



# LUND UNIVERSITY

## Självkompakterande betong med låg fillerhalt : explosiv spjälkning vid hög temperatur

Persson, Bertil

2004

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Persson, B. (2004). *Självkompakterande betong med låg fillerhalt : explosiv spjälkning vid hög temperatur*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7179). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

*Total number of authors:*

1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

**Självkompakterande betong med  
låg fillerhalt – explosiv spjälkning  
vid hög temperatur  
(Self-compacting concrete with low  
content of filler – explosive  
spalling at high temperature)**

Bertil Persson

ISRN: LUTVDG/TVBM--04/7179--SE (1-54)

ISSN: 0348-7911 TVBM

ISBN: 91-631-6150-8

Lunds Tekniska Högskola  
Byggnadsmaterial  
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415  
Fax: 046-2224427  
[www.byggnadsmaterial.lth.se](http://www.byggnadsmaterial.lth.se)

## Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund

### SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

---

#### **Förord**

Självkompakterande betong, SKB, uppvisar andra egenskaper vid snabb upphettning till hög temperatur än vad normal betong gör främst beroende på kompakta fasgränser. Vid låg permeabilitet, som hos SKB, kan explosiv spjälkning vid hög temperatur uppstå i händelse av brand eftersom vattenånga inte kan lämna strukturen tillräckligt snabbt. Spjälkningen gör att armeringsstål i betongen friläggs och att konstruktionens goda bestånd kan äventyras. Betong som vibreras får sämre fasgränser än SKB eftersom vattenansamling gör fasgränserna mer porösa i vibrerad betong än i SKB. SKB kan tillverkas endera med filler eller viskositetshöjande medel i syfte att undvika separation av ballast. Efter av svalning från 800 °C uppvisar SKB med kalkstensfiller, till skillnad från normal betong, ingen hållfasthet alls. Betongen faller sönder av sig självt under inverkan av luftens fuktighet. En tidigare analys visade att problemen med explosiv spjälkning vid hög temperatur eventuellt kan undvikas om fillerhalten begränsas i betongen eller om polypropylenfibrer, ppf, tillförs. LTH Byggnadsmaterial har undersökt effekten av hög temperatur på deformationerna hos SKB med låg fillerhalt ( $\leq 5\%$  av cementhalten). Deformationer, som uppkommer i samband med spjälkning

vid snabb upphettning, temperaturutvidgning inklusive krympning och krypning, har studerats, tillsammans med grundläggande parametrar som fukt och hållfasthet. Trettiofyra cylindrar,  $\varnothing 100 \times 200$  mm, av SKB med vattencementtal, vct, varierande mellan vct = 0.33 och vct = 0.48, med eller utan tillsats av ppf, har provats. Proverna härdades 1 år i luft, endera vid relativ fuktighet, RF, = 30%, RF = 60% eller RF = 90%, tills dess att viktstabilitet uppnåddes. Åldern varierade mellan 1 och 1½ år vid provningen. Fuktkvot, hållfasthet och deformationer vid snabb uppvärmning till ca 800 °C under konstanta lastnivåer 0%, 15%, 30% eller 45% av hållfastheten undersöktes.

Försöket finansierades av Abetong AB, Box 24, 35103 Växjö samt utfördes 2003-2004 vid LTH Byggnadsmaterial, Lund. Ett stort tack framförs till finansören samt till Thord Lundgren, LTH, som utvecklat mätmetodikerna och bistått vid datainsamlingen, vilken i övrigt har genomförts av författaren.

Lund i november 2004

Bertil Persson

# Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund

## SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

---

### Innehållsförteckning

	SIDAN
Förord	i
Innehållsförteckning	ii
Sammanfattning	iii
Rekommendationer	iv
Summary	v
Recommendations	vi
1. BAKGRUND OCH SYFTE	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Påverkande parametrar	1
1.3 Betongegenskaper vid brand	3
1.4 Cementhalt och spjälkning	6
1.5 Härdningssätt och ålder	7
1.6 Fibermängd och spjälkning	8
1.7 Fukt, yttre påkänning och syfte	10
2. MATERIAL OCH METODER	12
2.1 Material	12
2.2 Metoder	12
3. RESULTAT	14
3.1 Fuktkvot och RF	14
3.2 Temperaturutveckling	14
3.3 Temperaturspjälkning	16
3.3 Temperaturutvidgning inklusive krympning och krympning utan last	17
3.4 Deformationer med last	18
4. ANALYS OCH DISKUSSION	22
4.1 Samband mellan fuktkvot, påkänning och explosiv spjälkning vid hög temperatur	22
4.2 Temperaturutvidgning inklusive krympning	23
4.3 Deformationer under last	24
4.4 Specifik krypning	25
4.4.1 Allmänt	25
4.4.2 Inverkan av lastnivå, RF, vct och hållfasthet på krypningsutveckling	25
4.4.3 Kryptal	27
4.4.4 Modelling	30
5. SLUTSATSER	32
REFERENSER	33
APPENDIX	34-54

### **Sammanfattning**

Självkompakterande betong med låg fillerhalt ( $\leq 5\%$  av cementhalten), utvecklad och använd i Abetongs produktion, provades i fråga om risken för explosiv spjälkning vid hög temperatur. Tidigare har det konstaterats att en minskad cementhalt till förmån för en hög fillerhalt markant ökar risken för explosiv spjälkning vid hög temperatur. För normal, vibrerad betong är ett sätt att undvika explosiv spjälkning vid hög temperatur, god uttorkning. Därför torkades de tre betonger, som tillverkades av Abetong, före provningarna vid tre olika luftfuktigheter, 1 år före provningen, vilket förväntades ge en tillräckligt låg fuktkvot för att nå fuktjämvikt mellan omgivningen och provet. En annan viktig parameter som ökar risken för explosiv spjälkning vid hög temperatur är hög, yttre påkänning. En väl beprövad utrustning, i bruk på LTH under nära nog 40 år, gav möjligheten till höga laster, konstanta under hela uppvärmningsperioden. Fyra olika lastnivåer tillämpades under försöket. Denna möjlighet utnyttjades även om upphettning utvecklingen var tämligen låg, ca  $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  ( $900\text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$ ), endast hälften så stor som anges av en normalbrandkurva. För att i görligaste mån undvika för provningen menliga deformationer från det till betongen omgivande stålstödet, kylde stålet med ingjutna vattenkanaler till ca  $12\text{ }^\circ\text{C}$ , konstant under hela provningsperioden. Deformationer mättes externt där också temperaturen hölls konstant under provningen. En tredje, för att undgå explosiv spjälkning vid hög temperatur, väsentlig och positiv parameter är inblandning fibrer, numera av polypropylen men även kokosfibrer har med framgång använts tidigare. Till samtliga betongtyper tillsattes, dels en mindre mängd fibrer som ej ansågs påverka de färskas egenskaperna i negativ riktning, dels i en av betongerna en fördubblad minimimängd fibrer varvid gjutbarheten försämrades avsevärt. Mängden fibrer begränsas helt klart av gjutbarheten, dvs. vid höga krav på fibrer kan självkompakterande betong ej tillverkas utan en vibrerad kvalitet får istället nyttjas. Den mest väsentliga delen av försöket var att konstatera om de föreslagna betongerna motstod explosiv spjälkning vid hög temperatur eller ej, med eller utan fibrer. Kravet

på att undgå explosiv spjälkning vid hög temperatur är avgörande för den självkompakterande betongens framtid eftersom det ej är möjligt att handha två olika vibreringssätt inom en och samma industri. För vissa typer av konstruktioner är kravet på eliminering av risken för explosiv spjälkning vid hög temperatur gränssättande för användningen som i tunnlar, arenor, allmänna platser, tunnelbanehallar, etc. där folksamlingar uppstår men ett absolut krav föreligger på god och snabb utrymning utan störande explosioner från explosivt spjälkande betong. Då betong spjälkar explosivt vid brand uppstår, dels kraftiga ljud, dels projektiler som kan fara iväg och skada personer och egendom långt från själva brandplatsen. Den självkompakterande betongens i övrigt mycket goda egenskaper kan i själva verket bli dess akilleshäl, nämligen en utomordentligt kompakt fasgräns mellan cementpastan och ballasten (sten, grus och sand). Vibrering, som används i normal betong, innebär att vatten ansamlas i denna fasgräns med högre porositet som följd, vilket helt undviks med självkompaktering. På så sätt blir porositeten hos självkompakterande betong lägre än hos normal betong även vid högre temperaturer, till fördel för god beständighet, hög hållfasthet, etc., men till nackdel för explosiv spjälkning vid hög temperaturen eftersom fukt har svårare att lämna en tät betong än en porös. Klara, men dock kostsamma, alternativ finns att lösa den explosiva spjälkningsproblematiken, även för självkompakterande betong, nämligen en måttlig inblandning av fibrer. Inblandning av fibrer ställer andra krav på proportionering av betongen där industrin också har en viktig roll att spela, för att ha ett gångbart alternativ tillhands om fibrer skulle visa sig vara absolut av nöden för att klara av kraven på explosiv spjälkning vid hög temperatur – ett problem som betongbranschen kan och är villig lösa. Detta visas inte minst i föreliggande projekt. Följande slutsatser drogs:

- Inblandning av ppf var ett synnerligen effektivt sätt att undvika explosiv spjälkning hos SKB vid hög temperatur. Beständigheten hos plastfiberbetong bör dock undersökas före det att en generell användning kan rekommenderas.

## Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund

### SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

- Vid härdning vid RF = 30% före provningen ( $RF_{inre} = 60\%$ ), motsvarande fuktkvoten,  $u = 2.7\%$ , exploderade samtliga SKB utan ppf vid upphettning.
- Vid härdning vid RF = 60% före provningen motsvarande  $u$  varierande mellan 3.1% och 3.8%,  $u_{medel} = 3.4\%$ , exploderade så gott som samtliga SKB vid snabb upphettning. För SKB med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  18  $\mu\text{m}$  ppf undveks spjälkning under i övrigt konstanta förhållanden.  $u$  varierande då mellan 3.0% och 3.6%,  $u_{medel} = 3.3\%$ . Samma betong, samma upphettningsutveckling, etc., som vid provning utan ppf användes för SKB med ppf.
- Vid härdning vid RF = 90% före provningen med  $u = 4.1\%$ , exploderade samtliga SKB som inte innehöll ppf, medan spjälkning undveks i SKB med inblandning av  $0.7 \text{ kg/m}^3$  18  $\mu\text{m}$  ppf.
- Tidigare för normal betong känd kombination av fukt/påkänning avseende risk för explosiv spjälkning vid hög temperatur gäller ej alls för SKB.
- Temperaturutvidningskoefficienten inklusive krympningen,  $\mu$ , för SKB mellan 20 °C och 600 °C, varierande mellan  $\mu = 0.015\%/^{\circ}\text{C}$ , vid RF = 30% i betongen före provning, och  $\mu = 0.02\%/^{\circ}\text{C}$ , vid RF = 90% före provning.
- För SKB med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  ppf erhöles  $\mu = 0.02$  vid RF = 90% före provning medan SKB med  $1.4 \text{ kg/m}^3$  ppf erhöles  $\mu = 0.015$  (RF = 90%).
- Kryptalsutvecklingen minskade då  $0.7 \text{ kg/m}^3$  ppf tillfördes SKB jämfört med motsvarande parameter i SKB utan ppf vid i övrigt konstanta förhållanden.
- Effekten av lastnivå på kryptalsutvecklingen var tydlig, ca 50% ökning från lastnivå 15% till nivån 45%.
- Effekten av RF före provning på kryptalsutvecklingen var också tydlig, ca 100% ökning från RF = 30% till RF = 90%.
- Effekten av ppf på kryptalsutvecklingen vid olika RF före provning var ca 50%

lägre kryptalsutveckling i SKB med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  än i SKB utan ppf.

#### Rekommendationer

Med ledning av de senast utförda försöken med SKB med liten inblandning av filler, vid varierande fukt och påkänningsnivå (spänning/hållfasthet), samt tidigare försök, ges följande rekommendationer på fiberinblandning i SKB med vattencementtal, vct,  $< 0.50$  och fuktkvot,  $u$ ,  $> 2.5\%$ , oavhängig påkänningsnivån, då krav ställs att undvika explosiv spjälkning vid hög temperatur:

- $0.7 \text{ kg/m}^3$  18  $\mu\text{m}$  ppf för all SKB med låg fillerhalt ( $\leq 5\%$  av cementhalten).
- $> 0.7 \text{ kg/m}^3$  18  $\mu\text{m}$  ppf för SKB med filler, Tabell 1, Figur 1 och ekvation (1):

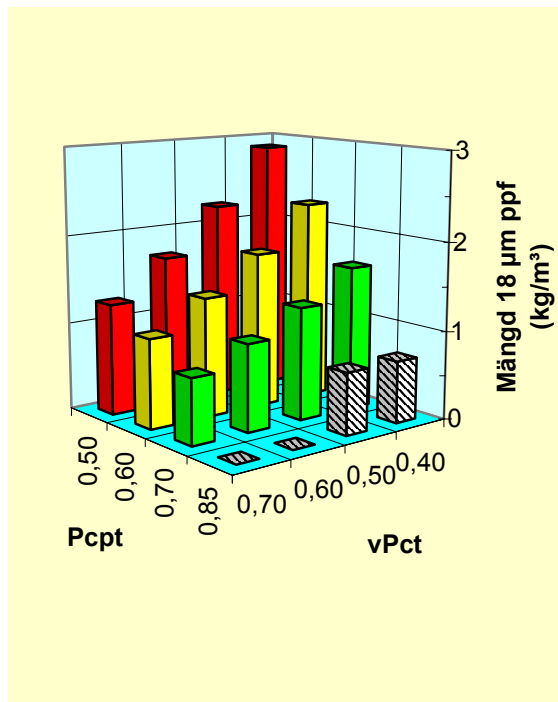
$$ppf = 0.5 \cdot [(13 \cdot (Pcpt) - 12.3) \cdot \ln(vPct) - 2.69 \cdot (Pcpt)^2 + 2.65 \cdot (Pcpt) - 0.2] \quad (1)$$

vPct betecknar vatten/Portlandcementpulvertalet (mängd vatten/(mängd Portlandcement + mängd filler)).

Pcpt betecknar Portlandcementpulvertalet (mängd Portlandcement/(mängd Portlandcement + mängd filler)).

Tabell 1 - Mängd 18  $\mu\text{m}$  ppf i SKB med filler.

Pcpt/ vPct	0.50	0.60	0.70	0.85
0.40	2.9	2.3	1.6	0.7
0.50	2.2	1.8	1.3	0.7
0.60	1.7	1.4	1.0	0
0.70	1.3	1.0	0.7	0



Figur 1 – Mängd 18 µm ppf i SKB med filler.

### Summary

Self-Compacting Concrete with low filler content that was developed and used in the production at Abetong, was tested for risk of explosive spalling at high temperature. Previously it has been seen that a decrease in the cement content and a corresponding increase of filler clearly increases the risk of explosive spalling at high temperature. For normal, vibrated concrete one way to avoid explosive spalling at high temperature is to dry the concrete well enough. Therefore the three types of concrete produced by Abetong were dried out before the testing for one year at three different air moisture contents, which was expected to give sufficiently low moisture content to reached equilibrium between the surrounding ambient humidity and the specimen. Another important parameter that increases the risk of explosive spalling at high temperature is high external loading. Equipment which has been frequently used utilised at LTH for nearly 40 years, enabled large loading, constant throughout the testing period. Four different loading levels were used during the tests. This possibility was used during the testing even through the heating rate was fairly low, about 15

°C/min (900 °C/h), only half of what was in prescribed for standard fire heating. In order to avoid, as far as possible, detrimental deformations from the steel support surrounding the concrete, the steel support was cooled during whole the testing period by cast-in water channels to about 12 °C. The deformations were measured externally when also the temperature was held constant during the whole testing period. A third essential and positive parameter for explosive spalling at high temperature is additives of fibre, nowadays made of polypropylene but fibres from coconuts have been successfully used previously. To all the concrete it was added (1) a small amount of fibres which was not suppose to affect the fresh properties at all in a negative way, and (2) twice the minimum amount which clearly caused worse workability. The amount of fibres evidently limits the workability, i.e. with a large required amount of fibres Self-Compacting Concrete may not be produced and a vibrated quality has to be used instead. The utmost essential part of the test was to establish whether or not the suggested concrete resisted explosive spalling at high temperature, with or without fibres. The requirement to avoid explosive spalling at high temperature is fundamental for the future of Self-Compacting Concrete since it is not feasible to manage two different ways of compaction in the framework of the same industry. For some types of structures the requirement to avoid any risk of explosive spalling at high temperature limits its serviceability for uses such as tunnels, arenas, showground, public areas, and underground halls. In these places where many people are assembled, safe and rapid evacuation without disturbing explosions from exploding concrete is an absolute requirement. When concrete exploded a loud noise is created and also projectiles that may fly far and hurt persons and properties far from the site of the fire. Beneficial properties of Self-Compacting Concrete, besides explosive fire spalling, may very well be its Achilles heel, i.e. an extraordinarily compact interfacial zone between the cement paste and the aggregate (stone, gravel and sand). Vibration, which is used in normal concrete, causes the water to assemble in this interfacial zone with higher porosity as a result which is avoided by



using self-compaction. In this way the porosity of Self-Compacting Concrete is lower than for normal concrete even at high temperature. Denser concrete is an advantage for good durability and high strength and so forth, but a disadvantage because of explosive spalling at high temperature, since moisture has greater difficulties leaving a denser concrete than a more porous one. Clearly defined but costly alternatives exist for solving the problem of explosive spalling of Self-Compacting Concrete at high temperature, i.e. small additives of fibres. Additives of fibres lead to other requirements of the mix proportions of concrete and the industry too play an important role to obtain a practicable alternative if fibres prove to be absolutely necessary to solve the problems of explosive spalling at high temperature. The industry is willing to solve this problem – this has been shown not at least in this project. The following conclusions were drawn:

- Addition of polypropylene fibres, ppf, was one extremely efficient way to avoid explosive spalling of Self-Compacting Concrete, SCC. However, the durability of SCC ought to be investigated before more general use may be recommended.
- After curing at relative humidity, RH = 30% (RH<sub>internal</sub> = 60%), corresponding to the moisture content, u = 2.7%, all SCC without ppf exploded at rapid heating.
- After curing at RF = 60%, with u varying between 3.1% and 3.8%, u<sub>average</sub> = 3.4%, almost all SCC without ppf exploded at rapid heating. For SCC with 0.7 kg/m<sup>3</sup> 18 µm ppf fire spalling was avoided other parameters being constant, u varying between 3.0% and 3.6%, u<sub>average</sub> = 3.3%, the same types of concrete, the same rate of heating, etc. as at testing of SCC without ppf.
- After heating at RF = 90%, u = 4.1%, all SCC without ppf exploded while all SCC with 0.7 kg/m<sup>3</sup> 18 µm ppf remained intact even after rapid heating.
- The coefficient of thermal expansion including shrinkage, µ, for SCC between

20 °C and 500 °C varied between µ = 0.015%/°C at RH = 30% in SCC before testing to µ = 0.02%/°C at RF = 90% before testing.

- For SCC with 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf µ = 0.02 was observed at RH = 90% before testing, with 1.4 kg/m<sup>3</sup> ppf, µ = 0.015 (RH = 90%) was observed.
- The creep ratio rate decreased with 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf additives as compared to the creep rate in SCC without ppf.
- The effect of the loading level on the creep ratio rate was clear, about 50% increase from a loading level of 15% to a loading level of 45%.
- The effect of RF on the creep ratio rate was also clear, about 100% increase from RH = 30% to RH = 90%.
- The effect of ppf on the creep ratio rate at different RH was significant, i.e. about 50% lower creep ratio rate with 0.7 kg/m<sup>3</sup> than without ppf.

### **Recommendations**

Supported by the latest research performed with SCC with low content of filler, at varying moisture content and different loading levels (stress/strength), together with previous research, the following recommendations are given for SCC with water to cement ratio, w/c, < 0.50 and moisture content, u, > 2.5%, irrespective of the loading level, resistance to fire spalling being required:

- 0.7 kg/m<sup>3</sup> 18 µm ppf for all SCC with low filler content (< 5% of the cement content)
- > 0.7 kg/m<sup>3</sup> 18 µm ppf for SCC with filler, Table 1, Figure 1 and equation (1):

$$\text{ppf} = 0.5 \cdot [(13 \cdot (\text{Pcpt}) - 12.3) \cdot \ln(\text{vPct}) - 2.69 \cdot (\text{Pcpt})^2 + 2.65 \cdot (\text{Pcpt}) - 0.2] \quad (1)$$

w/Pc denotes water Portland cement powder ratio (amount of water/(amount of Portland cement + amount of filler)).

## Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund

### SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

Pc/p denotes Portland cement powder ratio (amount of Portland cement/(amount of Portland cement + amount of filler)).

Table 1 – Amount of 18  $\mu\text{m}$  ppf in SKB with filler.

<b>Pc/p- w/Pc</b>	<b>0.50</b>	<b>0.60</b>	<b>0.70</b>	<b>0.85</b>
0.40	2.9	2.3	1.6	0.7
0.50	2.2	1.8	1.3	0.7
0.60	1.7	1.4	1.0	0
0.70	1.3	1.0	0.7	0

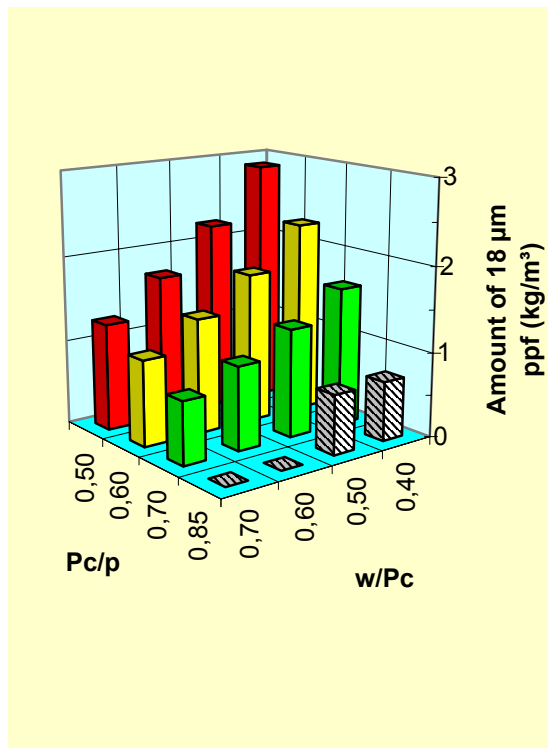


Figure 1 – Amount of 18  $\mu\text{m}$  ppf in SCC with filler.

**Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund**

**SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV  
SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR**

---

## **1. Bakgrund och syfte**

### **1.1 Bakgrund**

Till skillnad från normal betong kompakteras SKB ej med vibrering. Kompaktering med vibrering innebär, förutom att armering kringsluts på ett säkert sätt samt att inestängd luft stiger i betongen och lämnar denna, att grövre partiklar i den färskbetongen (ballast, grus och sand) sätts i rörelse i förhållande till finare, cement, filler och vatten. Vatten ansamlas därvid i fasgränser i normal betong mellan grövre partiklar och cementpasta vilket inte är fallet för SKB. En ansamling av vatten i fasgränser innebär en ökad porositet i fasgränser hos normal betong jämfört med SKB. En ökad porositet i fasgränser innebär också ökad diffusivitet hos normal betong som helhet jämfört med SKB. Detta kan vara en av förklaringarna till varför SKB är mycket mer känslig för explosiv spjälkning vid hög temperatur än normal betong, att vatten/vattenånga i samband med brand ej diffunderar lika snabbt ur SKB som ur normal betong. I övrigt är låg porositet och diffusivitet en fördelaktig egenskap för betong i fråga om hållfasthet och beständighet. SKB kännetecknas i många fall också av ett stort innehåll av finmaterial, cement och filler, i syfte att undvika segregation i gjutskedet. Detta gör att betongen blir ännu tätare i inledningen av en brand för att den vattenånga som finns i betongen skall kunna transporteras ut. Vattenångan drivs vid brand inåt i betongen där den övergår i flytande form då temperaturen och trycket ökar [1]. Vatten har dessutom en större värmeutvidgningskoefficient än betongen varför porerna fylls ut snabbt då temperaturen ökar (relativa fuktigheten, RF, ökar i betong då temperaturen stiger). Efter några minuters brand ökar även trycket i de vattenfyllda porerna i betongen. Vid en högre temperatur, beroende av trycket, kan vatten inte längre existera utan övergår explosivt i vattenånga, vilket spjälkar betongen. Omedelbart efter explosionsögonblicket kan vatten forsa nedför en brandspjälkad pelare vid provning i vertikalt läge. Detta visar att flytande vatten verkligen bildas i betongen även om dess RF inledningsvis är låg.

### **1.2 Påverkande parametrar**

I huvudsak följande parametrar påverkar risken för explosiv spjälkning vid hög temperatur [2-4]:

- Fuktkvot
- Kapillaritet och permeabilitet
- Polypropylenfibrer, ppf
- Porositet
- Påkänning
- Relativ fuktighet, RF
- Vibrering

RF påverkar explosiv spjälkning vid hög temperaturen på följande sätt, Figur 1.1 [1]:

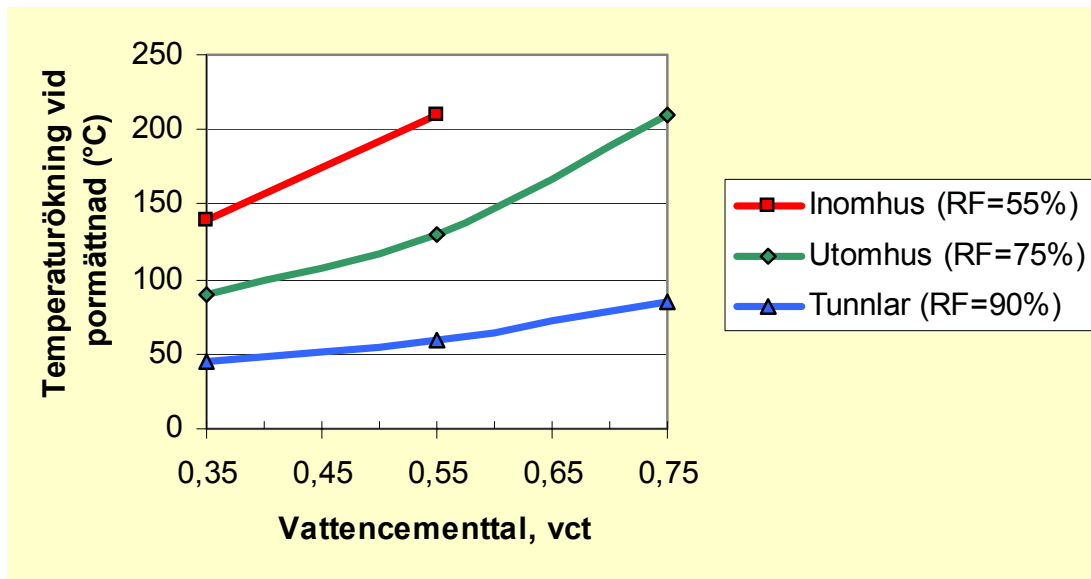
- RF i luft minskar vid ökande temperatur
- RF i betong ökar då temperaturen ökas
- En måttlig temperaturökning i betong gör att vattenånga övergår i vatten
- När högre temperatur sedan nås i vattnet övergår detta explosivt i ånga.

Porositeten påverkar explosiv spjälkning vid hög temperaturen på följande sätt, Figur 1.2 [1]:

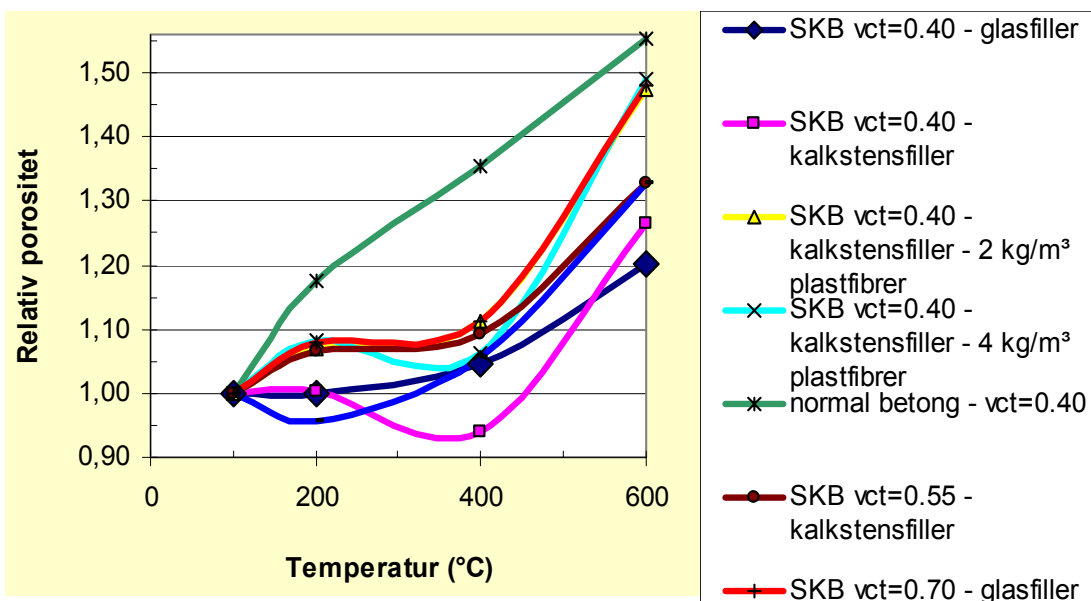
- Vid ökad temperatur ökar porositeten mindre hos SKB än hos normal betong
- Vid en liten temperaturökning, ökar ej porositeten hos SKB
- Vid en liten temperaturökning, ökar porositet hos SKB med fibrer
- Temperaturökning ger större porositetsökning vid  $v_{ct} = 0.55$  än vid  $v_{ct} = 0.40$ .

Kapillariteten påverkar explosiv spjälkning vid hög temperaturen på följande sätt, Figur 1.3 [1]:

- Motståndstalet för vatteninträning minskar mer för normal än för SKB.
- För SKB med  $4 \text{ kg/m}^3$   $32 \text{ }\mu\text{m}$  ppf ökar motståndstalet vid  $225 \text{ }^\circ\text{C}$  jämfört med  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Vid  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  blir motståndstalet för vatteninträning mindre för SKB med  $4 \text{ kg/m}^3$   $32 \text{ }\mu\text{m}$  ppf än för normal betong (ppf förångas).



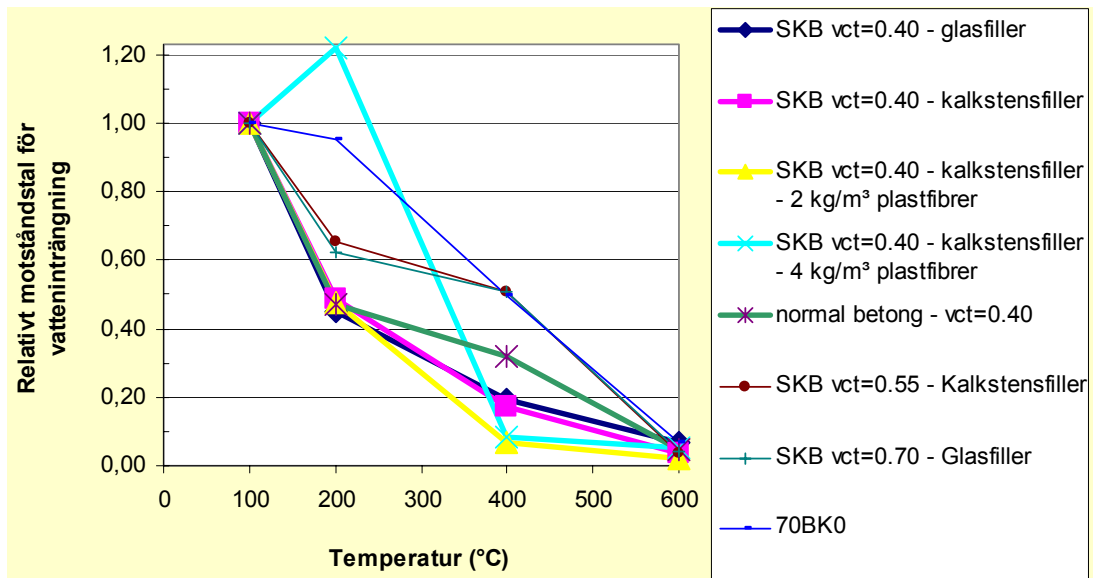
Figur 1.1 - Samverkan mellan RF i betong och temperatur.



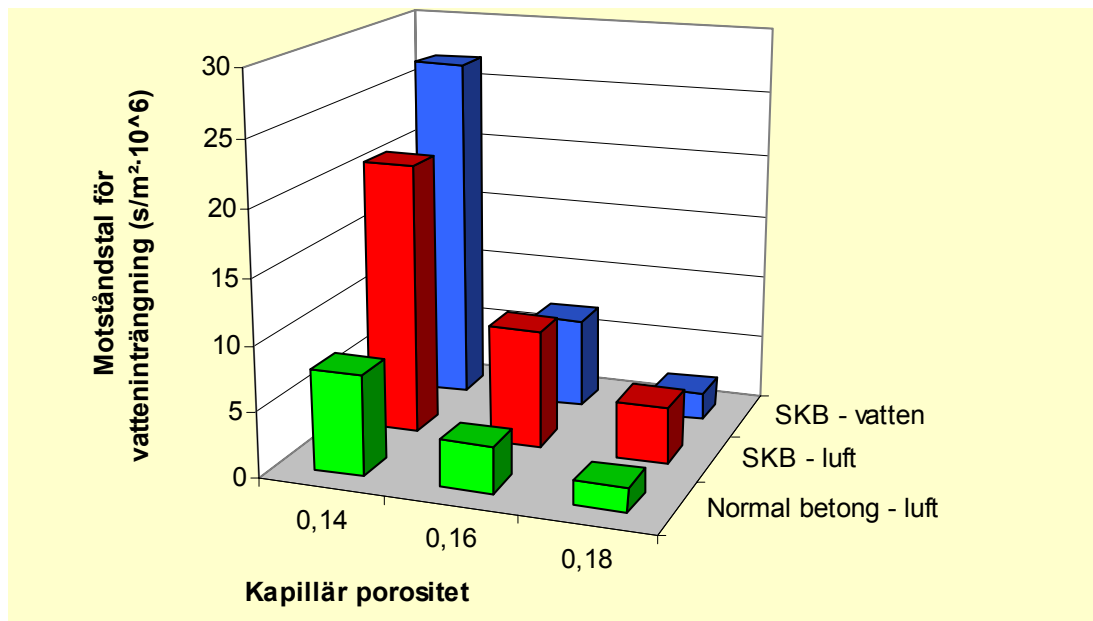
Figur 1.2 - Porositetsutveckling och temperatur.

Figur 1.4 visar sambandet mellan kapillär porositet och motståndstal mot vatteninträning, dels för normal betong, dels för SKB [1]. För SKB erhålls vid konstant porositet ett större

motståndstal mot vatteninträning än för normal betong. Fritt vatten får större motstånd att röra sig i SKB än i normal betong [1].



Figur 1.3 - Kapillaritetsutveckling och temperatur

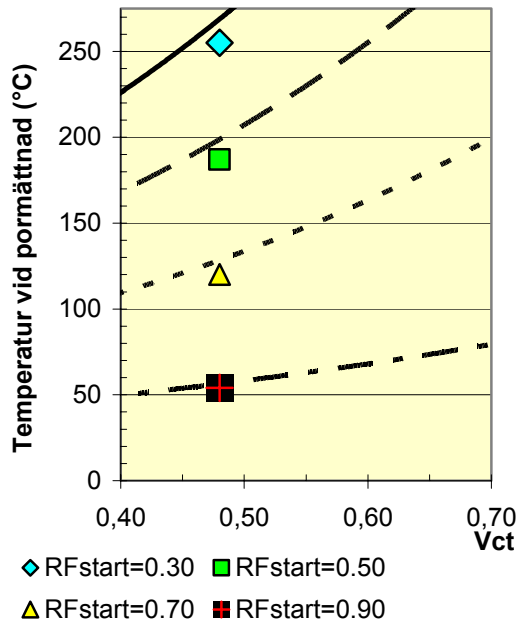


Figur 1.4 - Kapillaritet och porositet.

### 1.3 Betongegenskaper vid brand

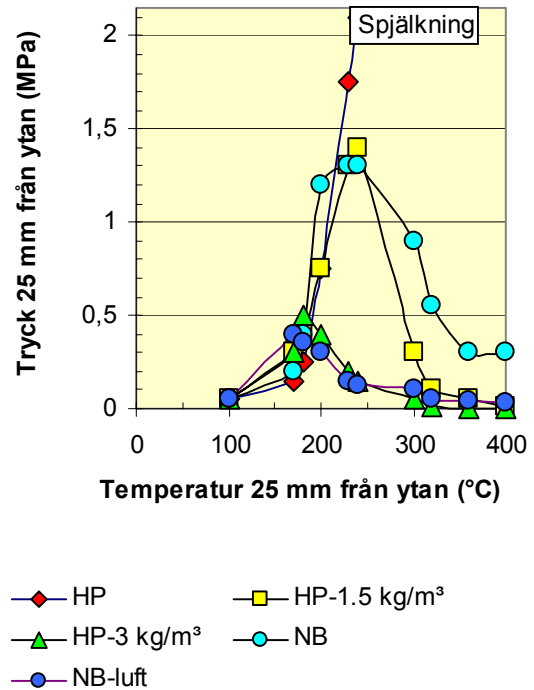
Figur 1.5 visar temperatur i betongen då por-mättnad nås vid varierande vattencementtal, vct, och RF i betongen vid brandens start [1]. I allmänhet varierar dock RF mellan 70% och 90% RF i utomhusbetong före brandens start eftersom RF i betongen normalt är ca 5% högre än den omgivande luftens medelfuktighet. Det förefaller

också som att explosionen i betongen uppstår vid lägre temperatur än den kritiska, 374 °C. En vanlig betongtemperatur, som registreras just vid själva explosionen ca 20 mm från ytan, är ca 225 °C med ca 600 °C på betongens yta, t.ex. vid försök vid LTH Byggnadsmaterial, Lund.



Figur 1.5 - Temperatur då vatten i betong når pormättnad (varierande vct och RF).

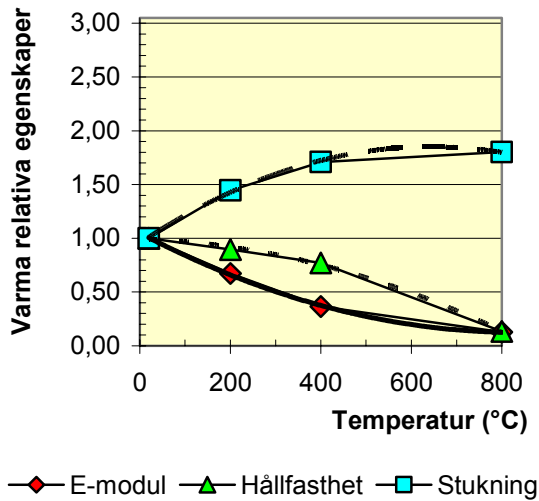
Förloppet vid explosiv spjälkning av betong vid hög temperatur är emellertid dynamisk och stokastiskt varför exakt temperatur och portryck är svåra att följa. Klart är dock att den kritiska temperaturen, 374 °C, överskrids i ugnen före explosion i de försöksresultat som finns att tillgå, Figur 1.6 [5]. Vidare är det enligt Figur 1.6 gynnsamt att använda luftporbildare i betongen i syfte att minska risken för explosiv spjälkning vid hög temperatur. Vid tidigare redovisade försök användes luftporbildare i betong med vattenlagring (upp till 5% lufthalt) [1]. I luftlagrad betong varierade den naturliga lufthalten mellan 1% och 5% [1]. Normal betong består till allra största delen av ballast, grus och sten. En mindre del, ca 20% av betongen, utgörs av cementlim, ungefär lika viktdelar vatten och cement. Mängdförhållandet mellan vatten och cement anges av betongens vattencementtal, vct. Lika viktdelar vatten och cement i betongen innebär således vct = 0.50. Då betongen värms upp expanderar ballasten medan cementlimmet krymper.



Figur 1.6 - Temperatur och tryck vid spjälkning. HP = högpresterande betong, NB = normal betong, 1.5 kg/m³ = 1.5 kg/m³ pff.

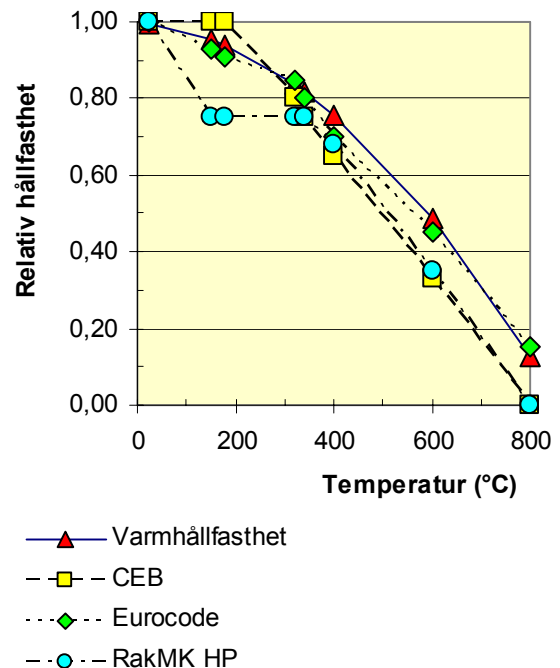
Vatten lämnar då betongens cementlim parallellt med att temperaturen höjs varför stora rörelser uppstår i förhållande till ballasten. Dessa rörelser ger upphov till spänningar i gränsskiktet mellan ballast och cementlim. Då SKB fortfarande är varm påverkas inte hållfasthet i någon nämnvärd grad upp till ca 400 °C enligt försök på området SKB, Figur 1.7 [1]. Cementlim har ganska plastiska egenskaper under uppvärmningsfasen och kan därför fungera bra tillsammans med ballasten åtminstone upp till 575 °C då en kvartsomvandling inträffar. Elasticitetsmodulen (betongens deformationer) påverkas emellertid kraftigare vid uppvärmning än vad hållfastheten gör. En halvering av elasticitetsmodulen kan utan vidare ske vid en uppvärmning upp till 400 °C och provning vid denna temperatur, såväl för normal betong som för SKB, Figur 1.7.

SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

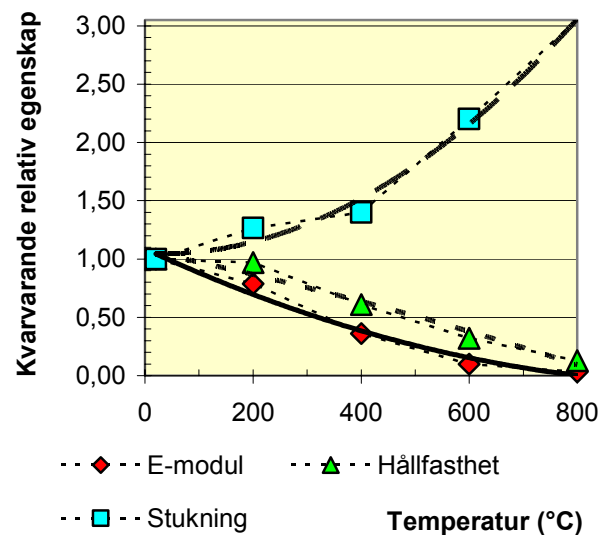


Figur 1.7 - Varma relativa egenskaper hos normal betong och SKB.

Positivt för SKB i förhållande till högpresterande, HP, betong, är att hållfastheten bibehålls mellan 100 °C och 225 °C, ökar till och med något, Figur 1.8 [1]. Recept för de provade betongerna ges i [6-15]. I HP betong minskar hållfastheten ca 20% mellan 100 °C och 225 °C. Efter det att betongen har utsatts för höga temperaturer sker ånyo stora deformationer hos ballast och cementlim. Både ballasten och cementlim krymper men limmet något mindre än ballasten eftersom limmet samtidigt tar upp fukt ur luften. Speciellt SKB med kalkstensfiller påverkas kraftigt efter 800 °C då den kyls till 20 °C och får vila någon vecka i rumsfuktig luft. SKB med kalkstensfiller, som kan ta tryck vid 800 °C, pulveriseras totalt och faller sönder av sig själv, Figur 1.9 [1]. Beräkningsmässigt betyder de speciella egenskaperna hos SKB föga eller ingenting eftersom man ändå inte beräknar någon hållfasthet hos betong som utsatts för mer än 500 °C [16]. Egenskaperna innebär emellertid rent praktiskt att en byggnad av SKB som stått kvar under en brand kan falla samman av sig självt efter avsvälning.



Figur 1.8 - Jämförelse mellan egenskaper hos SKB och högpresterande, HP, betong.



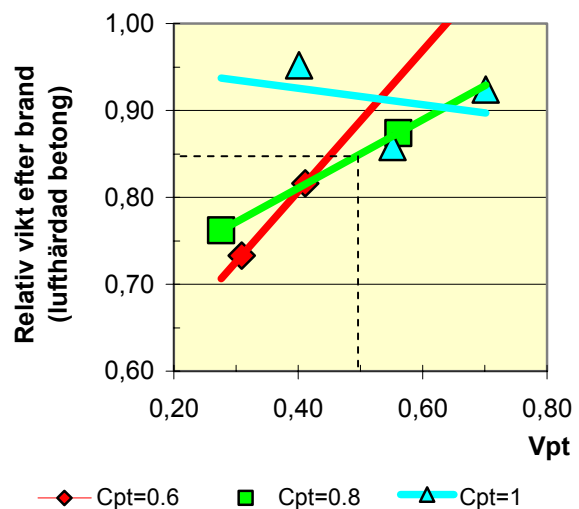
Figur 1.9 - Egenskaper hos upphettad normal betong och SKB efter avsvälning (ingen hållfasthet hos SKB med kalkstensfiller).



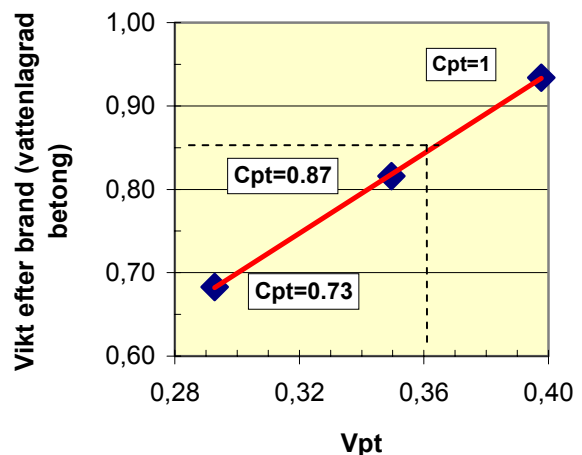
### 1.4 Cementhalt och spjälkning

För vissa SKB ingår ofta, tillsammans med cementet, en relativt stor mängd filler i pulverhalten jämfört med vad som är fallet för normal betong. Filler medverkar till att ge SKB förhållandevis hög tryckhållfasthet. Filler i betong bidrar dock ej nämnvärt till draghållfastheten, vilket kan vara avgörande vid explosiv spjälkning vid hög temperatur. Späs pulverhalten ut med alltför mycket filler blir betongen inte så motståndskraftig mot brand som med bara cement. Motsvarande gäller för kloridinträngning i betong då cementet späs ut med för mycket kalkstensfiller [17]. Utspänningseffekten kan uttryckas i det så kallade cementpulvertalet,  $cpt = 1$  för betong med uteslutande Anläggningscement och  $cpt = 0.86$  för betong med endast Byggcement. I Byggcement ingår ca 14% kalkstensfiller redan från leverans. För tidigare provade SKB varierade  $cpt$  ned till 0.5 [1]. Vid  $cpt = 0.5$  utgörs hälften av pulverhalten av filler, vilket är mycket, t.ex.  $275 \text{ kg/m}^3$  cement och  $275 \text{ kg/m}^3$  kalkstensfiller, så kallad fillerbetong. Det går mycket väl att framställa SKB utan att filler ingår i receptet men då blir betongen mer instabil samt mindre ekonomisk än SKB med filler [18]. Ytseparation av vatten är också vanlig hos en SKB med låg fillerhalt vilket kan leda till estetiska fel hos betongen (bruna fläckar). Fullskaleproduktion sker dock av SKB vid flera fabriker utan att filler används varför klara alternativ finns till fillermotoden [18]. Figur 1.10 visar klart hur  $cpt$  inverkar av på explosiv spjälkning vid hög temperatur hos SKB med Byggcement (lufthårdning). Tendenser till explosiv spjälkning vid hög temperatur översteg ej 15% vid ett vattenpulvertal,  $vpt > 0.50$ . Normal betong med  $cpt = 1$  brandspjälkade upp till 15% av sin ursprungliga vikt vilket får anses som acceptabelt. Det kan inte vara rimligt att ställa mer konservativa krav på SKB än på normal betong. Detta skulle vara bakåtsträvande, att ställa större krav på ny teknik, SKB, än på normal betong. Vid  $vpt < 0.50$  uppstod däremot oacceptabelt stor explosiv spjälkning vid hög temperatur då mindre än 80% av pulverhalten utgjordes av Byggcement,  $cpt < 0.80$ , Figur 1.10. Figur 1.11 visar en sammantagen inverkan av cementpulvertalet på vikt efter brandprovning av betong med Anläggningscement (vattenlagring).

För Anläggningscement kan ett något lägre  $vpt = 0.36$  tillämpas vid en accepterad explosiv spjälkning vid hög temperatur av 15%, Figur 1.11 ( $cpt = 0.90$ ). Det finns självfallet också ett samband mellan parametrarna  $cpt$  och  $vpt$ . Bägge parametrarna ökar samtidigt vid ett konstant vattencementtal,  $vct$ . Frågan var bara hur explosiv spjälkning vid hög temperatur bäst skulle åskådliggöras, med  $vct$  eller  $vpt$ .  $vct$  är en välkänd parameter som i görligaste mån bör nyttjas (påverkar såväl hållfasthet som beständighet).



Figur 1.10 - Effekt av cementpulvertal,  $cpt$ , på vikt efter provning (lufthårdning, Byggcement).



Figur 1.11 – Effekt av cementpulvertal,  $cpt$ , på provad vikt (vattenlagring, Anläggningscement).

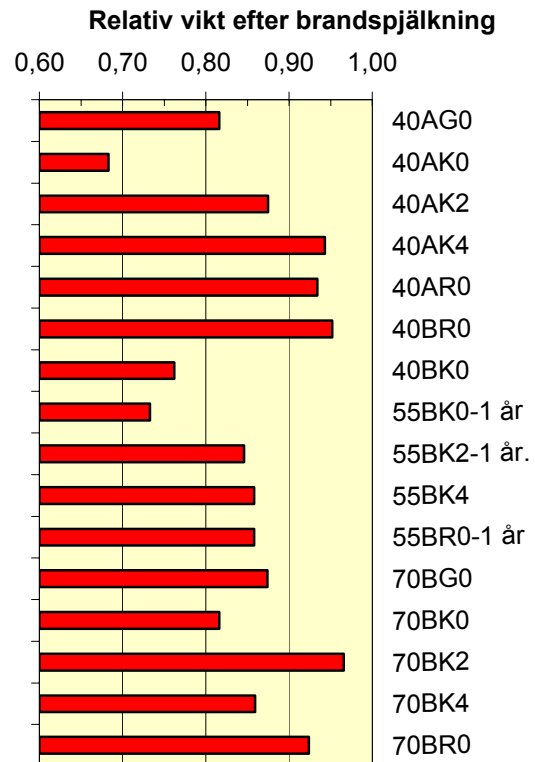
### 1.5 Härdningssätt och ålder

Effekt av lagringssätt på mängden betong explosivt spjälkad vid hög temperatur kan bedömas med ledning av resultaten för två betonger enligt Figur 1.12, betong 40AR0 och betong 40BR0, Tabell 1.1 [14]. Betong 40AR0 (vattenlagrad med Anläggningscement; vct = vpt = 0.40; cpt = 1), som erhöll 93% vikt efter explosiv spjälkning vid hög temperatur och betong 40BR0 (luftlagrad med Byggcement; vct = vpt = 0.40; cpt = 1), som erhöll 95% vikt [9]. Det är förvånansvärt hur lika explosiv spjälkning vid hög temperaturen var för de bägge betongerna trots skillnaden i lagringssätt. Detta kan dock bero på att cpt egentligen var lägre för betong med Byggcement, vpt = 0.86, än för betong med Anläggningscement, vpt = 1. Om definitionen för vpt ändras påverkas dock även vct som i sånt fall ökar till vct = 0.47 för betongen 40 BR0 (beräkning på mängden Portlandcement). Lagringssättet synes ha liten inverkan på mängden betong explosivt spjälkad vid hög temperatur. Uppmätt RF = 75% för luftlagrad betong respektive RF = 90% för vattenlagrad betong var tillräckligt hög för att ge en explosiv spjälkning vid hög temperatur av samma storleksordning för de bägge betongerna. Tillräcklig mängd vatten fanns i betongen för att nå porfyllnad vid brandförloppet. Ålderns inverkan på mängden betong spjälkad vid hög temperatur kan också bedömas med ledning av Figur 1.12, Tabell 1.2 [1].

Tabell 1.1 – Vikt hos betonger 40AR0, 40BR0.

Betong	40AR0	40BR0
Cementpulvertal, cpt	1	1
Portlandcementpulvertal, Pcpt	1	0.85
Vattencementtal, vct	0.40	0.40
VattenPortlandcementtal, vPct	0.40	0.47
Vattenpulvertal	0.40	0.40
Lagringssätt (6 mån.)	Vatten	Luft
RF	73%	93%
Vikt efter brand	93%	95%

A = Anläggningscement; B = Byggcement; R = normal betong; 40 = vct; 0 = 0% fibrer.



Figur 1.12 - Vikt efter explosiv spjälkning vid hög temperatur [12]. Medelvärde av 2-3 förspända pelare 200x200 mm av var betong, längd 2 m. A = Anläggningscement; B = Byggcement; R = referens; 40 = vct; 0 = 0% fibrer.

Tabell 1.2 – Vikt versus ålder efter brand [12].

Betong	Cpt	Vct	Vpt	RF	Vikt efter brand
40AR0	1.00	0.40	0.40	0.93	0.93
40BR0	1.00	0.40	0.40		0.95
55BK0-1 år	0.56	0.55	0.31	0.77	0.73
55BK2-1 år	0.59	0.55	0.32		0.85
55BK4	0.62	0.55	0.34		0.86
55BR0-1 år	1.00	0.55	0.55	0.73	0.86
70BR0	1.00	0.55	0.70	0.77	0.92

A = Anläggningscement; B = Byggcement; R = normal betong; 40 = vct; 0 = 0% fibrer.

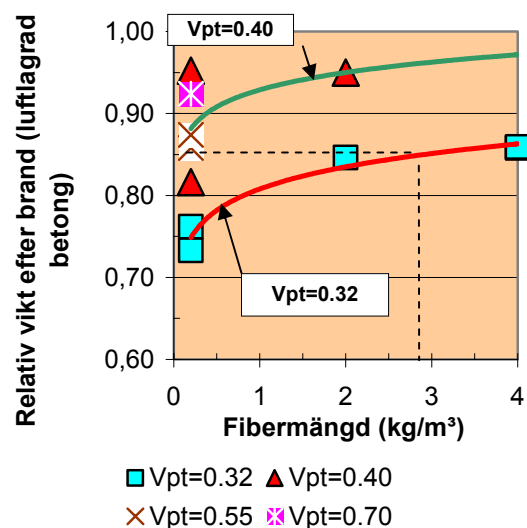
## SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

Betong 55BR0, som hade åldern ett år vid provningstillfället förlorade 14% av sin vikt vid explosiv spjälkning vid hög temperaturen, jämfört med genomsnittliga värdet 7% för jämförbara betonger med ett halvt års provningsålder, 40AR0, 40BR0 och 70BR0. I detta fall verkar ej heller provningsåldern ha inverkat på resultatet, snarare tvärtom [12]. Notabelt är att en normal betong kan erhalla 14% explosiv spjälkning vid hög temperatur efter 1 års luftlagring, RF = 73%, betong 55BR0. I sammanhanget var det även intressant att jämföra explosiv spjälkning vid hög temperaturen hos en SKB med samma vct, 55BK0, med betong 55BR0 (normal betong). Det krävdes 2 kg/m<sup>3</sup> ppf i en SKB för att erhalla samma bandspjälkning, betong 55BK2 som i betongen 55BR0, ca 15% för bägge (vct = 0.55) vid 1 års ålder, Tabell 1.2 [12]. Slutligen kan även ålderns inverkan på erforderlig fibermängd studeras för betongerna 55BK2 (2 kg/m<sup>2</sup> fibrer, 1 år) och 55BK4 (4 kg/m<sup>2</sup> fibrer, 1/2 år). För bägge betongerna erhålls samma explosiv spjälkning vid hög temperatur, ca 15%, varför åldersskillnaden vid provningen, 1/2 år, i detta fall halverade behovet av fibrer, från 4 kg/m<sup>2</sup> fibrer till 2 kg/m<sup>2</sup> fibrer. I huvudsak verkade dock inte åldern, 1/2 eller 1 år, ha inverkat något nämnvärt på explosiv spjälkning vid hög temperaturen hos normal betong utan fibrer – ej heller verkade lagringssättet ha inverkat något nämnvärt vid 1/2 års ålder, Tabell 1.2. Tidigare har det för normal betong varit känt att vattenlagring eller lagring vid hög luftfuktighet gjort betongen mera känslig för explosiv spjälkning vid hög temperatur än härdning i luft. Uttorkningstiden, upp till ett år, kan ha varit för kort i förhållande till ett halvt år för att någon effekt skulle erhallas vid hög temperaturen.

### 1.6 Fibermängd och spjälkning

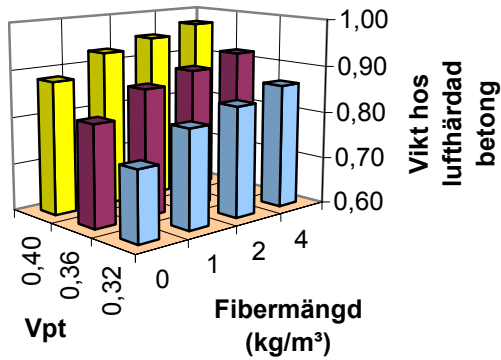
För vissa kombinationer av cementpulvertalet, cpt < 0.80 och vattenpulvertalet, vpt < 0.50, krävs andra åtgärder för att klara kravet på en högsta explosiv spjälkning vid hög temperatur av ca 15% av betongens ursprungliga vikt t.ex. användning av ppf i betongen. I tidigare projekt användes fibrer med diametern 32 µm medan finare fibrer, 18 µm, enligt senare rön anses vara mer effektiva och därmed halvera explosiv

spjälkning vid hög temperaturen jämfört med tidigare använda [3]. Tidigare givna fibermängder grundade sig enbart på diametern 32 µm och 1/2 års ålder vid provningen. En ökning av åldern till 1 år förefaller att minska behovet av fibrer till hälften för att erhalla samma vikt på betongen efter explosiv spjälkning vid hög temperatur vid i övrigt konstanta förhållanden, Figur 1.12. Halveras sedan fibermängden vid övergång till diametern 18 µm i stället för 32 µm finns inte stora krav kvar på fibrer för att erhalla en SKB som är säker mot explosiv spjälkning vid hög temperatur. Först bör dock fillerhalten begränsas. Figurerna 1.13-1.14 visar hur vikten efter explosiv spjälkning vid hög temperatur hos betong med Byggcement påverkades av mängden fibrer, effektiv för att erhalla en brandsäker betong, Figurerna 1.13-1.14. På samma sätt visas i Figurerna 1.15-1.16 hur vikten efter explosiv spjälkning vid hög temperatur hos betong med Anläggningcement påverkades av mängden fibrer [1]. Det var önskvärt att sammanföra kraven på fibermängd till få parametrar, Figur 1.17 [1]. Figur 1.17 visar vikt efter explosiv spjälkning vid hög temperatur oberoende av härdningssätt och cementtyp versus cementpulvertal, cpt, vattencementtal, vct och fibermängd [1].

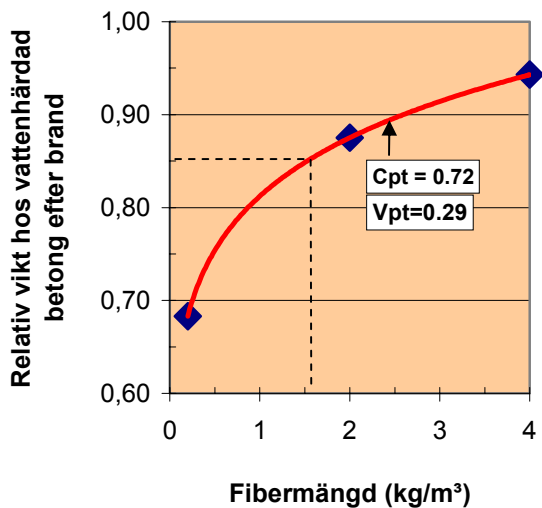


Figur 1.13 - Vikt efter spjälkning med Byggcement, olika fibermängd och vpt. 32 µm ppf, 1/2 år.

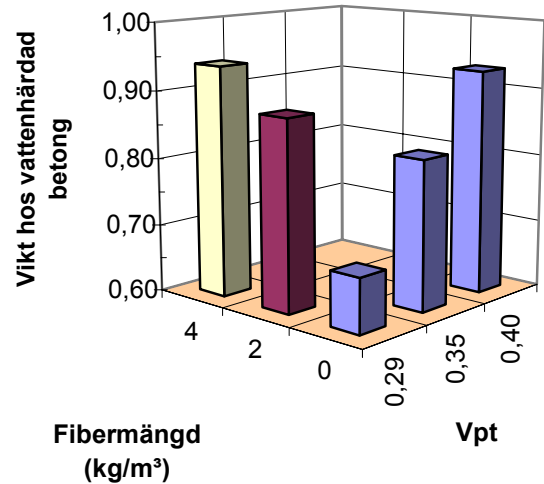
SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHalt - Explosiv Spjälkning vid Hög Temperatur



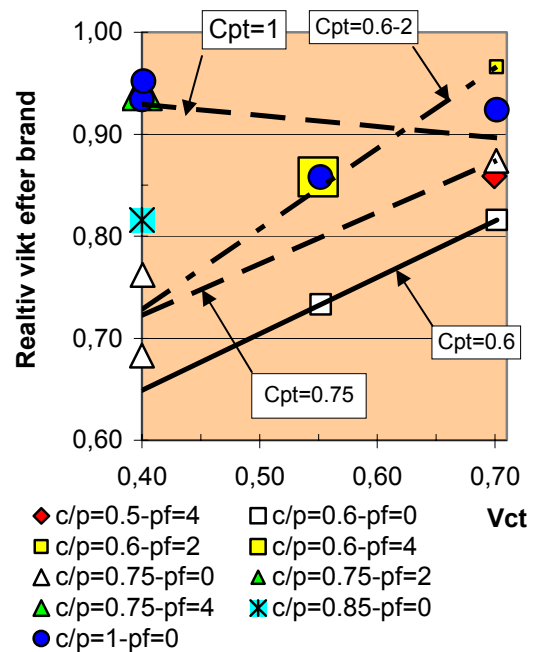
Figur 1.14 - Vikt efter explosiv spjälkning vid hög temperatur med Byggcement vid varierande fibermängd och vpt. 32 µm ppf, ½ års ålder.



Figur 1.15 - Vikt efter explosiv spjälkning vid hög temperatur med Anläggningscement, olika fibermängd och vpt. 32 µm ppf, ½ års ålder.



Figur 1.16 - Vikt efter explosiv spjälkning vid hög temperatur av betong med Anläggningscement, varierande fibermängd och vpt. 32 µm ppf, ½ års ålder.



Figur 1.17 - Vikt efter explosiv spjälkning vid hög temperatur oberoende av härdningssätt och cementtyp versus cementpulvertal, cpt, vattencementtal, vct och fibermängd [12]. Beteckningar: 0.5-0: cpt = 0.50 och 0 kg/m³ fibrer.

## Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund

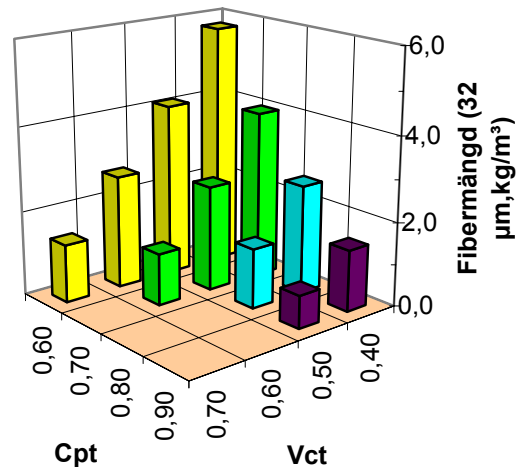
### SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

Som synes varierar resultaten rätt avsevärt för referensbetongerna med låg fillerhalt och fibrer. Effekten av vct och fibermängd på explosiv spjälkning vid hög temperaturen är dock tydlig i Figur 1.17. Figur 1.18 visar erforderlig mängd fibrer med diametern 32  $\mu\text{m}$  vid ett halvt års provningsålder förutsatt att vikten efter explosiv spjälkning vid hög temperatur skall överstiga 85% av ursprungsvikten före brand [1]. Fibermängder ges i tabell 1.3 baserade på vad som kan urskiljas ur Figur 1.18. Det är helt klart från Figur 1.18 och Tabell 1.3 att cpt till stor del avgör behovet av fibrer. Dessutom minskar fiberbehovet vid mindre fiberdiameter och högre provningsålder än vad som provats i tidigare försök [3]. Det är nödvändigt att begränsa fiberinnehållet eftersom SKB annars blir synnerligen svårgjuten. Fiber i SKB begränsar betongens rörlighet. Mer än 2  $\text{kg/m}^3$  32  $\mu\text{m}$  plastfiber i SKB är inte att rekommendera från gjutbarhetssynpunkt. Detta krav sätter i sin tur krav på cpt och vct om betongen skall klara explosiv spjälkning vid hög temperatur redan vid ½ års ålder, Figur 1.18 och Tabell 1.3. Vid cpt = 0.60 kan således endast betong med vct  $\geq$  0.60 och 2  $\text{kg/m}^3$  plastfiber användas. Vid cpt = 0.75 kan betong med vct  $\geq$  0.40 och 2  $\text{kg/m}^3$  plastfiber användas. Slutligen finns inga krav på fiberinblandning i betong med cpt = 1 och vct > 0.40, vilket är känt sedan tidigare för normal betong. En annan aspekt är givetvis plastfibers beständighet som är föga känd. Så länge beständigheten hos plastfiber inte kan dokumenteras bör dessa ej användas där krav ställs på en hög beständighet t.ex. i tunnlar. Inomhus kan ppf användas utom andra betänkligheter än effekt på gjutbarhet [1].

Tabell 1.3 - Mängd 32  $\mu\text{m}$  fibrer vid ½ års provningsålder (vikten efter explosiv spjälkning vid hög temperatur > 85% av ursprungsvikten).

Vct	Cpt= 0.50	Cpt= 0.60	Cpt= 0.75	Cpt= 0.85	Cpt= 1
0.4	ej känd	4	2	1	0
0.5	ej känd	3	1	0	0
0.6	ej känd	2	0	0	0
0.7	4	1	0	0	0

Cpt = cementpulvertal = mängd cement/(mängd cement + mängd filler).



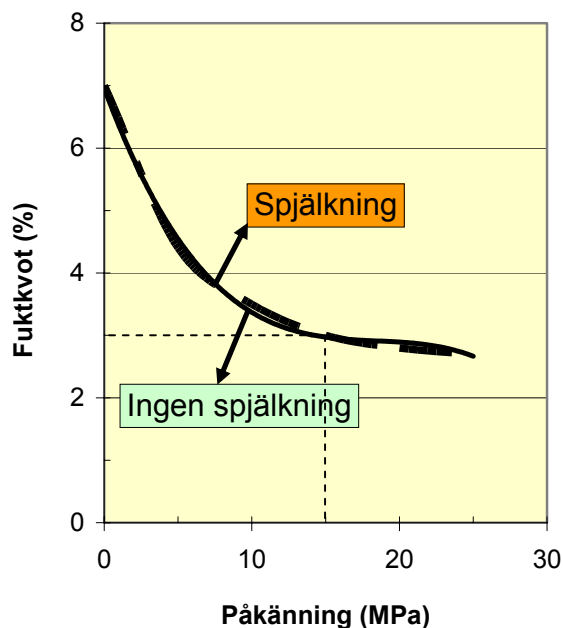
Figur 1.18 - Mängd 32  $\mu\text{m}$  fibrer vid ett halvt års provningsålder förutsatt att vikten efter brand skall överstiga 85% av ursprungsvikten [1]. Cpt = cementpulvertal, cement/(cement+filler).

#### 1.7 Fukt, yttre påkänning och syfte

Ett europeiskt workshop vid CEMBUREAU beträffande "Brandsäkerhet hos betong" speciellt egenskaper hos SKB hölls 2003 med 20 deltagare [20-21]. Speciellt diskuterades inverkan av filler, fukt och spänning på risken för explosiv spjälkning vid hög temperatur [3,5]. För normal betong har det konstaterats ett samband mellan fukt, spänning och risken för explosiv spjälkning vid hög temperatur men detta gäller uppenbarligen inte för högpresterande, HP, betong även om fuktkvoten var så låg som 2.2%, figur 1.6 [5]. Frågan var dock obesvarad för SKB eftersom resultaten var något motstridiga jämfört med figur 1.19 [3]. Henk Vanwalleghem presenterade belgiska försök med SKB i form av långa cylindrar,  $\text{Ø}150$  mm, vilka hängdes i en ugn med en temperaturutveckling enligt ISO 834 [22]. Betongerna lufttorkades utan pålagd påkänning under provningen. Fuktkvoten var 4.5%. Ingen explosiv spjälkning vid hög temperatur observerades [22]. Fabienne Robert presenterade också resultat från försök med enligt ISO 834 [23]. Provningar utfördes på en del av en förspänd betongbalk med längden 700 mm samt tvärsnittet 300 x 500 mm, dels för SKB med tryckhållfasthet 40 och 55 MPa, dels för normal betong med motsvarande kvalitet, 40 MPa.



SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR



Figur 1.19 –Explosiv spjälkning vid hög temperatur hos normal betong vs påkänning/fuktkvot [3].

Fuktkvoten var 3.7% för betongerna med tryckhållfastheten 40 och 55 MPa och 4.6% för SKB med tryckhållfastheten 55 MPa vid samma uttorkningsförhållanden. Ingen spjälkning uppstod för betongerna med tryckhållfastheten 40 MPa. För SKB med tryckhållfastheten 55 MPa uppstod en mindre spjälkning mitt på balken där viss förspänning troligen fortfarande fanns kvar (i och med att balken kapades fanns knappt någon förankringslängd kvar). Djupet på spjälkningen var 29 mm som mest. Fabienne Robert presenterade också provningar av tryckhållfasthet vid förhöjd temperatur som visade högre värden än för normal betong, speciellt för 400 °C [23]. Patrick Sullivan visade provning av pelare av normal betong och SKB i full skala [24]. Den normala betongen och SKB härdades parallellt. För SKB skedde en total avskalning av täcksiktet

medan nästan ingen spjälkning uppstod hos den normala betongen. Med 2-4 kg/m<sup>3</sup> ppf i betongen kunde spjälkningen hos SKB elimineras [24,25]. Fuktkvoten var ej känd vid provningen – endast härdningen som var exakt lika för SKB som för normal betong fram till provningen. Efter en avslutande diskussion togs en generell rekommendation fram i form av tabell 1.4, i fråga om åtgärder beträffande brandsäkerhet hos betong speciellt egenskaper hos SKB. De svenska SKB, som optimerats fram under 1 år i ett samarbete mellan industrin och LTH, ansågs speciella eftersom de innehöll hög fillerhalt samt glasfiller [1]. De svenska betongrecepten stämde dock väl med t.ex. tyska rekommendationer i fråga om fillerhalten [26]. Gränsen för tryckhållfasthet vållade en speciell diskussion eftersom finska erfarenheter som mest medgav tryckhållfasthetsklass C60 utan att speciella åtgärder vidtogs för betongens brandsäkerhet (C = cylinder, MPa). I Sverige finns en rekommendation att använda fibrer vid vattenbindemedelstal, vbt < 0.32, vilket torde motsvara tryckhållfasthetsklass > C60. Rekommendationerna i Tabell 1.4 görs i avvaktan på resultat från fortsatta försök i fråga om kritisk fuktkvot och kritisk påkänning för explosiv spjälkning vid hög temperatur hos SKB (fuktkvot ≤ 3%; tryckhållfasthet ≤ C60-C85 MPa). Önskemål om fortsatta försök var en av orsakerna till här redovisade resultat. Försöket syftade till att bestämma sambandet mellan explosiv spjälkning vid hög temperatur, deformation, fuktkvot, påkänning och temperatur hos SKB med låg fillerhalt (≤ 5% av cementhalten) med användning av små provkroppar, Ø100 mm x 200 mm, med och utan ppf. För ändamålet användes SKB tillverkad av industrin i fullskaleproduktion med industriella sammansättningar och egenskaper. Samtidigt studerades temperaturutvidgningen inklusive krympningen samt krympningen hos betongerna.

Tabell 1.4 –Åtgärder i fråga om brandsäkerhet hos betong speciellt egenskaper hos SKB.

Miljö	Fuktkvot	Tryckhållfasthet	Normal SKB	Speciell SKB
Normal	≤ 3%;	≤ C60-C85	Inga åtgärder	Speciella åtgärder
Speciell	> 3%	> C60-C85	Speciella åtgärder	Speciella åtgärder



## Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund

### SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

placerades omedelbart i glasrör som förslöts med gummipropp. Efter 3 dygn mättes RF med i glasröret instuckna RF-prober, märke: Vaisala HMP 44. Avläst RF-värde kalibrerades med hjälp av en fuktgenerator. Tryckpressen kalibrerades mot en lastcell vilken i sin tur kalibrerats i en krönt tryckpress. I Tabell 2.1 ges de vid provningarna använda påkänningarna, ca 0%, 15%, 30% och 45% av cylinderhållfastheten, varierande mellan 0 och 27 MPa.

Tabell 2.1 – Påkänning, ca 0%, 15%, 30% och 45% av cylinderhållfastheten,  $f_c$  (MPa)

Betong/ lastnivå	C40 (42V)	C50 (48FK)	C60 (33H)	Medel- värde
0· $f_c$	0.5	0.5	0.5	0.5
0.15· $f_c$	6	7.5	9	7.5
0.30· $f_c$	12	15	18	15
0.45· $f_c$	18	22.5	27	22.5

$f_c$  = cylinderhållfasthet, C40 (42V) = cylinderhållfasthetsklass, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, V = Vislanda, 42 = vct.



Figur 2.1 – Deformationer under konstant last 100-mm cylindrar med längd 200 mm. Foto: Stefan Backe.



## Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund

### SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

#### 3. Resultat

##### 3.1 Fuktkvot och RF

Tabell 3.1 visar uppmätt fuktkvot i provade betonger. Tabell 3.2 visar RF i betong 48FK med 1.4 kg/m<sup>3</sup> ppf härdad i RF = 30% under 1 år (cylinder Ø100 x 200 mm). Tre glasrör fyllda med betongfragment från inre delen av cylindern visade RF = 60% med mycket liten standardavvikelse trots att betong torkats ut under mycket lång tid i RF = 30% (motsvarade u = 2.7%). Motsvarande förhållande gäller troligen för uttorkningsklimat RF = 60%. Med ledning av [1] kan RF = 75% ha förväntats i cylindrar vilka torkat vid RF = 60% under 1 år. För RF = 90% torde inre och yttre RF ha varit lika stora efter 1 år till följd av betongens inre självuttorkning.

##### 3.2 Temperaturutveckling

I figur 3.1 och Appendix 3.1 ges ett sammandrag av temperaturutveckling hos betong utan ppf. I figur 3.2 och Appendix 3.2 ges ett sammandrag av temperaturutveckling hos betong med ppf. För SKB utan ppf uppmättes följande betongtemperatur:

$$T_{20} = 3.78 \cdot \exp(0.00663 \cdot U) \quad \{200 < U < 600 \text{ }^\circ\text{C}\} \quad (3.1)$$

$$T_{50} = 1.11 \cdot \exp(0.00778 \cdot U) \quad \{200 < U < 600 \text{ }^\circ\text{C}\} \quad (3.2)$$

För SKB med ppf uppmättes följande betongtemperatur:

$$T_{20} = 6.7 \cdot \exp(0.00555 \cdot U) \quad \{200 < U < 800 \text{ }^\circ\text{C}\} \quad (3.3)$$

$$T_{50} = 6.15 \cdot \exp(0.00525 \cdot U) \quad \{200 < U < 800 \text{ }^\circ\text{C}\} \quad (3.4)$$

där

U betecknar ugntemperatur (°C)  
T<sub>20</sub>, T<sub>50</sub> betecknar betongtemperatur på mät-djupen 20 mm resp. 50 mm (°C).

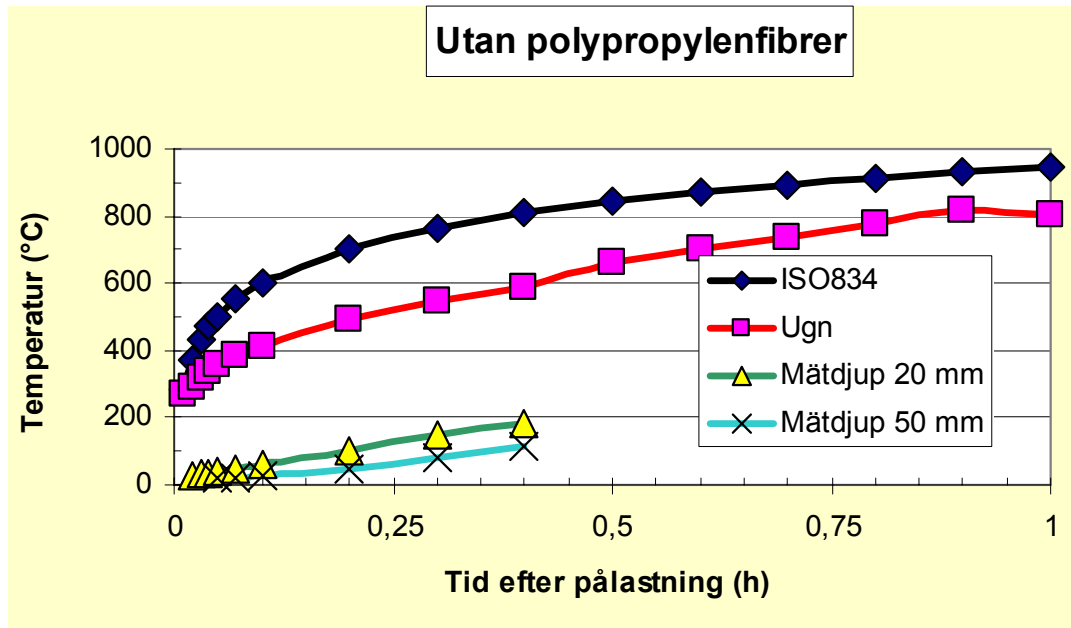
Tabell 3.1 – I betong uppmätt fuktkvot (%).

Betong/RF	C40 (42V)	C50 (48FK)	C60 (33H)	M.v.
30%, ppf	-	2.7	-	-
60%, ppf	3.0	3.1	3.6	3.2
60%, utan ppf	3.8	3.7	3.1	3.5
60%, m.v.	3.4	3.4	3.4	3.4
90%, ppf	-	4.1	-	-

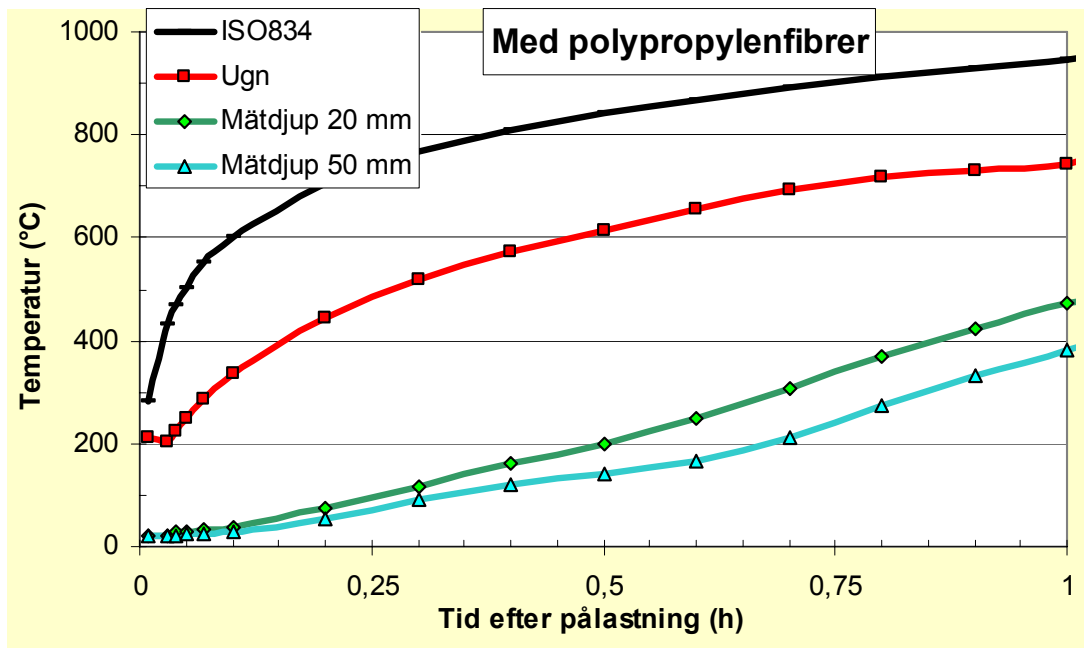
C40 (42V) = hållfasthetsklass, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, M.v. = medelvärde, RF = relativ fuktighet, yttre, V = Vislanda, 42 = vct.

Tabell 3.2 - RF i betong 48FK härdad i RF = 30% under 1 år (cylinder Ø100 x 200 mm).

Provning, RF, probe	Uppmätt
RF test 1 (1), probe	17
Uppmätt RF	58.3
Kalibrerad RF (20,0 °C,%)	59.6
RF test 1 (2), probe	38
Uppmätt RF	57.3
Kalibrerad RF (20,0 °C,%)	59.7
RF test 1 (3), probe	15
Uppmätt RF	55.1
Kalibrerad RF (20,0 °C,%)	60.4
Medelvärde, RF (%)	59.9
RF standardavvikelse (%)	0.4



Figur 3.1 - Ett sammandrag av temperaturutveckling hos betong utan ppf.



Figur 3.2 - Ett sammandrag av temperaturutveckling hos betong med ppf.

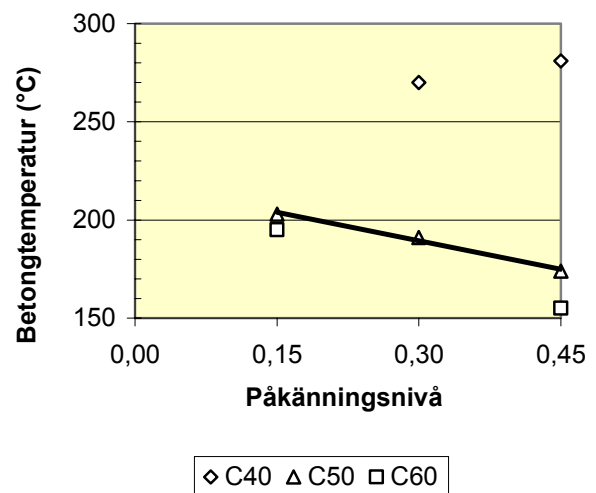
### 3.3 Temperaturspjälkning

Av Appendix 3.3 framgår förekomst av explosioner för SKB utan ppf. SKB C40 (42V), RF = 60%, med 15% påkänning av cylinderhållfastheten erhöill som första prov en långsam upphettning jämfört med övriga prover som ställdes i ugn med starttemperatur 225 °C. Detta kan ha varit anledningen till att SKB C40 (42V) med 15% påkänning av cylinderhållfastheten ej exploderade. SKB C40 (42V), RF = 60%, utan påkänning, exploderade heller ej varför orsaken även kan ha varit betongrelaterad. Mot att fenomenet skulle vara betongrelaterat tyder explosionen av bägge betongcylindrarna C40 (42V) vid RF = 30%, såväl utan last som med 30% last av cylinderhållfastheten. Anledningen till varför SKB C60 (33H) med 30% påkänning av cylinderhållfastheten ej exploderade är dock okänd. Så gott som alla cylindrar med betong utan ppf exploderade under de aktuella provningsförhållandena (13 av 16). Appendix 3.4 visar tid efter pålastning samt ugnens temperatur vid explosion hos prover härdade vid RF = 30%. Appendix 3.5 visar tid efter pålastning samt betongtemperatur på 20 mm:s mätdjup vid explosion hos prover härdade vid RF = 30%. Appendix 3.6 visar betongtemperatur versus hållfasthetsklass och påkänningsnivå hos prover härdade vid RF = 30%. Appendix 3.7 visar tid efter pålastning samt ugnens temperatur vid explosion hos prover härdade vid RF = 60%. Appendix 3.8 visar tid efter pålastning samt betongtemperatur på 20 mm:s mätdjup vid explosion hos prover härdade vid RF = 60%. Appendix 3.9 och Figureerna 3.3-3.4 visar betongtemperatur versus hållfasthetsklass och påkänningsnivå hos prover härdade vid RF = 60%. För betong med ppf erhöills intakta provkroppar i samtliga upphettningsfall (18 av 18), Appendix 3.10. Det mest anmärkningsvärda är att prover härdade vid RF = 90% ej exploderade med en så liten inblandning av 18 µm ppf som 0.7 kg/m<sup>3</sup>. För högre hållfasthet erhöills lägre explosionstemperatur vilket stämde väl med Figur 1.1. För hållfasthet C50 (48FK) erhöills ett samband mellan betongtemperatur, X, vid explosion (°C) och påkänningsnivå, p, , Figur 3.3:

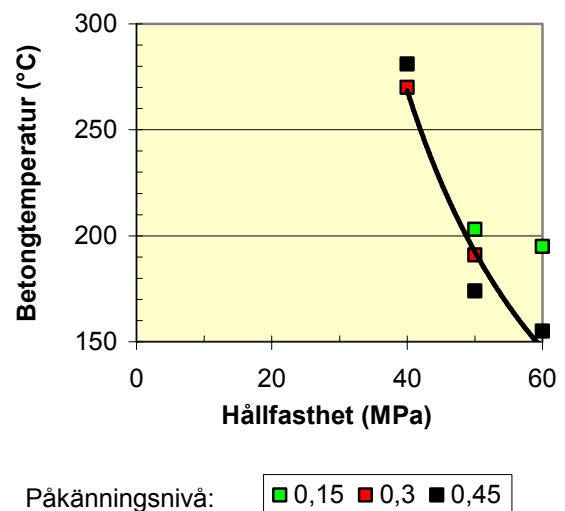
$$X = 225 \cdot (1-p) \quad (3.5)$$

För påkänningsnivån 45% av cylinderhållfastheten erhöills följande samband mellan betongtemperatur, X, vid explosion (°C) och hållfastheten, f<sub>c</sub>, , Figur 3.4:

$$X = 66040 \cdot f_c^{-1.49} \quad (3.6)$$



Figur 3.3 - Betongtemperatur vid explosion versus hållfasthetsklass och påkänningsnivå.

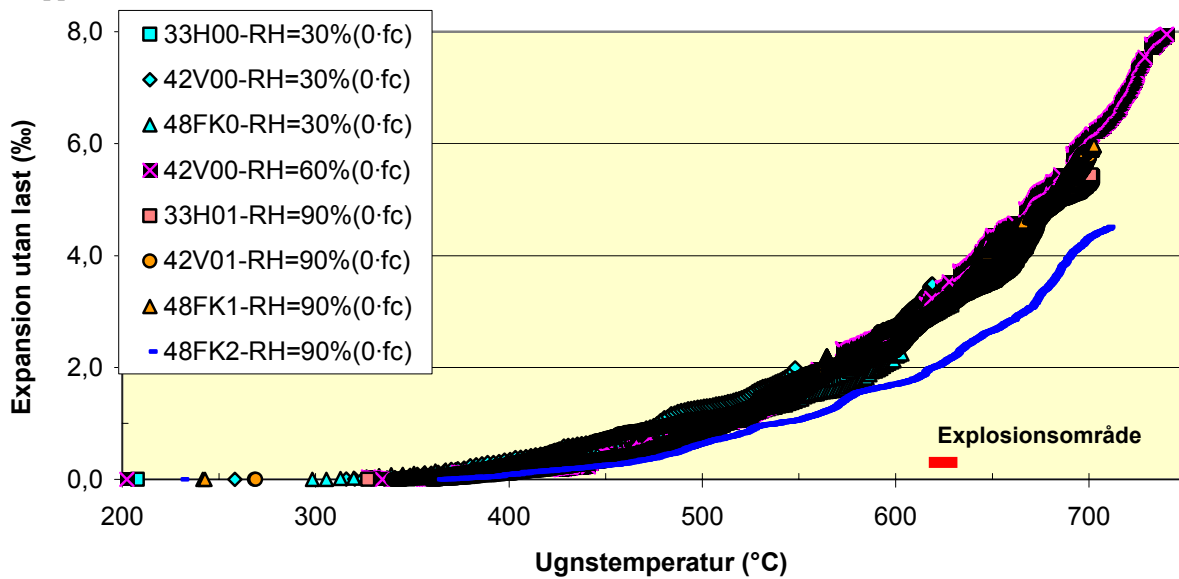


Figur 3.4 - Betongtemperatur vid explosion versus hållfasthetsklass och påkänningsnivå.

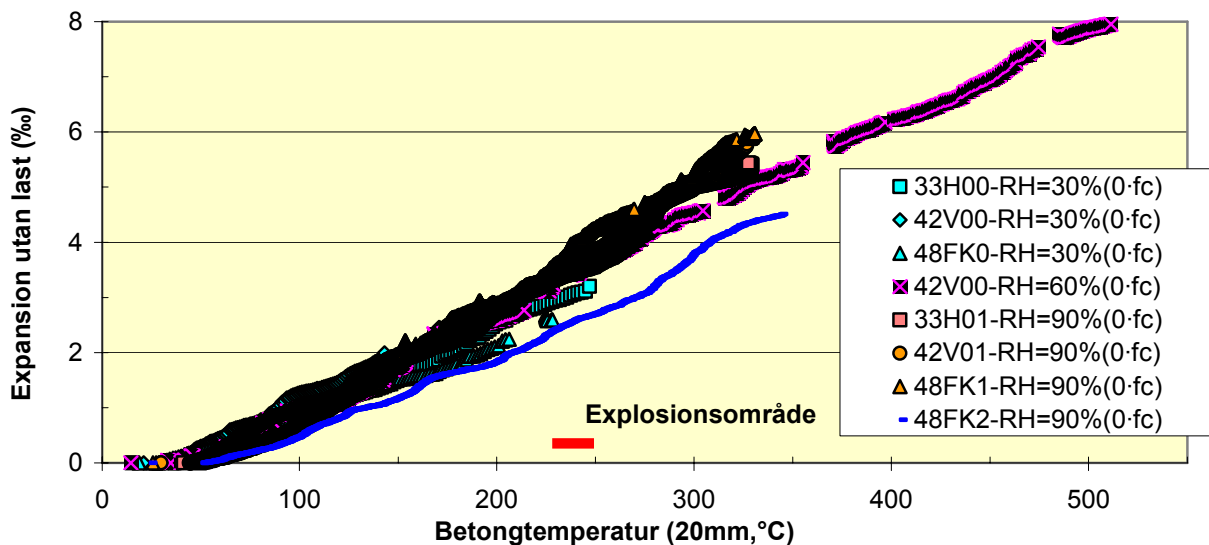
### 3.3 Temperaturutvidgning inklusive krympning utan last

I syfte att undvika instabiliteter under temperaturhöjningen bestämdes temperaturutvidgning inklusive krympning för prover med en liten last, 4 kN (0.5 MPa), totalt 8 cylindrar, Figur 3.5. Deformationen visas ej då lasten avvek mer än  $\pm 0.5$  kN från avsedd last då alltför stor avvikelse då uppstod i deformationen eftersom 0.8 m av

mätlängden om 1 m utgjordes av stål (elastiska deformationer). Figur 3.6 visar deformationer som funktion av betongtemperatur 20 mm från ytan i sin tur beräknad med ekvationerna (3.1) eller (3.3). Betong utan och med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  ppf uppvisade lika stor deformation medan  $1.4 \text{ kg/m}^3$  ppf gav ca 10% mindre temperaturdeformation än betong utan ppf.



Figur 3.5 - Temperaturutvidgning inklusive krympning som funktion av ugnstemperatur.



Figur 3.6 - Deformationer utan last som funktion av betongtemperatur 20 mm från ytan.

### 3.4 Deformationer med last

#### 3.4.1 Allmänt

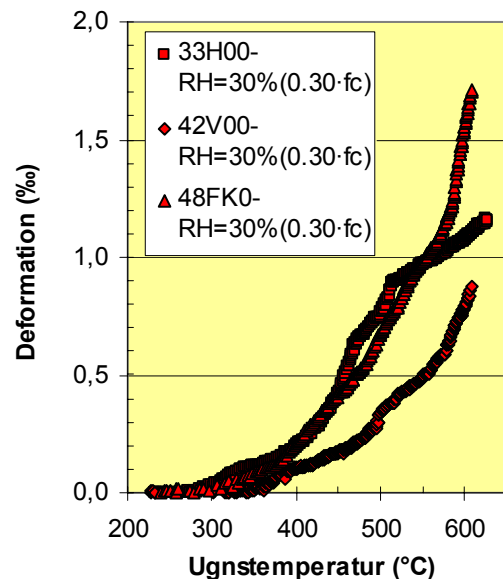
För RF = 60%, en högsta RF i inomhusmiljö, provades samtliga betonger utan ppf eller med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf, vid lastnivåerna 15%, 30% och 45% av aktuell cylinderhållfasthet, vanligen förekommande lastnivåer, Tabell 2.1, 18 cylindrar. För RF = 30%, torr inomhusmiljö, vintertid, samt RF = 90%, utomhusmiljö, tunnlar, berg-rum, virkeslager, broar, dvs. självuttorkningen för betong med vct = 0.42, provades vardera 3 cylindrar. Dessutom provades vid RF = 90% SKB med 1.4 kg/m<sup>3</sup> betong vid lastnivåerna 30% och 45% av cylinderhållfastheten, Appendix 3.11. Redovisning sker RF-vis, dvs. först för RF = 30%, därefter RF = 60% samt sist RF = 90%. Totala deformationer visas inklusive temperaturutvidgning och krympning.

#### 3.4.2 RF = 30%

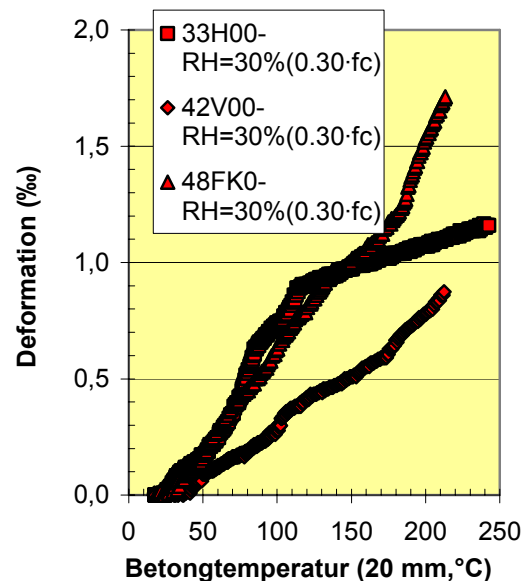
För prover härdade vid RF = 30%, dvs. ytan av betongen erhöll RF = 30% medan centrum av cylindern erhöll RF = 60% efter 1 år, observerades explosioner i ugnen för samtliga prover utan ppf. Inga prover med ppf fanns att tillgå vid RF = 30% eftersom en så låg uttorkningsnivå ansågs riskfri för explosiv spjälkning. Figur 3.7 visar deformation som funktion av ugnstemperatur medan Figur 3.8 visar deformation som funktion av betongtemperatur, 20 mm från ytan. Jämfört med temperaturutvidgningen inklusive krympningen blev deformationen med 30% last hälften så stor som utan.

#### 3.4.3 RF = 60%

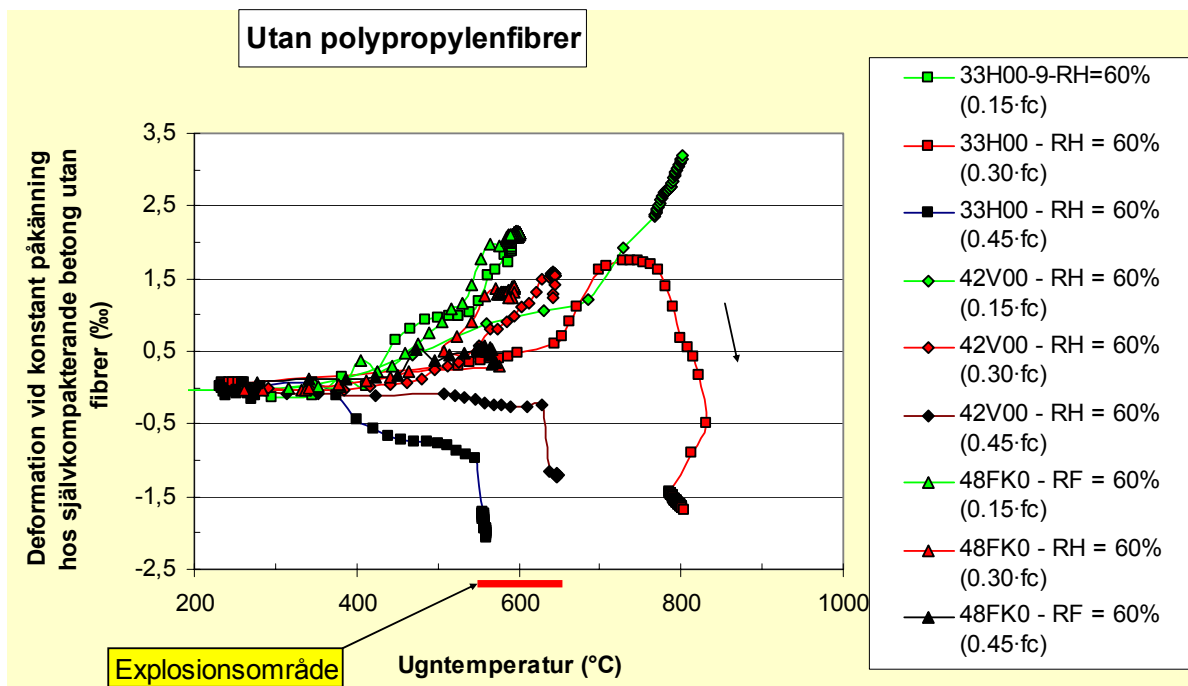
Figur 3.9 visar deformationer hos SKB utan fibrer under brandtemperatur och konstant belastning. Som framgår av Figur 3.9 fanns det för explosiv spjälkning vid hög temperatur en kritisk ugnstemperatur, 550 °C - 650 °C. Vid snabb uppvärmning undgick en enda betong explosiv spjälkning vid hög temperatur i detta temperaturintervall, vct = 0.33 med 30% påkänning av cylinderhållfastheten. Efter att provet passerat det nämnda temperaturintervallet observerades en viss expansion upp till ca 750 °C, då tertiär krympning till brott inträffade, Figur 3.10 [4].



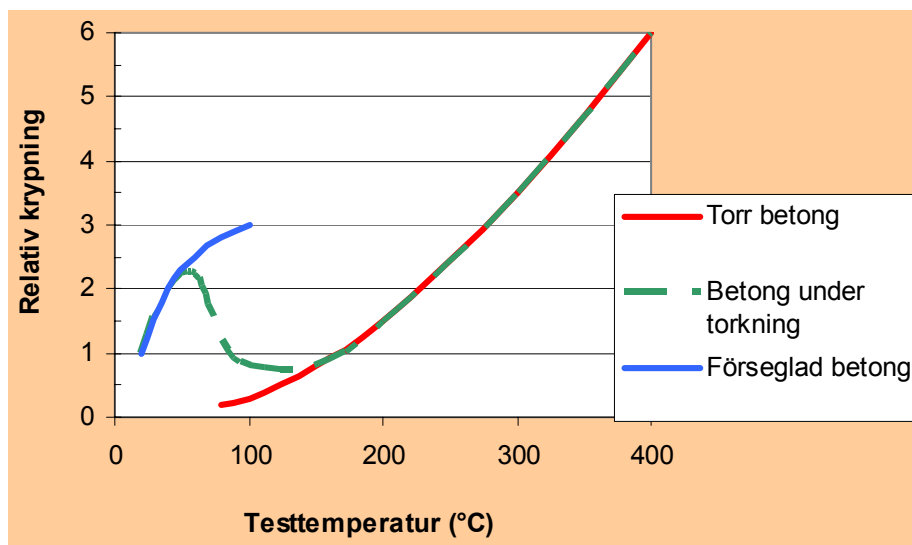
Figur 3.7 - Deformation efter härdning vid RF = 30% med 30% av cylinderhållfastheten vid 20 °C versus ugnstemperatur (prover exploderade).



Figur 3.8 - Deformation efter härdning vid RF = 30% med 30% av cylinderhållfastheten vid 20 °C versus 20 mm från ytan (prover exploderade).



Figur 3.9 - Deformationer hos SKB utan fibrer under brandtemperatur och konstant belastning.

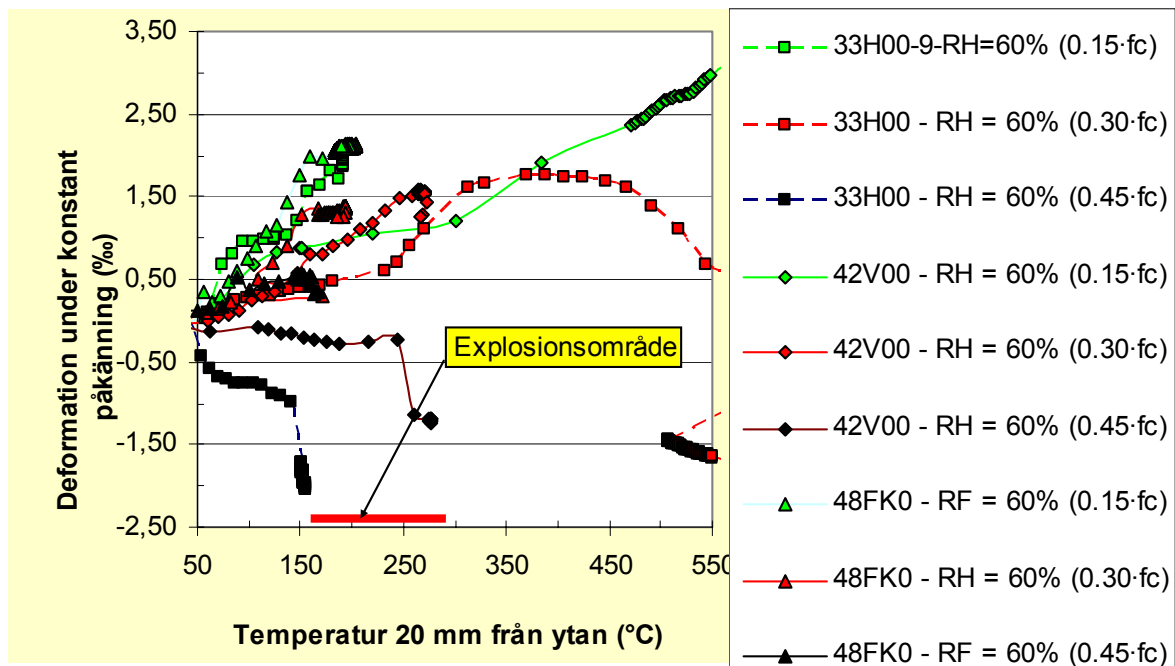


Figur 3.10 – Krypning hos betong med förhöjd temperatur [4].

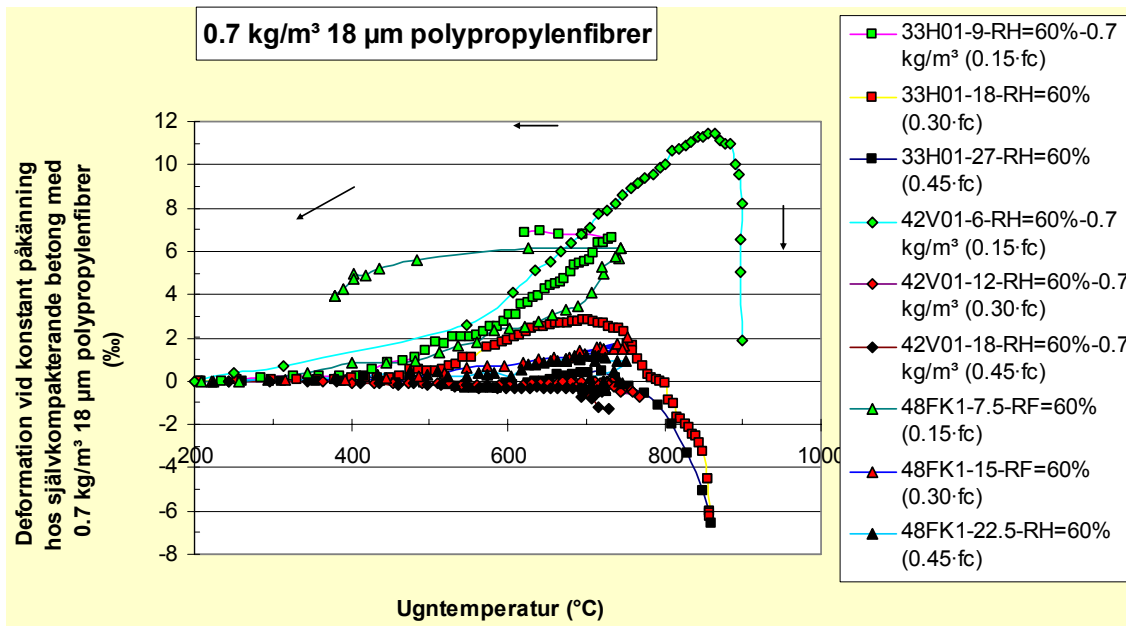
Betongens krypningsutveckling ökar nämligen avsevärt vid högre temperatur, Figur 3.10, dvs. betongen deformationerades vid ca 800 °C till brott, från en expansion av ca 1.7‰ till en kompression av ca 1.7‰, totalt 3.4‰, vilket överensstämmer med brottstukningen hos betong, ca 3.5‰. För en betong med  $v_{ct} = 0.42$  och långsam upphettning inträffade, med 15% påkänning

av cylinderhållfastheten, ej heller något brott utan en expansion av ca 3.4‰ fram till brott vid ca 800 °C. Figur 3.11 visar betongdeformationen som funktion av betongtemperaturen uppmätt på djupet 20 mm i betongen. Figur 3.12 visar deformationer hos SKB med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf som funktion av ugnstemperatur.

SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR



Figur 3.11 – Deformation hos provade betonger versus betongtemperatur.

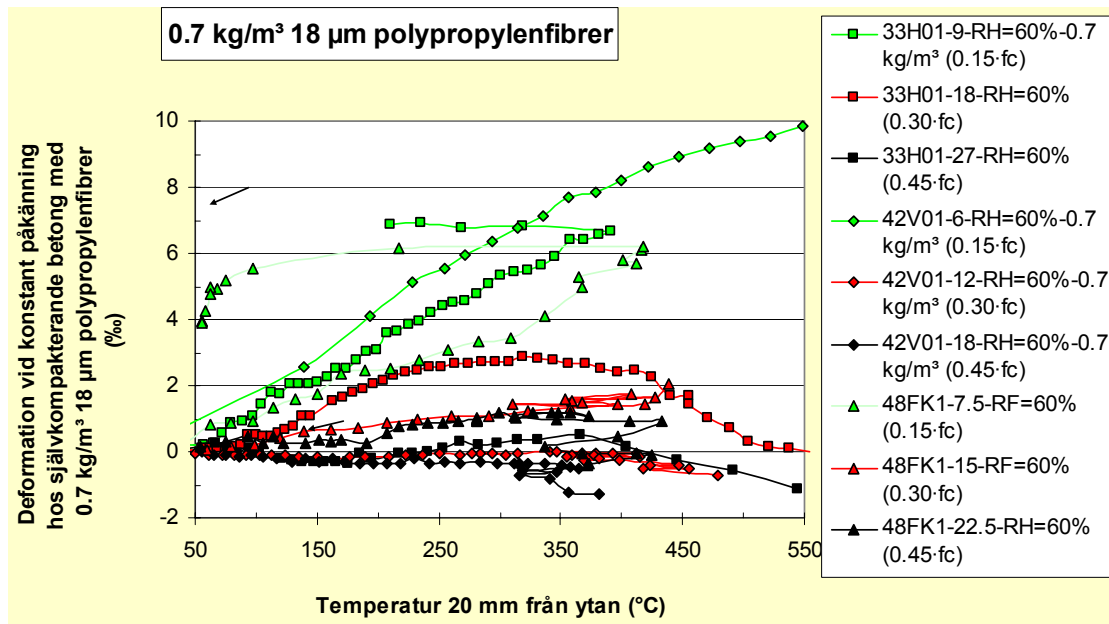


Figur 3.12 - Deformationer hos SKB med 0.7 kg/m³ ppf som funktion av ugntemperatur.

En SKB med  $v_{ct} = 0.33$  samt en SKB med  $v_{ct} = 0.42$  provades till krypbrott vid 850 °C resp. 900 °C. Den senare betongen utan ppf studerades till krypbrott vid ca 800 °C. Ett mer kontinuerligt deformationsförlopp erhöles med ppf i SKB än utan ppf. Detta beror på att ppf inledningsvis, då

den smälter, fördröjer fuktrörelser i betongen för att slutligen förångas och därvid göra det möjligt för ångtrycket att lämna betongen utan att explosiv spjälkning sker. Figur 3.13 visar deformationer hos SKB med ppf versus betongtemperatur 20 mm från ytan.

SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

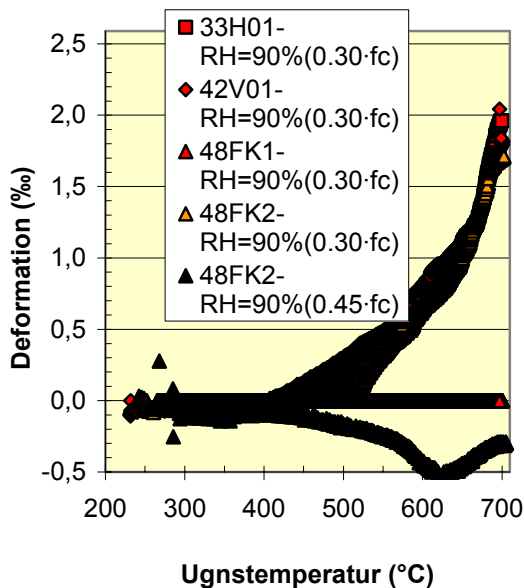


Figur 3.13 - Deformationer hos SKB med ppf som funktion av temperatur 20 mm från ytan.

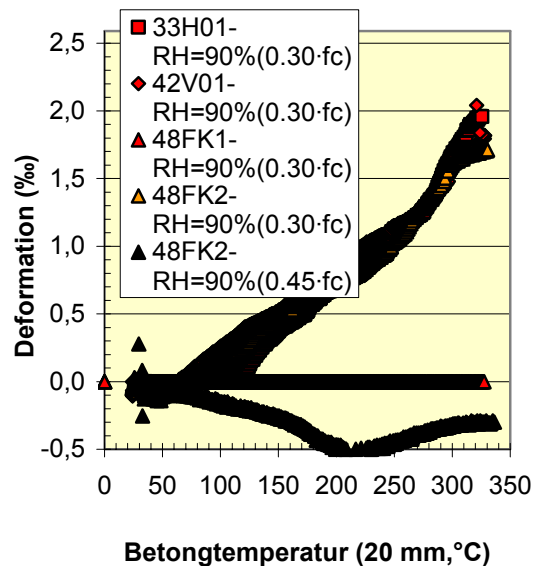
**3.4.4 RF = 90%**

För RF = 90% provades endast betong med ppf, endera 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf eller 1.4 kg/m<sup>3</sup> ppf, Appendix 3.11. Lastnivå 30% av cylinderhållfastheten provades utom för betong med vct = 0.48 där även 45% av cylinderhållfastheten provades i kombination med 1.4 kg/m<sup>3</sup> ppf. Figur 3.14 visar

totala deformationer hos betong under last efter härdning vid RF = 90% versus ugnstemperatur. Figur 3.15 visar totala deformationer hos betong efter härdning vid RF = 90% versus temperatur 20 mm från ytan.



Figur 3.14 - Totala deformationer under last efter härdning vid RF = 90% vs ugnstemperatur.



Figur 3.15 - Totala deformationer under last hos betong efter härdning vid RF = 90% versus betongtemperatur 20 mm från ytan.

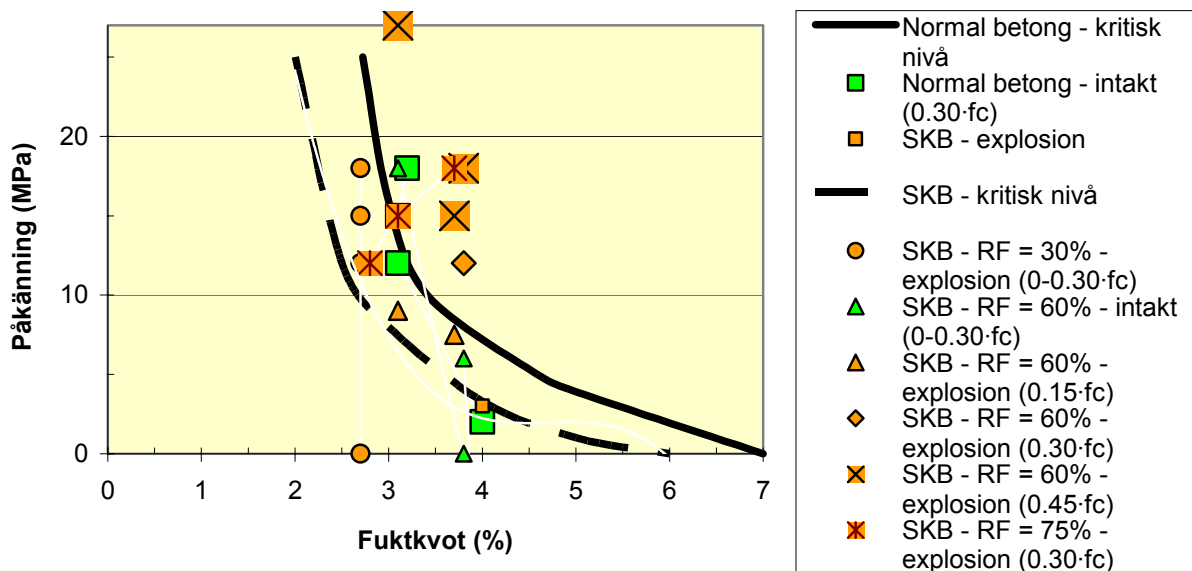


#### 4. Analys och diskussion

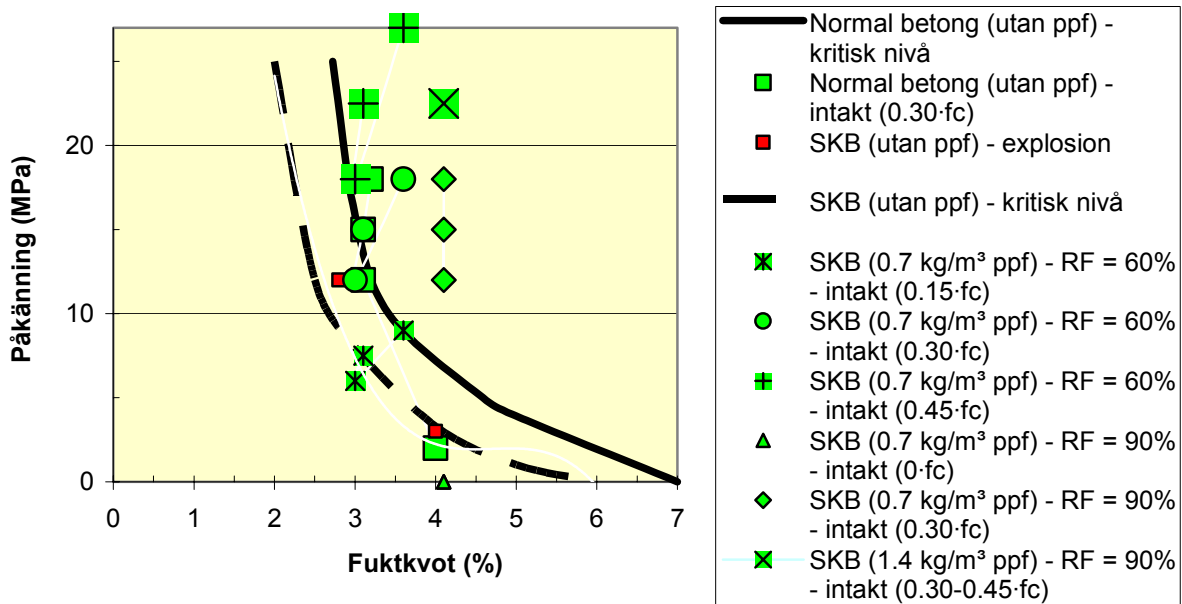
##### 4.1 Samband mellan fuktkvot, påkänning och spjälkning vid hög temperatur

För betong utan ppf föreföll det att finnas ett visst samband mellan hållfasthet och temperatur då explosiv spjälkning vid hög temperatur inträffade, Figur 3.4. Högre hållfasthet gav spjälkning vid lägre temperatur eftersom pormättnad nåddes tidigare i en betong med lägre porositet (=högre hållfasthet). Det fanns dock även ett visst beroende mellan påkänningsnivå och temperatur vid explosiv spjälkning vid hög temperatur, Figur 3.3. För högre påkänningsnivå hade redan en större del av kapaciteten hos betongen utnyttjats varför en mindre del återstod för de tillskottskrafter i betongen som uppstod vid hög temperatur. Det torde således ej finnas ett entydigt samband mellan fuktkvot, påkänning och explosiv spjälkning vid hög temperatur utan ett sådant samband blir även beroende av påkänningsnivån. Figur 4.1 visar att så gott som samtliga provade SKB utan ppf spjälkade medan normal betong utan ppf motstod hög temperatur vid samma uppvärmningsutveckling, ballasttyp, cement, fuktkvot, etc., vid provning parallellt i samma

ugn. Streckad linje avser SKB [2] heldragen linje normal betong [3]. Figur 4.1 bekräftar att ett visst samband existerar för normal (vibrerad) betong mellan fukt/påkänning och explosiv spjälkning vid hög temperatur [3]. Figur 4.1 visar också att SKB var avsevärt mer känslig för explosiv spjälkning vid hög temperatur än normal betong, vid i övrigt konstanta förhållanden. SKB utan ppf exploderade även utan last med så låg fuktkvot som  $u = 2.7\%$ , tre prover, dvs. vida under vad som anses som kritisk nivå [2,3], Figur 4.1. Figur 4.2 visar ett samband mellan fuktkvot, påkänning och explosiv spjälkning vid hög temperatur hos SKB utan och med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  ppf. Ingen SKB med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  ppf exploderade även om fuktkvot/påkänning vida översteg kritisk nivå, t.ex.  $RF = 90\%$  ( $u = 4.1\%$ ) i kombination med påkänningen  $22.5 \text{ MPa}$ , Figur 4.2. Tidigare för normal betong känd kombination av fukt/påkänning avseende risk för explosiv spjälkning vid hög temperatur gäller således ej alls för SKB. Även vid låg fuktkvot,  $u = 2.7\%$ , med en omgivande  $RF = 30\%$  (inre  $RF = 60\%$ ) utan last bör ppf inblandas för att undgå spjälkning i SKB vid hög temperatur.



Figur 4.1 –Explosiv spjälkning vid hög temperatur hos SKB utan ppf med fuktkvot/påkänning över streckad linje [2] samt hos normal betong med fuktkvot/påkänning över heldragen linje [3].



Figur 4.2 - Samband mellan fuktkvot, påkänning och explosiv spjälkning vid hög temperatur hos SKB utan och med 0.7 kg/m³ ppf. Streckad linje avser SKB [2] heldragen linje normal betong [3].

#### 4.2 Temperaturutvidgning inklusive krympning

Från Figur 3.6 beräknades temperaturutvidgningskoefficienten inklusive krympning,  $\mu$ , baserat på uppmätt temperatur på 20 mm:s avstånd från betongytan, T, dvs. nära nog halva hydrauliska radien =  $100/4 = 25$  mm, Tabell 4.1.

Tabell 4.1 – Beräknad temperaturutvidgningskoefficient, Figur 3.6 (%/°C, 20 °C < T < 500 °C). *Kursiv stil* = extrapolation/interpolation.

Betong/ RF (%)	33H0 (C60)	42V0 (C40)	48FK (C50)	M.v.
30%	0.0147	0.0166	0.0125	0.0146
60%	<i>0.0174</i>	0.0174	<i>0.0169</i>	0.0172
90%, 0.7 kg/m³ ppf	0.0200	0.0195	0.0213	0.0203
90%, 1.4 kg/m³	<i>0.0148</i>	<i>0.0148</i>	0.0148	<i>0.0148</i>

C40 (42V) = hållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, M.v. = medelvärde, V = Vislanda, 42 = vct

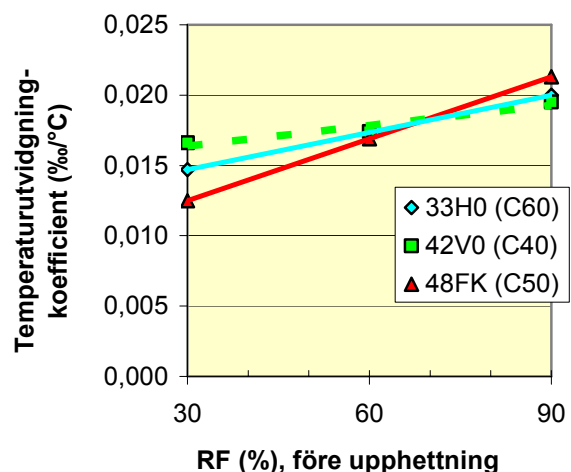
Följande samband beräknas för  $\mu$ , Figur 4.3:

$$\mu = a \cdot RF + b \quad \{30\% < RF < 90\%; R^2=0.98\} \quad (4.1)$$

Konstanter a och b ges i Tabell 4.2, RF (%).

Tabell 4.2 - Konstanter a och b i ekv. (4.1)

Vct (%)	a	b (%/°C)
33	0.00883	0.01205
42	0.0048	0.0149
48	0.01467	0.0081



Figur 4.3 - Temperaturutvidgningskoefficient versus RF före provning (20 °C < T < 500 °C).

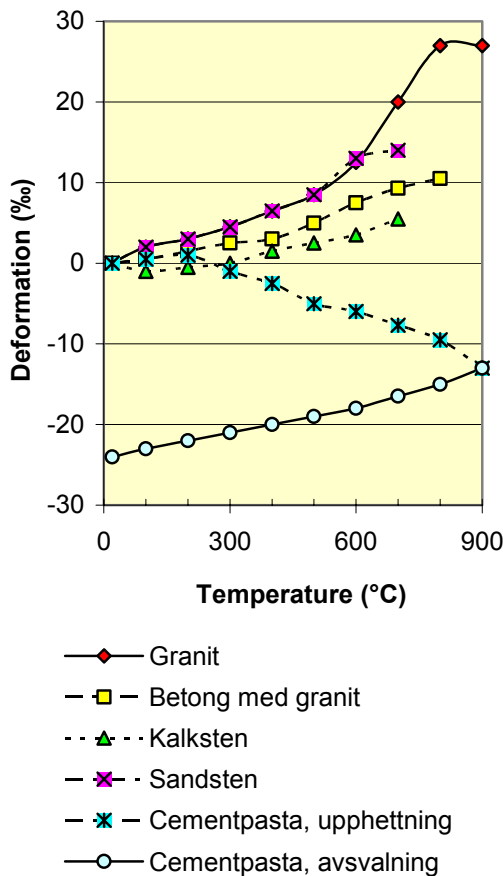
Temperaturutvidningskoefficienten inklusive krympning ökade således med RF före provning vilket troligen förklaras av att pormättnad nås tidigare vid hög RF i provet före provning än hos en torr provkropp vilket i sin tur ger ett högre portryck i prover som var fuktiga före provning än hos torra. För ett prov med 1.4 kg/m<sup>3</sup> ppf i stället för 0.7 kg/m<sup>3</sup> minskade  $\mu$  från 0.020 till 0.015%/°C troligen beroende på att fukten i SKB med 1.4 kg/m<sup>3</sup> ppf bättre kanaliserades ut ur provet än med 0.7 kg/m<sup>3</sup>. Det var även intressant att jämföra aktuella resultat med tidigare rön på området [27], Figur 4.4, Tabell 4.3. Tabell 4.3 visar beräknad temperaturutvidningskoefficient för området (20 °C < T < 500 °C) enligt Figur 4.3, dvs. uppmätta värden enligt [27] överensstämde väl med tidigare erfarenheter dock med en ny komplettering av vct/RF-beroendet för  $\mu$ , Figur 4.3.

Tabell 4.3 -  $\mu$  för området (20 °C < T < 500 °C).

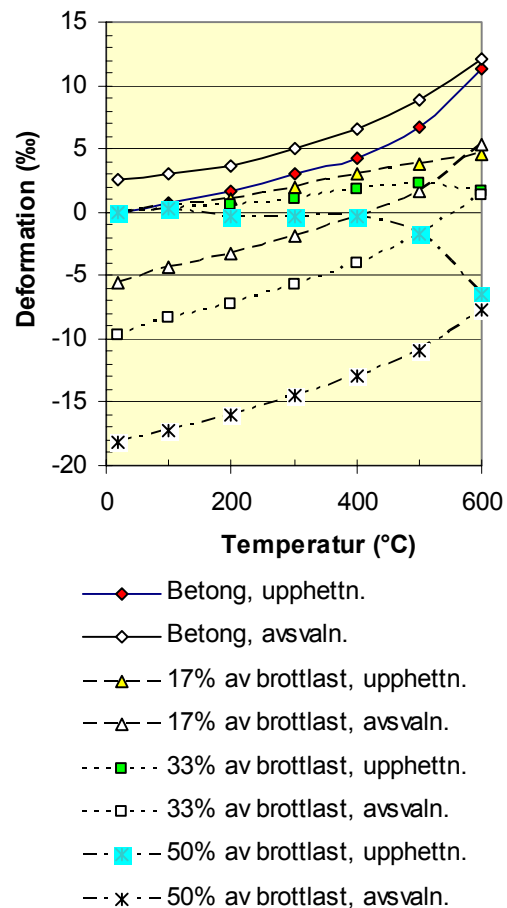
Material	Temperaturutvidningskoefficient (%/°C)
Granit	0.020
Betong med granit	0.014
Kalksten	0.009
Sandsten	0.021
Cementpasta, upphettning	-0.022
Cementpasta, avsvälning	0.011

### 4.3 Deformationer under last

Det var även intressant att skapa en jämförelse med tidigare resultat i fråga om deformation under last, Figur 4.5 [28].



Figur 4.4 – Temperaturdeformation versus temperatur för vissa betongmaterial [27].



Figur 4.5 – Deformationer under last med varierande andel av brottlast vid 20 °C [28].

#### 4.4 Specifik krypning

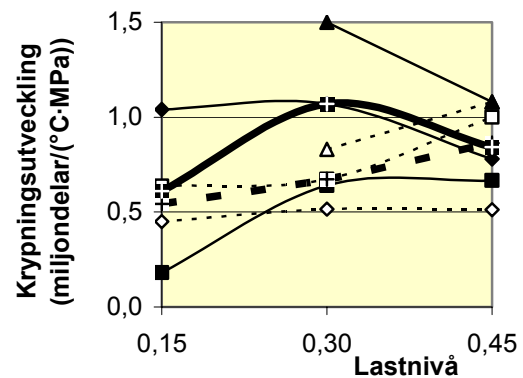
##### 4.4.1 Allmänt

Eftersom såväl deformationer med som utan last uppmättes kunde krypningen beräknas för de olika betongerna vid lastnivå varierande mellan 0 och 45% av brottlasten vid 20 °C, vilken beror av temperaturhöjningen exklusive temperaturutvidgningen exklusive krympningen. Temperaturutvecklingen i betongen var därför väsentlig: 450 °C/h (7.5 °C/min.). Deformationen hos betongerna var relativt linjär med temperaturen upp till kvartomvandling vid 575 °C varefter en betong utan last uppvisade en ökande expansion medan deformationen hos betong med last erhöles, med ökande last, minskande deformation vid ca 50% av brottlasten erhöles kompression hos betongen, Figur 4.5. Detta beror i sin tur på krypning hos cementpasta vilken var belastningsnivåberoende. I detta försök uppmätt deformation subtraherades först med temperaturutvidgningen, Tabell 4.1. Därefter dividerades resultatet med påkänningen varvid specifik krypning,  $J_T$ , erhöles beroende av temperatur och lastnivå, Figurerna 4.6-4.11. Ur Figurerna 4.6-4.11 beräknades specifik krypningsutveckling,  $d_{J_T}/dT$ , vid temperaturutvecklingen 450 °C/h för området upp till 500 °C betongtemperatur, dvs. en högsta temperatur intressant för betongkonstruktioner, Appendix 4.1. Med kännedom om specifik krypningsutveckling kan deformationer efter brand hos byggnader under varierande last beräknas. En jämförelse görs mellan specifik krypningsutveckling hos betonger, med och utan ppf i fråga om lastnivå, RF, vct och hållfasthet. I Appendix visas Figurerna 4.6-4.11 i större skala.

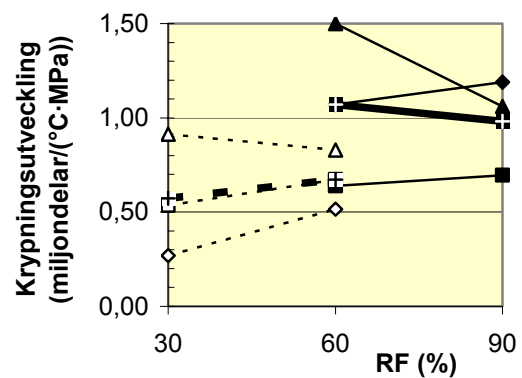
##### 4.4.2 Inverkan av lastnivå, RF, vct och hållfasthet på krypningsutveckling

För SKB utan ppf ökade krypningsutvecklingen med ökande lastnivå medan motsatsen uppmättes för SKB med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf, Figur 4.12. Mellan lastnivåer 30% och 45% av tryckhållfastheten var ökningen i krypningsutveckling utan ppf ca 50% medan motsvarande parameter för SKB med ppf minskade med ca 25% mellan lastnivåerna 30% och 45%. Oberoende av lastnivå ökade krypningsutvecklingen med ppf med ca 15% jämfört med SKB utan ppf. Figur 4.13 visar

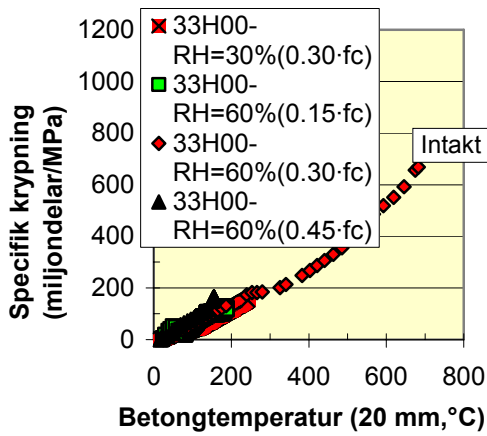
krypningsutvecklingen för betong med 30% lastnivå versus RF. Något beroende av RF kunde ej särskiljas däremot ökade krypningsutvecklingen med ca 70% för SKB med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf jämfört med SKB utan ppf, eftersom fuktrörelser i SKB under upphettningen blev större med ppf till följd av de kanaler i SKB som då bildades med ppf.



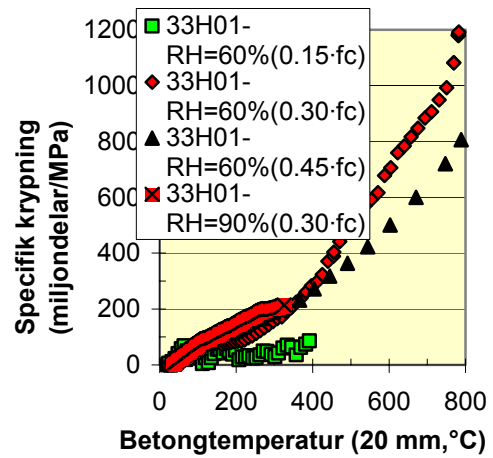
Figur 4.12 –Krypningsutveckling för SKB härdat vid RF = 60% vs lastnivå (0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf).



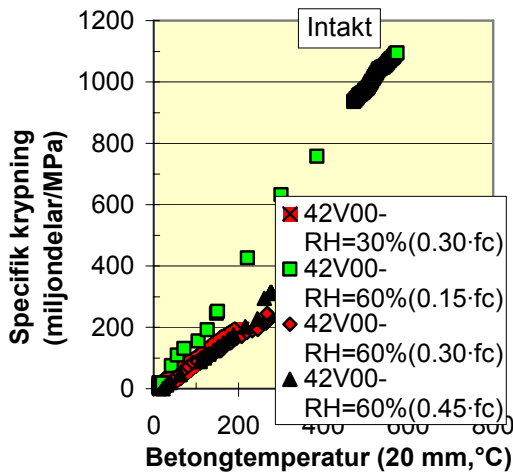
Figur 4.13 –Krypningsutveckling för SKB med 30% lastnivå versus RF. (0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf).



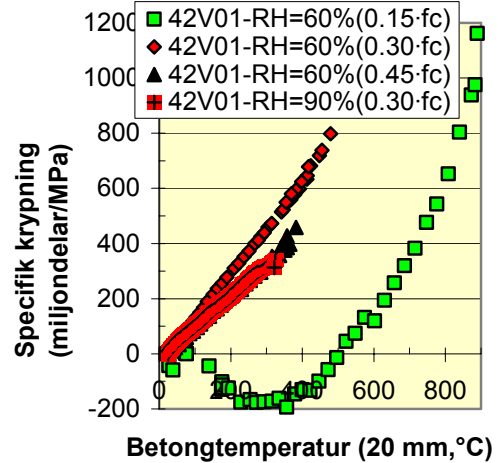
Figur 4.6 –Specifik krypning, btg 33H00.



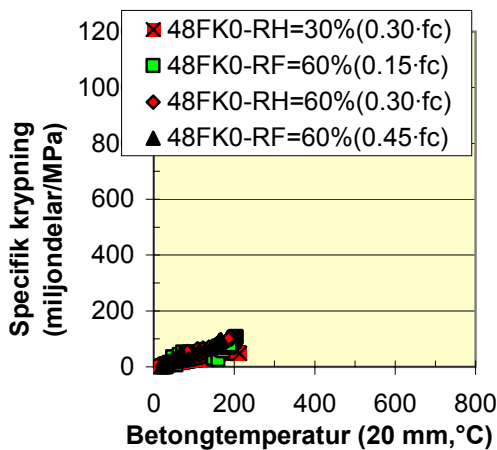
Figur 4.9 –Specifik krypning, btg 33H01.



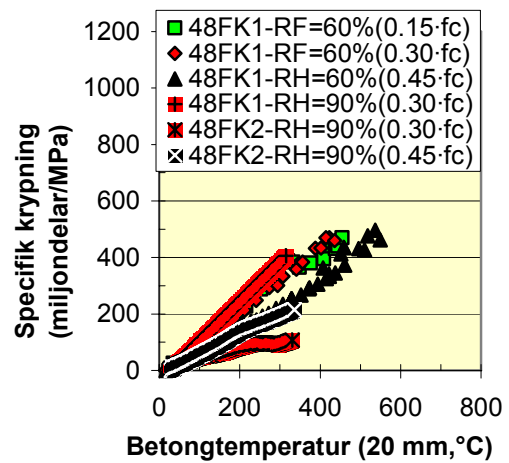
Figur 4.7 –Specifik krypning, btg 42V00.



Figur 4.10 –Specifik krypning, 42V01.



Figur 4.8 –Specifik krypning, btg 48FK0.



Figur 4.11 –Specifik krypning, 48FK1.

SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

Figur 4.14 visar krypningsutveckling hos SKB utan och med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf versus vct vid lastnivå varierande mellan 15% och 45%. Inget signifikant beroende av vct kunde konstateras – för SKB utan ppf minskade krypningsutvecklingen då vct ökade, för SKB med ppf ökade krypningsutveckling med ökande vct. Oberoende av vct och lastnivå ökade krypningsutvecklingen ca 15% med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf jämfört med krypningsutvecklingen i SKB utan ppf, Figur 4.14. Detta kan även bero av att betong med vct = 0.42 innehöll luftporbildare med lägre hållfasthet som följd. Figur 4.15 visar krypningsutvecklingen hos SKB utan och med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf versus cylinderhållfasthet vid lastnivå varierande mellan 15% och 45%. Inte heller i detta fall kunde ett signifikant samband konstateras. För SKB med 1.4 kg/m<sup>3</sup> uppmättes ca 35% krypningsutveckling av den för SKB med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf. Med 1.4 kg/m<sup>3</sup> ppf fördubblades krypningsutvecklingen då lastnivån ökades från 30% till 45% av cylinderhållfastheten vid 20 °C, Appendix 2.1 och 4.1. Krypningsutvecklingen minskande vid högre cylinderhållfastheten, från ca 1.2 miljonddelar/(°C·MPa) vid 40 MPa, till ca 0.8 miljonddelar/(°C·MPa) vid 60 MPa. Den ökande krypningsutvecklingen var signifikant då ppf tillfördes betongen vid i övrigt konstanta förhållanden.

4.4.3 Kryptal

För beräkning av deformationer är kryptalet,  $\phi$ , en i byggbranschen ofta använd parameter:

$$\phi = (\delta_T - \delta_{el}) / \delta_{el} \quad (4.2)$$

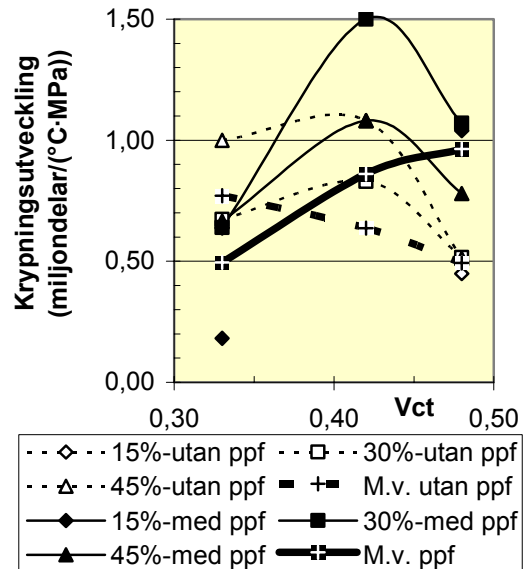
där

$\delta_T$  betecknar deformation under upphettning

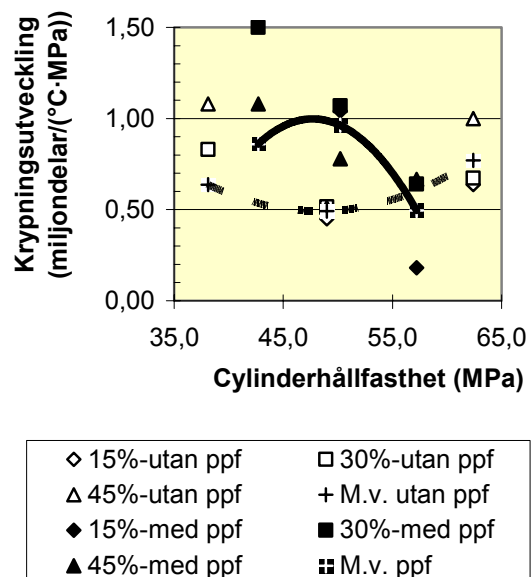
$\delta_{el}$  betecknar elastisk deformation vid 20 °C.

Enligt Figur 3.10 kan kryptal varierande mellan 2 och 6 förväntas mellan 200 °C och 600 °C hos normal betong. Beräkning av kryptal för de olika provade betongerna har genomförts enligt ekvation (4.2), Figurerna 4.16-4.21, med värden på upp  $\phi = 25$  eller, i något fall mer, beroende på att högre temperatur studerats, upp till 900 °C, jämfört med Figur 3.10 (upp till 600 °C). Skillnaden i kryptal mellan Figur 3.10 och erhållna resultat

beror också på att krypning för ökande temperatur studerats i detta fall medan Figur 3.10 avser stationära temperaturförhållanden [4]. I Appendix visas Figurerna 4.16-4.21 i större skala.

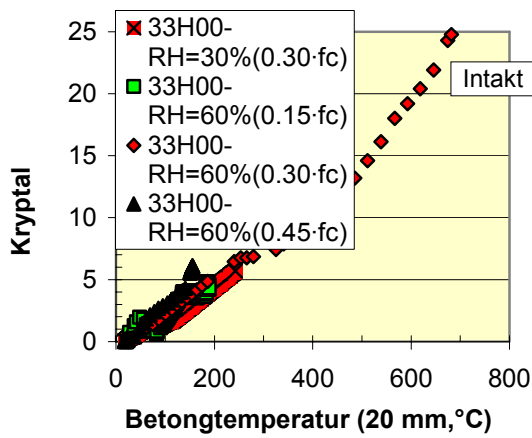


Figur 4.14 –Krypningsutveckling hos SKB utan och med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf versus vct. Lastnivå 15%-45%. RF = 60%. M.v. = medelvärde.

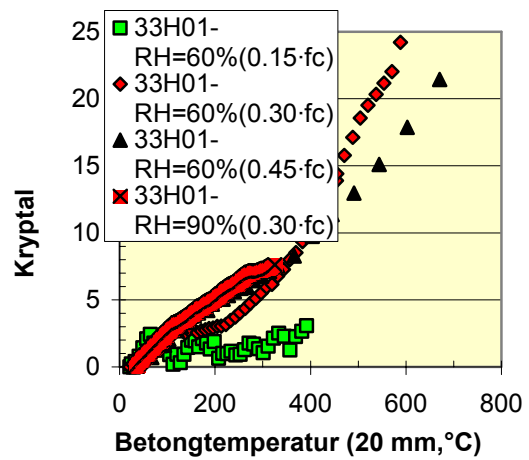


Figur 4.15 –Krypningsutveckling hos SKB utan och med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf versus cylinderhållfasthet. Lastnivå 15%-45%. RF = 60%.

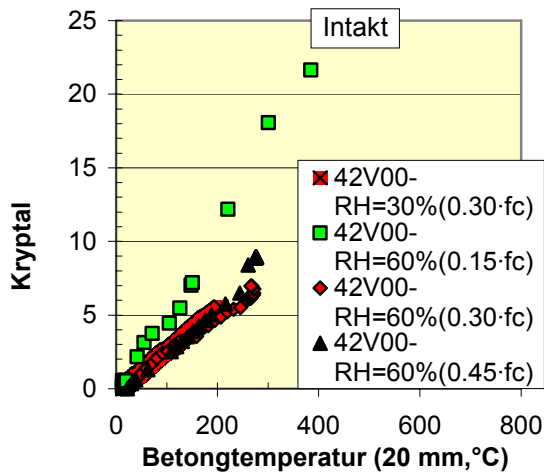




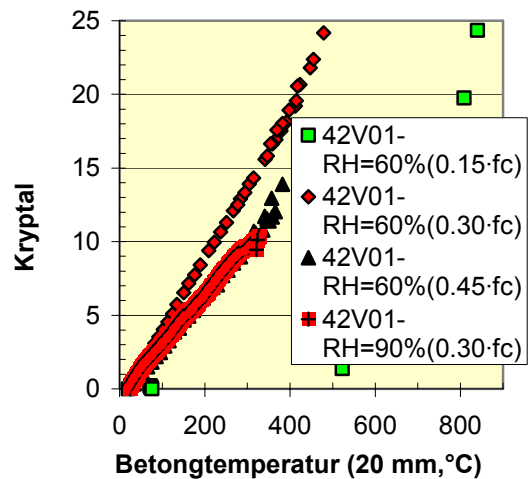
Figur 4.16 –Kryptal, betong 33H00.



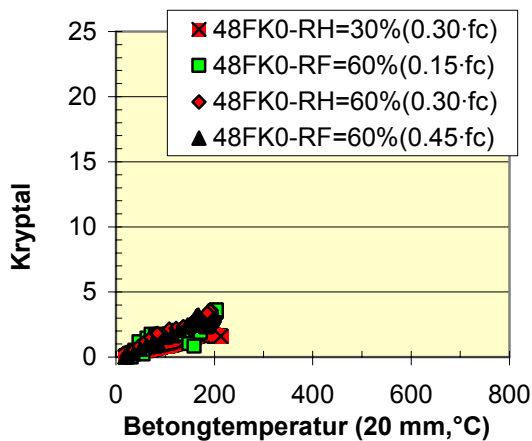
Figur 4.19 –Kryptal, betong 33H01.



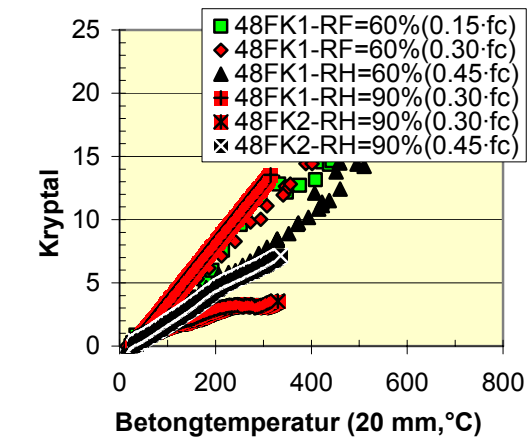
Figur 4.17 –Kryptal, betong 42V00.



Figur 4.20 –Kryptal, betong 42V01.



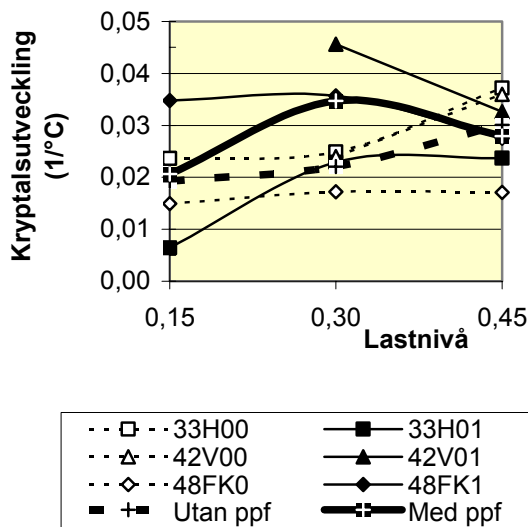
Figur 4.18 –Kryptal, betong 48FK0.



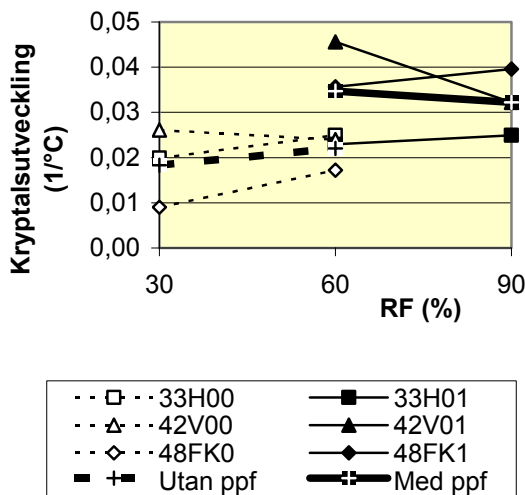
Figur 4.21 –Kryptal, betong 48FK1-2.

SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHalt - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

Kryptalsutvecklingen hos betong provad med temperaturutvecklingen 450 °C/h under 15%, 30% och 45% last av cylinderhållfasthet vid 20 °C (1°C) var av intresse vid bedömning av effekten av brand på konstruktioner. I Figurerna 4.22-4.25 redovisas effekt av lastnivå, RF, vct och hållfasthet på kryptalsutvecklingen, dvs. multiplikation med förväntad temperaturökning ger kryptalet. Kryptalsutvecklingen ökade ca 50% då lastnivå ökade från 15% till lastnivån 45%, Figur 4.22. Effekten av ppf på kryptalsutvecklingen vid olika lastnivåer var ej signifikant.

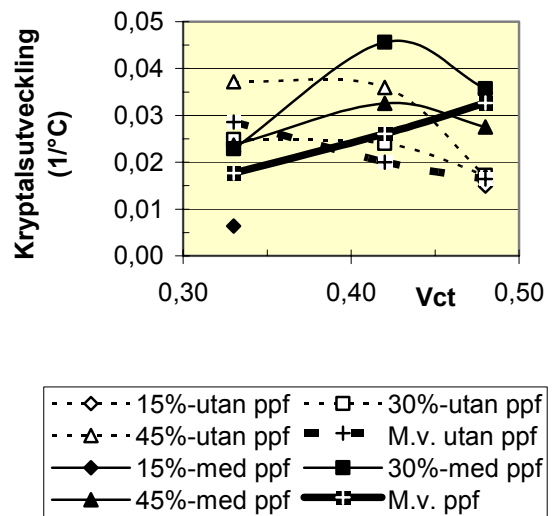


Figur 4.22 – Effekt av lastnivå på kryptalsutvecklingen. RF = 60% före provning.

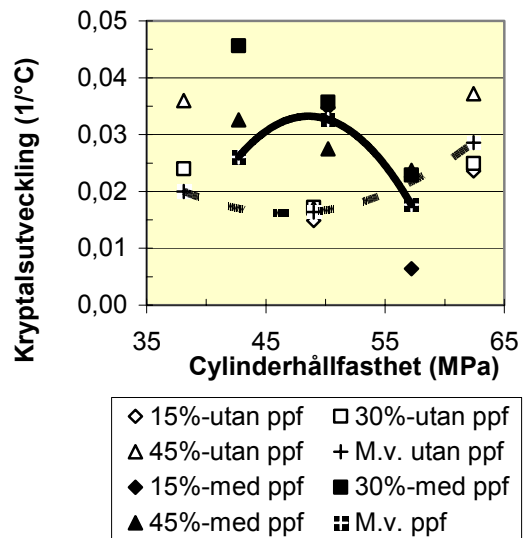


Figur 4.23 – Effekt av RF på kryptalsutvecklingen. Lastnivå: 30% av cylinderhållfast.

Kryptalsutvecklingen ökade ca 100%, då RF ökade från RF = 30% till RF = 90%, Figur 4.23. Effekten av ppf på kryptalsutvecklingen vid olika RF var signifikant, dvs. ca 50% större kryptalsutvecklingen med 0.7 kg/m<sup>3</sup> än utan ppf. Effekt av vct på kryptalsutvecklingen var motsäggelsefull, Figur 4.24, utan ppf minskar effekten av vct på kryptalsutvecklingen med ppf ökande vct medan motsatt förhållande gäller för SKB med 0.7 kg/m<sup>3</sup> ppf. Figur 4.25 visar liten effekt av hållfasthet på kryptalsutvecklingen.



Figur 4.24 – Effekt av vct på kryptalsutvecklingen. Lastnivå: 15%-45%. RF = 60%.



Figur 4.25 - Effekt av hållfasthet på kryptalsutvecklingen. Lastnivå: 15%-45%. RF = 60%



#### 4.4.4 Modellering

Figur 4.26 visar ett samband mellan temperaturutvidgningskoefficienten inklusive krympning för SKB enligt följande, ekvation (4.1) (%/°C):

$$\mu = [0.014 \cdot (vct)^2 - 0.011 \cdot vct + 0.0022] \cdot RF - 0.97 \cdot (vct)^2 + 0.76 \cdot vct - 0.133$$

$$\{0.30 < vct < 0.50; 30\% < RF < 90\} \quad (4.3)$$

Förutsatt att temperaturstegringen i betongen uppgick till 450 °C/h fanns två samband mellan kryptalsutvecklingen,  $d\phi/dT$ , lastnivå och RF före provning (exklusive temperaturutvidgningen inklusive krympningen, ekvation (4.1), 1/°C):

$$d\phi/dT = 0,030 \cdot [(\sigma/fc) + 0,56]$$

$$\{0.15 < \sigma/fc < 0.45; R^2=0.81\} \quad (4.4)$$

$$d\phi/dT = 0,00023 \cdot [RF + 54]$$

$$\{30 < RF < 90\%; R^2=0.96\} \quad (4.5)$$

Exempel för 200 °C temperaturökning:

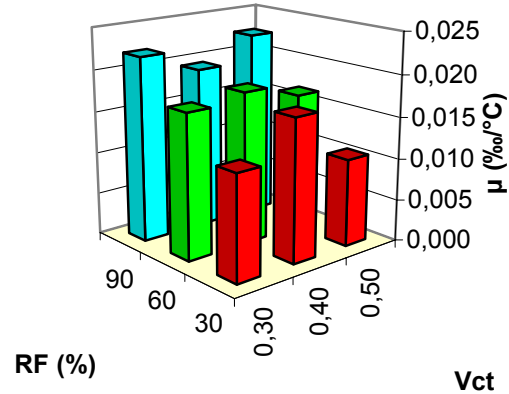
$\sigma/fc = 0.30 \Rightarrow \phi = 0.03 \cdot (0.3 + 0.56) \cdot 200 = 5.16$   
 $RF = 60\% \Rightarrow \phi = 0.00023 \cdot (60 + 54) \cdot 200 = 4.78$ ,  
 dvs. tämligen lika resultat med ekvationerna (4.4) och (4.5). Ett alternativt samband mellan kryptalsutvecklingen,  $d\phi/dT$ , vid en temperaturutveckling av 450 °C/h hos SKB utan fibrer förlagrad vid RF = 60% visas i Figur 4.27 från Appendix 4.2 och följande samband (1/°C):

$$d\phi/dT = (-0.219 \cdot (\sigma/fc) - 0.011) \cdot vct + 0.127 \cdot (\sigma/fc) + 0.0173$$

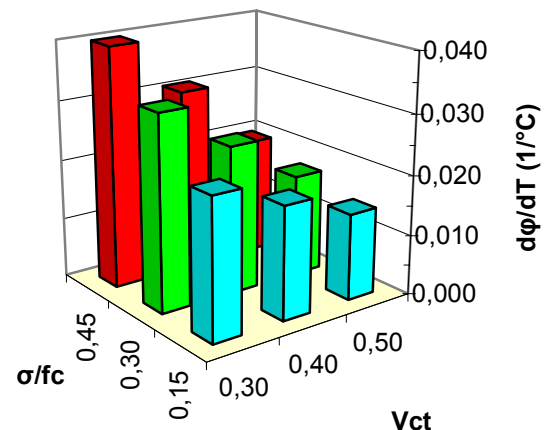
$$\{0.30 < vct < 0.50; 0.15 < \sigma/fc < 0.45\} \quad (4.6)$$

$\sigma/fc$  betecknar lastnivån före provning.

Kryptalet erhålls genom multiplikation med temperaturhöjningen i betongen, företrädesvis upp till 250 °C eftersom få SKB utan fibrer ej klarade högre temperatur vid snabb upphettning. Figur 4.27 visar kryptalsutvecklingen i SKB utan fibrer. Av Figur 4.27 framgår att kryptalsutvecklingen i SKB utan fibrer ökade för lägre vct.



Figur 4.26 - Temperaturutvidgningskoefficienten inklusive krympning, (20 °C < T < 500 °C).



Figur 4.27 - Kryptalsutvecklingen,  $d\phi/dT$ , vid en temperaturutveckling av 450 °C/h hos SKB utan fibrer förlagrad vid RF = 60%.

Skillnaden i krypning mellan ytan av betongen och dess inre delar blev då större än vid högre vct. Detta kan vara en förklaring till varför betong med lägre vct har en större tendens till spjälkning än betong med högre vct, att förskjuvningskrafter uppstår inom betongen till följd av större skillnader i deformation mellan ytan och betongens inre än om betong med högre

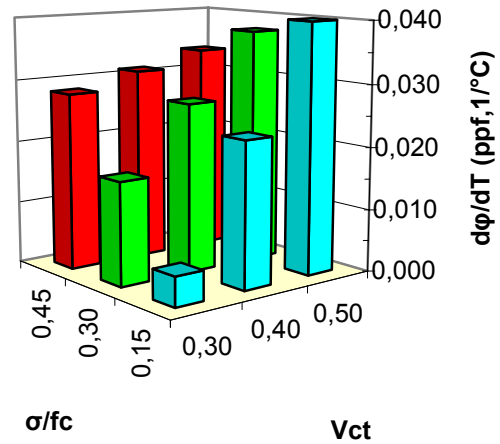
SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

vct studeras. Eftersom krypning och fukttransport är synonyma begrepp är ett högre krytpal ett tecken på att fukt förhindras att transporteras i betongen, mer vid lägre vct än vid högre. Ett samband mellan krytpalsutvecklingen vid temperaturutvecklingen av 450 °C/h hos SKB med fibrer härdad vid RF = 60% visas i Figur 4.28 från Appendix 4.2 och följande samband (1/°C):

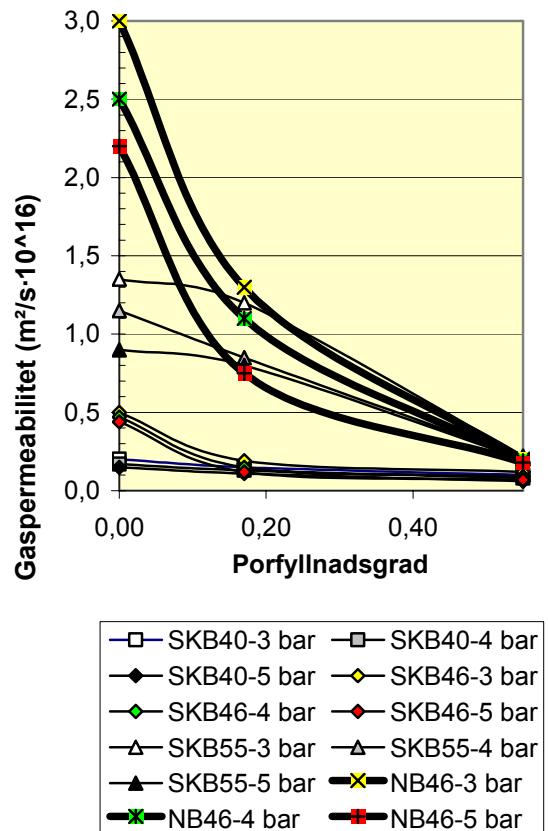
$$d\phi/dT = (-0.53 \cdot (\sigma/fc) + 0.265) \cdot vct + 0.238 \cdot (\sigma/fc) - 0.0868$$

$$\{0.30 < vct < 0.50; 0.15 < \sigma/fc < 0.45\} \quad (4.7)$$

Krytpal erhålls genom multiplikation med temperaturhöjningen i betongen, upp till 500 °C. Av Figur 4.28 framgår tydligt att krytpalsutvecklingen i SKB med fibrer minskade för SKB med lägre vct, dvs. skillnaden i krypning mellan ytan av betongen och dess inre delar blev då mindre än vid högre vct. Detta är den troligaste förklaringen till varför betong med fibrer vid lägre vct har en mindre tendens till spjälkning än betong utan fibrer, att förskjuvningskrafter uppstår inom betongen till följd av mindre skillnader i deformation mellan ytan och betongens inre än om betong utan fibrer studeras. Eftersom krypning och fukttransport är synonyma begrepp är ett lägre krytpal ett tecken på att fukt kanaliseras att transporteras genom betongen, mer vid lägre vct än vid högre. Därav det lägre krytpalet för betong med fibrer än utan fibrer. Kanaliseringen av fukt med fibrer blir en ersättning för de sämre fasgränser som vibrerad betong har jämförts med SKB, Figur 4.29 [29], vari visas att gaspermeabiliteten i SKB endast uppgår till ca 20% av den som uppmäts för vibrerad, normal betong. I normal betong vibreras cementpasta och ballast/grus/sand inbördes så att vatten ansamlas närmast fasgränsen med högre vct i fasgränsen än i betongen i övrigt som följd. Detta är inte fallet för SKB som har perfekta fasgränser med hög beständighet och hållfasthet jämfört med normal betong men också sämre motståndskraft vid höga temperaturer eftersom fukt stängs inne i och med goda fasgränser i SKB.



Figur 4.28 - Krytpalsutveckling,  $d\phi/dT$ , vid temperaturutveckling 450 °C/h hos SKB med fibrer.



Figur 4.29 - Gaspermeabilitet i SKB vs porfyllnadsgrad [29]. NB 46 = normal betong, vct (%).

## 5. Slutsatser

Följande slutsatser drogs av projektet:

- Inblandning av ppf var ett synnerligen effektivt sätt att undvika explosiv spjälkning hos SKB vid hög temperatur. Beständigheten hos plastfiberbetong bör dock undersökas före det att en generell användning kan rekommenderas.
- Vid härdning vid RF = 30% före provningen ( $RF_{inre} = 60\%$ ), motsvarande fuktkvoten,  $u = 2.7\%$ , exploderade samtliga SKB utan ppf vid upphettning.
- Vid härdning vid RF = 60% före provningen motsvarande  $u$  varierande mellan 3.1% och 3.8%,  $u_{medel} = 3.4\%$ , exploderade så gott som samtliga SKB vid snabb upphettning. För SKB med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  18  $\mu\text{m}$  ppf undveks spjälkning under i övrigt konstanta förhållanden.  $u$  varierande då mellan 3.0% och 3.6%,  $u_{medel} = 3.3\%$ . Samma betong, samma upphettning utveckling, etc., som vid provning utan ppf användes för SKB med ppf.
- Vid härdning vid RF = 90% före provningen med  $u = 4.1\%$ , exploderade samtliga SKB som inte innehöll ppf, medan spjälkning undveks i SKB med inblandning av  $0.7 \text{ kg/m}^3$  18  $\mu\text{m}$  ppf.
- Tidigare för normal betong känd kombination av fukt/påkänning avseende risk för explosiv spjälkning vid hög temperatur gäller ej alls för SKB.
- Temperaturutvidgningskoefficienten inklusive krympningen,  $\mu$ , för SKB mellan 20 °C och 600 °C, varierande mellan  $\mu = 0.015\%/^{\circ}\text{C}$ , vid RF = 30% i betongen före provning, och  $\mu = 0.02\%/^{\circ}\text{C}$ , vid RF = 90% före provning.
- För SKB med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  ppf erhöles  $\mu = 0.02$  vid RF = 90% före provning medan SKB med  $1.4 \text{ kg/m}^3$  ppf erhöles  $\mu = 0.015$  (RF = 90%).
- Kryptalsutvecklingen minskade då  $0.7 \text{ kg/m}^3$  ppf tillfördes SKB jämfört med motsvarande parameter i SKB utan ppf vid i övrigt konstanta förhållanden.
- Effekten av lastnivå på kryptalsutvecklingen var tydlig, ca 50% ökning från lastnivå 15% till nivån 45%.
- Effekten av RF före provning på kryptalsutvecklingen var också tydlig, ca 100% ökning från RF = 30% till RF = 90%.
- Effekten av ppf på kryptalsutvecklingen vid olika RF före provning var signifikant, dvs. ca 50% lägre kryptalsutveckling i SKB med  $0.7 \text{ kg/m}^3$  än i SKB utan ppf.

**Referenser**

1. Bertil Persson. Self-Compacting Concrete at Fire Temperatures. Rapport TVBM-3110. ISBN 91-631-3301-6, LTH Byggnadsmaterial. 2003, 200 sid.
2. Gunnar Rise. Svenska Betongföreningens brandkommitté. Cement- och Betonginstitutets informationsdag. 2004.
3. Gabriel Alexander Houry, Passive Fire Protection in Tunnels. Imperial College. Concrete. 2002, 26 sid.
4. Adam M. Neville, J.J. Brooks, Concrete Technology, Longman, Singapore, 1987.
5. Long Phan, High-Strength Concrete at High Temperature. Symposium on Utilization of HPC, Ed.: de Larrard, F., Lacroix, R., Paris, 1996, 501-518.
6. Lars Boström. SKB med ppf klarar brand. Brandposten no 26. SP. 2002, 15.
7. Bertil Persson. High Performance Self Compacting Concrete. Red.: König, Dehn och Faust. 2002, 1273-1290.
8. Boström, L., SKB utsatt för brand. Bygg & Teknik. 2002/06, 36-38.
9. Bertil Persson. Self Compacting Concrete with High Performance. Nordic Concrete Research. Helsingör. Norsk Betongförening. Oslo. 2002, 327-330.
10. Lars Boström. SKB med ppf klarar brand. Betong 3/2002, 32.
11. Bertil Persson. SKB motståndskraftig mot sprickbildning och brand. Husbyggaren 4/2002, 10-16.
12. Lars Boström. The Performance of Some Self Compacting Concrete when Exposed to Fire. 2002:23. SP, 37 sid.
13. Gunnar Rise. Personlig information. Strängbetong AB. Nacka. 2003.
14. Bertil Persson. Hållbarhet hos SKB med kalkstensfiller. Bygg & Teknik 07/2002, 35-38.
15. Bertil Persson. Förebygger ppf explosiv spjälkning vid hög temperatur även hos SKB? Husbyggaren 2/2002, 26-30.
16. Yngve Anderberg. Personlig information. Fire Safe Design, Lund. 2002.
17. Bertil Persson. Chloride Migration Coefficient of Self-Compacting Concrete. Materials and Structures. 37. 2004, 82-91.
18. Jan Lillieblad. Personlig information. A-betong Precon. Växjö. 2002.
19. Bertil Persson. Självkompakterande husbyggnadsbetong i Okayama, Japan – och i Malmö. Husbygg 2/99. 1999, 6-13.
20. Bertil Persson. Brandspjälkning i betong kan undvikas. Husbygg. 2/2003, 18-28.
21. Workshop, Brandsäkerhet hos SKB, CEMBUREAU, Bryssel, CD-rom. 2003.
22. Henk Vanwalleghem. Fire Tests on SCC Cylinders for Dutch CUR 120 Committee. Workshop, Brandsäkerhet hos SKB, CEMBUREAU, Bryssel, 2003.
23. Fabienne Robert, Characterisation of SCC in Fire, *ibid*.
24. Patrick Sullivan, UK Experience of SCC in Fire, *ibid*.
25. Tom Lennon, Bailey, C., Clayton, N., Performance of High Grade Concrete Columns in Fire, Symposium on Utilization of HPC. Ed.: König, G., Dehn, F., Faust, T., Leipzig. 2002, 341-353.
26. DAfStb-Richtlinie "Selbstverdichtender Beton", Beuth Verlag, Berlin, 2001.
27. K., Nekrassow, Influence of Temperature on the Physical-Mechanical Properties of Concrete, "Einfluss hoher Temperaturen auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaftens des Betons, Symposium Feuerwiderstandsfähigkeit von Spannbeton, Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin, 1966, 67-74.
28. Sven Thelandersson, Effect of the Temperatures on Tensile Strength of Concrete, Bulletin 26, Div. Structural Mechanics and Concrete Construction, Nordisk Betong 1972:2, 1972, 28 sid.
29. Geert de Schutter, K. Audenart, V. Boel, L. Vandewalle, G. Heirman, J. Vantomme, J. D'Hemricourt, Transport Properties in Self-Compacting Concrete and Relation with Durability: Overview of a Belgian Research Project, 3rd International Conference on SCC, Reykjavik, 799-807.

**APPENDIX**

**Appendix 1 – Spjälkad betongcylinder utan ppf. Foto: Stefan Backe.**

**Appendix 2.1 – Sammansättning och egenskaper hos betongerna (kg/m<sup>3</sup>, etc.)**

**Appendix 3.1 – Temperaturutveckling för betong utan ppf**

**Appendix 3.2 – Temperaturutveckling för betong med ppf**

**Appendix 3.3 - Explosioner för SKB utan ppf, härdning vid RF = 30% eller RF = 60% (13 exploderade prov – 3 intakta prov)**

**Appendix 3.4 – Tid efter pålastning samt ugnens temperatur vid explosion (°C) hos prover härdade vid RF = 30%**

**Appendix 3.5 – Tid efter pålastning samt betongtemperatur på 20 mm:s djup vid explosion (°C) hos prover härdade vid RF = 30%**

**Appendix 3.6 - Betongtemperatur vid explosion versus hållfasthetsklass och påkänningsnivå hos prover härdade vid RF = 30%**

**Appendix 3.7 – Tid efter pålastning samt ugnens temperatur vid explosion (°C) hos prover härdade vid RF = 60%**

**Appendix 3.8 – Tid efter pålastning samt betongtemperatur vid explosion (°C) hos prover härdade vid RF = 60%**

**Appendix 3.9 - Betongtemperatur versus hållfasthetsklass och påkänningsnivå hos prover härdade vid RF = 60%**

**Appendix 3.10 – Intakta prover för betong med ppf (18 intakta prov)**

**Appendix 3.11 – Betong provad under 15%, 30% och 45% last av cylinderhållfasthet vid 20 °C -beteckningar**

**Appendix 4.1 – Specifik krypningsutveckling hos betong provad med temperaturutvecklingen 450 °C under 15%, 30% och 45% last av cylinderhållfasthet vid 20 °C (miljondelar/(MPa·°C))**

**Appendix 4.2 –Kryptalsutveckling hos betong provad med temperaturutvecklingen 450 °C/h under 15%, 30% och 45% last av cylinderhållfasthet vid 20 °C (1/°C)**

**Appendix 4.3 - Specifik krypning, btg 33H00**

**Appendix 4.4 - Specifik krypning, btg 33H01**

**Appendix 4.5 - Specifik krypning, btg 42V00**

**Appendix 4.6 - Specifik krypning, btg 42V01**

**Appendix 4.7 - Specifik krypning, btg 48FK0**

**Appendix 4.8 - Specifik krypning, btg 48FK1-2**

**Appendix 4.9 - Kryptal, btg 33H00**

**Appendix 4.10 - Kryptal, btg 33H01**

**Appendix 4.11 - Kryptal, btg 42V00**

**Appendix 4.12 - Kryptal, btg 42V01**

**Appendix 4.13 - Kryptal, btg 48FK0**

**Appendix 4.14 - Kryptal, btg 48FK1-2**

**Appendix 4.15 – Expansion utan last versus betongtemperatur, 20 mm (‰)**



**Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund**

**SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHalt - EXPLOSIV  
SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR**

---

**Appendix 1 – Spjälkad betongcylinder utan ppf. Foto: Stefan Backe**



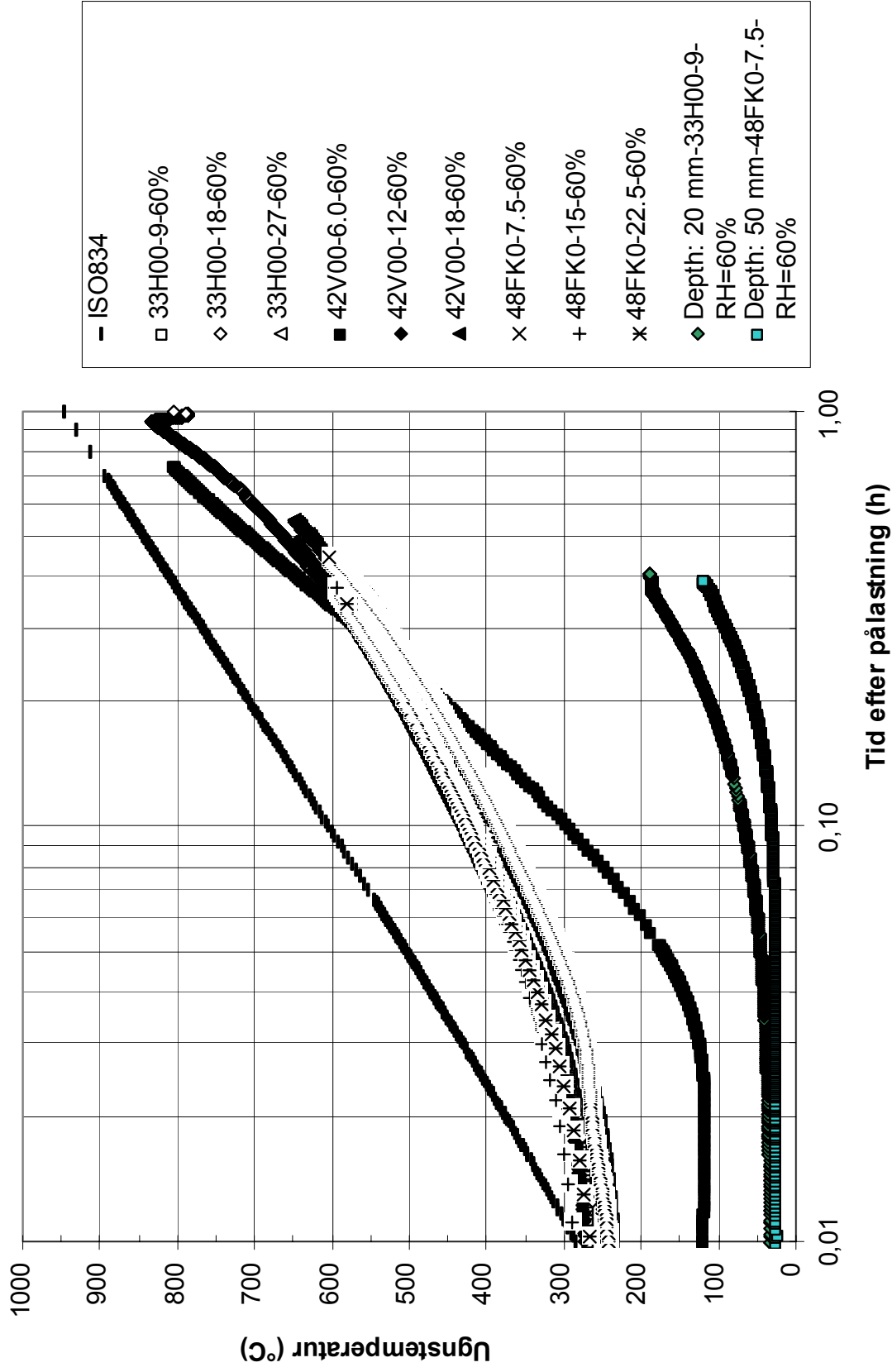
**Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund**

**SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR**

**Appendix 2.1 – Sammansättning och egenskaper hos betongerna (kg/m<sup>3</sup>, etc.)**

Betong	33H00	33H01	42V00	42V01	48FK0	48FK1	48FK2
Makadam 11-16 mm			557	557			
Makadam 8-11 mm	809	803			700	697	694
Makadam 4-8 mm			222	222			
Naturgrus 0-8	969	962	893	892	1050	1045	1041
Kalkstensfiller					20	20	23
Byggcement	456	453	426	426	387	385	389
Luftporbildare			0.138	0.138			
Viskositetsmedel			1.8	1.8			
Flytmedel	5.4	5.4	4.3	4.3	3.2	3.8	3.8
Vatten	150	156	177	177	185	188	187
Vct	0.33	0.34	0.42	0.42	0.48	0.49	0.48
Ppf		0.7		0.7		0.7	1.4
Densitet	2386	2377	2277	2277	2344	2338	2337
Torrdensitet	2233	2217	2096	2096	2157	2147	2148
Portlandcement/pulvermängd	0.86	0.86	0.86	0.86	0.82	0.82	0.81
Byggcement/torrdensitet	0.26	0.26	0.25	0.25	0.22	0.22	0.22
Ballast/torrdensitet	0.80	0.80	0.80	0.80	0.81	0.81	0.81
Ballast/Byggcement	3.90	3.90	3.92	3.92	4.52	4.52	4.46
Ballast/Portlandcement	4.53	4.53	4.56	4.56	5.26	5.26	5.19
Flytsättningsmått (mm)	720	670	650	600	680	630	600
Lufthalt (%)	3	3	5	5	2	2	2
Provningsålder hållf. (mån.)	8	8	10	10	10	10	10
Cylinderhållfasthet (Ø100 mm,MPa)	62.4	57.2	38.1	42.7	49	50.2	48.4
Kubhållfasthet (100 mm,MPa)	86.6	79.5	53	59.2	68	69.9	67.2
Ugnsprovning (mån.), RF = 30%	12	-	14		14		
RF = 60%	10	10	12	12	12	12	
RF = 90%		13		15		15	15
Fuktkvot (%), RF = 30%							4.1
RF = 60%	3.1	3.6	3.8	3	3.7	3.1	3.2
RF = 90%							2.7
Elasticitetsmodul, beräknad (ACI,GPa)	37.1	35.5	29.0	30.7	32.9	33.3	32.7
Elastisk deformation, beräknad (ACI,miljondelar)	26.9	28.1	34.5	32.6	30.4	30.0	30.6

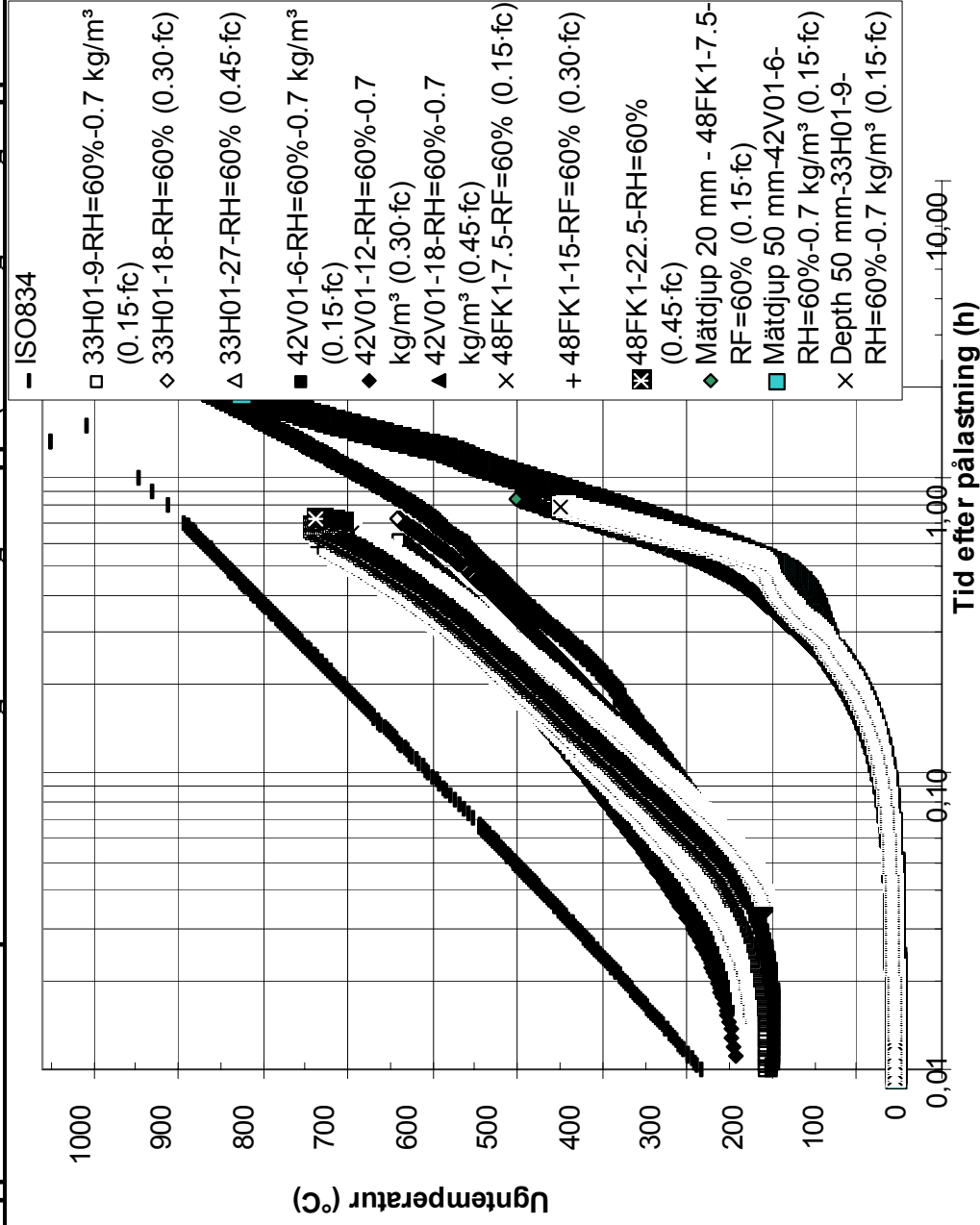
Appendix 3.1 – Temperaturutveckling för betong utan ppf (beteckningar enligt Appendix 2.1, -6- = påkänning)





Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund  
 SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

Appendix 3.2 – Temperaturutveckling för betong med ppf (beteckningar enligt Appendix 2.1, -6- = påkänning)



## Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund

### SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR

#### **Appendix 3.3 - Explosioner för SKB utan ppf, härdning vid RF = 30% eller RF = 60% (13 exploderade prov – 3 intakta prov)**

Betong/RF	C40 (42V)	C50 (48FK)	C60 (33H)
30%, 0·fc	Explosion	Explosion	Explosion
30%, 0.30·fc	Explosion	Explosion	Explosion
60%, 0·fc	Intakt	-	-
60%, 0.15·fc	Intakt*	Explosion	Explosion
60%, 0.30·fc	Explosion	Explosion	Intakt
60%, 0.45·fc	Explosion	Explosion	Explosion

Beteckningar: C40 (42V) = cylinderhållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, RF = relativ fuktighet, yttre, V = Vislanda, 42 = vct, \* = långsam upphettning (förstaprov).

#### **Appendix 3.4 – Tid efter pålastning samt ugnens temperatur vid explosion (°C) hos prover härdade vid RF = 30%**

Tid (min)	33H00-0-30%	33H00-18-30%	42V00-0-30%	42V00-12-30%	48FK0-0-30%	48FK0-15-60%
28	630					
25		628				
33			619			
16				608		
27					619	
23						608

Beteckningar: C40 (42V) = cylinderhållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, RF = relativ fuktighet, yttre, V = Vislanda, 42 = vct.

#### **Appendix 3.5 – Tid efter pålastning samt betongtemperatur på 20 mm:s djup vid explosion (°C) hos prover härdade vid RF = 30%**

Tid (min)	33H00-0-30%	33H00-18-30%	42V00-0-30%	42V00-12-30%	48FK0-0-30%	48FK0-15-60%
28	247					
25		243				
33			229			
16				212		
27					229	
23						213

Beteckningar: C40 (42V) = cylinderhållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, RF = relativ fuktighet, yttre, V = Vislanda, 42 = vct.

#### **Appendix 3.6 - Betongtemperatur vid explosion versus hållfasthetsklass och påkänningsnivå hos prover härdade vid RF = 30%**

Betong	C40 (42V)	C50 (48FK)	C60 (33H)
0·fc	247	229	229
0.30·fc	243	207	213

Beteckningar: C40 (42V) = cylinderhållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, RF = relativ fuktighet, yttre, V = Vislanda, 42 = vct.

**Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund**

**SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR**

**Appendix 3.7 – Tid efter pålastning samt ugnens temperatur vid explosion (°C) för prover härdade vid yttre relativ fuktighet, RF = 60%.**

Tid (min)	33H00-9-60%	33H00-27-60%	42V00-12-60%	42V00-18-60%	48FK0-7.5-60%	48FK0-15-60%	48FK0-22.5-60%
25	595						
22		560					
29			644				
33				650			
27					601		
23						592	
21							578

C40 (42V) = hållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, V = Vislanda, 42 = vct.

**Appendix 3.8 – Tid efter pålastning samt betongtemperatur vid explosion (°C) för prover härdade vid RF = 60%**

Tid (min)	33H00-9-60%	33H00-27-60%	42V00-12-60%	42V00-18-60%	48FK0-7.5-60%	48FK0-15-60%	48FK0-22.5-60%
25	195						
22		155					
29			270				
33				281			
27					203		
23						191	
21							174

C40 (42V) = hållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, V = Vislanda, 42 = vct.

**Appendix 3.9 - Betongtemperatur versus hållfasthetsklass och påkänningsnivå för prover härdade vid RF = 60%**

Betong	C40 (42V)	C50 (48FK)	C60 (33H)
0.15		203	195
0.30	270	191	
0.45	281	174	155
Vct	0.42	0.48	0.33

C40 (42V) = hållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, V = Vislanda, 42 = vct.

**Appendix 3.10 – Intakta prover för betong med ppf (18 intakta prov)**

Betong/ RF/påkänning	C40 (42V01) - 0.7	C50 (48FK01) - 0.7	C50 (48FK02) -1.4	C60 (33H) -0.7
60%, 0.15·fc	Intakt	Intakt		Intakt
60%, 0.30·fc	Intakt	Intakt		Intakt
60%, 0.45·fc	Intakt	Intakt		Intakt
90%, 0·fc	Intakt	Intakt	Intakt	Intakt
90%, 0.30·fc	Intakt	Intakt	Intakt	Intakt
90%, 0.45·fc			Intakt	

C40 (42V) = hållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, V = Vislanda, 42 = vct.

**Lunds Tekniska Högskola, Avdelning Byggnadsmaterial, Lund**

**SJÄLVKOMPakterande BETONG MED LÅG FILLERHALT - EXPLOSIV SPJÄLKNING VID HÖG TEMPERATUR**

**Appendix 3.11 – Betong provad under 15%, 30% och 45% last av cylinderhållfasthet vid 20 °C - beteckningar**

Betong	Lastnivå	33H00	33H01	42V00	42V01	48FK0	48FK1	48FK2
Cylinderhållfasthet		60	60	40	40	50	50	50
<u>RF = 30%</u>	30%	33H00-141		42V00-94		48FK0-117		
<u>RF = 60%</u>	15%	33H0071	33H0171	42V0047	42V0147	48FK059	48FK159	
	30%	33H00141	33H01141	42V0094	42V0194	48FK0118	48FK1118	
	45%	33H00212	33H01212	42V00141	42V01141	48FK0177	48FK1177	
<u>RF = 90%</u>	30%		33H01-144		42V01-94		48FK1-118	48FK2-118
	45%							48FK2-177

C40 (42V) = hållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, V = Vislanda, 42 = vct. 141 = last (kN).

**Appendix 4.1 – Specifik krypningsutveckling hos betong provad med temperaturutvecklingen 450 °C/h under 15%, 30% och 45% last av cylinderhållfasthet vid 20 °C (miljondelar/(MPa·°C))**

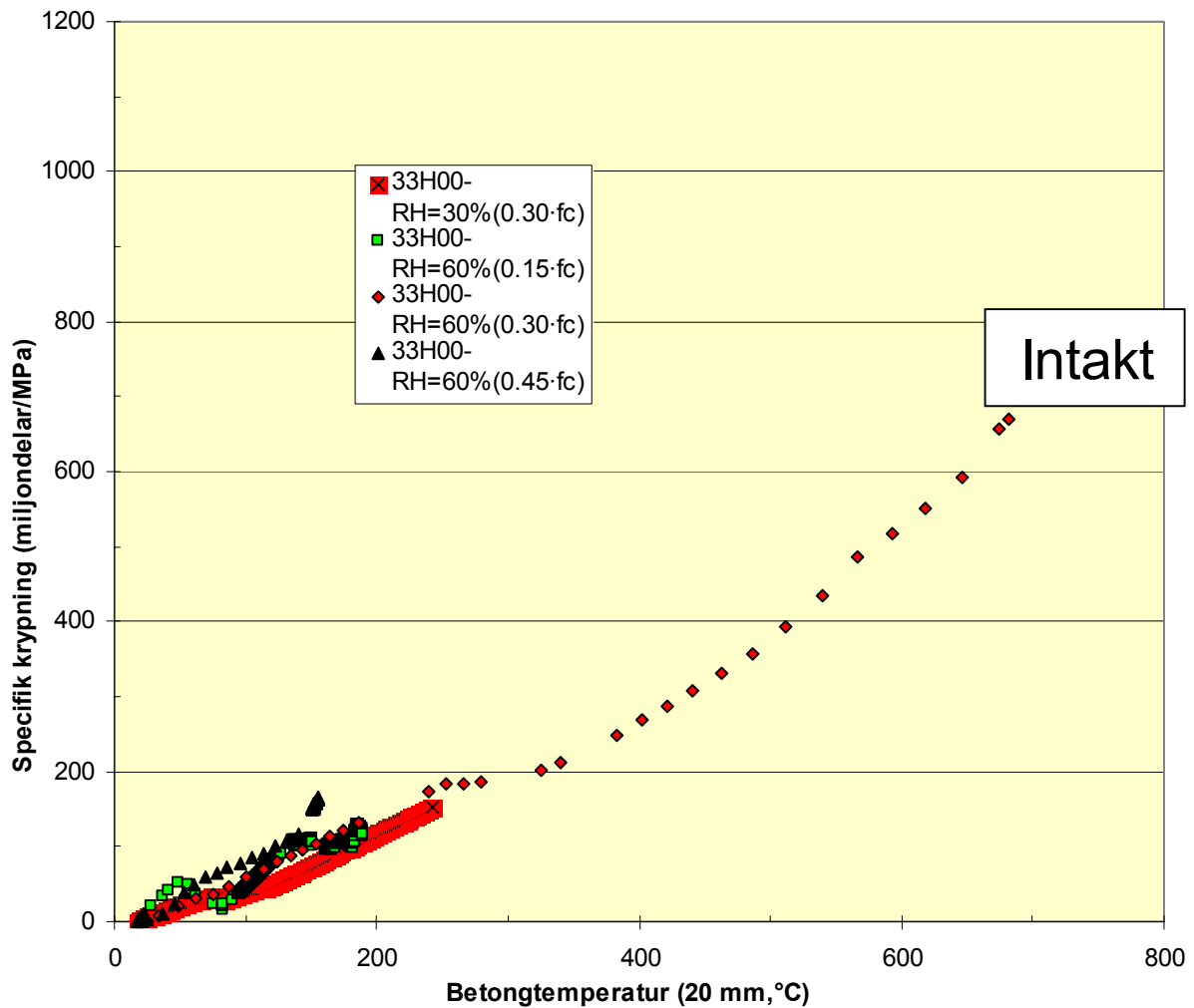
Betong	Lastnivå	33H00	33H01	42V00	42V01	48FK0	48FK1	48FK2
Cylinderhållfasthet (MPa)		62.4	57.2	38.1	42.7	49	50.2	48.4
<u>RF = 30%</u>	30%	0.535		0.914		0.270		
<u>RF = 60%</u>	15%	0.637	0.181	(1.960)	(-0.037)	0.449	1.040	
	30%	0.673	0.640	0.830	1.500	0.516	1.070	
	45%	1.000	0.666	1.080	1.080	0.512	0.779	
<u>RF = 90%</u>	30%		0.696		1.060		1.190	0.389
	45%							0.639

C40 (42V) = hållfasthet 40 MPa, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, V = Vislanda, 42 = vct. 141 = last (kN).

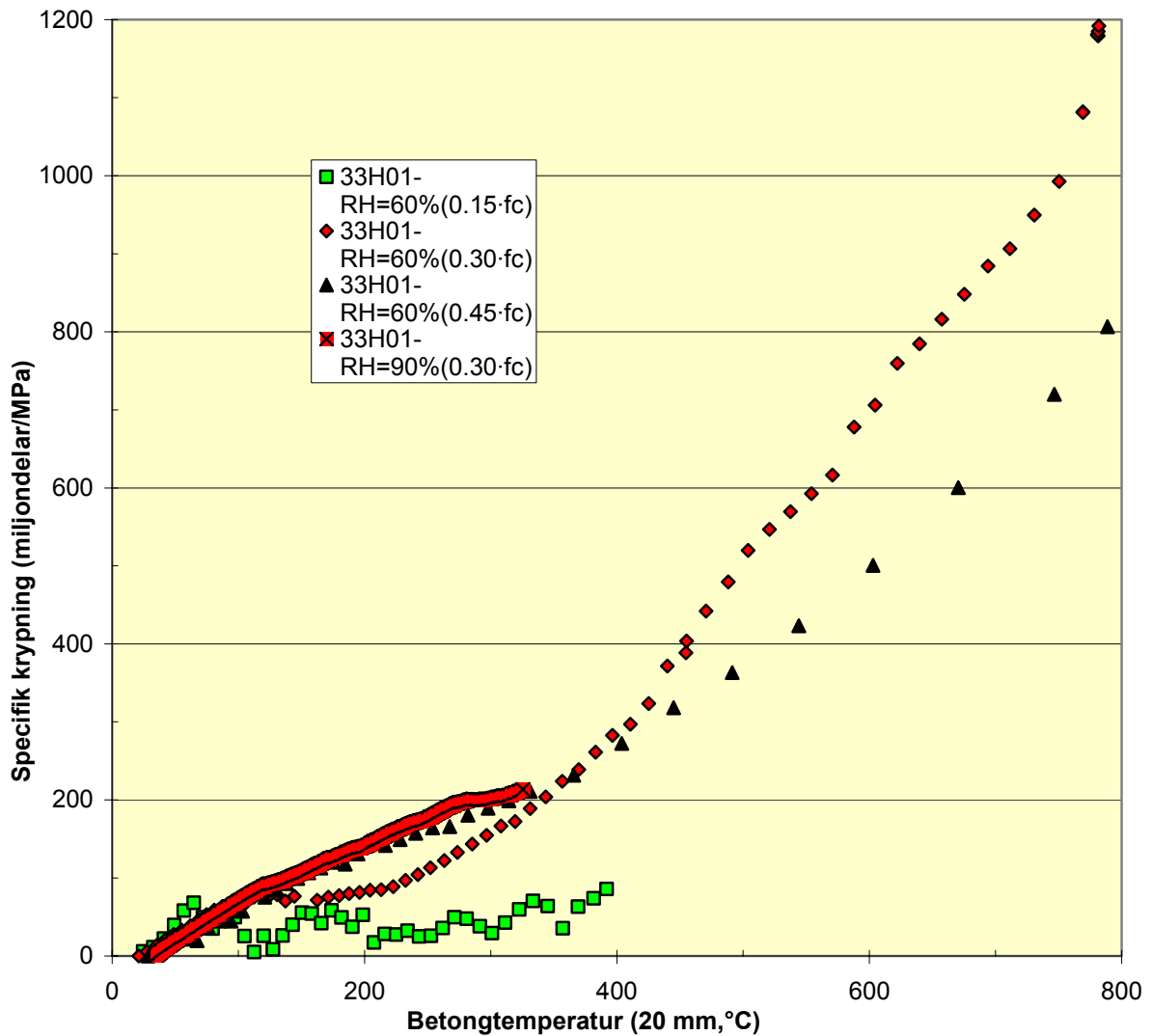
**Appendix 4.2 –Kryptalsutveckling hos betong provad med temperaturutvecklingen 450 °C/h under 15%, 30% och 45% last av cylinderhållfasthet vid 20 °C (1/°C)**

Betong	Lastnivå	33H00	33H01	42V00	42V01	48FK0	48FK1	48FK2
Cylinderhållfasthet (MPa)		62.4	57.2	38.1	42.7	49.0	50.2	48.4
<u>RF = 30%</u>	30%	0.0199		0.0261		0.0090		
<u>RF = 60%</u>	15%	0.0236	0.0064	(0.0555)	(-0.0140)	0.0149	0.0348	
	30%	0.0249	0.0229	0.0240	0.0456	0.0172	0.0357	
	45%	0.0372	0.0237	0.0360	0.0326	0.0171	0.0275	
<u>RF = 90%</u>	30%		0.0249		0.0322		0.0396	0.0129
	45%							0.0213

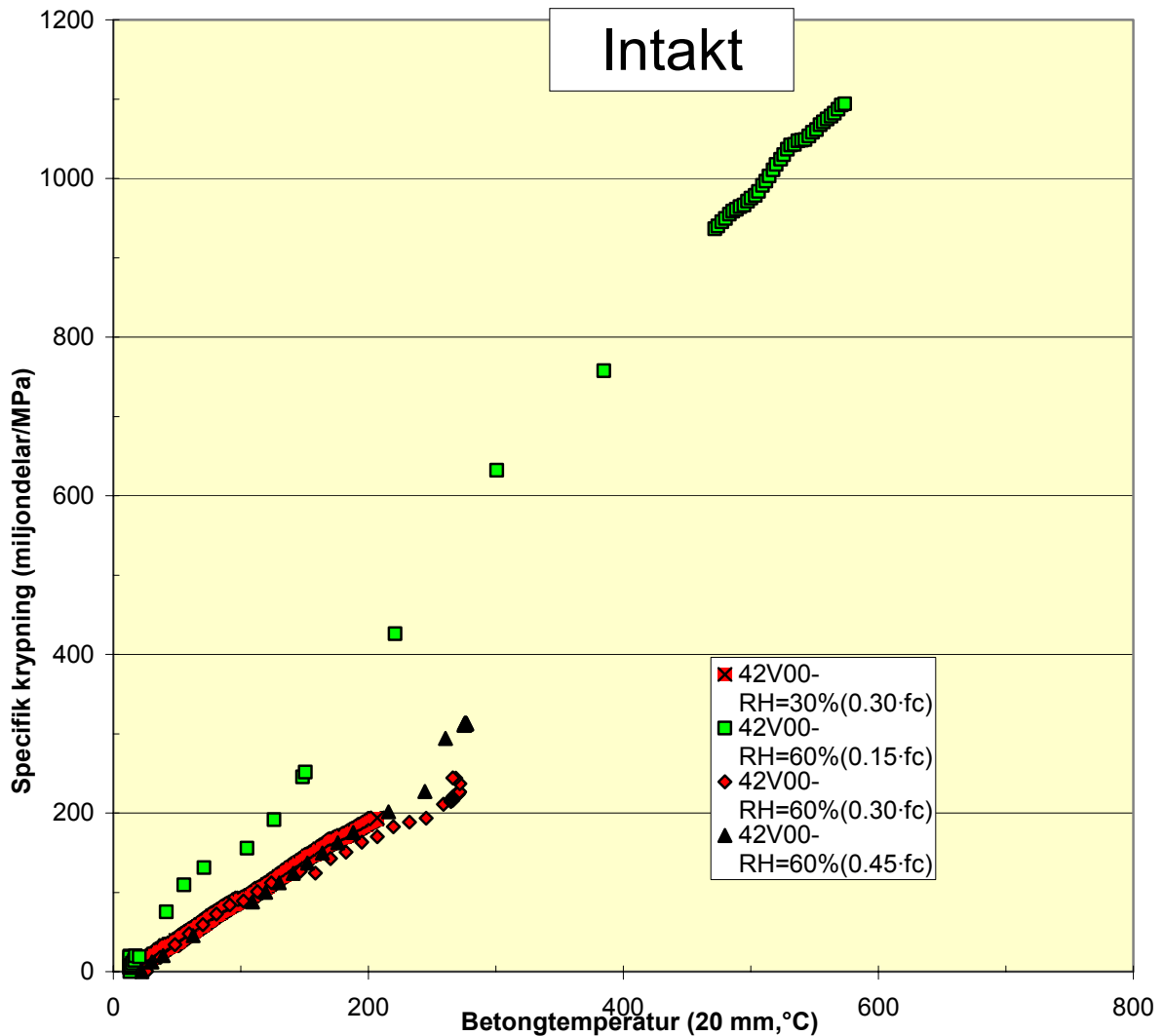
**Appendix 4.3 - Specifik krypning, btg 33H00**



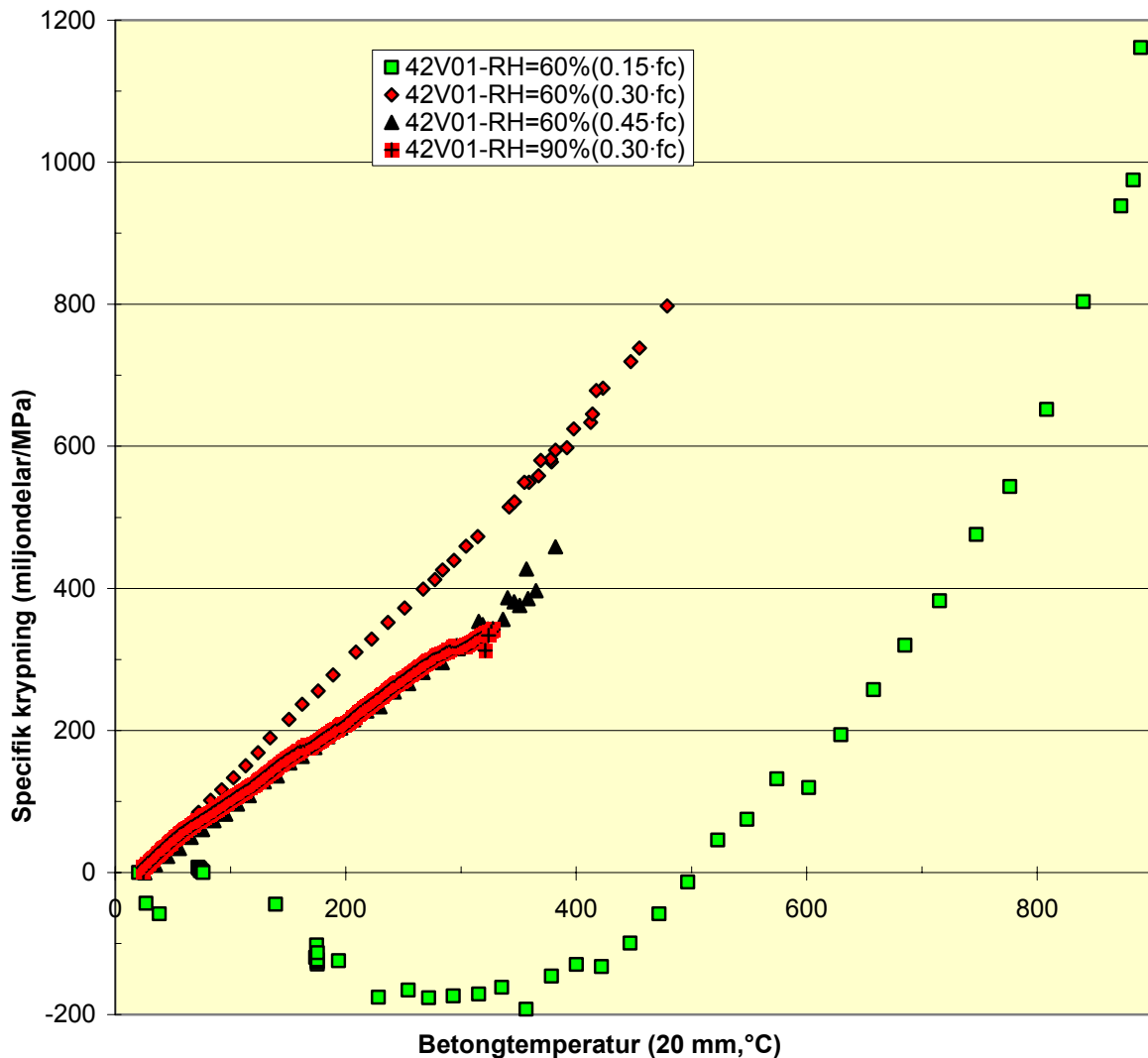
**Appendix 4.4 - Specifik krypning, btg 33H01**



**Appendix 4.5 - Specifik krypning, btg 42V00**

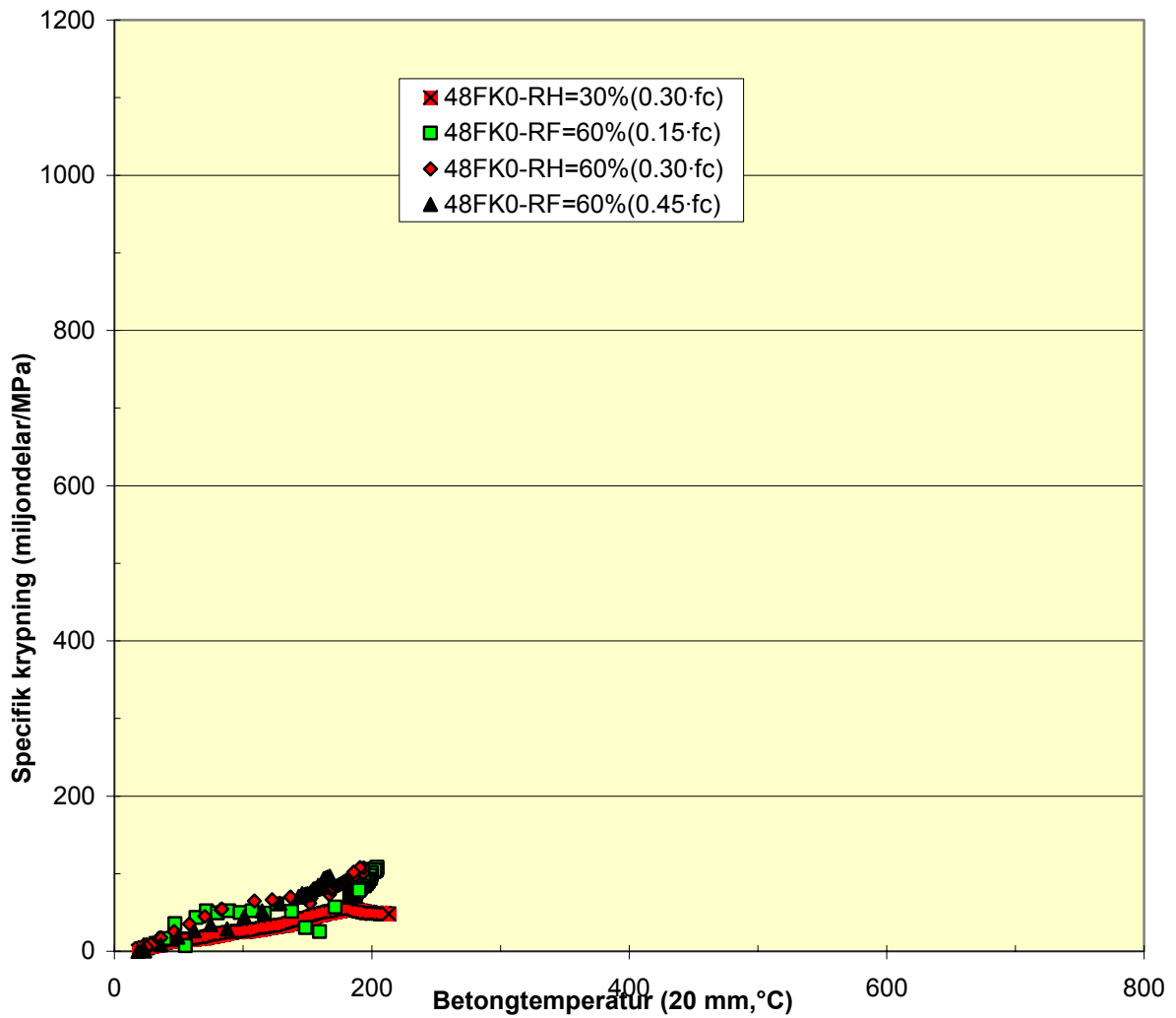


**Appendix 4.6 - Specifik krypning, btg 42V01**

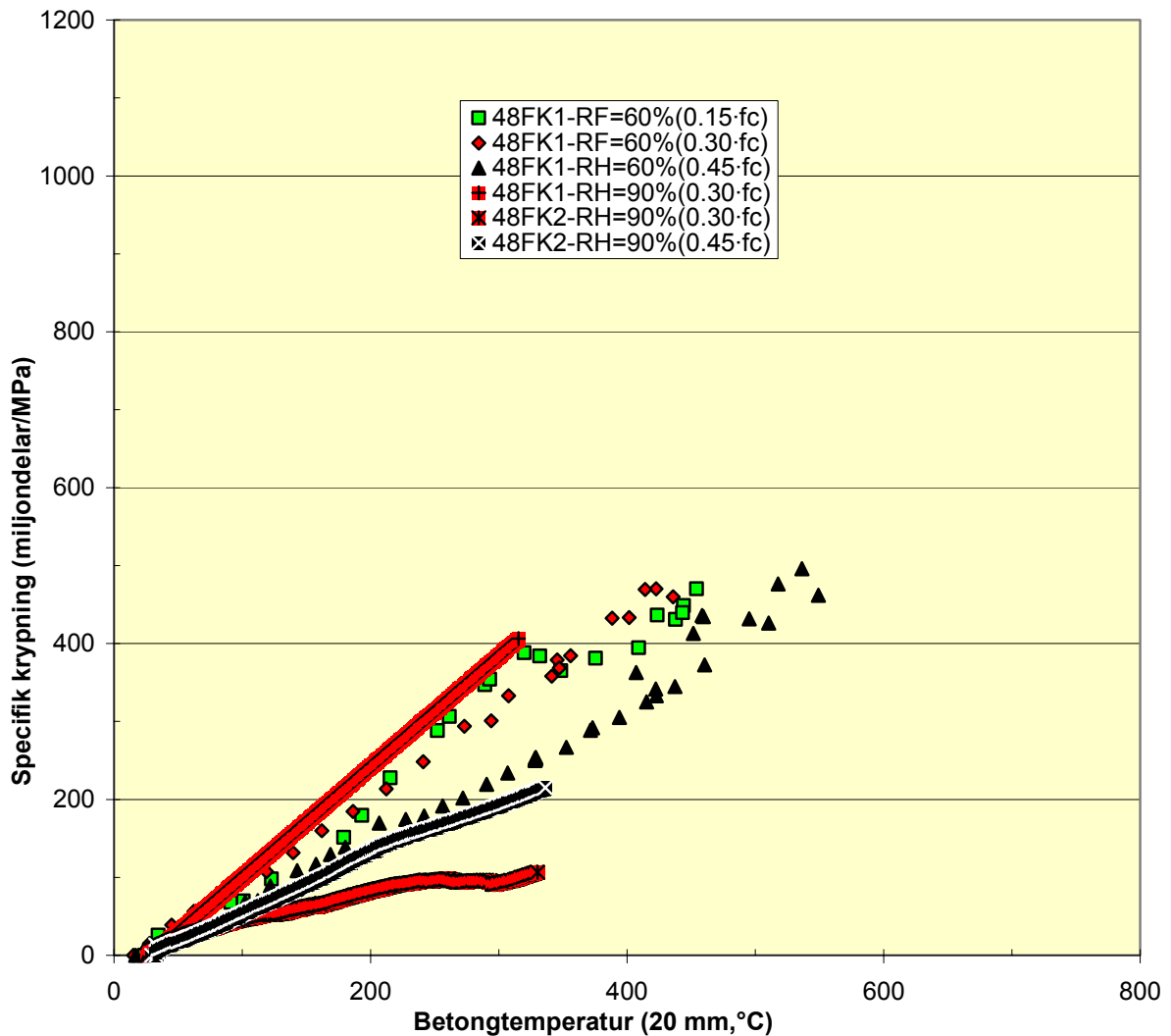




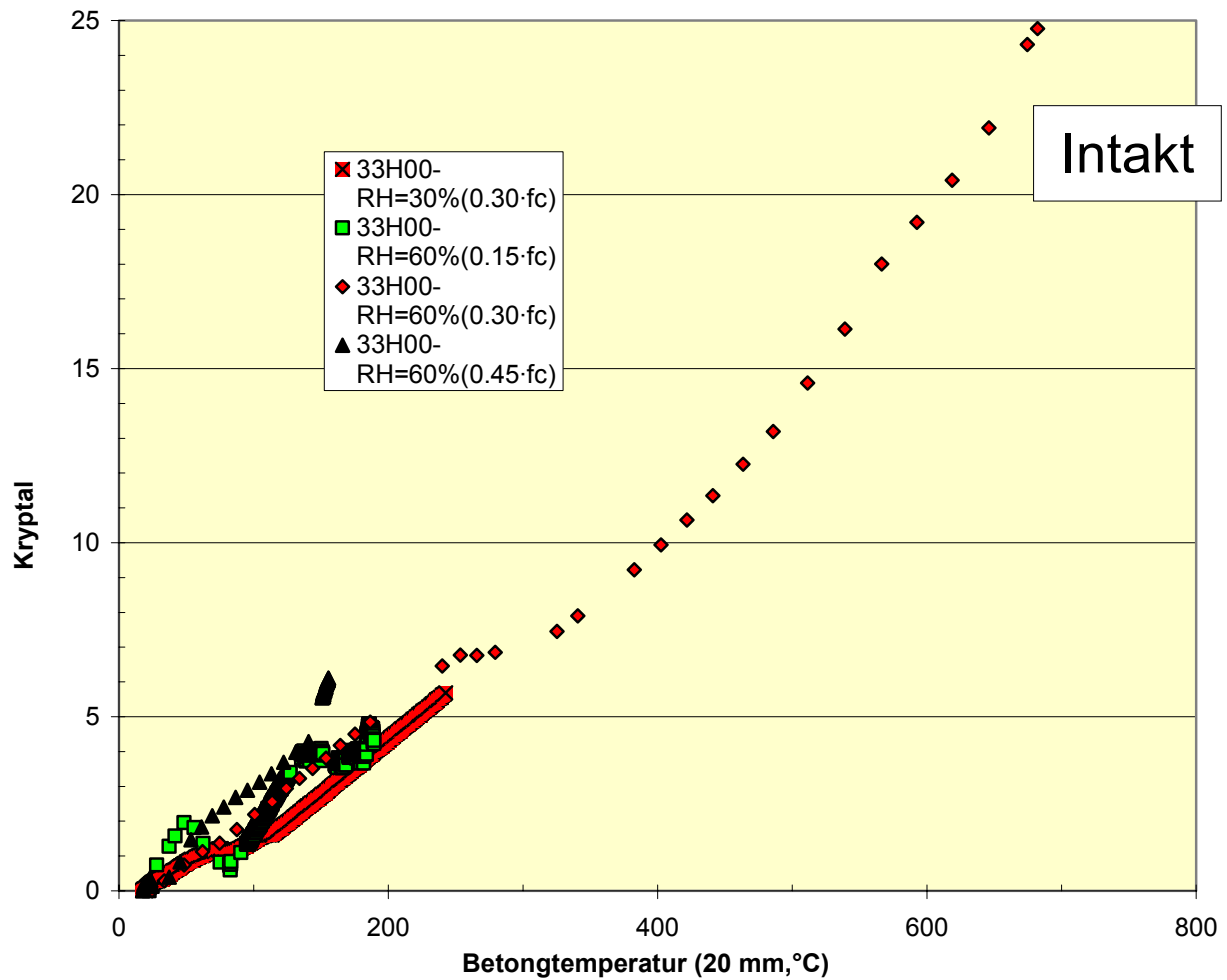
**Appendix 4.7 - Specifik krypning, btg 48FK0**



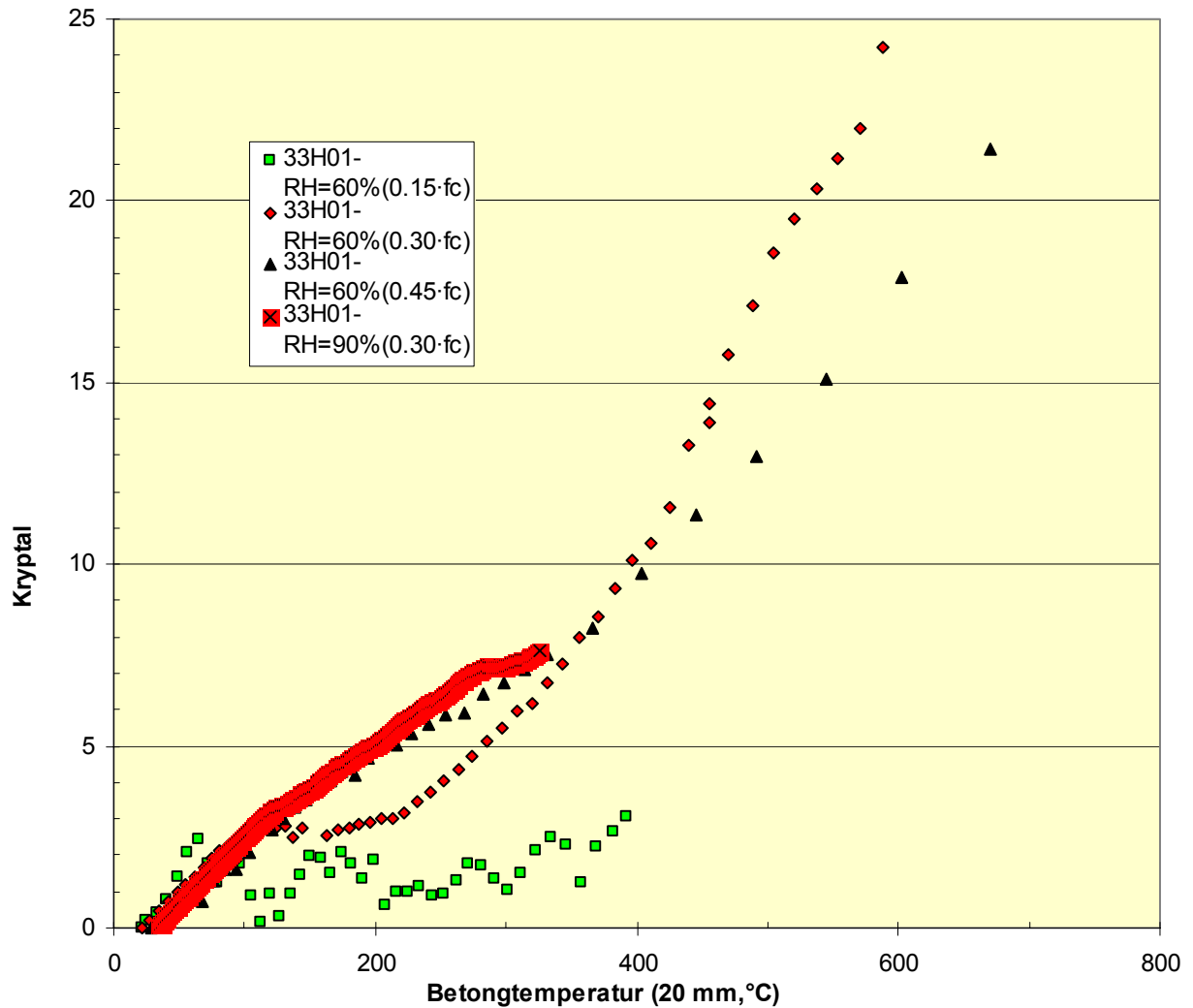
**Appendix 4.8 - Specifik krypning, btg 48FK1-2**



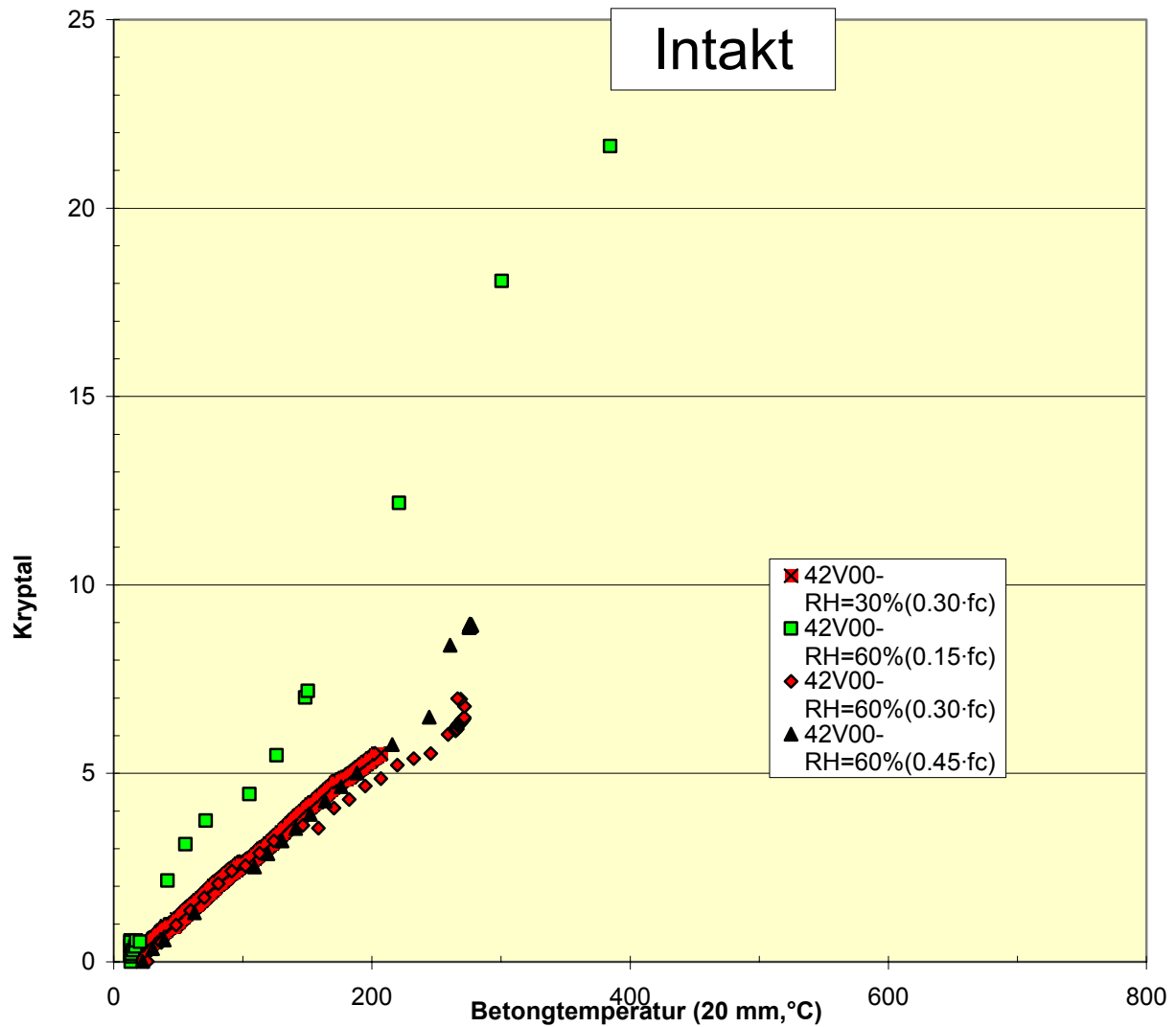
Appendix 4.9 - Kryptal, btg 33H00



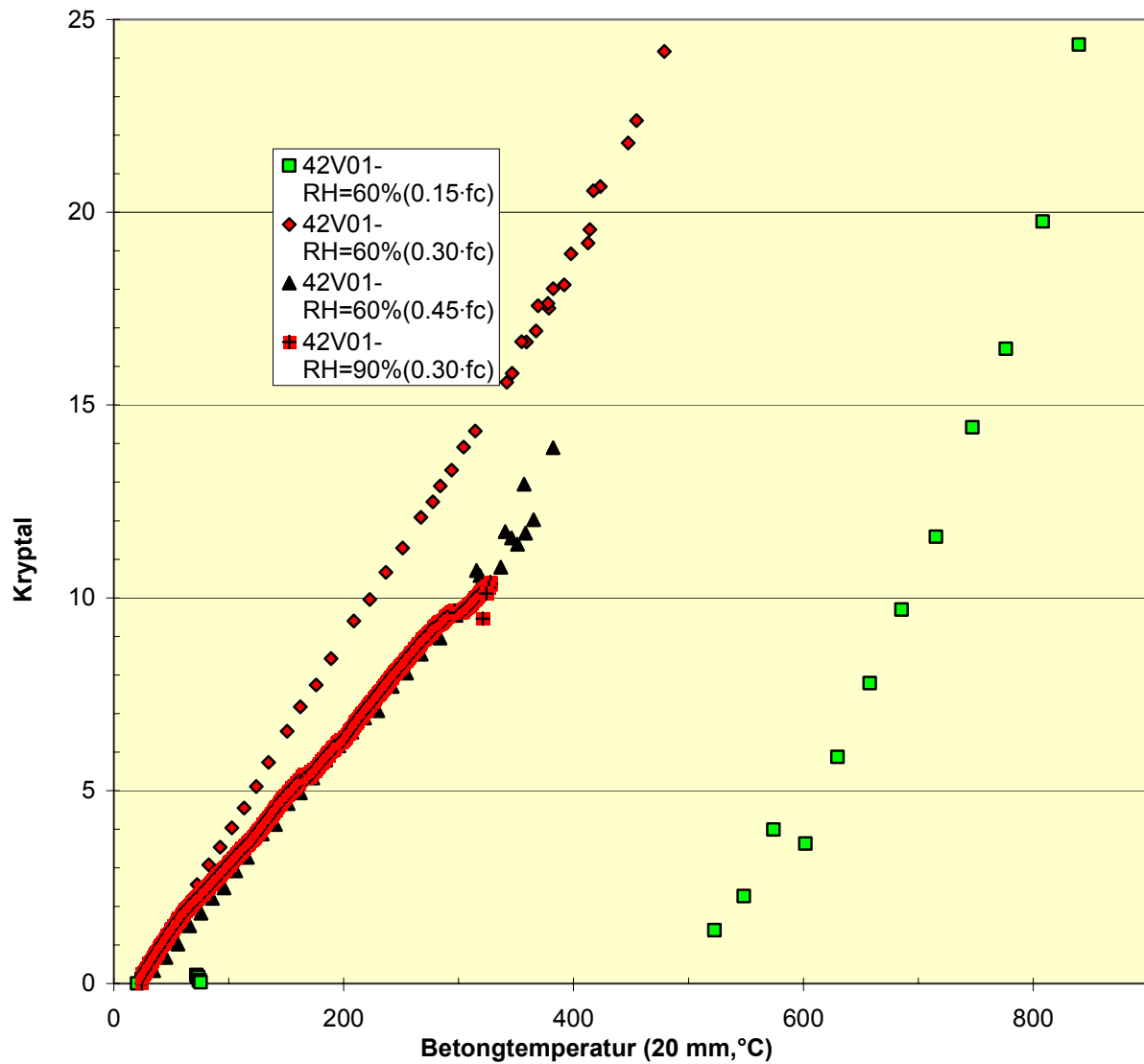
**Appendix 4.10 - Kryptal, btg 33H01**



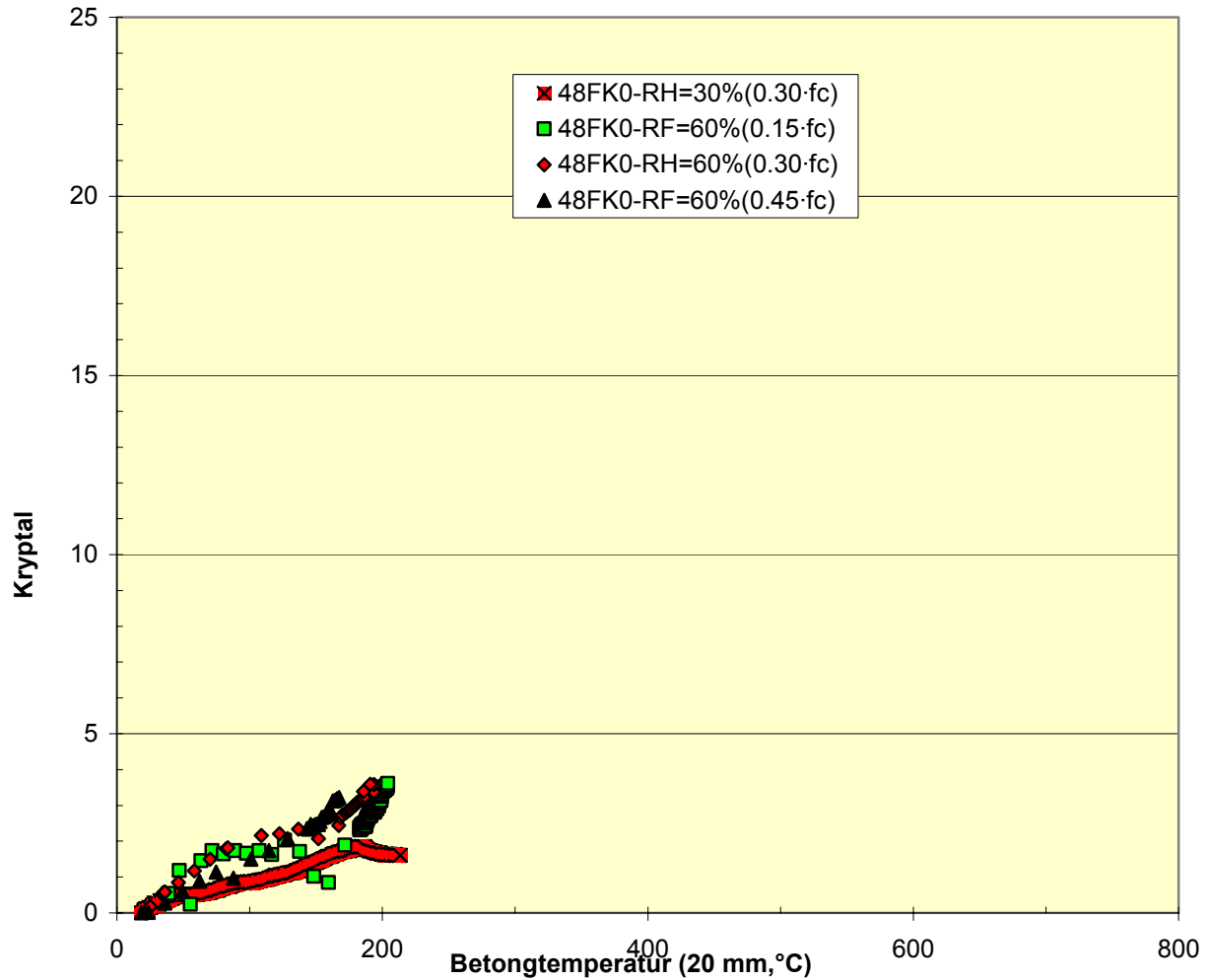
**Appendix 4.11 - Kryptal, btg 42V00**



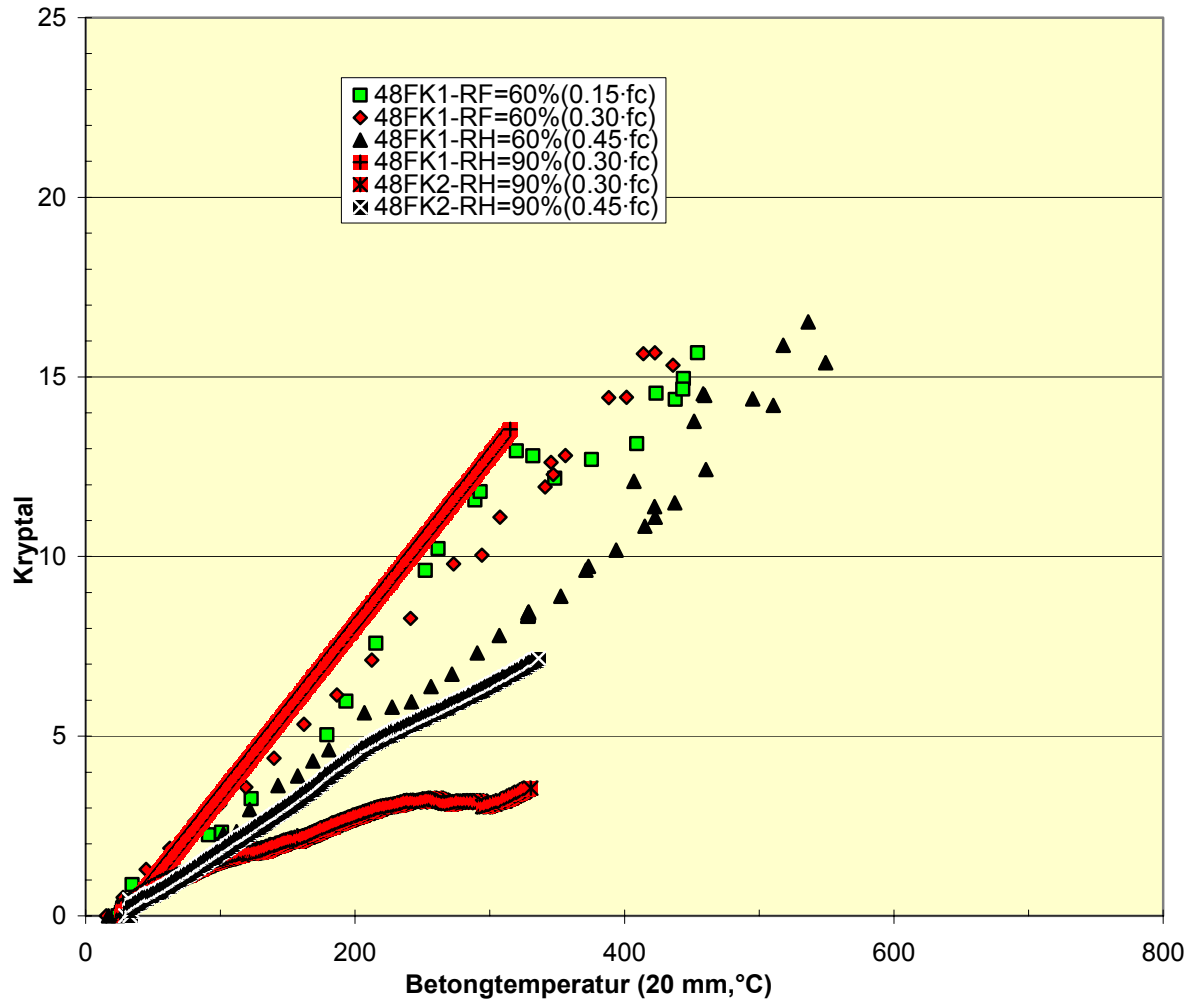
Appendix 4.12 - Kryptal, btg 42V01



**Appendix 4.13 - Kryptal, btg 48FK0**



Appendix 4.14 - Kryptal, btg 48FK1-2





**Appendix 4.15 – Expansion utan last versus betongtemperatur, 20 mm (%)**

