LUND UNIVERSITY

Beständighet hos självkompakterande betong med polypropylenfibrer

Persson, Bertil

2005

Link to publication

Citation for published version (APA):
Persson, B. (2005). *Beständighet hos självkompakterande betong med polypropylenfibrer*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7183). 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

Download date: 18. Dec. 2025

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET

Avd Byggnadsmaterial

Beständighet hos självkompakterande betong med polypropylenfibrer

Durability of Self-Compacting Concrete with Polypropylene Fibres

Bertil Persson

TVBM-7183 Lund 2005

ISRN: LUTVDG/TVBM--05/7183--SE (1-83)

ISSN: 0348-7911 TVBM

ISBN: 91-631-7504-5

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

Förord

Självkompakterande betong underlättar arbetet eftersom vibrering undviks. Arbetsplatsen blir säkrare i och med att den blir fri från vibreringsljud. Sammansättningen hos självkompakterande betong innebär i allmänhet att kalkstensfiller tillförs. Tillsammans med förbättrade fasgränser mellan ballast och cementpasta innebär detta lägre transportal för vatten, etc. i betong, samt högre hållfasthet. Inblandning av kalkstensfiller kan dock göra betongen mindre beständig i t.ex. i sulfathaltig miljö eller efter tösaltning. I och med att självkompakterande betong görs tätare än normal betong ökas också risken för explosiv spjälkning i samband med brand, t.ex. i tunnlar. Genom en liten tillförsel av fina plastfibrer av polypropylen kan spjälkningen undvikas på ett effektivt sätt. I stället för att successivt transporteras in i betongen och ackumuleras där med ångsprängning som följd, då den höga temperaturen når vattnet, hindras vattentransporten inåt av smältande fibrer. I ytan av betongen, där temperaturen är hög vid brand, bryts fibrerna ned med en förbättrad ångtransport som följd. Fibrerna i sig får anses beständiga i likhet med annan plast som gjuts in i betong. Frågeställningen var om självkompakterande plastfiberbetong var beständig i utsatt miljö. Syftet med projektet var att jämföra beständigheten hos självkompakterande plastfiberbetong med beständigheten hos självkompakterande betong utan polypropylenfibrer och även med beständigheten hos normal betong. Inre frostbeständighet studerades, kloridmigrationskoefficient, krympning, krypning samt spjälkning vid hög temperatur och saltfrostbeständighet (efter tösaltning). Endast betong med Degerhamn Anläggningscement med vattencementtal = 0.40 (0.42) studerades. Åldern hos betongen var 90 dygn eller 300 dygn efter härdning vid relativ fuktighet, RF, = 60% eller = 90%.

Försöket finansierades av Vägverket, Region Syd, VSKv, Box 543, 291 25 Kristianstad (kontaktperson: Thomas Bruneby), referensnummer: SA 90-K 2004:560, samt utfördes 2004- 2005 vid LTH Byggnadsmaterial, Lund. Ett stort tack framförs till finansiären Vägverket, till Ingemar Larsson, som bistått med försöken med sulfatbeständighet, till Thord Lundgren, LTH, som utvecklat mätmetodiken och bistått vid datainsamlingen, till Bengt Nilsson, som kapat betongproverna, samt till Dana Sedlonka, som genomfört mätningarna av kloridinträngning.

Lund i maj 2005

Bertil Persson

Innehållsförteckning

	Sid.
Förord	i
Innehållsförteckning	ii
Sammanfattning	iii
Summary	vi
1. Bakgrund, ekonomisk nytta och syfte	1
2. Genomförande	2
3. Inre frostbeständighet	3
4. Kloridmigrationskoefficient, D	10
5. Krympning inklusive temperaturutvidgning	13
6. Krypning vid hög temperatur	17
7. Saltfrostbeständighet	23
8. Spjälkning vid brandtemperatur	31
9. Sulfatbeständighet	42
Referenser	46
Appendix	49
Appendix 1 – Material, sammansättning och egenskaper hos betong	50
Appendix 2 – Metoder	51
Appendix 3 – Resultat från provning av inre frostbeständighet	54
Appendix 4 – Resultat av provning av kloridinträngning	55
Appendix 5 - Uppmätt temperaturutvidgningskoefficient	56
Appendix 6 – Hårdnade egenskaper och påkänning vid krypförsök	57
Appendix 7 – Saltfrostbeständighet	58
Appendix 8 – Spjälkning	65
Appendix 9 – Sulfatbeständighet	74-75

Sammanfattning

Allmänt

Ett 90-tal prover av anläggningsbetong, såväl normal som självkompakterande betong, med och utan polypropylenfibrer, undersöktes i fråga om inre frostbeständighet, kloridinträngning, krympning och krypning vid hög temperatur, saltfrostbeständighet, spjälkning vid hög temperatur samt sulfatbeständighet.

Inre frostbeständighet

Efter flera studier av inre frostbeständigheten hos självkompakterande betong, SKB, omfattande längdändringar, viktsförändringar och inre fundamental egenfrekvens kunde följande konstateras:

1. SKB med polypropylenfibrer uppvisade mycket sämre inre frostbeständighet vid konstant lufthalt än SKB utan polypropylenfibrer och än normal betong vilket berodde på att avståndsfaktorn var större.
2. Troligen sammanslogs luftporerna till större i SKB med polypropylenfibrer, ppf, än i SKB utan polypropylenfibrer och än i normal betong.
3. Till följd av segregation av luft och ballast uppvisade undervattengjuten SKB sämre inre frostbeständighet långt från gjutplatsen än nära den plats där betongen pumpades in i konstruktionen.
4. För SKB krävdes vid vct = 0.40 minst 5% lufthalt samt avståndsfaktor < 0.25 mm för att uppfylla kraven på god inre frostbeständighet.

Kloridinträngning

1. Kloridmigrationskoefficient = $6 \cdot 10^{-12}$ m²/s erhölls efter härdning vid RF = 60% och = $7 \cdot 10^{-12}$ m²/s vid RF = 90%.
2. Efter härdning vid RF = 60% var kloridmigrationskoefficienten mindre för självkompakterande betong, SKB, med ppf än för SKB utan ppf.
3. Efter härdning vid RF = 90% hade SKB med ppf 20% större kloridmigrationskoefficient än för SKB vid RF = 60%.
4. Vid RF = 60% var kloridmigrationskoefficienten mindre för SKB med ppf än för normal betong utan fibrer.
5. Efter härdning vid RF = 60% var kloridmigrationskoefficienten mindre för SKB med kalkstensfiller än för normal betong.
6. Efter härdning vid RF = 90% kunde inga signifikanta skillnader konstateras mellan kloridmigrationskoefficienten för SKB och den för normal betong.
7. Efter härdning vid RF = 90% kunde inga signifikanta skillnader konstateras mellan kloridmigrationskoefficienten för SKB med ppf och SKB utan ppf.
8. Kloridmigrationskoefficienten för SKB minskade signifikant med ökad hållfasthet.

Krympning och temperaturexpansion vid hög temperatur

1. Betong med ppf uppvisade en ca 33% lägre temperaturutvidgningskoefficient än betong utan ppf.
2. Lägre starttemperatur, 20 °C, gav något lägre temperaturutvidgningskoefficient än en högre temperatur, 225 °C, vilket förklaras av en snabbare ytuppvärmning vid den högre starttemperaturen.

Krypning

1. Kryptalsutvecklingen beräknades efter reduktion av krympning och temperaturexpansion.
2. Betong med ppf visade mycket mindre krypning upp till ca 200 °C betongtemperatur än betong utan ppf vilket sannolikt berodde på att fuktrörelser in i betongen hindrades av smältande ppf.
3. I ytan av betongen förångades troligen ppf varvid fukten kanaliserades ut ur betongen i stället för att kondenseras inåt mot betongens kärna.

Saltfrostbeständighet

1. God saltfrostbeständighet erhölls för samtliga undersökta självkompakterande betonger - mycket god saltfrostbeständighet uppmättes för normal betong.
2. Vid konstant lufthalt ca 3% uppvisade självkompakterande betong, SKB, med viskositetsmedel dubbelt så stor saltfrostavskalning som betong med kalkstenfiller och ppf.
3. Vid vct = 0.42 i stället för vct = 0.40 mer än fördubblades saltfrostavskalningen hos SKB med ca 3% lufthalt.
4. För betong med ca 7.5% lufthalt i färskt tillstånd erhöll SKB med kalkstensfiller ca 4 ggr så stor saltfrostavskalningen som normal betong.

5. Vid för låg lufthalt skedde ett inre sammanbrott för SKB med ppf.
6. Vid hög hållfasthet saltfrostskadades SKB med ppf om lufthalten samtidigt var för låg.
7. Saltfrostavskalning ökade resp. minskade då avståndsfaktorn resp. den hårdnade lufthalten ökades.

Spjälkning vid hög temperatur

Hänsyn togs till ca 300 försök med explosiv spjälkning hos betong. I fråga om fuktinnehåll och lastnivå kvarstår Sv. Betongföreningens preliminära rekommendationer, 2004, i fråga husbyggnadsbetong rekommenderades generellt minst 0.7 kg/m³ 18 µm ppf då krav finns på beständighet mot explosiv spjälkning samt > 0.7 kg/m³ 18 µm ppf, vid ökande fillerhalt. För anläggningsbetong, tunnlar, etc. har föreliggande undersökning och omfattande österrikiska försök visat att en liten mängd, > 1.4 kg/m³ 18 µm ppf förmådde att bemästra explosiv spjälkning även för vattenlagrad, ung betong. I övrigt kan följande slutsatser dras:

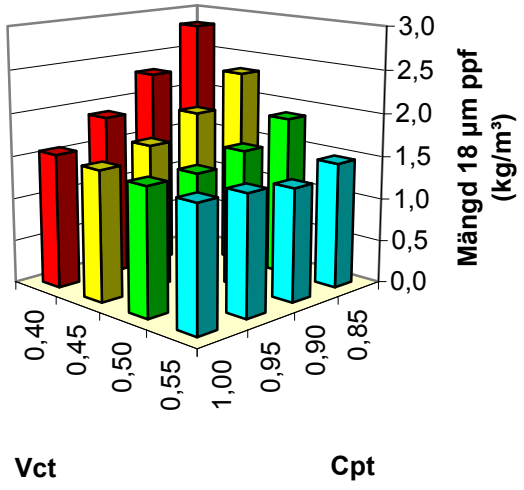
1. Ca 1.5 kg/m³ 18 µm ppf bemästrade explosiv spjälkning av betong bättre än kraftig uttorkning av betongen
2. Ca 1.5 kg /m³ 18 µm ppf bemästrade explosiv spjälkning av betong bättre än om en lastnivå av ca 25% av brottpåkänningen ändrades till dragpåkänning.
3. Det krävdes en ökning av armeringsmängden i betongen med ca 300 kg/m³ för att bemästra explosiv spjälkning lika väl som med 1.5 kg/m³ 18 µm ppf.
4. Ett skikt av 60 mm sprutbetong med 2 kg/m³ 18 µm ppf skyddade underliggande väluttorkad betong med 1.5 kg/m³ 18 µm ppf och ytfuktkvoten 3.2% mot explosiv spjälkning under 180 min.
5. Ett skikt av 60 mm sprutbetong med 2 kg/m³ 18 µm ppf skyddade inte en underliggande fuktig betong med 1.5 kg/m³ 18 µm ppf och ytfuktkvoten 5.2% mot explosiv spjälkning utan denna uppgick till 90 mm efter 180 min
6. Motsvarande betong utan sprutbetong erhöll ca 25 mm spjälkning efter 180 min.
7. Inblandning av stålfiber hade liten eller ingen effekt på explosiv spjälkning hos betong.
8. Ytbeläggning med ett kraftigt metalliskt stålnät, glasfibernät eller kolfibernät skyddade betongen sämre mot explosiv spjälkning än inblandning av 0.5 kg/m³ 70 µm ppf.

Baserat på föreliggande undersökning och andra försök [4-20,29,45-47] kunde rekommendationer ges för inblandning av 18 µm ppf i syfte att stoppa explosiv spjälkning hos anläggningsbetong, Tabell 8.4, Figur 8.20:

$$Ppf_{anl}=(28\cdot(cpt)^2-26\cdot(c/p)-2.4)\cdot\ln(vct)+45\cdot(cpt)^2-68\cdot(cpt)+24.2 \geq 1.4 \quad (8.6)$$

Tabell 8.4 - 18 µm ppf för att stoppa explosiv spjälkning hos i anläggningsbetong (kg/m³).

Cpt/vct	0.85	0.90	0.95	1.00
0.40	2.8	2.3	1.9	1.6
0.45	2.3	1.9	1.7	1.5
0.50	1.9	1.6	1.5	1.5
0.55	1.5	1.3	1.4	1.4



Figur 8.20 - 18 µm ppf i syfte att bemästra explosiv spjälkning hos i anläggningsbetong.

Sulfatbeständighet

1. Efter 900 dygns exponering i destillerat vatten, havsvatten och sulfatlösning kunde ingen inre nedbrytning dvs. någon minskning av inre egenfrekvensen, skönjas.
2. Längdändringarna gav inget entydigt resultat däremot kunde efter 900 dygns sulfatangrepp en liten viktminskning

skönjas för SKB med ny blandningsordning dvs. med filler tillfört sist.

3. För en SKB med sedimentärt kalkstensfiller kunde det efter 1400 dygns provning urskiljas en sammanhörande minskning av egenfrekvensen (inre nedbrytning), stor expansion (ettringitbildning, > 10 ‰) och viktminskning (ytavskalning).
4. Trots en stor ytavskalning uppmättes efter 1400 dygns sulfatangrepp ingen minskning av egenfrekvens för proverna.
5. Ytavskalningen efter 900 dygns sultfatangrepp var emellertid stor för SKB med ordinarie blandningsordning, filler först – såväl med kristallint som sedimentärt kalkstensfiller.
6. Fortsatt ytangrepp av sulfater observerades efter 900 dygn även för betonger med ny blandningsordning, filler sist, men av mindre storleksordning än för betong med sedimentärt kalkstensfiller.
7. Efter 1400 dygns sulfatangrepp fram till 1700 dygn bröts samtliga betonger med kalkstensfiller ned medan normal betong utan kalkstensfiller motstod angreppet utan någon mätbar påverkan.
8. Det fanns ett samband mellan densitetsökning och sulfatangrepp, dvs. kompakteringstekniken påverkade sulfatbeständigheten, vilket är anmärkningsvärt.
9. Om yttre miljön vad gäller sulfathalt inte kan förutses bör SKB med kalkstensfiller ej nyttjas.

Summary

General

About 90 specimens of plant construction concrete, both normal and self-compacting concrete, with and without polypropylene fibres, was investigated as regards internal frost resistance, chloride migration, shrinkage and creep at high temperature, salt frost scaling, spalling at high temperature and sulphate resistance.

Internal frost resistance

After several studies on internal frost resistance of self-compacting concrete, SCC, including length changes, weight changes and fundamental resonance frequency, the following may be concluded:

1. SCC with polypropylene fibres exhibited substantially worse internal frost resistance at constant air content than SCC without polypropylene fibres and than normal concrete which was dependent on a larger spacing factor.
2. Probably the air voids were assembled to larger ones in SCC with polypropylene fibres, ppf, than in SCC without polypropylene fibres and than in normal concrete.
3. Dependent on segregation of air and aggregate submerged cast SCC exhibited worse internal frost resistance far from the casting position than close to the place where the concrete was pumped into the construction.
4. For SCC with water-cement ratio, w/c = 0.40 at least 5% air content was required and a spacing factor < 0.25 mm in order to fulfil the requirement of good internal frost resistance.

Chloride migration

1. The chloride migration coefficient = $6 \cdot 10^{-12}$ m²/s was received after curing at relative humidity, RH = 60% and = $7 \cdot 10^{-12}$ m²/s at RH = 90%.
2. After curing at RH = 60% the chloride migration coefficient became smaller for self-compacting concrete, SCC, with ppf than for SCC without ppf.
3. After curing at RH = 90% SCC with ppf obtained 20% larger chloride migration coefficient than at RH = 60%.
4. At RH = 60% the chloride migration coefficient was smaller with ppf than for normal concrete without ppf.
5. After curing at RH = 60% the chloride migration coefficient was smaller for SCC with limestone powder than for normal concrete.
6. After curing at RH = 90% no significant differences were observed between the chloride migration coefficient for SCC and normal concrete.
7. After curing at RH = 90% no significant differences were observed between the chloride migration coefficient for SCC with ppf and the chloride migration coefficient for SCC without ppf.
8. The chloride migration coefficient increased significantly at higher strength.

Shrinkage and thermal expansion at high temperature

1. Concrete with ppf exhibited about 33% lower temperature expansion coefficient than concrete without ppf.
2. Lower starting temperature, 20 °C, gave somewhat lower temperature expansion coefficient than higher, 225 °C, which was explained by more rapid heating of the surface at higher starting temperature.

Creep

1. The development of creep was estimated after reduction of measured shrinkage and temperature expansion.

2. Concrete with ppf exhibited much smaller creep up to 200 °C concrete temperature than concrete without ppf which probably was dependent on movement of moisture inward the concrete that was prohibited by melting ppf.

3. In the surface of the concrete the ppf probably evaporated during heating at which moment channels were formed out of the concrete for movement of moisture instead of inward.

Salt frost scaling

1. Good salt frost durability was obtained for all concrete – very good salt frost scaling was obtained for normal concrete.
2. At about 3% air self-compacting concrete, SCC, with viscosity agent exhibits about twice as large salt frost scaling as SCC with limestone filler and pp.

3. For SCC with 3% air content the salt frost scaling was twice as large for SCC with w/c = 0.42 as for SCC with w/c = 0.40.
4. For 7.5% fresh air content SCC with limestone filler obtained about 4 times the salt frost scaling of normal concrete.
5. At low air content an inner break down occurred in SCC with ppf.
6. At high strength SCC with ppf was damaged by frost if the air content was low.
7. The salt frost scaling increased alt. decrease when the spacing factor alt the harden air content increased.

Spalling at high temperature

The conclusions were based on about 300 test results on explosive spalling of concrete. As regards the moisture content and the load level the preliminary recommendations of the Swedish Concrete Association of 2004 remains, as regards house building concrete at least 0.7 kg/m³ 18 µm ppf generally was recommended when requirements exist on durability for fire spalling, > 0.7 kg/m³ 18 µm ppf generally was recommended when the concrete also contains filler. For construction concrete, tunnels and so firth, the present investigation and also extensive Austrian tests shows that a small amount of ppf, about 1.4 kg/m³ 18 µm ppf, managed to prevent explosive spalling even for water cured young concrete. Furthermore the following conclusions may be drawn:

1. About 1.5 kg/m³ 18 µm ppf prevented fire spalling better than if a load level of 0.25 was changed into tensile stress.
2. An increase of the amount of reinforcement by 300 kg/m³ was required to prevent fire spalling as well as with 1.5 kg/m³ 18 µm ppf.
3. A layer of 60 mm shotcrete with 2 kg/m³ 18 µm ppf protected underlying dried out concrete with 1.5 kg/m³ 18 µm ppf and the surface moisture of 3.2% against fire spalling under 180 min.
4. A layer of 60 mm shotcrete with 2 kg/m³ 18 µm ppf did not protect underlying moist concrete with 1.5 kg/m³ 18 µm ppf and the surface moisture 5.2% against explosive spalling but this exhibited 90 mm after 180 min.
5. The corresponding concrete without shotcrete exhibited about 25 mm spalling after 180 min.
6. Use of steel fibres had no or little effect on the explosive spalling of concrete.
9. Surface covering by metal steel net, a glass fibre or carbon fibre net had less effect on fire spalling than 0.5 kg/m³ 70 µm ppf did.

Based on the present investigation and other tests [4-20,29,45-47] the following recommendations may be given for additives of 18 µm ppf in order to prevent fire spalling of construction concrete, Table 8.4, Figure 8.20:

$$Ppf_{constr}=(28\cdot(c/p)^2-26\cdot(c/p)-2.4)\cdot\ln(w/c)+45\cdot(c/pt)^2-68\cdot(c/p)+24.2 \geq 1.4 \quad (8.6)$$

where c/p denotes cement-powder ratio

Table 8.4 - 18 µm ppf in order to prohibit fire spalling of concrete (kg/m³).

c/p – w/c	**0.85**	**0.90**	**0.95**	**1.00**
0.40	2.8	2.3	1.9	1.6
0.45	2.3	1.9	1.7	1.5
0.50	1.9	1.6	1.5	1.5
0.55	1.5	1.3	1.4	1.4

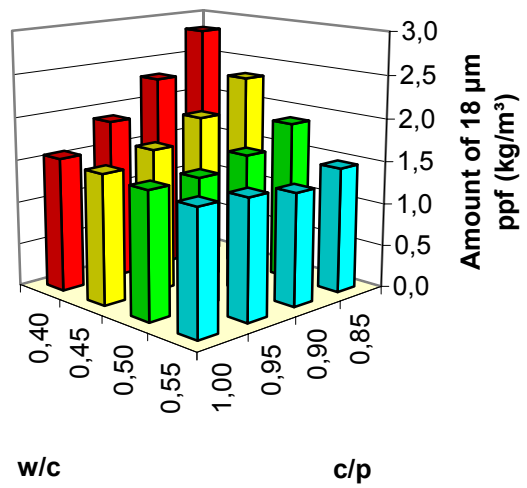


Figure 8.20 – Amount of 18 µm ppf in order to avoid fire spalling of plant construction concrete.

Sulphate resistance

1. After 900 days of exposure in distilled water, sea water or sulphate solution no destruction could be observed, i.e.

no decrease of fundamental resonance frequency.

2. The length changes gave no significant result after 900 days but the sulphate attack showed a small decrease of weight for SCC with filler added at the end of the mixing.
3. For SCC with sedimentary limestone filler a consistent change of length and decrease weight was observed after 1400 days of sulphate exposure (formation of ettringite and surface scaling).
4. In spite of large surface scaling at 1400 days of sulphate attack no decrease of fundamental resonance frequency was observed.
5. The surface scaling after 900 days of sulphate attack was however large for SCC with ordinary mixing order , filler at first – both for sedimentary and crystalline limestone powder.
6. Ongoing sulphate attack was observed after 900 days' age also for concrete with new mixing order, filler at last, but smaller than for concrete with sedimentary limestone powder.
7. After 1400 days of sulphate attack up to 1700 days all concrete with limestone filler broke down while the normal concrete resisted the sulphate attack without any decrease of weight or fundamental resonance frequency.
10. A correlation between increase of density and sulphate attack was observed, i.e. the compaction technique affected the sulphate resistance which is a severe aspect of SCC.
11. If the ambient conditions of the concrete, as regards the sulphate content of the ground, are not known SCC with limestone filler may not be utilized.

1. Bakgrund, ekonomisk nytta och syfte

1.1 Problemställning, historik och dagsläget

Självkompakterande betong, SKB, med polypropylenfibrer, ppf, har visat sig effektiv i syfte att undvika spjälkning vid hög temperatur [1-17]. Att ppf är verksamma även för högpresterande betong framkom inför höghusbyggnationer i Frankfurt för ca 10 år sedan [18]. Enligt föreliggande remiss överväger Vägverket att låta rekommendera inblandning av ca 2 kg/m³ Ø18 µm ppf, i tunnelbetong, även sprutbetong [19]. Svenska Betongföreningens brandkommitté har också preliminärt rekommenderat inblandning av ppf i betong vid en viss lägsta kombination av fuktkvot/påkänning (överstigande en viss kritisk nivå) förutsatt att betong med fibrer är beständig [20]. Veterligt föreligger endast en större undersökning beträffande effekten av ppf i betong [21]. Denna undersökning avsåg dock fiberns inverkan på plastisk krympning. Bland annat visade det sig att avdunstningshastigheten hos den färska betong ökade med fiberinnehållet, dvs. troligen även uttorkningshastigheten [22]. Tidigare har det visats att krympning och krypning hos SKB är av samma storleksordning som hos normal betong [23]. Sydsverige står inför två stora tunnelprojekt där inblandning av ppf är högaktuell. Alternativt kan hela tunnelväggen brandskyddas vilket är mer kostsamt än att använda fiberinblandning. Före det att ppf används i betong får fundamentala beständighetsegenskaper hos denna betong visas såsom beständighet mot inre frost, kloridinträngning, krympning och krypning, saltfrostangrepp och sulfatangrepp. LTH Byggnadsmaterial, Lund har kompetens på området och i samarbete med Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, under senare år erfarenhet av ett flertal liknande provningar [23-28].

1.2 Ekonomisk nytta av inblandning av polypropylenfibrer

I en beräkning bedöms merkostnaden för inblandning av ppf till 40 x 0.4 = 16:- kr/m² betong. Motsvarande kostnad för en keramisk värmeisolering av tunnelväggen bedöms till ca 100:- kr/m². Till kostnaden för tilläggsisolering kommer extrakostnader för ökat schakt, ca 0.2 m, för att ge plats för tilläggsisolering med bibehållen innerdiameter för tunneln. Tunnelelementen blir på samma sätt större om keramisk värmeisolering väljs i stället för inblandning av ppf i betongen. Kostnaden för extraschakten och ökningen av tunnelelementen jämfört med kostnaden för tunnelelement med inblandning av ppf exklusive extraschakt torde vida överstiga kostnaden för den keramiska värmeisoleringen av tunnelväggen. Dessutom finns risk för nedfallande tilläggsisolering vilket inte är fallet för betong med ppf. Beräknat för Sydsveriges bägge tunnlar, Citytunneln och Hallandsåstunneln, uppgår kostnadsbesparingen till mångmiljonbelopp vid användning av SKB med ppf i stället för keramisk isolering. Den ekonomiska nyttan överstiger således vida kostnaden för detta projekt. I ett nyligen avslutat projekt visade samtliga SKB utan ppf spjälkning vid hög temperatur vid låg RF = 30%, medan spjälkning vid hög temperatur helt undveks med så liten mängd som 0.7 kg/m³ ppf i SKB även vid RF = 90% [29]. En genomgång av internationellt tillgängliga resultat avseende explosiv spjälkning hos betong vid hög temperatur visade entydigt en remarkabelt positiv effekt av ppf i betong [17]. Kostnad för inblandning av ppf i förhållande till en eventuell skadekostnad är mycket liten.

1.3 Syfte

Projektets mål var att ge entreprenören, beställaren och nyttotagare underlag för en bedömning av beständigheten hos SKB med ppf. Beständighetsaspekter som mot inre frost, kloridinträngning, krympning och krypning och saltfrostangrepp, spjälkning vid hög temperatur samt sulfatbeständighet (långtidsuppföljning [25,30]) studerades. Projektet har en direkt anknytning till ett nyligen avslutat SBUF-projekt [27]. Projektet avgränsades till anläggningsbetong med Degerhamn Anläggningscement.

2. Genomförande

2.1 Material och metoder

Projektet avgränsas till att undersöka anläggningsbetong med Degerhamn Anläggningscement, dels normal, dels självkompakterande, SKB, Appendix 1. Av Appendix 2 framgår använda provningsmetoder. Appendix 2 visar även en del av den provningsutrustning som har använts.

2.2 Arbetsprogram och tidplan

Arbetsprogrammet indelades i sju avsnitt med detaljer som anges i Tabell 2.1.

Tabell 2.1 – Arbetsprogram.

No	Provning	Antal	Mätperiod
1	Inre frostbeständighet	15	1/11-04--1/4-05
2	Kloridmigrationskoefficient	30	1/11-1/12-04
3	Krympning	8	15/11-15/12-04
4	Krypning	9	15/11-15/12-04
5	Saltfrostbeständighet	15	1/11-04—1/1-05
6	Spjälkning	17*	15/11-15/12-04
7	Sulfatbeständighet**	14	1/1-00—1/1-05
-	Summa	90	-

* samma provkroppar som vid undersökning av krympning och krypning

** femårsuppföljning av ett långtidsprojekt [25,30].

2.3 Organisation

Följande personer har ingått i projektets referensgrupp:

- Thomas Bruneby, Vägverket, Region Syd, Kristianstad
- Bo Eriksson-Vanke, Banverket, Sundbyberg
- Bernt Freiholtz, Vägverket, Teknik/Bro och tunnel, Borlänge
- Sven-Erik Johansson, Cementa, Malmö
- Jan Lillieblad, Abetong, Växjö
- Ingvar Mattsson, Skandinaviska Byggelement, Uppsala
- Johan Silfwerbrand, CBI, Stockholm

Följande personer har ingått i projektets styrgrupp:

- Thomas Bruneby, Vägverket, Borlänge
- Professor em. Göran Fagerlund, LTH, Lund
- Professor Lars-Olof Nilsson, LTH, Lund

Följande personer vid LTH, Lund, har genomfört provningarna:

- Ingemar Larsson
- Thord Lundgren
- Bengt Nilsson
- Dana Sedlonka

2.4 Redovisning

Det behövs draghjälp från beställare, entreprenörer och konstruktörer om inblandning av ppf i självkompakterande betong skall slå igenom. Resultaten från projektet kommer därför att redovisas genom artiklar i Betong, Bygg & Teknik, Byggindustrin och Husbyggaren. Projektrapporten läggs ut på LTHs hemsida samt efter behov även på Vägverkets hemsida.

3. Inre frostbeständighet

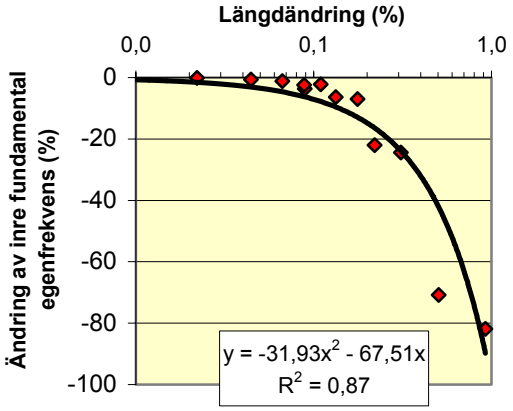
3.1 Tidigare forskning

3.1.1 Brobetonger

Tidigare provningar av inre frostbeständigheten hos SKB uppvisade en förbättring jämfört med normal betong. Inre frostbeständigheten hos normal betong i sötvatten bestäms av betongens vct, som bör vara < 0.45, av lufthalten, som bör variera mellan 3.5% och 7%, samt av avståndsfaktorn, < 0.25 mm. En undersökning av inre frostbeständigheten hos betong med vct = 0.40 (brobetonger), såväl SKB som normal, visade att inre frostbeständigheten förbättrades i SKB jämfört med normal betong [25]. Figur 3.1 visar resultat av mätningarna inre egenfrekvens (lineär mot roten ur elasticitetsmodulen) för brobetonger [25]. En av de normala betongerna förstördes under provningen av inre frostbeständighet medan den andra normala betongen förblev intakt efter 300 cykler. Figur 3.2 visar resultat av längdmätningarna för brobetonger [25]. En av de tillverkade normala betongerna expanderade mer efter 300 cykler under provningen av inre frostbeständighet än samtliga SKB och den andra normala betongen. Figur 3.3 visar resultat av viktmätningarna av brobetongerna [25]. En av de tillverkade normala betongerna förlorade mer vikt (avskalning) efter 300 cykler under inre frostbeständighetsprovningen än samtliga SKB och den andra normala betongen. Skillnaden i resultat mellan de bägge normala betongerna var troligen att härröra till vibreringstekniken som försämrar fasgränsen hos betongen (SKB vibreras ej – därav generellt bättre inre frostbeständighet hos SKB än hos normal, vibrerad betong). Figur 3.4 visar ändring av inre fundamental egenfrekvens som funktion av längdändring. Figurerna 3.1-3.4 visar att endast endera inre fundamental egenfrekvens, längd eller vikt behöver mätas för att fastställa inre frostbeständigheten. Undersökningarna avsåg betong med rent Portlandcement (Degerhamn). I betong med cement med 12% kalkstensfiller ökas egentligt vct från t.ex. vct = 0.40 till vct = 0.45 varvid risken blir större för skador än i betong med vct = 0.40 [31].

3.1.2 Normal undervattensbetong

Inre frostbeständighet hos ett stort antal undervattensgjutna betonger studerades. Vct varierande mellan 0.45 och 0.78 (utborrade betongprover).

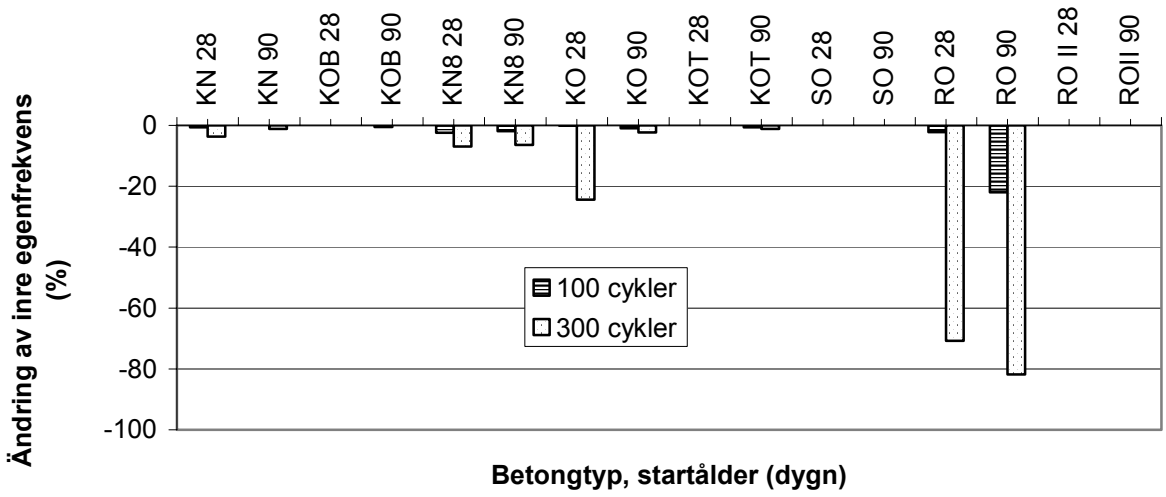


Figur 3.4 - Inre egenfrekvens vs längdändring.

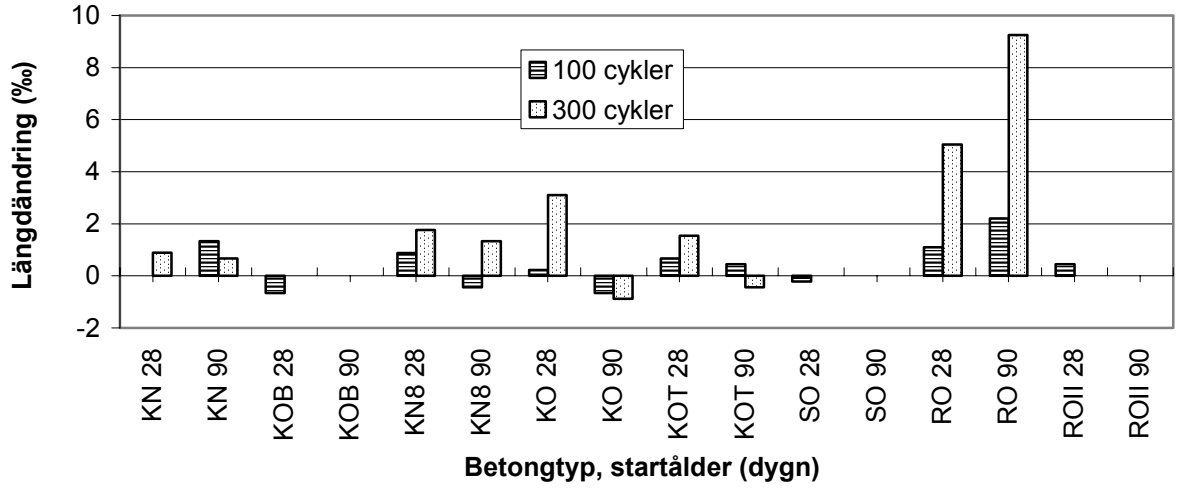
God inre frostbeständighet hos undervattensgjuten betong krävs för brofundament och kraftverksdammar. Figur 3.5 visar inre fundamental egenfrekvens [28]. Figur 3.6 visar viktändring hos undervattensgjuten betong [28]. I stort sett alla betonger förstördes av inre frostangrepp främst beroende av för högt vct > 0.45. Endast normal betong med vct = 0.46 med 11% lufthalt med låg tryckhållfasthet var beständig mot inre frostangrepp. Även SKB med vct = 0.48 med 6% lufthalt klarade kraven vilket bekräftar ovanstående resultat: SKB har bättre inre frostbeständighet än normal betong vid i övrigt konstanta förhållanden [25].

3.1.3 Undervattensgjuten SKB

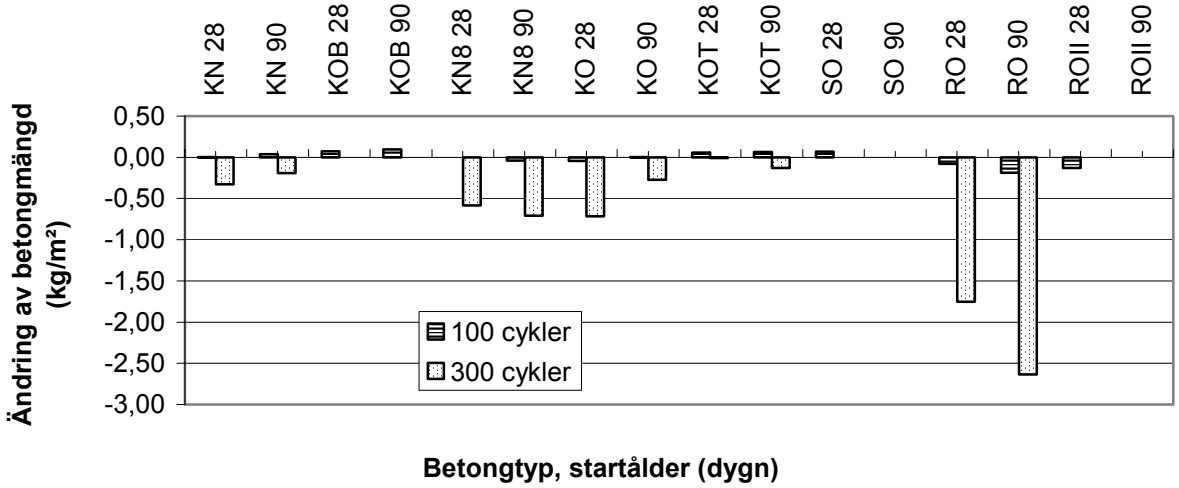
Figurerna 3.7 och 3.8 visar resultat av inre frostbeständighet hos undervattensgjuten SKB med vct varierande mellan 0.35 och 0.45 samt med lufthalt 4%. Resultaten bekräftar tidigare resultat kända för normal betong. Samtliga betongen med vct varierande mellan 0.35 och 0.45 samt med lufthalt 4% uppfyllde ställda krav utom en betong med vct = 0.35 i bortre delen från pumpstället räknat (separation av ballast och luft gav dålig inre frostbeständighet). Även SKB med vct = 0.35 och 4% lufthalt kan således erhålla dålig inre frostbeständighet om separation av ballast sker medan oseparerad SKB med vct = 0.45 och 4% lufthalt erhåller god inre frostbeständighet. I ett annat projekt studerades inre frostbeständighet hos undervattengjuten SKB med vct = 0.45 [32]. Betongen separerade kraftigt med varierande densitet inom götet som följd. Figur 3.9 visar densitet och uppmätt dynamisk elasticitetsmodul, E-modul, i götet [32,33].



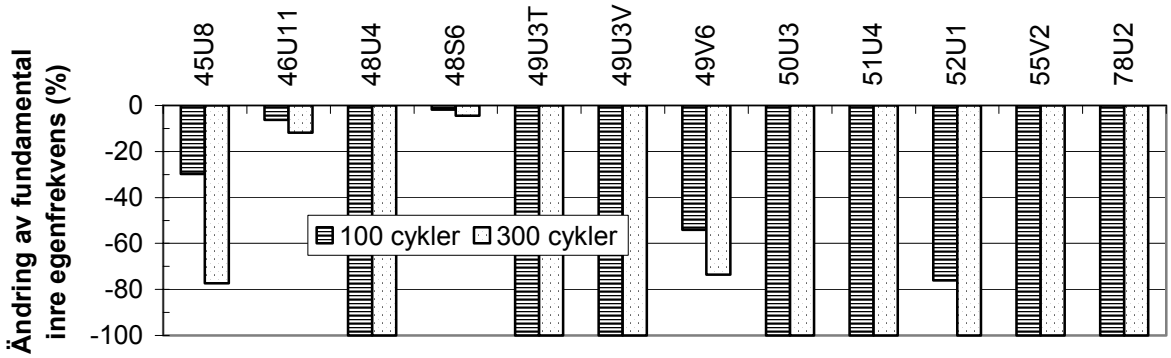
Figur 3.1 - Resultat av mätningar inre egenfrekvens (lineär mot roten ur elasticitetsmodulen) för brobetonger. B = fördubblad mängd filler, K = kalkstensfiller, N = ny blandningsordningen med filler sist, O = ordinarie blandningsordning med filler först, R = normal betong (referens), T = 6 m gjuttryck.



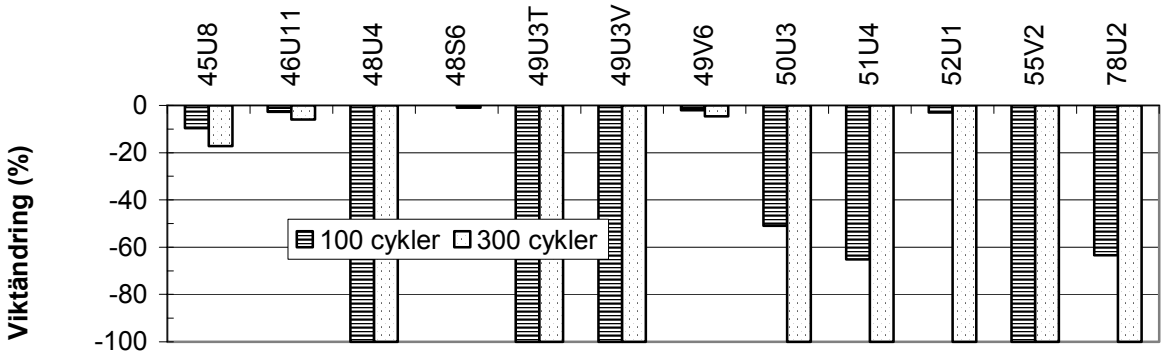
Figur 3.2 - Resultat av längdmätningar för brobetonger. Beteckningar: se figur 3.1.



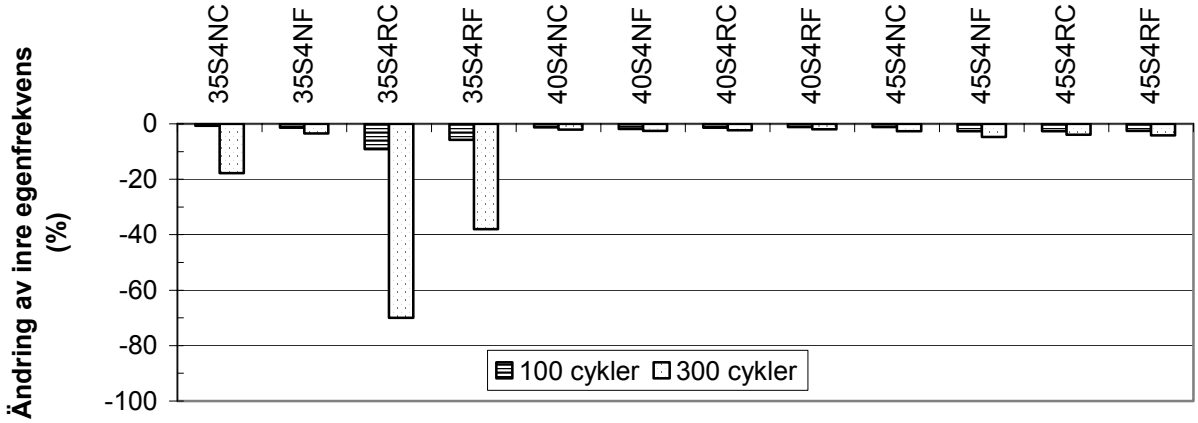
Figur 3.3 - Resultat av viktmätningar för brobetonger. B = fördubblad mängd filler, K = kalkstensfiller, N = ny blandningsordningen med filler sist, O = ordinarie blandningsordning med filler först, R = normal betong (referens), T = 6 m gjuttryck.



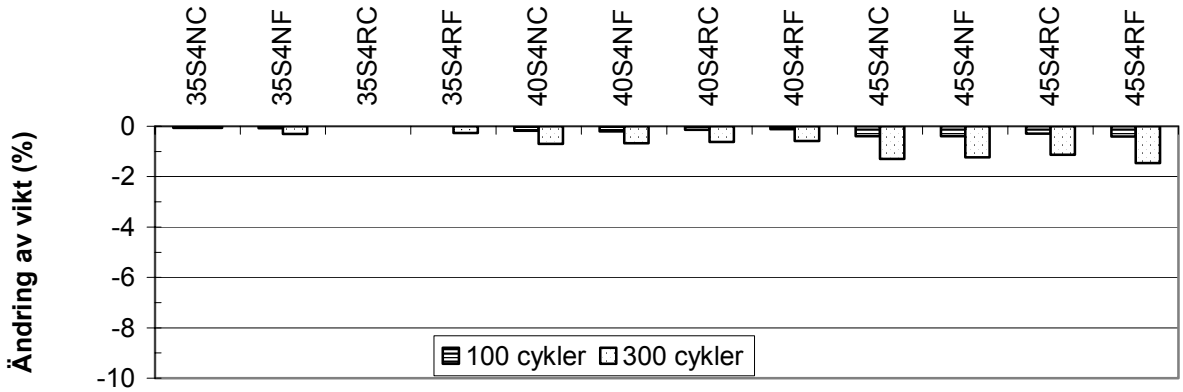
Figur 3.5 - Inre egenfrekvens. S= SKB, T= torr, U= undervattens, V= våt, <11= lufthalt (%), >45= vct.



Figur 3.6 - Viktändring. S SKB, T= torr, U= undervattens, V= våt, <11= lufthalt (%), >45= vct.



Figur 3.7 –Egenfrekvens. C = krön, F = botten, N = nära pump, R = bortre 4 = lufthalt (%), 35 = vct.



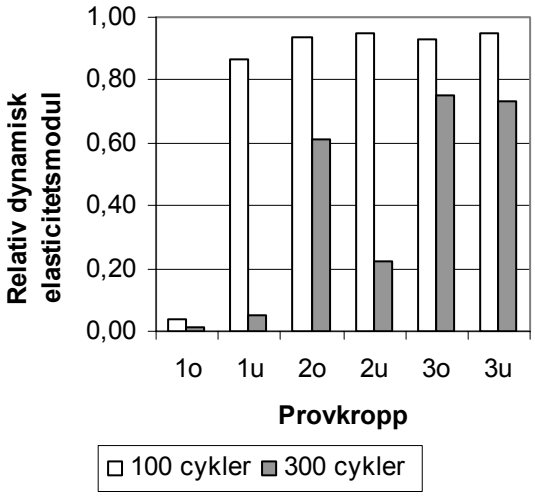
Figur 3.8 –Viktändring. C = krön, F = botten, N = nära pump, R = bortre 4 = lufthalt (%), 35 = vct.

PUMPPLATS

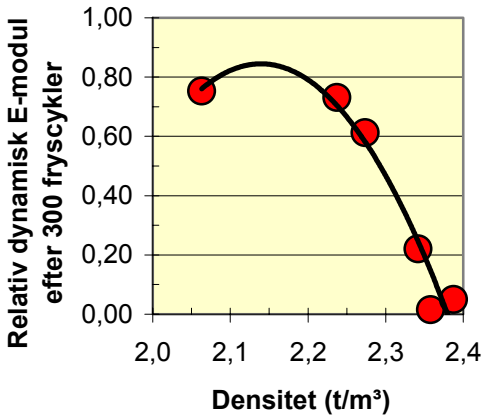
Hög densitet- låg E-modul	Låg densitet- hög E-modul	Låg densitet- hög E-modul
Hög densitet- låg E-modul	Hög densitet- låg E-modul	Låg densitet- hög E-modul

Figur 3.9 - Densitet och uppmätt dynamisk elasticitetsmodul, E-modul, i undervattensgjuten självkompakterande betong [31].

Stora skillnader i densitet fick till följd att betong närmaste pumpstället erhöll vct > 0.45, högre än planerat, med låg inre frostbeständighet (låg dynamisk E-modul) som följd medan betong längre från pumpstället hade högre cementhalt och därmed vct < 0.45 med god inre frostbeständighet som följd, Figur 3.10. Närmast pumpstället var stenhalten högre än i bortre delen av götet där ingen ballast alls fanns. Mitt i formen hade betongen också separerat kraftigt med hög stenhalt i botten och ingen grov ballast alls i övre delen av formen. Sannolikt finns risk för separation även hos ovanvattengjuten SKB. Stora variationer i densitet kan antyda dålig inre frostbeständighet inom götet. Figur 3.11 visar inre frostbeständighet (dynamisk E-modul) efter 300 fryscykler som funktion av densitet hos götet.



Figur 3.10 – Relativ inre frostbeständighet hos undervattensgjuten SKB med stor separation. o = övre del av götet, u = undre del av götet, 1 = nära pumpplats, 3 = bortre del från pumpplats.



Figur 3.11 - Inre frostbeständighet (dynamisk E-modul) efter 300 fryscykler som funktion av densitet inom götet [32].

3.2 Detaljgenomförande

Material och metoder ges i kap. 2 ovan. Sammansättning och egenskaper i färskt tillstånd hos studerade betonger ges i Appendix 1. Provkropparna utgjordes av cylindrar med längden 50 mm vilka i sin tur kapades ut ur cylindrar Ø100x200 mm³, lagrade vid RF = 60%. Ålder vid provstart var 300 dygn. Tre identiska prover av var betong användes. Före frysstart förvarades proverna 14 dygn i kalkhaltigt vatten. Frysning skedde i destillerat vatten mellan ± 20 °C, två ggr per dygn med fryshastigheten 8 °C/h. Kontroll skedde av att provkroppstemperaturen understeg -20 °C. Mätning skedde av vikt och inre egenfrekvens med en Grindosonic provutrustning före frysning, efter 100 fryscykler samt efter 300 fryscykler. Krav enligt ASTM C666-92: efter 300 fryscykler dynamisk elasticitetsmodul > 40% av ursprungsvärdet. ASTM 215-985 användes för att fastställa dynamisk elasticitetsmodul hos betongen enligt följande ekvation:

$$E_{dyn}=0.007x0.00416x((L/25.4)^3x(44.447x(D/25.4/(4xL/25.4))^2+4.136xD/25.4/(4xL/25.4)+0.9077))/(D/25.4)^4x(W/454)xN^2$$

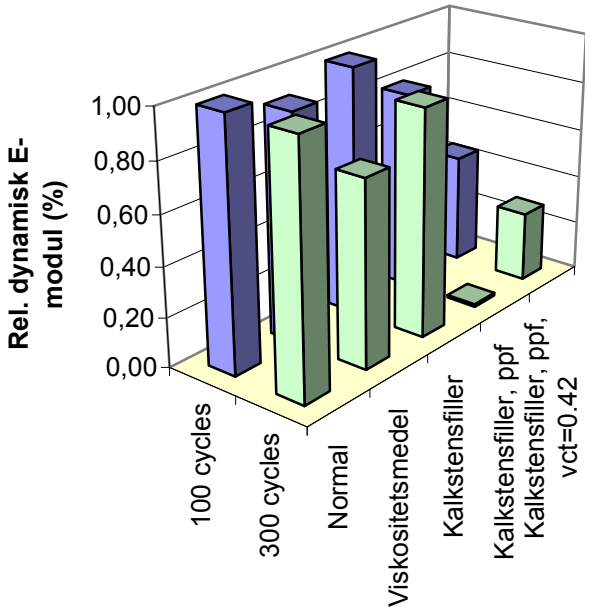
där d betecknar diametern (mm), L längden (mm), N egenfrekvensen (Hz) samt W provkroppens vikt (g).

Således skedde uppmätning av provkroppen, vägning och bestämning av transversell egenfrekvens. Egenfrekvensen bestämdes i sin tur med en Grindosonic mätapparat vilken i sin tur kalibrerats mot mätning av egenfrekvensen med annan metod. Noggrannheten i uppmät-

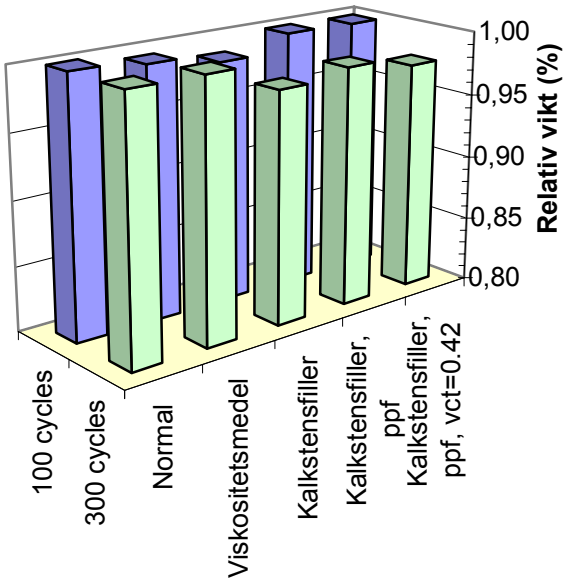
ningen får anses vara ± 0.2 mm, vägningen noggrannheten ± 0.2 g samt egenfrekvensen ha noggrannheten ± 500 Hz. Mätningen av egenfrekvensen inverkade mest på noggrannheten i beräknad dynamisk elasticitetsmodul. Vid exempelvis 15000 Hz i egenfrekvens blir onoggrannheten i dynamisk elasticitetsmodul ca ± 7% eller ± 3 GPa vid en beräknad dynamisk elasticitetsmodul av 40 GPa.

3.3 Resultat och analys

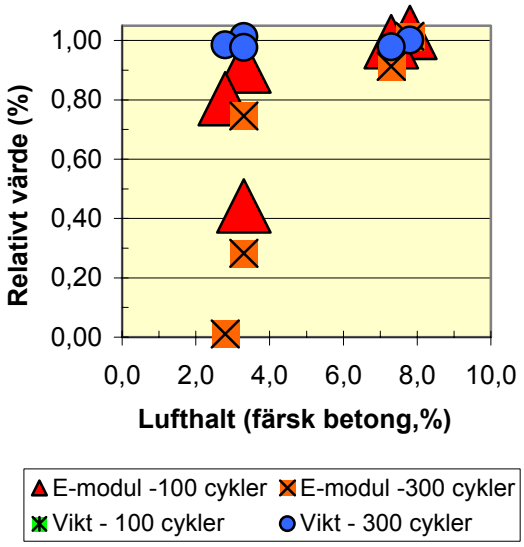
Resultat framgår av Appendix 3. Figurerna 3.12-13 visar utvecklingen av relativ elasticitetsmodul och relativ vikt. Såväl vid vct = 0.40 som vct = 0.42 minskade elasticitetsmodulen dramatiskt i betong med ppf fram till 300 frostcykler med ppf. Vikten minskade obetydligt för dessa betonger vilket kan bero av att fibrerna förstärkte ytan som blev svår att borsta ren från frostspjälkad betong. Figur 3.14 visar relativ elasticitetsmodul och relativ vikt som funktion av lufthalt i färskt tillstånd. För vissa betonger med mindre än 4% lufthalt skedde en dramatisk minskning av elasticitetsmodulen före 300 frostcykler.



Figurerna 3.12- Utveckling av relativ elasticitetsmodul. Betong med vct = 0.40 (0.42).



Figurerna 3.13- Utveckling av relativ vikt. Betong med vct = 0.40 (0.42).



Figur 3.14 – Rel. elasticitetsmodul och vikt vs lufthalt i färskt tillstånd. cykl. = frostcykler.

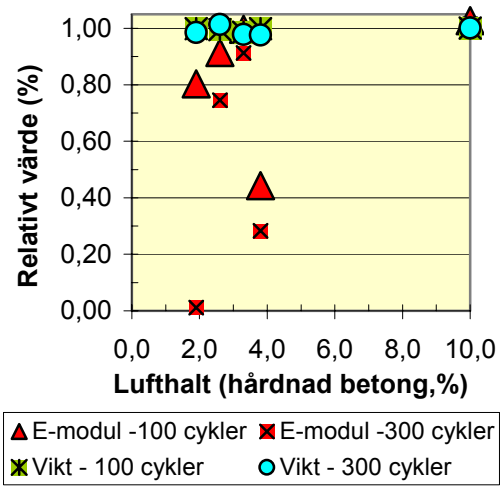
Lufthalt och avståndsfaktor i hårdnat tillstånd visas i Figurerna 3.15-16 [33]. Resultaten i Figurerna 3.15-16 var tämligen motsägelsefulla eftersom såväl god som sämre inre frostbeständighet kunde erhållas vid konstant lufthalt = 3% respektive vid konstant avståndsfaktor = 0.40 mm. Det var därför på sin plats att studera inverkan av ppf på lufthalt och avståndsfaktor, Figurerna 3.17-3.18. Figur 3.17 visar relativ elasticitetsmodul som funktion av hårdnad lufthalt för betong med och utan ppf. Figur 3.18 visar relativ elasticitetsmodul som funktion av avståndsfaktor för betong med och utan ppf.

Vid konstant lufthalt = 3% blev således rel. elasticitetsmodulen liten för betong med ppf, Figur 3.17, eftersom avståndsfaktorn blev stor, Figur 3.18. Figur 3.19 visar att avståndsfaktorn för betong med och utan ppf ungefär följde samma samband som för normal betong:

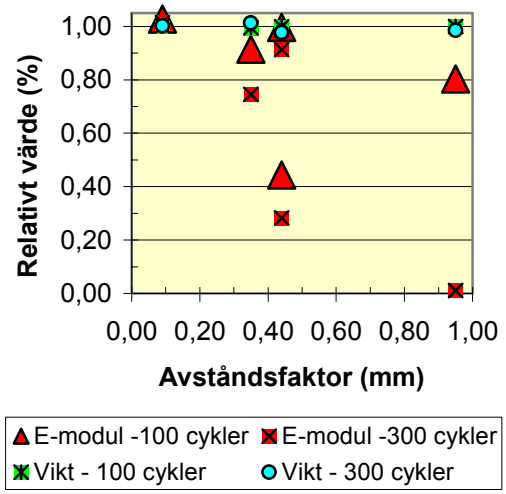
$$L = 0.05 \cdot (w/c-0.26) \cdot A^{2 \cdot (w/c-1)} \qquad (3.1)$$

A betecknar lufthalt (-)
L betecknar avståndsfaktor (mm).

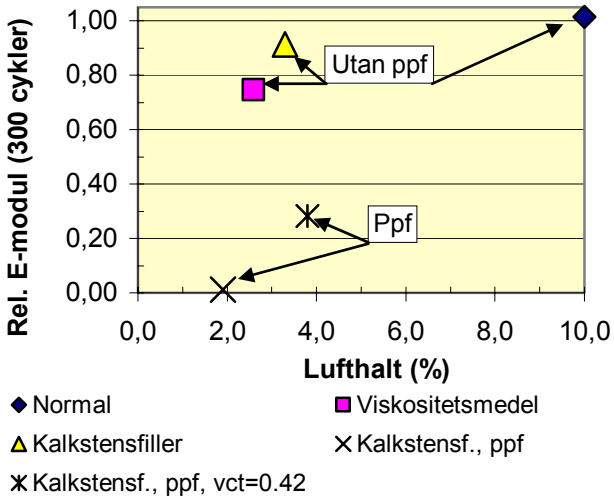
Troligen skedde en sammanslagning av små luftporer till större under inverkan av ppf. I och med att luftporerna blev färre till antalet blev medelavståndet dem emellan också större (= dubbla avståndsfaktorn).



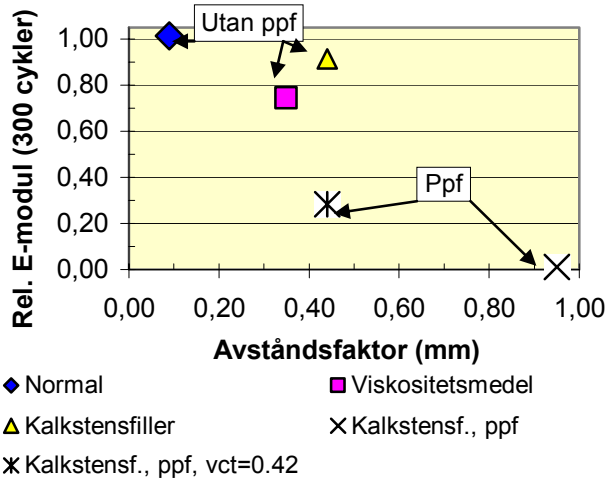
Figur 3.15 - Relativ elasticitetsmodul och relativ vikt versus lufthalt i hårdnat tillstånd.



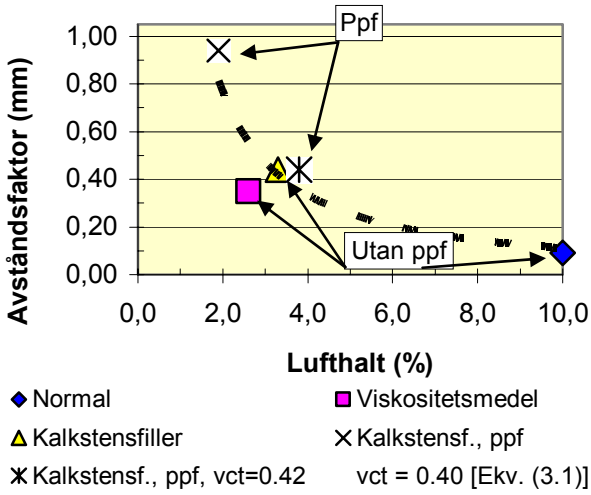
Figur 3.16 - Relativ elasticitetsmodul och relativ vikt versus avståndsfaktor.



Figur 3.17 – Rel. elasticitetsmodul versus hårdnad lufthalt för betong med och utan ppf.



Figur 3.18 – Rel. elasticitetsmodul versus hårdnad lufthalt för betong med och utan ppf.



Figur 3.19 – Avståndsfaktor versus lufthalt för olika typ av SKB, med och utan ppf, samt för normal betong och enligt ekvation (3.1).

3.4 Slutsatser av inre frostbeständighet

Efter flera studier av inre frostbeständigheten hos självkompakterande betong omfattande längdändringar, viktsförändringar och inre fundamental egenfrekvens kunde följande konstateras:

1. SKB med polypropylenfibrer uppvisade mycket sämre inre frostbeständighet vid konstant lufthalt än SKB utan polypropylenfibrer och än normal betong vilket berodde på att avståndsfaktorn var större.
2. Troligen sammanslogs luftporerna till större i SKB med polypropylenfibrer än i SKB utan polypropylenfibrer och än i normal betong.
3. Till följd av segregation av luft och ballast uppvisade undervattengjuten SKB sämre inre frostbeständighet långt från gjutplatsen än nära den plats där betongen pumpades in i konstruktionen.
4. För SKB krävdes vid vct = 0.40 minst 5% lufthalt samt avståndsfaktor < 0.25 mm för att uppfylla kraven på god inre frostbeständighet.

4. Kloridmigrationskoefficient, D

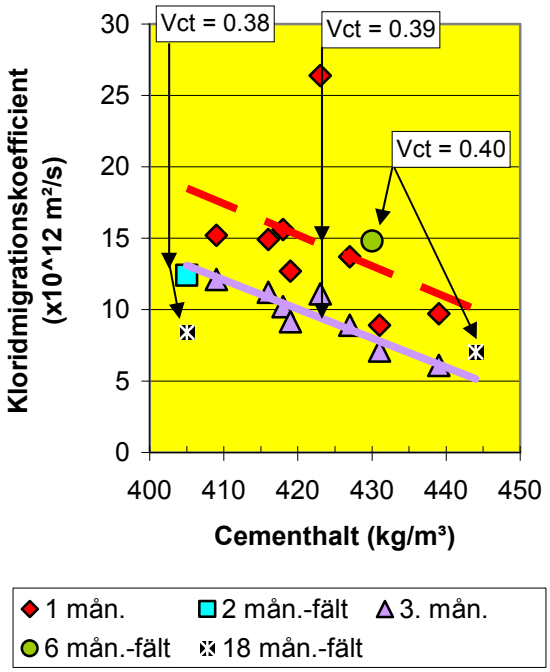
4.1 Tidigare forskning

Det har visats att kloridinträngningen i betong ökar om Portlandscement ersätts med kalkstensfiller troligen eftersom kalkstensfiller ej binder klorider [25,34]. Figur 4.1 visar att kloridmigrationskoefficienten för SKB med vct = 0.39 var lineärt beroende av cementhalten. Ett nästan lineärt beroende erhölls även av vct. Följande samband erhölls för att beräkna kloridmigrationskoefficienten, D ($x10^{-12}$ m²/s):

$$D=\{[(0.0055\cdot\ln(t)-0.2122)\cdot c-3.5\cdot\ln(t)+104]\cdot(4\cdot w/b-1.2)/0.4\}\cdot(10^{-12})\ \{R^2=0.88\}\ (4.1)$$

c betecknar cementhalt (375 < c < 450 kg/m³)
ln(t) naturliga logaritmen av betongens ålder (1 < t < 36 månader), w/b vbt (0.35 < w/b < 0.50)

Det har nyligen visats att kloridinträngningen vid havsvattenexponering fördubblats med 14% innehåll av kalkstensfiller i cementet jämfört med kloridinträngningen i betong med cement utan kalkstensfiller [35]. Ett sätt att minska kloridmigrationskoefficient i betong är att tillföra ca 5% silikastoft beräknat på cementhalten [36-38].



Figur 4.1 - Kloridmigrationskoefficient med vct = 0.39 som funktion av cementhalt [34].

4.2 Detaljgenomförande

Tangs provutrustning användes, dels för prover härdade vid RF = 60%, dels för prover härdade vid RF = 90% [39-40]. Material och metoder ges i kap. 2. Ålder vid provstart var 300 dygn. Även i detta fall kapades cylindrar Ø100x200 mm³ till längden 50 mm. Efter kapning skedde vattenlagring. Prover som först hade härdats vid RF = 60% vattenlagrades 1 vecka medan prover som först hade härdats vid RF = 90% vattenlagrades under 3 veckors tid. Vakuumbehandling skedde under 3 h varefter proverna fick fritt suga vatten under 24 h. Kloridmigrationskoefficienten mättes under 1 dygn med hjälp av yttre pålagd elektrisk spänning. Efter migrationen mättes djupet på kloridmigrationen efter detektering med silvernitrat. Tre identiska prover av var betong användes dvs. tre vid RF = 60%, 3 prover efter härdning vid RF= 90%. Diffusionskoefficienten för kloridmigration beräknades enligt följande, D ($x10^{-12}$ m²/s):

$$D= 0.0239\cdot(273+T)\cdot L\cdot/[(U-2)\cdot t]\cdot\cdot\{x_d-0.0238\cdot[(273+T)\cdot L\cdot x_d)/(U-2)]^{1/2}\}\ (4.2)$$

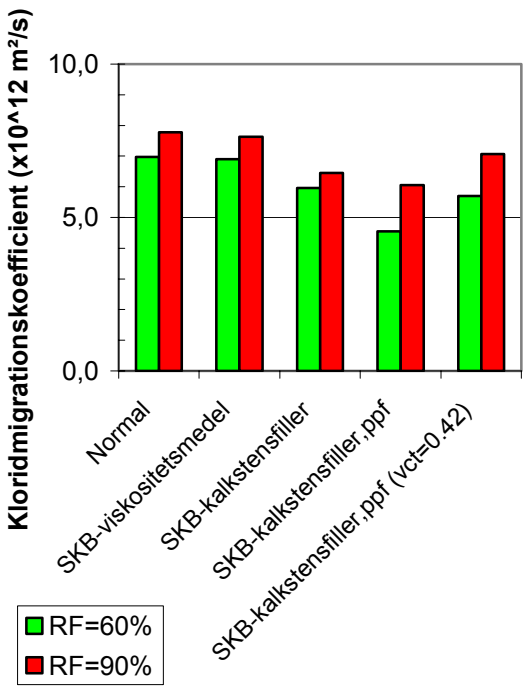
t betecknar provtid (h)
x_d betecknar medelmigrationsdjup (mm)
L betecknar provtjocklek (mm)
T betecknar medeltemperatur (°C)
U betecknar pålagd spänning (V)

4.3 Resultat och analys

Resultat framgår av Appendix 4 med medelvärden enligt Tabell 4.1. Enligt Figur 4.1 fanns en tendens att D var större efter härdning vid RF = 90% än efter härdning vid RF = 60%. Signifikansanalys visar att så var fallet för betong med ppf dvs. betong med ppf erhöll mindre kloridmigrationskoefficient efter härdning vid RF = 60% än efter härdning vid RF = 90% (z = 8.4 > 1.97 resp. z = 2.1 > 1.97).

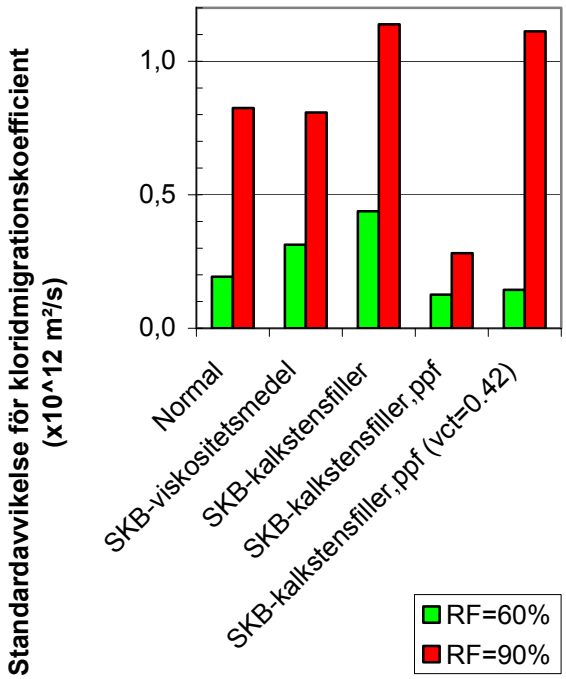
Tabell 4.1 –Uppmätt kloridmigrationskoefficient ($x10^{-12}$ m²/s).

Betong/RF	D m.v.	Stdav	Variations-koefficient
40LN0-60%	6.97	0.19	0.03
40LN0-90%	7.77	0.82	0.11
40L00-60%	6.90	0.31	0.05
40L00-90%	7.63	0.81	0.11
40LK0-60%	5.96	0.44	0.07
40LK0-90%	6.45	1.14	0.18
40LK2-60%	4.55	0.13	0.03
40LK2-90%	6.05	0.28	0.05
42LK2-60%	5.70	0.14	0.03
42LK2-90%	7.07	1.11	0.16

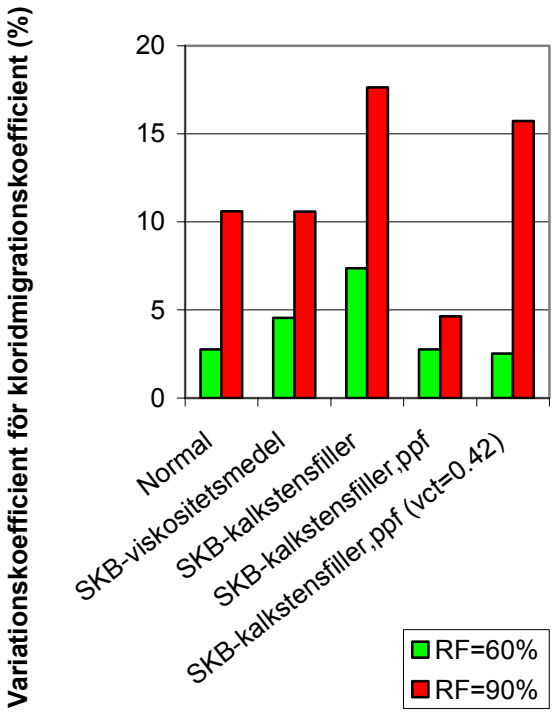


Figur 4.1 – Kloridmigrationskoefficient, D.

Vid RF = 90% förekom ingen skillnad mellan kloridmigrationskoefficienten för betongerna. För RF = 60% var kloridmigrationskoefficienten mindre i betong med kalkstensfiller än i betong utan kalkstensfiller (z = 3.7 > 1.97). För betong med ppf var kloridmigrationskoefficienten vid RF = 60% signifikant mindre än kloridmigrationskoefficienten utan ppf (z = 5.3 > 1.97). I Figurerna 4.2-4.3 visas standardavvikelse och variationskoefficient. För betong med kalkstensfiller, både utan och med ppf, uppmättes variationskoefficient > 10% vid RF = 90%. Signifikanta skillnader i D beroende av kalkstensfillerinblandning uppmättes vid RF = 60%. Som medelvärde beräknades D = $6 \cdot 10^{-6}$ m²/s efter härdning vid RF = 60% och D = $7 \cdot 10^{-6}$ m²/s efter härdning vid RF = 90%. Orsaken till ca 20% större D efter härdning vid RF = 90% än vid härdning vid RF = 60% kan vara kort vakuumbehandling. Efter härdning vid RF = 60% kan 3 h vara för kort tid för att porerna skall vattenfyllas. Resultaten efter härdning vid RF = 90% får anses mest relevanta. Variationskoefficienten var störst efter härdning vid RF = 90%. Signifikanta skillnader mellan kloridmigrationskoefficient med eller utan ppf kunde ej konstateras vid RF = 90%. Normal betong får anses ha samma D som SKB vid RF = 90%. Högre D för prover härdade vid RF = 90% skulle kunna bero av större alkaliurlakning då dessa vattenlagrades 3 veckor mot 1 veckas vattenlagring för prover som härdats vid RF = 60%.



Figur 4.2 – Standardavvikelse för D.



Figur 4.3 - Variationskoefficient för D.

En annan relevant parameter att studera var hållfasthet. Figur 4.4 visar D som funktion av cylinderhållfasthet, fc. Högre hållfasthet gav lägre D vid konstant vct. Följande samband erhölls efter härdning vid RF = 60%:

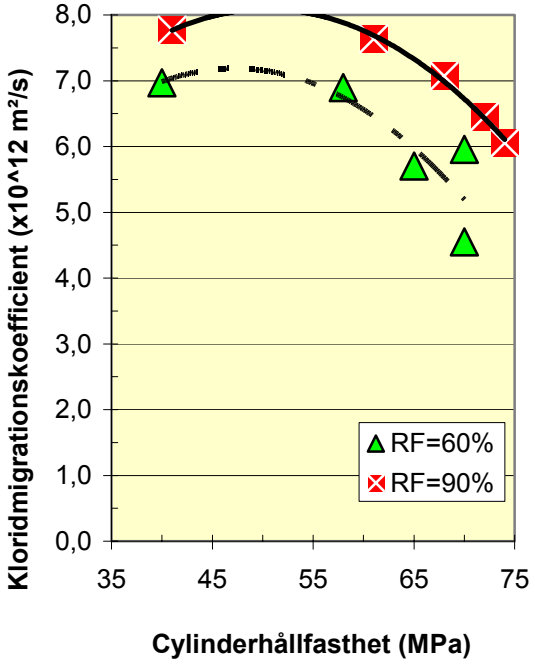
$$D = -0.00386 \cdot fc^2 + 0.364 \cdot fc - 1.4 \quad (4.3)$$

Följande samband erhölls vid RF = 90%:

$D = -0.00357 \cdot fc^2 + 0.360 \cdot fc - 1$ (4.4)

fc betecknar cylinderhållfasthet (MPa)
D betecknar diffusionskoefficienten för kloridmigration ($x10^{-12}$ m²/s

Hållfastheten var i det närmaste dubbelt så hög i SKB som i normal betong vid konstant vct vilket troligen beror av en förbättrad partikelfördelning i den färska betongen samt förbättrade fasgränser. Om inte betongen vibreras uppstår ingen rörelse mellan ballast och cementpasta i färskt stadium varför heller ingen ansamling av vatten sker mellan ballast och cementpasta i SKB som är fallet för normal betong. Figur 4.5 visar med ekvation (4.1) beräknad D som funktion av uppmätt D. Utom för betong med viskositetshöjande medel överensstämde uppmätt och beräknad D väl.

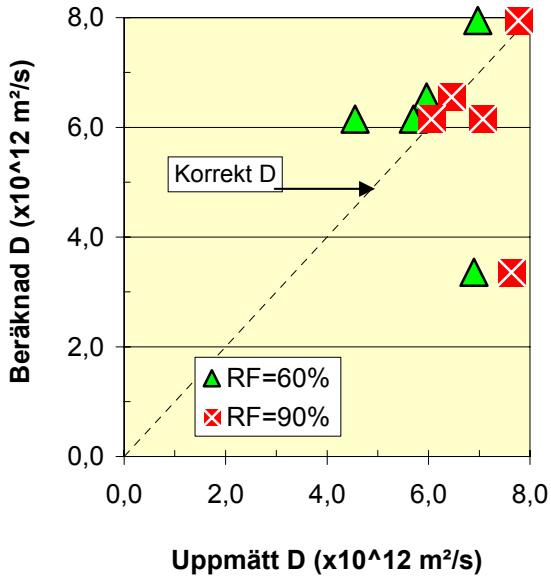


Figur 4.4 –D versus cylinderhållfasthet.

4.4 Slutsatser beträffande kloridmigrationskoefficienten

Följande slutsatser kunde dras:

1. Kloridmigrationskoefficient = $6 \cdot 10^{-12}$ m²/s erhölls efter härdning vid RF = 60% och = $7 \cdot 10^{-12}$ m²/s vid RF = 90%.



Figur 4.5 - Med ekvation (4.1) beräknad D som funktion av uppmätt D.

2. Efter härdning vid RF = 60% var kloridmigrationskoefficienten mindre för självkompakterande betong med ppf än för självkompakterande betong utan ppf.
3. Efter härdning vid RF = 90% hade självkompakterande betong med ppf 20% större kloridmigrationskoefficient än vid RF = 60%.
4. Vid RF = 60% var kloridmigrationskoefficienten mindre för självkompakterande betong med ppf än för normal betong utan fibrer.
5. Efter härdning vid RF = 60% var kloridmigrationskoefficienten mindre för självkompakterande betong med kalkstensfiller än för normal betong.
6. Efter härdning vid RF = 90% kunde inga signifikanta skillnader konstateras mellan kloridmigrationskoefficienten för självkompakterande betong och den för normal betong.
7. Efter härdning vid RF = 90% kunde inga signifikanta skillnader konstateras mellan kloridmigrationskoefficienten för självkompakterande betong med ppf och självkompakterande betong utan ppf.
8. Kloridmigrationskoefficienten för SKB minskade signifikant med ökad hållfasthet.

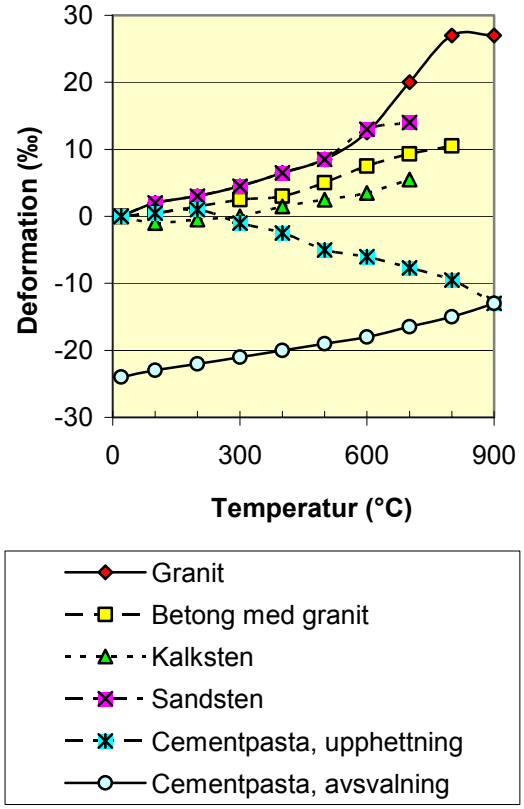
5. Krympning inklusive temperaturutvidgning

5.1 Tidigare resultat

För att studera krypning vid hög temperatur var det lämpligt att först få kännedom om krympning inklusive temperaturutvidgning för betong utan last. Det var intressant studera tidigare rön på området [41], Tabell 5.1. Figur 5.1 visar temperaturutvidgningskoefficienten, μ, för området (20 °C < T < 900 °C).

Tabell 5.1 – Mätt μ (20 °C < T < 900 °C) [41].

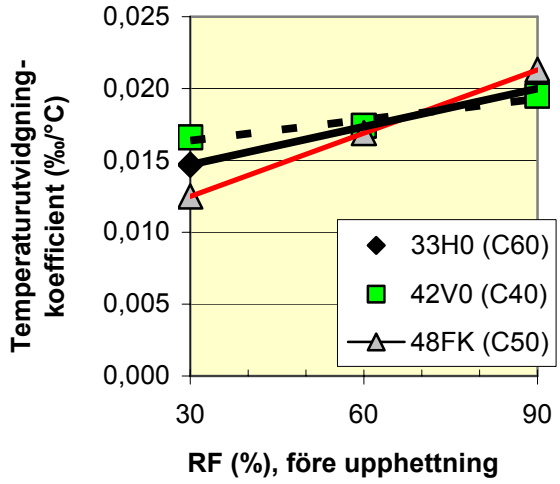
Material	μ (‰/°C)
Granit	0.020
Betong med granit	0.014
Kalksten	0.009
Sandsten	0.021
Cementpasta, upphettning	-0.022
Cementpasta, avsvalning	0.011



Figur 5.1 – μ för vissa betongmaterial [41].

Temperaturutvidgningskoefficienten inklusive krympning studerades för ett antal husbyggnadsbetonger härdade mellan RF = 30% och RF = 90% [29], Tabell 5.2, Figur 5.2. Från Figur 5.2 beräknades temperaturutvidgningskoefficienten inklusive krympning, μ, baserat på temperatur på 20 mm:s avstånd från betongytan, T, dvs. nära nog halva hydrauliska radien = 100/4 = 25 mm, Tabell 5.2 (‰/°C):

$$\mu = [0.014\cdot(vct)^2-0.011\cdot vct+0.0022]\cdot RF-0.97\cdot(vct)^2+0.76\cdot vct-0.133 \quad \{0.30 < vct < 0.50;\ 30\% < RF < 90\} \quad (5.1)$$



Figur 5.2 - μ versus RF (20 °C < T < 500 °C).

Tabell 5.2 – μ (‰/°C, 20 °C < T < 500 °C).

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

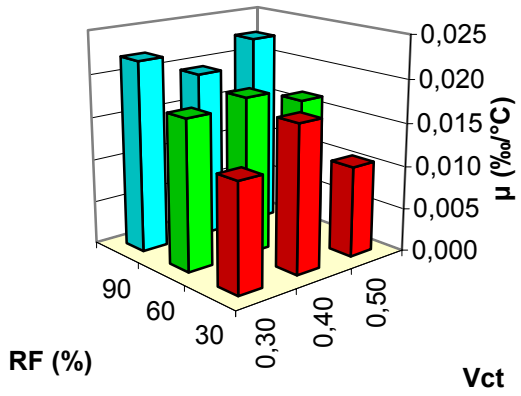
C40 hållfasthetsklasss, FK = Falkenberg, H = Hallsberg, V = Vislanda, 42 = vct (%).
Kursiv text = extrapolation/interpolation.

Figur 5.3 visar ett samband mellan μ inklusive krympning för SKB (‰/°C) [29]:

$$\mu = [0.014\cdot(vct)^2-0.011\cdot vct+0.0022]\cdot RF-0.97\cdot(vct)^2+0.76\cdot vct-0.133 \quad \{0.30 < vct < 0.50;\ 30\% < RF < 90\} \quad (5.2)$$

5.2 Detaljgenomförande

Provningen skedde i en elektrisk ugn enligt Appendix 2 med mätning av deformationer vid 20 °C. En, i förhållande till betongens hållfasthet, liten yttre last med en konstant spänning om ca 0.5 MPa anbringades under hela provningen i syfte att undvika instabiliteter i mätningen av deformationer. Betongens cementpasta krymper under temperaturutvidgning medan betongens ballast expanderar varför stora inre deformationer erhålls i betongen.



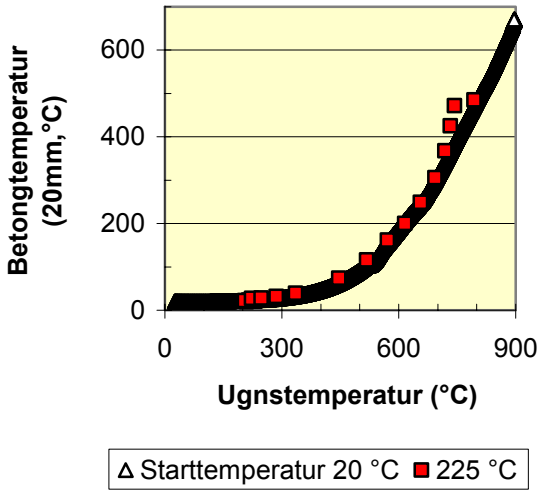
Figur 5.3 - μ inklusive krympning, (20 °C < T < 500 °C) [29].

Prover härdades vid RF = 90%. Två temperaturutvecklingskurvor användes, dels ouppvärmd ugn (RF = 90%), dels ugn förvärmd till 225 °C, det senare fallet i syfte att nå en snabbare temperaturutveckling vilket anses vara viktigt för risken för att spjälkning skall ske. Temperaturutvecklingen i betongen 20 mm från ytan skiljde emellertid mycket litet mellan betong som studerades från 20 °C och från 225 °C förvärmd ugn, Figur 5.4. Följande temperaturutvecklingssamband användes:

$$T_{B20} = 7.23 \cdot \exp(0.0054 \cdot U) + 10 \qquad (5.3)$$

$$T_{B225} = 6.7 \cdot \exp(0.00555 \cdot U) \qquad (5.4)$$

T_{B20} betecknar betongtemperatur på 20 mm, U ungstemperatur (°C).



Figur 5.4 – Betongtemperatur, 20 mm mätdjup, vid 20 °C resp. 225 °C starttemperatur.

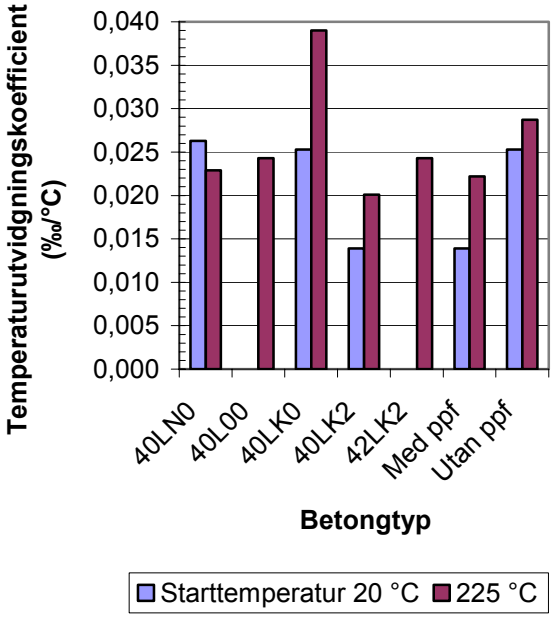
5.3 Resultat och analys

Figur 5.5 visar deformation hos provad betong utan last versus betongtemperatur vid 20 °C starttemperatur på ugnen. Figur 5.6 visar deformation hos provad betong utan last versus betongtemperatur vid 225 °starttemperatur på ugnen. Figur 5.7 visar en sammanfattning av uppmätt temperaturutvidgningskoefficient. Som ovan i Tabell 5.2 fanns en klar tendens till minskande temperaturutvidgningskoefficient för betong med ppf vilket överensstämmer väl med tidigare erfarenheter: ppf hindrar först, vid lägre temperatur, vatten från att tränga in i betongen för att sedan bilda kanaler då nedbrytning sker av ppf vid högre temperatur. I Appendix 5 visas medelvärden som används vid beräkningar av krypning vid hög temperatur.

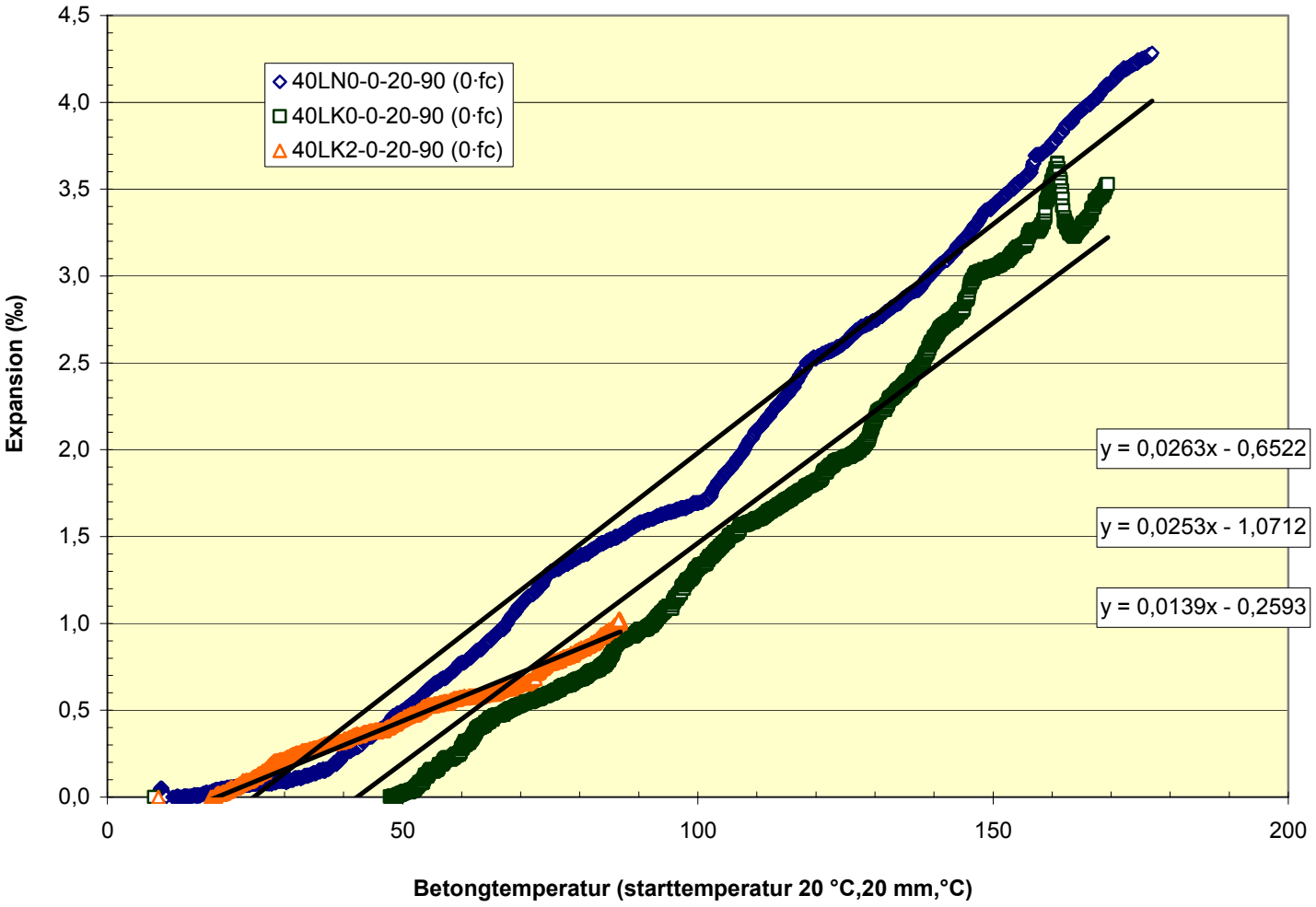
5.4 Slutsatser

Följande slutsatser kunde dras:

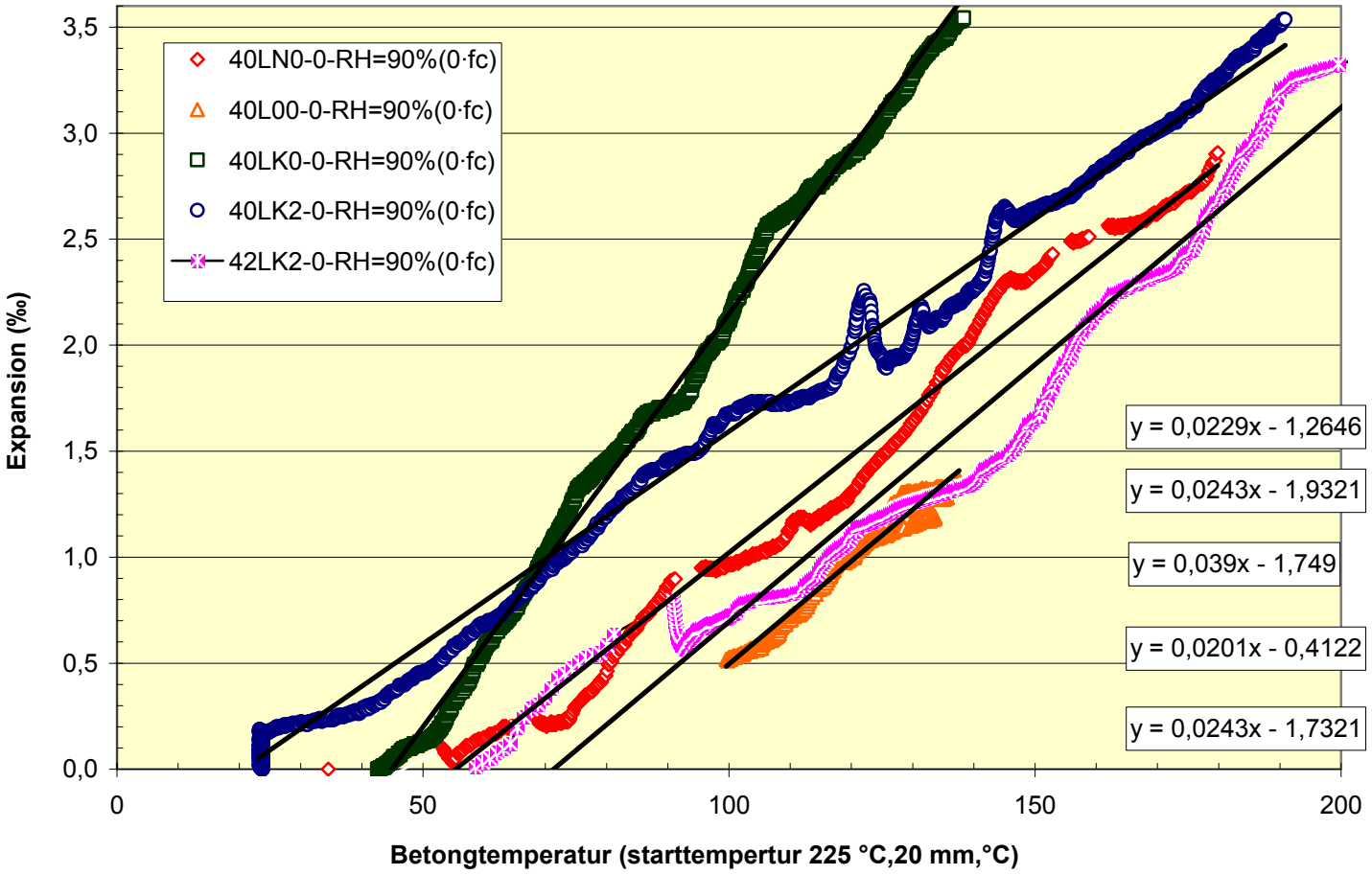
1. Betong med ppf uppvisade en ca 33% lägre temperaturutvidgningskoefficient än betong utan ppf.
2. Lägre starttemperatur, 20 °C, gav något lägre temperaturutvidgningskoefficient än en högre, 225 °C, vilket förklaras av en snabbare ytuppvärmning vid den högre starttemperaturen.



Figur 5.7 - Uppmätt μ. K = kalkstensfiller, L = LTH, Med (Utan) = medelvärde. N = normal betong, 00 = viskositetsmedel, 02 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct (%).



Figur 5.5 - Deformation hos provad betong utan last versus betongtemperatur vid 20 °starttemperatur. K = kalkstensfiller, L = LTH, M.v. = medelvärde. N = normal betong, 00 = viskositetsmedel, 02 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct (%).



Figur 5.6 Deformation hos provad betong utan last versus betongtemperatur vid 225 °starttemperatur. K = kalkstensfiller, L = LTH, M.v. = medelvärde. N = normal betong, 00 = viskositetsmedel, 02 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct (%).

6. Krypning vid hög temperatur

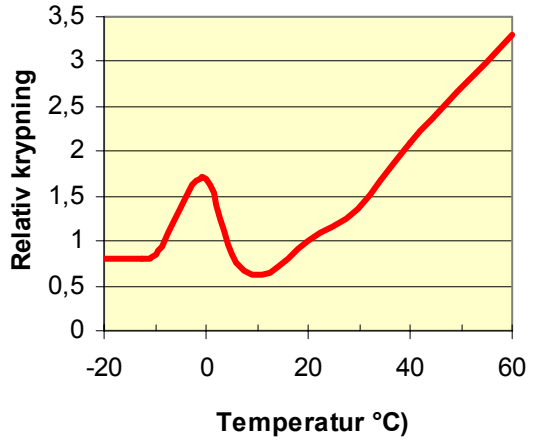
6.1 Tidigare forskning

Krypning definieras som deformation vid konstanta yttre förhållanden, last och omgivningsklimat. Kryptalet definieras på följande sätt:

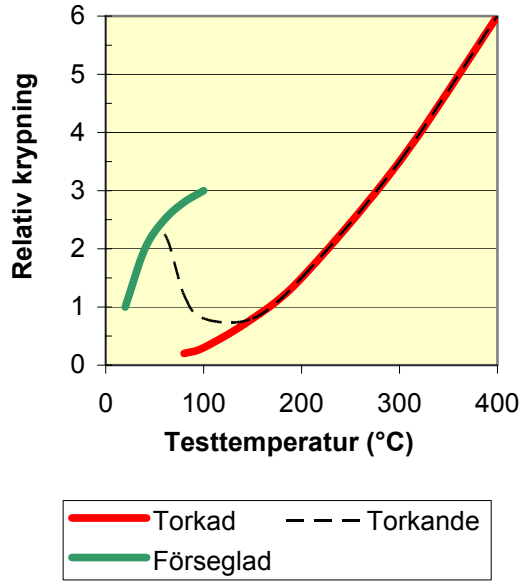
$$\varphi = (\delta_T - \delta_{el})/\ \delta_{el} \qquad (6.1)$$

δ_T betecknar deformation under upphettning
δ_{el} betecknar elastisk deformation vid 20 °C.

Figur 6.1 visar relativ krypning vid temperaturer upp till 60 °C samt i Figur 6.2 motsvarande parameter upp till 400 °C [42,43]. Omkring fryspunkten uppmäts en ökande krypning till följd av isbildning samt vid ökande temperatur upp till 60 °C eftersom relativa fuktigheten ökar i betongens porer samtidigt som temperaturen ökar [42]. Över 100 °C sker dehydratation [43].



Figur 6.1 - Relativ krypning upp till 60 °C.



Figur 6.2 - Relativ krypning upp till 400 °C [43].

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

$$d\varphi/dT = 0{,}030\cdot[(\sigma/fc) + 0{,}56] \quad \{0.15 < \sigma/fc < 0.45;\ R^2=0.81\} \qquad (6.2)$$

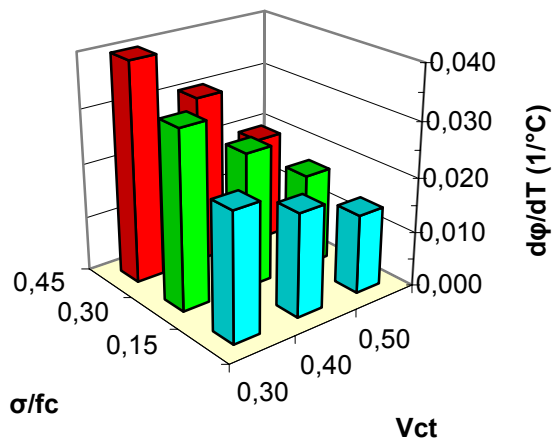
$$d\varphi/dT = 0{,}00023\cdot[RF + 54] \quad \{30 < RF < 90\%;\ R^2=0.96\} \qquad (6.3)$$

Exempel för 200 °C temperaturökning:

$\sigma/fc = 0.30 \Rightarrow \varphi = 0.03\cdot(0.3 + 0.56)\cdot 200 = 5.16$
$RF = 60\% \Rightarrow \varphi = 0.00023\cdot(60 + 54)\cdot 200 = 4.78$, dvs. tämligen lika resultat med ekvationerna (6.2) och (6.3). Ett alternativt samband mellan kryptalsutvecklingen, dφ/dT, vid en temperaturutveckling av 450 °C/h hos SKB utan fibrer härdad vid RF = 60% visas i Figur 6.3 och ges av följande samband (1/°C) [29]:

$$d\varphi/dT = (-0.219\cdot(\sigma/fc)-0.011)\cdot vct+0.127\cdot(\sigma/fc)+0.0173 \quad \{0.30 < vct < 0.50;\ 0.15 < \sigma/fc < 0.45\} \qquad (6.4)$$

σ/fc betecknar lastnivån före provning.

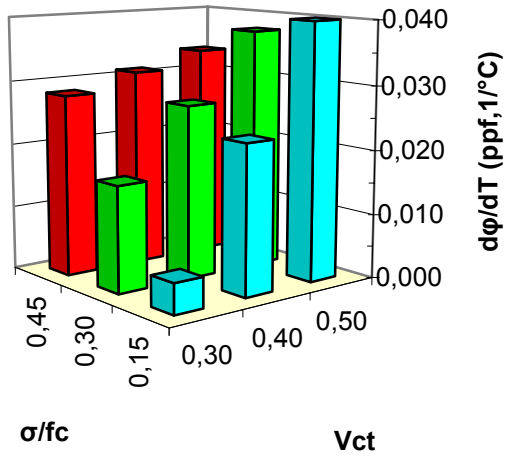


Figur 6.3 - Kryptalsutvecklingen, dφ/dT, vid en temperaturutveckling av 450 °C/h hos SKB utan fibrer förlagrad vid RF = 60% [29].

Kryptalet erhålls genom multiplikation med temperaturhöjningen i betongen, företrädesvis upp till 250 °C eftersom få SKB utan fibrer klarade högre temperatur vid snabb upphettning. Figur 6.3 visar kryptalsutvecklingen i SKB utan fibrer. Av Figur 6.3 framgår att kryptalsutvecklingen i SKB utan fibrer ökade för lägre vct. Skillnaden i krypning mellan ytan av betongen och dess inre delar blev större vid lägre vct än vid högre. 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 då betong med högre vct studeras. Eftersom krypning och fukttransport är synonyma begrepp är ett högre kryptal ett tecken på att fukt förhindras att transporteras ut ur betongen, mer vid lägre vct än vid högre. Ett samband mellan kryptalsutvecklingen vid temperaturutvecklingen av 450 °C/h hos SKB med fibrer härdad vid RF = 60%, visat i Figur 6.4, ges av (1/°C):

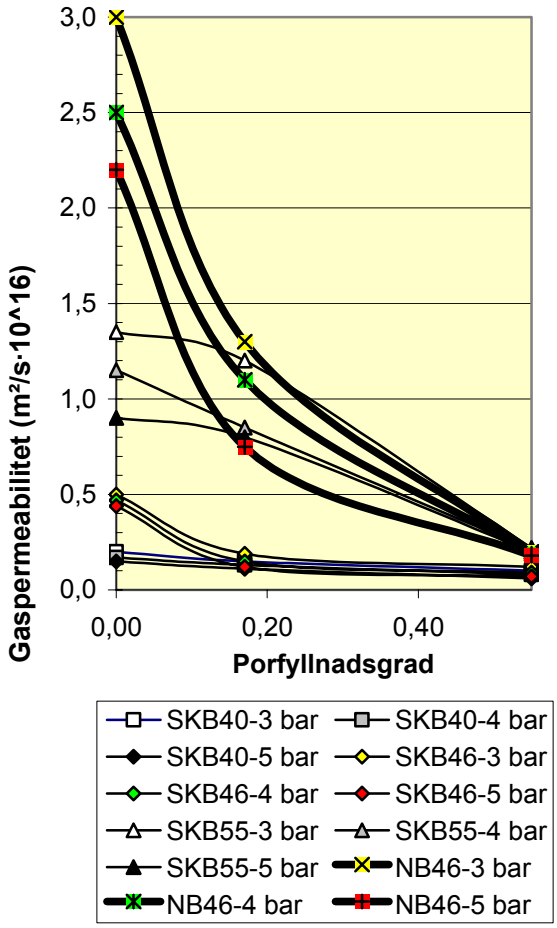
$$d\varphi/dT = (-0.53\cdot(\sigma/fc)+0.265)\cdot vct+0.238\cdot(\sigma/fc)-0.0868$$

$$\{0.30 < vct < 0.50;\ 0.15 < \sigma/fc < 0.45\} \quad (6.5)$$



Figur 6.4 - Kryptalsutveckling, dφ/dT, hos SKB med fibrer vid temperaturutveckling 450 °C/h [41].

Kryptalet erhålls genom multiplikation med temperaturhöjningen i betongen, upp till 500 °C. Av Figur 6.4 framgår tydligt att kryptalsutvecklingen 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 mindre 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 kryptal ett tecken på att fukt kanaliserats för att transporteras genom betongen, mer vid lägre vct än vid högre. Därav det lägre kryptalet för betong med fibrer än utan fibrer. Kanaliseringen av fukt i betong med fibrer blir en ersättning för de sämre fasgränser som vibrerad betong har jämförts med SKB, Figur 6.5 [44], 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 cementpastan i övrigt som följd. Detta är inte fallet för SKB som har fasgränser med hög beständighet och hållfasthet jämfört med normal betong men också sämre motståndskraft mot spjälkning vid höga temperaturer eftersom fukt stängs inne i och med bättre fasgränser.



Figur 6.5 - Gaspermeabilitet i SKB vs porfyllnadsgrad [44]. NB = normal betong, SKB = självkompakterande betong, 46 = vct (%).

6.2 Detaljgenomförande

Till skillnad från normala krypförsök varierades omgivningsklimatet genom att temperaturen ökades med ca 15 °C/min. Från uppmätt deformation subtraherades deformationer till följd av temperaturutveckling och krympning enligt Appendix 5. Nio prover med spänningsnivåer ca 15% eller ca 30% av cylinderhållfastheten studerades, Appendix 6. Ett försök utfördes efter härdning vid RF = 60% och övriga 8 försök efter härdning vid RF = 90%. Sju försök utfördes med 20 °C starttemperatur i ugn och två försök med 225 °C starttemperatur. Starttemperaturen påverkade betongtemperaturen på 20 mm obetydligt, Figur 5.4. Krypningen följdes så långt möjligt, vilket begränsades av spjälkning för prover utan ppf som härdats vid RF = 90% (alla prover utan ppf exploderade efter härdning vid RF = 90%).

6.3 Resultat

Specifik krypning, J_T, beräknades på följande sätt (miljondelar/MPa):

$$J_T = -1000\cdot(\delta_T - \mu\cdot\Delta T)/\sigma \quad (6.2)$$

ΔT betecknar temperaturökning (°C)
δ_T betecknar deformation under upphettning (‰)
σ betecknar påkänning (MPa)
μ betecknar temperaturutvidgningskoefficienten inklusive krympning (‰/°C)

Figurerna 6.6 resp. 6.7 visar specifik krypning för ca 15% resp. ca 30% av brottlasten. Betong med ppf visade betydligt mindre specifik krypning än betong utan ppf (samtliga prover utan ppf exploderade). Krypning liksom krympning och fuktrörelser är synonyma begrepp. Om fuktrörelser i betongen kanaliseras genom inblandning av ppf blir även krypningen mindre för betong med ppf än för betong utan ppf. Närmast ytan på betongen mister ppf sina egenskaper till följd av hög temperatur. Lägre in i betongen expanderar ppf vid temperaturhöjningen mer än betongens struktur och fyller därvid ut betongens porer så att fuktrörelser inåt betongen förminskas. Mest effektiv är denna effekt förmodligen i ett skikt av betongen där denna håller ca 140-170 °C och ppf smälter. Fukt hindras då från att tränga inåt en del av betongen som har lägre temperatur än ytan och magasineras. Fukten kanaliseras i stället ut ur betongen genom ytan där ytterst fina kanaler har bildats av smälta och nedbrytna ppf. Figurerna 6.6 och 6.7 är i viss mån missvisande vad gäller den specifika krypningen storlek för normal betong. Tabell 6.1 visar att SKB vid konstant vct erhöll minst 50% högre hållfasthet än normal betong till följd av förbättrade fasgränser, Figur 6.5. Detta innebär att SKB kan belastas i motsvarande grad mer än normal betong med ökad elastisk deformation som följd. Ett bättre sätt att jämföra betongens krypegenskaper är med kryptalet där krypningen jämförs med elasticitetsmodulen, Appendix 6. Figurerna 6.8 resp. 6.9 visar kryptalshastigheten för betongerna vid 15% resp. 30% lastnivåer. Tabell 6.2 visar uppmätt och med ekvationerna (6.4) och (6.5) beräknad kryptalshastighet för provade betonger (1/°C).

Tabell 6.1 – Uppmätt cylinderhållfasthet i betonger vid 3 och 10 mån. ålder (MPa).

Betong	**40LN0**	**40L00**	**40LK0**	**40LK2**	**42LK2**
3 mån. RF=90%	37	54	63	55	55
10 mån. RF=60%	40	58	70	70	65
10 mån. RF=90%	41	61	72	74	68
Hållfasthetsklass	C40	C60	C70	C70	C65

K = kalkstensfiller, L = LTH, N = normal; 00 = viskositetsmedel, 02 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct (%).

Tabell 6.2 – Uppmätt kryptalshastighet (1/°C).

Betong	40LN0	40L 00	40LK0	40LK2	42LK2
0.15·fc, 3 mån. RF=60%				0.024	
0.15·fc, 3 mån. RF=90%					0.032
0.15·fc, 10 mån. RF=90%				0.037	
0.15·fc, 10 mån. RF=90%			0.031	0.008	
Beräknad. 0.15·fc			0.019	0.023	0.027
0.30·fc, 10 mån. RF=90%	0.034	0.014	0.019	0.029	
Beräknad. 0.30·fc	0.025	0.025	0.025	0.027	0.029

6.4 Slutsatser

Följande slutsatser kunde dras:

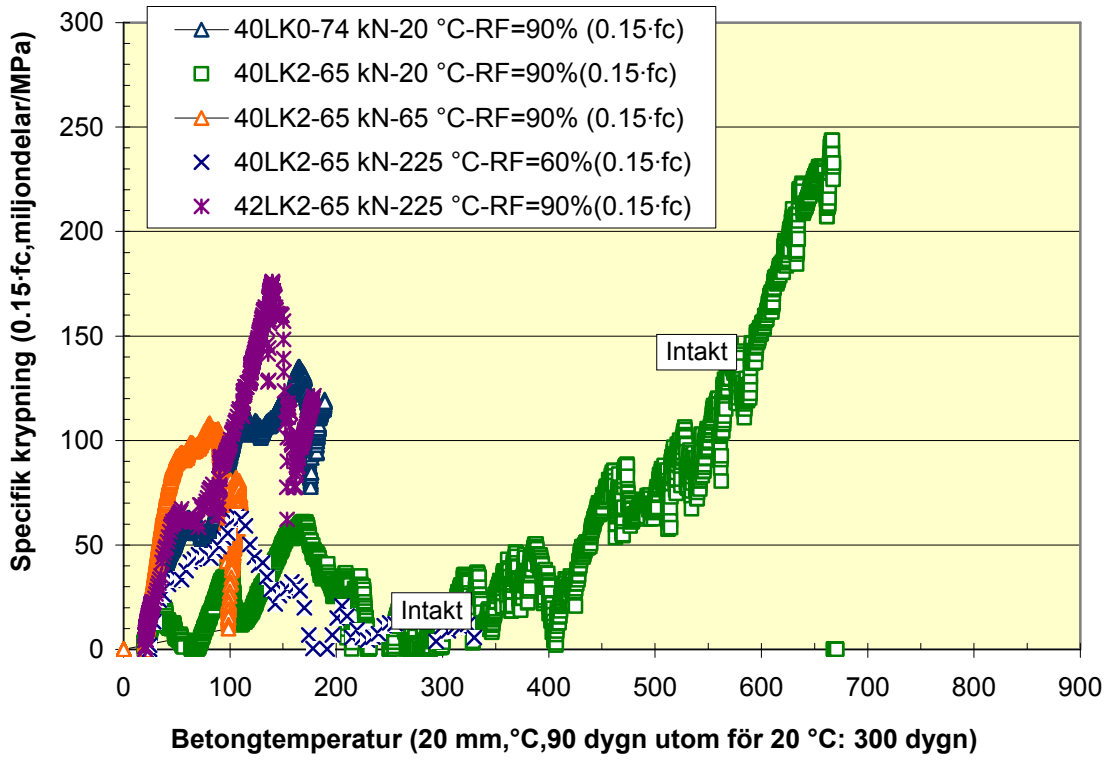
1. Kryptalsutvecklingen beräknades efter reduktion av krympning och temperaturexpansion.
2. Betong med ppf visade mycket mindre krypning upp till ca 200 °C betongtemperatur än betong utan ppf vilket sannolikt berodde på att fuktrörelser in i betongen hindrades av smältande ppf.
3. I ytan av betongen förångades troligen ppf varvid fukten kanaliserades ut ur betongen i stället för att kondenseras inåt mot betongens kärna.

6.5 Kompletterande data för polypropylenfibrer, ppf

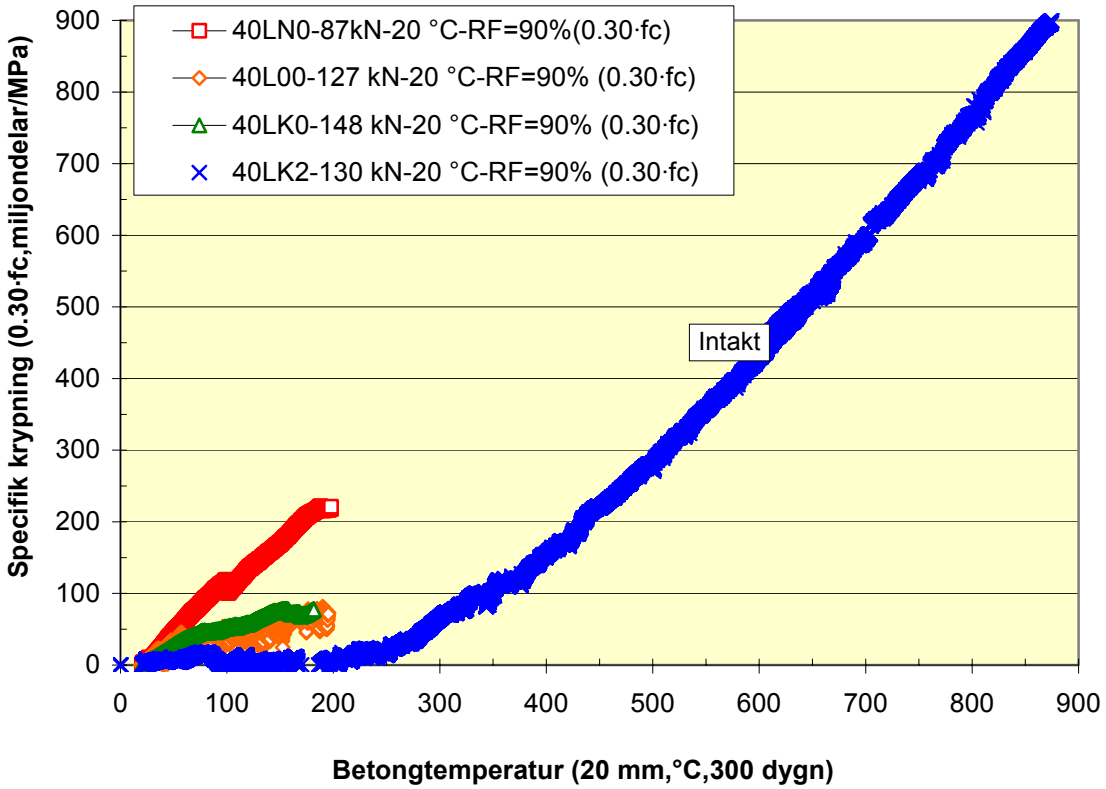
Data ges för ppf i Tabell 6.3 [45]:

Tabell 6.3 - Kompletterande data för ppf [45].

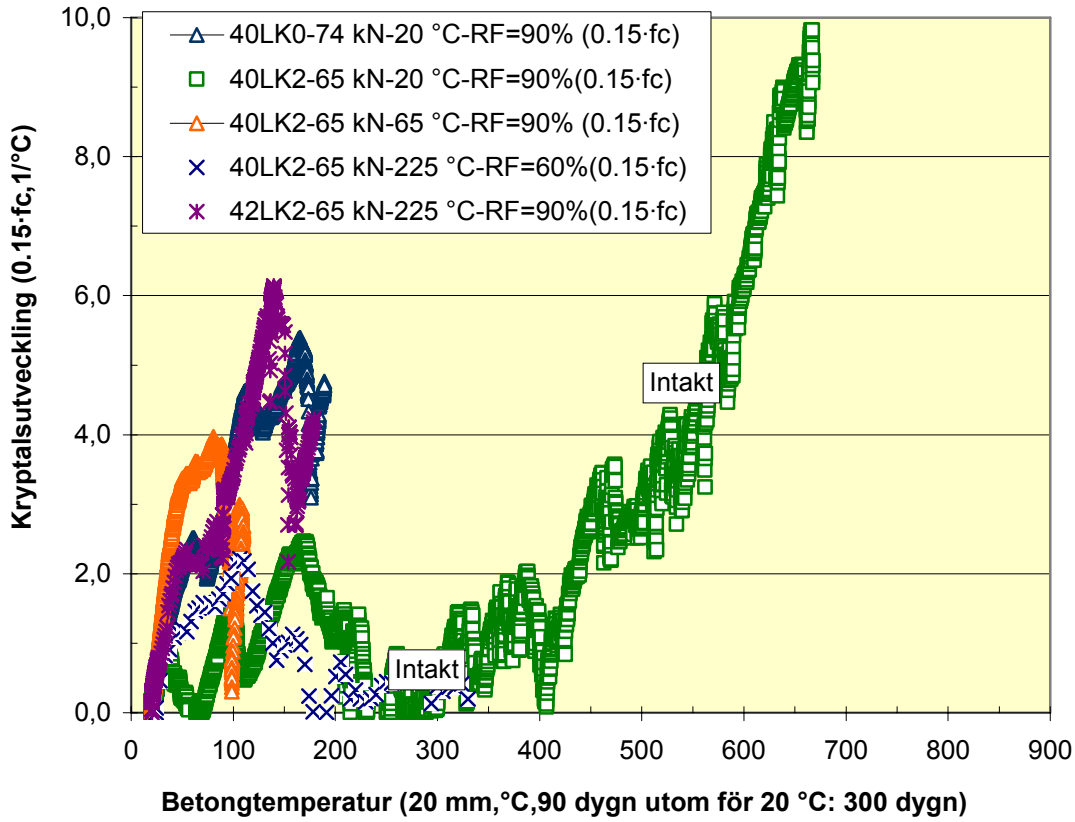
Egenskap	Värde
Skrymdensitet	910 kg/m³
Temperaturbeständighet, korttid	140 °C
Temperaturbeständighet, långtid	100 °C
Mjukningstemperatur, Vicat B	145 °C
Nedbrytningstemperatur	330-410 °C
Flampunktstemperatur	350-370 °C
Självantändningstemperatur	390-410 °C
1 kg 32 µm ppf - 6 mm:s längd	230 miljoner/m³
1 kg 16 µm ppf - 6 mm:s längd	916 miljoner/m³
Värmevärde	46000 kJ/kg



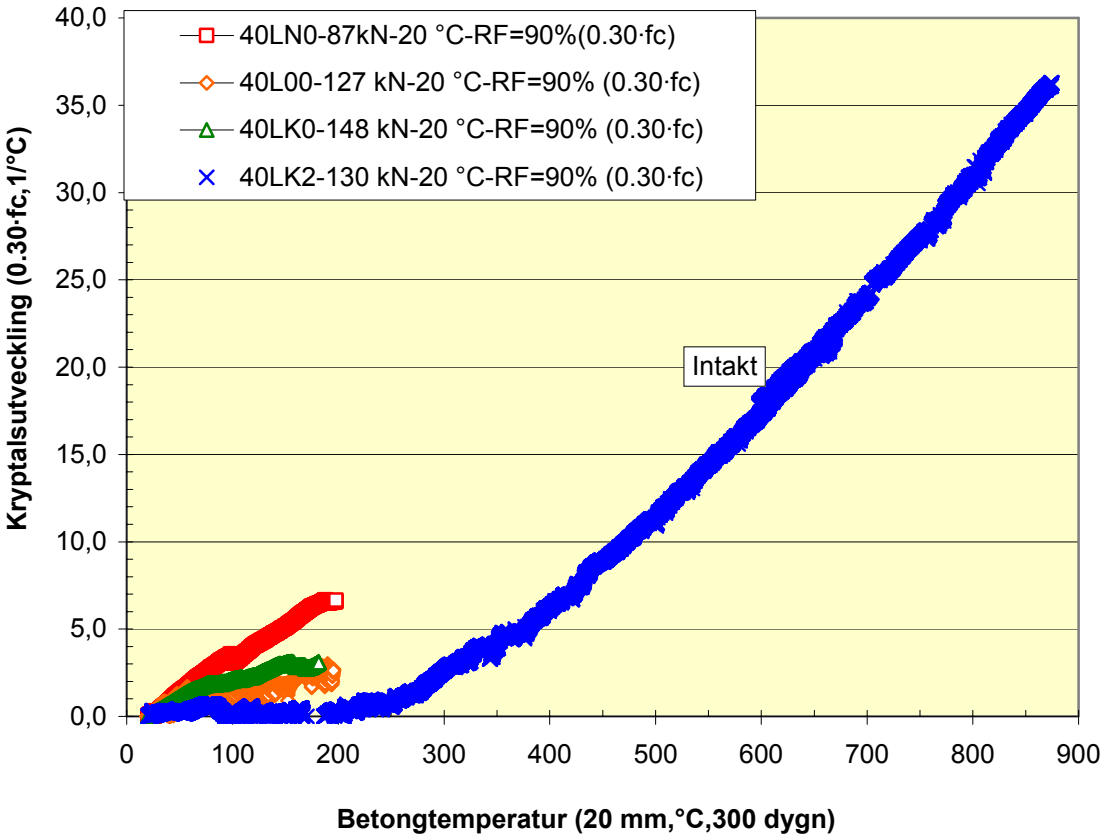
Figur 6.6 – Specifik krypning vid 15% last av brottlasten. K = kalkstensfiller, L = LTH, M.v. = medelvärde. N = normal betong, 00 = viskositetsmedel, 02 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct (%).



Figur 6.7 – Specifik krypning vid 30% last av brottlasten. K = kalkstensfiller, L = LTH, M.v. = medelvärde. N = normal betong, 00 = viskositetsmedel, 02 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct (%).



Figurer 6.8 - Kryptalsutveckling för betong vid 15% lastnivå.



Figurer 6.9 - Kryptalsutveckling för betong vid 30% lastnivå.

7. Saltfrostbeständighet

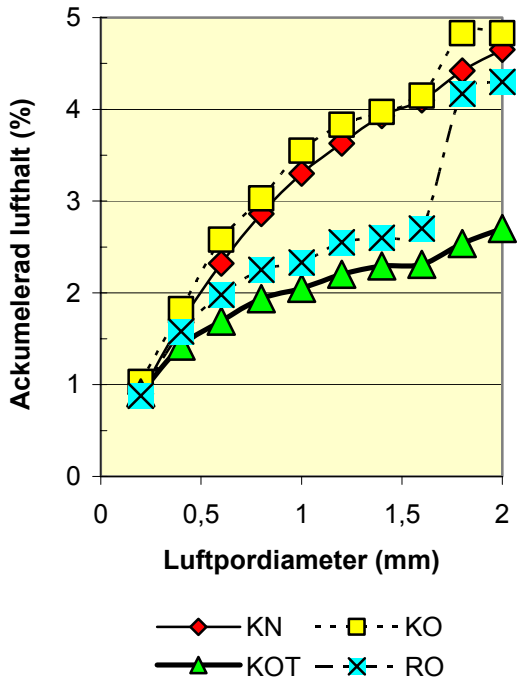
7.1 Tidigare forskning

7.1.1 Brobetonger

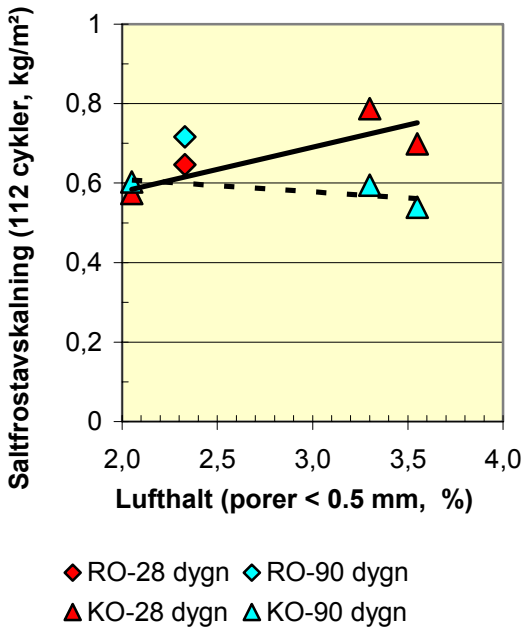
Provningar av saltfrostbeständighet utfördes vid LTH med allsidig frysning, tre prover (diameter 100 mm; längd 40 mm) av vardera betong [25]. Även efter 112 fryscykler var avskalningen liten, ca 0.6 kg/m² [25]. Figur 7.1 visar ackumulerad lufthalt i betongerna versus luftpordiameter för betonger enligt Appendix 7 [25]. Högt gjuttryck (T) gjorde att luftporerna i härdat tillstånd blev mindre i storlek och lufthalten också mindre än då gjutning skedde med normalt gjuttryck trots samma lufthalt i färskt tillstånd hos betongerna. Det fanns inget samband mellan luftporfördelningen och saltfrostavskalningen, Figur 7.2. Figur 7.2 visar saltfrostavskalningen efter 112 fryscykler versus luftporer < 0.5 mm [25]. Trots sämre luftporfördelning med en mindre andel små luftporer blev saltfrostavskalningen ungefär densamma vid laboratorieförsöken oberoende av luftporfördelningen. Vid > 6% lufthalt i färskt tillstånd blev saltfrostbeständigheten god. Figur 7.3 visar alternativa metoder att begränsa saltfrostavskalning hos betong [38]. Förutom > 6% lufthalt är tillförsel av ca 5% silikastoft den mest effektiva metoden att begränsa saltfrostavskalningen vid vct = 0.40 [38]. Figur 7.4-5 visar saltfrostavskalning för betong enligt Appendix 7 [25], ca 50% större saltfrostavskalning för SKB än för normal betong, NB.

7.1.2 Undervattensgjuten betong

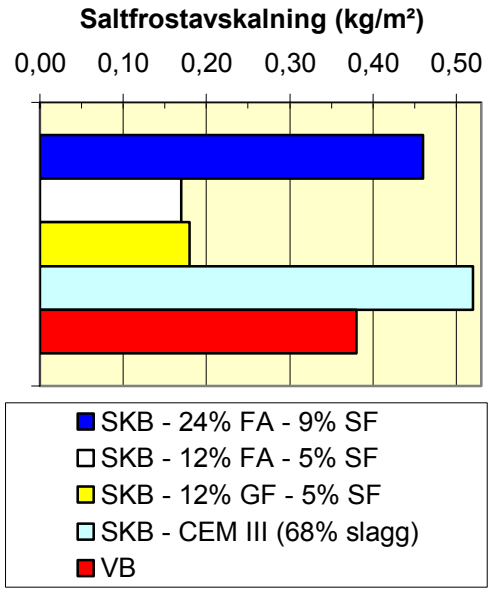
Undervattengjuten betong kan utsättas för saltfrostavskalning, t.ex. brofundament [28]. Figur 7.6 visar saltfrostavskalning för betonger med vct varierande mellan 0.35 och 0.49. Figur 7.6 visar att vct < 0.45 krävs för att erhålla god saltfrostbeständighet. För betong med vct = 0.49 krävs lufthalt 11% för att nå god saltfrostbeständighet vilket ger låg hållfasthet. Figur 7.7 visar inverkan av gjutplatsens läge på saltfrostbeständigheten [28]. Gjutplatsens läge hade större inverkan på saltfrostbeständigheten än lufthalt och vct. Separation inträffade mellan pumpstället och gjutplatsen [28]. Figur 7.8 visar mycket god saltfrostbeständighet i betong nära pumpstället [28]. Långt från pumpstället var det dock till föga nytta med en hög uppmätt lufthalt före pumpning eftersom separation skedde, såväl av luft som av ballast, Figur 7.9 [28].



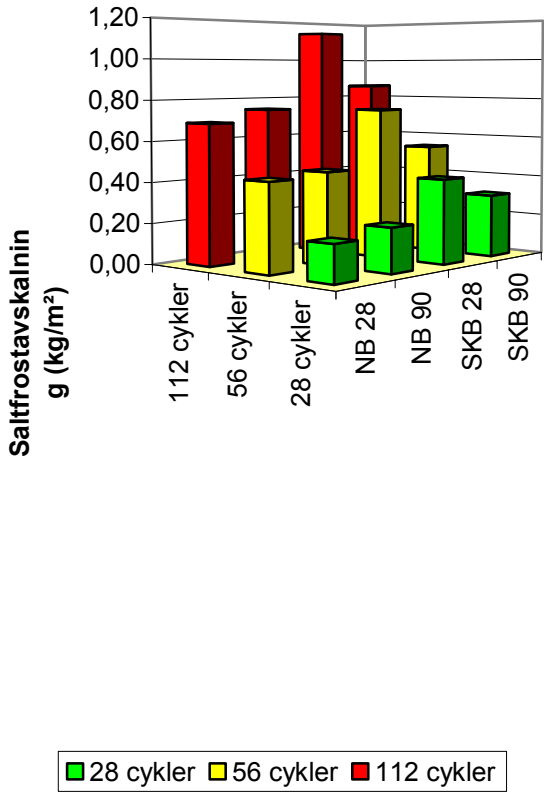
Figur 7.1 – Ackumulerad lufthalt vs luftpordiameter för betonger enligt Appendix 7 [25]. K = kalkstensfiller, N = ny blandningsordning (filler sist), O = ordinarie, R = normal betong (SKB i övrigt), T = 5.5 m gjuttryck (0.25 m i övrigt).



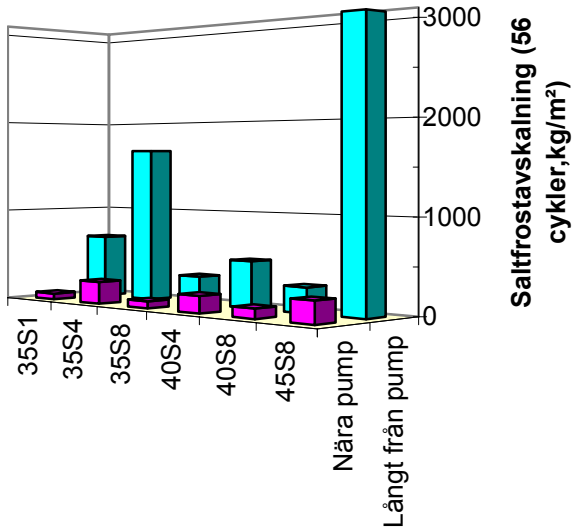
Figur 7.2 – Saltfrostavskalning vs lufthalt för porer < 0.5 mm, Appendix 7 [25]. Beteckningar enligt Figur 7.1.



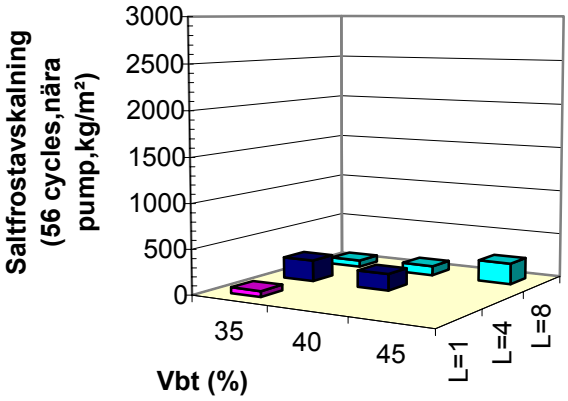
Figur 7.3 –Saltfrostavskalning med vct = 0.40 [38]. FA = flygaska, GF = glasfiller, SKB = självkompakterande betong, SF = silikastoft, VB = normal betong, CEM III = slaggcement.



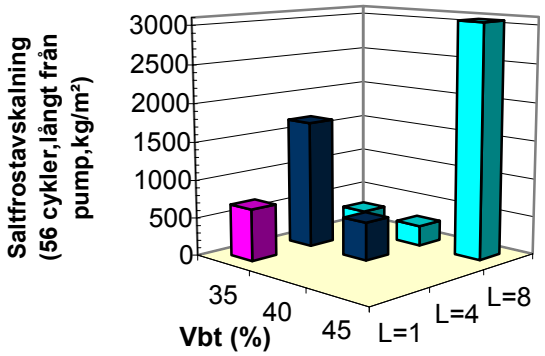
Figur 7.4– Saltfrostavskalning för betong, Appendix 7 [25]. NB= normal, 28= ålder (dygn).



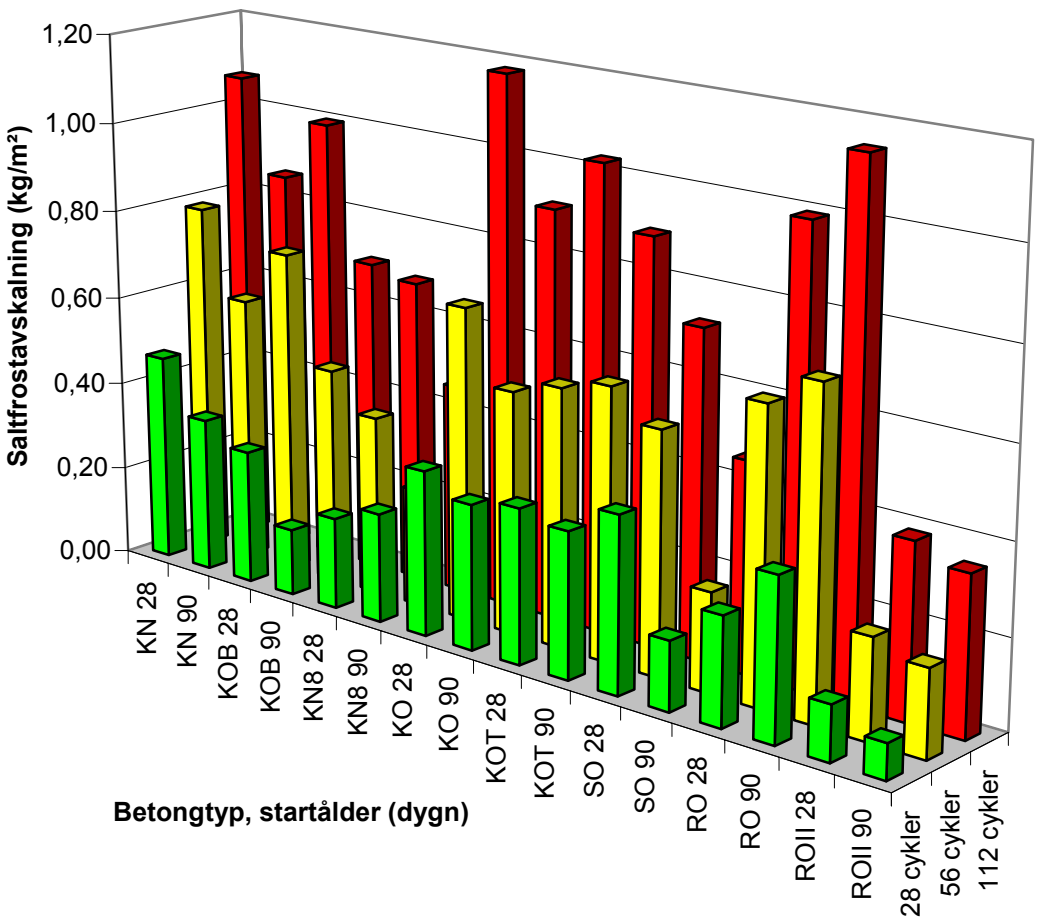
Figur 7.7 - Gjutplatsens läge och saltfrostbeständigheten [28]. S = SKB med 7.5% silikastoft, 4 = färsk lufthalt före pumpning (%).



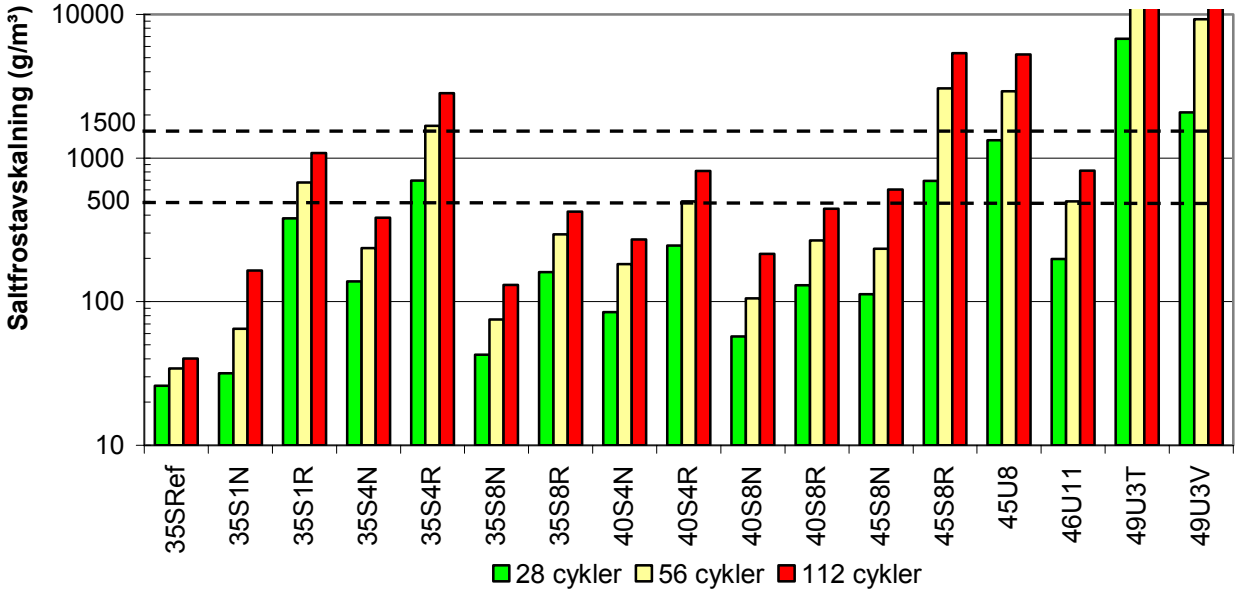
Figur 7.8 – Saltfrostbeständighet, nära pumpningsplatsen [28].



Figur 7.9 - Saltfrostbeständighet långt från pumpningsplatsen [28]. L = lufthalt (%).



Figur 7.5 – Saltfrostavskalning vid vct = 0.40. B = ökad fillermängd, K = Limus 40; N = ny blandningsordning (filler sist); O = ordinarie blandningsordning (filler först); R = referens (VB), S = Limus 15; T = 5.5 m hydrostatiskt tryck i stället för 0.23 m; II = andra; 8 = 8% lufthalt, 28 = ålder (dygn).



Figur 7.6 – Saltfrostavskalning hos undervattengjuten betong. N = betongpumpsslang nära gjutplats, R = betongpumpsslang långt från gjutplats, T = torkad betong, V = vattenlagrad betong, U = viskositetsmedel, 35Ref = betong med 7.5% silikastoft utan luftporbildare, 35S = SKB med vct = 0.35 med 7.5% silikastoft, 1 = lufthalt (%).

7.2 Detaljgenomförande

Material och metoder ges i kap. 2 ovan. Provkropparna utgjordes av cylindrar med längden 50 mm vilka i sin tur kapades ut ur cylindrar Ø100x200 mm³, lagrade vid RF = 60%. Ålder vid provstart var 300 dygn. Tre identiska prover av varje betong användes. Före frysstart förvarades proverna 14 dygn i kalkhaltigt vatten. Frysning skedde i vatten med 3% koksaltlösning, NaCl, mellan ± 20 °C, två ggr per dygn med fryshastigheten 8 °C/h. Kontroll skedde av att provkroppstemperaturen understeg -20 °C. För god beständighet mot saltfrostavskalning skall uppfyllas skall denna efter 56 frostcykler ej överstiga 1.5 kg/m² - för mycket god beständighet mot saltfrostavskalning skall uppfyllas skall denna efter 56 frostcykler ej överstiga 0.5 kg/m². Mätning skedde av vikt och inre egenfrekvens med en Grindosonic provutrustning före frysning, efter 28, 56 och 112 fryscykler. Krav på dynamisk elasticitetsmodul, enligt ASTM C666-92, på > 40% av ursprungsvärdet. ASTM 215-985 användes för att fastställa dynamisk elasticitetsmodul hos betongen enligt följande ekvation:

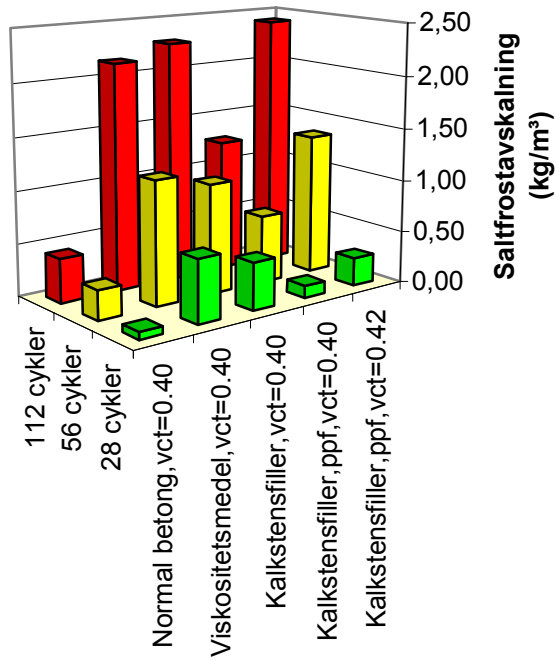
$$E_{dyn}=0.007x0.00416x((L/25.4)^3x(44.447x(D/25.4/(4xL/25.4))^2+4.136xD/25.4/(4xL/25.4)+0.9077))/(D/25.4)^4x(W/454)xN^2 \quad (4.1)$$

d betecknar diametern (mm), L längden (mm), N egenfrekvensen (Hz) samt W provvikten (g).

Uppmätning skedde av provkroppen, vägning och bestämning av transversell egenfrekvens. Egenfrekvensen bestämdes i sin tur med en Grindosonic mätapparat vilken i sin tur kalibrerats mot mätning av egenfrekvensen med annan metod. Noggrannheten i uppmätningen får anses vara ± 0.2 mm, vägningen ± 0.2 g samt egenfrekvensen ha noggrannheten ± 500 Hz. Mätningen av egenfrekvensen inverkade mest på noggrannheten i beräknad dynamisk elasticitetsmodul. Vid exempelvis 15000 Hz i egenfrekvens blir onoggrannheten i dynamisk elasticitetsmodul ca ± 7% eller ± 3 GPa vid en beräknad dynamisk elasticitetsmodul = 40 GPa.

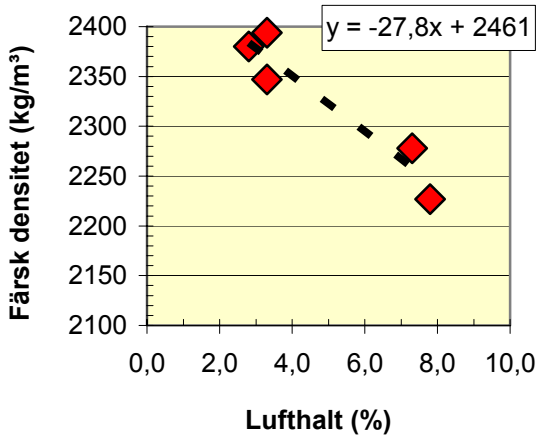
7.3 Resultat av saltfrostavskalning

I särklass störst avskalning erhölls i den cirkulära randen av provet. Figur 7.10 visar god saltfrostbeständighet för samtliga undersökta betonger – mycket god saltfrostbeständighet för normal betong dvs. < 0.5 kg/m² avskalad betong efter 56 frostcykler (t.o.m. efter 112 frostcykler, Appendix 7). Saltfrostavskalningen var ca 4.5 ggr så stor för SKB som för normal betong. För betong med plastfibrer och vct = 0.40 erhölls ca 2.3 så stor saltfrostavskalningen som för normal betong men ändock godkänd - < 0.5 kg/m² mängd avskalad betong. LTH-metoden anses som mer krävande än Boråsmetoden till följd av den snabba fryshastigheten samt att allsidig frysning sker. För plastfiberbetong observerades en accelererande saltfrostavskalning vilket kan bero på att plastfibern inledningsvis hindrade avspjälkning från ytan. Antalet plastfibrer i betongen är mycket stor, ca 1000 miljon fibrer/m³ betong. Betong med vct = 0.42 visade dubbelt så stor avspjälkning som betong med vct = 0.40 vilket visar vikten av ett lågt vct hos betong för att erhålla en god frostbeständighet.

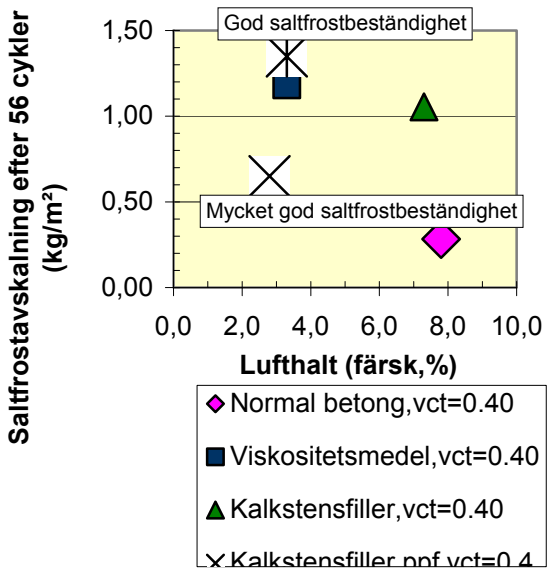


Figur 7.10 – Saltfrostbeständighet, 56 cykler.

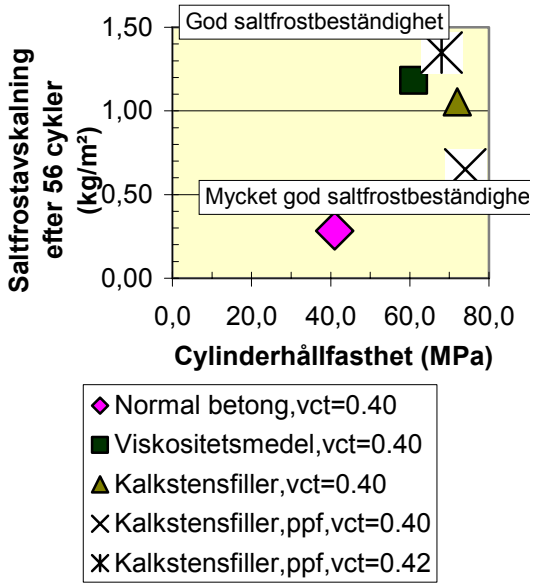
Figur 7.11 visar densitet som funktion av lufthalt i färskt tillstånd, dvs. uppmätt lufthalt förefaller vara korrekt. I Figur 7.12 ges saltfrostavskalning som funktion av färsk lufthalt. Vid konstant vct = 0.40 och konstant lufthalt ca 3% uppvisade betong med viskositetsmedel dubbelt så stor saltfrostavskalning som betong med kalkstenfiller och ppf. Troligen förhindrar ppf mekaniskt avskalning av betongen. Ytan av betong med ppf var svår att borsta ren före mätning av saltfrostavskalningen eftersom ppf gav en ökad vidhäftning. Det var svårt att definiera hur mycket ppf som skulle borstas bort före mätning. Efter borstning fanns ett stort antal ppf som stack ut ur ytan på betongen, eftersom antalet fibrer i betongen var stort vid 1.4 kg/m³, ca 1 miljard fibrer/m³, Tabell 6.3. Vid vct = 0.42 i stället för vct = 0.40 fördubblades saltfrostavskalningen vid ca 3% lufthalt. För betong med ca 7.5% färsk lufthalt erhöll SKB med kalkstensfiller ca 4 ggr så stor saltfrostavskalningen som normal betong, vilket troligen berodde på en tätare struktur hos SKB. SKB med ppf och 2.8% lufthalt erhöll slutligen ca 2.3 ggr större saltfrostavskalningen än normal betong med lufthalt 7.8%. Svårighet förelåg att dosera tillräcklig mängd luftporbildare för att erhålla en godtagbar lufthalt > 6% i SKB med viskositetshöjande medel resp. i betong med ppf. Överdosering skedde av luftporbildare. Fibrerna gjorde att luftporerna slöt sig samman så att luft bubblade ut betongen varför resulterade lufthalt blev låg. Figur 7.13 visar saltfrostavskalning att ökade vid ökad hållfasthet. Även hårdnad lufthalt, avståndsfaktor och densitet uppmättes, Figurerna 7.14-16 [33]. För betong med enbart kalkstensfiller minskade således såväl lufthalt som densitet vilket är logiskt.



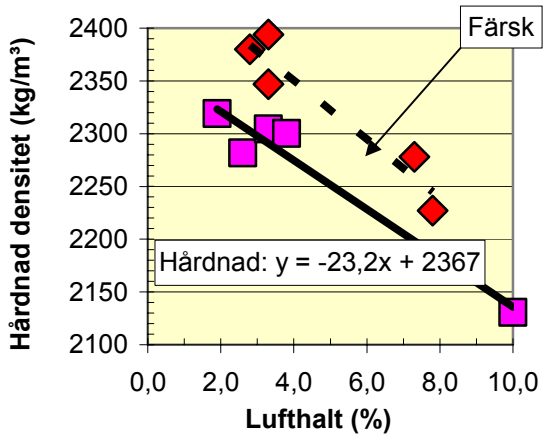
Figur 7.11 - Densitet vs färsk lufthalt.



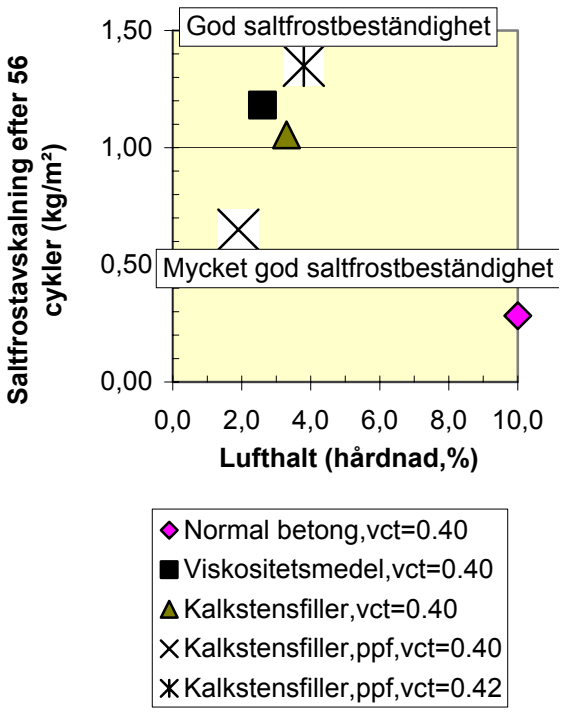
Figur 7.12 - Saltfrostavskalning vs färsk lufthalt.



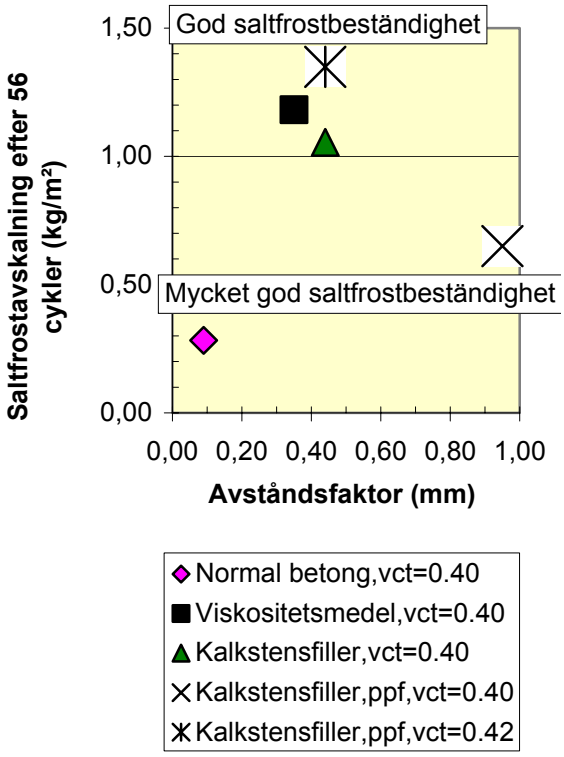
Figur 7.13 - Saltfrostavskalning vs hållfasthet.



Figur 7.14 - Densitet vs färsk och hårdnad lufthalt [33].



Figur 7.15 - Saltfrostavskalning vs hårdnad lufthalt.

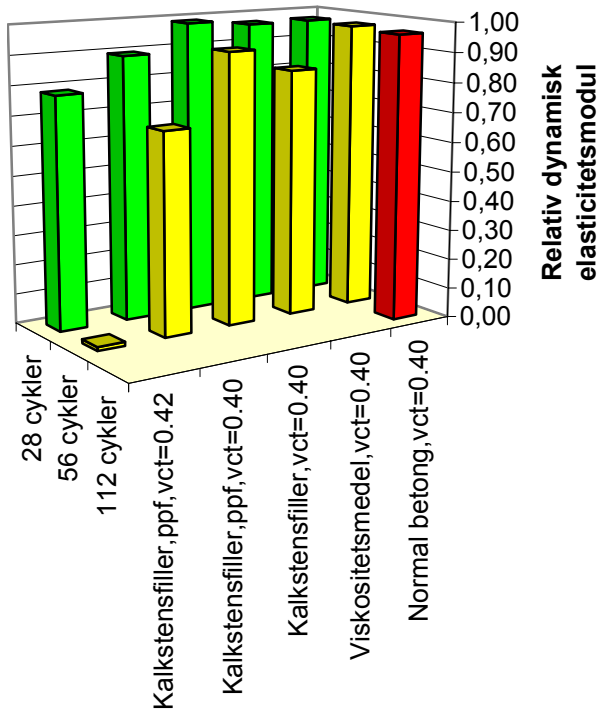


Figur 7.16 - Saltfrostavskalning vs avståndsfaktor.

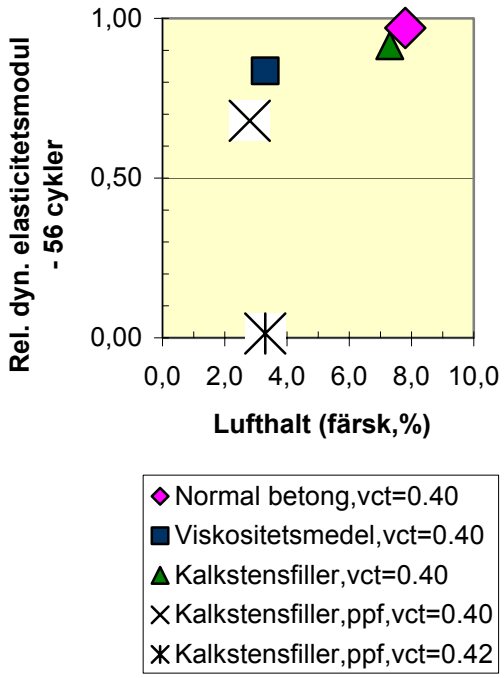
Resultaten var rimliga utom för betong med ppf, dvs. vid ökande hårdnad lufthalt erhölls en minskande saltfrostavskalning. För betong med ppf förefaller dessa ha förhindrat avskalning från betongytan och därmed givit liten avskalning även vid låg lufthalt (betong med högre vct = 0.42 erhöll dock ökande saltfrostavskalning även med ppf). Motsvarande resultat erhölls för saltfrostavskalning och avståndsfaktor dvs. för ökande avståndsfaktor > 0.25 mm erhölls ökande saltfrostavskalning utom för betong med ppf (betong med vct = 0.42 erhöll dock ökande saltfrostavskalning med ppf).

7.4 Dynamisk elasticitetsmodul

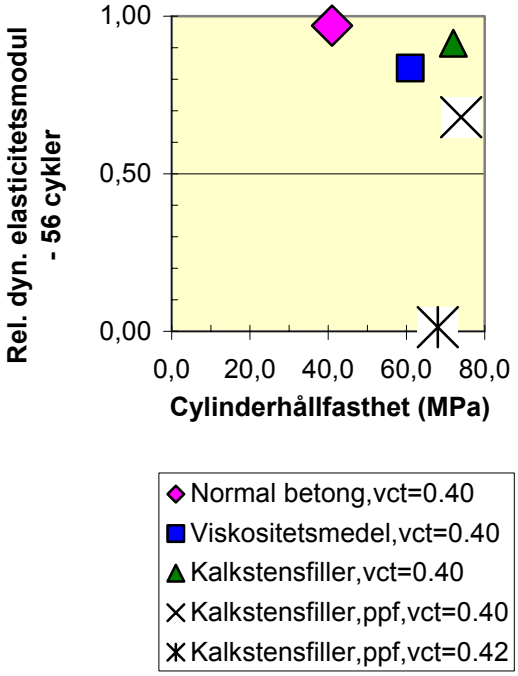
LTH-metoden har en parallell mätning av saltfrostavskalning och dynamisk elasticitetsmodul. Figur 7.17 visar > 60% relativ elasticitetsmodul återstod efter 56 frostcykler utom för SKB med vct = 0.42 (vid 112 cykler kunde mätning för SKB ej ske). Figur 7.18 visar relativ dynamisk elasticitetsmodul efter 56 frostcykler vs färsk lufthalt. Vid för låg lufthalt skedde ett inre sammanbrott för SKB med ppf. Figur 7.19 visar relativ dynamisk elasticitetsmodul efter 56 frostcykler vs hållfasthet, dvs. även vid hög hållfasthet frysskadades SKB med ppf om den färska lufthalten samtidigt var för låg. Hårdnad lufthalt uppmättes. Figur 7.20-21 visar relativ E-modul efter 56 fryscykler vs hårdnad lufthalt och avståndsfaktor [33].



Figur 7.17 - Relativ elasticitetsmodul efter 56 cykler (ej mätning för SKB vid 112 cykler).

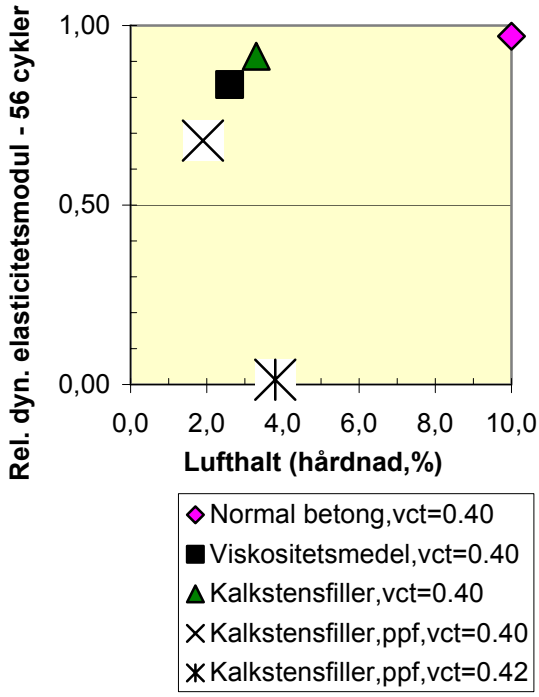


Figur 7.18 – Relativ dynamisk elasticitetsmodul efter 56 frostcykler vs färsk lufthalt.

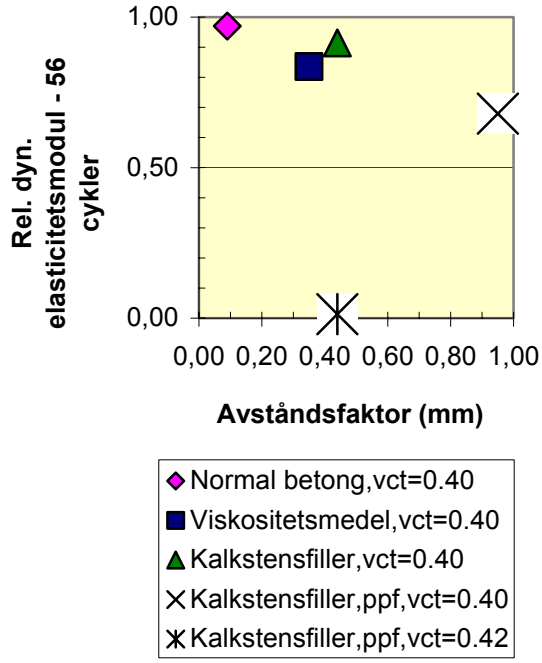


Figur 7.19 – Relativ dynamisk elasticitetsmodul efter 56 frostcykler vs hållfasthet.

Även dynamisk E-modul visade ökande värden vid ökande lufthalt, resp. minskande värden för ökande avståndsfaktor där betong med ppf utgjorde undantaget. Denna observation gäller för betong med vct = 0.40 utan ppf. För betong med vct = 0.42 erhölls en större minskning av E-modulen vid konstant avståndsfaktor/hårdnad lufthalt än för betong med vct = 0.40.



Figur 7.20 – Relativ dynamisk elasticitetsmodul efter 56 frostcykler vs hårdnad lufthalt.



Figur 7.21 – Relativ dynamisk elasticitetsmodul efter 56 frostcykler vs avståndsfaktor.

7.5 Slutsatser

Följande slutsatser drogs av mätningarna:

1. God saltfrostbeständighet erhölls för samtliga undersökta självkompakterande betonger, SKB - mycket god saltfrostbeständighet uppmättes för normal betong, NB.
2. Vid konstant lufthalt ca 3% uppvisade SKB med viskositetsmedel dubbelt så

stor saltfrostavskalning som SKB med kalkstenfiller och ppf.

3. För SKB med vct = 0.42 i stället för vct = 0.40 mer än fördubblades saltfrostavskalningen vid ca 3% lufthalt.
4. För betong med ca 7.5% lufthalt i färskt tillstånd erhöll SKB med kalkstensfiller ca 4 ggr så stor saltfrostavskalningen som normal betong.
5. Vid för låg lufthalt skedde ett inre sammanbrott för SKB med ppf.
6. Vid hög hållfasthet saltfrostskadades SKB med ppf om lufthalten samtidigt var för låg.
7. Avståndsfaktorn och den hårdnade lufthalten visade ökande resp. minskande saltfrostavskalning då avståndsfaktorn resp. den hårdnade lufthalten ökades.

8. Spjälkning vid brandtemperatur

8.1 Tidigare forskning

8.1.1 Allmänt

Ett 300-tal försök med explosiv spjälkning hos betong, nationellt som internationellt, redovisas i Appendix 8.1 [4-20,29,45-47]. Senaste tillskottet av spjälkningsundersökningar, motiverat av brandkatastrofer i tunnlar enligt Appendix 8.2, omfattade delvis spända, armerade betongplattor, med eller utan ppf, med storleken 1800 x 1400 mm² och tjockleken 300 mm eller 500 mm, dvs. relevanta tunneldelar. Betongen hade en ålder varierande mellan 1 mån. och 1 år. [45]. Spjälkning av betong styrs mest av följande parametrar [45]:

1. Fuktinnehåll (vid fuktkvot, 105 °C, < 2% sker ingen spjälkning)
2. Temperatur/tid- utveckling
3. Geometri och dimensioner hos konstruktionen
4. Belastning (drag- eller tryckpåkänningar)
5. Porstruktur (porositet, permeabilitet)
6. Betonghållfasthet
7. Ballasttyp och storlek
8. Fiberinnehåll (stål eller plast)
9. Armeringsinnehåll och täckskikt.

8.1.2 Fuktinnehåll

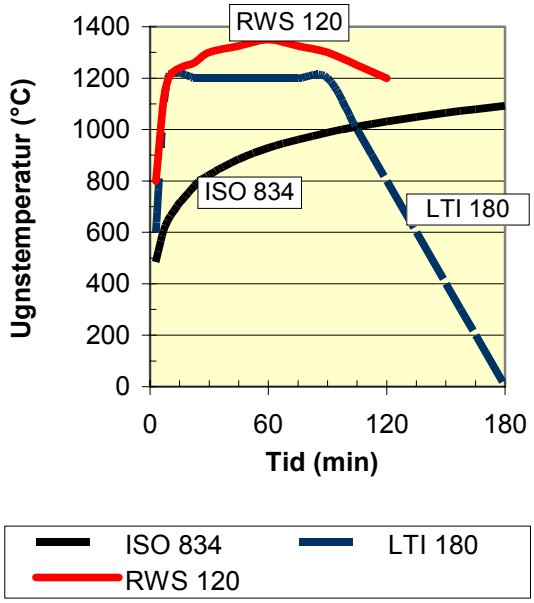
Proverna i den senaste internationella undersökningen lagrades på följande sätt [45]:

1. Vattenlagring på ovansidan, i stålform
2. Uttorkning av prov i luft, avformat
3. Uttorkning vid 50 °C, inuti provet.

Fuktkvoten, bestämd vid 105 °C på parallellgjutna prover med storleken 1000 x 1000 x 500 mm³, varierade mellan 2% (ytfukt) och 7% (mitt i provkropp) [45], Appendix 8. Teoretiskt kan spjälkning endast ske vid fuktkvot > 2% [48].

8.1.3 Temperatur /-tidsutveckling

Figur 8.1 visar använda temperatur/tidsutvecklingskurvor, ISO 834, LTI eller RWS [45]. Upphettning skedde med en brännare placerad i ena långsida av en underliggande ugn med rökutgång på motstående sida.



Figur 8.1 - Temperatur- – tidsutvecklingskurvor [45].

8.1.4 Geometri och belastning

Betongplattor med storleken 1800 x 1400 mm² och tjockleken 300 mm eller 500 mm användes [45]. I längdriktningen spändes med 0.5 MPa samt transversellt med tryckpåkänningar varierande mellan 1.16 och 9 MPa. Spänning skedde endera symmetriskt eller osymmetriskt med spännstag i stål som förankrades mot stålplattor på utsidan av provet. Sidorna av provet samt den brandoexponerade undersidan (1200 x 800 mm²) kläddes med plåt i syfte att simulera ensidig brandbelastning. Vägning skedde före och efter provning, efteråt i såväl varmt som kallt tillstånd. Mätningar skedde även av spjälkningsdjup. I provet mättes temperaturutvecklingen på flera djup från ytan. Hållfasthet mättes på utborrade prover, Ø100 mm [45].

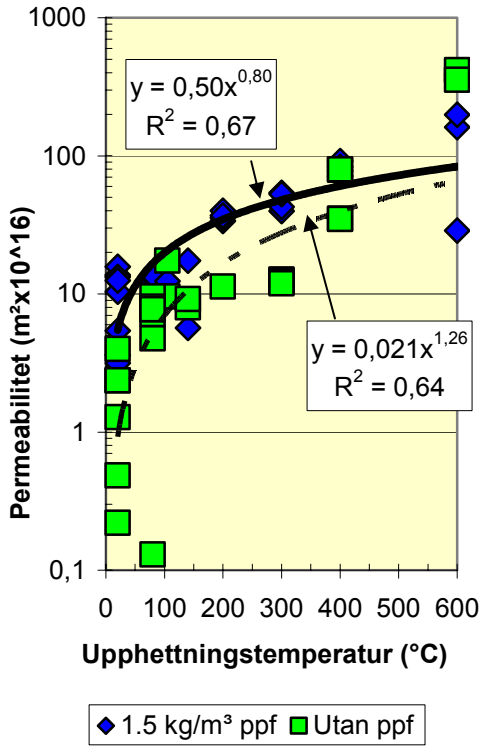
8.1.5 Porstruktur och permeabilitet

Ett mycket stort antal permeabilitetsbestämningar utfördes på betongerna efter upphettning till varierande temperaturer, T, och påföljande avkylning, Figur 8.2 [45]. Följande permeabilitetsutveckling beräknades (m²x10[14)]:

$P = 0.021 \cdot T^{1.26}$ (8.1)

$P_{ppf} = 0.50 \cdot T^{0.80}$ (8.2)

T betecknar upphettningstemperatur (°C)

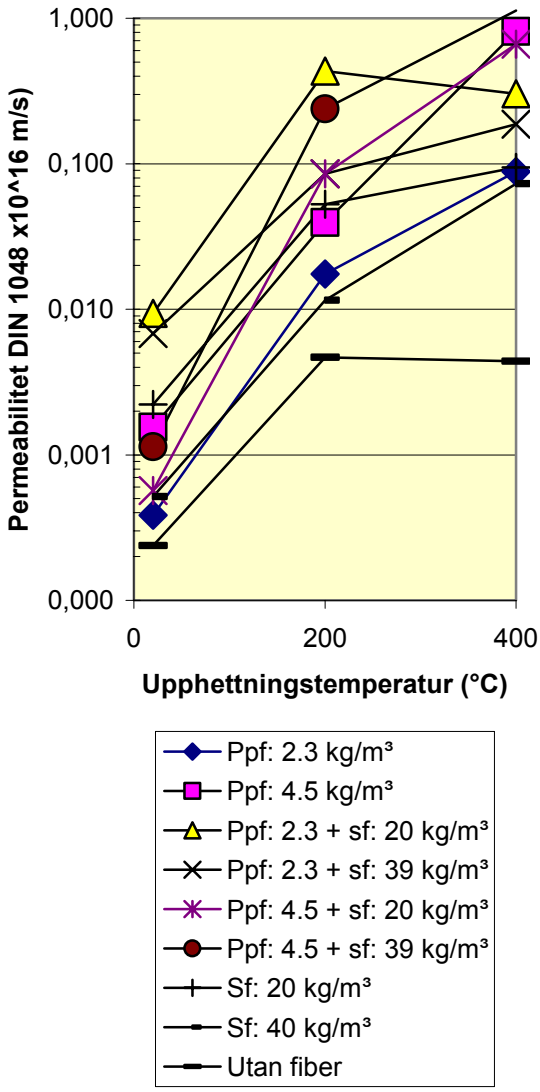


Figur 8.2 - Uppmätt permeabilitetsutveckling vs upphettningstemperatur (m²x10[16)] [45].

Även Figur 8.3 visar utveckling av permeabilitet hos SKB med och utan fibrer efter upphettning till 200 °C och 400 °C (vct = 0.30) [49]. Även utan upphettning påverkades permeabiliteten vilket även har observerats i samband med andra studier [49]. Lägst permeabilitet observerades för SKB utan fibrer vilken samtidigt erhöll högst hållfasthet av studerade SKB, 82 MPa. Övriga SKB erhöll lägre hållfasthet vid konstant vct vilket kan ha berott på försämrad gjutbarhet och kompaktering då fibrer tillfördes. Det var klarlagt att ppf i betongen gav en ökad permeabilitet även efter en tämligen liten upphettning troligen till följd av att temperaturutvidgningen skiljer mellan betong och ppf. Vid kritisk temperatur för spjälkning, ca 170 °C, uppgick permeabiliteten för betong utan ppf till ca 13.5 m²x10 $^{-14}$ medan permeabiliteten för betong med 1.5 kg/m³ ppf uppmättes till ca 30.5 m²x10 $^{-14}$. En ökad porositet efter upphettning av betong med ppf innebär att vattenånga vid upphettning enklare passerar ut ur betongen än om ppf ej finns.

8.1.6 Hållfasthet och mätningar

Hållfasthetsklasserna C25 eller C30 studerades [45]. Tryckhållfastheten vid provning varierade mellan 33 och 66 MPa (utborrade cylindrar Ø100 mm), dvs. en stor överhållfasthet vilket torde bero av att täthetskravet (vattentät betong) överflyglade hållfasthetskravet [45]. Följande övriga mätningar utfördes [45]:



Figur 8.3 - Utveckling av permeabilitet hos SKB med vct = 0.30 med och utan fibrer efter upphettning till 200 °C och 400 °C (vct = 0.30) [49]. Ppf med 60 µm. Sf = stålfibrer.

1. Temperatur i provkropp/ugn var 30 s
2. Registrering av resultat varannan min.
3. Akustisk och okulär besiktning under av provet under och efter provningen
4. Akustisk registrering av spjälkningsljud
5. Fotografering av prover omedelbart efter provning samt 1 dygn efter provning
6. Rasterpresentation och spjälkningskonturer
7. Vägning före och efter spjälkning
8. Bestämning av ångtryckutveckling
9. Bestämning av spännkraftsutveckling
10. Bestämning av fettrycksökning vid spännstagen.

8.1.7 Ballasttyp och maximal storlek, fiberinnehåll, armering, täckskikt

Endera kalksten eller kvartsit användes (maximal dimension siktvidd 32 mm) [45]. Ppf endera 1.0 (endast prov 51, Appendix 8.1), 1.5, 2.0 (sprutbetong) eller 3.0 kg/m³ 6 mm monofilament 18 µm användes. Dessutom användes en kombination av 1.5 kg/m³ 18 µm ppf och 30 kg/m³ 60 mm stålfibrer 750 µm [45]. Följande slakarmering fanns på brandsidan, BSt 550:

1. 17 Ø14 mm byglar, 2.5 m, i underkant tvärs plattan
2. 14 Ø14 mm byglar, 2.8 m, i underkant längs plattan
3. 12 Ø8 mm byglar, 0.45 m, runt tvärspänningarmeringens förankringar vid plattans sidoyta
4. 12 Ø8 mm byglar, 0.30 m, armeringsstöd i täckskiktet (40 mm) i underkant.

Dessutom fanns monteringsstag för termoelement och armering i såväl överkant som underkant av plattan. Betongen göts och vibrerades [45]. Mängden slakarmering får betraktas som stor och realistisk för en tunneldel, ca 100 kg/m³ resp. 200 kg/m³. Spännkraften var 266 kN i spännstagen av kvalitet 1570/1770 men minskade med ca 40% till följd av den korta längden, 1.4 resp. 1.8 m [45]. I ett antal provkroppar ökades armeringsmängden betydligt i syfte att undvika spjälkning, upp till ca 400 kg/m³:

1. Prover 19-26: Ø20 i. st. f. Ø14 (en riktning)
2. Prover 54-55: Ø14 c/c 90 mm plus Ø26 c/c 75 mm i. st. f Ø14 c/c 100 mm (en riktning) samt 2xØ14 c/c 100 mm
3. Prover 58-59: 4-dubbel armering c/c 50, 60, 200 och 210 mm
4. Prover 61-62: 60 mm sprutbetong C20 med 2 kg/m³ 18 µm ppf.

8.1.8 Resultat av tidigare forskning

Svenska Betongföreningens preliminära rekommendationer [20]:

På grundval av föreliggande resultat från undersökning av SKB kunde följande rekommendationer ges [3-19]:

1. *Betong med vct_{ekv} > 0,55 och kalkstensfillermängd mindre än 25 viktsprocent av cementmängden.*

Vid användning av cement med innehåll av kalkstensfiller skall den närvarande delen av kalkstensfiller i cementen räknas som kalkstensfiller och endast klinkerandelen som cement. (Detta innebär att cement CEM II /A-L är tillåtet som får innehålla 20 % kalkstensfiller av totalmassan.) Inga speciella rekommendationer behövs eftersom risken för spjälkning är försumbar.

2. Övrig betong

2.a Byggnader med luftfuktighetens årsmedelvärde < 60 %, brand ISO 834.

Vid dessa byggnader kommer betongen efter en tid att ha ett fuktinnehåll på < 2.5 viktsprocent. Om följande villkor i tabell 8.1 uppfylles behöver inga extra åtgärder vidtagas för att reducera risken för explosiv spjälkning i betong.

Tabell 8.1 – Villkor för åtgärder beträffande spjälkning hos betong [20].

	Betong med kalkstensfiller > 25 viktsprocent av cementmängden (som definierat under punkt 1)	**Betong med kalkstensfiller < 25 viktsprocent av cementmängden (som definierat under punkt 1)**
Max. fuktkvot	2.5 %	2.5 %
Max. tryckhållfasthetsklass*	C50/60	C80/95
Max. tryckpåkänning vid brandlastfallet	15 MPa	25 MPa

*Högre tryckhållfasthet medför större risk för spjälkning.

2.b Byggnader och anläggningar med RH > 70%.

Om betongen ej brandprovats bör polypropylenfibrer tillsättas eller betongen skyddas av ett obrännbart värmeisolerande skikt [20]. Några rekommendationer om mängd resp. typ av fibrer har inte kunnat ges beroende på bristande kunskapsnivå avseende betongsammansättning, beständighet och utförande [20]. Polypropylenfibrer har dock visat sig vara effektiva för att reducera spjälkningsmängden. Om man i ett aktuellt fall har tillräcklig kunskap för att bestämma erforderlig fibermängd kan brandprovning utelämnas [20].

Rekommendationer för husbyggnadsbetong [29]:

Med ledning av försök med SKB med eller utan filler, vid varierande fukt och påkänningsnivå (spänning/hållfasthet), samt tidigare försök, gavs följande rekommendationer på fiberinblandning i SKB med vattencementtal, vct, < 0.70 och fuktkvot, u, 2.5% < u < 4%, oavhängig påkänningsnivån, då krav ställs att undvika explosiv spjälkning vid hög temperatur [29]:

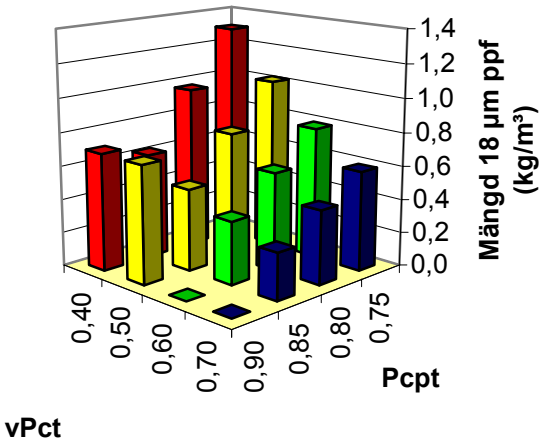
1. 0.7 kg/m³ 18 µm ppf för all SKB med låg fillerhalt (≤ 5% av cementhalten).
2. mer än 0.7 kg/m³ 18 µm ppf för SKB med filler, Tabell 8.2, Figur 8.4 och ekvation (8.3):

ppf_{hus}= 0.5·[(13·(Pcpt)-12.3)·ln (vPct)-2.69·(Pcpt)² +2.65·(Pcpt)-0.2] ≥ 0.7 (8.3)

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

Tabell 8.2 - Mängd 18 µm ppf i SKB med filler (kg/m³) [46].

Pcpt/ vPct	0.75	0.8	0.85	0.9
0.40	1.3	1.0	0.6	0.7
0.50	1.0	0.8	0.5	0.7
0.60	0.8	0.6	0.4	0.0
0.70	0.6	0.4	0.3	0.0



Figur 8.4 –18 µm ppf i SKB med filler [29].

Rekommendationer för tunnelbetong [45]:

Ovan refererade undersökning anger 2 kg/m³ 18 µm ppf 6 mm monofilament för att praktiskt förhindra explosiv spjälkning hos tunnelbetong oberoende av fuktinnehållet [45]. För högpresterande betong skall doseringen av ppf ökas om så erfordras. Anledningen till generalitetet i rekommendationerna av ppf-inblandning är omfattande spjälkning hos betong utan ppf, oberoende av armeringsmängd, ballasttyp, fuktkvot, påkänning, upphettningskurva, etc., Appendix 8.1. I Appendix 8.1 har spjälkad mängd betong jämförts med brandbelastad betongmängd. Spjälkningsdjupet var stort trots kraftig ytarmering, upp till 360 mm – i allmänhet ca 200 mm då ppf ej fanns i betongen. Enligt undersökningen förefaller dock mellan 1.0 (prov 51, ytfuktkvot = 2%) och 1.5 kg/m³ 18 µm ppf (ytfuktkvot 5.2%) ha varit en tillräcklig mängd ppf även om 2 kg/m³ 18 µm ppf rekommenderas. Ökningen av armeringsmängden i en riktning från Ø14 mm till Ø20 förhindrade ej spjälkning (prover 19-22), endast inblandning av 1.5 kg/m³ 18 µm ppf (prover 23-26) kunde förhindra spjälkning. I prover 54-55 där armeringen ökades enormt kunde spjälkningen begränsas till 60 mm även utan inblandning av ppf. Då sprutbetong med ppf användes spjälkades denna plus betong till 150 mm:s djup (vattenlagring). Ingen spjälkning uppstod för luftlagrad betong belagd med sprutbetong med 2.0 kg/m³ ppf. Figur 8.5 visar temperaturutveckling för de provade betongplattorna med ppf [45]. Ugnstemperaturen följde tämligen väl RWS 120. Följande temperaturutveckling, T, rådde vid RWS 120 för betongplattor med tjocklek 500 mm (°C):

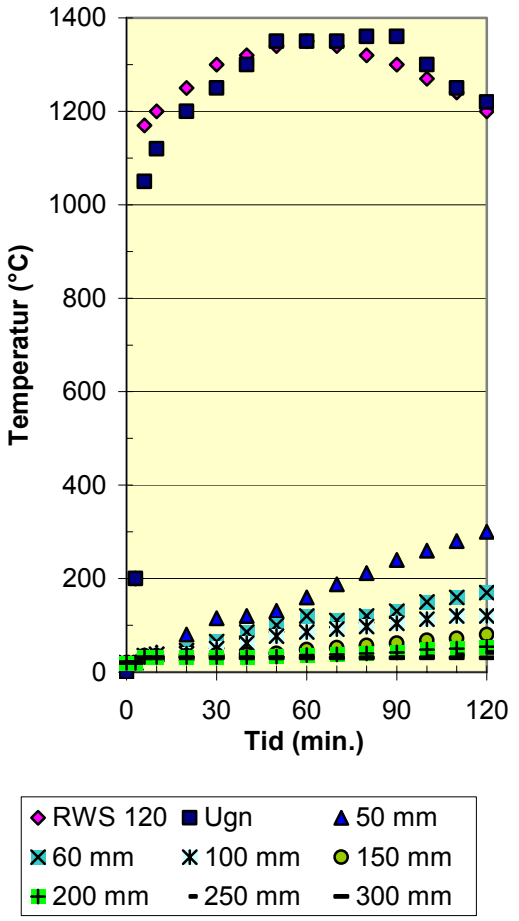
$T= 20+t\cdot(t\cdot(0.000012\cdot d-0.00341)+1270\cdot d^{-1.573})$ (8.4)

d betecknar avstånd från ytan (mm)
t betecknar tid (min)

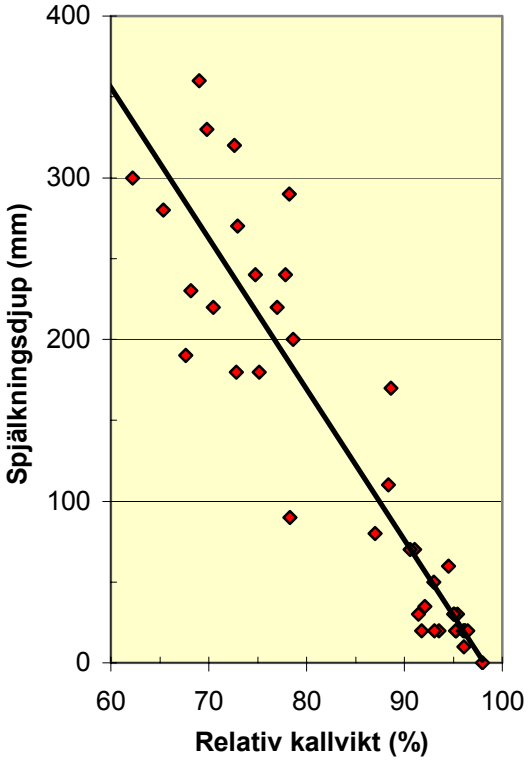
Figur 8.6 visar spjälkningsdjupet som funktion av relativ kallvikt av provkropparna efter spjälkning, dvs. ett lineärt samband [45]:

$s = -9{,}32\cdot r + 915$ {R^2=0.85} (8.5)

där
s betecknar spjälkningsdjupet vid RWS 120 för 500 mm betongplattor (mm)
r betecknar relativ kallvikt (%)

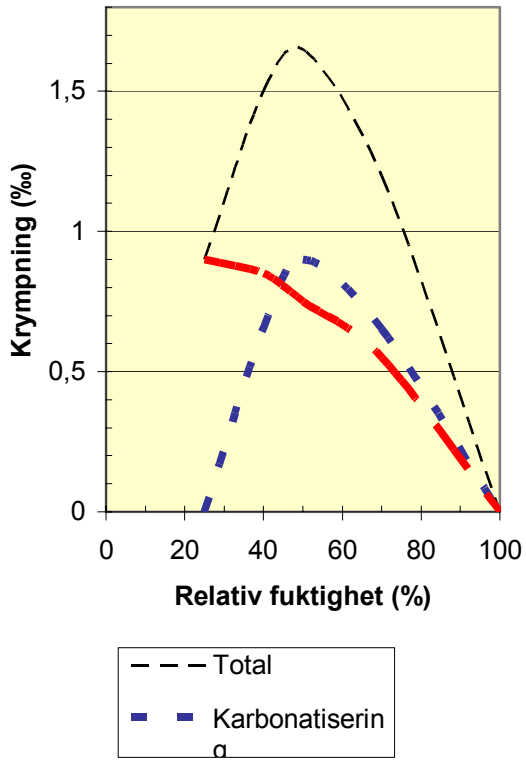


Figur 8.5 - Temperaturutveckling för provade betongplattor vid RWS 120 [45].



Figur 8.6 - Spjälkningsdjupet vs relativ kallvikt av provkropparna efter spjälkning [45].

Fuktkvoten bestämdes vid 28 dygns ålder genom att en parallellgjuten provkropp delades mitt itu med uttagning av prover tvärs genom provet. Fuktproverna samlades i plastpåsar som sedan transporterades till Innsbruck (institutet för Betongbyggnad, Byggnadsmaterial och Byggnadsfysik) för vägning av prover före och efter upphettning till 105 °C [45]. Tabell 8.3 visar uppmätt fuktkvot vid 28 dygns ålder i proverna medan brandprovningarna företogs upp till 360 dygns ålder [45]. Fuktkvoten var hög trots varierande torkningssätt vilket i sin tur beror av ett högt vct. Emellertid återspeglar uppmätt fuktkvot gängse förhållanden i österrikisk tunnelbyggnadsteknik, vattentät betong med hög fillerhalt och ett högt vct. Så småningom äger karbonatisering rum även i en betong av denna typ vilket medför att ytan på betongen krymper upp till 0.6‰ [42]. Denna ytkrympning gör att ett för fukttransport otät ytskikt uppstår som bättre står emot brand än en relativt nygjuten betong som provades här. Karbonatisering sker snabbast vid RF = 50% i betong med högt vct, en omgivningsmiljö som måhända råder i en tunnel men ej rådde i samband med försöken [45]. Vid vattenlagringen fick betongen ej möjlighet att karbonatisera (för högt RF), ej heller vid intensiv torkning (för lågt vct), Figur 8.7 [43]. Figur 8.7 visar total krympning, karbonatiserings- och uttorkningskrympning som funktion av omgivningens RF [43].

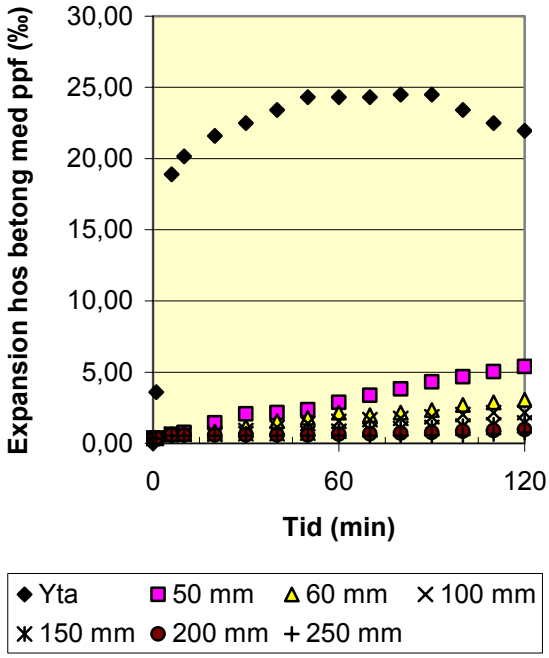


Figur 8.7 - Krympning som funktion av omgivningens RF [43].

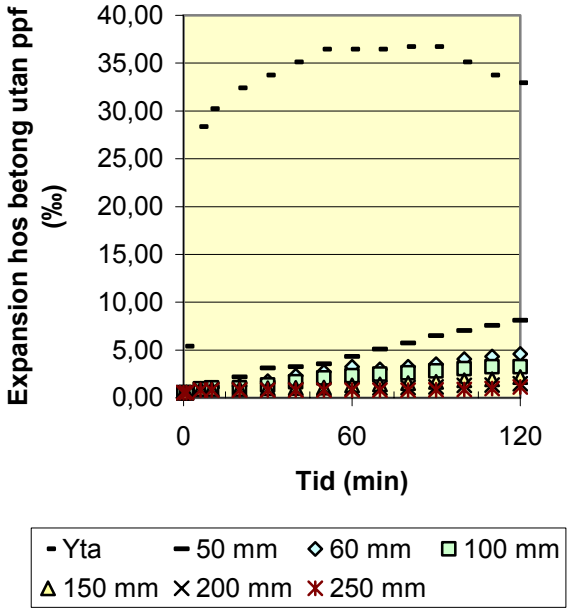
Tabell 8.3 – Fuktkvot i parallellprov (%) [45].

Härdningssätt	Mitt i prov	Mot ugn
Uttorkning, luft	5.1, 5.5, 5.8	2, 3.2, 3.3
Uttorkning 50 °C	4.9, 5.4, 7	4.3, 4.7, 4.7
Vattenlagring	5.3	5.2

Betongens spricker vid en töjning av ca 0.2% varvid sprickor uppstår med en för fukttransport otätare betong som följd. Betongen enligt de österrikiska försöken var ej karbonatiserad [45]. Å andra sidan visar Appendix 8.2 att eventuell karbonatisering föga torde ha hindrat explosiv spjälkning vid förekommande brandkatastrofer i tunnlar [45]. I såväl Moorfleettunneln, Tyskland, Eurotunnel, England – Frankrike, Mont Blanctunneln, Frankrike - Italien som i Gotthardtunneln, Schweiz förkom omfattande explosiv spjälkning i samband med brand. Betongen i dessa tunnlar torde ha varit väl karbonatiserad inte minst till följd av hög koldioxidhalt i tunnlarna. Karbonatisering kan möjligen minska risken för explosiv spjälkning men ej hindra den som ppf gör – även vid hög fuktkvot i betongen. I Tabell 8.3 visas fuktkvoten såväl i ytan av provet som mitt inuti. Ytfukten är avgörande eftersom explosiv spjälkning först sker allra närmast ytan av betongen. Om ytan av betongen förblir intakt motstår även betongens inre delar explosiv spjälkning vid brand, Figurerna 8.8-8.9.

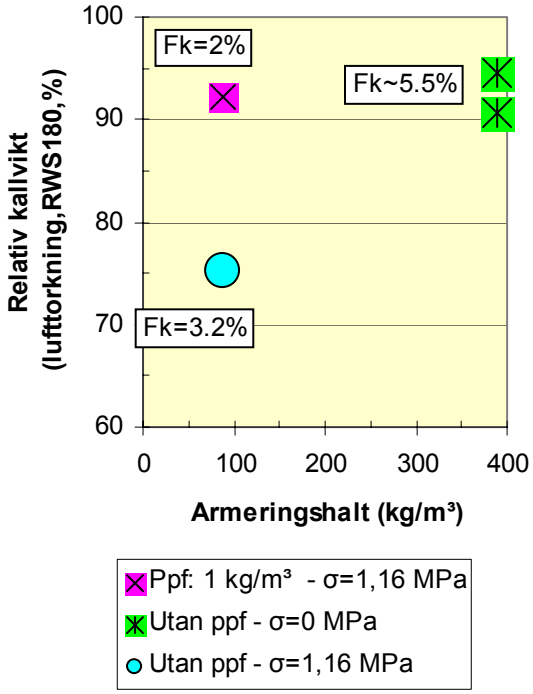


Figur 8.8 – Expansion hos betong med ppf vs tid. Varierande mätdjup [45].

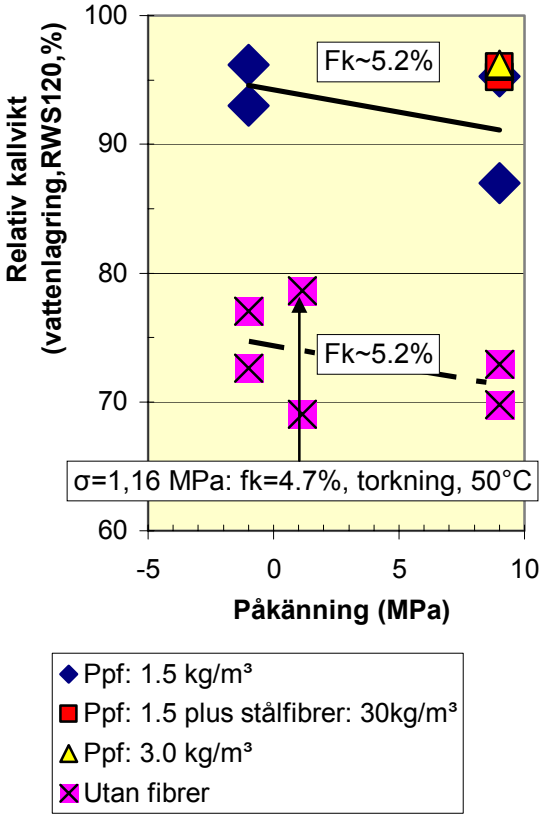


Figur 8.9 – Expansion hos betong utan ppf vs tid. Varierande mätdjup [45].

Explosiv spjälkningsrisk förelåg ej < 50 mm från ytan i ppf-betong (expansion < 3.5‰ – v.g. jfr resultat vid bestämning av temperaturutvidgningskoefficient ovan) inom 80 min om ytan behölls intakt – ej inom 50 min. för betong utan ppf där dock ytan spjälkades av varför riskzonen då successivt flyttades inåt [45]. För betong utan ppf påbörjades den explosiva spjälkningen med RWS-kurvan redan efter 2-4 min. till följd av den stora temperaturökningshastigheten, Figur 8.5, efter 3-5 min med LTI-kurvan samt efter 6-12 min. med ISO 384-kurvan [45]. Störst explosiva spjälkningshastighet uppmättes för LTI-kurvan efter vattenlagring av betong med yttre påkänning 1.16 MPa: ca 300 mm/h. Den explosiva spjälkningen fortsatte oförhindrad av normalt förekommande armeringen, ca 100 eller ca 200 kg/m³. Kraftigt ökad armering kunde bemästra den explosiva spjälkningen, ca 400 kg/m³, Figur 8.10. Figur 8.10 visar relativ kallvikt efter provning med RWS 180-kurvan som funktion av armeringshalten vid varierande påkänning [45]. Det är dock mer ekonomiskt att använda 1.5 kg/m³ 18 µm ppf i stället för att öka armeringshalten med ca 300 kg/m³ för att bemästra explosiv spjälkning. Figur 8.11 visar relativ kallvikt efter provning med RWS 120-kurvan som funktion av påkänning vid varierande mängd ppf. Figur 8.11 visar att stålfibrer inte hade någon inverkan på explosiv spjälkning.

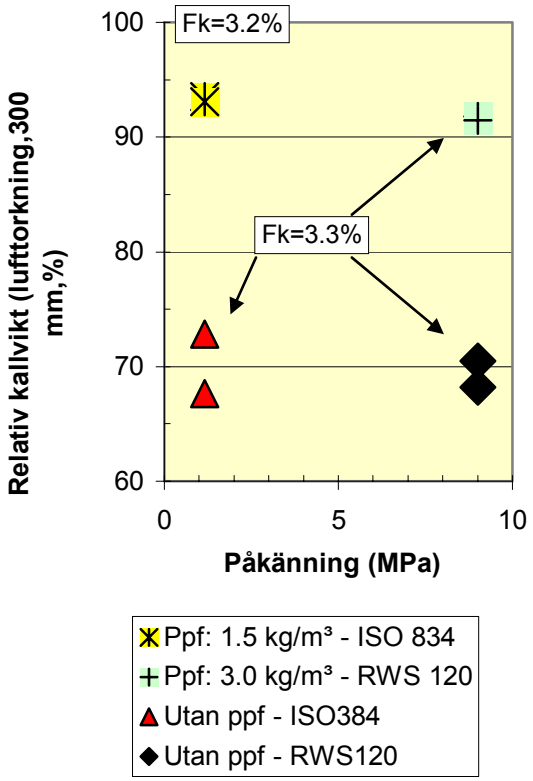


Figur 8.10 - Relativ kallvikt efter provning med RWS 180-kurvan vs armeringshalten. Varierande påkänning. Ppf 18 µm. 500 mm btg. Fk = ytfuktkvot, 28 dygns ålder (%) [45].

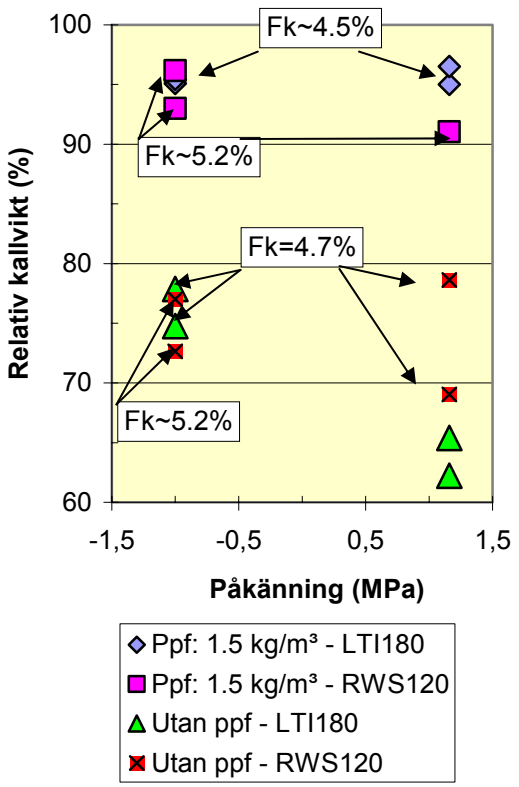


Figur 8.11 - Relativ kallvikt efter provning med RWS 120-kurvan som funktion av påkänning. Varierande mängd ppf 18 µm. 500 mm btg. Fk = ytfuktkvot (%) [45].

Påkänningen hade liten inverkan på mängden spjälkad betong åtminstone upp till 9 MPa – en för tunnelbetong rimlig påkänning. Inblandning av 1.5 kg/m³ 18 µm ppf bemästrade den explosiva spjälkningen. Utan ppf fortsatte spjälkning förbi armeringsskiktet på mindre än 10 min. och sedan till mer än 300 mm:s djup. Med ppf uppstod endast sprickbildning i ytan samt spjälkning på ca 20 mm, i vissa fall lokalt upp till 50 mm efter 2 h men ej förbi armeringsskiktet i något fall [45]. Det står klart att påkänningen hade mycket mindre inverkan på mängden explosivt spjälkad betong än vad inblandning av ppf hade. Figur 8.12 visar relativ kallvikt efter provning med RWS 120- och ISO384 kurvorna vs påkänning. Varierande mängd 18 µm ppf visas med 300 mm betong. Det förefaller som om 1.5 kg/m³ 18 µm ppf var tillräckligt även i detta fall för att bemästra spjälkningen. Såväl temperaturer enligt ISO 384-kurvan som enligt RWS 120-kurvan var tillräckliga för att ge spjälkning. På samma sätt jämfördes LTI 180-kurvan med RWS 120-kurvan, Figur 8.13. Figur 8.13 visar relativ kallvikt efter provning med RWS 120- och LTI 180-kurvorna vs påkänning vid 1.5 kg/m³ 18 µm ppf och 500 mm betong.

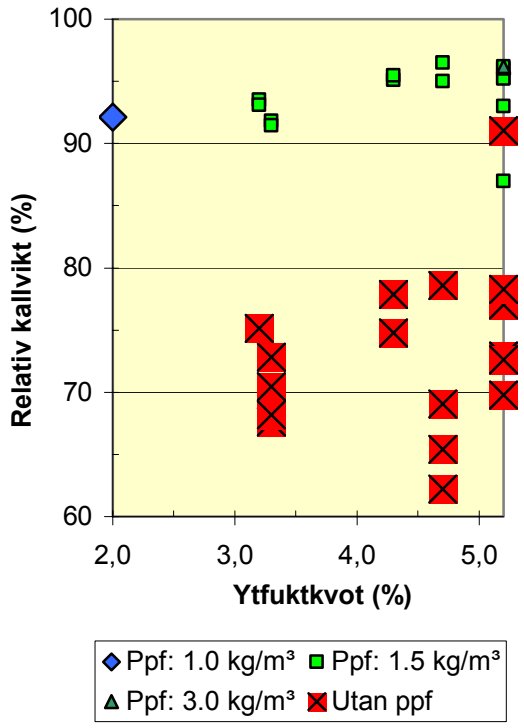


Figur 8.12 - Relativ kallvikt vid provning med RWS 120- och ISO384 kurvorna vs påkänning. Varierande mängd ppf 18 µm. 300 mm btg. Lufttorkning. Fk = ytfuktkvot (%) [45].



Figur 8.13 - Relativ kallvikt efter provning med RWS 120- och LTI 180-kurvorna vs påkänning. Fk = ytfuktkvot (%) [45].

Prover visade i Figur 8.13 med LTI 180 innehöll kvartsit som inte föreföll att ge upphov till större explosiv spjälkning än kalksten [45]. Figur 8.14 visar relativ kallvikt vs ytfuktkvot.



Figur 8.14 - Relativ kallvikt vs ytfuktkvot [45].

Rekommendationer för högpresterande betong [3]:

Åtgärder för att minska betongens spjälkningsbenägenhet skall vidtagas för betonger med vatten/bindemedelstal (vbt) under 0,32. Detta kan göras genom att tillsätta ppf 32 µm med låg smältpunkt till betongen. Dessa råd gäller endast under följande förutsättningar, Figur 8.15 [3]:

1. Betongens hållfasthet ligger mellan K80 till K120 (K = kubhållfasthet)
2. Vatten/bindemedelstalet (vbt) är över 0,24
3. Silikastoftinnehållet är under 7 %
4. Brandförhållandena är enligt ISO 834, standardbrandkurvan, eller motsvarande brandpåverkan
5. Betongens relativa fuktighet är under 75-80 %
6. Maximala belastningen från extern last är mindre än 45 % av medelcylinderhållfastheten.

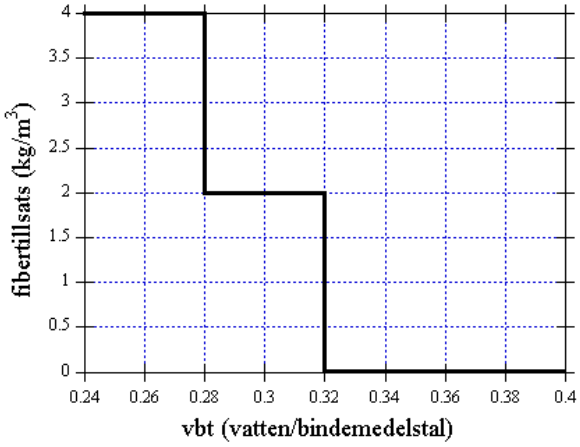


Fig. 8.15 – 32 µm ppf för att undvika spjälkning hos högpresterande betong [3].

8.2 Detaljgenomförande

Provningen skedde i en elektrisk ugn enligt Appendix 2 med mätning av deformationer vid 20 °C. Vid åtta spjälkningsförsök anbringades en, i förhållande till betongens hållfasthet, liten yttre last med en konstant spänning om ca 0.5 MPa under hela provningen i syfte att undvika instabiliteter i mätningen av deformationer. Betongens cementpasta krymper kraftigt under temperaturutvidgning medan betongens ballast expanderar varför stora inre deformationer erhålls i betongen. Syftet med den smärre yttre lasten var att undvika instabilitet. Prover med liten last härdades vid RF = 90%. Nio prover med spänningsnivåer ca 15% eller ca 30% av cylinderhållfastheten studerades, Appendix 6.

Ett av dessa 9 försök utfördes efter härdning vid RF = 60% och övriga 8 försök efter härdning vid RF = 90%. Sju försök utfördes med 20 °C starttemperatur i ugn och två försök med 225 °C starttemperatur. Två temperaturutvecklingskurvor erhölls, dels ouppvärmd ugn (RF = 90%), dels ugn förvärmd till 225 °C, det senare fallet i syfte att nå en snabbare temperaturutveckling vilket anses vara viktigt för risken för spjälkning. Temperaturutvecklingen i betongen 20 mm från ytan skiljde emellertid mycket litet mellan betong som studerades från 20 °C och från 225 °C förvärmd ugn, Figur 5.4. Följande temperaturutvecklingssamband användes:

$$T_{B20} = 7.23 \cdot \exp(0.0054 \cdot U) + 10 \qquad (5.3)$$

$$T_{B225} = 6.7 \cdot \exp(0.00555 \cdot U) \qquad (5.4)$$

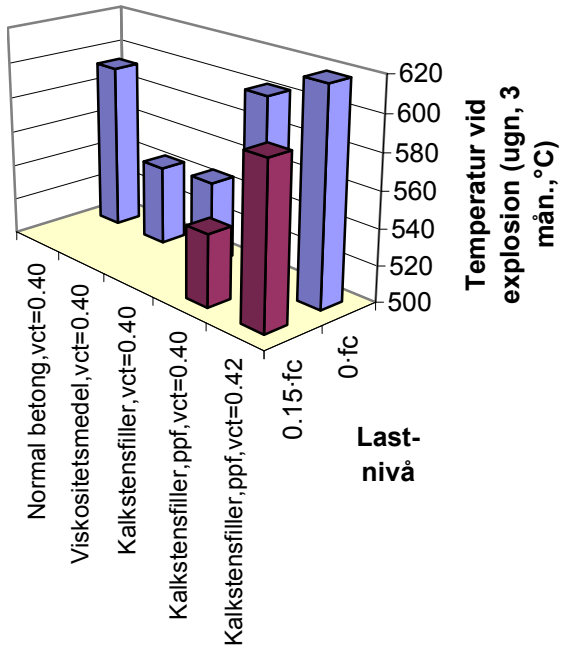
T_{B20} betecknar betongtemperatur på 20 mm
U betecknar ungstemperatur

Deformationen följdes så långt möjligt, vilket begränsades av spjälkning för prover utan ppf som härdats vid RF = 90% (alla prover utan ppf exploderade efter härdning vid RF = 90%). Efter härdning vid RF = 60% uppmättes fuktkvoten 3.1% samt efter härdning vid RF = 90% en fuktkvot varierande mellan 4.9% och 5.6%. Mellan provningsålder 3 mån. (starttemperatur 225 °C) och 10 mån. minskade fuktkvoten i genomsnitt med 0.2%, Appendix 6.

8.3 Resultat och diskussion

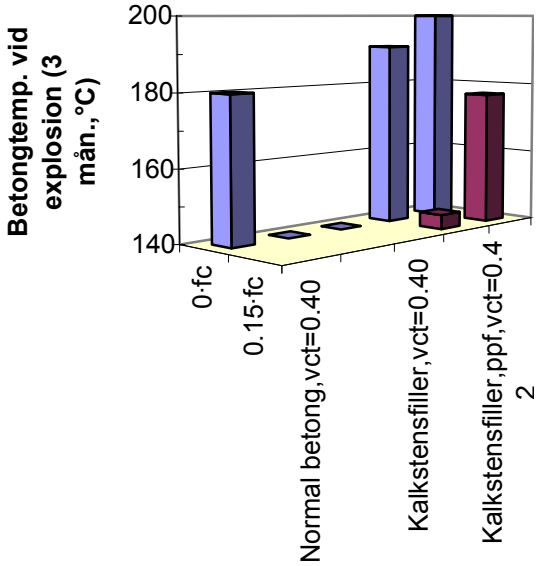
Av 17 spjälkningsprover exploderade 13. Samtliga tre prover med ppf härdade vid RF = 90% och med starttemperatur 20 °C bestod spjälkningsförsöken utan att explosion uppstod (ålder 10 mån., fuktkvot 5.0%). Vidare klarade sig ett prov med ppf härdat vid RF = 60% och med starttemperatur 225 ° utan att explosion uppstod (ålder 10 mån., fuktkvot 3.1%). Däremot exploderade fyra prover med ppf härdade vid RF = 90% och med starttemperatur 225 °C (ålder 3 mån., fuktkvot 5.4%). I Appendix 8.3-4 visas ugnstemperatur samt betongtemperatur vid explosion av prover. Figur 8.16 visar ugnstemperatur vid explosion av betong provad vid 3 mån. ålder. Figur 8.17 visar betongtemperatur vid explosion av betong provad vid 3 mån. ålder. Lägsta temperaturer uppmättes för betong med viskositetsmedel resp. enbart kalkstensfiller (tätast struktur) medan normal betong och betong med 1.4 kg/m³ 18 µm ppf i stort sett erhöll samma temperaturer vid explosion (ppf smälte och hindrade fukt att tränga in i strukturen). Närmast ytan förlorade ppf sina egenskaper, ev. avgasades varvid permeabiliteten ökade avsevärt jämfört med normal betong med kalkstensfiller resp. viskositetsmedel. På samma sätt visar Figurerna 8.18-8.19 temperaturerna vid explosion efter 10 mån. härdning, dvs. betonger med ppf motstod spjälkning medan övriga betonger exploderade. Även i detta fall erhöll betonger med enbart kalkstensfiller resp. viskositetsmedel lägre explosionstemperatur än normal betong men skillnaderna var små, inom felmarginalen. Det bör understrykas att följande två mekanismer kan ha påverkat förhållandena vid 10 mån. jämfört med provningen vid 3 mån. ålder:

1. Lägre starttemperatur, 20 °C i. st. f. 225 °C
2. Något lägre fuktkvot, Appendix 6.



Figur 8.16 - Ugnstemperatur vid explosion av betong provad vid 3 mån. ålder.

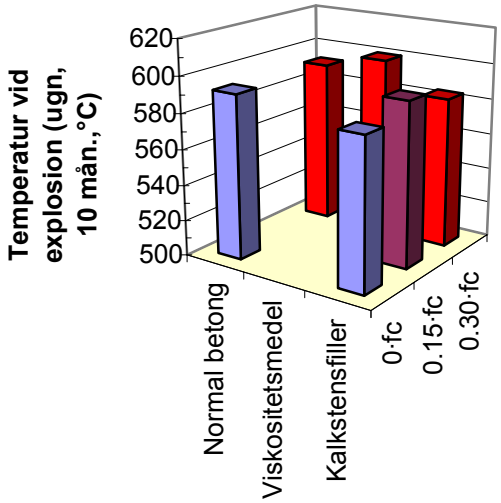
Å andra sidan påverkade starttemperaturen betongtemperaturen på 20 mm djup obetydligt medan uttorkningen av betongytan kan ha haft effekt, ca 0.2% lägre fuktkvot för betong med ppf vid 10 mån. ålder än vid 3 mån. ålder.



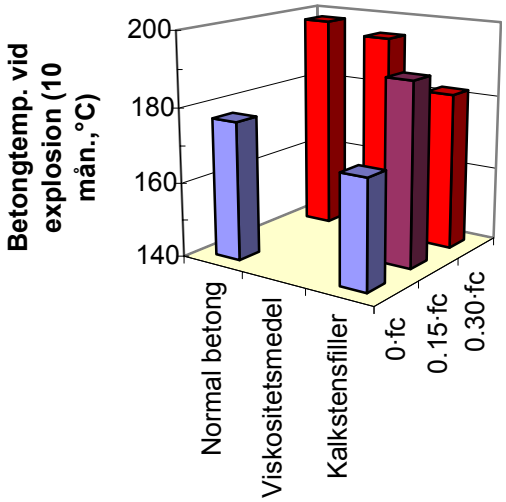
Figur 8.17 - Betongtemperatur vid explosion av betong provad vid 3 mån. ålder.

8.4 Slutsatser

I slutsatserna tas hänsyn till ca 300 försök med explosiv spjälkning hos betong. I fråga om fuktinnehåll och lastnivå kvarstår Svenska Betongföreningens preliminära rekommendationer enligt ovan [3], i fråga husbyggnadsbetong rekommenderades generellt minst 0.7 kg/m³ 18 µm ppf då krav finns på beständighet mot explosiv spjälkning samt > 0.7 kg/m³ 18 µm ppf vid ökande fillerhalt enligt Tabell 8.2, ekvation (8.3) samt Figur 8.4 ovan [29]. För anläggningsbetong, tunnlar, etc. har föreliggande undersökning och omfattande österrikiska försök visat att en mängd > 1.4 kg/m³ 18 µm ppf, förmådde att bemästra explosiv spjälkning även för vattenlagrad, ung betong [45]. I övrigt kan följande slutsatser dras:



Figur 8.18 - Ugnstemperatur vid explosion efter 10 mån. härdning.



Figur 8.19 - Betongtemperatur vid explosion efter 10 mån. härdning.

1. Ca 1.5 kg/m³ 18 µm ppf bemästrade explosiv spjälkning av betong bättre än kraftig uttorkning av betongen
2. Ca 1.5 kg/m³ 18 µm ppf bemästrade explosiv spjälkning av betong bättre än om en lastnivå av ca 25% av brottpåkänningen ändrades till dragpåkänning
3. Det krävdes en ökning av armeringsmängden i betongen med ca 300 kg/m³ för att bemästra explosiv spjälkning lika väl som med 1.5 kg/m³ 18 µm ppf.
4. Ett skikt av 60 mm sprutbetong med 2 kg/m³ 18 µm ppf skyddade underlig-

gande väluttorkad betong med 1.5 kg/m³ 18 µm ppf och ytfuktkvoten 3.2% mot explosiv spjälkning under 180 min.

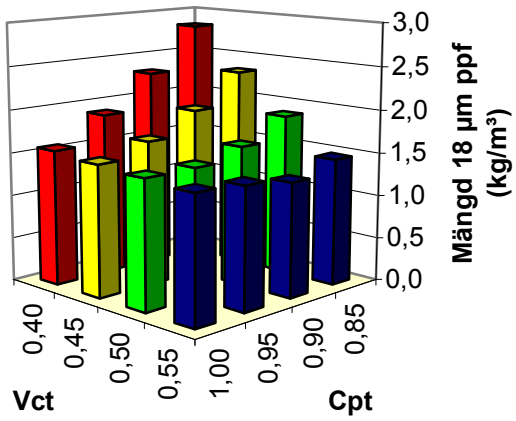
5. Ett skikt av 60 mm sprutbetong med 2 kg/m³ 18 µm ppf skyddade inte en underliggande fuktig betong med 1.5 kg/m³ 18 µm ppf och ytfuktkvoten 5.2% mot explosiv spjälkning utan denna uppgick till 90 mm efter 180 min
6. Motsvarande betong utan sprutbetong erhöll ca 25 mm spjälkning efter 180 min.
7. Inblandning av stålfiber hade liten eller ingen effekt på explosiv spjälkning hos betong.
8. Ytbeläggning med ett kraftigt metalliskt stålnät, glasfibernät eller kolfibernät skyddade betongen sämre mot explosiv spjälkning än inblandning av 0.5 kg/m³ 70 µm ppf.

Baserat på föreliggande undersökning och ovannämnda försök [4-20,29,45-47] kunde följande rekommendationer ges i fråga om inblandning av 18 µm ppf i syfte att bemästra explosiv spjälkning hos anläggningsbetong, Tabell 8.4, Figur 8.20:

$$Ppf_{anl}=(28\cdot(cpt)^2-26\cdot(c/p)-2.4)\cdot\ln(vct)+45\cdot(cpt)^2-68\cdot(cpt)+24.2 \geq 1.4$$

Tabell 8.4 - Mängd 18 µm ppf för att bemästra explosiv spjälkning hos i anläggningsbetong (kg/m³).

Cpt/vct	0.85	0.90	0.95	1.00
0.40	2.8	2.3	1.9	1.6
0.45	2.3	1.9	1.7	1.5
0.50	1.9	1.6	1.5	1.5
0.55	1.5	1.3	1.4	1.4



Figur 8.20 - Mängd 18 µm ppf i syfte att bemästra explosiv spjälkning hos i anläggningsbetong.

9. Sulfatbeständighet

9.1 Tidigare forskning

Pågående försök visar att sulfathalten i svenska vatten eller grundvatten kan förväntas uppgå till 1.4 g/l som mest [50]. Eftersom det inte fanns tid att vänta 100 år på resultat användes en accelererad provningsmetod baserad på natriumsulfat, Na_2SO_4, 18 g/l [25,51]. Sulfathalt var 8.7 ggr högre än vad som uppmätts i verkligheten. En skillnad på så lite som 2-3 ggr högre koncentration av sulfater kan ge skador inom några år. Koncentration och exponeringstid är dock inte linjära vid beständighetsförsök, n = 1 utan kan vara accelererande, n > 1, eller retarderande tidsberoende, n < 1 [52].

9.2 Detaljgenomförande

Försöksbetonger ges i Appendix 7.1, sex SKB samt en normal betong [25,53]. Ur stora betongvolymer borrades cylindrar med diametern 50 mm och längden 150 mm. Startålder var endera 1 eller 3 månader. Exponering skedde endera för destillerat vatten, havsvatten från Barsebäck eller destillerat vatten med natriumsulfat, 18 g/l, de bägge förra i jämförande syfte [25]. Vätskan byttes varje halvår med kontinuerlig omrörning. Temperaturen hölls vid 5 °C där kolsyran har stor löslighet (närmre 0 °C kan man av praktiska skäl inte arbeta eftersom frysning då riskeras av proverna med de jämförande vätskorna). Mätning skedde av egenfrekvens (utgör ett mått på elasticitetsmodulen dvs. inre förstöring av betongen), längdändring och vikt hos proverna vid 100, 300, 900, 1350 och 1700 dygns ålder (vid 1400 och 1700 dygn endast efter sulfatangrepp).

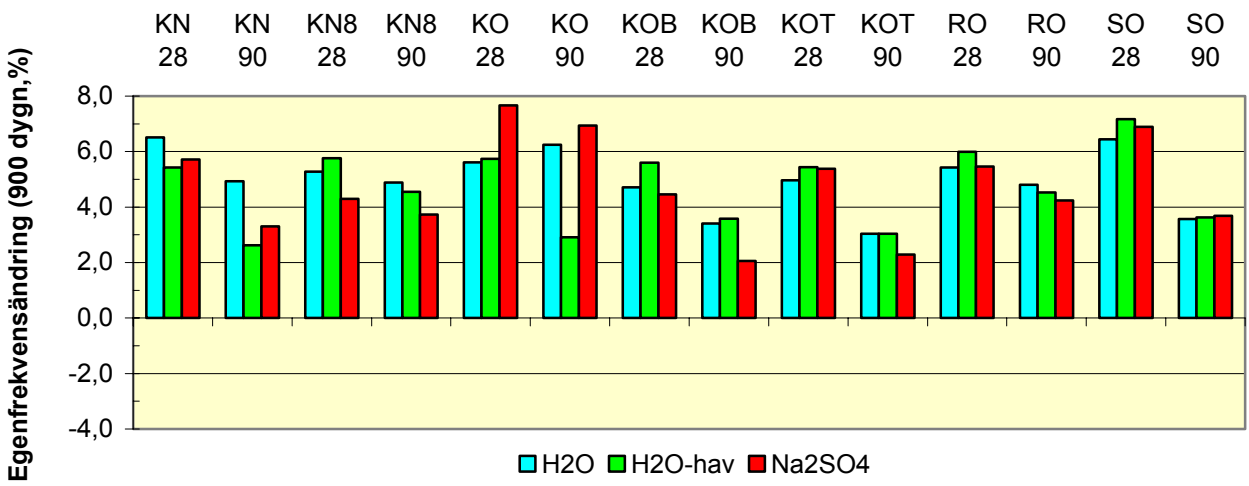
9.3 Resultat och diskussion

Följande beteckningar används:

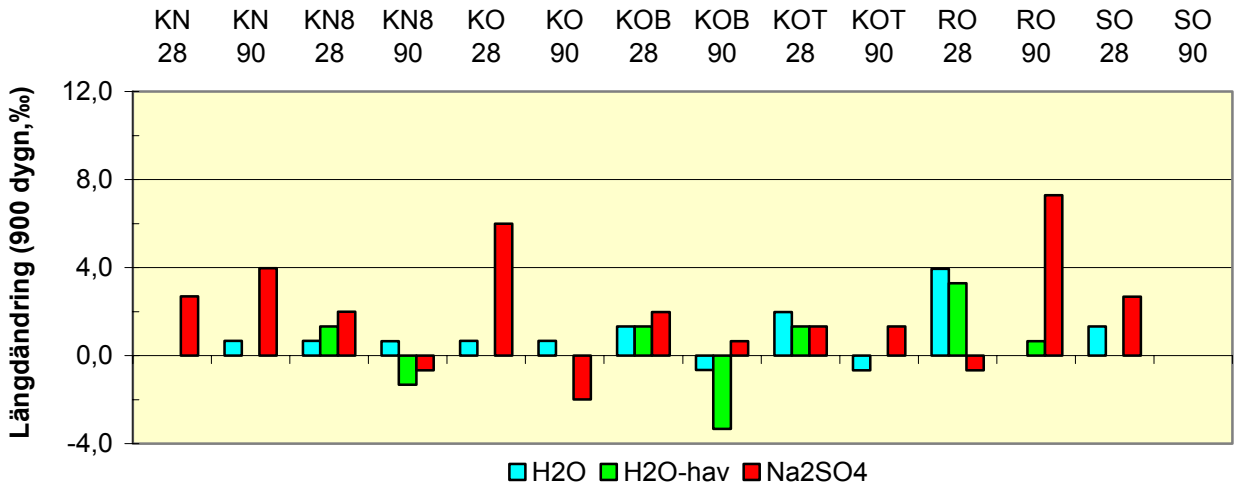
1. B = ökad fillermängd
2. K = Limus 40 (kristallint kalkstensfiller)
3. N = ny blandningsordning (filler sist)
4. = ordinarie blandningsordning (filler först)
5. R = referens (normal betong)
6. S = Limus 15 (sedimintärt kalkstensfiller)
7. T = 5.5 m hydrostatiskt tryck i stället för 0.23 m.

8 = 8% lufthalt

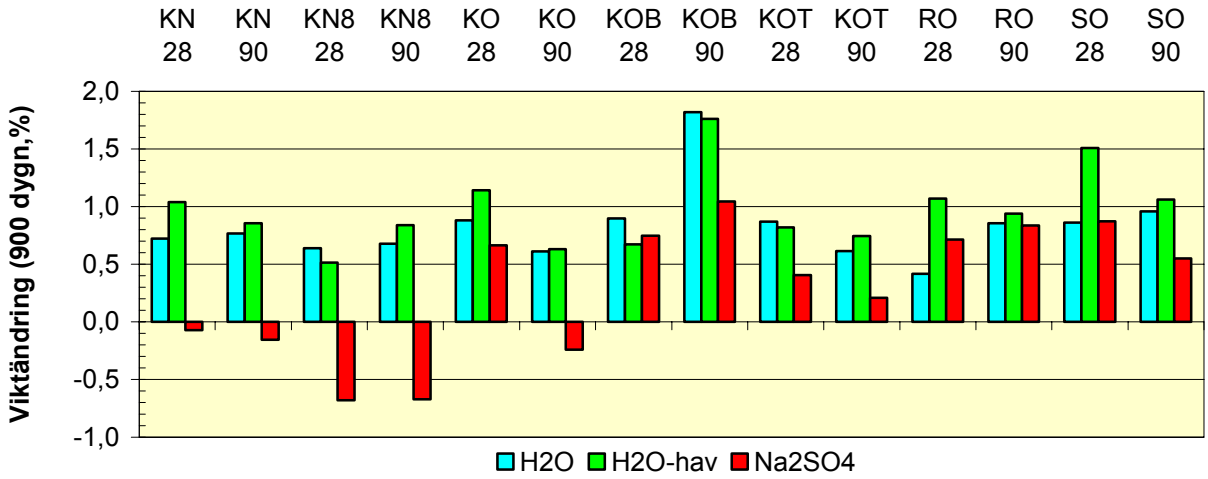
Figur 9.1 visar egenfrekvensändring efter 900 dygn. Figur 9.2 visar längdändring efter 900 dygns exponering i destillerat vatten, havsvatten eller sulftat. Figur 9.3 visar viktändring efter 900 dygns exponering i destillerat vatten, havsvatten och sulftat. Inget av sulfatproverna uppvisade någon inre nedbrytning dvs. någon minskning av inre egenfrekvensen. Längdändringarna gav inget entydigt resultat däremot kunde en liten viktminskning skönjas för SKB med ny blandningsordning (KN och KN8), dvs. med filler tillfört sist. Efter 900 dygn fortsatte endast provningarna med sulfatangrepp. Figur 9.4 visar egenfrekvensändring efter sulfatangrepp upp till 1400 dygn. Figur 9.5 visar längdändring efter sulfatangrepp upp till 1400 dygn. Figur 9.6 visar viktändring efter sulfatangrepp upp till 1400 dygn [53]. För en betong, SO 28, kunde det efter 1400 dygns provning urskiljas en sammanhörande minskning av egenfrekvensen (inre nedbrytning), stor expansion (ettringitbildning, > 10 ‰) och viktminskning (ytavskalning). Trots en stor ytavskalning uppmättes ändock en ökande egenfrekvens för proverna KO 90 och SO 90, eftersom inre nedbrytningen ännu ej påbörjats. Ytavskalningen var emellertid oacceptabelt stor för samtliga betonger KO och SO (ordinarie blandningsordning, filler först – såväl kristallint som sedimentärt kalkstensfiller). Fortsatt ytangrepp av sulfater observerades även för betonger med ny blandningsordning, filler sist, KN och KN8, nu av mindre storleksordning än för betong med sedimentärt kalkstensfiller. Först efter 1400 dygns sulfatangrepp fram till 1700 dygn bröts samtliga betonger med kalkstensfiller ned signifikant medan normal betong utan kalkstensfiller motstod angreppet utan någon mätbar påverkan, Figur 9.7. Figur 9.7 visar viktändring efter sulfatangrepp upp till 1700 dygn. Det fanns även anledning att undersöka inverkan av kompakteringsmetod på sulfatangreppet (ytavskalningen). Figur 9.8 visar densitet vid blandning, 28 och 90 dygns ålder hos provade betonger. Gjutning med stor formhöjd, 5.5 m, gav störst ökning av densiteten från blandning till härdat tillstånd, ca 6%. Vibrering av betongen gav en densitetsökning om ca 4.5%. Densitetsökningen var mindre än 4% för samtliga SKB (normal gjuthöjd). .



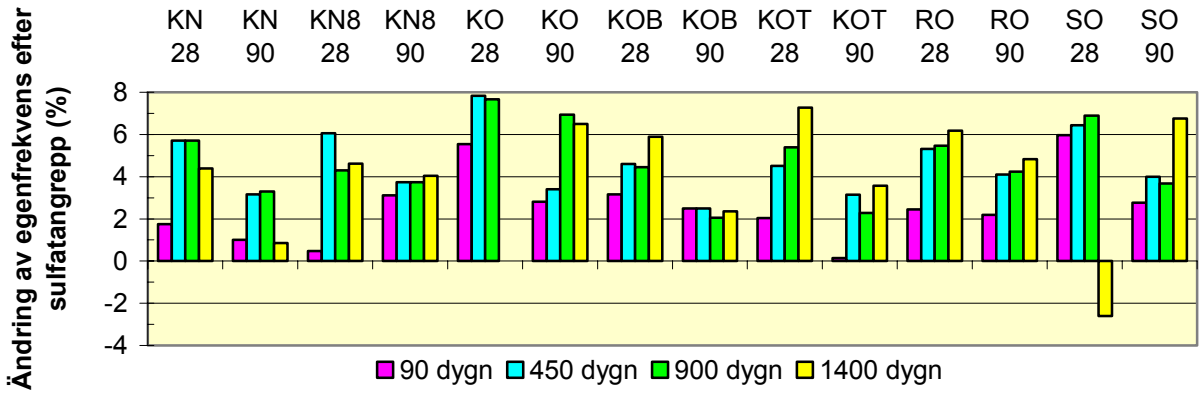
Figur 9.1 - Egenfrekvensändring efter 900 dygns exponering i destillerat vatten, havsvatten och sulftat.



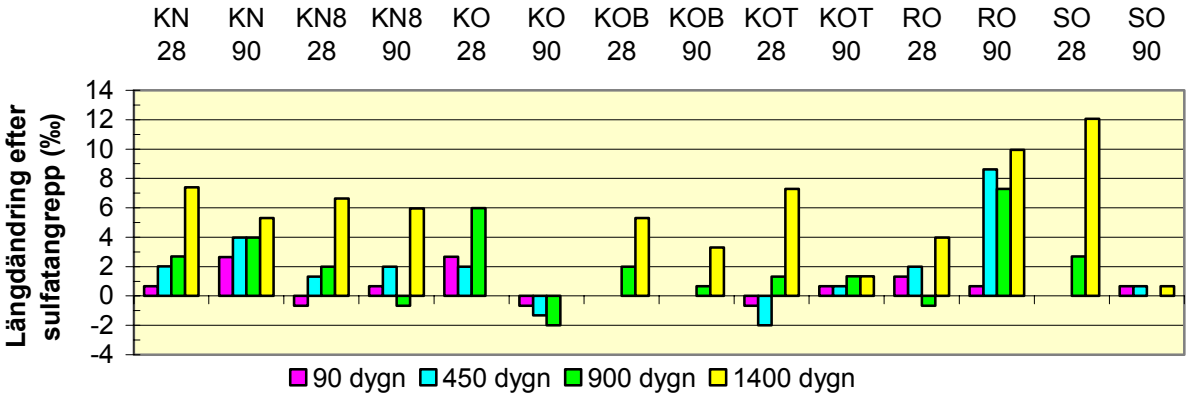
Figur 9.2 - Längdändring efter 900 dygns exponering i destillerat vatten, havsvatten och sulftat.



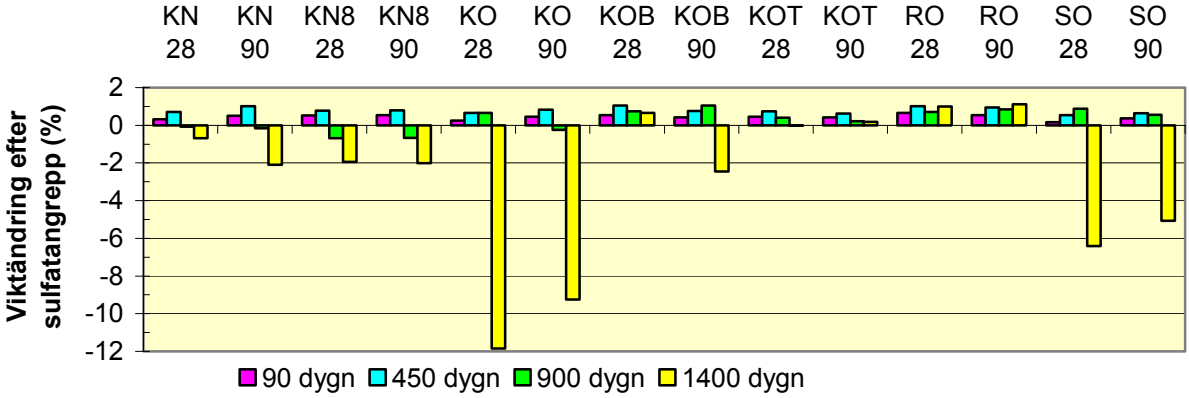
Figur 9.3 - Viktändring efter 900 dygns exponering i destillerat vatten, havsvatten och sulftat. Beteckningar: B = ökad fillermängd, K = Limus 40; N = ny blandningsordning (filler sist); O = ordinarie blandningsordning (filler först); R = referens (VB), S = Limus 15; T = 5.5 m hydrostatiskt tryck i stället för 0.23 m; II = andra; 8 = 8% lufthalt.



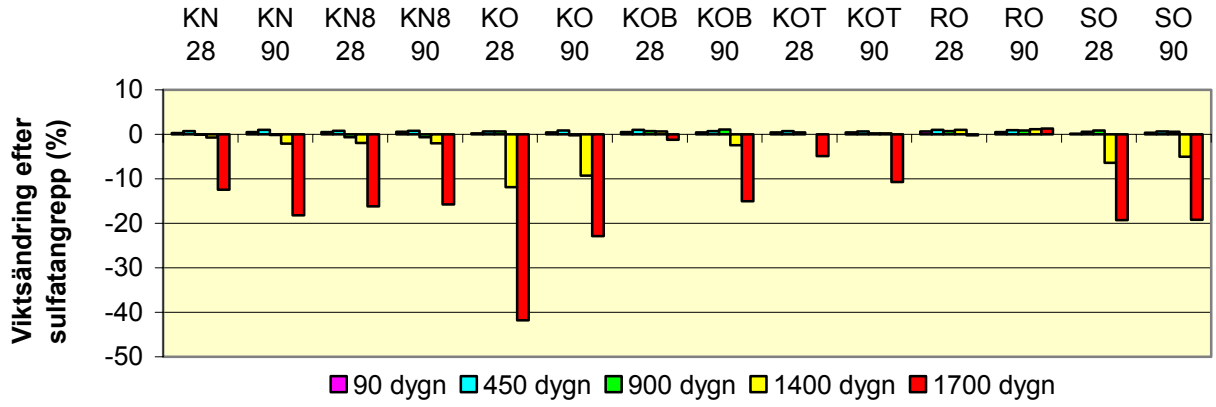
Figur 9.4 – Egenfrekvensändring efter sulfatangrepp upp till 1400 dygn. Beteckningar ges i Figur 9.3.



Figur 9.5 – Längdändring efter sulfatangrepp upp till 1400 dygn. Beteckningar ges i Figur 9.3.

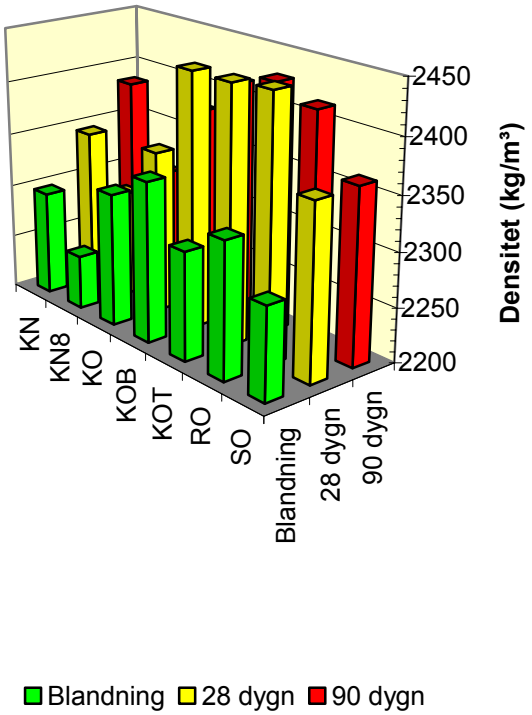


Figur 9.6 – Viktändring efter sulfatangrepp upp till 1400 dygn. Beteckningar ges i Figur 9.3.

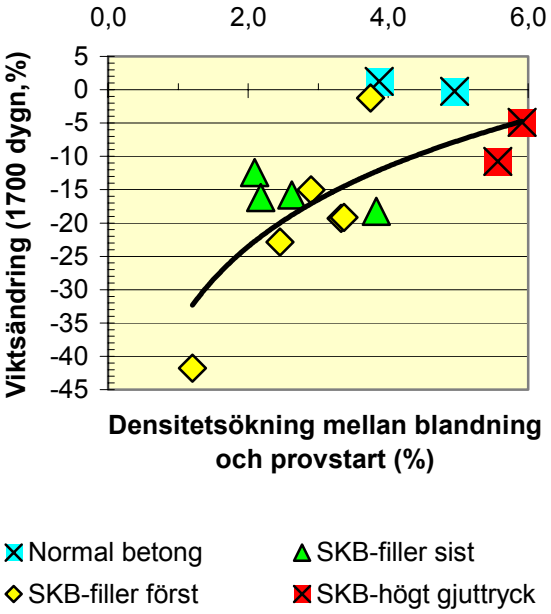


Figur 9.7 – Viktändring efter sulfatangrepp upp till 1700 dygn. Beteckningar ges i Figur 9.3.

Figur 9.9 visar ett samband mellan densitetsökning och sulfatangrepp, dvs. kompakteringstekniken påverkade sulfatbeständigheten, vilket är anmärkningsvärt. Figur 9.9 visar även att betong utan kalkstensfiller väl motstod sulfatangrepp. Om yttre miljön vad gäller sulfathalt inte kan förutses bör SKB med kalkstensfiller ej nyttjas.



Figur 9.8 – Densitet vid blandning, 28 och 90 dygns ålder. Beteckningar: se Figur 9.3.



Figur 9.9 – Viktsändring vs densitetsökning dvs. påverkan av kompakteringstekniken.

9.4 Slutsatser av sulfatbeständighet hos självkompakterande betong med kalkstensfiller och hos normal betong

Följande slutsatser kunde dras:

1. Efter 900 dygns exponering i vatten, havsvatten och sulftatlösning kunde ingen inre nedbrytning dvs. minskning av inre egenfrekvensen, skönjas
2. Längdändringarna gav inget entydigt resultat däremot kunde efter 900 dygns efter sulfatangrepp en liten viktminskning skönjas för SKB med ny blandningsordning dvs. med filler tillfört sist.
3. För en SKB med sedimentärt kalkstensfiller kunde det efter 1400 dygns provning urskiljas en sammanhörande minskning av egenfrekvensen (inre nedbrytning), stor expansion (ettringitbildning, > 10 ‰) och viktminskning (ytavskalning).
4. Trots en stor ytavskalning uppmättes efter 1400 dygns sulfatangrepp ingen minskning av egenfrekvens för proverna.
5. Ytavskalningen efter 900 dygns sultfatangrepp var emellertid stor för SKB med ordinarie blandningsordning, filler först – såväl med kristallint som sedimentärt kalkstensfiller.
6. Fortsatt ytangrepp av sulfater observerades efter 900 dygn även för betonger med ny blandningsordning, filler sist, men av mindre storleksordning än för betong med sedimentärt kalkstensfiller.
7. Efter 1400 dygns sulfatangrepp fram till 1700 dygn bröts samtliga betonger med kalkstensfiller ned medan normal betong utan kalkstensfiller motstod angreppet utan någon mätbar påverkan.
8. Det fanns ett samband mellan densitetsökning och sulfatangrepp, dvs. kompakteringstekniken påverkade sulfatbeständigheten, vilket är anmärkningsvärt.
9. Om yttre miljön vad gäller sulfathalt inte kan förutses bör SKB med kalkstensfiller ej nyttjas.

Referenser

1. Khoury, G. A., Passive Fire Protection in Tunnels. Imperial College. Concrete. 2002, 26 sid.
2. Bertil Persson, Self-compacting Concrete at Fire Temperatures, Materials and Structures, 2003.
3. Anderberg, Y., Oredsson, J., Rise, G., High Performance Concrete Structures – Design Handbook. Svensk Byggtjänst, Stockholm, 2000, 49-58.
4. SBUF-projekt beträffande brandbeständighet hos självkompakterande betong, 2003.
5. Bertil Persson, Self-Compacting Concrete at Fire Temperatures. TVBM-3110, LTH Byggnadsmaterial, Lund. 2003, 200 sid.
6. Boström, L., Självkompakterande betong med polypropylenfibrer klarar brand. Brandposten no 26. SP. 2002.
7. Boström, L., Självkompakterande betong med polypropylenfibrer klarar brand. Betong 3/2002, 32.
8. Boström, L., Self-compacting concrete exposed to Fire, Bygg & Teknik. 2002/06, 36-38.
9. Bertil Persson, Hållbarhet hos självkompakterande betong med kalkstensfiller. Bygg & Teknik 07/2002, 35-38.
10. Bertil Persson, Förebygger polypropylenfibrer spjälkning vid hög temperatur även hos självkompakterande betong? Husbyggaren 2/2002, 26-30.
11. Bertil Persson, Självkompakterande betong motståndskraftig mot sprickbildning och brand. Husbyggaren, 4/2002, 10-16
12. Bertil Persson, Hållbarhet hos självkompakterande betong med kalkstensfiller. Bygg & Teknik 07/2002, 35-38.
13. Bertil Persson, Hög fukt- och fillerhalt bakom spjälkning vid hög temperatur hos självkompakterande betong. Bygg & Teknik 2003/06, 34-36.
14. Bertil Persson, Självkompakterande betong vid brandtemperatur. Betong 3/2003, 27-28.
15. Bertil Persson. Fire Resistance of Self-Compacting Concrete, Materials and Structures, Vol. 37, No 273, 575-584.
16. Bertil Persson. Självkompakterande betong utan filler – explosiv spjälkning vid hög temperatur. Rapport TVBM-7179. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2004, 54 sid.
17. RILEM TC DSC (Technical Committee on Durability of Self-Compacting Concrete. Explosive Spalling of Self-Compacting Concrete. Data Bank. 2004, 3 sid.
18. Diedrichs, U., Jumppanen, U.-M., Schneider, U., High Temperature Properties and Spalling Behaviour of High Strength Concrete. Weimar. Red.: Wittmann och Schwesinger. Freiburg and Unterengstringen. 1995, 129-143.
19. Rekommendationer beträffande inblandning av polypropylenfibrer i tunnelbetong. Remiss. Tunnel 2004, Vägverket, Borlänge, 2003.
20. Preliminära riktlinjer för att undvika explosiv spjälkning av betongkonstruktioner vid hög temperatur. Svenska Betongföreningens brandkommitté, Betong NR2/2004, 2004, 21-14.
21. Bertil Persson, Plastisk krympning hos självkompakterande betong utan byggfukt ISSN: 0348-7911 TVBM, Rapport TVBM-7176, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 2003, 70 sid.
22. Bertil Persson. Plastisk krympning hos självkompakterande betong utan byggfukt. Bygg & Teknik2004/07, sid. 41-43.
23. Bertil Persson, Deformationer hos husbyggnadsbetong – inverkan av produktionsmetoder på elasticitetsmodul, krypning och krympning. Rapport TVBM-3088 (Formas, Skanska och SBUF). LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 71 sid.
24. Bertil Persson, Kompatibilitet mellan golvmaterial och betong – Effekt av produktionsmetoder på emissioner, fukt och karbonatisering." TVBM-7149. LTH. Lund. 2000, 133 sid.
25. Bertil Persson, Assessment of Chloride Migration Coefficient, Salt Frost Resistance, Internal Frost Resistance and Sulphate Resistance of Self-Compacting Concrete. TVBM-3100. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2001, 86 sid.

26. Bertil Persson, Golvsystem på betong – fuktpåverkan, kemisk emission och vidhäftning. Rapport TVBM-7165. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2003, 157 sid.
27. Bertil Persson, Self-Compacting Concrete at Fire Temperatures. TVBM-3110. LTH Byggnadsmaterial, 2003, 200 sid.
28. Bertil Persson, Self-Compacting Concrete for Submerged Repair of Harbours or Power Plant Dams, TVBM-3113, ISBN 91-631-4006-3, LTH Byggnadsmaterial, Lund. 2003, 68 sid.
29. Bertil Persson. Självkompakterande betong utan filler – explosiv spjälkning vid hög temperatur. Rapport TVBM-7179. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2004, 54 sid.
30. Bertil Persson, Self-Compacting Concrete after 4-year Thaumasite Sulphate Attack Rapport U03.08 (Heidelberg Cement Ltd, Malmö), LTH, 2003, 12 sid.
31. Bertil Persson. Internal Frost Resistance and Salt Frost Scaling of Self-Compacting Concrete. Cement and Concrete Research. 33, 2003, 373-379.
32. Bertil Persson. Inre frostbeständighet hos undervattensgjuten, självkompakterande betong. Rapport U04.10. LTH Byggnadsmaterial. Lund 2004, 8 sid.
33. Peter Laugesen. Luftporanalys (ASTM C 457). Rapport 05-105. Pelcon. Søborg. 2004, 6 sid.
34. Bertil Persson. Chloride Migration Coefficient of Self-Compacting Concrete. Materials and Structures. 37. 2004, sid. 82-91.
35. Dirch Bager. Long-term Durability of High Perfomance Concrete in Seawater. International Workshop on Durability of HPC. Essen 23-24 September. 2004, 301-310.
36. M. Geiker, N. Thaulow, P. J. Andersen, Assessment of Rapid Test of Concrete Permeability Test of Concrete with and without Mineral Admixtures. Durability of Concrete and Components. Brighton. Chapman & Hall (1990) 52-61.
37. Dimitrious Boubitsas, Katarina Paulou. Self Compacting Concrete for Marine Environment. TVBM-5048. LTH Byggnadsmaterial. Lund (2000) 55 sid.
38. Bertil Persson. A Background for the Choice of Mix Design of the Concrete for the Great Belt Link. Rapport U91.02. LTH Byggnadsmaterial. Lund (1991) 102 sid.
39. CTH Rapid Test for Determination of the Chloride Migration Coefficient, D, in Concrete. NT BUILD 492 (2000).
40. L. Tang, L.-O. Nilsson, Modelling of chloride penetration into concrete – Tracing five years' field exposure. Concrete Science Engineering. 2 (2000) 170-175.
41. 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.
42. Bertil Persson. Quasi-instantaneous and Long-term Deformations of High-Performance Concrete with Some Related Properties. Rapport TVBM-1016. ISBN 91-630-6969-5. 1998. 500 sid
43. J. J. Brooks och Adam Neville. Concrete Technology. Longman. Singapore. 1987.
44. 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.
45. Wolfgang Kusterle et al. Brandbeständikeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie in Zusammenarbeit mit der Eisenbahn - Hochleistungsstrecken AG. Stressenforschung. Heft 544. ISSN 0379-1491. Bundesstrassensverwaltung. Stubenring 1, A-1010 Wien. 2004, 221 pp.
46. G.F. Peng et al. Residual Mechanical Properties and Explosive Spalling of Fibre-Toughened High Perfomance Concrete Exposed to High Temperatures. Washington. 2005.

47. C.-G. Han, Y.-S. Hwang, S.-H. Yang, N. Gowripalan, Performance of Spalling Resistance of High Performance Concrete with Polypropylene Fiber Contents and Lateral Confinement. HSC/HPC, Washington. 2005.
48. K. Kordina; C. Meyer-Ottens. Betong Brandschutz Handbuch. Betong-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1981.
49. S.L. Suhaendi, T. Horiguchi, N. Saeki, Residual Strength and Permeability of Hybrid Fiber Reinforced High Strength Concrete Exposed to High Temperature. HSC/HPC Congress, Washington. 2005.
50. Jan Trägård. Risken för taumasitiskt sulfatangrepp på svensk SKB – pågående försök. Nordiskt Betongforskningsmöte. Helsingör. 2002, 298-300.
51. Iad Saleh, Karin Pettersson, Ulf Jönsson. Frostbeständighet och kloridinträngning hos självkompakterande anläggningsbetong. SBUF-rapport nr 09101. Skanska Sverige AB. 2002, 175 sid.
52. Sven-Erik Johansson. Personlig information. Cementa AB. 2002.
53. Bertil Persson, Self-Compacting Concrete after 4-year Thaumasite Sulphate Attack, Report U03.08. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2003, 12 sid.
54. Lars Boström, Innovative Self-Compacting Concrete – Development of Test Methodology for Determination of Fire Spalling, SP Rapport 2004:06, Borås, 224 sid.
55. Long Phan. High-Strength Concrete at High Temperature – An Overview. Symposium on Utilization of High Strength/HPC, Ed. König, G., Dehn, F., Faust, T., Leipzig, 2002, 501-518.
56. Lars Boström. The Performance of Some SCC when Exposed to Fire. Report 2002:23. Fire Technology. Swedish National Testing and Research Institute, SP. Borås. 37 sid.

APPENDIX

Appendix 1 – Material, sammansättning (kg/m³) och egenskaper hos betong
Appendix 2 – Metoder
Appendix 3 – Resultat från provning av inre frostbeständighet
Appendix 4 – Resultat av provning av kloridinträngning
Appendix 5 - Uppmätt temperaturutvidgningskoefficient (‰/°C).
Appendix 6 – Hårdnade egenskaper och påkänning vid krypförsök
Appendix 7 – Saltfrostbeständighet
Appendix 8 – Spjälkning
Appendix 9 – Sulfatbeständighet

Appendix 1 – Material, sammansättning (kg/m³) och egenskaper hos betong

Betong	40LN0	40L00	40LK0	40LK2	42LK2
Beskrivning	Normal betong. vct=0.40	Viskositets-medel, vct=0.40	Kalkstens-filler, vct=0.40	Kalkstens-filler. ppf. vct=0.40	Kalkstens-filler. ppf. vct=0.42
Gjutdatum	16.1.04	16.1.04	13.1.04	13.1.04	15.1.04
Makadam kvartsit 11-16 mm	471	496	474	450	450
Makadam kvartsit 8-11 mm	139	146	189	208	208
Naturgrus Åstorp 0-8 mm	1000	1053	912	990	990
Kalkstensfiller Limus 40			92	97	97
Anläggningscement Degerhamn	441	464	430	450	450
Luftporbildare (MB Microair)	0.132	0.093	0.089	0.125	0.225
Vatten	176	186	172	180	193
Viskositetsmedel (MB Glenium Stream)		2.3			
Flytmedel (MB Glenium 51)	2.2	4.6	5.6	32.4	33.7
Vattencementtal, vct	0.40	0.40	0.40	0.40	0.43
Polypropylenfibrer, ppf				1.4	1.4
Densitet	2227	2347	2278	2380	2394
Torrdensitet	2049	2156	2109	2179	2178
Bindemedel/densitet	0.215	0.215	0.205	0.207	0.207
(Flyt)sättmått (mm)	180	620	640	600	600
Lufthalt (%)	7.8	3.3	7.3	2.8	3.3

Beteckningar: ppf = polypropylenfibrer, vct = vattencementtal, K = kalkstensfiller, L = LTH, MB = Master Builders, N = normal betong, 2 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct.

Appendix 2 – Metoder

Appendix 2.1 - Provningsmetoder

Appendix 2.2 - Provningsutrustning för inre frost- och saltfrostbeständighet

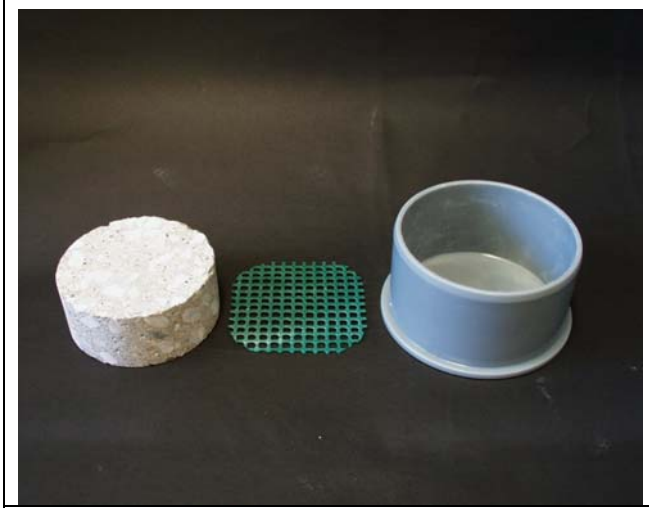
Appendix 2.3 - Provningsutrustning för kloridmigrationskoefficient

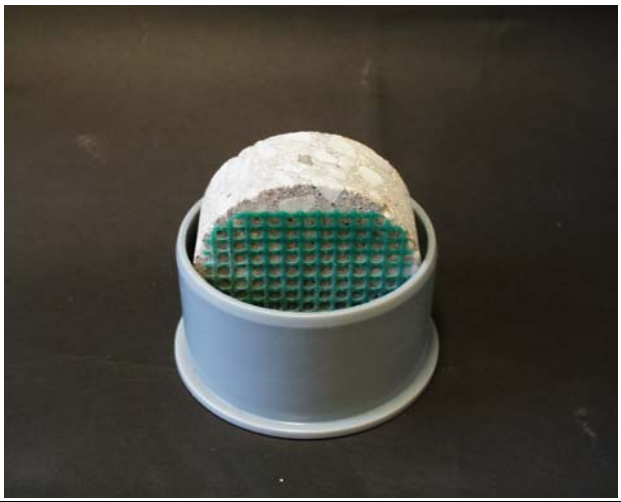
Appendix 2.4 – Provningsutrustning för krympning och krypning vid hög temperatur sulfatbeständighet.

Appendix 2.1 - Provningsmetoder

No	Provning	Metod	Cykler	Provkropp (mm³)	Temperatur	Förlagring	Anm.
1	Inre frostbeständighet	ASTM C666-92 (modifierad)	300	Ø100x50	± 20 °C/2 ggr dygn	RF = 60%	3 identiska prover
2	Kloridmigrations-koefficient	NT BUILD 492		Ø100x50		RF = 60%, RF = 90%	3 identiska prover
3	Krympning	TVBM-7179		Ø100x200	< 800 °C	RF = 60%, RF = 90%	Hög temperatur
4	Krypning	LTH TVBM-3110		Ø100x200	< 800 °C	RF = 60%, RF = 90%	Hög temperatur
5	Saltfrostbeständighet	LTH (modifierad)	112	Ø100x50	± 20 °C/2 ggr dygn	RF = 60%	3 identiska prover
6	Spjälkning	TVBM-3110	-	Ø100x200	< 800 °C	RF = 60%, RF = 90%	Prover lika krympning, krypning
7	Sulfatbeständighet	18 g/l natriumsulfat	-	Ø50x150	5 °C		Långtid, 5 år

Appendix 2.2 - Provningsutrustning för inre frost- och saltfrostbeständighet.





Appendix 2.3 - Provningsutrustning för kloridmigrationskoefficient.

Appendix 2.4 – Provningsutrustning för krympning och krypning vid hög temperatur samt sulfatbeständighet.

Appendix 3 – Resultat från provning av inre frostbeständighet

Betong	40LN0	40L00	40LK0	40LK2	42LK2
Provstart 2004-11-04	Normal betong. vct=0.40	Viskositets-medel, vct=0.40	Kalkstens-filler, vct=0.40	Kalkstens filler. ppf. vct=0.40	Kalkstens filler. ppf. vct=0.42
Densitet 1 (kg/m³)	2188	2358	2378	2410	2333
Densitet 2 (kg/m³)	2172	2368	2387	2413	2315
Densitet 3 (kg/m³)	2163	2341	2369	2388	2295
Densitet, medelvärde (kg/m³)	2174	2356	2378	2404	2314
Vikt 1 (g)	880.1	948.2	956.6	969.4	938.3
Vikt 2 (g)	873.4	952.5	960.1	970.6	931.1
Vikt 3 (g)	870.1	941.5	952.7	960.4	923.1
Vikt Medelvärde (g)	874.5	947.4	956.5	966.8	930.8
Egenfrekvens 1 (Hz)	13000	14500	14800	14600	14200
Egenfrekvens 2 (Hz)	13000	14400	14500	14400	14200
Egenfrekvens 3 (Hz)	13000	14400	14500	14400	14200
100 cykler - 2004-12-24					
Vikt 1 (g)	880.8	943.3	954.8	969.0	939.1
Vikt 2 (g)	874.7	946.6	944.9	970.0	928.3
Vikt 3 (g)	872.1	938.4	932.6	959.7	921.3
Vikt Medelvärde (g)	875.9	942.8	944.1	966.2	929.6
Egenfrekvens 1 (Hz)	13200	13700	14800	12400	1880
Egenfrekvens 2 (Hz)	13200	13700	14700	13100	12800
Egenfrekvens 3 (Hz)	13100	14100	14500	13400	10100
300 cykler - 2005-04-01					
Vikt 1 (g)	882.24	938.36	947.1	958.67	904.74
Vikt 2 (g)	873.84	943.75	935.67	951.63	898.31
Vikt 3 (g)	871.74	997.75	925.26	946.67	924
Vikt Medelvärde (g)	875.9	960.0	936.0	952.3	909.0
Egenfrekvens 1 (Hz)	13150	10410	14300	1300	1420
Egenfrekvens 2 (Hz)	13100	12600	13800	1670	4980
Egenfrekvens 3 (Hz)	13000	13800	14200	1610	12100
Relativ vikt (%)					
100 cykler	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00
300 cykler					
E-modul start (GPa):					
1	30.2	40.5	42.6	42.0	38.4
2	30.0	40.1	41.0	40.9	38.2
3	29.9	39.7	40.7	40.5	37.8
Medelvärde	30.0	40.1	41.4	41.1	38.1
E-modul 100 c. (GPa):					
1	31.2	36.0	42.5	30.3	0.7
2	31.0	36.1	41.5	33.8	30.9
3	30.4	37.9	39.8	35.0	19.1
Medelvärde	30.9	36.7	41.3	33.0	16.9
E-modul 300 c. (GPa):					
1	31.0	20.7	39.4	0.3	0.4
2	30.5	30.4	36.2	0.5	4.5
3	29.9	38.6	37.9	0.5	27.5
Medelvärde	30.5	29.9	37.8	0.5	10.8

Appendix 4 – Resultat av provning av kloridinträngning

Betong/RF	U	Te	L	xd	t	D	U	Te	L	xd	t	D	U	Te	L	xd	t	D
40LN0-60%	30	21,7	51	15,3	24	7,03	30	21,7	50,0	15	24	6,75	30	21,7	51	15,5	24	7,12
40LN0-90%	30	21,7	51	18,7	24	8,72	30	21,7	51,0	15,7	24	7,22	30	21,7	51	16	24	7,37
40L00-60%	30	22,4	49	15,2	24	6,74	30	22,4	50,0	16	24	7,26	35	22,4	49	17,4	24	6,69
40L00-90%	30	21,7	50	18,7	24	8,56	30	21,8	50,0	15,7	24	7,1	30	21,7	50	16	24	7,24
40LK0-60%	30	22,5	50	12,4	24	5,50	30	22,5	50,0	13,4	24	5,99	30	22,5	50	14,2	24	6,38
40LK0-90%	30	21,8	50	12	24	5,30	30	21,8	51,0	16,4	24	7,58	30	21,8	49	14,7	24	6,49
40LK2-60%	35	22	50	12,3	24	4,69	35	22	50	11,9	24	4,52	35	22	50	11,7	24	4,44
40LK2-90%	30	21,4	51	15,1	24	6,92	30	21,4	52,0	14,6	24	6,79	30	21,4	51	16,1	24	7,42
42LK2-60%	35	22,9	49	15,3	24	5,84	35	22,9	49	15	24	5,72	35	22,9	49	14,6	24	5,55
42LK2-90%	35	20,4	50	17,8	24	6,94	35	20,4	52,0	20,2	24	8,24	35	20,4	50	15,6	24	6,03

Beteckningar på betong: K = kalkstensfiller, L = LTH, MB = Master Builders, N = normal betong, 2 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct; övriga beteckningar: t betecknar provtid (h), x_d betecknar medelmigrationsdjup för klorider (mm), D betecknar diffusionskoefficienten för Kloridmigrationskoefficient, x10 $^{-12}$ m²/s, L betecknar provtjocklek (mm), T betecknar medeltemperaturen i lösningen (°C), U betecknar pålagd spänning (V).

Appendix 5 - Uppmätt temperaturutvidgningskoefficient (‰/°C).

Betong	40LN0	40L00	40LK0	40LK2	42LK2	Med ppf	Utan ppf
Starttemperatur 20 °C	0.026		0.025	0.014		0.014	0.025
225 °C	0.023	0.024	0.039	0.020	0.024	0.022	0.029

ppf = polypropylenfibrer, K = kalkstensfiller, L = LTH, M.v. = medelvärde. N = normal betong, 2 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct.

Appendix 6 – Hårdnade egenskaper och påkänning vid krypförsök

Betong	40LN0	40L00	40LK0	40LK2	42LK2

Ålder 3 mån:

Cylinderhållfasthet, fc (RF=90%,MPa)	37	54	63	55	55
Beräknad elasticitetsmodul, ACI (GPa)	28.6	34.5	37.3	34.9	34.9
Beräknad specifik elastisk deformation (miljondelar)	35.0	29.0	26.8	28.7	28.7
Fuktkvot (RF=90%,%)	5.6	5.6	5.5	5.4	5.4

Ålder 10 mån:

Cylinderhållfasthet (RF=60%,MPa)	40	58	70	70	65
Beräknad elasticitetsmodul, ACI (GPa)	29.7	35.7	39.2	39.4	37.7
Beräknad specifik elastisk deformation (miljondelar)	33.6	28.0	25.5	25.4	26.5
Fuktkvot (RF=60%,%)				3.1	
Cylinderhållfasthet (RF=90%,MPa)	41	61	72	74	68
Beräknad elasticitetsmodul, ACI (GPa)	30.1	36.8	39.9	40.3	38.7
Beräknad specifik elastisk deformation (miljondelar)	33.2	27.2	25.1	24.8	25.9
Fuktkvot (RF=90%,%)	5.3	5.6	5.3	5.0	
Uttorkning från ålder 3 mån- ålder 10 mån, (%)	0.3	0.0	0.2	0.4	

Tryckkraft (kN):

0·fc	4	4	4	4	4
0.15·fc	44	64	74	65	65
0.30·fc	87	127	148	130	130

Tryckpåkänning (MPa):

0·fc	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
0.15·fc	5.61	8.15	9.43	8.28	8.28
0.30·fc	11.1	16.2	18.9	16.6	16.6

RF= 60% (σ/fc):

0·fc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.15·fc	0.14	0.14	0.14	0.12	0.13
0.30·fc	0.28	0.28	0.27	0.24	0.26

RF= 90% (σ/fc):

0·fc	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.15·fc	0.14	0.13	0.13	0.11	0.12
0.30·fc	0.27	0.26	0.26	0.23	0.24

fc = cylinderhållfasthet, K = kalkstensfiller, L = LTH, N = normal betong, 2 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct.

Appendix 7 – Saltfrostbeständighet

Appendix 7.1 – Tidigare provade brobetonger, sammansättning (kg/m³) och egenskaper [25].

Appendix 7.2 – Resultat av saltfrostbeständighet

Appendix 7.3 – Beräkning av saltfrostbeständighet

Appendix 7.1 – Tidigare provade brobetonger, sammansättning (kg/m³) och egenskaper [25].

Beteckning	KN	KOB	KN8	KO	KOT	SO	RO	ROII
Makadam Bålsta 8-16	363	371	355	367	363	402	862	876
Naturlig sand Bålsta 0-8	853	872	836	864	855	786	715	727
Naturlig sand SÄRÖ 0-2	316	135	309	320	316	422	146	149
Kaklstensfiller	183	375	180	186	184	94[1)]	0	
Cement Degerhamn	418	427	409	423	419	416	431	438
Luftporbildare (Microair)	585	213	1203	106	117	125	474	482
Flytmedel (Glenium 51)	2.97	4.13	3.2	3.39	3.69	2.99	7.32	5.92
Vatten	163	167	160	165	163	162	168	171
Vct	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
Lufthalt (%)	5.6	4.9	8	5.5	6.3	5.6	5.8	6.1
28-dygns hållfasthet (MPa)	63	84	50	75	75	61	68	63
(Flyt)sättmått (mm)	720	780	735	620	640	710	110	150
T500 (s)	5	7	8	10	8	5	-	-
Densitet	2297	2348	2250	2323	2300	2285	2325	2368
Aggregatinnehåll	0.64	0.65	0.63	0.65	0.65	0.64	0.65	0.66

Beteckningar:

B = ökad fillermängd
K = Limus 40 (kristallint kalkstensmjöl)
N = ny blandningsordning (filler sist)
O = ordinarie blandningsordning (filler först)
R = referens (normal betong)
S = Limus 15 (sedimintärt kalkstensmjöl)
T = 5.5 m hydrostatiskt tryck i stället för 0.23 m
8 = 8% lufthalt.

Appendix 7.2 – Resultat av saltfrostbeständighet

No	3	4	5	6	7
Betong	40LN0	40L00	40LK0	40LK2	42LK2
Start					
Densitet 1 (kg/m³)	2130	2265	2307	2301	2318
Densitet 2 (kg/m³)	2130	2313	2316	2319	2301
Densitet 3 (kg/m³)	2131	2267	2291	2337	2282
Densitet m.v. (kg/m³)	2131	2282	2305	2319	2300
Vikt 1 (g)	880,5	936,2	953,5	951,1	958,3
Vikt 2 (g)	880,6	956,1	957,4	958,6	951,2
Vikt 3 (g)	881,1	937,3	947	966	943,2
Vikt m.v. (g)	881	943	953	959	951
Egenfrekvens 1 (Hz)	13600	13900	14500	14500	14200
Egenfrekvens 2 (Hz)	13200	14300	14600	14700	14500
Egenfrekvens 3 (Hz)	13300	14000	14500	14700	14300
28 cykler					
Vikt 1 (g)	877,1	909,6	927,1	947,3	945
Vikt 2 (g)	876,8	930,4	937,6	952,3	931
Vikt 3 (g)	878,2	904,8	929,3	959,9	939
Vikt m.v. (g)	877	915	931	953	938
Egenfrekvens 1 (Hz)	13300	13900	14500	13800	13700
Egenfrekvens 2 (Hz)	13100	14300	14700	13900	12850
Egenfrekvens 3 (Hz)	13200	14000	14600	13900	11650
56 cykler					
Vikt 1 (g)	867,5	884,2	901	919,4	875,2
Vikt 2 (g)	864,8	907,2	911,6	926,3	880,4
Vikt 3 (g)	869,9	871,1	896,2	938,1	906,4
Vikt m.v. (g)	867	888	903	928	887
Egenfrekvens 1 (Hz)	13400	14200	14600	9800	1610
Egenfrekvens 2 (Hz)	13100	14400	13500	12100	1710
Egenfrekvens 3 (Hz)	13300	10800	14700	14400	1810
112 cykler					
Vikt 1 (g)	861,4	841,4	853,1	885,8	834,5
Vikt 2 (g)	859	855,3	851,8	900,7	831,5
Vikt 3 (g)	862,3	827,5	828,8	910	845,7
Vikt m.v. (g)	861	841	845	899	837
Egenfrekvens 1 (Hz)	13400				
Egenfrekvens 2 (Hz)	13200				
Egenfrekvens 3 (Hz)	13200				

K = kalkstensfiller, L = LTH, MB = Master Builders, N = normal betong, 2 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct.

Appendix 7.3 – Beräkning av saltfrostbeständighet

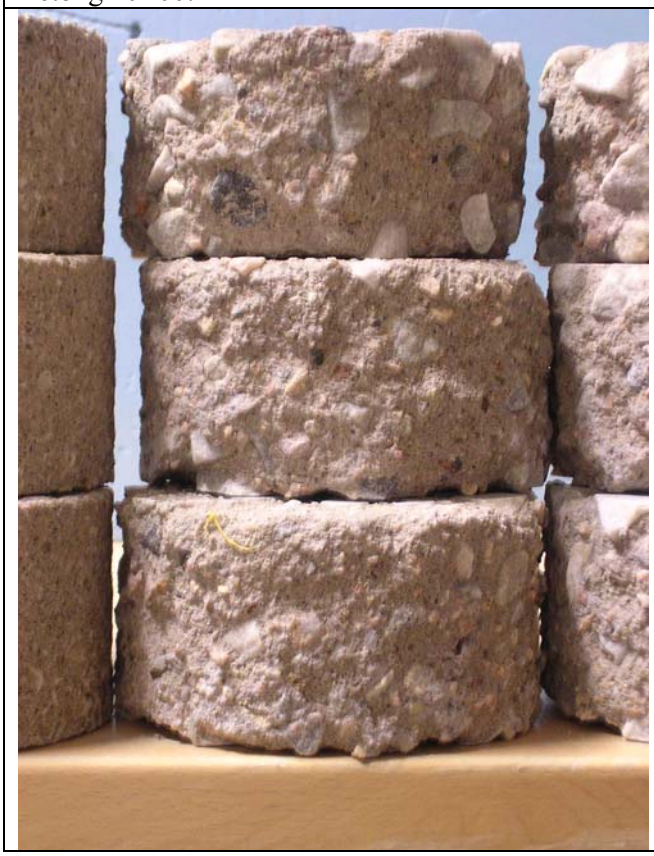
Betong	40LN0	40L00	40LK0	40LK2	42LK2
28 cykler (kg/m²)	0.07	0.60	0.45	0.11	0.27
56 cykler (kg/m²)	0.28	1.18	1.05	0.65	1.35
112 cykler (kg/m²)	0.42	2.16	2.29	1.27	2.41
E-modul start (GPa):					
1	33.1	36.8	40.7	40.6	39.3
2	31.2	39.7	41.5	42.1	40.6
3	31.7	37.3	40.5	42.4	39.2
M.v.	32	38	41	42	40
E-modul 28 c. (GPa):					
1	31.5	35.7	39.6	36.7	36.0
2	30.6	38.7	41.2	37.4	31.2
3	31.1	36.0	40.3	37.7	25.9
M.v.	31	37	40	37	31
E-modul 56 c. (GPa):					
1	31.7	36.2	39.0	17.9	0.5
2	30.2	38.2	33.8	27.6	0.5
3	31.3	20.6	39.4	39.5	0.6
M.v.	31	32	37	28	1
E-modul 112 c. (GPa):					
1	31.4				
2	30.4				
3	30.5				
M.v.	31				
Rel. E-modul 28 c. (%)	0.97	0.97	0.99	0.89	0.78
Rel. E-modul 56 c. (%)	0.97	0.84	0.91	0.68	0.01
Rel. E-modul 112 c. (%)	0.96				

fc = cylinderhållfasthet, K = kalkstensfiller, L = LTH, MB = Master Builders, N = normal betong, 2 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct.

Appendix 7.3 –Saltfrostavskalning efter 112 cykler

Översikt:	Betong 40LN0:
Betong 40L00:	Betong 40LK0:
Betong 40LK2:	Betong 42LK2:

Appendix 7.4 –Saltfrostavskalning efter 112 cykler

Översikt:	Betong 40LN0:
Betong 40L00:	Betong 40LK0:
	

Betong 40LK2:		Betong 42LK2:

Appendix 8 – Spjälkning

Appendix 8.1 - RILEM Technical Committee. Durability of SCC Fire Resistance, Coordinator: Bertil Persson, Explosive Spalling, Data Base [5-8,15,18,29,45-47,54-56].

Appendix 8.2 – Katastrofala tunnelbränder [45].

Appendix 8.3 – Uppmätt ugnstemperatur vid explosion av prover (°C)

Appendix 8.4 – Beräknad/uppmätt betongtemperatur vid explosion av prov (°C)

Symboler		Sort
ppf, sf	Polypropopylene fibres, steel fibre	kg/m³
cf, gf, mf	Carbon, glass or metal fabric mesh	
..A..	Anläggningscement CEM I 42.5 BV/SR/LA	
..B..	Byggcement CEM II/A -L 42.5 R Skövde	
Cl	Climate chamber in the air	
CE	Cover layer exploded	
Dry	Drying in the air	
DE	Deep explosion	
…G.	Glass filler	
Ex	Explosive spalling type	
Fl	Flexural bending towards fire	
He	Heated drying	
HP	High-Performance Concrete	
IN	Intact	
…K.	Limestone filler	
Mc.	Moisture content	%
NC	Normal concrete	
No	Number of equal tested specimens	
Pl	Plain	
PRC	Prestresssed reinforced	
R	Reinforced	
Rate	Temperature increase rate	°C/h
Rel.	Relative weigth after heating	%
Reinf.	Reinforcement	mm
RH	Relative humidity	%
Seal	Sealed curing	
Sp.	Spalling depth, maximum	mm
St	Starting temperature	°C
SC	Self-Compacting Concrete	
TE	Totally exploded	
Wa	Water curing	
σ,σ/fc	Stress,stress level of cylinder strength	MPa, -

Appendix 8.1a - RILEM TC DSC Fire Resistance, Coordinator: Bertil Persson, Explosive Spalling, Data Base.

Data	Type	Reinf.	ppf (sf)	w/c	w/p	Age	Air	Cur,	Mc,	No	RH	Size	Ex	St,	σ	fccyl	σ/fc	Rate	Rel,	Sp,	Ref.
Littera		mm;c/c	µm;kg/m³			d	%		%		%	m³		°C	MPa	MPa		°C/min. -	%	mm	
22HPC	PlHPC			0.22	0.20	400	3.2	Wa	5.0	1		Ø0.1x0.2	TE	20	39.0	98	0.40	10			55.
22HPC	PlHPC		100;1.5	0.22	0.20	400	3.2	Wa	5.0	1		Ø0.1x0.2	IN	20	39.0	98	0.40	10			55.
33H00	PlSC			0.33	0.33	360	3	Cl	2.7	1	30	Ø0.1x0.2	TE	225	0.5	50	0.01	15	0		29.
33H00	PlSC			0.33	0.33	360	3	Cl	2.7	1	30	Ø0.1x0.2	TE	225	18.0	60	0.30	15	0		29.
33H00	PlSC			0.33	0.33	300	3	Cl	3.1	1	60	Ø0.1x0.2	TE	225	9.0	60	0.15	15	0		29.
33H00	PlSC			0.33	0.33	300	3	Cl	3.1	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	18.0	60	0.30	15	90		29.
33H00	PlSC			0.33	0.33	300	3	Cl	3.1	1	60	Ø0.1x0.2	TE	225	27.0	60	0.45	15	0		29.
33H01	PlSC		18;0.7	0.33	0.33	300	3	Cl	3.6	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	9.0	60	0.15	15	90		29.
33H01	PlSC		18;0.7	0.33	0.33	300	3	Cl	3.6	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	18.0	60	0.30	15	90		29.
33H01	PlSC		18;0.7	0.33	0.33	300	3	Cl	3.6	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	27.0	60	0.45	15	90		29.
33H01	PlSC		18;0.7	0.33	0.33	390	3	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	0.5	50	0.01	15	90		29.
33H01	PlSC		18;0.7	0.33	0.33	390	3	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	18.0	60	0.30	15	90		29.
33I	PlHPC			0.33	0.29	127	1.7	Cl	4.2	1		Ø0.15x0.3	TE	20	30.0	75	0.40	Fire cond.			18.
33I	PlHPC		?;4	0.33	0.29	133	1	Cl	4.4	1		Ø0.15x0.3	IN	20	30.0	75	0.40	Fire cond.			18.
33I	RHPC			0.33	0.29	127	1.7	Cl		1	50	0.25x0.25x1	CE	18	30.0	75	0.40	Fire cond.			18.
33I	RHPC		?;4	0.33	0.29	133	1	Cl		1	50	0.25x0.25x1	IN	18	30.0	75	0.40	Fire cond.			18.
35F	RHPC			0.35	0.29	53	1.8	Seal		1		0.4x0.5x5.6	CE		8.0	20	0.40	Fire cond.			18.
35F	RHPC		?;5.4	0.35	0.29	53	1.8	Seal		1		0.4x0.5x5.6	IN		12.0	30	0.40	Fire cond.			18.
40AG0	PRSC	8Ø12.6/40		0.40	0.31	170	5	Wa	7.4	3	89	0.2x0.2x2	CE	20	17.9	72	0.25	ISO834	82		5-8.,15.,56.
40AK0	PRSC	8Ø12.6/40		0.40	0.29	170	5.1	Wa	5.3	3	89	0.2x0.2x2	CE	20	17.9	81	0.22	ISO834	68		5-8.,15.,56.
40AK2	PRSC	8Ø12.6/40	32;2	0.40	0.28	170	2.5	Wa	5.2	3		0.2x0.2x2	CE	20	17.9	78	0.23	ISO834	88		5-8.,15.,56.
40AK4	PRSC	8Ø12.6/40	32;4	0.40	0.30	170	2.8	Wa	5.7	3		0.2x0.2x2	IN	20	17.9	75	0.24	ISO834	94		5-8.,15.,56.
40AR0	PRSC	8Ø12.6/40		0.40	0.40	170	4	Wa	~5.9	3	93	0.2x0.2x2	IN	20	17.9	69	0.26	ISO834	93		5-8.,15.,56.
40BR0	PRNC	8Ø12.6/40		0.40	0.40	170	-	Cl	3.4	3	73	0.2x0.2x2	IN	20	17.9	72	0.25	ISO834	95		5-8.,15.,56.
40BK0	PRSC	8Ø12.6/40		0.40	0.28	170	-	Cl	4.1	3	77	0.2x0.2x2	CE	20	17.9	66	0.27	ISO834	76		5-8.,15.,56.
42V00	PlSC			0.42	0.42	420	5	Cl	2.7	1	30	Ø0.1x0.2	TE	225	0.5	50	0.01	15	0		29.
42V00	PlSC			0.42	0.42	420	5	Cl	2.7	1	30	Ø0.1x0.2	TE	225	12.0	40	0.30	15	0		29.
42V00	PlSC			0.42	0.42	360	5	Cl	3.8	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	0.5	50	0.01	15	90		29.
42V00	PlSC			0.42	0.42	360	5	Cl	3.8	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	6.0	40	0.15	15	90		29.
42V00	PlSC			0.42	0.42	360	5	Cl	3.8	1	60	Ø0.1x0.2	TE	225	12.0	40	0.30	15	0		29.

Appendix 8.1b - RILEM TC DSC Fire Resistance, Coordinator: Bertil Persson, Explosive Spalling, Data Base.

Data	Type	Reinf.	ppf (sf)	w/c	w/p	Age	Air	Cur,	Mc,	No	RH	Size	Ex	St,	σ	fccyl	σ/fc	Rate	Rel,	Sp,	Ref.
Littera		mm;c/c	µm;kg/m³			d	%		%		%	m³		°C	MPa	MPa		°C/min. -	%	mm	
42V00	PlSC			0.42	0.42	360	5	Cl	3.8	1	60	Ø0.1x0.2	TE	225	18.0	40	0.45	15	0		2.
42V01	PlSC		18;0.7	0.42	0.42	360	5	Cl	3.0	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	6.0	40	0.15	15	90		2.
42V01	PlSC		18;0.7	0.42	0.42	360	5	Cl	3.0	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	12.0	40	0.30	15	90		2.
42V01	PlSC		18;0.7	0.42	0.42	360	5	Cl	3.0	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	18.0	40	0.45	15	90		2.
42V01	PlSC		18;0.7	0.42	0.42	450	5	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	0.5	50	0.01	15	90		2.
42V01	PlSC		18;0.7	0.42	0.42	450	5	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	12.0	40	0.30	15	90		2.
48FK0	PlSC			0.48	0.46	420	2	Cl	3.7	1	30	Ø0.1x0.2	TE	225	0.5	50	0.01	15	0		2.
48FK0	PlSC			0.48	0.46	420	2	Cl	3.7	1	30	Ø0.1x0.2	TE	225	15.0	50	0.30	15	0		2.
48FK0	PlSC			0.48	0.46	360	2	Cl	3.7	1	60	Ø0.1x0.2	TE	225	7.5	50	0.15	15	0		2.
48FK0	PlSC			0.48	0.46	360	2	Cl	3.7	1	60	Ø0.1x0.2	TE	225	15.0	50	0.30	15	0		2.
48FK0	PlSC			0.48	0.46	360	2	Cl	3.7	1	60	Ø0.1x0.2	TE	225	22.5	50	0.45	15	0		2.
48FK1	PlSC		18;0.7	0.48	0.46	360	2	Cl	3.1	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	7.5	50	0.15	15	90		2.
48FK1	PlSC		18;0.7	0.48	0.46	360	2	Cl	3.1	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	15.0	50	0.30	15	90		2.
48FK1	PlSC		18;0.7	0.48	0.46	360	2	Cl	3.1	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	22.5	50	0.45	15	90		2.
48FK1	PlSC		18;0.7	0.48	0.46	450	2	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	0.5	50	0.01	15	90		2.
48FK1	PlSC		18;0.7	0.48	0.46	450	2	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	15.0	50	0.30	15	90		2.
48FK2	PlSC		18;1.4	0.48	0.46	450	2	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	0.5	50	0.01	15	90		2.
48FK2	PlSC		18;1.4	0.48	0.46	450	2	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	15.0	50	0.30	15	90		2.
48FK2	PlSC		18;1.4	0.48	0.46	450	2	Cl	4.1	1	90	Ø0.1x0.2	IN	225	22.5	50	0.45	15	90		2.
55BK0	PRSC	8Ø12.6/40		0.55	0.30	320	1.3	Cl	~3.6	3		0.2x0.2x2	CE	20	14.6	61	0.24	ISO834	73		5-8.,15.,56.
55BK2	PRSC	8Ø12.6/40	32;2	0.55	0.30	320	1.1	Cl	~3.6	3		0.2x0.2x2	CE	20	14.6	56	0.26	ISO834	85		5-8.,15.,56.
55BK4	PRSC	8Ø12.6/40	32;4	0.55	0.30	160	-	Cl	~3.6	3		0.2x0.2x2	CE	20	12.5	60	0.21	ISO834	86		5-8.,15.,56.
55BR0	PRNC	8Ø12.6/40		0.55	0.55	320	1.5	Cl	~3.6	3		0.2x0.2x2	CE	20	14.6	56	0.26	ISO834	86		5-8.,15.,56.
70BG0	PRSC	8Ø12.6/40		0.70	0.56	170	1.7	Cl	3.9	3	77	0.2x0.2x2	CE	20	12.5	43	0.29	ISO834	87		5-8.,15.,56.
70BK0	PRSC	8Ø12.6/40		0.70	0.40	170	2.6	Cl	2.9	3	76	0.2x0.2x2	CE	20	12.5	50	0.25	ISO834	82		5-8.,15.,56.
70BK2	PRSC	8Ø12.6/40	32;2	0.70	0.40	160	-	Cl	~3.6	3		0.2x0.2x2	IN	20	12.5	36	0.35	ISO834	97		5-8.,15.,56.
70BK4	PRSC	8Ø12.6/40	32;4	0.70	0.30	160	-	Cl	~3.6	3		0.2x0.2x2	CE	20	12.5	48	0.26	ISO834	86		5-8.,15.,56.
70BR0	PRNC	8Ø12.6/40		0.70	0.70	170	5	Cl	~3.6	3	77	0.2x0.2x2	IN	20	12.5	37	0.34	ISO834	92		5-8.,15.,56.

Appendix 8.1c - RILEM TC DSC Fire Resistance, Coordinator: Bertil Persson, Explosive Spalling, Data Base.

Data	Type	Reinf.	ppf (sf)	w/c	w/p	Age	Air	Cur,	Mc,	No	RH	Size	Ex	St,	σ	fccyl	σ/fc	Rate	Rel,	Sp,	Ref.
Littera		mm;c/c	µm;kg/m³			d	%		%		%	m³		°C	MPa	MPa		°C/min. -	%	mm	
5	PRNC	#Ø14/100		0.63	0.52	60	6.3	He	4.7	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	46	0.03	RWS120	79	200	45.
6	PRNC	#Ø14/100		0.63	0.52	60	6.3	He	4.7	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	38	0.03	RWS120	69	360	45.
7	PRNC	#Ø14/100	18;1.5	0.64	0.52	45	6.3	Wa	5.2	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	9.0	38	0.24	RWS120	95	20	45.
8	PRNC	#Ø14/100	18;1.5	0.64	0.52	100	6.3	Wa	5.2	1		1.4x1.8x0.5	CE	20	9.0	38	0.24	RWS120	87	80	45.
9	PRNC	#Ø14/100	18;1.5 (32)	0.64	0.52	45	6.9	Wa	5.2	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	9.0	38	0.24	RWS120	95	20	45.
10	PRNC	#Ø14/100	18;1.5 (32)	0.64	0.52	60	6.9	Wa	5.2	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	9.0	38	0.24	RWS120	96	20	45.
11	PRNC	#Ø14/100		0.63	0.52	30	~4.5	Wa	5.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	9.0	38	0.24	RWS120	70	330	45.
12	PRNC	#Ø14/100		0.63	0.52	30	~4.5	Wa	5.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	9.0	38	0.24	RWS120	73	270	45.
13	RNC	#Ø14/100		0.64	0.52	100	4.7	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	-1.0	47	-0.02	RWS120	77	220	45.
14	RNC	#Ø14/100		0.64	0.52	100	4.7	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	-1.0	47	-0.02	RWS120	73	320	45.
15	RNC	#Ø14/100	18;1.5	0.64	0.52	75	~4.5	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	CE	20	-1.0	47	-0.02	RWS120	93	50	45.
16	RNC	#Ø14/100	18;1.5	0.64	0.52	80	~4.5	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	-1.0	47	-0.02	RWS120	96	20	45.
17	PRNC	#Ø14/100	18;3.0	0.64	0.52	80	~4.5	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	9.0	47	0.19	RWS120	96	10	45.
18	PRNC	#Ø14/100	18;3.0	0.64	0.52	90	~4.5	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	9.0	47	0.19	RWS120	96	20	45.
19	PRNC	Ø(14+20)/100		0.50	0.50	100	3.0	Dry	3.3	1		1.4x1.8x0.3	DE	20	1.2	56	0.02	ISO834	73	180	45.
20	PRNC	Ø(14+20)/100		0.50	0.50	100	3.0	Dry	3.3	1		1.4x1.8x0.3	DE	20	1.2	56	0.02	ISO834	68	190	45.
21	PRNC	Ø(14+20)/100		0.36	0.34	110	6.9	Dry	3.3	1		1.4x1.8x0.3	DE	20	9.0	65	0.14	RWS120	70	220	45.
22	PRNC	Ø(14+20)/100		0.36	0.34	110	6.9	Dry	3.3	1		1.4x1.8x0.3	DE	20	9.0	65	0.14	RWS120	68	230	45.
23	PRNC	Ø(14+20)/100	18;3.0	0.36	0.34	120	~4.5	Dry	3.3	1		1.4x1.8x0.3	IN	20	9.0	65	0.14	RWS120	92	20	45.
24	PRNC	Ø(14+20)/100	18;3.0	0.36	0.34	120	~4.5	Dry	3.3	1		1.4x1.8x0.3	IN	20	9.0	65	0.14	RWS120	91	30	45.
25	PRNC	Ø(14+20)/100	18;1.5	0.63	0.51	130	6.4	Dry	3.2	1		1.4x1.8x0.3	IN	20	1.2	33	0.04	ISO834	94	20	45.
26	PRNC	Ø(14+20)/100	18;1.5	0.63	0.51	130	6.4	Dry	3.2	1		1.4x1.8x0.3	IN	20	1.2	33	0.04	ISO834	93	20	45.
29	RNC	#Ø14/100		0.60	0.49	110	3.5	He	4.3	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	-1.0	52	-0.02	LTI180	75	240	45.
30	RNC	#Ø14/100		0.60	0.49	110	3.5	He	4.3	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	-1.0	52	-0.02	LTI180	78	240	45.
31	RNC	#Ø14/100	18;1.5	0.60	0.49	120	3.5	He	4.3	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	-1.0	52	-0.02	LTI180	95	30	45.
32	RNC	#Ø14/100	18;1.5	0.60	0.49	120	3.5	He	4.3	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	-1.0	52	-0.02	LTI180	95	30	45.
33	PlNC			0.51	0.51	130	2.6	He	4.7	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	52	0.02	LTI180	65	280	45.
34	PlNC			0.51	0.51	130	2.6	He	4.7	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	52	0.02	LTI180	62	300	45.
35	PlNC		18;1.5	0.51	0.51	130	2.8	He	4.7	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	1.2	52	0.02	LTI180	95	30	45.
36	PlNC		18;1.5	0.51	0.51	130	2.8	He	4.7	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	1.2	52	0.02	LTI180	97	20	45.
43	PRNC	#Ø14/100		0.66	0.66	75	4.8	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	36	0.03	RWS120	78	290	45.
44	PRNC	#Ø14/100		0.66	0.66	80	4.8	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	CE	20	1.2	36	0.03	RWS120	91	70	45.

Appendix 8.1d - RILEM TC DSC Fire Resistance, Coordinator: Bertil Persson, Explosive Spalling, Data Base.

Data	Type	Reinf.	ppf (sf)	w/c	w/p	Age	Air	Cur,	Mc,	No	RH	Size	Ex	St,	σ	fccyl	σ/fc	Rate	Rel,	Sp,	Ref.
Littera		mm;c/c	µm;kg/m³			d	%		%		%	m³	0	°C	MPa	MPa		°C/min. -	%	mm	
51	PRNC	#Ø14/100	18;1.0	0.51	0.51	350	8.0	Dry	2.0	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	1.2	32	0.04	RWS180	92	35	45.
52	PRNC	#Ø14/100		0.51	0.51	360	5.8	Dry	3.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	32	0.04	RWS180	75	180	45.
54	RNC	2xØ(14+26)/100		?	?	60	6.0	Dry	~3.2	1		1.4x1.8x0.5	CE	20	0.0	32	0.00	RWS180	91	70	45.
55	RNC	2xØ(14+26)/100		?	?	60	6.0	Dry	~3.2	1		1.4x1.8x0.5	CE	20	0.0	32	0.00	RWS180	95	60	45.
58	PRNC	4xØ(14+26)/100		?	?	75	~4.5	Dry	~3.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	37	0.03	LTI180	89	170	45.
59	PRNC	4xØ(14+26)/100		?	?	75	~4.5	Dry	~3.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	37	0.03	LTI180	88	110	45.
61	PRNC	#Ø14/100	Shotcrete (w/c=0.46):			75	7.5	Wa	~5.2	1		1.4x1.8x0.5	DE	20	1.2	37	0.03	LTI180	78	90	45.
62	PRNC	#Ø14/100	18;2.0	?	?	75	7.5	Dry	~3.2	1		1.4x1.8x0.5	IN	20	1.2	37	0.03	LTI180	98	0	45.
40LN0:1	PlNC			0.40	0.40	90	7.8	Cl	5.6	1	90	Ø0.1x0.2	TE	225	0.5	37	0.01	15			Ch. 8.
40LN0:2	PlNC			0.40	0.40	300	7.8	Cl	5.3	1	90	Ø0.1x0.2	TE	20	0.5	41	0.01	15			Ch. 8.
40LN0:3	PlNC			0.40	0.40	300	7.8	Cl	5.3	1	90	Ø0.1x0.2	TE	20	11.1	41	0.27	15			Ch. 8.
40L00:1	PlNC			0.40	0.40	90	3.3	Cl	5.6	1	90	Ø0.1x0.2	TE	225	0.5	54	0.01	15			Ch. 8.
40L00:2	PlNC			0.40	0.40	300	3.3	Cl	5.6	1	90	Ø0.1x0.2	TE	20	16.2	61	0.27	15			Ch. 8.
40LK0:1	PlNC			0.40	0.40	90	7.3	Cl	5.5	1	90	Ø0.1x0.2	TE	225	0.5	63	0.01	15			Ch. 8.
40LK0:2	PlNC			0.40	0.40	300	7.3	Cl	5.3	1	90	Ø0.1x0.2	TE	20	0.5	72	0.01	15			Ch. 8.
40LK0:3	PlNC			0.40	0.40	300	7.3	Cl	5.3	1	90	Ø0.1x0.2	TE	20	9.4	72	0.13	15			Ch. 8.
40LK0:4	PlNC			0.40	0.40	300	7.3	Cl	5.3	1	90	Ø0.1x0.2	TE	20	18.9	72	0.26	15			Ch. 8.
40LK2:1	PlNC		18;1.4	0.40	0.40	90	2.8	Cl	3.1	1	60	Ø0.1x0.2	IN	225	8.3	55	0.15	15			Ch. 8.
40LK2:2	PlNC		18;1.4	0.40	0.40	90	2.8	Cl	5.4	1	90	Ø0.1x0.2	TE	225	0.5	55	0.01	15			Ch. 8.
40LK2:3	PlNC		18;1.4	0.40	0.40	90	2.8	Cl	5.4	1	90	Ø0.1x0.2	TE	225	8.3	55	0.15	15			Ch. 8.
40LK2:4	PlNC		18;1.4	0.40	0.40	300	2.8	Cl	4.9	1	90	Ø0.1x0.2	IN	20	0.5	74	0.01	15			Ch. 8.
40LK2:5	PlNC		18;1.4	0.40	0.40	300	2.8	Cl	4.9	1	90	Ø0.1x0.2	IN	20	8.3	74	0.11	15			Ch. 8.
40LK2:6	PlNC		18;1.4	0.40	0.40	300	2.8	Cl	4.9	1	90	Ø0.1x0.2	IN	20	16.6	74	0.22	15			Ch. 8.
42LK2:1	PlNC		18;1.4	0.43	0.43	90	3.3	Cl	5.4	1	90	Ø0.1x0.2	TE	225	8.3	55	0.15	15			Ch. 8.
42LK2:2	PlNC		18;1.4	0.43	0.43	90	3.3	Cl	5.4	1	90	Ø0.1x0.2	TE	225	16.6	55	0.30	15			Ch. 8.
H1:1-16	PlHPC+	Sf (..)	?;0.6(40)	0.29	0.26	56		Dry		16		0.1x0.1x0.3	IN	20		78	0.00	10			46.
H2:1-13	PlHPC+	Sf (..)	?;0.3(70)	0.29	0.26	56		Dry		13		0.1x0.1x0.3	IN	20		78	0.00	10			46.
H2:14-16	PlHPC+	Sf (..)	?;0.3(70)	0.29	0.26	56		Dry		3		0.1x0.1x0.3	TE	20		78	0.00	10			46.
P1-14	PlHPC		?;1.0	0.29	0.26	56		Dry		14		0.1x0.1x0.3	IN	20		58	0.00	10			46.
P15-16	PlHPC		?;1.0	0.29	0.26	56		Dry		2		0.1x0.1x0.3	TE	20		58	0.00	10			46.
S1-9	PlHPC+	Sf (..)	?;0 (100)	0.29	0.26	56		Dry		9		0.1x0.1x0.3	IN	20		78	0.00	10			46.
S10-16	PlHPC+	Sf (..)	?;0 (100)	0.29	0.26	56		Dry		7		0.1x0.1x0.3	TE	20		78	0.00	10			46.

Appendix 8.1e - RILEM TC DSC Fire Resistance, Coordinator: Bertil Persson, Explosive Spalling, Data Base.

Data	Type	Reinf.	ppf (sf)	w/c	w/p	Age	Air	Cur,	Mc,		RH	Size	Ex	St,	σ	fccyl	σ/fc	Rate	Rel,	Sp,	Ref.
Littera		mm;c/c	µm;kg/m³			d	%		%		%	m³		°C	MPa	MPa		°C/min. -	%	mm	
30-0-pl	PlHPC			0.37	0.30	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	TE	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0-cf1	PlHPC+	Cf		0.37	0.30	28	4.5	Wa		1		Ø0.1x0.2	CE	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0-cf2-3	PlHPC+	Cf		0.37	0.30	28	4.5	Wa		2		Ø0.1x0.2	TE	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0-gf1	PlHPC+	Gf		0.37	0.30	28	4.5	Wa		1		Ø0.1x0.2	CE	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0-gf2-3	PlHPC+	Gf		0.37	0.30	28	4.5	Wa		2		Ø0.1x0.2	TE	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0-mf1-5	PlHPC+	Mf		0.37	0.30	28	4.5	Wa		5		Ø0.1x0.2	CE	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0-mf6	PlHPC+	Mf		0.37	0.30	28	4.5	Wa		1		Ø0.1x0.2	TE	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.5-pl	PlHPC		70;0.5	0.37	0.30	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.5-cf	PlHPC+	Cf	70;0.5	0.37	0.30	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.5-gf	PlHPC+	Gf	70;0.5	0.37	0.30	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.5-mf1-2	PlHPC+	Mf	70;0.5	0.37	0.30	28	4.5	Wa		2		Ø0.1x0.2	CE	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.5-mf3-6	PlHPC+	Mf	70;0.5	0.37	0.30	28	4.5	Wa		4		Ø0.1x0.2	IN	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.9-pl	PlHPC		70;0.9	0.37	0.30	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.9-cf	PlHPC+	Cf	70;0.9	0.37	0.30	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.9-gf	PlHPC+	Gf	70;0.9	0.37	0.30	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		60	0.00	ISO 834			47.
30-0.9-mf	PlHPC+	Mf	70;0.9	0.37	0.30	28	4.5	Wa		6		Ø0.1x0.2	IN	20		60	0.00	ISO 834			47.
40-0-pl	PlHPC			0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	TE	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0-cf	PlHPC+	Cf		0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	TE	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0-gf	PlHPC+	Gf		0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	TE	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0-mf1-5	PlHPC+	Mf		0.50	0.40	28	4.5	Wa		5		Ø0.1x0.2	CE	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0-mf6	PlHPC+	Mf		0.50	0.40	28	4.5	Wa		1		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.5-pl	PlHPC		70;0.5	0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.5-cf	PlHPC+	Cf	70;0.5	0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.5-gf	PlHPC+	Gf	70;0.5	0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.5-mf1	PlHPC+	Mf	70;0.5	0.50	0.40	28	4.5	Wa		1		Ø0.1x0.2	CE	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.5-mf2-6	PlHPC+	Mf	70;0.5	0.50	0.40	28	4.5	Wa		5		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.9-pl	PlHPC		70;0.9	0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.9-cf	PlHPC+	Cf	70;0.9	0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.9-gf	PlHPC+	Gf	70;0.9	0.50	0.40	28	4.5	Wa		3		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.
40-0.9-mf	PlHPC+	Mf	70;0.9	0.50	0.40	28	4.5	Wa		6		Ø0.1x0.2	IN	20		40	0.00	ISO 834			47.

Appendix 8.1f - RILEM TC DSC Fire Resistance, Coordinator: Bertil Persson, Explosive Spalling, Data Base.

Data	Type	Reinf.	ppf (sf)	w/c	w/p	Age	Air	Cur,	Mc,	No	RH	Size	Ex	St,	σ	fccyl	σ/fc	Rate	Rel,	Sp,	Ref.
Littera		mm;c/c	µm;kg/m³			d	%		%		%	m³		°C	MPa	MPa		°C/min. -	%	mm	
LS3001	PRSC			0.40	0.31	81		Dry	4.9	1	50	1.8x1.2x0.2	CE	20	8.8	52	0.17	ISO 834	84	57	54.
LS4001	PRSC			0.52	0.40	81		Dry	5.1	1	50	1.8x1.2x0.2	CE	20	8.8	40	0.22	ISO 834	81	56	54.
LS4011	PRSC		18;1	0.52	0.40	81		Dry	4.8	1	50	1.8x1.2x0.2	IN	20	8.8	39	0.23	ISO 834	100	0	54.
LS5501	PRSC			0.70	0.55	81		Dry	5.2	1	50	1.8x1.2x0.2	CE	20	8.8	24	0.37	ISO 834	85	62	54.
LB4001	FlRSC			0.52	0.40	81		Dry	5.1	1	50	3.6x0.6x0.2	CE	20	7.7	40	0.19	ISO 834	97	21	54.
LB4011	FlRSC		18;1	0.52	0.40	81		Dry	4.8	1	50	3.6x0.6x0.2	IN	20	7.7	39	0.20	ISO 834	100	0	54.
LC3001	PlSC			0.40	0.30			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	0.0	52	0.00	ISO 834	98	0	54.
LC3002	PlSC			0.40	0.30			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	0.0	52	0.00	ISO 834	98	0	54.
LC3003	PlSC			0.40	0.30			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	CE	20	5.3	52	0.10	ISO 834	82		54.
LC3004	PlSC			0.40	0.30			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	CE	20	5.3	52	0.10	ISO 834	81		54.
LC4001	PlSC			0.52	0.40			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	0.0	40	0.00	ISO 834	98		54.
LC4002	PlSC			0.52	0.40			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	0.0	40	0.00	ISO 834	95		54.
LC4003	PlSC			0.52	0.40			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	CE	20	5.3	40	0.13	ISO 834	77		54.
LC4004	PlSC			0.52	0.40			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	CE	20	5.3	40	0.13	ISO 834	79		54.
LC4011	PlSC		18;1	0.52	0.40			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	0.0	39	0.00	ISO 834	98		54.
LC4012	PlSC		18;1	0.52	0.40			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	0.0	39	0.00	ISO 834	98		54.
LC4013	PlSC		18;1	0.52	0.40			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	5.3	39	0.14	ISO 834	100		54.
LC4014	PlSC		18;1	0.52	0.40			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	5.3	39	0.14	ISO 834	100		54.
LC5501	PlSC			0.70	0.55			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	0.0	24	0.00	ISO 834	98		54.
LC5502	PlSC			0.70	0.55			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	IN	20	0.0	24	0.00	ISO 834	96		54.
LC5503	PlSC			0.70	0.55			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	CE	20	5.3	24	0.22	ISO 834	81		54.
LC5504	PlSC			0.70	0.55			Dry		1	50	Ø0.15x0.45	CE	20	5.3	24	0.22	ISO 834	85		54.
SS3001	PlSC			0.40	0.30			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	20	0.0	52	0.00	ISO 834	89	50	54.
SS3002	PlSC			0.40	0.30			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	20	0.0	52	0.00	ISO 834	90	48	54.
SS3003	PlSC			0.40	0.30			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	TE	CE	2.5	52	0.05	ISO 834	81	105	54.
SS3004	PlSC			0.40	0.30			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	TE	CE	2.5	52	0.05	ISO 834	68	186	54.
SS4001	PlSC			0.52	0.40			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	20	0.0	40	0.00	ISO 834	91	49	54.
SS4002	PlSC			0.52	0.40			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	20	0.0	40	0.00	ISO 834	92	38	54.
SS4003	PlSC			0.52	0.40			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	CE	2.5	40	0.06	ISO 834	72	170	54.
SS4004	PlSC			0.52	0.40			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	CE	2.5	40	0.06	ISO 834	67	193	54.

Appendix 8.1g - RILEM TC DSC Fire Resistance, Coordinator: Bertil Persson, Explosive Spalling, Data Base.

Data	Type	Reinf.	ppf (sf)	w/c	w/p	Age	Air	Cur.	Mc.	No	RH	Size	Ex	St.	σ	fccyl	σ/fc	Rate	Rel.	Sp.	Ref.
Littera		mm;c/c	µm;kg/m³			d	%		%		%	m³		°C	MPa	MPa		°C/min. -	%	mm	
SS4011	PlSC		18;1	0.52	0.40			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	IN	20	0.0	39	0.00	ISO 834	100	0	54.
SS4012	PlSC		18;1	0.52	0.40			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	IN	20	0.0	39	0.00	ISO 834	100	0	54.
SS4013	PlSC		18;1	0.52	0.40			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	IN	20	2.5	39	0.06	ISO 834	100	0	54.
SS4014	PlSC		18;1	0.52	0.40			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	IN	20	2.5	39	0.06	ISO 834	100	0	54.
SS5501	PlSC			0.70	0.55			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	20	0.0	24	0.00	ISO 834	95	30	54.
SS5502	PlSC			0.70	0.55			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	20	0.0	24	0.00	ISO 834	95	34	54.
SS5503	PlSC			0.70	0.55			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	20	2.5	24	0.10	ISO 834	73	132	54.
SS5504	PlSC			0.70	0.55			Dry		1	50	0.6x0.5x0.2	CE	20	2.5	24	0.10	ISO 834	74	132	54.
A1	PRC			0.38	0.38	97		Wa	3.7	1		1.8x1.2x0.4	CE	20	2.1	77	0.03	Fire cond.	78	273	54.
A2	PRC			0.38	0.38	97		Wa	3.7	1		1.8x1.2x0.4	CE	20	2.1	77	0.03	Fire cond.	73	213	54.
B1	PRC		18;2	0.38	0.38	97		Wa	4.2	1		1.8x1.2x0.4	IN	20	2.1	76	0.03	Fire cond.	96	35	54.
B2	PRC		18;2	0.38	0.38	97		Wa	4.2	1		1.8x1.2x0.4	IN	20	2.1	76	0.03	Fire cond.	98	28	54.
C1	PRC			0.38	0.40	97		Wa	4.0	1		1.8x1.2x0.4	CE	20	2.1	53	0.04	Fire cond.	92	85	54.
C2	PRC			0.38	0.40	97		Wa	4.0	1		1.8x1.2x0.4	CE	20	2.1	53	0.04	Fire cond.	90	78	54.
D1	PRC		18;2	0.38	0.40	97		Wa	4.9	1		1.8x1.2x0.4	IN	20	2.1	63	0.03	Fire cond.	99	3	54.
D2	PRC		18;2	0.38	0.40	97		Wa	4.9	1		1.8x1.2x0.4	IN	20	2.1	63	0.03	Fire cond.	100	2	54.
E1	PRC			0.38	0.31	97		Wa	4.2	1		1.8x1.2x0.4	CE	20	2.1	74	0.03	Fire cond.	76	306	54.
E2	PRC			0.38	0.31	97		Wa	4.2	1		1.8x1.2x0.4	CE	20	2.1	74	0.03	Fire cond.	87	116	54.
F1	PRC		18;2	0.38	0.32	97		Wa	4.8	1		1.8x1.2x0.4	CE	20	2.1	68	0.03	Fire cond.	93	56	54.
F2	PRC		18;2	0.38	0.32	97		Wa	4.8	1		1.8x1.2x0.4	CE	20	2.1	68	0.03	Fire cond.	95	54	54.
A23	PRC			0.38	0.38	97		Wa	3.7	1		0.4x0.4x0.1	CE	20	2.5	77	0.03	ISO 834	87	10	54.
B23	PRC		18;2	0.38	0.38	97		Wa	4.2	1		0.4x0.4x0.1	IN	20	2.5	76	0.03	ISO 834	100	0	54.
C23	PRC			0.38	0.40	97		Wa	4.0	1		0.4x0.4x0.1	CE	20	2.5	53	0.05	ISO 834	91	9	54.
D22	PRC		18;2	0.38	0.40	97		Wa	4.9	1		0.4x0.4x0.1	IN	20	2.5	63	0.04	ISO 834	98	0	54.
D23	PRC		18;2	0.38	0.40	97		Wa	4.9	1		0.4x0.4x0.1	IN	20	2.5	63	0.04	ISO 834	100	0	54.
E22	PRC			0.38	0.31	97		Wa	4.2	1		0.4x0.4x0.1	CE	20	2.5	74	0.03	ISO 834	81	9	54.
E23	PRC			0.38	0.31	97		Wa	4.2	1		0.4x0.4x0.1	CE	20	2.5	74	0.03	ISO 834	86	12	54.
F22	PRC		18;2	0.38	0.32	97		Wa	4.8	1		0.4x0.4x0.1	IN	20	2.5	68	0.04	ISO 834	99	0	54.
F23	PRC		18;2	0.38	0.32	97		Wa	4.8	1		0.4x0.4x0.1	IN	20	2.5	68	0.04	ISO 834	100	0	54.

Appendix 8.2 – Katastrofala tunnelbränder [45]

År	Objekt	Byggmått	Brandbelastning/orsak	Skador på tunnel
1949	Holland Tunnel, USA	Cirkulär gjuten tunnel och ståltunnel, Ø2.7 m, L = 2.7 km	Lastbil med 22 ton svavelkol	180 m svårt skadade väggar och tak, tunnelmellandäck sammanstörtat på 170 m
1969	Moorfleettunneln, Tyskland	En m armerad betong rektangulär, B/H = 13.5 x 5.3 m², L = 243 m	Lastbil med 14 ton polyetengranulat varav ca 1/3-del uppbränt	Svårt skadade väggar och tak, ca 25 m. Spjälkning: ca 400 mm
1984	Summit tunnel, England	Hästskoformat murning, fri vidd 7 m, L = 2.7 km	Godståg med 600 ton bensin	Skadat område ca 60 m, murverk bitvis smält (1250 °C)
1996	Eurotunnel, England - Frankrike	Cirkulär armerad betong, 0.40 m, L 50 km	15 lastbilar med last	Skadat område ca 500 m. Spjälkning: 260 mm:s djup
1999	Mont Blanctunneln, Frankrike - Italien	Arm. btg, ca 0.45 m, rektangulär, B/H = 8.6 x 4.5 m², L = 11.6 km	Lastbil med 12 ton mjöl och 8 ton margarin. 23 lastbilar och 24 personbilar utbrända	Skadat område ca 1500 m. Spjälkning skedde till 150 mm:s djup
1999	Tauerntunneln, Österrike	Cirk. arm. betong, L = 6.4 km	Lacklastad lastbil. . 16 lastbilar och 10 personbilar utbrända	Skadat område ca 400 m
2001	Gotthardtunneln, Schweiz	Cirk. arm. betong, L 16.3 km	Frontalsammanstötning mellan lastblar, 13 lastbilar, 4 skåpbilar och 6 personbilar utbrända	Ca 300 m, 170 m tunnelmellandäck sammanstörtat, spjälkning

Appendix 8.3 – Uppmätt ugnstemperatur vid explosion av prover (°C)

Betong	40LN0	40L00	40LK0	40LK2	42LK2
3 mån. - RF= 60%, 0.15·fc				Intakt vid 710	
3 mån. - RF= 90%, 0·fc	593	544	546	603	618
3 mån. - RF= 90%, 0.15·fc				540	590
10 mån. - RF= 90%, 0·fc	592		584	Intakt vid 460*	
10 mån. - RF= 90%, 0.15·fc			592	Intakt vid 896	
10 mån. - RF= 90%, 0.30·fc	592	600	584	Intakt vid 888	

fc = cylinderhållfasthet, K = kalkstensfiller, L = LTH, N = normal betong, 2 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct,
* jordningsfel på ugn.

Appendix 8.4 – Beräknad/uppmätt betongtemperatur vid explosion av prov (°C)

Betong	40LN0	40L00	40LK0	40LK2	42LK2
3 mån. - RF= 60%, 0.15·fc				Intakt vid 345	
3 mån. - RF= 90%, 0·fc	180	137	138	191	206
3 mån. - RF= 90%, 0.15·fc				144	177
10 mån. - RF= 90%, 0·fc	177		169	Intakt vid 100*	
10 mån. - RF= 90%, 0.15·fc			189	Intakt vid 666	
10 mån. - RF= 90%, 0.30·fc	198	195	182	Intakt vid 675	

fc = cylinderhållfasthet, K = kalkstensfiller, L = LTH, N = normal betong, 2 = 1.4 kg/m³ ppf. 40 = vct,
* jordningsfel på ugn.

Appendix 9 – Sulfatbeständighet

Appendix 9.1 – Sulfatbeständighet, del I

Betong	Sort	Startvärde			90 dygn			450 dygn			900 dygn			1400 dygn	1700 dygn
Test		H2O	H2O-hav	Na2SO4	H2O	H2O-hav	Na2SO4	H2O	H2O-hav	Na2SO4	H2O	H2O-hav	Na2SO4	Na2SO4	Na2SO4
KN 28	(Hz)	6600.0	6820.0	6830.0	6660.0	6880.0	6950.0	6970.0	7170.0	7220.0	7030.0	7190.0	7220.0	7130.0	
längd	(mm)	150.3	149.6	148.6	150.3	149.5	148.7	150.4	149.7	148.9	150.3	149.6	149.0	149.7	
massa	(g)	693.3	693.8	684.9	696.1	696.6	687.1	698.0	701.4	689.8	698.3	701.0	684.4	680.2	609.4
KN 90	(Hz)	6900.0	6850.0	6970.0	7060.0	6870.0	7040.0	7220.0	7110.0	7190.0	7240.0	7030.0	7200.0	7030.0	
	(mm)	149.8	150.5	151.0	149.9	150.7	151.4	149.8	150.6	151.6	149.9	150.5	151.6	151.8	
	(g)	703.2	702.3	701.4	707.5	707.0	704.9	708.5	708.5	708.5	708.6	708.3	700.3	686.7	578.5
KOB 28	(Hz)	6800.0	6780.0	6960.0	6990.0	7000.0	7180.0	7110.0	7140.0	7280.0	7120.0	7160.0	7270.0	7370.0	
	(mm)	151.1	150.9	151.1	151.3	151.3	151.1	151.3	151.3	151.1	151.3	151.1	151.4	151.9	
	(g)	714.4	715.5	722.2	719.7	719.2	726.0	720.5	719.8	727.8	720.8	720.3	727.6	727.0	710.7
KOB 90	(Hz)	6760.0	6990.0	6810.0	6890.0	7150.0	6980.0	6980.0	7210.0	6980.0	6990.0	7240.0	6950.0	6970.0	
	(mm)	151.9	150.4	151.7	152.1	150.1	151.7	152.1	150.3	151.7	151.8	149.9	151.8	152.2	
	(g)	714.2	703.7	717.2	724.2	713.1	721.1	726.4	715.1	722.9	727.2	716.1	724.7	699.6	615.4
KN8 28	(Hz)	6250.0	6420.0	6280.0	6280.0	6450.0	6310.0	6570.0	6800.0	6660.0	6580.0	6790.0	6550.0	6570.0	
	(mm)	151.0	151.0	150.9	150.8	150.9	150.8	151.0	151.2	151.1	151.1	151.2	151.2	151.9	
	(g)	673.1	681.2	677.0	676.1	683.9	678.7	677.2	684.7	681.5	677.4	684.7	672.4	663.8	566.8
KN8 90	(Hz)	6340.0	6380.0	6430.0	6570.0	6560.0	6630.0	6630.0	6630.0	6670.0	6650.0	6670.0	6670.0	6690.0	
	(mm)	151.3	150.7	151.0	151.4	150.5	151.1	151.5	150.6	151.3	151.4	150.5	150.9	151.9	
	(g)	678.4	679.2	683.0	682.7	683.3	686.1	682.8	685.3	688.7	683.0	684.9	678.4	669.3	575.0

Appendix 9.2 – Sulfatbeständighet, delI

Betong	Sort	Startvärde			90 dygn			450 dygn			900 dygn			1400 dygn	1700 dygn
Test		H2O	H2O-hav	Na2SO4	H2O	H2O-hav	Na2SO4	H2O	H2O-hav	Na2SO4	H2O	H2O-hav	Na2SO4	Na2SO4	Na2SO4
KO 28	(Hz)	6600.0	6620.0	6130.0	6770.0	6820.0	6470.0	6920.0	7000.0	6610.0	6970.0	7000.0	6600.0		
	(mm)	150.7	150.5	150.3	150.9	150.5	150.7	151.0	150.7	150.6	150.8	150.5	151.2		
	(g)	692.7	692.8	691.7	697.2	697.0	695.4	698.5	700.5	698.9	698.8	700.7	696.3	609.7	405.8
KO 90	(Hz)	6720.0	6860.0	6770.0	6940.0	6950.0	6960.0	7130.0	7030.0	7000.0	7140.0	7060.0	7240.0	7210.0	
	(mm)	149.7	150.5	150.5	149.9	150.5	150.4	149.8	150.7	150.3	149.8	150.5	150.2	149.0	
	(g)	702.9	697.6	702.3	707.2	701.9	705.3	707.0	702.2	707.6	707.2	702.0	700.6	637.3	545.5
KOT 28	(Hz)	6850.0	6800.0	6870.0	7010.0	6970.0	7010.0	7180.0	7150.0	7180.0	7190.0	7170.0	7240.0	7370.0	
	(mm)	151.3	151.5	150.9	151.3	151.6	150.8	151.5	151.8	150.6	151.6	151.7	151.1	152.0	
	(g)	714.1	721.0	717.0	718.0	724.8	720.2	719.8	726.7	722.3	720.3	726.9	719.9	716.8	682.8
KOT 90	(Hz)	6920.0	6920.0	7000.0	7000.0	7020.0	7010.0	7110.0	7110.0	7220.0	7130.0	7130.0	7160.0	7250.0	
	(mm)	150.8	150.5	150.5	150.9	150.6	150.6	150.8	150.6	150.6	150.7	150.5	150.7	150.7	
	(g)	716.3	710.9	718.0	719.9	715.0	721.0	720.3	716.1	722.5	720.7	716.2	719.5	719.3	642.5
SO 28	(Hz)	6520.0	6420.0	6530.0	6780.0	6750.0	6920.0	6900.0	6870.0	6950.0	6940.0	6880.0	6980.0	6360.0	
	(mm)	150.3	149.4	149.2	150.4	149.4	149.2	150.5	149.4	149.2	150.5	149.4	149.6	151.0	
	(g)	696.4	689.7	700.2	701.7	694.7	704.8	702.0	699.7	707.3	702.4	700.1	706.3	655.3	566.3
SO 90	(Hz)	6720.0	6610.0	6520.0	6870.0	6750.0	6700.0	6930.0	6820.0	6780.0	6960.0	6850.0	6760.0	6960.0	
	(mm)	150.4	150.8	150.2	150.3	150.8	150.3	150.5	150.7	150.3	150.4	150.8	150.2	150.3	
	(g)	700.0	696.5	690.4	704.0	703.3	694.1	705.9	703.0	696.9	706.7	703.9	694.2	655.4	569.0
RO 28	(Hz)	6640.0	6510.0	6960.0	6770.0	6640.0	7130.0	7000.0	6860.0	7330.0	7000.0	6900.0	7340.0	7390.0	
	(mm)	152.0	152.0	151.0	152.5	152.4	151.2	152.6	152.5	151.3	152.6	152.5	150.9	151.6	
	(g)	722.0	720.0	714.0	723.3	722.3	715.2	724.8	727.9	717.9	725.0	727.7	719.1	721.1	721.5
RO 90	(Hz)	6660.0	6630.0	6840.0	6830.0	6770.0	6990.0	6960.0	6930.0	7120.0	6980.0	6930.0	7130.0	7170.0	
	(mm)	151.4	151.6	150.9	151.5	151.7	151.0	151.4	151.9	152.2	151.4	151.7	152.0	152.4	
	(g)	712.8	704.0	716.6	717.1	707.8	719.2	718.6	710.6	721.2	718.9	710.6	722.6	724.6	726.2