Ny rapid. Slamasker 14 %	200	756	1023	799	1015	ca. 1 time før	95	107.0	5		
A3-150-8		200	771	1015	801	1010	ca. 1 time før	95	93.5	7		
A3-150-9		200	776	1012	811	1021	ca. 1 time før	85	54.0	5		
A5-150-6	ANL Betonslam 12 %	200	746	1009	803	1017		100	137.5	18		
A5-150-7		200	761	1011	820	1014		100	65.5	8		
A5-150-8		200	782	1000	815	1005		95	94.0	5		
A6-150-6	ANL. Stenmel 32 %	80	784	1000	820	1018		90	122.5	13		
A6-150-7		80	806	1004	812	1016	160 Nm 1 t før	93	45.5	9		
A6-150-8		80	790	1007	809	1023	160 Nm 1 t før	90	47.5	10		
KER 5	MS 37.8 kg/m3 LA 340.1 kg/m3	300	139	1045	664	1000	Lav sluttemp.	0	0.0	0		eksp. flade: top
KER 25		200	270	1030	664	1000	Lav sluttemp.	0	0.0			eksp. flade: top
KER 39		200	146	1025	670	1005	Lav sluttemp.	måske 2 %				eksp. flade: top
KER 41		200	314	1020	675	1000	Lav sluttemp.	0	2.6			eksp. flade: top
KER 44		200	218	1020	667	1000	Lav sluttemp.	0				??eksp. flade: ??
KER 50		200	105	1025	670	1000	Lav sluttemp.	0				eksp. flade: bund
Boreprøve 1	Fra flise nr. 9, Storebælt. Johan	----	593	880	653	890	tykkelse 10 cm	50	26.5	4		ingen te-hætte
Boreprøve 2		200	762		857	1010	tykkelse 10 cm	85	27.5	4		ingen te-hætte
Boreprøve 3		40	760	1005	817	980	tykkelse 10 cm	85	32.5	6		
AR-150-10	Rapid cement. FA 10 %. MS 5 %	0										uden tilspænding

ANL: Svensk cement, FA: Flyveaske, LA: Lavalkali, MS: Mikrosilica

før brand-prøvning	Vægt		Afvigelse efter-før %	Tørvægt g	Fugt-indhold før brand %	Bemærkning	Revner på krum flade		Densitet kg/m3	Dato	Luft-indhold %	Betontype
	g	efter brand-prøvning g					Afstand fra top cm	Del af omkreds %				
11757.8	11579.6	-1.5	11092.0	6.0			16.5	100		11-04-2000		AR-150-7
11714.7	11502.2	-1.8	11004.0	6.5	tab i vægt i vandbad		15.5	100		12-04-2000		AR-150-8
11800.5	11559.2	-2.1	11095.5	6.4			15.0	100		13-04-2000		AR-150-9
11871.1	11675.5	-1.7	11237.5	5.6			11.0	50		25-04-2000		A0-150-6
11847.9	11604.0	-2.1	11181.5	6.0	betonflager 26.5 g		12.0	100		26-04-2000		A0-150-7
11868.9	11613.5	-2.2	11206.5	5.9	flig 12 g knække af		14.0	100		27-04-2000		A0-150-8
12038.5	11871.0	-1.4	11397.5	5.6			ingen revner			23-05-2000		A1-150-6
12041.0	11844.5	-1.7	11328.5	6.3			2.5]	100		24-05-2000		A1-150-7
11968.0	11772.0	-1.7	11276.0	6.1			ingen revner			25-05-2000		A1-150-8
12054.0	11850.5	-1.7	11299.0	6.7			ingen revner			09-06-2000		A3-150-7
12043.0	11856.5	-1.6	11293.0	6.6			14.0]	100		13-06-2000		A3-150-8
12054.0	11930.0	-1.0	11347.0	6.2			ingen revner			14-06-2000		A3-150-9
12348.0	12054.5	-2.4	11552.0	6.9			6.0	50		03-07-2000		A5-150-6
12314.0	12110.0	-1.7	11582.0	6.3			15.0	100		04-07-2000		A5-150-7
12497.0	12309.5	-1.5	11745.5	6.4			ingen revner			05-07-2000		A5-150-8
12741.5	12523.0	-1.7	11999.5	6.2			27.0	33		11-07-2000		A6-150-6
12313.0	12237.5	-0.6	11951.5	5.8			10.0]	100		12-07-2000		A6-150-7
12768.5	12633.5	-1.1	12087.0	5.6			ingen revner			13-07-2000		A6-150-8
12898.2	12739.5	-1.2	12434.0	3.7			14.0]	100		27-03-2000	3.8	KER 5
12950.2	12771.6	-1.4	12472.5	3.8			ingen revner			30-03-2000	3.8	KER 25
12885.2	12694.5	-1.5	12401.0	3.9	Med te-hætte		ingen revner			28-03-2000	3.8	KER 39
12767.1	12643.2	-1.0	12204.5	4.6			ingen revner			03-04-2000	3.8	KER 41
12818.8	12697.6	-1.0	12263.5	4.5			ingen revner			04-04-2000	3.8	KER 44
12853.2	12745.9	-0.8	12305.0	4.5			ingen revner			05-04-2000	3.8	KER 50
4113.0	4049.5	-1.6	3952.0	4.1	25 mm fra ovn t. prøve		ingen revner			05-04-2000		Boreprøve 1
4086.5	4006.5	-2.0	3913.0	4.4	25 mm fra ovn t. prøve		Tophat 8]	100		08-04-2000		Boreprøve 2
3984.5	3880.5	-2.7	3809.0	4.6			ingen revner			09-04-2000		Boreprøve 3
												AR-150-10

## P-beton.

Grøn Beton. Sammenfatning af prøvningsforløb for Stor Pakke m.m. Passive beton

Betontype	Betonsammensætning	Tilspændingsmoment Nm	Starttemperatur		Sluttemperatur		Bemærkning	Afskalninger			
			ved beton °C	i ovn °C	ved beton °C	i ovn °C		på eksp. endeflade %	Vægt g	dybde max. mm	på ikke eksp. endeflade %
PR-150-5	{ LA sulfatbestandig. FA 25 % MS 5 %	200.0	806	1030	847	995	beton syder	50	26.5	5	0
PR-150-6		200.0	774	1000	861	1000	beton syder	65	141.5	8	
PR-150-7		100.0	765		846	1005	beton syder ikke	over 50	52.0	18	0
P2-150-4	{ Ny rapid. FA 50 %. Specialfiller 10 %	----	771	997	838	1015		80	47.0	11	0
P2-150-5		80.0	793	1006	846	1015		75	36.5	5	
P2-150-6		80.0	781	1009	845	1010		60	48.5	7	
P3-150-5	{ Ny rapid. Slamaske 17 %	(160) 80	811	1013	844	1010		10	28.5	8	
P3-150-6		(160) 80	802	1002	847	1009		15	30.0	19	ca. 5-10
P3-150-7		(160) 80	773	1010	837	1007		30	27.0	8	
P5-150-4	{ Ny rapid. Betonslam 12 %	(160) 80	847	1014	842	1010	ca. 1 time før	40	17.5	5	
P5-150-5		(160) 80	854	1014	829	1013	ca. 1 time før	30	32.5	12	
P5-150-6		(160) 80	849	1008	832	1013	ca. 1 time før	50	26.5	6	
P6-150-4	{ BYGG. Stenmel 43 % Lavt e-modul ifølge TI	80.0	841	1012	834	1020	Lavt e-modul	10	14.5	3	
P6-150-5		(160) 80	812	1001	825	1012	ifølge TI	20	14.5	5	
P6-150-6		160 (80)	849	1010	831	1021		30	19.0	4	
P7-150-4	{ BYGG. FA fra biobrændsel 40 %	160 (80)	835	1020	842	1023		0	0.0	0	
P7-150-5		160 (80)	823	1016	832	1015		0	0.0	0	
P7-150-6		160 (80)	831	1011	827	1018		50	36.5	7	5
IBE-150-1	{ Passiv. Basiscement FA 0 % og MS 0 %	(160) 80	784	1002	832	1016		ca. 5-10	9.0	4	
IBE-150-2		(160) 80	831	1011	834	1010	160 Nm 1 t før	5	9.0	2	
IBE-150-3		(160) 80	817	1011	836	1009	160 Nm 1 t før	25	20.0	6	
	{										

BYGG: Svensk cement  
FA: Flyveaske  
LA: Lavalkali  
MS: Mikrosilica

Vægt		Afvigelse efter-før %	Tørvægt g	Fugtindhold før brand %	Bemærkning	Densitet kg/m <sup>3</sup>	Revner på krum flade		Dato	Luftindhold %	Sætmål mm
før brand prøvning g	efter brand prøvning g						afstand fra top cm	del af omkreds %			
11826.5	11727.0	-0.8	11349.0	4.2	Tophat		28.0	50	16-05-2000		
11780.5	11573.0	-1.8	11191.5	5.3			27.0	100	17-05-2000		
11765.0	11647.0	-1.0	11263.5	4.5			27.5	50	18-05-2000		
12150.0	12070.0	-0.7	11597.5	4.8	Ikke tør. Tophat	2; 5; 11; 28	28.0	100	06-07-2000		
11992.5	11925.5	-0.6	11464.0	4.6	Ikke tør. Tophat		alle 100	07-07-2000			
11993.5	11902.5	-0.8	11456.5	4.7	Ikke tør		29.0	50	10-07-2000		
11519.0	11468.0	-0.4	11082.0	3.9			28.5	66	18-07-2000		
11568.5	11510.0	-0.5	11145.0	3.8		28.5	33	19-07-2000			
11760.5	11711.0	-0.4	11338.5	3.7		28.0	100	20-07-2000			
11488.5	11427.5	-0.5	10966.5	4.8	Tophat		28.0	100	27-07-2000		
11488.5	11405.5	-0.7	10951.0	4.9			28.0	25	28-07-2000		
11481.0	11410.5	-0.6	10946.5	4.9			ingen revner		31-07-2000		
12306.0	12249.5	-0.5	11697.0	5.2			ingen revner		16-08-2000		
12313.0	12237.5	-0.6	11707.5	5.2			ingen revner		17-08-2000		
12223.5	12150.5	-0.6	11613.0	5.3			ingen revner		18-08-2000		
12202.5	12153.0	-0.4	11664.0	4.6	Ikke tør	2397.7	9,0; 28,0	40; 50	22-08-2000		
12287.0	12230.5	-0.5	11766.0	4.4	Ikke tør		13,5	75	23-08-2000		
12233.0	12108.5	-1.0	11690.0	4.6	Ikke tør		28,5	33	24-08-2000		
12050.5	11999.0	-0.4	11589.0	4.0			8,0; 28,0	66; 50	24-07-2000	0.5	80
12188.5	12141.0	-0.4	11718.0	4.0		2397.7	17,0; 27,0	66; 66	25-07-2000	0.5	80
12070.5	12015.0	-0.5	11598.0	4.1	Tophat	2397.7	17,0; 28,5	66; 100	26-07-2000	0.5	80

## **APPENDIX D**

**Måling og beregning af fugt i cylindre og betonvægge i Udvidet Pakke**

**Eksempel fra Excel fil, Vejning-fugtindhold 07.**

**BETONTYPE: PR**

Cylinder	Udtørring	Nr.	Dato 29-11-2001		Dato 21-12-2001		Dato 11-01-2002		Dato 15-02-2002		Dato 29-04-02		Dato 13-05-02		Vægt- tab	Vægt- tabs- procent	Tilsyne- ladende tørvægt	Fugtindhold / tørvægt		
			Vægt	Vægt	Vægt	Vægt	Vægt	Vægt	Vægt	Vægt	ved start	ved slut	slutmiddel							
	Fra alle flader	26	12017.5	11805.5	11764.5	11734.5	11681.5	11638.0	379.5	3.16	11388.3	5.52	2.19							
	Fra alle flader	27	12382.5	12193.0	12156.0	12124.5	12079.5	12075.0	307.5	2.48	11734.2	5.52	2.90							
	Fra alle flader	28	12417.5	12234.0	12198.5	12169.0	12126.0	12121.5	296.0	2.38	11767.4	5.52	3.01							
Ovntørring	Fra alle flader	29	12224.5	12021.0	11595.5	11589.5	11584.5	11584.5	640.0	5.24	11584.5	5.52	0.00							
	Fra alle flader	30	12191.5	11981.5	11944.5	11914.0	11869.0	11865.0	326.5	2.68	11553.2	5.52	2.70							
	Fra alle flader	31	12368.5	12170.0	12134.5	12105.0	12061.5	12057.0	311.5	2.52	11721.0	5.52	2.87	2.87						
Til fugt i væg	Fra endeflader	32	12288.0	12249.0	12238.0	12226.0	12206.5	12192.6	95.4	0.78	11570.3	5.52	4.70							
Til fugt i væg	Fra endeflader	33	12459.5	12417.5	12406.0	12394.5	12375.5	12361.1	98.4	0.79	11746.5	5.52	4.69							
Til fugt i væg	Fra endeflader	34	12332.0	12291.0	12279.5	12267.5	12248.0	12233.6	98.4	0.80	11625.2	5.52	4.68	4.69						
	Vægt uden plast på krum flade	32	12209.5																	
	Vægt uden plast på krum flade	33	12395.5																	
	Vægt uden plast på krum flade	34	12267.5																	

Udtørring i varmeskab fra den 21-12-2001
Brandprøvet
Den 13/5 er nr. 32, 33 og 34 forsejlet med plastpose og clips  
Korrigeret fejlmåling
Plastpose + clips = 10.9 gram  
Vægt eksklusiv plastpose

