Renovering av krypgrundläggning för småhus - långtidsuppföljning, Bygg & Teknik 2008/08.

Renovering av krypgrundläggning för småhus

Föreliggande uppföljning av ett långtidsförsök i Tingsryd 1991–2005 beträffande markisolerade krypgrunder, utfördes efter ytterligare ett års försökstid med datainsamling från hösten 2005 till hösten 2006. I Sverige bedöms cirka 250 000 småhus ha mögelpåväxt i krypgrunden. Problemen ökar med växthuseffekten och dess ökande ånghalt i atmosfären. Mögelpåväxt i krypgrunden är inget problem så länge luften i krypgrunden ej står i förbindelse med inneluften i huset. Tyvärr är så fallet för det mesta eftersom träbjälklag ej kan utföras impermeabla. Lufttransport från en möglig krypgrund till inneluften leder till mögeldoft, vilket boende ofta vänjer sig vid men besökare omedelbart märker av. Hälsoeffekten av att bo i ett mögelhus diskuteras dessutom ivrigt men någon klar slutsats finns ej. Mögelpåväxt i krypgrunden får dock betraktas som ett dolt fel vid husförsäljning.

Totalt studerades i detta långtidsprojekt krypgrunder till sju likadana hus belägna i samma kvarter i Tingsryd. Husen var seriebyggda i exakta samma utförande. Ett sedan byggandet av området med 30 till 35 cm lättklinker markisolerat hus nr 4 ingick i försöksserien. Detta hus hade ingen plastfolie på marken. Samtliga renoverade hus hade före åtgärd plastfolie på marken. Plastfolien togs bort i samband med renoveringen. Hus nr 2 bibehölls som referenshus i förutvarande skick med traditionell krypgrund, det vill säga utan markisolering men med plastfolie på marken. Inga av husen hade några påtagliga problem före renoveringen – mer än med påväxt av mögel på underkanten av bjälklagen.



*Artikelförfattare är **Bertil Persson**, docent, Bara.*

Material och metoder

Material och metoder i detalj ges i [1]. Påväxten av mögel på underkanten av bjälklagen före renoveringen kartlades noga och redovisas i denna rapport. Renoveringen av krypgrunderna 2004 innebar att markisolering av lättklinker utfördes efter det att befintlig mögelpåväxt på trä på underkanten av bjälklaget i krypgrunden hade eliminerats genom behandling med borsyra. Befintliga ventilationsöppningar i grundmuren runt krypgrunden behölls i oförändrat skick och antal. Underkanten av bjälklaget i krypgrunden bestod efter åtgärd av hård träfiberskiva (masonite). Markisoleringen bestod av 35 cm lättklinker utan plastfolie mot underliggande mark. Följande principer användes:

1. Urtagning av illaluktande plastfolie på krypgrundens botten
2. Utläggning av fiberduk direkt på marken
3. Eliminering av på underkanten av bjälklaget befintligt mögel
4. Inblåsning av 0,3 till 0,4 m lättklinker
5. Montage av träprover, ny hård träfiberskiva, cementbunden träullsskiva och fibercementskiva på bjälklagets underkant samt fuktgivare på samma plats och utomhus.

Mätningar av temperatur och relativ fuktighet (RF) fortsatte kontinuerligt under hösten 2005 med datainsamling och batteribyte på instrument dessförinnan samt under juni 2006. Under försöksåret, 2004 till 2005, stabiliserades förhållandena i krypgrunden efter renovering i fråga om byggfukt från lättklinkern. Byggfukten från lättklinkern ledde till att börja med till en något förhöjd ånghalt i krypgrunderna till de nyligen markisolerade husen jämfört med ånghalten i krypgrunden till det sedan länge markisolerade huset nr 4 i försöksserien. Med anledning av eventuell risk för skador till följd av denna byggfukt avfuktades de nyligen markisolerade krypgrunderna direkt efter läggning av lättklinkern 2004. I slutet av uttorkningsperioden blev därför temperaturen något högre och relativ fuktighet något lägre i de uttorkade krypgrunderna jämfört med motsvarande förhållanden i krypgrunden till det sedan länge markisolerade huset nr 4 i försöksserien. Uttorkningen av byggfukt avslutades i mars 2005 varefter temperatur- och RF-förhållanden i de nyligen markisolerade krypgrunderna torde ha stabili-



Krypgrundsbotten utan plastfolie.



Trossbotten av hård träfiberskiva behandlad med mögelhämmande medel.



Krypgrundsbotten med fiberduk.



Inblåsning av lättklinker på fiberduken via instegshål.

serats fram till starten av uppföljningen under hösten 2005. Temperatur-/RF-mätarna av typ Hobo placerades mot underkanten på taket i krypgrunden [2]. Noggrannheten i Hobo-givarna får efter kalibrering ha ansetts vara plus minus 0,2 °C samt plus minus 3 procent RF. Under hösten 2005 monterades nya serier av provbitar av obehandlat hyvlat trä (gran), hård träfiberskiva, fibercementskiva och cementbunden träullsplatta i samtliga försökshus nr 1 till 7. Provbitarna demonterades under oktober 2006 för analys [3].

Resultat

Resultatpresentation från uppföljningen sker av i form av temperatur och relativ fuktighet samt risk för mögelpåväxt på trä, *R*, beräknad enligt ekvation (1) här intill [1].

Resultaten visar temperatur, relativ fuktighet och risk för mögelpåväxt på obehandlat trä (gran) 2004 till 2006 samt skillnad i temperatur, relativ fuktighet och risk för mögelpåväxt på obehandlat trä (gran) mellan 2005 och 2004 samt mellan 2006 och 2004, dels för två veckor, dels för tre dygn. Tidsperioderna valdes med hänsyn till de perioder då högst risk för mögelpåväxt beräknades, det vill säga mest ogynnsam kombination av temperatur och relativ fuktighet. Risk för mögelpåväxt på trä beräknades enligt ekvation (1) [1] och korreleras med observerad mögelpåväxt på trä [3 till 8]. Samma tidsperioder valdes för samtliga hus. Resultatfigurerna visar temperatur, relativ fuktighet och risk för mögelpåväxt på obehandlat trä (gran) 2005 till 2006. Resultat från mikrobiologisk analys presenteras [3]. Ånghalten presenteras därefter. Därefter görs en jämförelse av förhållandena före renovering och ett till två år efter renovering beträffande temperatur och relativ fuktighet samt risk för mögelpåväxt på trä i krypgrunderna.

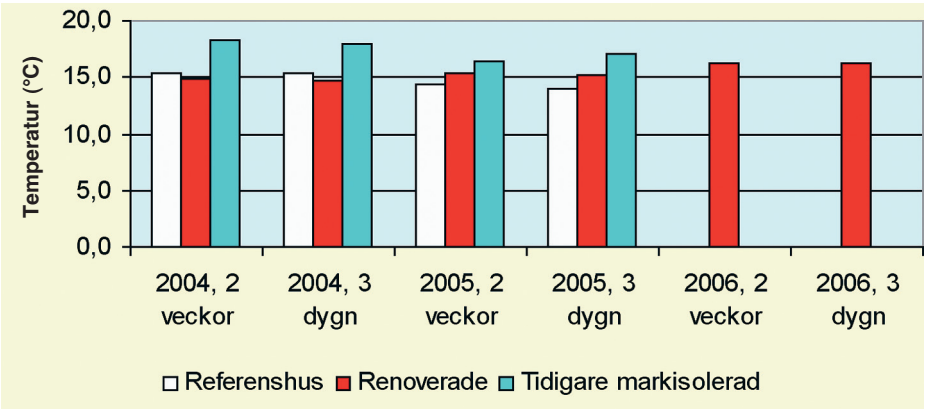
Temperatur

Tabell 1 visar en sammanställning av temperaturutveckling i krypgrunderna (grad Celsius). I *figur 1* ges en sammanställning av temperaturutveckling i krypgrunderna beroende av typ av krypgrund (grad Celsius). I *figur 2 på nästa sida* ges en sammanställning av temperaturskillnader i krypgrunderna beroende av typ av krypgrund (grad Celsius). Efter renovering ökade således temperaturen i kryp-

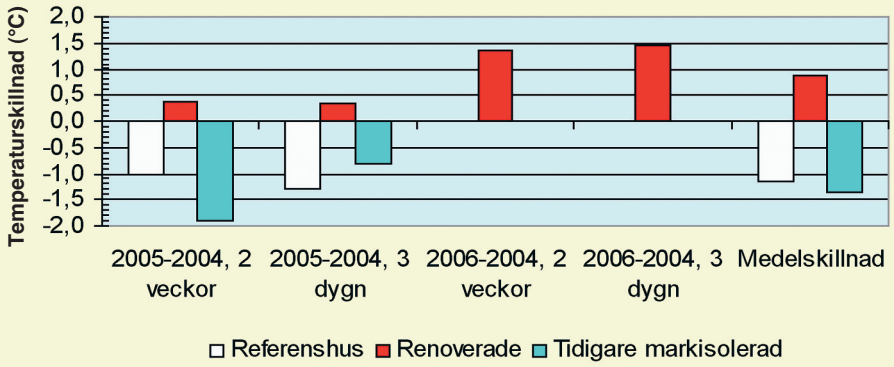
$$R = (-0{,}0000390847 \cdot RF5 + 0{,}0148757714 \cdot RF4 - 2{,}2324717695 \cdot RF3 + 164{,}9814176024 \cdot RF2 - 5994{,}2720391383 \cdot RF + 85447{,}7767622303) - (-0{,}0000390847 \cdot RF5 + 0{,}0148757714 \cdot RF4 - 2{,}2324717695 \cdot RF3 + 164{,}9814176024 \cdot RF2 - 5994{,}2720391383 \cdot RF + 85447{,}7767622303 - (0{,}01105 \cdot RF3 - 2{,}62434 \cdot RF2 + 207{,}1472 \cdot RF - 5435{,}25564)) \cdot (20 - T) / 16 \quad \{70 < RF < 100\ \%;\ 0 < \text{temperatur } T < 20\ °C\} \qquad (1)$$

Tabell 1: Sammanställning av temperaturutvecklingen i krypgrunderna (°C).

	Hus 1	Hus 2	Hus 3	Hus 4	Hus 5	Hus 6	Hus 7
Medel 2004, 2 veckor	14,8	15,3	15,1	18,3	14,9	15,1	14,8
Medel 2004, 3 dygn	14,6	15,4	14,8	17,9	14,9	14,9	14,6
Medel 2005, 2 veckor	–	14,3	14,3	16,4	15,7	16,2	–
Medel 2005, 3 dygn	–	14,1	14,0	17,1	15,5	16,1	–
Medel 2006, 2 veckor	16,3	–	16,1	–	16,3	–	16,3
Medel 2006, 3 dygn	16,1	–	16,0	–	16,3	–	16,3
Skillnad 2005–2004, 2 veckor	–	-1,0	-0,8	-1,9	0,8	1,1	–
Skillnad 2005–2004, 3 dygn	–	-1,3	-0,8	-0,8	0,6	1,2	–
Skillnad 2006–2004, 2 veckor	1,5	–	1,0	–	1,4	–	1,5
Skillnad 2006–2004, 3 dygn	1,5	–	1,2	–	1,4	–	1,7



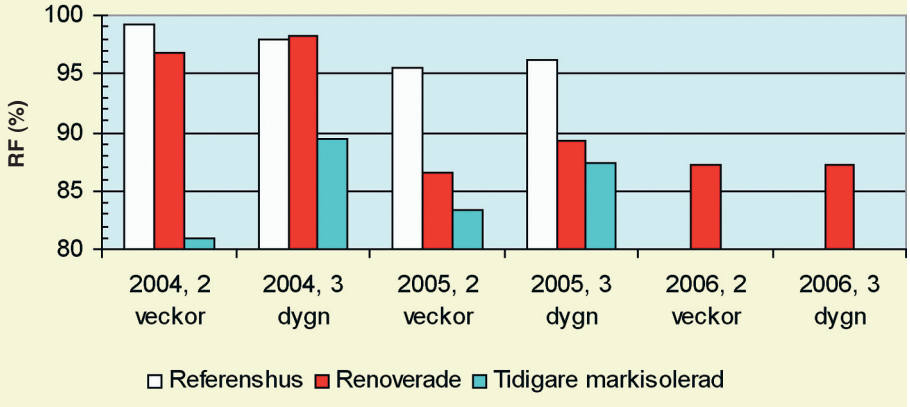
Figur 1: Sammanställning av temperaturutveckling beroende av typ av krypgrund.



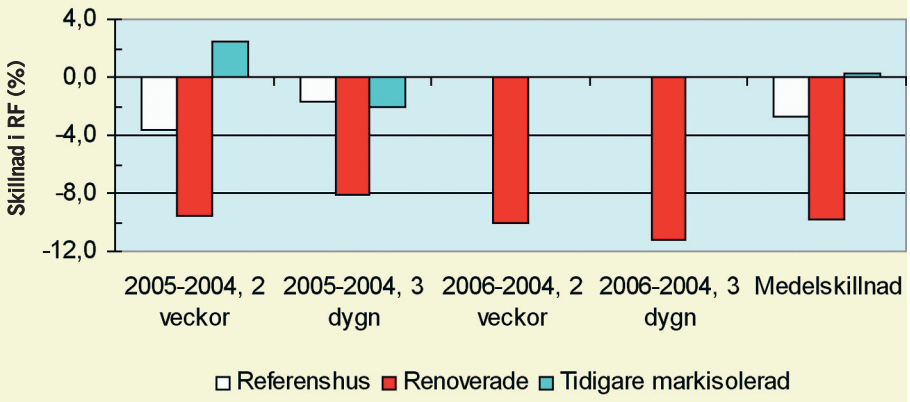
Figur 2: Sammanställning av skillnader i temperatur beroende av typ av krypgrund.

Tabell 2: Sammanställning av RF-utvecklingen i krypgrunderna (%).

	Hus 1	Hus 2	Hus 3	Hus 4	Hus 5	Hus 6	Hus 7
Medel 2004, 2 veckor	97,9	99,2	96,1	80,9	97,2	95,0	97,9
Medel 2004, 3 dygn	99,6	97,9	98,1	89,4	96,7	97,2	99,6
Medel 2005, 2 veckor	–	95,6	90,8	83,4	86,8	82,1	–
Medel 2005, 3 dygn	–	96,2	90,0	87,4	89,5	88,1	–
Medel 2006, 2 veckor	85,9	–	87,2	–	87,6	–	87,9
Medel 2006, 3 dygn	86,8	–	87,1	–	87,6	–	87,6
Skillnad 2005–2004, 2 veckor	–	-3,6	-5,3	2,5	-10,4	-12,9	–
Skillnad 2005–2004, 3 dygn	–	-1,7	-8,1	-2,0	-7,2	-9,1	–
Skillnad 2006–2004, 2 veckor	-12,0	–	–8,9	–	-9,6	–	-10,0
Skillnad 2006–2004, 3 dygn	-12,8	–	-11,0	–	-9,1	–	-12,0



Figur 3: Sammanställning av RF-utveckling beroende av typ av krypgrund (procent).



Figur 4: Sammanställning av skillnader i den relativa fuktigheten beroende av typ av krypgrund (procent).

grunderna med cirka 2 °C (klimatberoende minskning i referenskrypgrunden och tidigare isolerade krypgrund med cirka 1,1 °C plus ökning i den renoverade krypgrinden med 0,9 °C).

Relativ fuktighet

Tabell 2 visar en sammanställning av relativ fuktighet i krypgrunderna (procent). I *figur 3* ges en sammanställning av RF-utveckling i krypgrunderna beroende av typ av krypgrund (procent). I *figur 4* ges en sammanställning av RF-skillnader i krypgrunderna beroende av typ av krypgrund (procent). Efter renovering minskade således den relativa fuktigheten i krypgrunderna med cirka 9 procent (klimatberoende minskning i referenskrypgrunden och tidigare isolerade krypgrund med cirka 1,1 procent minus minskning i den renoverade krypgrunden med 9,8 procent).

Risk för mögelpåväxt på trä

Tabell 3 på sidan 69 visar en sammanställning av risk för mögelpåväxt på trä i krypgrunderna, ekvation (1) (procent), [1]. I *figur 5* ges en sammanställning av risk för mögelpåväxt på trä i krypgrunderna, ekvation (1) (procent) [1]. I *figur 6* ges en sammanställning av skillnader i risk för mögelpåväxt på trä i krypgrunderna, ekvation (1) (procent) [1]. Efter renovering minskade risken för mögelpåväxt på trä i krypgrunderna, ekvation (1) (procent) [1] med cirka 49 procent (klimatberoende minskning i referenskrypgrunden och tidigare isolerade krypgrund med cirka 11,8 procent minus minskning i den renoverade krypgrunden med 60,8 procent) .

Ånghalt

Tabell 4 på sidan 70 visar en sammanställning av ånghalt i krypgrunderna (gram per kubikmeter). I *figur 7* ges en sammanställning av ånghalt i krypgrunderna (gram per kubikmeter). I *figur 8* ges en sammanställning av skillnader i ånghalt i krypgrunderna (gram per kubikmeter). Efter renovering ökade ånghalt i krypgrunderna med cirka 0,6 g/m^3 (klimatberoende minskning i referenskrypgrunden och tidigare isolerade krypgrund med cirka 1,2 g/m^3 minus minskning i den renoverade krypgrunden med 0,6 g/m^3).

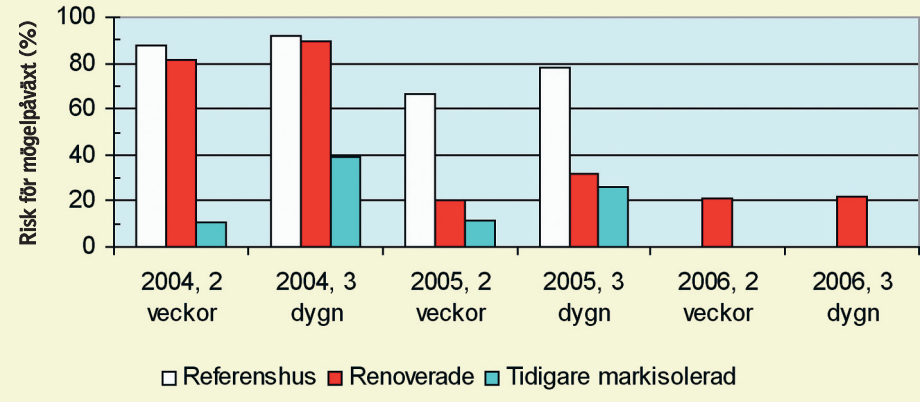
Samband mellan observerad och beräknad risk för mögelpåväxt på trä

För analys av observerad mögelpåväxt på trä och beräknad risk för mögelpåväxt på trä enligt ekvation (1) [1] användes klassindelning enligt *tabell 5 på sidan 70*. Totalt användes 23 analyser av påväxt av mögelsvamphyfer på trä [3 till 8]. *Figur 9* visar samband mellan frekvens för mögelpåväxt på trä och risk för mögelpåväxt på trä enligt ekvation (1) [1]. Ur figur 9 erhölls följande samband:

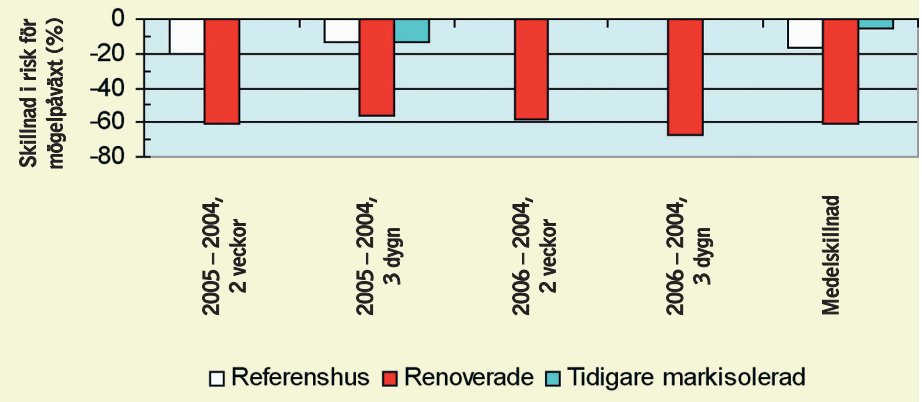
$$F_{m.sv.h} = 0{,}23 \cdot R_{3d}^{0{,}57} \quad \{R^2 = 0{,}56\} \qquad (2)$$

Tabell 3: Översikt över risk för mögelpåväxt på trä i krypgrunder, ekvation (1) (%) [1].

	Hus 1	Hus 2	Hus 3	Hus 4	Hus 5	Hus 6	Hus 7
Medel 2004, 2 veckor	82,1	87,8	73,7	10,3	81,0	87,1	82,1
Medel 2004, 3 dygn	90,8	91,6	90,7	39,2	85,8	87,4	90,8
Medel 2005, 2 veckor	–	67,0	33,0	11,6	17,2	10,2	–
Medel 2005, 3 dygn	–	77,9	33,6	26,2	35,3	26,8	–
Medel 2006, 2 veckor	14,3	–	19,8	–	24,9	–	24,1
Medel 2006, 3 dygn	17,7	–	20,2	–	25,6	–	23,0
Skillnad 2005–2004, 2 veckor	–	-20,8	-40,7	1,3	-63,8	-76,9	–
Skillnad 2005–2004, 3 dygn	–	-13,7	-57,1	-13,0	-50,5	-60,6	–
Skillnad 2006–2004, 2 veckor	-67,8	–	-53,9	–	-56,1	–	-58,0
Skillnad 2006–2004, 3 dygn	-73,1	–	-70,5	–	-60,2	–	-67,8



Figur 5: Översikt över risk för mögelpåväxt på trä i krypgrunderna, ekvation (1) (procent) [1].



Figur 6: Översikt över skillnader i risk för mögelpåväxt på trä i krypgrunderna, ekvation (1) (procent) [1].

$F_{m.sv.h}$ betecknar frekvens av mögelsvamphyfer på trä
R_{3d} betecknar under tre dygn beräknad risk för mögelpåväxt på trä enligt ekvation (1) [1].

Ekvation (2) har mycket låg korrelationskoefficient, vilket visar att ett samband mellan under tre dygn beräknad risk för mögelpåväxt på trä enligt ekvation (1) [1] och observerad mögelpåväxt på trä är svagt. En jämförande analys för en treveckors exponering visade ingen korrelation alls. I ekvation (1) ingår temperatur och relativ fuktighet som parametrar, men uppenbart påverkar även andra faktorer än dessa mögelpåväxt på trä i krypgrunder.

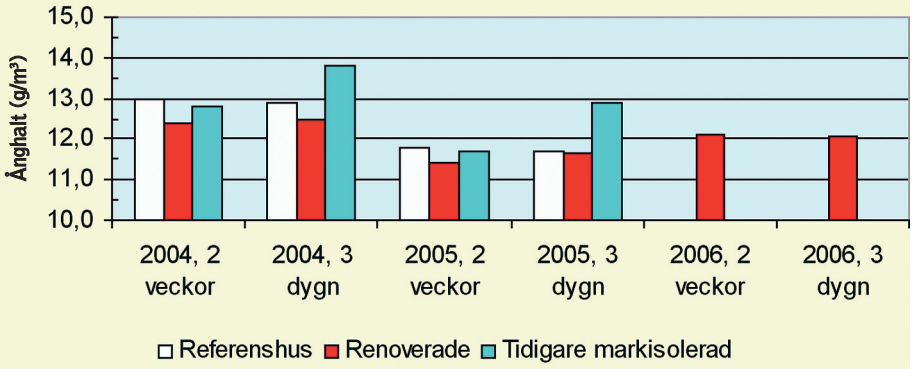
Slutsatser

Efter mätningar av temperatur, relativ fuktighet, risk för mögelpåväxt på trä, förekomst av mögelsvamphyfer och sporer på fyra typer av nymonterade material, exponerade under ett år samt analys av mikroorganismer på materialen, utfört på fem i efterhand markisolerade krypgrunder, en referenskrypgrund utan markisolering och en sedan länge markisolerad krypgrund, drogs följande slutsatser [9]:

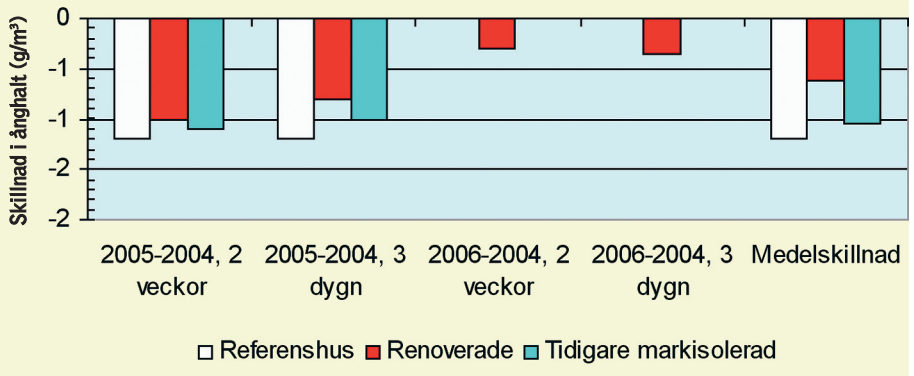
1. Efter renovering ökade temperaturen i krypgrunderna med cirka 2 °C jämfört med temperaturen i referenshusets krypgrund.
2. Efter renovering minskade relativa fuktigheten i krypgrunderna med cirka nio procent jämfört med relativa fuktigheten i den oisolerade krypgrunden.
3. Efter renovering minskade risken för mögelpåväxt på trä i krypgrunderna med 49 procent.
4. Efter renovering ökade ånghalt i krypgrunderna med cirka 0,6 g/m^3 jämfört med ånghalten i den oisolerade krypgrunden.
5. Ingen förekomst av mögelsvamphyfer kunde konstateras på fibercementskiva eller på cementbunden träullsskiva (utom sparsam förekomst på träullsskiva i en krypgrund, före och efter renoveringen).

Tabell 4: Sammanställning av ånghalt i krypgrunderna (g/m³).

	Hus 1	Hus 2	Hus 3	Hus 4	Hus 5	Hus 6	Hus 7
Medel 2004, 2 veckor	12,4	13,0	12,5	12,8	12,4	12,3	12,4
Medel 2004, 3 dygn	12,5	12,9	12,5	13,8	12,4	12,4	12,5
Medel 2005, 2 veckor	-	11,8	11,2	11,7	11,7	11,4	-
Medel 2005, 3 dygn	-	11,7	10,9	12,9	11,9	12,2	-
Medel 2006, 2 veckor	12,0	-	12,0	-	12,2	-	12,3
Medel 2006, 3 dygn	12,0	-	11,9	-	12,2	-	12,2
Skillnad 2005-2004, 2 veckor	-	-1,2	-1,3	-1,1	-0,8	-0,9	-
Skillnad 2005-2004, 3 dygn	-	-1,2	-1,6	-1,0	-0,5	-0,3	-
Skillnad 2006-2004, 2 veckor	-0,4	-	-0,4	-	-0,2	-	-0,2
Skillnad 2006-2004, 3 dygn	-0,5	-	-0,5	-	-0,1	-	-0,3



Figur 7: Sammanställning av ånghalt i krypgrunderna (gram per kubikmeter).



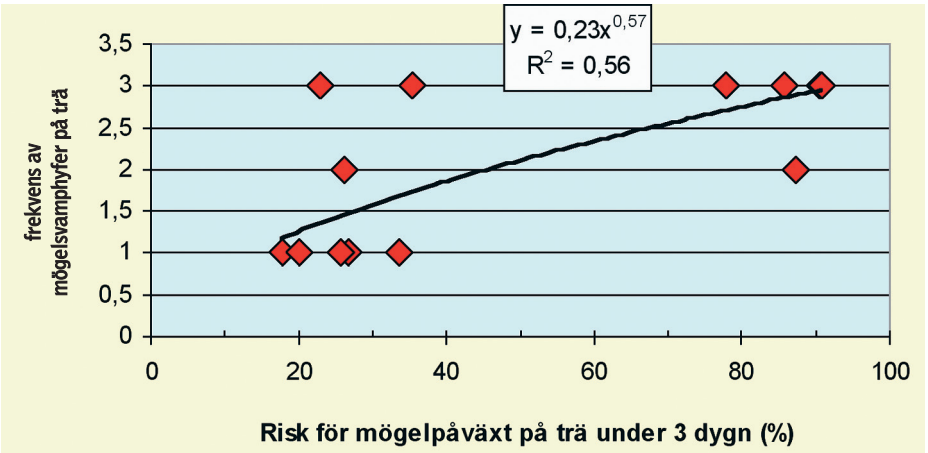
Figur 8: Sammanställning av skillnader i ånghalt i krypgrunderna (gram per kubikmeter).

6. Måttlig till riklig förekomst av mögelsvamphyfer på hård träfiberskiva minskade väsentligt på ny, under 1 år exponerad hård träfiberskiva i och med renoveringen (sparsam förekomst i tre krypgrunder samt måttlig i en krypgrund efter renovering).

7. Riklig förekomst av mögelsvamphyfer på trä i alla krypgrunder före renovering minskade efter renoveringen till sparsam förekomst på trä i tre av krypgrunderna och måttlig förekomst på trä i en krypgrund medan mögelsvamphyfer fortfarande förekom rikligt på trä i två av de renoverade krypgrunderna. Renoveringsmetoden är alltså ej effektiv då trä exponeras. ■

Tabell 5: Klassindelning för förekomst av mögelsvamphyfer på trä [1].

Klass	0	1	2	3
Angrepp	Inga	Sparsam	Måttlig	Riklig



Figur 9: Frekvens för mögelpåväxt på trä och risk för mögelpåväxt på trä, ekv (1) [1].

Referenser

[1]. Bertil Persson, *Renovering av krypgrundläggning för småhus*, TVBM-3128, ISBN 91-631-7906-7, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 2005, 83 sid.

[2]. Stefan Backe, Datafiler från HOBO instrument nR 13, 22, 23, 25, 27, 35, 40 och 41, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 2006.

[3]. Elisabeth Gilert, *Botaniska analysgruppen, Rapport M06 548*, Göteborg, 2006.

[4]. Elisabeth Gilert, *Mikrobiologisk analys M02 425*, ibid, 2002.

[5]. Elisabeth Gilert, *Mikrobiologisk analys M02 996*, ibid, 2002.

[6]. Elisabeth Gilert, *Mikrobiologisk analys M03 936*, ibid, 2003.

[7]. Elisabeth Gilert, *Mikrobiologisk analys M04 1072*, ibid, 2004.

[8]. Elisabeth Gilert, *Mikrobiologisk analys M05 698*, ibid, 2005.

[9]. Bertil Persson, *Renovering av krypgrundläggning för småhus – långtidsuppföljning 2005–2006*, TVBM-7193, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 2007, 29 sid.

Renovering av krypgrundläggning för småhus, Bygg & Teknik 2006/08, 21-25.

Renovering av krypgrundläggning för småhus

Ett i fält genomfört långtidsförsök med renovering av krypgrundläggning för småhus presenteras. Sju likadana hus i samma kvarter studerades under tre år. Fem hus försågs med markisolering i efterhand efter det att underkanten på bjälklaget i krypgrunden hade behandlats med borsyra. En annan förberedande åtgärd var att byta ut en på marken befintlig byggplastfolie mot fiberduk. Ett hus hade försetts med markisolering i förhand samt ett hus hade en oisolerad grund med byggplastfolie på marken under huset (referenshus). Bostadsrättsföreningen Önnemon, Tingsryd, ställde välvilligt hus till förfogande. Projektet finansierades av Peab Sverige AB, Svenska byggbranschen utvecklingsfond, Svensk Leca AB, Maxit AB, Heidelberg Cement Group samt Träullit AB och utförs 2002 till 2005. Slutrapport kommer 2007

Med markisolering minskade relativa fuktigheten i krypgrunden avsevärt sommartid. Därmed minskade även mögelpåväxten på obehandlat hyvlat trä (gran) i jämförelse med den påväxt som skedde året före renoveringen, i bägge fallet på nymonterade träprover. På hård träfiberskiva upphörde i stort sett mögelsvampangrepp på prover som monterats efter renoveringen att jämföra med ett måttligt mögelsvampangrepp i motsvarande hus, året före renoveringen.

I det oisolerade huset (referenshuset) var relativa fuktigheten i krypgrunden sommartid ofta högre än 90 procent. Därmed förekom riklig mögelpåväxt på hyvlat trä (gran) och hård träfiberskiva i det oisolerade huset (referenshuset) under samma period som mätning av mögelpåväxt skedde i de markisolerade husen. På cementbundna material (fibercementskiva och cementbunden träullsplatta) förekom däremot ingen nämnvärd påväxt av mögel, ej heller i det oisolerade huset (referenshuset). *Tabell 1* visar förekomst av mögelsvamphyfer under ett år på material i krypgrund före åtgärd [1, 2]. *Tabell 2* visar dito efter åtgärd [1, 2].



Artikelförfattare är ***Bertil Persson****, docent, Bara.*

Genomförande

Fem hus försågs med markisolering i efterhand efter det att underkanten på bjälklaget i krypgrunden hade behandlats med borsyra. En annan förberedande åtgärd var att byta ut en byggplastfolie på marken mot fiberduk [3]. Ett hus hade försetts med markisolering i förhand samt ett hus hade en oisolerad grund med endast byggplastfolie på marken under huset (referenshus). Med markisolering minskade relativa fuktigheten i krypgrunden avsevärt sommartid. Därmed minskade även mögelpåväxten på obehandlat hyvlat trä (gran) [4–13].

Mögelpåväxt ägde ej rum på hård träfiberskiva efter renoveringen. I det oisolerade huset (referenshuset) var relativa fuktigheten i krypgrunden sommartid ofta högre än 90 procent.

Därmed förekom riklig mögelpåväxt på hyvlat trä (gran) och hård träfiberskiva i det oisolerade huset (referenshuset) under samma period som mätning av mögelpåväxt skedde i de markisolerade husen. På cementbundna material (fibercementskiva och cementbunden träullsplatta) förekom däremot ingen nämnvärd påväxt av mögel, ej heller i det oisolerade huset (referenshuset). Med markisolering ökade temperaturen i krypgrunden med cirka 2 °C jämfört med temperaturen i referenshusets krypgrund. Under korta perioder varierande mellan tre dygn och två veckor följde dock ej temperaturen i de nyligen markisolerade krypgrunderna omgivningens temperatur lika väl som var fallet i den sedan länge markisolerade krypgrunden. Detta kan bero på för litet utrymme mellan en mittbalk i krypgrunderna och isoleringen eller på högre fuktkvot på den nu utförda markisoleringen än på den tidigare markisoleringen. Relativa fuktigheten i de markisolerade krypgrunderna minskade med cirka tio procent jämfört med den oisolerade krypgrundens relativa fuktighet – relativa fuktigheten i den sedan länge markisolerade

Tabell 1: Förekomst av mögelsvamphyfer på material i krypgrund före åtgärd [1,2].

Material/ hus	*Fibercement-skiva*	*Cementbunden träullsplatta*	*Hård träfiberskiva*	*Hyvlat trä (gran)*
1:I	Ingen	Ingen	Måttlig	Riklig
1:II			Måttlig	Riklig
3:I	Ingen	Ingen	Måttlig	Riklig
3:II	Ingen	Ingen	Måttlig–riklig	Riklig
5:I	Ingen	Måttlig	Riklig	Riklig
5:II	Ingen	Sparsam	Måttlig–riklig	Riklig
6	Ingen	Ingen	Måttlig–riklig	Måttlig
7:I	Ingen	Ingen	Sparsam–måttlig	Riklig
7:II	Ingen	Ingen	Sparsam	Riklig

Tabell 2:Förekomst av mögelsvamphyfer på material i krypgrund efter åtgärd [1,2].

Hus	*Fibercement-skiva*	*Cementbunden träullsplatta*	*Hård träfiberskiva*	*Trä*
1	Ingen	Ingen	Ingen	Sparsam
2 (ref. utan markisolering)	Ingen	Ingen	Måttlig	Riklig
3	Ingen	Ingen	Sparsam	Sparsam
4 (tid. markisolerat)	Ingen	Ingen	Ingen	Måttlig
5	Ingen	Ingen	Ingen	Riklig
6	Ingen	Ingen	Ingen	Sparsam
7	Ingen	Ingen	Ingen	Sparsam

krypgrunden var dock ytterligare mellan två procent och fyra procent lägre än i de krypgrunder som nyligen hade isolerats, vilket också kan bero av att luftväxlingen var sämre i de nyligen markisolerade krypgrunderna eller på högre fuktkvot på den nu utförda markisoleringen än på den tidigare markisoleringen. Under en beräkningsperiod om tre dygn erhölls i medeltal relativa fuktigheten 89 procent i de nyligen markisolerade krypgrunderna, relativa fuktigheten 98 procent i en oisolerad referenskrypgrund samt relativa fuktigheten 87 procent i en sedan länge markisolerad krypgrund (mycket högre risk för mögelpåväxt på obehandlat trä anses föreligga vid en relativ fuktighet högre än 90 procent).

Väsentligt minskad risk för mögelpåväxt

Med markisolering halverades risken för mögelpåväxt på obehandlat trä jämfört med risken för mögelpåväxt på obehandlat trä för en oisolerad krypgrund enligt en modell som baseras på beräkningsperiodens längd, relativa fuktigheten och temperaturen. I en sedan länge markisolerad krypgrund beräknades risken för mögelpåväxt på obehandlat trä vara ytterligare tio procent lägre än i de nyligen markisolerade krypgrunderna. Ingen förekomst av mögelsvamphyfer kunde konstateras på vare sig fibercementskiva eller cementbunden träullsskiva placerad i alla de aktuella krypgrunderna, före eller efter markisolering. Tidigare måttlig förekomst av mögelsvamphyfer på nyplacerad hård träfiberskiva försvann så gott som helt i och med markisolering (sparsamt angrepp i en krypgrund) jämfört med tidigare riklig förekomst av mögelsvamphyfer på nyplacerad hård träfiberskiva. Tidigare rikliga förekomster av mögelsvamphyfer på nyplacerat hyvlat trä i fem krypgrunder minskade med markisoleringen till sparsam förekomst jämfört med förekomst på tidigare nyplacerat hyvlat trä i tre av krypgrunderna samt till måttlig förekomst i två av krypgrunderna (riklig förekomst av mögelsvamphyfer på hyvlat trä i den sedan länge markisolerade krypgrunden). En beräkningsmodell för risk för mögelpåväxt på obehandlat trä stämde illa med verkligheten om hänsyn ej togs till beräkningsperiodens längd.

Förekomst av mögelsvamphyfer och beräknad risk för mögelpåväxt

För analys av samband mellan mögelsvamphyfer på trä användes ekvation (1), i *rutan* här intill, beräkning av risk för mögelpåväxt på obehandlat hyvlat trä (gran), R [8, 9] (procent):

Nivåerna på mögelangrepp indelades i fyra klasser enligt *tabell 3*. För analysen valdes enligt [8] beräknad risk för mögelpåväxt på obehandlat trä (gran), dels för en tvåveckorsperiod, dels för en tredygnsperiod separerade för nyligen markisolerade krypgrunder, tidigare markisolerad krypgrund och hus utan markisolerad krypgrund. *Figur 1* visar samband mellan enligt [8,9] beräknad risk för mögelpåväxt på trä, dels för två veckor, dels för tre dygn med klassindelning enligt tabell 3 [2]. Frekvensen för mögelsvamphyfer, $F_{m.sv.\ h}$, på trä beräknades ($F_{m.sv.\ h}$ betecknar frekvens av mögelsvamphyfer på trä och t beräkningsperiod (dygn), $R_{2\ veckor}$ betecknar enligt ekvation (1) [8, 9] beräknad risk för mögelpåväxt på trä för två veckor):

$$F_{m.sv.\ h} = 1{,}3 \cdot (R_{2\ veckor})^{0{,}15} \quad \{R^2 = 0{,}54\} \qquad (2)$$

$$F_{m.sv.\ h} = 0{,}25 \cdot \ln(R_{3\ dygn})^{0{,}54} \quad \{R^2 = 0{,}55\} \qquad (3)$$

Ekvationerna (1)–(3) resulterade i följande samband för mögelfrekvens, tabell 3, *figur 2*:

$$F_{m.sv.h} = (0{,}27 \cdot \ln(t) - 0{,}042) \cdot R^{(-0{,}086 \cdot \ln(t) + 0{,}62)} \qquad (4)$$

Ånghalt ointressant

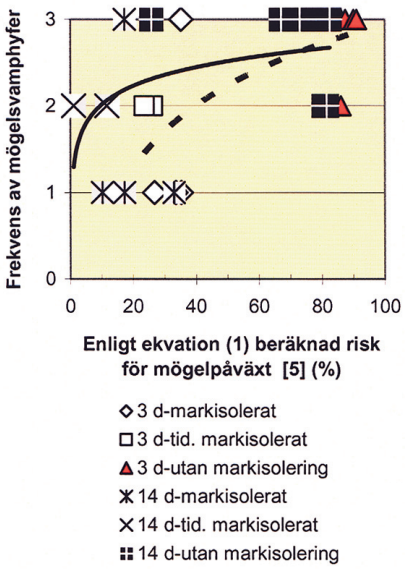
Notabelt är att överskottet i ånghalt jämfört med utomhus var större för krypgrunderna till de nyligen markisolerade husen, nummer 1, 3, 5, 6 och 7 än för krypgrunden till referenshuset med enbart plastfolie på marken, nummer 2 [16]. Överskottet i ånghalt återfinns under lång tid [1]. *Figurerna 3–4* visar skillnad i ånghalt mellan krypgrund och utomhus, samt ånghalten utomhus. Inledningsvis fanns från november, 2004, till augusti, 2005, ett större överskott i ånghalt i krypgrunderna till de nyligen markisolerade husen jämfört med krypgrunderna till referenshuset utan markisolering, nummer 2, och det sedan länge markisolerade huset, nummer 4. Under juli, 2005, fanns inget ånghaltsöverskott för vare sig krypgrunden till referenshuset utan markisolering, nummer 2, och det sedan länge markisolerade huset, nummer 4. Överkott fanns i krypgrunderna till husen 5 och 6 jämfört med utomhus. Trots detta växte riklig med mögel på trä i krypgrunden till referenshuset utan markisolering, nummer 2, och i krypgrunden till det markisolerade huset med ånghaltsöverskott under lång tid, nummer 5, måttligt på trä i krypgrunden till det sedan länge markisolerade huset och i krypgrunden till hus 7 (ånghaltsmätningar saknas) men bara sparsamt på trä i krypgrunden till de övriga markisolerade husen, nummer 1, 3 och 6.

Sambandet mellan överhaltsöverskott i krypgrund och ånghalt utomhus var såle-

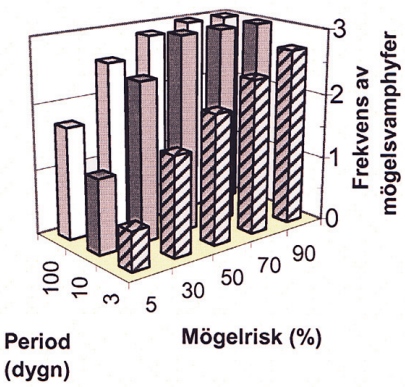
$$R = (-0{,}0000390847 \cdot RF^5 + 0{,}0148757714 \cdot RF^4 - 2{,}2324717695 \cdot RF^3 + 164{,}9814176024 \cdot RF^2 - 5994{,}2720391383 \cdot RF + 85447{,}7767622303) - (-0{,}0000390847 \cdot RF^5 + 0{,}0148757714 \cdot RF^4 - 2{,}2324717695 \cdot RF^3 + 164{,}9814176024 \cdot RF^2 - 5994{,}2720391383 \cdot RF + 85447{,}7767622303 - (0{,}01105 \cdot RF^3 - 2{,}62434 \cdot RF^2 + 207{,}1472 \cdot RF - 5435{,}25564)) \cdot (20 - T) / 16 > 0 \quad \{70 < RF < 100\ \%;\ 0 < \text{temperatur, } T < 20\ °C\} \qquad (1)$$

Tabell 3: Klassindelning för förekomst av mögelsvamphyfer [2].

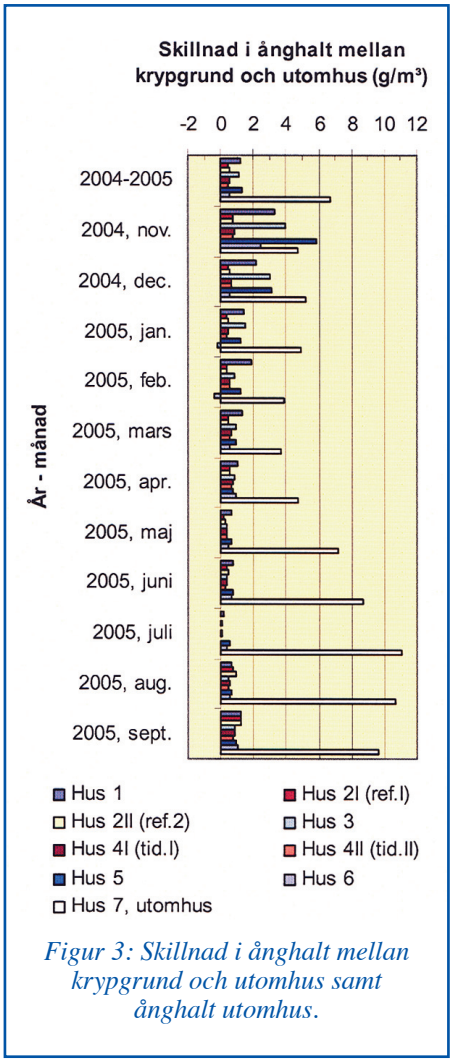
Klass	0	1	2	3
Angrepp	Inga	Sparsam	Måttlig	Riklig



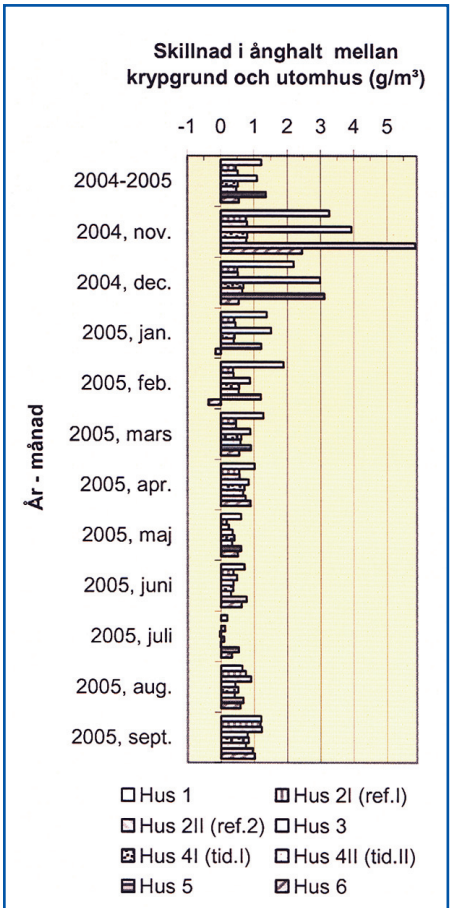
Figur 1: Samband mellan enligt ekvation (1) [8, 9] beräknad risk för mögelpåväxt på trä, dels för en tvåveckorsperiod, dels för tre dygn och med frekvens av mögelsvamphyfer [1, 2].



Figur 2: Mögelfrekvens enligt tabell 3 som funktion av risk för mögelpåväxt på obehandlat trä (gran) enligt ekvation (4) [8, 9] och beräkningsperioden längd [1].



Figur 3: Skillnad i ånghalt mellan krypgrund och utomhus samt ånghalt utomhus.



Figur 4: Skillnad i ånghalt mellan krypgrund och utomhus.

des svagt. Det var ej ånghaltsöverskottet i krypgrunden jämfört med utomhus som betingade mögelpåväxt på trä utan relativa fuktigheten, RF. Med markisolering minskade RF med cirka tio procent (ökade temperaturen med cirka 2 °C) jämfört med RF i krypgrunder utan markisolering, vilket gav mindre mögelpåväxt oaktat ett större ånghaltsöverskott i krypgrunder med markisolering jämfört med krypgrunden till referenshuset utan markisolering. *Tabell 4* och *figur 5 på nästa sida* visar utvecklingen av skillnad i ånghalt mellan krypgrunder till de undersökta husen och utomhus.

Aktuella ånghaltsöverskott jämfört med ånghalten utomhus i krypgrunderna till de studerade husen var således mycket små då väl byggfukten hade torkat ut. Tabell 4 och figur 5 visar att krypgrunderna till det sedan länge markisolerade huset och referenshuset hade samma ånghaltsöverskott jämfört med ånghalten utomhus, på årsbasis beräknat cirka 0,5 g/m³, det vill säga ingen fukt fördes genom lättklinkern upp till krypgrunden på lång sikt, då lättklinkern var fuktfri. Under augusti och september 2005, var dock ånghaltsöverskottet större i referenshusets krypgrund än i alla markisolerade krypgrunder, eftersom i trä kondenserat fukt då avgick.

Tabell 4: Skillnad i ånghalt mellan krypgrunder till de undersökta husen och utomhus.

Period	*Hus 1*	*Hus 2I (ref.I)*	*Hus 2II (ref.2)*	*Hus 3*	*Hus 4I (tid.I)*	*Hus 4II (tid.II)*	*Hus 5*	*Hus 6*	*Hus 7 (utomhus)*
2004–2005	1,22	0,46	0,51	1,09	0,51	0,46	1,36	0,54	6,70
2004, nov	3,26	0,76	0,79	3,93	0,80	0,77	5,85	2,45	4,74
2004, dec	2,19	0,50	0,52	2,99	0,68	0,65	3,12	0,54	5,22
2005, jan	1,38	0,41	0,44	1,51	0,42	0,39	1,21	-0,16	4,90
2005, feb	1,89	0,37	0,38	0,88	0,55	0,54	1,20	-0,37	3,90
2005, mars	1,28	0,46	0,46	0,89	0,61	0,59	0,90	0,55	3,68
2005, apr	1,01	0,55	0,56	0,84	0,71	0,67	0,75	0,89	4,70
2005, maj	0,60	0,17	0,24	0,35	0,40	0,34	0,60	0,51	7,18
2005, juni	0,71	0,38	0,48	0,37	0,37	0,30	0,76	0,62	8,66
2005, juli	0,19	0,00	0,12	-0,03	0,09	-0,01	0,53	0,33	11,01
2005, aug	0,64	0,75	0,90	0,43	0,51	0,41	0,67	0,58	10,72
2005, sept	1,21	1,19	1,22	0,80	0,83	0,74	0,95	1,02	9,60

Slutsatser

Efter mätningar av temperatur, relativ fuktighet, risk för mögelpåväxt på trä, förekomst av mögelsvamphyfer och sporer på fyra nymonterade material samt analys av mikroorganismer på materialen, utfört på fem i efterhand markisolerade krypgrunder, en referenskrypgrund utan markisolering och en sedan länge markisolerad krypgrund, drogs följande slutsatser [1]:

1. Med markisolering ökade temperaturen i krypgrunden med cirka 2 °C jämfört med temperaturen i referenshusets krypgrund.

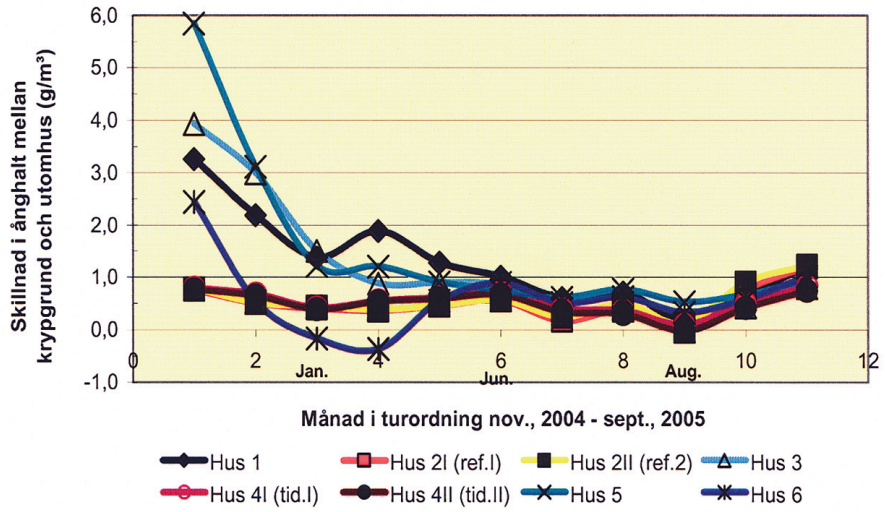
2. Under korta perioder varierande mellan tre dygn och två veckor följde dock ej temperaturen i de nyligen markisolerade krypgrunderna omgivningens temperatur lika väl som fallet var i den sedan länge markisolerade krypgrunden, vilket även detta kan bero på för litet utrymme mellan en mittbalk i krypgrunderna och isoleringen eller på något högre fuktkvot i den nu använda markisolering än i den tidigare utförda markisoleringen.

3. Relativa fuktigheten i de markisolerade krypgrunderna minskade med cirka tio procent jämfört med relativa fuktigheten i den oisolerade krypgrunden – relativa fuktigheten i den sedan länge markisolerade krypgrunden var dock ytterligare mellan två och fyra procent lägre än i de krypgrunder som nyligen hade isolerats, vilket kan bero av att luftväxlingen var sämre i de nyligen markisolerade krypgrunderna eller på högre fuktkvot på den markisolering som användes vid renoveringen än på den tidigare utförda markisoleringen.

4. Under en beräkningsperiod om tre dygn erhölls i medeltal relativa fuktigheten 89 procent i de nyligen markisolerade krypgrunderna, relativa fuktigheten 98 procent i en oisolerad referenskrypgrund samt relativa fuktigheten 87 procent i en sedan länge markisolerad krypgrund (mycket högre risk för mögelpåväxt på trä anses föreligga vid högre än 90 procent relativ fuktighet).

5. Efter uttorkning av byggfukt ur lättklinkern blev ånghaltsöverskottet i krypgrunden jämfört med utomhus lika stort i markisolerade som oisolerade krypgrunder, cirka 0.5 g/m³.

6. Med markisolering halverades risken för mögelpåväxt på obehandlat trä jämfört med risken för mögelpåväxt på obehandlat trä för en oisolerad krypgrund



Figur 5: Skillnad i ånghalt mellan krypgrunder till de undersökta husen och utomhus.

enligt en modell som baseras på beräkningsperiodens längd, relativa fuktigheten och temperaturen.

7. I en sedan länge markisolerad krypgrund beräknades risken för mögelpåväxt på obehandlat trä vara ytterligare tio procent lägre än i de nyligen markisolerade krypgrunderna.

8. Ingen som helst förekomst av mögelsvamphyfer kunde konstateras på vare sig fibercementskiva eller cementbunden träullsskiva placerad i de aktuella krypgrunderna, före eller efter markisolering, utom på cementbunden träullsskiva i ett hus, före renoveringen.

9. Tidigare rikliga förekomsten av mögelsvamphyfer på under ett år exponerad hård träfiberskiva försvann så gott som helt på ny, under ett år exponerad hård träfiberskiva i och med markisoleringen (sparsamt angrepp i en krypgrund).

10. I och med den minskade förekomsten av mögelsvamphyfer på hård träfiberskiva är renoveringsmetoden intressant då hård träfiberskiva finns heltäckande under bjälklaget.

11. Tidigare riklig förekomst av mögelsvamphyfer på trä i fyra krypgrunder och måttlig förekomst i en av krypgrunderna minskade med markisoleringen till sparsam förekomst i fyra av krypgrunderna. Fortfarande förekom riklig förekomst av mögelsvamphyfer på trä i en av de markisolerade krypgrunderna till följd av förhöjd fukthalt i lättklinkern.

12. Riklig förekomst av mögelsvamphyfer på trä i en markisolerad krypgrund till följd av förhöjd fukthalt i lättklinkern samt måttlig förekomst i den sedan länge isolerade krypgrunden gör att åtgärden ej är intressant då trä finns exponerat i krypgrunden.

13. En beräkningsmodell för risk för mögelpåväxt på obehandlat trä stämde ej med verkligheten om hänsyn ej togs till beräkningsperiodens längd, vilket gjordes i ett nytt samband.

14. Det krävs en utveckling av arbetsmetoder och verktyg om renovering av krypgrundläggning för småhus med markisolering ska uppfylla krav på en god arbetsmiljö.

Förbättring av arbetsmetoder

”Brainstorming” förekom på ett möte inför nyutveckling av arbetsmetoder för renovering av krypgrunder förutsatt att ingen personal får visas i krypgrunden under arbetsutförande [3]:

- Bägge gavlarna grävs upp i kantbalkarnas fulla längd.
- Boracolsprutning sker från en fjärrstyrd vagn eller med långa rör från gavlarna.
- Befintlig plastfolie dras ut från gavlarna.
- Förtillverkade fiberdukar med insydda plastlinor används.
- Lättklinker inblåses från bägge gavlarna med rör som dras ut efterhand.
- Avjämning sker med teleskopsloda från gavlarna.

Vid ett projektmöte gjordes vissa ändringar av ovanstående förslag [3]:

- Befintlig plastfolie behålls och perforeras med tankvagnens hjälp.
- Lättklinker inblåses med en nyutvecklad vagn som drar och styr röret i sidled.
- Mängd lättklinker avpassas så att nästan hela krypgrunden fylls utom cirka 10 cm
- Ventilerarna kontrolleras utifrån så att de fortfarande är fria eller frigörs.
- Avjämning av lättklinkern behöver ej ske, ej heller fiberduk läggas ovanpå.
- Det undersöks om lättklinkern kan dammsugas för att minska dammängden.
- Isolering bör ske under hösten för att medge så lång period som möjligt före nästa sommarperiod (lika med möglingsperiod) för uttorkning av byggfukt. ■

Referenser

[1]. Bertil Persson. *Renovering av krypgrundläggning för småhus*. TVBM-3128. ISBN 91-631-7906-7. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 2005, 83 sid., www.byggnadsmaterial.lth.se .

[2]. Elisabeth Gilert. Botaniska analysgruppen. *Rapport M05 698*. Göteborgs universitet. Göteborg. 2005.

[3]. Anders Nilsson. *Dokumentation och kvalitetssäkring av krypgrundsförsök*. Peab Sverige AB, Växjö, 2004.

[4]. Göran Hedenblad, Bertil Persson. *Den problematiska kryprumsgrunden*. Byggindustrin 90/1, 1990, sid. 39–41.

[5]. Bertil Persson, Göran Hedenblad. Lättklinkerisolerat kryprum – fältförsök i Tingsryd. Rapport U93.01. LTH Byggnadsmaterial. 1993, 23 sid.

[6]. Bertil Person. *Lättklinkerisolerad krypgrund med minskad mögelpåväxt*. Rapport U02.05. LTH Byggnadsmaterial. 2002, 309 sid.

[7]. Bertil Persson. *Mögel i småhusgrunder kan undvikas till rimliga kostnader*. Husbyggaren 5/2002, sid. 10-17.

[8]. Lars-Erik Nevander, Bengt Elmarsson. *Fukthandboken*. Sv. Byggtjänst. 1994,293.

[9]. Bertil Persson. Lättklinkerisolerad krypgrund med minskad mögelpåväxt. Bygg & teknik 2003/02, sid. 22–28.

[10]. Elisabeth Gilert. *Mikrobiologisk analys M02 425*. Mykologisektionen. Botaniska analysgruppen. Göteborg. 2002.

[11]. Elisabeth Gilert. *Mikrobiologisk analys M02 996*. ibid. 2002.

[12]. Elisabeth Gilert. Mikrobiologisk analys. Botaniska analysgruppen. *Rapport M03 936*. Göteborgs universitet. Göteborg. 2003.

[13]. Elisabeth Gilert. Botaniska analysgruppen. *Rapport M04 1072*. Göteborgs universitet. Göteborg. 2004.

Silikastoftbetong – efter 13 år. Bygg & Teknik2003/07-08, 42-47, 68-71.

Silikastoftbetong – efter 13 år

I artikeln redogörs för långtidsförsök med samverkan mellan silikastoft och Portlandcement i betong härdad förseglad, i luft eller i vatten. För detta ändamål studerades provkroppar tagna ur fem ton betong av åtta kvaliteter vid sex olika åldrar under en period av 13 år. Hälften av betongerna innehöll silikastoft. Parallella studier utfördes av hållfasthet, hydratation och relativ fuktighet, RF. Efter 13 år utfördes också tester beträffande saltfrostbeständighet hos betongerna. Artikeln innehåller en hel del värdefull data från de omfattande mätningarna och analyserna. Unika resultat och analyser presenteras beträffande samverkan mellan Portlandcement och silikastoft i betong. Projektet utfördes mellan 1989 och 2003 och finansierades av dåvarande BFR, Nutek, Cementa och Elkem, Norge.

Silikastoft har använts i betong under många år i syfte att erhålla hög hållfasthet, god gjutbarhet och andra kvalitetsegenskaper hos betong. Effektivitetsfaktorn för silikastoft vad gäller hållfasthet, hydratation och RF i fråga om inverkan av vattencementtal, vct, och ålder, har emellertid bara analyserats i begränsad omfattning. Rapporter har presenterats under årens lopp angående en minskning av hållfastheten med tiden hos betong till följd att innehåll av silikastoft [1]. En del av minskningen kunde relateras till antalet mikrosprickor i betongen. En del av den rapporterade minskning av hållfasthet kan hänföras till att olika fukttillstånd i betongen använts vid provningstillfällena. Minskningen av spräckhållfasthet jämfört med tryckhållfasthet i betong med silikastoft har kunnat korreleras till en utpräglad autogen krympning i betong med silikastoft jämfört med betong utan detta tillsatsmaterial [2]. Utvecklingen av hydratation skiljer sig avsevärt mellan betong med och utan silikastoft [3]. Puzzolanreaktionen mellan Portlandcement och silikastoft i betong innebär att en del av kalciumhydroxiden övergår i kalciumsilkathydrat, vilket minskar hydratationsgraden men ökar hållfastheten. För en fullständig puzzolanreaktionen ska äga rum i betong med vct = 0,39 krävs cirka 16 procent silikastoft beräknat på innehållet av Portlandcement. Eftersom inget vatten förbrukas under puzzolanreaktionen, äger heller ingen ökad kemisk krympning rum [3]. Kemisk krympning, cirka 25 procent, äger rum då blandningsvattnet binds till cementet. Den ökade autogena krympningen i silikastoftbetong jämfört med den autogena krympningen Portlandscementbetong (vid konstant vct) förklaras i stället av ett ökat undertryck i porerna hos silikastoftbetong jämfört med undertrycket i porerna hos Portlandscementbetong beroende av en finare porstruktur i betong med silikastoft än i betong utan detta tillsatsmaterial. Målet för projektet var att jämföra tryck- och draghållfasthet, hydratation, RF samt saltfrostbeständighet hos silikastoftbetong och Portlandscementbetong vid konstant vct över en period av 13 år. Vct varierade mellan 0,22 och 0,58. Tre härdningsmetoder användes: försegling, luft eller vatten. Massbetonger göts på sådant sätt att inverkan av gjutförhållanden och temperatur undveks. RF och hydratation studerades parallellt med de mekaniska egenskaperna. Ett annat mål för projektet, att jämföra saltfrostavskalningen hos silikastoftbetong med saltfrostavskalningen hos betong utan silikastoft, genomfördes endast vid 13 års ålder men inpå fjortonde året eftersom den senare provningen tog 300 dygn i anspråk.

Experiment

Material

Tabell 1 visar den kemiska sammansättningen hos det lågalkaliska cement (CEM I 42.5 BV/SR/LA, Degerhamn), som användes vid försöken [4]. Åtta typer av betong studerades i form av 24 stora betongprovkroppar. Ballasten bestod av krossad kvartsitisk sandsten 8–12 mm (Hardeberga, tryckhållfasthet: 333 MPa, spräckhållfasthet: 15 MPa, elasticitetsmodul: 60 GPa [5] och glödgningsförlust: 0,25 procent [6]) tillsammans med naturgrus 0–8 mm (Åstorp, granit, glödgningsförlust: 0,85 procent [6]). Silikastoft i form av granulat användes (Elkem, glödgningsförlust: 2,25 procent [6], specifik yta: 17,5 m^2/g). Superplasticerare (Cementa, naftalensulfonat) tillsattes 30 s efter allt annat material under blandningen (blandningstid: 240 s). I *tabell 2* ges betongrecept (kg/m^3 torrt material) och

Tabell 1: Cementsammansättning, CEM I 42.5 BV/SR/LA, Degerhamn (%)

Analyserade egenskaper:	
CaO	64,6 %
SiO_2	21,8
Al_2O_3	3,34
Fe_2O_3	4,39
MgO	0,84
K_2O	0,62
Na_2O	0,07
Alkali	0,48
SO_3	2,23
CO_2	0,14
Free CaO	1,13
Mineralogiska egenskaper:	
C_2S	22,5 %
C_3S	53,0
C_3A	1,4
C_4AF	13,4
Fysikaliska egenskaper:	
Glödningsförlust	0,63%
Blaine	325 m^2/kg
Densitet	3180 kg/m^3

Tabell 2: Betongrecept (kg/m^3 torrt material) och egenskaper hos betonger.

Material/vct	0,22	0,25	0,24	0,33	0,36	0,47	0,48	0,58
Kvartsit 8–12 mm	1360	1310	1310	1210	1160	1150	1150	1150
Grus 0–8 mm	525	630	549	723	730	846	825	812
Cement, lågalk.	484	456	476	400	389	303	298	299
Silkastoft	48	-	48	-	39	-	30	-
Superplasticerare	13,3	8,84	7,78	3,35	3,07	3,01	2,13	-
Densitet	2530	2510	2500	2470	2460	2440	2450	2420
Ballastinnehåll	0,71	0,74	0,75	0,75	0,73	0,71	0,73	0,70
Lufthalt (%)	0,95	1,5	0,8	1,4	1,1	1,1	0,95	0,75
Arbetbarhet (vebe)	29	34	13	25	12	9	12	15
Hållfasthet								
- 1 månad (MPa)	114	93	112	77	93	58	65	38
- 3 månader	128	104	128	91	100	70	76	45
- 15 månader	142	121	139	105	104	78	81	51
- 90 månader	139	121	131	106	106	74	79	49
- 155 månader	141	129	142	114	117	80	94	56



*Artikelförfattare är **Bertil Persson**, docent i byggnadsmaterial vid Lunds Teknisk Högskola.*

egenskaper i färskt och härdad tillstånd (MPa) [4]. Tryckhållfastheten, f_c, spräckhållfastheten, f_{ct}, och hydratationen studerades på borrkärnor, 80 mm långa med diameter 40 mm, vilka borrades ur de stora göten (250 kg vardera) och kapades med diamantklinga. Hälften av betongerna innehöll tio procent silikastoft. De stora göten utfördes med 1 m i diameter, 100 mm i tjocklek, så kallat kvarnhjul. Därvid undveks inverkan av separation i betongen och kraftig temperaturutveckling. För att simulera en lång provkropp, en pelare med 1 m i diameter, behandlades de bägge flata sidorna på ”kvarnhjulen” med minst 2 mm epoxiharts. Även den cirkulära ytan på de prover, som förseglades helt och hållet, behandlades med minst 2 mm epoxi. Fukttransporten genom epoxiskiktet var försumbar i förhållande till den fukttransport som ägde rum genom betongen – även på 13 års sikt. En tredjedel av proverna förseglades således även i randen. En tredjedel av proverna sänktes ned i vatten. Totalt utfördes ungefär cirka 2 200 mätningar, *tabell 3*. Den cirkulära randen på ”kvarnhjulen” härdades således endera förseglad, i luft eller i vatten under 13 år. Temperaturen varierade mellan 18 °C och 24 °C och omgivningens RF mellan 23 procent och 48 procent [4].

Tabell 3: Antal provningar.

Parameter	1 m	3 m	5 m	15 m	90 m	155 m
Tryckhållfasthet, f_c	144	144	72	144	144	72
Spräckhållfasthet, f_{ct}	72	72	–	72	72	72
Hydratation	144	144	72	144	144	72
RF	72	72	36	72	18	72
Saltfrostavskalning						72
Total	***432***	***432***	***180***	***432***	***378***	***360***

m = månad

Metoder

Vid 1, 3, 5, 15 och 90 månaders ålder togs borrkärnor på avstånden 50, 150 och 350 mm från den exponerade kanten på ”kvarnhjulet”. Vid 155 månaders ålder togs proverna cirka 100 mm från kanten eftersom en otillräcklig mängd material fanns att tillgå på de tidigare provplatserna i de stora göten. Under hållfasthetsprovningarna användes 4,5 mm mellanlägg av hård träfiberskiva mellan tryckpressens stålytor och betongen i syfte att utjämna eventuella ojämnheter på de kapade och slipade ändsidorna av cylindrarna. Bredden på träfiberskivan var 4,5 mm i samband med spräckning av proverna, men då placerades träskivan längs med cylinderns cirkulära kant, en träfiberlinjal per sida. Tryckbelastningen utfördes med en hastighet av 1 MPa/s dock minst 30 s för spräckproven. Plaströr i syfte att mäta RF inuti betongen göts in på olika kantavstånd, 50, 150 och 350 mm, från den exponerade, cirkulära sidan av ”kvarnhjulet.” Parallellt, intill RF-rören, göts även termoelement in för att kontrollera eventuella temperaturskillnader mellan RF-proben och betongen [7]. RF-mätpunkterna täcktes med en isolerande huv av cellplast som minskade inverkan av temperaturskillnader mellan betongen och luften i laboratoriet. Mätperioden för RF var 22 timmar. RF-proberna, av fabrikat Vaisala, kalibrerades noggrant mot en mättad saltlösning i stort sett efter varje mättillfälle [8]. Kalibreringstiden var längre än själva mättiden i och med att 3 RF användes för kalibreringen, 75,5 procent RF, 85,4 procent RF samt 95,0 procent RF (18 °C vid kalibreringen). Vid 155 månaders ålder samlades i stället lika härdade betongcylindrar av samma typ och kvalitet i dubbla, 2 mm tjocka plastpåsar, som förseglades. Efter en vecka stacks en RF-mätprob in i plastpåsarna och RF mättes i omedelbar närhet till de utborrade proverna. Vid 155 månaders ålder utsattes betongen också för saltfrostprovning i tre procent koksaltlösning. Av lika härdad betong av samma typ använde tre prover med diametern 40 mm och längden 80 mm för fryscykler varierande mellan - 20 °C och + 20 °C, en gång per dygn. Mätning av avskalningen utfördes efter 56, 112 och 300 cykler. Glödningsprov vid 1 050 °C i syfte att bestämma hydratationsgraden hos betongen utfördes på de proverna som tidigare använts för att bestämma tryckhållfastheten [3, 4]. Betongen krossades till bitar med storlek som mest 5 mm i samband med hållfasthetsproven. Bitarna torkades först en vecka vid 105 °C i torr luft före det att glödgningen utfördes under 16 timmar vid 1050 °C. Kompensation utfördes för egenförluster vid glödningen hos ballast, cement och silikastoft i samband med att hydratationsförlusterna, beräknades [4, 9].

Resultat

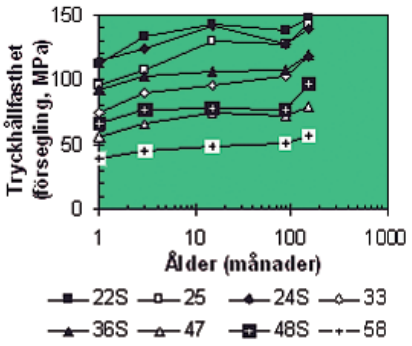
Hållfasthet

Figurerna 1–4 visar utvecklingen av tryckhållfasthet med försegling, luft- och vattenhärdning respektive oberoende av lagringssätt. Följande inverkan av mellanlägg på tryckhållfastheten, f_c, jämfört med tryckhållfastheten utan mellanlägg, f_{cc}, erhölls (MPa):

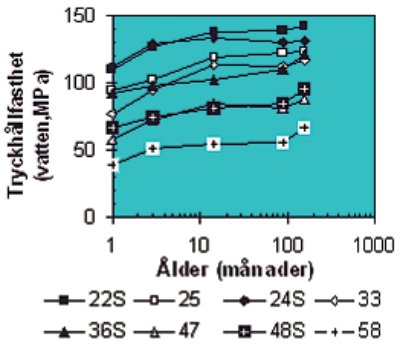
$$f_c = 0{,}94 \cdot f_{cc} \qquad (1)$$

f_c betecknar tryckhållfasthet med mellanlägg av 4,5 mm hård träfiberskiva,
f_{cc} betecknar tryckhållfasthet utan mellanlägg.

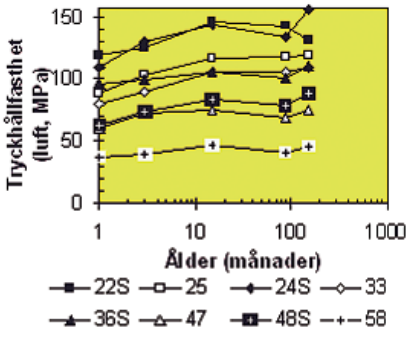
Mellanläggen minskade således tryckhållfastheten med cirka sex procent. Fukt-



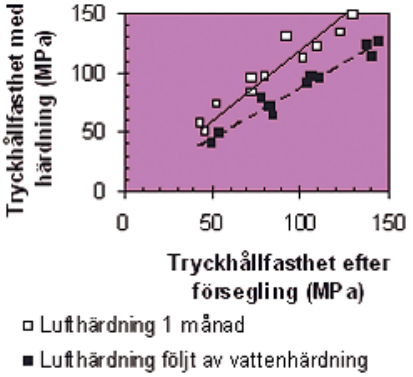
Figur 1: Tryckhållfasthet med förseglad härdning som funktion av ålder.
S = 10 % silikastoft; 22 = vct (%).



Figur 3: Tryckhållfasthet med vattenhärdning som funktion av ålder.
S = 10 % silikastoft; 22 = vct (%).



Figur 2: Tryckhållfasthet med lufthärdning som funktion av ålder.
S = 10 % silikastoft; 22 = vct (%).



Figur 4: Effekt av härdningssätt på tryckhållfasthet.

förhållandena i borrkärnan under provningen hade också inverkan på resultatet. Tryckhållfasthet mättes också vid fem månaders ålder efter en månads av intensiv torkning av borrkärnan vid 55 °C, f_{cd}, och även med ovannämnda härdningssätt i uttorkat tillstånd följt av vattenhärdning, f_{cw}, under ytterligare en månad. Följande samband erhölls:

$$f_{cd} = 1{,}19 \cdot f_c \qquad (2)$$

$$f_{cw} = 0{,}87 \cdot f_c \qquad (3)$$

Fukttillståndet hade således stor betydelse för provningsresultatet. Med intensiv torkning ökade tryckhållfastheten med cirka 19 procent medan en påföljande vattenlagring minskade tryckhållfastheten med cirka 13 procent, allt jämfört med en provning i förseglat fukttillstånd [4]. Eftersom såväl luftlagring som vattenlagring är dimensionsberoende vad gäller resulterande fuktförhållanden i betongen [7], är dessa lagringssätt beroende av den nationella standarden i fråga om storlek på provkropparna samt deras utformning, cylinder eller kub. Internationella jämförelser av tryckhållfasthet på lång sikt blir därför svåra att utföra eftersom endera luft- eller vattenlagring föreskrivs. Bästa lagringssätt för långtidsprovningar av tryckhållfastheten är troligen försegling men detta lagringssätt är i praktiken svårt att åstadkomma. Små fuktläckage under lång tid kan torka ut provet. *Figurerna 5–8* visar tryckhållfasthet som funktion av vct vid förseglad, luft- eller vattenhärdning samt vid alla olika härdningssätt (fyllda markeringar är lika med tio procent silikastoft). Följande samband ger utvecklingen av betongens tryckhållfasthet (MPa):

Tabell 4: Konstanter i ekvationer (4) och (5) (MPa).

Ålder (månader)	Silika-stoft	A	B	C	D
1	10 %	-188,2	157,4	0,1945	0,0658
3	10 %	-207,9	175,9	0,2056	0,0635
15	10 %	-241,9	195,5	0,2315	0,0523
90	10 %	-225,0	187,2	–	–
155	10 %	-189,2	185,0	0,2746	0,0487
1	–	-163,5	132,7	0,1752	0,0878
3	–	-177,2	149,2	0,1971	0,0926
15	–	-212,0	174,6	0,2180	0,0981
90	–	-222,6	177,6	–	–
155	–	-226,6	186,5	0,2312	0,0928

$$f_c(vct) = A \cdot (vct) + B \qquad (4)$$

$f_c(vct)$ betecknar tryckhållfasthet (MPa), A, B betecknar konstanter givna i *tabell 4*.

Härdningsförhållanden hade en liten effekt på tryckhållfasthet efter lång tid. Emellertid var inverkan av silikastoft på tryckhållfastheten mera signifikant. Vid en månads ålder erhöll betong med tio procent silikastoft cirka 15 MPa högre tryckhållfasthet än betong utan silikastoft (då vct hölls konstant). Baserat på samband (4) erhölls följande tidsberoende för tryckhållfastheten:

$$(\delta f_c/\delta t)_S \approx vct \cdot (0{,}013 \cdot t - 0{,}9) + 5/t \qquad (5)$$

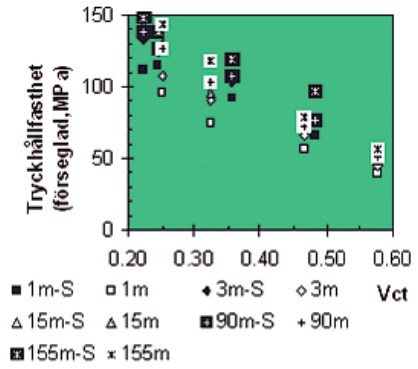
$$\delta f_c/\delta t \approx vct \cdot (0{,}009 \cdot t - 1) + 10/t \qquad (6)$$

t betecknar ålder (månader),
$(\delta f_c/\delta t)$ betecknar utvecklingen av tryckhållfasthet i betong utan silikastoft (MPa/månad),
$(\delta f_c/\delta t)_S$ betecknar utvecklingen av tryckhållfasthet med tio procent silikastoft (MPa/månad).

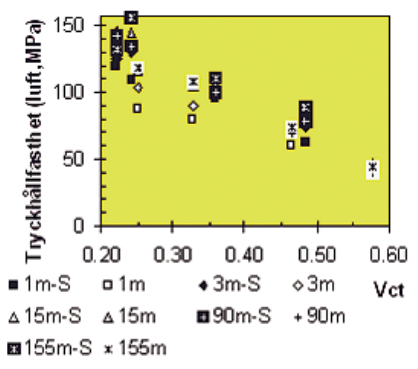
I genomsnitt var utvecklingen av tryckhållfastheten dubbelt så stor i betong utan silikastoft som i betong med tio procent silikastoft. *Figur 9* visar medelvärdet av spräckhållfastheten oberoende av härdningssätt.

Hydratation, relativ fuktighet och saltfrostavskalning

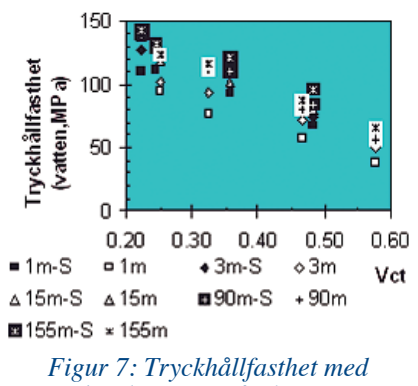
Figurer 10–12 på sidan 46 visar utvecklingen av hydratation (icke förångbar vattenmängd i förhållande till cement-



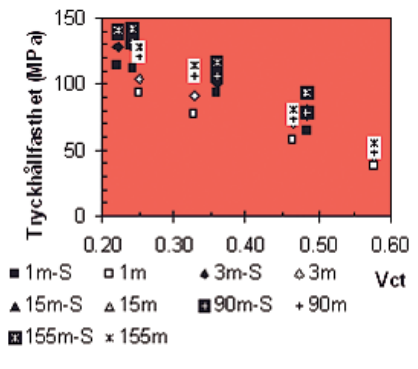
Figur 5: Tryckhållfasthet med förseglad härdning som funktion av vct. S = 10 % silikastoft; 22 = vct (%).



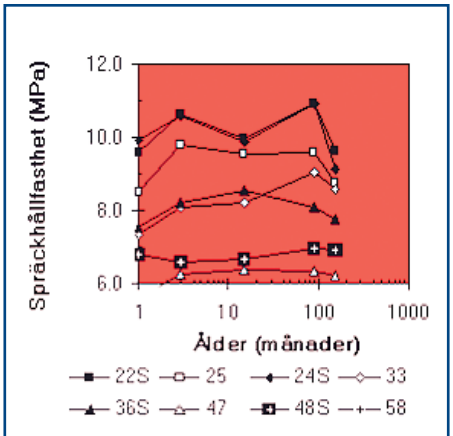
Figur 6: Tryckhållfasthet med lufthärdning som funktion av vct. S = 10 % silikastoft; 22 = vct (%).



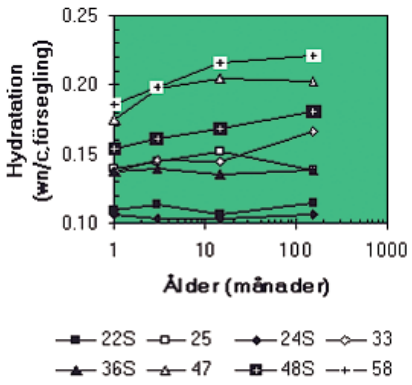
Figur 7: Tryckhållfasthet med vattenhärdning som funktion av vct.



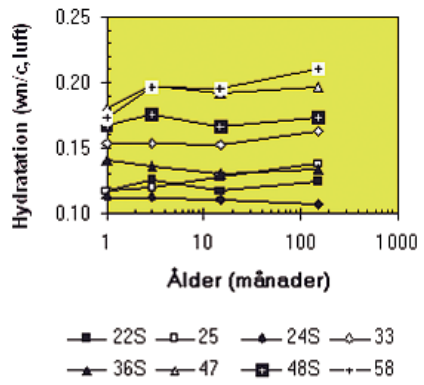
Figur 8: Tryckhållfasthet oberoende av härdningssätt.



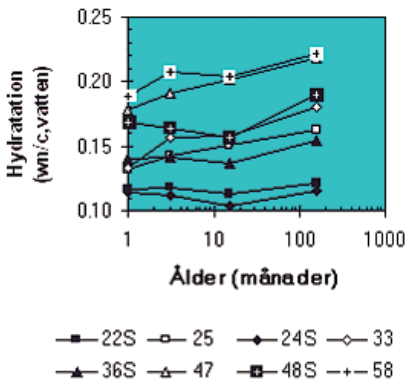
Figur 9: Spräckhållfasthet oberoende av härdning som funktion av ålder. S = 10 % silikastoft; 22 = vct (%).



Figur 10: Hydratation, w_n/c, som funktion av ålder (förseglad).



Figur 11: Hydratation, w_n/c, som funktion av ålder (lufthärdning).



Figur 12: Hydratation, w_n/c, som funktion av ålder (vatten).

mängden) med försegling, luft- och vattenhärdning respektive. *Figur 13* visar hydratationen hos alla borrkärnor som studerats. Följande samband användes för att beskriva hydratationen, w_n/c, som funktion av vct:

$$w_n/c = C \cdot (vct) + D \quad (7)$$

w_n/c betecknar hydratiserat vatten i förhållande till cementinnehåll,
C, D betecknar konstanter visade i tabell 4.

Hydratationsgraden, $\alpha = 1$, kan erhållas med vct > 0,39 [10]. Maximala hydratationsgraden, α_{max}, för betong med vct < 0,39 är lineärt beroende av vct [4]:

$$\alpha_{max} = w/(0{,}30 \cdot c) \quad (8)$$

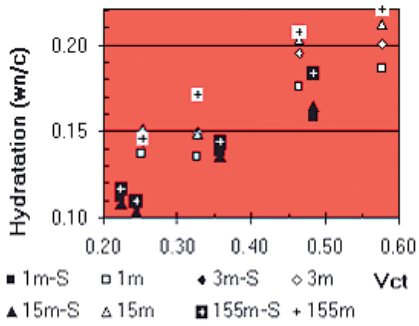
Hydratationsgraden, α, kan uttryckas som:

$$\alpha = w_n/(0{,}25 \cdot c) \quad (9)$$

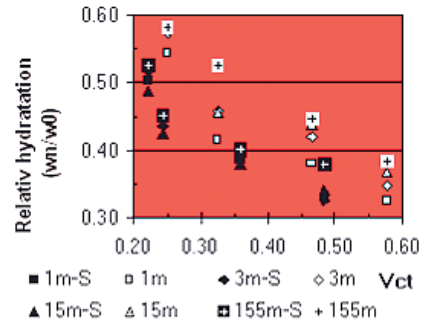
Om samband (8) och (9) divideras med varandra erhålls maximala relativa hydratationsgraden:

$$(w_n/w)_{max} = 0{,}64 \quad \{0 < vct < 0{,}39\} \quad (10)$$

$$(w_n/w)_{max} = 0{,}25 \cdot c/w \quad \{vct > 0{,}39\} \quad (11)$$



Figur 13: Hydratation som funktion av vct (oberoende härdning).



Figur 14: Relativ hydratation som funktion av vct (oberoende härdning).

Figur 14 visar relativa hydratationen (icke förångbar vattenmängd i förhållande till mängden blandningsvatten) i betong oberoende av härdningssättet som funktion av vct. Figur 14 gav samband för utvecklingen av relativa hydratationen med förseglad härdning som funktion av vct:

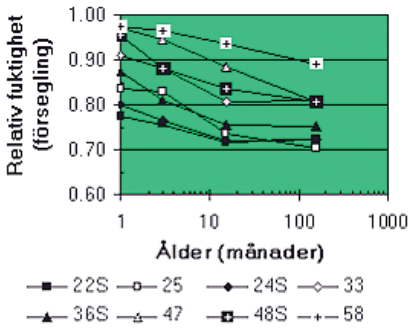
$$w_n/w_{0S} = (0{,}012 \cdot \ln(t) + 0{,}219) \cdot \cdot (vct) \exp(0{,}0312 \cdot \ln(t) - 0{,}522) \quad \{10\ \%\ \text{silikastoft}\} \quad (12)$$

$$w_n/w_0 = (0{,}0116 \cdot \ln(t) + 0{,}243) \cdot \cdot (vct) \exp(0{,}0149 \cdot \ln(t) - 0{,}568) \quad \{\text{inget silikastoft}\} \quad (13)$$

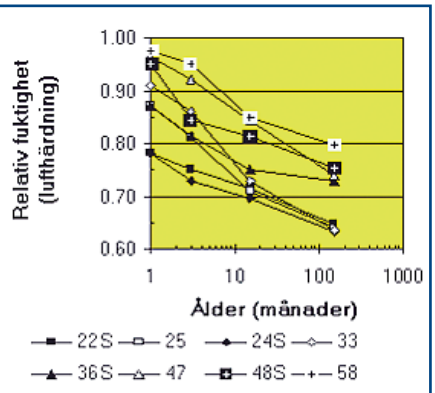
Relativ fuktighet, RF, hos betongen har stor betydelse i syfte att förklara utvecklingen av hydratationen [10]. *Figurer 15–17 på nästa sida* visar utvecklingen av RF med förseglad, luft- och vattenhärdning (fyllda markeringar = tio procent silikastoft). *Figur 18* visar RF vid försegling som funktion av vct. Från figur 18 erhölls följande samband för RF (med eller utan silikastoft) i förhållande till ålder och vct:

$$RH_S(t,vct) = (0{,}62 \cdot ((1 - 0{,}1 \cdot \ln(t)) \cdot (vct) + 1) \quad \{1 < t < 155 \text{ månader}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \quad (14)$$

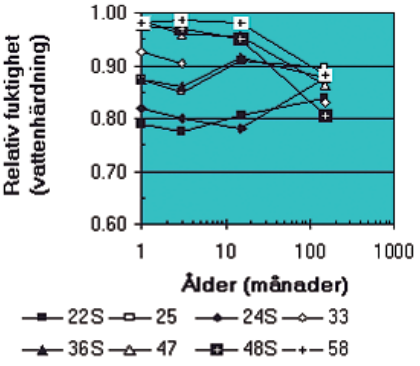
$$RF(t,vct) = 0{,}44 \cdot (1 + 0{,}038 \cdot \ln(t)) \cdot (vct) - 0{,}032 \cdot \ln(t) + 0{,}75 \quad \{1 < t < 155\ \text{m}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \quad (15)$$



Figur 15: RF med förseglad härdning som funktion av ålder.



Figur 16: RF med lufthärdning som funktion av ålder (månader). S = 10 % silikastoft; 22 = vct (%).

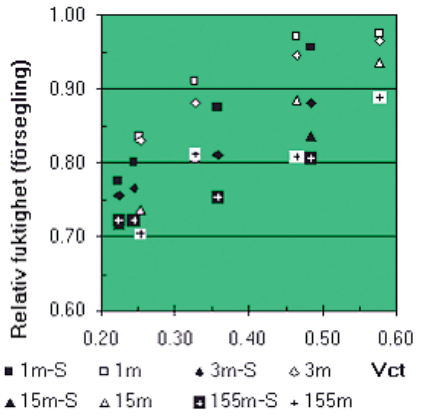


Figur 17: RF med vattenhärdning som funktion av ålder (månader). S = 10 % silikastoft; 22 = vct (%).

Tabell 5: Saltfrostavskalning (kg/m²).

Härdning	Vct	56 cykler	112 cykler	300 cykler
Luft	0,222S	0,000	0,018	1,673
	0,243S	0,000	0,031	2,165
	0,251	0,036	0,219	1,088
	0,326	0,017	0,713	>3
	0,358S	0,008	>3	>3
	0,465	>3	>3	>3
	0,483S	0,126	>3	>3
	0,577	>3	>3	>3
Försegling	0,222S	0,000	0,007	0,405
	0,243S	0,000	0,000	2,381
	0,251	0,023	0,184	1,409
	0,326	0,046	>3	>3
	0,358S	0,000	>3	>3
	0,465	2,256	>3	>3
	0,483S	0,149	>3	>3
	0,577	0,501	>3	>3
Vatten	0,222S	0,000	0,000	0,151
	0,243S	0,000	0,003	0,063
	0,251	0,119	0,113	0,320
	0,326	0,015	>3	>3
	0,358S	0,015	>3	>3
	0,465	4,107	>3	>3
	0,483S	0,008	>3	>3
	0,577	8,412	12,192	12,192

Fryscykel/dygn: +20 °C/-20 °C; S = 10 % silikastoft.



Figur 18: RF med förseglad härdning som funktion av vct. m = månad; S= 10 % silikastoft.

ln(*t*) betecknar naturliga logaritmen av ålder, *t*, i månader (m),
m betecknar månader,
S betecknar tio procent silikastoft.

Efter 15 månaders ålder bibehölls RF i betongen mer eller mindre konstant med förseglad härdning enligt tillgängliga mätdata, figur 15, utom vid högt vct och i betong utan silikastoft betong (minskande RF). *Tabell 5* visar saltfrostavskalning efter 56, 112 och 300 cykler. Ingen luftporbildare användes i betongen, vilket i sig är dålig betongteknologi. Saltfrostavskalning var större hos betong utan silikastoft, troligen beroende av självuttorkning samt förmågan hos silikastoft att förhindra kloridinträngning i betongen. Efter 112 cykler visade all betong med tillräckligt lågt vct < 0,25 mycket liten saltfrostavskalning, tabell 5, även utan lufttillsats.

Bertil Perssons artikel fortsätter och avslutas i nästa nummer av Bygg & teknik, nummer 8/03 som utkommer – vecka 48 – i slutet av november.

Silikastoftbetong – efter 13 år

Här fortsätter och avslutas *Bertil Persons* artikel om silikastoftbetong

Effektivitetsfaktorer

Allmänt

Effektivitetsfaktorn för silikastoft, k, definierades enligt följande:

$$(vct)_{eff} = w/(c + k \cdot s) \qquad (16)$$

c betecknar cementinnehåll (kg/m^3),
k betecknar effektivitetsfaktor av silikastoft,
s betecknar innehåll av silikastoft (lika med tio procent för betongrecept 1, 3, 5 och 7, tabell 2),
w betecknar allt blandningsvatten (kg/m^3).

$(vct)_{eff}$ betecknar effektivt (eff) vct, dvs det vct som användes i betong utan silikastoft för att erhålla identiskt lika egenskaper (tryckhållfasthet, spräckhållfasthet, hydratation och relativ fuktighet) som i betong med tio procent silikastoft. Ungefär 60 procent av mängden silikastoft (tio procent silikastoft beräknat på basis av cementinnehåll) var tillgänglig för att reaktionen med Portlandcement skulle avslutas förutsatt att en hydratationsgrad, $\alpha = 1$. Efter 90 månaders hydratation varierade mängden icke förångbart vatten i förhållande till cementmängden, w_n/c, i betong utan silikastoft mellan 0,16 och 0,22, dvs mindre än 0,25. Mängden icke förångbart vatten i förhållande till cementmängden, $w_n/c \approx$ 0,25, krävs för att reaktionen mellan vatten och cement ska avslutas. Emellertid var w_n/c var mindre än 0,6 • 0,25 = 0,15 fortfarande vid 155 månaders ålder i betong med vct < 0,39, vilket visar att en tillräcklig mängd silikastoft bibehölls i betong med vct < 0,39 för att en långsiktig puzzolanreaktion skulle kunna äga rum mellan Portlandcement och silikastoft. För betong med vct ≥ 0,39 ägde puzzolanreaktionen mellan Portlandcement och silikastoft i huvudsak rum före en månads ålder men för betong med vct < 0,39 observerades en puzzolanreaktion fortfarande vid 15 månaders ålder. Från praktisk synpunkt får emellertid mängden silikastoft i betongen inte överstiga de nationella bestämmelserna även om det från teoretisk synpunkt är intressant att studera egenskaper hos betong med mer än tio procentsilikastoft [4].

Korrigering

Så har ska formlerna 12 och 13 på sidan 46 i förra numret se ut:

$$w_n/w_{0S} = (0{,}012 \cdot \ln(t) + 0{,}219) \cdot \cdot (vct)^{(0{,}0312 \cdot \ln(t) - 0{,}522)}$$
{10 % silikastoft} (12)

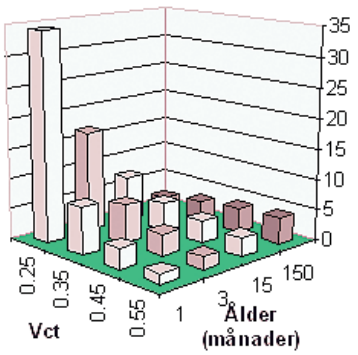
$$w_n/w_0 = (0{,}0116 \cdot \ln(t) + 0{,}243) \cdot \cdot (vct)^{(0{,}0149 \cdot \ln(t) - 0{,}568)}$$
{inget silikastoft} (13)

Relativ fuktighet

Betongens relativ fuktighet, RF, var av utomordentligt stor betydelse för att beskriva hydratationen av cementet, som bara äger rum vid RF > 72 procent [11]. Reaktionsprodukter, dvs hydroxider från hydratationen erfordrades för att puzzolanreaktionen skulle äga rum [12]. När relativa fuktigheten minskade, minskade även puzzolanreaktionen för att slutligen helt avstanna. Självuttorkningen hos betongen var också av stor betydelse [3]. Autogen krympning var mer uttalad i betong med silikastoft än i betong utan silikastoft beroende av att porstrukturen förfinades med silikastoft i betongen jämfört med porstrukturen i betong utan silikastoft [12]. Autogen krympning var klart relaterad till självuttorkningen hos betong [2]. Det observerades också att självuttorkningen orsakades av den kemiska krympningen av blandningsvattnet under hydratationen vilket gav upphov till ett undertryck i porvattnet, också mer uttalat i betong med silikastoft än i betong utan detta tillsatsmaterial. Autogen krympning förorsakade dragpåkänningar i cementpastan och tryckpåkänningar i ballasten i betong. Detta var av stor betydelse för att förklara de mekaniska egenskaperna hos betong såsom tryckhållfasthet och spräckhållfasthet. Beroende av en tryckpåkänning hos ballasten i betong med lågt vct (vilken ökar kontinuerligt beroende av autogena krympningen) kan den totala spräckhållfasthet hos betongen minska något i betong med tio procent silikastoft vid lågt vct. När den autogena krympningen överskrider dragbrottöjningen hos cementpastan, vilket ofta inträffar för betong med tio procent silikastoft och lågt vct, uppstår sprickor i cementpastan, eventuellt även i betongen beroende av ballastens egenskaper. Effektivitetsfaktor relaterad till självuttorkning, k_{se}, och sambanden (14) och (15) ovan användes, dvs vct i samband (15) ersattes med $(vct)_{eff}$ enligt samband (16). Efter detta utbyte av vct i samband (15) sattes samband (14) och (15) lika och effektivitetsfaktor, k_{se}, kunde enkelt beräknas. *Figur 19* visar effektivitetsfaktorn relaterad till självuttorkning. Effektivitetsfaktor, k_{se}, relaterades till vct och ålder hos betongen, t (månader), genom följande samband:

$$k_{se}(t,vct) = (0{,}71 \cdot (1 + 0{,}038 \cdot \ln(t)) \cdot (vct)/((1 - 0{,}1 \cdot \ln(t)) \cdot (vct) + 0{,}0516 \cdot \ln(t) - 0{,}21) - 1) \cdot 10 \quad \{1 < t < 155 \text{ månader}; 0{,}25 < vct < 0{,}50\} \qquad (17)$$

Vid vct = 0,43, observerades effektivitetsfaktor, k_{se} = 3,8, tämligen oberoende av ålder, vilket tydde på att det vct som krävdes för att full hydratation skulle äga rum var något större än vct = 0,39 enligt tidigare känt [10]. I betong med vct < 0,43 var emellertid $k_{se} > 3{,}8$ från 1 till 15 månaders ålder samt $k_{se} < 3{,}8$ vid 155 månaders ålder eftersom hydratationen då upphörde och därmed också puzzolanreaktionen. Motsatt förhållande observerades för betong med vct ≥ 0,43 i vilken hydratationen fortsatte vid högre vct.



Figur 19: Effektivitetsfaktor hos silikastoft relaterad till relativ fuktighet vid förseglad härdning.

Hållfasthet

Inledningsvis var effekten av silikastoft på tryckhållfastheten uttalad, speciellt för betong med lågt vct. En tidig puzzolanreaktion skapade reaktionsprodukter såsom kalciumsilikathydrater i stället för av kalciumhydrater med ungefär 15 MPa högre tryckhållfasthet. Emellertid, beroende av en remarkabel självuttorkning i betong med silikastoft, speciellt i betong med lågt vct, avstannade hydratationen och därför även puzzolanreaktionen och således även ökningen av tryckhållfasthet, jämför sambanden (5) och (6) ovan. Ökningen av tryckhållfastheten på lång sikt var ungefär 50 procent större i betong utan silikastoft än i betong med tio procent silikastoft. Alla typer av härdning studerades i fråga om effektivitetsfaktorn relaterad till tryckhållfasthet, k_{se}. För att beräkna effektivitetsfaktorn användes sambanden (18) och (19), dvs vct i sambandet för betong utan silikastoft ersattes med $(vct)_{eff}$ enligt samband (16).

$$f_{cS} = (0{,}00661 \cdot t^2 - 0{,}902 \cdot t - 206) \cdot vct + 4{,}98\ln(t) + 167 \quad \{1 < t < 150 \text{ mån.}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (18)$$

$$f_c = (0{,}00433 \cdot t^2 - 0{,}979 \cdot t - 17) \cdot vct + 9{,}99\ln(t) + 137 \quad \{1 < t < 150 \text{ mån.}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (19)$$

ln(t) betecknar naturliga logaritmen av ålder, t, i månader (m),
S betecknar tio procent silikastoft.

Efter detta utbyte av vct i samband (19) sattes sambanden lika för betong med och utan silikastoft och effektivitetsfaktorn, k_{sc}, kunder enkelt beräknas. *Figur 20 på nästa sida* visar effektivitetsfaktorn relaterad till tryckhållfasthet beskriven av följande samband:

$$k_{sc}(t,vct) = 10 \cdot ((0{,}00433 \cdot t^2 - 0{,}979 \cdot t - 177) \cdot (vct)/((0{,}00661 \cdot t^2 - 0{,}902 \cdot t - 206) \cdot vct) - 5 \cdot \ln(t) + 30) - 1) \quad \{1 < t < 155 \text{ m}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (20)$$

Alla härdningssätt studerades i fråga om effektivitetsfaktorn relaterad till spräckhållfasthet, k_{sp}. För att beräkna effektivi-

tetsfaktorn användes sambanden (21) och (22), dvs vct i samband för betong utan silikastoft ersattes med $(vct)_{eff}$ enligt samband (16). Efter detta utbyte av vct i samband (22) sattes sambanden för betong med och utan silikastoft lika och effektivitetsfaktor, k_{st}, kunde beräknas på enkelt sätt.

$$f_{ctS}(t,vct) = (0{,}719 \cdot \ln(t) - 14{,}5) \cdot (vct) - 0{,}285 \cdot \ln(t) + 13{,}5 \quad \{1 < t < 155 \text{ m}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (21)$$

$$f_{ct}(t,vct) = (0{,}197 \cdot \ln(t) - 15{,}2) \cdot (vct) + 0{,}0278 \cdot \ln(t) + 12{,}8 \quad \{1 < t < 155 \text{ m}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (22)$$

ln(t) betecknar naturliga logaritmen av ålder, t, i månader (m),
S betecknar tio procent silikastoft.

Figur 21 visar effektivitetsfaktorn relaterad till spräckhållfasthet, k_{st}, beskriven av följande samband:

$$k_{st} = 10 \cdot ((0{,}197 \cdot \ln(t) - 15{,}2) \cdot (vct)/((0{,}719 \cdot \ln(t) - 14{,}5) \cdot (vct) - 0{,}313 \cdot \ln(t) + 0{,}7) - 1) \quad \{1 < t < 155 \text{ m}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (23)$$

Vid vct < 0,48 minskade effektivitetsfaktorn för spräckhållfasthet med tiden (effektivitetsfaktor = 0 vid vct = 0,25). Observationen att spräckhållfasthet minskade med ökande tryckhållfasthet var troligen beroende av maximala spräckhållfasthet hos ballasten ($f_{sp,max} \approx 0{,}75 \cdot 15 =$ 12 MPa). Utvecklingen av förhållandet mellan tryckhållfasthet och spräckhållfasthet påverkades också av puzzolanreaktionen mellan Portlandcement och silikastoft. Silikastoft används ofta betong med högre tryckhållfasthet. Som nämnts ovan kan en uttalad, tidig självuttorkning i betong med silikastoft ge upphov till mikrosprickor i cementpastan och därför förhållandevis lägre spräckhållfasthet i en silikastoftbetong än i betong utan silikastoft. Inverkan av silikastoft på betongens spräckhållfasthet påverkade därför, på sikt, även förhållandet mellan tryckhållfasthet och spräckhållfasthet i betong. *Figur 22* visar spräckhållfastheten som funktion av tryckhållfastheten för cirka 1 000 provkroppar. Förhållandet mellan spräckhållfasthet minskade såväl med högre tryckhållfasthet som med åldern hos silikastoftbetong jämfört med betong utan silikastoft. Följande samband erhölls:

$$f_{ctS} = f_{cS} \cdot 0{,}0866 \cdot (1 - 0{,}0468 \cdot \ln(t)) \quad \{60 < f_c < 150 \text{ MPa}; 1 < t < 90 \text{ månader}\} \qquad (24)$$

$$f_{ct} = f_c \cdot 0{,}0938 \cdot (1 - 0{,}0447 \cdot \ln(t)) \quad \{30 < f_c < 120 \text{ MPa}; 1 < t < 155 \text{ månader}\} \qquad (25)$$

f_c betecknar tryckhållfasthet (MPa),
f_{ct} betecknar spräckhållfasthet (MPa),
ln (t) betecknar naturliga logaritmen av ålder, t (månader),
S betecknar tio procent silikastoft beräknat på basis av cementinnehållet.

Hydratation

Endast förseglad härdning var studerades i fråga om effektivitetsfaktor, k_{wn}, relaterad till relativa hydratationen, w_n/w. I syfte att beräkna effektivitetsfaktor användes sambanden (26) och (27), dvs vct i samband (27) gällande för betong utan silikastoft ersattes med $(vct)_{eff}$ enligt samband (16).

$$w_n/c_S = (0{,}0162 \cdot \ln(t) + 0{,}191)(vct) - 0{,}00365 \cdot \ln(t) + 0{,}0657 \quad \{1 < t < 155 \text{ mån.}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (26)$$

$$w_n/c = (0{,}0108 \cdot \ln(t) + 0{,}182)(vct) + 0{,}000966 \cdot \ln(t) + 0{,}0907 \quad \{1 < t < 155 \text{ mån.}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (27)$$

ln(t) betecknar naturliga logaritmen av åldern hos betongen, t (månader).

Efter detta utbyte av vct i samband (27) sattes hydratationssamband för betong med och utan silikastoft lika och effektivitetsfaktor, k_{swn} beräknades. *Figur 23* visar effektivitetsfaktor, k_{wn}, relaterad till relativa hydratationen, w_n/w, beskriven med följande samband:

$$k_{wn}(t,vct) = -10 \cdot ((0{,}0108 \cdot \ln(t) + 0{,}182) \cdot (vct)/((0{,}0162 \cdot \ln(t) + 0{,}191) \cdot (vct) - 0{,}00462 \cdot \ln(t) - 0{,}025)-1) \quad \{1 < t < 150 \text{ månader}; 0{,}25 < vct < 0{,}55\} \qquad (28)$$

ln(t) betecknar naturliga logaritmen som funktion av åldern hos betongen, t (månader).

Samverkan mellan Portlandcement och silikastoft påverkades helt klart även förhållandet mellan relativa hydratationen, w_n/w, och tryckhållfastheten, *figur 24*. För betong med tio procent silikastoft erhölls maximal tryckhållfasthet vid $w_n/w \approx 0{,}52$ medan maximal tryckhållfasthet erhölls vid $w_n/w \approx 0{,}6$ för betong utan silikastoft. Vid 155 månaders ålder erhölls inga tecken på minskande relativa hydratation i betong med silikastoft även om så har rapporterats [12].

Effekt av silikastoft på saltfrostbeständigheten

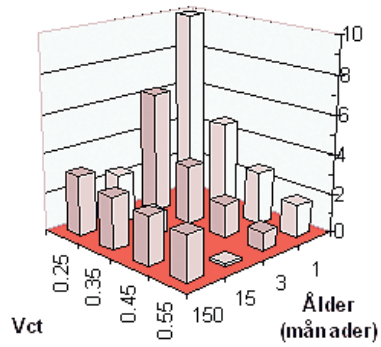
I *figur 25* visas effekten av silikastoft på saltfrostbeständigheten hos betong utan lufttillsats. Tio procent silikastoft i betongen minskade saltfrostavskalningen avsevärt, till cirka en tredjedel av den saltfrostavskalning som erhölls i betong utan silikastoft (utan luftporbildare). Detta ger en mycket hög effektivitetsfaktor för silikastoft avseende saltfrostavskalning beräknad med sambandet (16), cirka 30. Från figur 25 kan följande tendenssamband erhållas för saltfrostavskalning efter 56 cykler:

$$s_{cS} = 64{,}7 \cdot (vct)^{8{,}7} \quad \{0{,}25 < \text{vct} < 0{,}55\} \qquad (29)$$

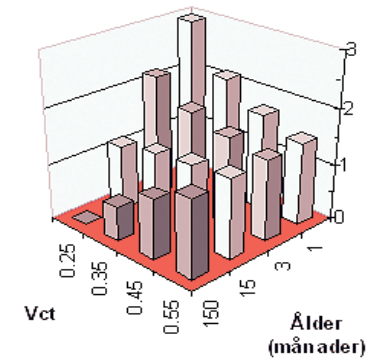
$$s_c = 2\,070 \cdot (vct)^{8{,}7} \quad \{0{,}25 < \text{vct} < 0{,}55\} \qquad (30)$$

s_c betecknar saltfrostavskalning (kg/m^2),
S betecknar tio procent silikastoft beräknat på basis av cement innehåll.

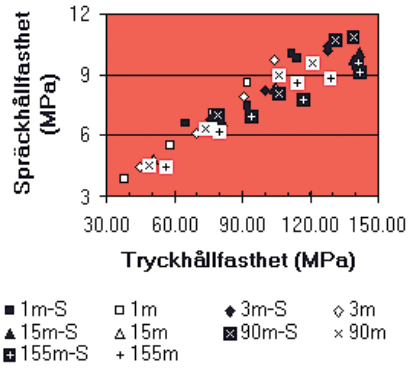
Även efter 112 cykler består effekten av silikastoft på saltfrostavskalning hos betongen, mer eller mindre identiskt lika effekten vid 56 cykler. Vid 56 frostcykler med ± 20°C en gång per dygn accepteras normalt en saltfrostavskalning av 0,5 kg/m^2. Detta betyder i sin tur att betong



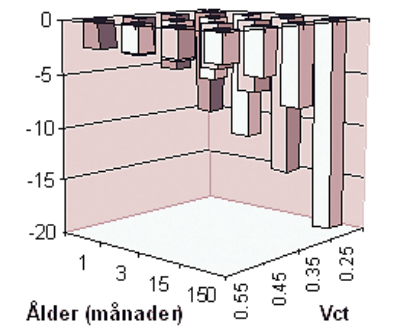
Figur 20: Effektivitetsfaktor hos silikastoft relaterad till tryckhållfasthet oberoende av härdningssätt.



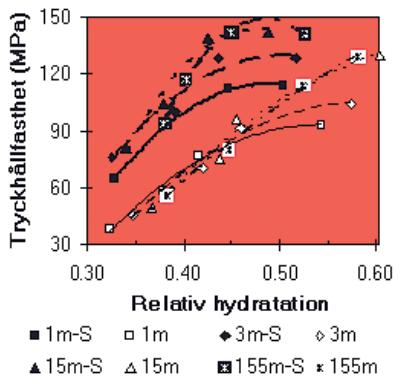
Figur 21: Effektivitetsfaktor hos silikastoft (spräckhållfasthet) oberoende av härdningssätt.



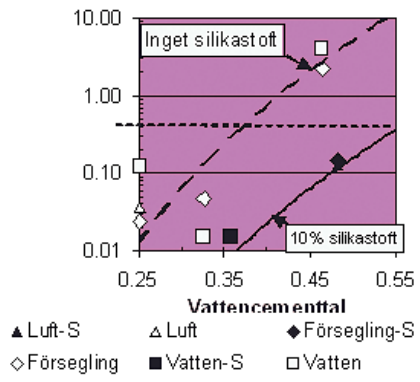
Figur 22: Spräckhållfasthet som funktion av tryckhållfasthet.



Figur 23: Effektivitetsfaktor för silikastoft (hydratation).



Figur 24: Tryckhållfasthet som funktion av relativ hydratation.



Figur 25: Saltfrostavskalning efter 56 cykler.

smed tio procent silikastoft (utan luftporbildare) uppfyller kraven på saltfrostavskalning vid vct < 0,55. För att betong utan silikastoft (utan luftporbildare) ska uppfylla kraven på saltfrostavskalning krävs på motsvarande sätt vct < 0,35. Skillnaden i saltfrostbeständighet förklaras troligen av skillnaden i kloridinträngning i betong med och utan silikastoft. Silikastoft förhindrar på ett effektivt sätt kloridmigration i betong [13]. Om mindre kloridmängd migrerar in i betongen blir också påverkan av koksalt mindre och därmed förbättras även saltfrostbeständigheten. Bakom den minskade kloridinträngningen i betong med silikastoft jämfört med betong utan silikastoft ligger i sin tur självuttorkningen. Klorider kan inte transporteras i tomma porer i betong vilka uppstår till följd av självuttorkning, större i betong med tio procent silikastoft än i betong utan silikastoft [14, 15]. Det skulle därför vara av mycket stort intresse att kartera kloridinträngning i de broar, pelare, hamnar etc i Sverige som under ett tjugotal år har tillverkats med en, om än liten, mängd silikastoft, cirka tre procent, i syfte att jämföra kloridinträngningen i dessa konstruktioner med motsvarande konstruktioner utförda av betong utan silikastoft.

Sammanfattning

I denna artikel har en jämförande 13-års studie av väsentliga egenskaper hos Portlandcement – och silikastoftbetong redovisats. Mekaniska egenskaper har uppmätts och deras utveckling med tiden beräknats med hänsyn till betongens innehåll av silikastoft och dess vattencementtal, vct. Tidigare rapporter beträffande en minskning av tryckhållfastheten med tiden i silikastoftbetong har kunnat vederläggas. Följande slutsatser drogs [16–18]:

- Silikastoft hade en positiv effekt på alla studerade egenskaper hos betongen (spräck- och tryckhållfasthet och relativ fuktighet) med undantag för hydratationsgraden, som var mindre i betong med silikastoft än i betong utan detta tillsatsmaterial. Effekten av silikastoft var uttalad för betong med lågt vct. Silikastoft hade i allmänheten större effekt på spräck- och tryckhållfastheten och på relativa fuktigheten än vad motsvarande mängd cement hade. Effektivitetsfaktor för silikastoft jämfört med cement varierade mellan 0 och 25 utom för på hydratation då effektivitetsfaktorn varierade mellan - 3 och -20.
- Beroende av en låg hydratationsgrad hos cement i betong med vct < 0,43, bibehölls silikastoft tillgängligt för att en puzzolanreaktion med Portlandcement skulle kunna äga rum, åtminstone fram till 15 månaders ålder. I betong med högre vct upphörde puzzolanreaktionen före en månads ålder beroende av att en otillräcklig mängd silikastoft var tillgänglig i receptet.
- Efter lång tid, 155 månader, var effektivitetsfaktor av silikastoft för tryckhållfastheten ungefär 2. Mellan 15 och 155 månaders ålder stabiliserades effektivitetsfaktor av silikastoft för tryckhållfasthet kring 2 jämfört med cement. Vid vct < 0,43 minskade effektivitetsfaktor av silikastoft för spräckhållfastheten med tiden (effektivitetsfaktor = 0 vid vct = 0,25). Detta fenomen förklarades av en uttalad självuttorkning i betong med tio procent silikastoft vilket logiskt stoppade hydratation i låg-vct-betong. I betong med högre vct, fanns inget silikastoft tillgängligt för att puzzolanreaktionen skulle äga rum efter en månads ålder.
- Sambandet mellan hydratationsgraden och tryckhållfastheten utvecklades olika i betong med och utan silikastoft beroende av puzzolanreaktionen mellan Portlandcement och silikastoft. Hydratation var en irrelevant parameter för att beskriva egenskaper hos betong med silikastoft.
- Vid 56 saltfrostcykler om ± 20 °C med en frysperiod per 24 timmar erhölls en normalt acceptabel saltfrostavskalning i betong utan luftporbildare med vct < 0,55 och tio procent silikastoft. För betong utan silikastoft krävdes vct < 0,35 för att erhålla en acceptabel saltfrostavskalning hos betongen, < 0,5 kg/m^2. Förklaringen till denna skillnad i saltfrostavskalning hos betong med och utan silikastoft låg troligen i förmågan hos silikastoft att minska kloridinträngningen i betong. ■

Referenser

[1]. Perraton, D.; de Larrard, F.; Aitcin, P.C. *Additional data on the strength retrogression of silica fume concrete*, CANMET/ACIs andra konferens om beständighet, 1994, sid. 2–15.

[2]. Persson, B. *Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology*, RILEMs Materials and Structures, Vol. 30, 1996, sid. 293–305.

[3]. Persson, B. *Hydration and Strength of High Performance Concrete*, Advanced Cement Based Material, 1996, sid. 107–123.

[4]. Persson, B. *Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet*. TVBM-1009. LTH. 1992. 400 sid.

[5]. Hassanzadeh, M. *Fracture mechanical properties*, M4:05, LTH Byggnadsmaterial, 1992, sid. 8–13.

[6]. Persson, B. *Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet – datarapport*, TVBM-7011. LTH, 1992, sid 38.

[7]. Persson, B. *Drying of Concrete after Different Kinds of Curing*, RILEMs Materials and Structures, Vol. 30, 1997, sid. 533–544.

[8]. ASTM E 104-85. *Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions*, ASTM, 1985, sid. 33–34, 637.

[9]. Byfors, J. *Plain concrete at early ages,* FO 3:80. CBI, Stockholm, 1980, sid. 40–43.

[10]. Powers, T. C. & Brownyard, T. L. *Studies of Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*, PCA, Vol. 43, ACI Journal, Detroit, 1947, sid. 984–987.

[11]. Norling Mjörnell, K. *Self-desiccation in concrete*, P-94:2, CTH Byggnadsmaterial, Göteborg, 1993, sid. 21–28.

[12]. Zhang, M. H. and Gjörv, O. E. *Effect of Silica Fume on Cement Hydration in Low Porosity Cement Pastes*, Cement and Concrete Research, Vol. 21, 1991, sid. 800–808.

[13]. Persson, B. *Assessment of Chloride Migration Coefficient, Salt Frost Resistance, Internal Frost Resistance and Sulphate Resistance of Concrete*, TVBM-3100. LTH. 2001, 86 sid.

[14]. Persson, B. *Chloride Migration Coefficient of Self-Compacting Concrete*, Nordiskt seminarium om betong med cementbundet material. Hirtshals. Red.: D. Bager. 2001, 187–207.

[15]. Persson, B. *Chloride Migration Coefficient of Self-Compacting Concrete*, RILEMs Materials and Structures, 2003 (under publicering).

[16]. Persson, B. *Thirteen-year Pozzolanic Interaction between Portland Cement and Silica Fume in Concrete*, CANMET/ACI:s åttonde konferens om flygaska, silikastoft, slagg och naturliga puzzolaner i betong. 2003 (under publicering).

[17]. Persson, B. *13 års studier visar att silikastoft gör brobetong mera beständig*. Husbyggaren 3/2003, sid. 40–49.

[18]. Persson, B. *Trettonårig effekt av silikastoft i betong*. U03.02. LTH Byggnadsmaterial, 2003, 25 sid.

Självkompakterande betong – en tyst revolution inom byggandet. Husbyggaren 2/2000. 2000, 20-24.

Självkompakterande betong – en tyst revolution inom byggandet

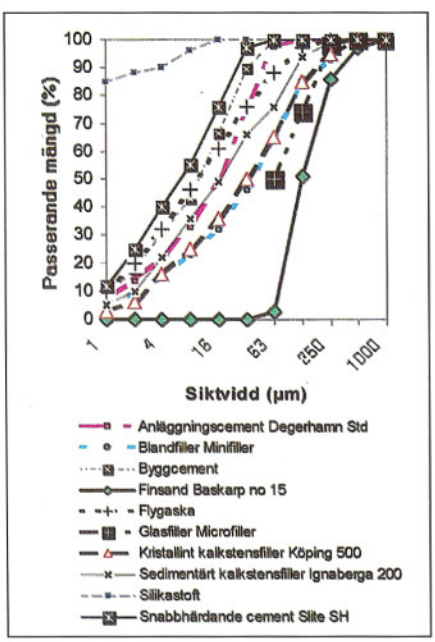
AV TEKN DR BERTIL PERSSON, LTH BYGGNADSMATERIAL

I denna artikel görs en genomgång av tillverkning och användning av självkompakterande betong. För detta ändamål beskrivs de krav som ställs vid tillverkningen samt ges några tillämpningar, såsom broar, tunnlar och höghus.

Japan har länge lett utvecklingen av självkompakterande betong. Tillämpningarna av densamma är dock mer omfattande i Sverige än i Japan. Cirka en procent av all platsgjuten betong i Sverige mot ca 0,1% i Japan är självkompakterande. Övriga länder har inte på långt när nått en procent av marknaden.

Självkompakterande betong har visat sig vara ett material som på ett radikalt sätt förbättrar arbetsmiljön inom byggandet. Arkitekter och konstruktörer ges större möjligheter att bygga smäckert och vackert i och med att den självkompakterande betongen ej kräver någon vibrering. Betongformen kan således göras så gott som helt sluten (frånsett ett rör för inpumpning av betongen). Framgent kommer därför formbyggtekniken att bli den faktor som begränsar estetiken hos betongkonstruktioner, inte längre materialet som sådant. Självkompakterande betong kan gjutas som stål dock i mycket större dimensioner.

Redan för ett tjugotal år sedan kom fullflytbetong i bruk med tillämpningar inom framförallt husbyggandet. Inledningsvis rönte fullflytbetongen motstånd hos betongtillverkare eftersom dåtidens baljbilar fick bytas mot roterbilar, en stor investering för branschen. Arbetskraften på byggena tryckte dock på och så småningom blev flytbetongen det förhärskande stombyggmaterialet, framförallt till väggar och golv inom husproduktionen. Fortfarande krävdes dock stavvibrering för att sä-



Figur 1 – Partikelfördelning för viktigare filler och cement.



Figur 2 – Kontroll av den självkompakterande betong på arbetsplatsen sker med ett flytsättmått.

kerställa att betongen omslöt armeringen på ett effektivt sätt. Stavvibrering gav, med dåtidens styva vibrostavshandtag, upphov till vita fingrar, vilket är en skada på de fina blodkärlen i armen. Givetvis stör vibreringen arbetsplatsen, kräver hörselskydd och försämrar därmed såväl möjligheterna till kommunikation som säkerheten på arbetsplatsen. Anläggningsbranschen, framförallt brobyggarna, har länge använt en styvare betongkvalitet, vilken krävt en omfattande stavvibrering.

Inom den industri som förtillverkar betongelement används förutom stavvibratorer även ytvibrering och formvibrering. Att kontinuerligt befinna sig utan hörselskydd i närheten av en vibrerande batteriform för betongväggar har varit en god garanti för att försämra hörseln. Målet, vid användning av självkompakterande betong, är att undvika nuvarande hälsovådliga och arbetskrävande metoder på byggplatser och i betongelementfabriker.

Krav vid tillverkning

Det krävs en extra silo på varje betongstation i landet för att härbärgera filler, en stor investering för betongtillverkare, ca 250 000 kr/silo. Filler, t ex blandfiller, finsand, glasfiller, senonkrita eller urkalkstensfiller, fyller ut de finare hålrummen mellan gruset och makadamen i betongen[1]. I Fig 1 visas partikelfördelningar för i Sverige använda fillertyper. Som en jämförelse visas även partikelfördelningar för svenska cement.



Figur 3 – Självkompakterande betong möjliggör gjutning av böjda konstruktioner med överform på ett helt annat sätt än vad normal betong gör[4]. (Foto: Thomas Österberg)



Figur 4 – Den högre hållfastheten hos självkompakterande betong tas tillvara genom ett lägre armeringsinnehåll eller en mer "slimmad" utformning4.
(Foto: Thomas Österberg)

Vidare krävs det tillsatser av tredje generationens flytmedel i betongen, polykarboxylatetrar. F n används flytmedel till normal betong t ex baserade på melaminformaldehyd respektive naftalensulfonat, s k andra generationens flytmedel. Tredje generationens flytmedel är tämligen harmlösa och innehåller ej ämnen som (än så länge skall man måhända försiktigtvis påpeka) finns upptagna på vare sig Kemikalieinspektionens begränsningslista eller observationslista[2]. (Första generationens flytmedel bestod av lignosulfonat, en restprodukt från skogsindustrin.) Kontroll av den självkompakterande betongens gjutbarhet på arbetsplatsen sker med ett flytsättmått (Fig 2). Den betongmängd som ryms i en kon av specificerad storlek skall rinna ut till diametern 700 mm utan att stenansamling eller vattenseparation sker (Fig 2). Diametern 500 mm skall nås inom en tidrymd varierande mellan tre och sju sekunder.



Figur 5 – Självkompakterande betong med stålfibrer, direktgjutning mot en utborrad sektion utan föregående injektering, Okayama, Japan. Sprickorna uppstod vid dygnsfogarna.

Användning inom husbyggande

Huvudsyftet vid användning av självkompakterande betong är att förbättra arbetsmiljön. Om betong med självkompaktering kan framställas på ett för hälsan mindre riskfyllt sätt, så skall givetvis denna metod användas före normalkompaktering, d v s vibrering. T ex i betongelementindustrin används idag samma utrustning och metoder som under miljonprogrammet. Medelåldern på personalen i betongelementindustrin är hög och det är uppenbart svårt att nyrekrytera ungdomar[3]. Kvinnor lyser med sin frånvaro i betongelementindustrin vilket i sig är ett illavarslande tecken på en hård och rå arbetsmiljö[3]. Med självkompakterande betong undviks farliga basktransporter i industrin eftersom betongen pumpas fram till gjutstället. Utrustning för vibrering behövs inte heller eftersom betongen kompakterar sig själv. På så sätt kan man undvara hörselskydd, minska risken för hörselskador samt göra arbetsplatsen säkrare som en följd av ökade möjligheter till samtal. (Som tidigare nämnts har problemet med "vita fingrar" redan lösts förutsatt att ett vibrostavshandtag med gummiled brukas.)

Användning av självkompakterande betong gör att nuvarande hälsovådliga och arbetskrävande metoder kan undvikas på byggplatserna. För att nå detta mål krävs en omfattande utbildning hos betongtillverkarna och på byggena om den nya betongens egenskaper, framförallt krav på noggrannhet och kontroll.

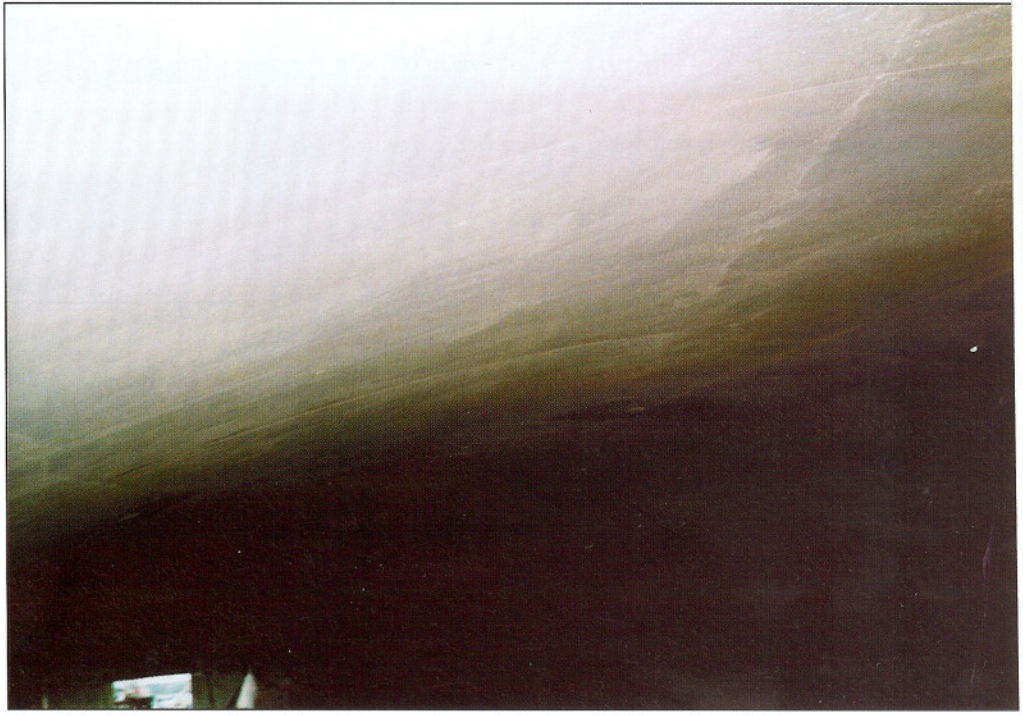
Inom husbyggandet är det nog svårt att få ekonomi för självkompakterande betong. Oftast är tjockleken på valv och väggar låsta av andra orsaker än rent bärighetsmässiga. Det är förhållandevis enkla gjutningar med måttlig armering och kraven på ytorna är kanhända inte så höga som för konstbyggnader. Kostar sedan självkompakterande husbyggnadsbetong ca 200 kr mer per kubikmeter, är det lätt att räkna ut att man inte kan få igen merkostnaden genom snabbare gjutning och mindre arbetskraft. Man skall dock inte bortse från möjligheten att de fackliga organisationerna och Bygghälsan på sikt kan få in en tvingande användning av självkompakterande betong inom husbyggandet[4].

Tillämpning på broar och tunnlar

På anläggningssidan är situationen något annorlunda[4]. Här är ofta svårighetsgraden större med högre armeringsinnehåll, svårare gjutetapper från geometrisk synpunkt. Det är inte alltid möjligt att kontrollera formutfyllnaden, d v s att komma åt att vibrera[4]. Av de 19 projekt som hittills, helt eller delvis, utförts med självkompakterande betong inom Vägverket Produktion, har man sett en direkt lönsamhet då det handlat om gjutningar mot berg, "böjda" gjutetapper och konstruktionsdelar med så hög armeringstäthet, att det har

varit svårt att komma åt med vibratorstavarna utan speciella åtgärder (formluckor etc)[4] (Fig 3). Dessutom har man sett en lönsamhet om den högre hållfastheten hos den självkompakterande betongen kan tas tillvara genom ett lägre armeringsinnehåll eller en mer "slimmad" utformning (Fig 4). Detta gäller förstås bara om merkostnaden för en motsvarande höghållfast "konventionell" brobetong ligger i samma härad som för den självkompakterande betongen[4]. Vid konstant vattencementtal erhålls nämligen ca 20% högre hållfasthet hos självkompakterande betong än hos normal betong på grund av den s k fillereffekten[5]. Eftersom vattencementtalet i betong till broar, oftast styrs av beständighetskrav, erhålls den högre hållfastheten "på köpet" vid användning av självkompakterande betong. (Beständigheten hos självkompakterande betong med kalkfillerinblandning utreds för övrigt f n vid avdelningen för Byggnadsmaterial på LTH.)

Tunnelinklädnader har utförts med självkompakterande betong, dels exempelvis en direktgjutning mot en utborrad sektion i Okayama, Japan, utan föregående injektering[6] (Fig 5), dels en eftergjuten tunnel vid Stäksundet, Bålsta[7] (Fig 6). I Japan användes stålfibrer i betong, vilket säkerställde tunnelns goda bestånd så snart betongen hade härdat under ca 20 timmar. Framdriften för tunneln var dock låg, ca 10 m per dygn. Långa stilleståndstider und-



Figur 6 – Eftergjuten tunnel i självkompakterande betong, Stäksundet, Bålsta.

veks dock, jfr Hallandsåsprojektet där metoden med självkompakterande betong troligen hade passat bra och rätt tillämpad medfört att den tunneln stått klar idag. Vid Stäksundet, användes tämligen traditionell metodik vid en eftergjuten tunnelinklädnad av självkompakterande betong. Armering utfördes manuellt. Betongen fördes in genom luckor på formsidorna samt genom stosar i valvhjässan. Här undveks dock all vibrering i och med att självkompakterande betong kom till bruk[7].

Bild 6 visar ett återkommande problem vid användning av självkompakterande betong: kalkränder. Vid överkanten av varje gjutpall avtecknar sig en rand av kalk (kalkstensfiller används för att ändra partikelfördelningen i betongen och därmed förbättra gjutbarheten). Ett annat problem är risken för spjälkning vid brand. Bränder i tunnlar med tät betong (lågt vattenbindemedelstal, vbt < 0,32[8]) har givit upphov till katastrofala spjälkningar av betong. Vid Stora Bälttunneln återstod t ex endast ca en centimeter av tunnelväggen efter en oljebrand. Samma problem uppkom vid en brand i tunneln under Engelska kanalen. Vid självkompakterande anläggningsbetong är vbt < 0,32 i de flesta fall. För att undvika spjälkning av betongen kan plastfibrer inblandas[8]. Ytterligare ett problem är det högre formtryck som uppstår eftersom självkompakterande betong kan gjutas snabbare än normal och mera liknar en vätska[9].

Arkitektonisk frihet

Självkompakterande betong är något av en arkitektonisk önskedröm. Förutsatt att betongen pumpas in underifrån fyller den ut formen som vatten med en porfri yta som resultat. Sker däremot gjutning på ett traditionellt sätt kan ytporer (blåsor) uppstå till följd av instängd luft[9]. Vid NTT kontorshus i Okayama användes självkompakterande betong såväl till bjälklag som till betongfyllnad av de bärande stålpelarna[1]. Vid NTT pumpades betongen in i pelarna och ca 25 m uppåt, en rationell, tyst och snabb metod. Bjälklagsbetongen innehöll lättballast varvid s k stenseparation undveks samtidigt som huset blev ca 25 % lättare än ett hus utfört i normal betong skulle ha blivit. Just detta stommaterial torde vara högaktuellt vid andra höghus, t ex ett eventuellt Scandinavian Tower i Malmö. Bjälklag och pelare kan göras smäckrare med självkompakterande betong än med normal i och med att den specifika hållfastheten ökar med ca 20%, se även avsnittet om broar ovan, "slimmade konstruktioner".

Arkitekternas fantasi samt formbyggarna sätter gränserna

I Nederländerna har ett antal byggnader försetts med ornament och stuckatur av självkompakterande betong[10], ett sätt av försköna stora, trista betongytor. Givetvis kan man tänka sig smäckra bågar, skal eller helt nya konstruktionstyper i självkompakterande betong, ej möjliga med normal betong. Det blir arkitekternas fantasi samt formbyggarna som kommer att sätta gränserna. Rätt ytbehandlad, t ex med vattenglas[11], kan sprickor undvikas på ytor av självkompakterande betong som gjuts mot det fria, vilket annars kan vara ett problem vid gjutning av fillerrik betong. □

Referenser:

1 *Bertil Persson:* Självkompakterande husbyggnadsbetong i Okayama, Japan – och i Malmö. Husbyggaren 2/99. 1999, sid. 6–13.

2 www.kemi.se

3 *Rickard Andersson* och *Lars-Göran Sjökvist:* Självkompakterande betong i prefabriceringsindustrin – en teknisk och ekonomisk analys. Rapport TVBM-5039. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 48 sid.

4 *Thomas Österberg:* Personlig information. Vägverket Produktion. Växjö. 2000.

5 *Christer Dieden:* Självkompakterande husbyggnadsbetong – sammansättning, hållfasthet och krympning. Rapport TVBM-5040. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 50 sid.

6 *Bertil Persson:* Tunnel genom vattenförande sediment – utan föregående injektering. Bygg & Teknik 1/99. Stockholm. 1999, sid. 28–29.

7 *Kjell Wallin:* Personlig information. PEAB Sverige AB. 2000.

8 *Jens Oredsson* och *Gunnar Rise:* Design Handbook.: Konsortiet Högpresterande betongkonstruktioner. Luleå Tekniska Högskola. Luleå. 1998. Sid 3–14, 23.

9 *Mahmoud Charkas* and *Waad Fayli:* Material- och produktionstekniska studier av självkompakterande betong med glasfiller. Rapport TVBM-5042. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 76 sid.

10 *Joost Walraven:* Föredrag vid Betongbyggnadsdagen 1999. Stockholm. 1999.

11 *Agustin Pujol Hugas:* Sammansättning och egenskaper hos självkompakterande betong. Rapport TVBM-5041. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 56 sid.

Självkompakterande betong motståndskraftig mot sprickbildning och brand. Husbyggaren 4/2002, 10-16.

Självkompakterande beto sprickbildnin

AV DOCENT BERTIL PERSSON

Om koldioxid eller klorider passerar det täckande skiktet mellan betongytan och armeringsstålet uppstår rost med sprickbildning och nedsatt bärförmåga som följd. När man byggde världens största hängbro, Akashi-Kayko i Japan, användes självkompakterande betong, SKB, till ett av ankaren först efter det att förtillverkade betongelement hade placerats som en kvarsittande ”filigranform” i ytan på fundamentet[1].

Betongelementen utfördes som vibrerad betong, VB, vilken polymerimpregnerades. Skälen till användningen av denna konstruktion var dels att garantera god motståndskraft mot karbonatisering och klorider, dels att begränsa risken för ”vilda” sprickor i betongytan[2]. Hela konstruktionens goda bestånd äventyras om koldioxid eller klorider tillåts passera täckskiktet för armeringen. Ett klassiskt exempel på detta problem är Ölandsbron där dock även frost kan ha inverkat – så är inte fallet vid Akashi-Kaykobron, där det sällan eller aldrig fryser. Just vid Ölandsbron minskades cementhalten i suboptimalt syfte, d v s betongkostnaden minskade något medan totalkostnaden för bron på sikt ökade mångfalt.

I fråga om brandspjälkning är det känt att polypropylenfibrer behövs i luftlagrad högpresterande (HP) betong med vattenbindemedelstal, vbt < 0.32[3]. För vattenlagrad betong finns inga regler för fiberinblandning (dessa konstruktioner anses ej vara i riskzonen för brand). Man vet dock från en brand i tunneln under Engelska kanalen att i det närmaste hela tunnelväggen av betong (vbt = 0.40) spjälkades loss och skadades allvarligt. Samma problem uppstod vid tunneln under Stora Bält där också mycket stora skador uppstod på betongen (vbt = 0.33) till följd av spjälkning efter en så kallad hydrokarbonbrand. Logiskt sett bör samma förhållanden gälla självkompakterande betong (SKB) med stora finmaterialhalter, ca 550 kg/m^3 cement + filler, att jämföra med vibrerad betong (VB) med ca 350 kg/m^3 i finmaterialhalt[4]. I Sverige har 19 landsvägsbroar, en dubbel landsvägstunnel och en järnvägstunnel utförts i SKB utan att det finns regelverk på området[5,6]. I Husbyggaren 2/2000 redovisas två områden där kunskap saknas beträffande SKB[4]:

* Kloridinträngning vid höga fillerhalter i betongen[7-10];
* Brandbeständighet hos betong med höga fillerhalter[11-14].

Försökens syfte var att studera kloridinträngning och brandbeständighet hos SKB samt att jämföra resultaten med motsvarande egenskaper hos VB.

Kloridinträngning

Från laboratorieförsök är det klarlagt att kloridinträngning i betong minskar med ökande cementhalt (Fig 1)[7]. Troligen binds mera klorid i betong med mera cement än i en cementsnål betong. En förhållandevis större del av kloriderna frigörs i cementsnål betong

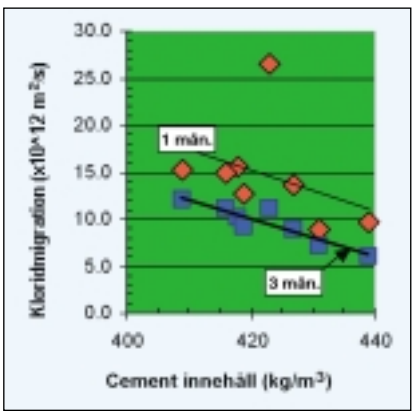


Fig 1 – Kloridmigration vid varierande cementhalt, tabell 1[7].

ng motståndskraftig mot g och brand

Tabell 1 – Recept m m för betonger vid försök med kloridinträngning[7] (kg/m³).

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
Kalkmjöl	183	375	180	186	184	94	0	
Cement Degerhamn	418	427	409	423	419	416	431	438
Luftporbildare, g/m³	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

B = ökad fillerandel, K = Limus 40; N = ny blandningsordning (filler sist); O = ordinarie blandningsordning (filler först); R = referens; S = Limus 15; T = 5.5 m hydrostatiskt tryck i stället för 0.23 m; II = andra; 8 = 8% lufthalt.

Tabell 2 – Recept m m för betonger vid försök med olika bindemedel[8] (kg/m³).

Beteckning	D	F	G	RO II	T
Makadam Bålsta 8-16	496	494	580	876	495
Naturlig sand Bålsta 0-8	699	728	800	727	714
Naturlig sand SÄRÖ 0-2	505	465	220	149	521
Flygaska, FA	89	55			
Glasfiller, GF			60		
Cement Aalborg (CEMI)	375				
Cement Degerhamn (CEMI)		440	420	438	
Slaggcement (CEMIII, 68% slag)					470
Silikastoft Elkem (granulerat)	35	18	21		
Luftporbildare, g/m³	498	501	500	482	498
Flytmedel (Glenium 51)	5.25		4.24	5.92	3.52
Vatten	191	172	162	171	183
Vbt	0.38	0.38	0.37	0.39	0.39
(Flyt)sättmått (mm)	690	725	720	150	737
T500 (s)	7	8	8		6.5
Densitet	2247	2300	2306	2368	2281
Aggregatinnehåll	0.64	0.64	0.60	0.66	0.65
Lufthalt (%)	6.4	6.2	6.3	6.1	5.7
28-dygns hållfasthet (100 mm, MPa)	61	70	64	63	79

D = Dansk flygaskabetong; F = flygaskabetong, optimal; G = glasfillerbetong; RO II = referensbetong; T = tysk slaggbetong.

och kan därvid bidra till att korrosion av armeringen uppstår. Recept m m för de provade betongerna ges i Tab 1[7]. Betongproverna till kloridförsöken borrades ur stora förseglade provkroppar varvid inverkan av karbonatisering, separation, väggeffekter i formytor och cementansamling undveks[8]. Betongerna blev därför direkt jämförbara vid samma ålder, en eller tre månader. Åldern inverkar kraftigt på kloridinträngningen.

Från en eller tre månaders ålder minskade kloridinträngningen med ca 60 procent[7]. SKB med lägre cementhalt hade ungefär samma kloridinträngning efter tre månader som VB hade en månad efter gjutning. Användning av SKB inbjuder till användning av lägre cementhalter eftersom dels fillereffekten ger SKB samma hållfasthet som VB vid lägre cementhalt, dels det är ekonomiskt och miljövänligt att minska cementhalten (på kort sikt). I livscykelperspektivet är det givetvis inte så. För brobyggnad krävs t ex god motståndskraft mot klorider. Att använda fel betong kostar mycket mer än att använda rätt betong

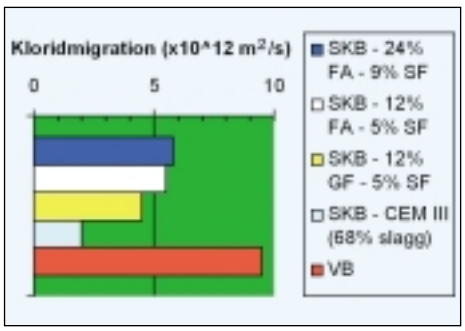


Fig 2 – Kloridmigration med olika typer av bindemedel, tabell 2[8]. FA = flygaska, SF = silikastoft.

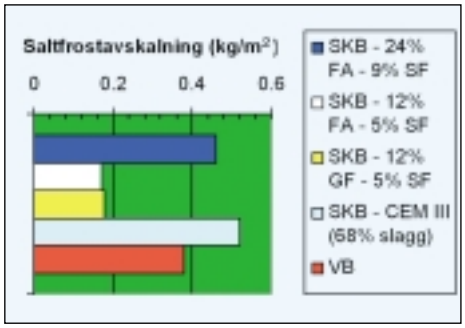


Fig 3 – Saltfrostbeständighet med olika typer av bindemedel, tabell 2[8]. FA = flygaska, SF = silikastoft.

redan från början – det visade sig inte minst vara fallet vid Ölandsbron. Äventyras beständigheten hos konstruktionen blir sluträkningen, mycket högre än om en högre cementhalt använts redan från början i betongen.

Det finns också andra möjligheter att bemästra kloridinträngningen genom t ex användning av fem procent silikastoft i betongen beräknat på cementhalten[8]. Om fem procent av cementen ersätts med silikastoft nås en avsevärd förbättring av betongens förmåga att motstå klorider (Fig 2). Silikastoft fungerar även som filler i SKB vilket krävs för att separation skall undvikas och god flytbarhet garanteras under gjutskedet[4]. I Fig 2 visas även kloridinträngning hos andra typer av betong, vissa dock ej så motståndskraftiga mot saltfrostpåverkan som VB (Fig 3).

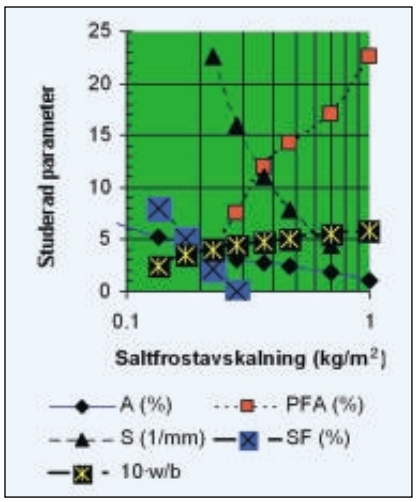


Fig 4 – Generellt inverkan av olika parametrar på saltfrostbeständigheten hos betong[9]. w/b = vbt, A = lufthalt, PFA = flygaska, S = avståndsfaktor för luft, SF = silikastoft.

Det är klarlagt att en ökad mängd silikastoft i betongen generellt minskar dess saltfrostavskalning (Fig 4)[9]. Sammantaget visade SKB med fem procent silikastoft de minsta värdena på såväl saltfrostavskalning som kloridinträngning[7,8]. Betongens självuttorkning kan också minska kloridmigrationen eftersom klorider ej kan transporteras i de luftfyllda porer som då uppstår[10]. Detta kan också vara en förklaring till den gynnsamma effekten av silikastoft för betongens förmåga att hindra kloridinträngning. Silikastoftbetong uppvisar nämligen en kraftigare självuttorkning än betong baserad på bara rent Portlandcement[10].

Brandpåverkan

Brandförsökets uppläggning, betongrecept och provningsmetodik ges i[11]. Belastningen på konstruktionen minskas visserligen i samband med brand, utnyttjandegraden av materialet ökar, men man har ändå krav på att täckskiktet skall finnas kvar en minsta tidsrymd för att skydda armeringen.

Vid försöken vid SP i Borås spjälkades all SKB utanför armeringsbyglarna tidigt, ca 15 minuter efter brandutbrottet. Man kunde tydligt se hur vatten forsade nedför det avklädda betongtvärsnittet trots att temperaturen vid explosionstillfället uppgick till ett par hundra grader. Detta styrker teorin i[11] att ånga övergår till vatten i betongen vid en ökad temperatur. Det ökande vattentrycket i betongen

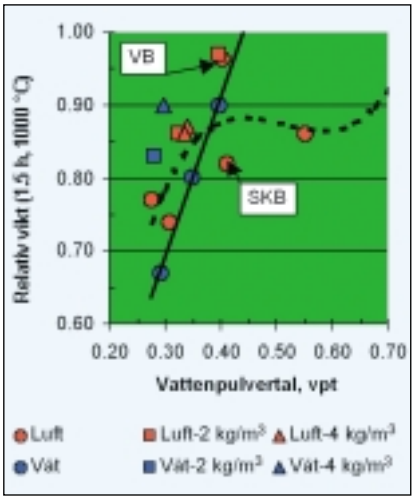


Fig 5 – Relativ vikt efter brandprovning, balkar med dimensionen 200x200 mm, dels lagrade våta (heldragen linje = utan fibrer), dels lagrade i luft (streckad linje = utan fibrer)[12-13]. Mängd polypropylenfibrer anges.

spränger så småningom denna då draghållfastheten nås. Alternativt nås en kritisk temperatur då vatten inte längre kan existera i flytande form, ca 275°C, och betongen sprängs av denna orsak. Endast vissa publicerade resultat ges här[12-13]. De mycket preliminära resultaten visar dock en tydlig inverkan av betongens vattenpulvertal (vpt) på avspjälkningen vid brand (Fig 5). Även lagringssättet hade en inverkan på mängden avspjälkad betong av förklariga skäl eftersom det är vattnet i betongen som genom sitt öka-

Forts sid 14



Fig 6 – Balkar efter brandprovning vid SP, Borås. (Foto: Katarina Kieksi)

Forts från sid 12

de tryck under brandförloppet spränger bort betongens ytskikt. Med inblandning av plastfibrer kan porer bildas under brand där övertrycket från vattnet kan ”pysa ut” och brandspjälkning därmed undgås[12]. Polypropylenfibrer smälter nämligen vid ca 170°C. Mera polypropylenfibrer krävs för vattenlagrad SKB än för luftlagrad (Fig 5). För vpt = 0.40 är dock situationen något oklar. Portlandcementbetong klarar sig i stort sett utan avspjälkning, ca fyra procent, medan en kalkstensfillerbetong spjälkar av 18 procent (Fig 5). Troligen erhålls en lägre draghållfasthet i betong med kalkmjöl än i betong med ren cement.

Betongoptimering

En fundamental förutsättning för att erhålla en brandsäker SKB är kunskap om sättet att producera betong med polypropylenfibrer. Brandförsöken baseras på betonger med en ökad fördelning av finpartiklar i den färska betongen:

$s = a \cdot d^b \{0.125 < d < 0.7 \cdot d_{max}\}$

utan polypropylenfibrer:

$a = 47\%$, $b = 0.24$ (K60), $b = 0.27$ (K30)

med fyra procent polypropylenfibrer:

$a = 55\%$, $b = 0.24$ (K60), $b = 0.27$ (K30)

s betecknar passerande material, d partikeldiameter (mm) och K kubhållfasthet (MPa).

Om finmaterialandelen i betongen ökar, ökas också dess krympning och krypning, vilket bör beaktas[14]. Större mängd finmaterial kan också påverka elasticitetsmodulen, som minskar något[14]. Ett alternativ till att använda kalkstensfiller i SKB är glasfiller varvid vpt blir högre eftersom en mindre mängd glasfiller krävs i SKB än mängden kalkstensfiller vid samma gjutbarhet. Ett tredje alternativ är att använda viskositetshöjande medel i SKB varvid vpt ej påverkas alls. Detta tredje alternativ är dock inte undersökt i fråga om brandspjälkning.

Karbonatisering

Att karbonatisering är ett stort problem för konstruktioners goda bestånd kan inte förnekas efter alla balkonger som fått renoveras eller bytas ut i Sverige. Karbonatisering innebär att betongens passivisering av armeringskorrosionen bryts. Karbonatisering undersöktes för sju SKB och två VB, alla med samma vpt = 0.27 och vattenhalt = 165 kg/m³ [15]. Cementhalten och halten av kalkstensfiller varierade

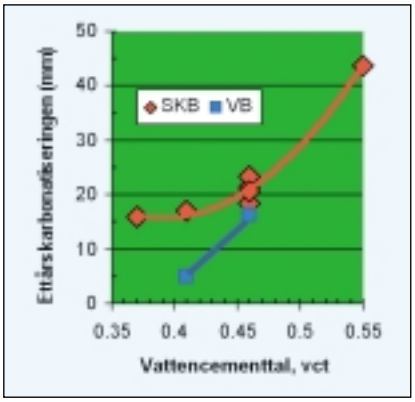


Fig 7 – Karbonatiseringen var större för SKB med kalkstensfiller än för VB[15]. 10 % koldioxid vid 60 % rumsfuktighet och 20 °C.

Forts sid 16

THP Communication



Nu ska du lyssna väldigt noga!

Luta dig tillbaka och blunda. Vad hör du? Människor, en radio, ventilationssus, en industri? Du kanske känner vibrationer i huset från bilarna på gatan eller motorvägen?

Vi har lyssnat noga i 45 år och hört en hel del. Ingemansson är Europas ledande expert inom ljud och vibrationer. Vi hjälper konsulter, byggentreprenörer, industriföretag och myndigheter överallt i samhället.

Vi tar fram tysta bostäder, arbetsplatser, vägar, fordon, maskiner och offentliga miljöer som ökar allas livskvalitet.

Har du ett ljudproblem som du vill lösa, ring och prata med oss.

Vi är bra på att lyssna.

Leading expertise – Sound and Vibration
Ingemansson Technology AB, Tel 031-774 74 00, www.ingemansson.com

INGEMANSSON

Forts från sid 14

des i betongerna. Även cementsorten varierades men hade ingen inverkan på karbonatiseringshastigheten. Provningen accelererades med tio procent koldioxid vid 60 procent rumsfuktighet och 20°C. Fig 7 visar att karbonatiseringen är större för SKB med kalkstensfiller än för VB med rent Portlandcement[15]. För ömsom vattenlagrade och ömsom accelererade prover erhölls dock samma karbonatisering i SKB och VB[15]. Det senare härdningssättet är mera realistiskt för utomhuskonstruktioner utom under broar eller under balkonger där det sällan regnar men karbonatiseringen är desto större. Balkongernas armering rostar mycket mer på undersidan än på ovansidan - det vet man från ett stort antal skadefall. Ett sätt att undvika stor karbonatisering av SKB tycks vara att ersätta kalkstensfiller med andra finmaterial t ex flygaska[15]. Karbonatisering kan minskas med ca 30 procent flygaska i stället för kalkstensfiller i en betong[15]. Flygaska finns dock inte att tillgå i någon större omfattning i Sverige eftersom det inte finns så många koleldade kraftverk. Silikastoft i betongen torde också ha en hämmande inverkan på karbonatiseringen.



(Foto: Katarina Kieski)

Sammanfattning

Resultat från försök beträffande karbonatisering, kloridinträngning och brandspjälkning hos självkompakterande betong, SKB, presenteras. Karbonatisering sker snabbare i SKB med kalkstensfiller än i vibrerad betong (VB) vid samma vattencementtal/vattenpulvertal, vct/vpt. Om flygaska används i stället för kalkstensfiller kan karbonatiseringen minskas med ca 30 procent. Resultaten visar vidare att SKB får lika bra motstånd mot kloridinträngning som VB vid bibehållen cementhalt. Alternativt kan fem procent silikastoft användas som en del av fillerbehovet i SKB varvid kloridinträngningen halveras jämfört med den hos VB. Vid låga vpt krävs troligen inblandning av polypropylenfibrer i SKB för att garantera en god beständighet mot brandspjälkning. Ett alternativ till att använda kalkstensfiller i SKB är glasfiller varvid vpt blir högre eftersom en mindre mängd glasfiller krävs i SKB än mängden kalkstensfiller vid samma gjutbarhet. Försöken finansieras av Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, Skanska Prefab AB, Statens Provnings- och Forskningsinstitut, SP, och Brandforsk. ❑

Referenser:

1 **Kazuyoshi Sakai.** Akashi Kaikyo bro 1A ankarblock – förtillverkat betongelement. Honchu-Shikoku bromyndighet. Kobe. 1998-11-09.

2 **Bertil Persson.** Brosystemet mellan Honshu och Shikoku. Bygg & Teknik 1999/02, 56–60.

3 **Yngve Anderberg, Jens Oredsson, Gunnar Rise.** HP betongkonstruktioner – handbok. Sv. Byggtjänst, Stockholm, 2000, 49–58.

4 **Bertil Persson.** SKB – en tyst revolution inom byggandet. Husbyggaren 2/2000, 20–24.

5 **Jan Trägårdh.** Mycket god frostbeständighet i SKB – en fallstudie från Stäkettunneln. Bygg & Teknik. 2001/07, 26–27.

6 **Annika Bergholtz, Simon Lundgren.** Motgjuten betonginklädnad i tunnel vid Grind, Bergmekanikdagen, ISSN 0281-4714, 2000, 227–236.

7 **Bertil Persson.** Bedömning av kloridmigration, saltfrost- och inre frostbeständighet samt sulfatbeständighet hos SKB. TVBM-3100. LTH. 2001, 86 sid.

8 **Dimitios Boubitsas, Katarina Paulou.** SKB för havsmiljö. TVBM-5048. LTH. 2000, 55 sid.

9 **Marianne Tange Jepsen.** Bedömning av beständighet hos betong med hjälp av neuralt nätverk. NCR. Hirtshals. Redaktör: Dirch Bager. 2001, 277–288.

10 **Bertil Persson.** Självuttorkning och kloridinträngning. TVBM-3104. Lund. 2002, 175–194.

11 **Bertil Persson.** Förebygger plastfibrer brandspjälkning även hos SKB? Husbyggaren 2/2002, 26–30.

12 **Lars Boström.** SKB med plastfibrer klarar brand. Brandposten no 26. SP. 2002, 15.

13 **Lars Boström.** SKB utsatt för brand. Bygg & Teknik. 2002/06, 36–37.

14 **Bertil Persson.** HP SKB. Red.: König, Dehn och Faust. Leipziguniversitetet. 2002, 1273–1290.

15 **Boel Andenaert, Geert de Schutter.** Karbonatisering av SKB. Red.: König, Dehn och Faust. Leipziguniversitetet. 2002, 853–862.

Självkompakterande betong, SKB, vid brandtemperatur. Betong 3/2003, 27-28.

Självkompakterande betong, SKB, vid brandtemperatur

Bertil Persson
LTH

Bakgrund

Intresset för SKB har uppstått efter en offensiv satsning av Cement och Betong Institutet och Vägverket. Vägverket har, helt eller delvis, tillverkat 19 broar med gott resultat. Även ett antal tunnlar har med framgång tillverkats i SKB. För konventionellt bostads- och kontorshusbyggande rapporteras kostnadsbesparingar varierande mellan 6 och 10% med den nya tekniken jämfört med kostnaderna vid användning av normal betong, NB. Vid brand är påfrestningarna betydligt större på SKB än på NB i och med att strukturen är tätare till följd av fillerinblandning.

Syfte

Det var projektets mål att ge riktlinjer för delmaterial och sammansättningen av brandbeständig SKB, med och utan plastfibrer. Vidare var projektets mål, att dokumentera hållfasthetsförluster hos betong som sammansätts med förhöjda fillerhalter, med syfte att ge riktlinjer för val av lämpliga delmaterial vid tillverkning av en brandbeständig SKB. Slutligen var syftet med projektet att undersöka om SKB med och utan fibertillsats vid konstant fuktkvot och påkänningsnivå var mer känslig vad gäller spjälkning än NB.







Brandspjälkning av betong i samband vid provning på SP. Foto: Katarina Kieski

Genomförande

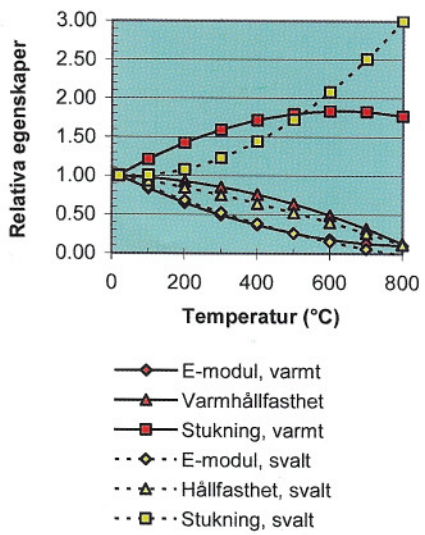
Med bidrag från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, Brandforsk, Skanska Prefab AB och SP, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, har arbetet utförts av Lunds Tekniska Högskola, LTH och SP.

Projektet genomfördes parallellt i Lund (materialförsök) och i Borås (fullskaleförsök). Ett 40-tal pelarprover i full tjocklek, tvärsnitt 20 x 20 cm, lagrades inomhus eller i vatten (simulerar en tunnelvägg) ett 1/2 år eller 1 år före det att provningar av brandspjälkning i ugn utfördes vid SP. Mätningar av hållfasthet, elasticitetsmodul och brottstukning genomfördes, dels vid hög temperatur, dels efter avsvalning till rumsklimat. Kompletterande mätningar utfördes på LTH av porositet, fukt, kapillaritet och motståndstal mot vatteninträngning.

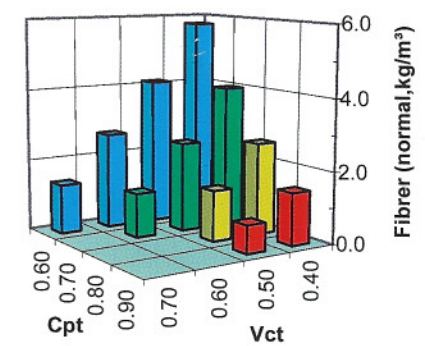
Resultat

Baserat på provningarna av brandspjälkning, brottstukning, elasticitetsmodul, fukt, hållfasthet, kapillaritet, motståndstal mot vatteninträngning och porositet, kunde följande slutsatser dras under förutsättning av att betongen med dimension 200 x 200 mm² hade torkat ut ett 1/2 år eller 1 år före provning (RF = 60% och 20 °C torkklimat) eller hade lagrats i vatten):

1. Brandspjälkningen var beroende av betongens fuktkvot och belastningsnivå.
2. Vid konstant fuktkvot och belastningsnivå är brandspjälkningen i SKB med filler större än i NB eftersom porositeten i SKB ökar betydligt mindre med ökande temperatur i SKB än hos NB.
3. För NB erhålls brandspjälkning för obelastad betong vid högre fuktkvot än 6% samt, vid en påkänning av 15 MPa, vid högre fuktkvot än 3%.
4. Vid tillräckligt hög fuktkvot ger ett högre vattencementtal, vct, och ett högre cementpulvertal, cpt, mindre brandspjälkning i SKB.
5. För vct < 0.50 krävs inblandning av plastfibrer i SKB för att brandspjälkningen skall bli densamma som för NB vid konstant fuktkvot och belastningsnivå.
6. Hållfastheten hos SKB utvecklas något gynnsammare (minskade mindre) med ökande temperatur än för NB.
7. Elasticitetsmodulen hos SKB minskar mer med ökande temperatur än för NB.



Figur 1. Relativa egenskaper hos betong vid/efter förhöjd temperatur utom hos betong med kalkstensfiller efter uppvärmning till 800 °C.



Figur 2. Mängden 32 µm fibrer, ppf_{normal}, för att begränsa mängden brandspjälkning till densamma som för normal betong (kg/m³).

8. Motståndet mot vatteninträngning minskar mindre med ökande temperatur i SKB än vad som är fallet för NB.

Projektrapporten visar att mer finmaterial erfordrades i ett recept för SKB än i recept för NB i syfte att receptet även skulle kunna innehålla 4 kg/m³ fibrer. För 2 kg/m³ fibrer kan ett mer traditionellt recept för SKB användas. Det kan dock inte rekommenderas att använda 4 kg/m³ fibrer i SKB eftersom arbetbarheten i en sådan betong minskar snabbt med tiden.

Mineraliska tillsatser av glas- eller kalkstensfiller ökade hållfastheten avsevärt vid normal temperatur även om cementhalten minskades något hos SKB jämfört med NB. Förmodligen var en mer effektiv packning av partiklarna i den färska betongen orsa-

ken till den ökande hållfastheten. Hållfastheten ökade med 0.07 MPa per kg/m^3 ökad mängd filler.

Tillsatser av polypropylenfibrer minskade hållfastheten med 2.3% per kg/m^3 ökande mängd fibrer.

Vattenhärdade cylindrar med 100 mm diameter utan polypropylenfibrer, uppvisade brandspjälkning vid 480 °C/h i uppvärmningshastighet. Med 240 °C/h i uppvärmningshastighet av SKB med 100 mm i diameter, utan polypropylenfibrer, erhölls ingen spjälkning alls. När väl spjälkning kunde undvikas uppvisade SKB och NB liknande egenskaper vid höga temperaturer utom efter en upphettning till 800 °C då SKB med kalkstensfiller förlorade all hållfasthet efter avsvalning till 20 °C, figur 1. En syntes för att beräkna mängden polypropylenfibrer för att undvika brandspjälkning togs fram baserad på cementpulvertalet, cpt, och vattencementtalet, vct, figur 2. Figur 2 visar mängden 32 µm fibrer, ppfnormal, för att vid konstant fuktkvot och påkänningsnivå begränsa mängden brandspjälkning till samma nivå som för normal betong (kg/m^3):

$$ppf_{normal} = (28\cdot(c/p)^2-26\cdot(c/p)-2.4)\cdot\ln(w/c)+45\cdot(c/p)^2-68\cdot(c/p)+23 > 0 \quad (1)$$

c/p betecknar cementpulvertalet, cpt.

ppf$_{normal}$ betecknar mängden 32 µm fibrer, för att begränsa mängden spjälkning till samma nivå som för normal betong (kg/m^3)

w/c betecknar vattencementtalet, vct.

Ytterligare information lämnas av

Christer Dieden, Skanska Prefab AB, tel 040-144000, och Bertil Persson, LTH, tel 046-2224591.

Rapporten "*Self-Compacting Concrete at fire temperatures*," TVBM-3110, av Bertil Persson, LTH, 200 sid. inkl. bilagor, pris exkl. moms 250 kr kan beställas från LTH, tel 046-2227415, fax 046-2224427, e-post Britt.Andersson@byggtek.lth.se.

Självkompakterande husbyggnadsbetong i Okayama, Japan – och i Malmö. Husbyggaren 2/99. 1999, 6-13.

Självkompakterande HUSBYGGNADSBETONG i Okayama, Japan – och i Malmö

AV BERTIL PERSSON,
LTH BYGGNADSMATERIAL, LUND

Efter en målmedveten satsning på forskning och utveckling inom de fem stora japanska byggbolagen är Japan idag ledande vad gäller modern betongteknologi, inte minst ifråga om självkompakterande betong, försvenskat till "vibreringsfri betong".
I denna artikel beskrivs självkompakterande betonger till ett kontorshus i Okayama som jag besökte 1998, samt till ett bostadshus i Malmö. Självkompakterande betong användes till såväl pålar som balkar och golv i det japanska projektet. I Malmö kom den självkompakterande betongen till användning i ett bjälklag till ett bostadshus.



1. Kontorshus under produktion i Okayama.

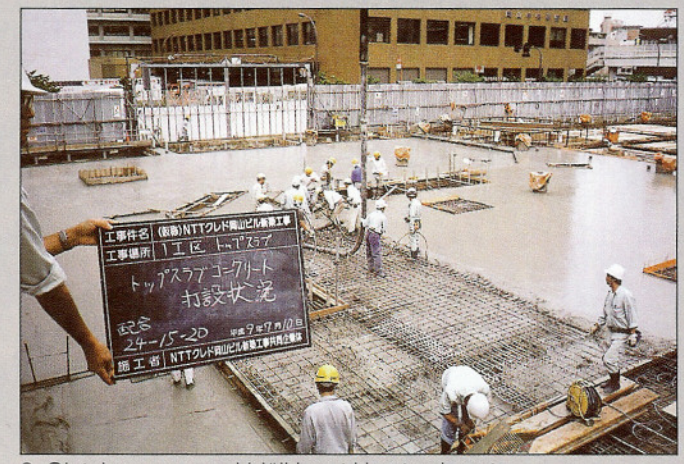
Användning av självkompakterande betong innebär fördelar vad beträffar arbetsmiljön men även för omgivningen.

Traditionell tillverkning av normal betong innebär hög ljudnivå samt risk för skador till följd av de vibrationer som uppstår i samband med kompaktering av betongen. Problemen uppstår då en vibrostav manuellt sticks ned i betongen i syfte att betongen ska erhålla en god kompaktering. Från handtaget på vibrostaven leds vibrationerna in i handen och armen på byggnadsarbetaren, vilket kan leda till arbetsskador. Även betongformen och armeringen kan komma i svängning vid användning av vibrostav, varvid ett genomträngande, dovt buller alstras. Detta buller kan verka störande inte minst då betongproduktionen sker i befintlig bostads-, industri- eller kontorsbebyggelse.

I Okayama löste byggföretaget Shimizu kraven på en god omgivningsmiljö genom att använda självkompakterande betong i stället för normal betong. Den självkompakterande betongen blev således ett konkurrensmedel.

Bortsett från fuktproblematiken utgör en modernisering av produktionstekniken en fråga som måste lösas om den platsgjutna betongen ska finnas kvar som ett konkurrenskraftigt byggnadsmaterial inom husbyggandet. Högpresterande betong (betong med vattencementtal, vct < 0,38), har effektivt eliminerat fuktproblemen i samband med platsgjuten betong, så kallad byggfuktfri betong, /4,5/.

Studieresorna till Japan 1998 bekostades av en japansk stipendiefond, JSPS (Japan Society for the Promotion of Science), samt av ett stipendium från Nordkvists fond, Lunds Universitet /1,2/. Studien av den självkompakterande betongen i Malmö rymdes inom ramen för ett SBUF-projekt (Svenska Byggbranschens Utvecklings-Fond)/3/.



3. Gjutningen av markbjälklaget i kontorshuset.


2. Pelarna i kontorshuset fylldes med betong underifrån.

Ny betongteknik

Till skillnad från normal betong innehåller självkompakterande betong stora tillsatser av flytmedel. Det finns farhågor hos till exempel boende att tillsatser av flytmedel skulle kunna förorsaka emissioner. Mätningar av emissioner från betonger med tillsats av flytmedel visade dock att eventuella emissioner var så små att de ej kunde uppmätas (under detektionsgränsen), /6/.

Till självkompakterande betong används det främst ett så kallat tredje generationens flytmedel, till exempel polykarboxyleter, /7/ (cirka 1 procent av cementmängden).

För att betongen inte ska separera då den gjuts (det vill säga stenmaterialet falla till botten av formen) krävs det vidare endera tillsats av ett så kallat viskositetshöjande medel eller av filler, /8/. Viskositetshöjande medel används sedan länge vid undervattensgjutningar samt till självkompakterande betong i tunnlar, /9/. Endast cirka 1 kg/m^3 betong erfordras av det så kallade viskositetshöjande medlet. Ett sådant är emellertid mycket dyrt varför det är mer ekonomiskt att använda olika typer av filler. Fillermängden varierar normalt mellan 50 och 250 kg/m^3. Endera ett eller ett par av följande typer av filler användes med framgång för att undvika stenseparation i en självkompakterande betong:

- Silikastoft (eller silikaslurry)
- Kvartsitiskt filler (finsand)
- Kalkstensfiller
- Glasfiller
- Flygaska

I *tabell 1* ges sammansättning och egenskaper i färskt tillstånd hos de självkompakterande betonger som användes i Okayama, /10/ och i Malmö, /11/.

Produktionsmetoder

För närvarande pågår det en intensiv utveckling i Sverige vad gäller produktion av självkompakterande betong, /12-15/ som anses vara ett stort steg mot ett mer industrialiserat byggande. Den självkompakterande betongen till pålarna/pelarna i

Material/Objekt	Balkar	Bjälklag i Malmö	Bjälklag i Okayama	Förankring	Pålar	T-balkar
Cement, c	520	520	310	260	310	500
Vatten, v	160	200	170	160	170	160
Vattencementtal	0.31	0.38	0.55	0.62	0.55	0.32
Glasfiller		100				
Kalkstensfiller	-	-	-	210	-	-
Stenhalt (%)	55	45	47	50	47	51
Flytmedel (% av c)	1	0.4	0.7	1	1	0.7
Viskositetshöjande medel (% av v)	0.05	-	0.15	2.5	0.15	-
Flytsättmått (mm)	500x650	560x630	550x750	500x650	550x700	550x700
Lufthalt (%)	3-5	1	3-6	< 3	3-6	3-6

Tabell 1. Sammansättning och egenskaper i färskt tillstånd hos de självkompakterande betonger som användes i Okayama, /10/ respektive i Malmö, /11/ (kg/m^3 torrvikt).

kontorshuset i Okayama pumpades in i stålrör nedifrån. (Pumpning av betong nedifrån är i övrigt vanlig vid undervattensgjutningar.) I Okayama lämnades stålrören kvar efter gjutning och ingick som en bärande del av konstruktionen. Stighöjden för gjutningen uppgick till som mest 25 meter över den plats på röret där betongen pumpades in, *figur 2*. Pumpning av betongen nedifrån innebar att en god utfyllnad ägde rum kring armeringen, håltagningar, etcetera. Under armeringsstålet verkade pumptrycket på ett kompakterande sätt medan tyngdkraften stod för kompakteringen av betongen ovanför armeringen. Pumpning av betong ökar dock påtagligt risken för stenseparation. Stenseparation innebar att den grövre delen av stenmaterialet i betongen lade sig längst ned i formen. Vid ett forskningsprojekt i Japan beträffande självkompakterande betong visade det sig att nedre delen av en vägg hade en mycket högre stenhalt än den övre delen, /16/. Övre halvan av väggen bestod till stor del av cementbruk, vilket i sin tur innebar att tryckhållfastheten hos betongen var hälften så stor i övre delen av väggen som i väggens nedre del.

Gjutning av bjälklag

Figur 3 visar gjutningen av första bjälklaget i kontorshuset i Okayama (markbjälklaget). Betongen flöt ut utan att manuell (eller maskinell för den delen) vibrering ägde rum. *Figur 4* visar en ofta använd kontrollmetod för självkompakterande betong, nämligen flytsättmått. En noga specificerad volym betong (normalt använd vid bestämning av betongens sättmått) flöt snabbt ut till en radie av minst en halv meter inom fem sekunder. Ytan fick inte uppvisa uppstickande stenar eller dylikt för att betongen skulle betraktas som självkompakterande.

Personalbehov/gjutkapacitet	Normal betong	Självkompakterande betong
Betongarbetare	1	1
Kranförare	1	0
Nivåkontrollant	1	1
Pumpförare	0	1
Personalbehov, totalt inkl. pump	3	3
Gjutkapacitet	15 m³/h	25 m³/h

Tabell 2. Personalbehov och gjutkapacitet i samband med bjälklagsgjutningar i Malmö (högpresterande betong med vattencementtal, vct = 0,38).



4. Betongens gjutbarhet kontrollerades med så kallat flytsättmått.



5. I kontorshuset göts alla bjälklag med självkompakterande betong.

Detta ställde krav på en minskad stenhalt i betongen jämfört med stenhalten hos en normal betong, *se tabell 1*. I det fall som stenar inte sticker upp ur betongytan, eller om betongytan inte lutar efter det att provet har utförts, så får betongen betecknas som fullflytande, det vill säga per definition anses vara en självkompakterande betong, /17/. *Figur 5* visar ett annat bjälklag vid kontorshuset i Okayama utfört i självkompakterande betong. Betongen innehöll lättballast i syfte att minska densiteten (lättballasten räknades in i stenhalten). Trots att denna typ av ballast användes så flöt betongen ut fint till en helt horisontell yta. Betongytan var tillräckligt jämn för att golvläggningen skulle kunna utföras utan kompletterande avjämningsarbete.

Även i Malmö göts bjälklaget med betongpump, *figur 6*, eftersom en betongbask visade sig vara alltför otät för att medge transport av den självkompakterande betongen, *tabell 1*. Vid de delar av golvet som var försänkta (för att erhålla golvfall i badrum etcetera) visade det sig olämpligt att använda självkompakterande betong. Den självkompakterande betongen kunde nämligen inte gjutas i lutning utan betongnivån steg på ett okontrollerat sätt i förtagningen. Vid dessa bjälklagsdelar med lutande betongyta ändrades därför konsistensen på betongen från självkompakterande till halvflytande genom att mängden flytmedel minskades. Ytor med fall göts därför före övriga ytor av bjälklaget i Malmö. Såväl i Okayama som i Malmö användes kvarsittande form, vilken var en fördel eftersom kraven på formens täthet var större vid användning av självkompakterande betong än vid normal betong.

Svårt värdera i pengar

Användning av självkompakterande betong innebar ökade kostnader

för material och för tillverkning. Bland annat ökade blandningstiden vid tillverkningen av betongen från normalt 1,5 till cirka 3 minuter, /*18*/. Detta minskade i sin tur kapaciteten för betongfabriken. Nämnda kostnadsökningar kompenserades sannolikt av en lägre arbetskostnad än vid manuell kompaktering av normal betong på gjutplatsen. En god omgivningsmiljö, så kallat "tyst byggande", var ett omgivningskrav i Okayama. Detta krav löstes på ett elegant sätt genom användning av självkompakterande betong, */10/*. På så sätt blev den nya metoden att kompaktera betongen ett konkurrensmedel som näppeligen kunde värderas i pengar. Även arbetsmiljön blev bättre med betong som kompakterade sig själv. Förbättringen i arbetsmiljö kunde inte heller värderas i pengar. En förbättrad arbetsmiljö kan för övrigt bli en viktig fråga vad gäller rekrytering av betongarbetare. Förutom att behovet av manuellt arbete minskar, genom användning av självkompakterande betong, så ges yrket en högre status.

Kostnadseffektiviteten för självkompakterande betong är dåligt klarlagd. I Malmö konstaterades en ökning av produktiviteten med cirka 60 procent vid användning av självkompakterande betong jämfört med normal betong, *tabell 2*. Till kostnaderna för den självkompakterande betongen kom dock kostnader för hyra av en betongpump. *Figur 7* visar de relativa materialkostnaderna för såväl självkompakterande betong (S) som normal betong (N), */19/*. Den direkta merkostnaden för material varierade mellan 10 och 30 procent, *figur 7*, beroende på merkostnader för cement, filler och flytmedel, */20/*. I Japan anses det dock för närvarande inte som ekonomiskt lönsamt att använda självkompakterande betong inom husproduktion, */21/*. Som ovan nämnts var det andra skäl än ekonomiska som där initierade den nya metoden.

Slutsatser

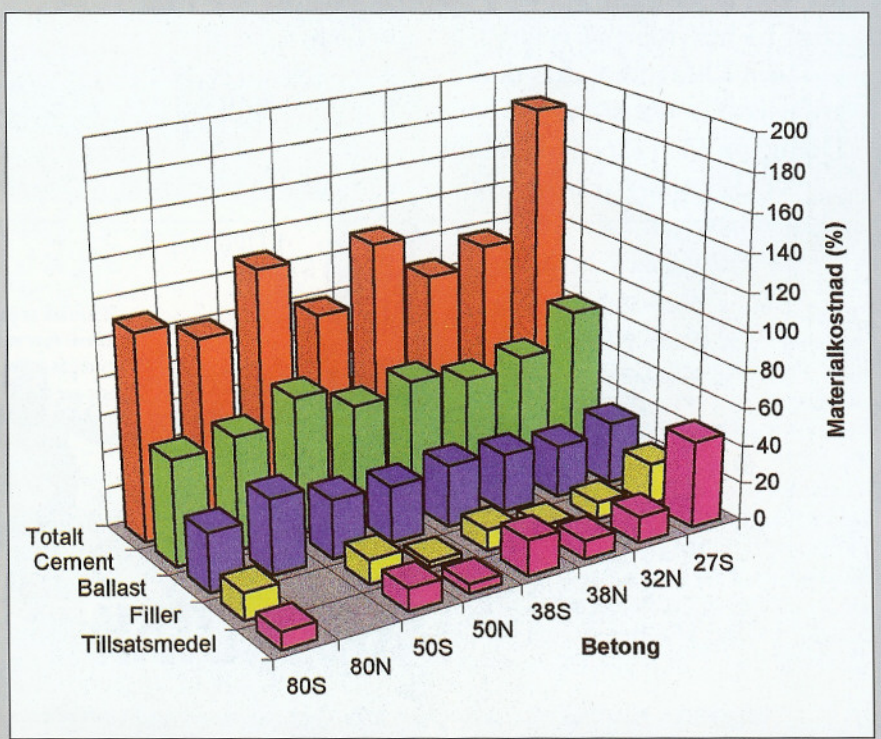
Följande slutsatser kan dras från erfarenheterna i samband med uppförandet av ett kontorshus i självkompakterande betong i Okayama:

- Den nya tekniken kunde med framgång användas till såväl pålar till grundläggningen som till pelare, balkar och bjälklag.
- Betong som kompakterade sig självt eliminerade effektivt störningar i form av vibreringsljud från bygget till omgivningen, så kallat "tyst byggande".
- Merkostnader för betongen och merkostnader för kontroll av betongproduktionen kompenserades ej av minskade arbetskostnader.
- Den förbättrade arbetsmiljön vägdes ej in i kalkylen.



6. Självkompakterande betong till ett bostadshus i Malmö (PEABs arbetsplats).

Erfarenheterna av den självkompakterande betongen till huset i Malmö var alltför begränsade för att säkra slutsatser skulle kunna dras. Dock observerades det en ökning av produktiviteten med cirka 60 procent vid användning av självkompakterande betong jämfört med användning av normal betong. Sannolikt kommer användningen av självkompakterande betong att öka, även om metoden inte är ekonomisk. Före en mer generell användning av självkompakterande betong



7. Relativa materialkostnader för självkompakterande betong (S) resp. normal betong (N). Beteckningar: 80 = vattencementtal, vct (%), /19/.

bör dock följande frågor klarläggas genom forskning, /22/:

1. Omfattning och effekt av stenseparation i självkompakterande betong.
2. Krympning och krypning hos självkompakterande betong.
3. Beständighet hos kalkfillerbetong.
4. Alkalikiselreaktioner hos glasfillerbetong.

Referenser

1. Bertil Persson, Teknisk rapport. *"Japan Society for the Promotion of Science."* LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1998-04-14.

2. Bertil Persson, *Reseberättelse avseende arbetsmöte om krympning i betong.* Nordkvists fond. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1998-06-13—14.

3. Bertil Persson, *Kompatibilitet mellan golvbeläggningar på betong med avseende på emissioner, fukt och karbonatisering – inverkan av produktionsmetoder på innemiljö.* Rapport U98.11. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1998-12-09.

4. Lars-Olof Nilsson, *Är högpresterande betong lösningen på fuktproblemen?* Byggforskning 2/98, 40-41.

5. Göran Fagerlund, Bertil Persson, *Högpresterande betong utan byggfukt.* Cementa 3/90, 18-19.

6. Bertil Persson, *Samverkan mellan golvmaterial och betong.* Rapport U98.09. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1998.

7. Ei-ichi Tazawa, Personlig information. Higashi-Hiroshima Universitetet. Hiroshima. 1998.

8. Kenji Sakata, Personlig information. Okayama Universitetet. Okayama. 1998.

9. Bertil Persson, *Tunnel genom vattenförande sediment utan föregående injektering.* Bygg & Teknik 1/99, 28-29.

10. Kyoji Ehara, Personlig information. Shimizu Ltd. 1998.

11. Göran Klevbo, *Optimering av självkompakterande högpresterande husbyggnadsbetong.* Personlig information. Cement och Betong Institutet, CBI. Stockholm och Trelleborg. 1999.

12. Jan Byfors, Marianne Grauers, *Vibreringsfri betong: Ett stort steg mot ett mer industrialiserat byggande.* Betong 4/97. 8-10.

13. Marianne Grauers, *Industrialiserad platsgjuten betong.* Bygg & Teknik 7/98, 12-15.

14. Christer Dieden, *Självkompakterande husbyggnadsbetong.* Examensarbete. LTH Byggnadsmaterial. Lund. *Preliminärt 1999.*

15. Richard Andersson, Lars-Göran Nilsson, *Självkompakterande betong för elementproduktion.* Examensarbete. LTH Byggnadsmaterial. Lund. *Preliminärt 1999.*

16. Bertil Persson, *Tryckhållfasthet och E-modul i väggar av självkompakterande betong.* Bygg & Teknik. *Preliminärt 7/99.*

17. Mårten Nilsson, Örjan Pettersson, *Europas första bro i vibreringsfri betong.* Väg- och Vattenbyggaren 2/98, 28-31.

18. Håkan Christiansson, Personlig information. Essbetong AB. Trelleborg. 1999.

19. Bertil Persson, *Materialkostnader för självkompakterande betong.* Betong 4/98, 25.

20. Ulf Carlsson, Personlig information. Essbetong AB. Malmö. 1999.

21. Fuminori Tomosawa, Personlig information. Tokyo Universitet. Tokyo. 1998.

22. Bertil Persson, Forskningsprojektet: *"Beständighet hos självkompakterande betong - förslag till samarbete med Bauhaus-Weimar".* LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999. □

Självtorkande golv – en tillämpning av högpresterande betong. Cement- och Betonginstitutet, CBI. Stockholm. 1993, 27-32.

Självtorkande golv – en tillämpning av högpresterande betong

Bertil Persson, Byggnadsmaterial LTH

Bakgrund

Byggfukt från betong är sedan länge ett av byggbranschens gissel. Dagligen serverar massmedia rapporter om skadefall, där betongen i många fall får klä skott för fel som egentligen beror på för korta uttorkningstider, felaktig dränering etc. I stället för konstruktioner av betong har man därför som beställare ofta valt att bygga med andra material, t ex kryprumsbjälklag i trä, mellanväggar av gips. I likhet med bilindustrin har byggnadsindustrin dessutom på sistone sökt minska den interna lagerhållningstiden och därmed räntekostnaderna. Uttorkningstiden för betongen har därvid ofta kommit "i kläm"; golv har lagts för tidigt med byggfuktskador som följd. Det har varit rätt uppenbart att 60-talets betong ej passat in i 90-talets byggande.

Den självtorkande betongen har hittills huvudsakligen använts som ett konkurrensmedel, där entreprenören genom att minska de oftast långa uttorkningstiderna för en normal betong kunnat erbjuda ett tidigt färdigställande av byggnaden. Förutsättningen för att den självtorkande betongen även skall bli lönsam i normalt byggande är att den räntevinst etc som uppstår till följd av en kortare byggtid kompenserar den högre betongkostnaden.

Forskning i Lund

Under åren 1989–91 genomfördes vid LTH Byggnadsmaterial omfattande laboratoriemätningar av den högpresterande betongens hydratation, struktur och hållfasthet, /1/. Försöken genomfördes med stora betongelement. Sammantaget visade försöken att man trots en mycket kraftig självtorkning i betongen erhåller en god hållfasthetsutveckling, oberoende av om den högpresterande betongen härdades i vatten eller luft eller om den membranhärdades. Vid en självtorkande betong kunde man, tack vare dess stora täthet, nyttiggöra den kemiska kontraktion som uppstod hos blandningsvattnet då det bands kemiskt av cementet. Denna kemiska kontraktion ger en inre självtorkning. Samtidigt är den s k jämviktsfuktkurvan mera gynnsam hos betong med lågt vbt, i synnerhet om silikastoft ingår i receptet. Detta var det nya med metoden.

Mekanismer

Högpresterande konstruktionsbetong har en anmärkningsvärd självtorkning även under fuktiga yttre förhållanden. Hydratationen tycks fortgå trots de mycket torra inre förhållandena. Studier av cementbruk vid LTH Byggnadsmaterial visade att ovannämnda kemiska krympning (vilken skapar självtorkningen) i stort sett var av samma storleksordning för låga vattencementtal som för höga, se FIG 1. Figuren visar den specifika volymen hos vatten som bundits kemiskt, dvs krympningen är (1-k) eller ca 25 %.

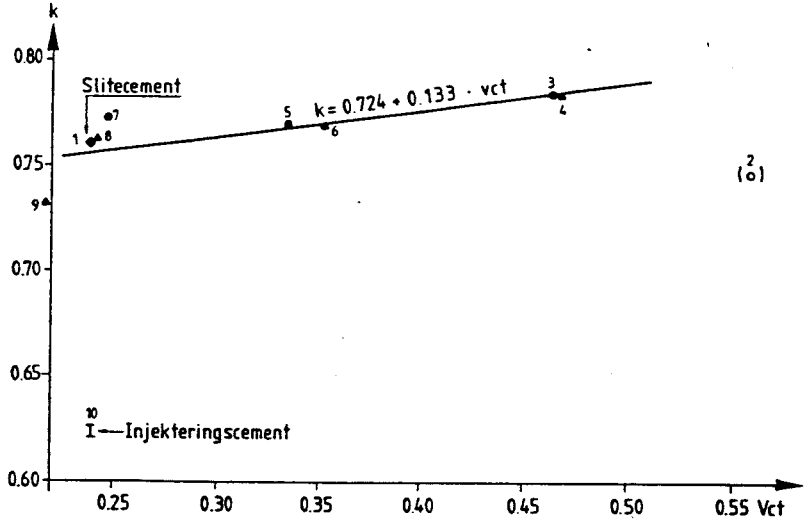


FIG 1. Hydratvattnets specifika volym som funktion av vct.

Tillsammans med kunskaper om hydratationsutvecklingen hos betong med varierande vattencementtal, w_o/C, se FIG 2, kunde en beräkning göras av den luftfyllda porvolym som uppstod i betongen till följd av den kemiska krympningen, se FIG 3.

Den i FIG 3 visade luftfyllda porvolymen uppgick till ca 14 l/m^3 betong oberoende av vattencementtal och oberoende av om silikastoft ingick i betongen eller ej. Om volymen av farlig byggfukt (relativ fuktighet, RF > 85%) ryms inom ovannämnda luftfyllda porvolym, har man definitionsmässigt en självtorkande betong fri från farlig byggfukt. Som förutsättning gäller då att den luftfyllda porvolymen ej får fyllas med yttre fukt. Betongen skall således endera membranhärdas eller vara tät. Det senare är fallet för en högpresterande betong med tillräckligt lågt vbt. (Den uppkomna luftfyllda porvolymen torde även ge betongen ett ökat frostskydd samt en ökad brandtålighet).

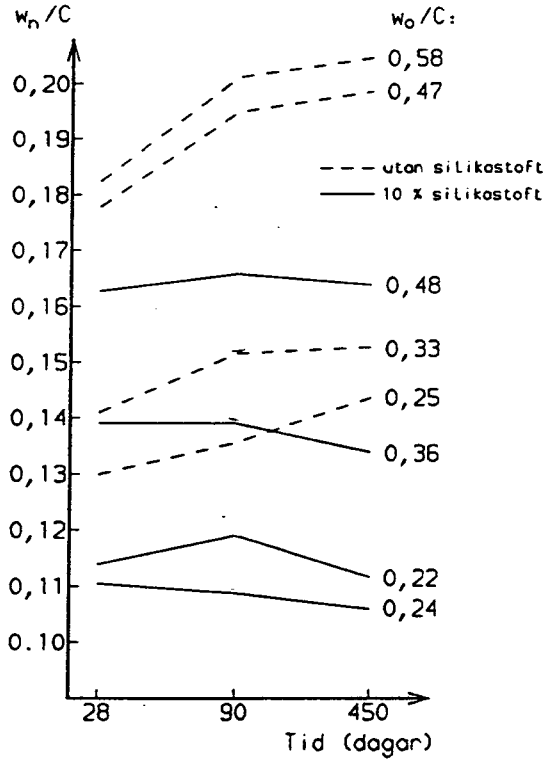


FIG 2. Hydratationsutveckling vid varierande vattencementtal.

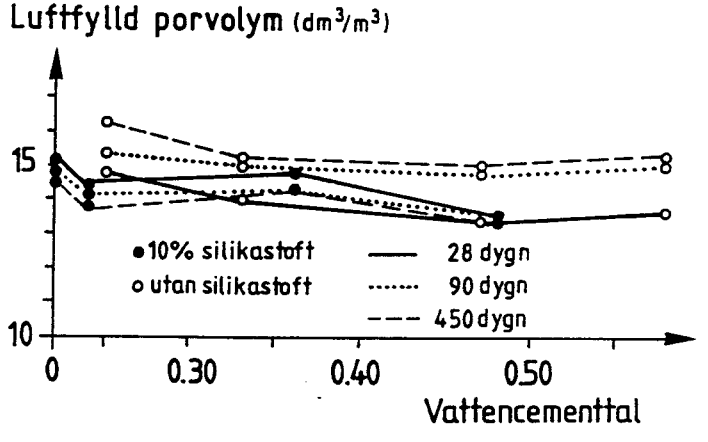
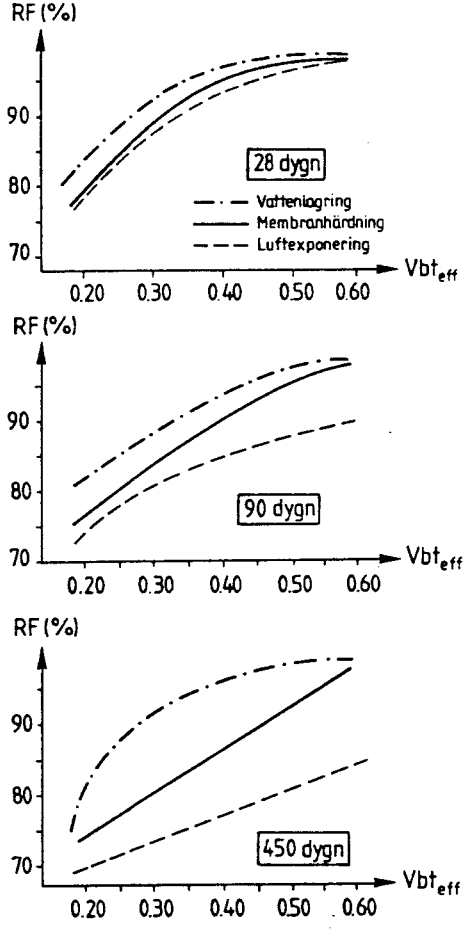


FIG 3. Kemisk krympning: Luftfylld porvolym i betong som funktion av vct.

Konstruktiva krav

Forskningen vid LTH Byggnadsmaterial visade att uttorkningsgraden hos betongen i huvudsak bestämdes av betongens effektiva vattenbindetal, vbt_{eff}, se FIG 4. ($Vbt_{eff} = w_o/(C + 2 \cdot S)$ där w_o är mängd blandningsvatten, C cementmängd och S mängd silikastoft). I FIG 4 visas inverkan av olika härdningsförhållanden samt exempel på en lämplig "dimensioneringsgång" för val av betong med önskad uttorkningsgrad. Denna har verifierats i samband med sju fältförsök, /1/–/6/. Vid det första fältförsöket år 1990 provade vi en självtorkande betong, som visade sig fungera väl även i fält under mycket fuktiga förhållanden, /1/.



Dimensioneringsgång
för val av betong med
önskad uttorknings-
tid (Anläggningscem.)

a. Bestäm ålder för önskad RF
b. Bestäm RF
c. Bestäm exponering
d. Avläs erf. vbt_{eff}
e. Öka vbt_{eff} med ca 0.04 för Slite Std

Exempel 1:
a. 28 dygn
b. RF=85%
c. Luft
d. Vbt_{eff}=0.28.

Exempel 2:
a. 90 dygn
b. RF=85%
c. Membran
d. Vbt_{eff}=0.32.

Exempel 3:
a. 450 dygn
b. RF=85%
c. Vatten
d. Vbt_{eff}=0.24.

FIG 4. RF på avståndet 50 mm från ytan på en pelare med diametern 1 m som funktion av effektiva vattenbindetalet. $Vbt_{eff} = w_o/(C + 2 \cdot S)$ där w_o är mängd blandningsvatten, C cementmängd och S mängd silikastoft.

Eftersom den högpresterande betongen har en finare porstruktur än normal betong, kommer vattenfronten i kapillärporerna automatiskt att ligga närmare betongytan. Försiktigtvis bör man således vid val av betongrecept kontrollera att RF i betongen genom självtorkning blir lägre än 85% inom 1/2 års tid. Som konstruktivt krav bör man vidare beakta att den självtorkande betongen har en avsevärd självkrympning, /7/. Slutligen skall tillsatsmedlen till den självtorkande betongen väljas med omsorg och doseras i sådan mängd att farliga emissioner ej uppstår.

Fältförsök

Ett bjälklag i det allergikeranpassade flerbostadshuset Söderberga Gård, Stockholm, /8/, göts av självtorkande betong. Redan 50 dygn efter gjutning nåddes RF = 85% i detta bjälklag, medan de referensbjälklag som utfördes av normal betong först drygt 300 dygn efter gjutning nådde samma grad av uttorkning, /9/. I Göteborg göts under slutet av 1992 ett antal plattor på mark av självtorkande betong, /10/. Sex veckor efter gjutning erhölls en RF varierande mellan 85 och 90 % (härdning utomhus).

I Motala, /11/, göts i januari 1993, ett tjockt bjälklag av självtorkande betong till ett s k Tyst hus. Sträng kyla rådde vid tillfället, varför den med betongpump gjutna betongen endast kunde avjämnas med sloda. Betongen täcktes sedan med plastfolie och vintermatta. Fuktmätning pågår vid detta försök. Mätning på uthuggna prover visade RF = 93% redan 20 dygn efter gjutning även vid vattenhärdade förhållanden. I Uppsala göts under vintern 1992-93 samtliga bjälklag av självtorkande betong i ett fler- familjshus, /12/. Vid detta projekt var väderleksförhållandena inledningsvis gynnsamma, varför bjälklagen då direktslipades med gott resultat. Efter stombyggnad men före insättning av fasader noterade man 30 dygn efter gjutning en uttorkningsgrad hos betongen varierande mellan 88 och 92 %. I intilliggande referensbetong erhölls samtidigt en uttorkningsgrad varierande mellan 94 och 97 %. (I Uppsala kunde man dessutom till följd av tidig hållfasthetsutveckling minska stombyggnadstiden med drygt 20% jämfört med den tid som skulle erfordrats om en normal betong hade använts).

Vi har f ö nyligen fått lämna ifrån oss "Svenska Rekordet" när det gäller självtorkande betong som gjutits i fält. Betongen till ett bjälklag i en musikstudio i Stockholm erhöll nämligen RF = 90% redan 9 dygn efter gjutning /12/, (vct = 0,32, Slite Std cement, pumpad betong).

Ökat kundvärde

Ett antal betongleverantörer bygger f n upp sin egen och branschens "know-how" om självtorkande betong genom intern och extern kursverksamhet. Vidare genomförs genom deras försorg arbetsplatsinformationer beträffande gjutegenskaper, efterbehandling etc. Genom att skaffa egen kompetens att mäta fukt kan vidare betongleverantörerna lämna en funk-

tionsgaranti i fukthänseende. En i leveransvillkoren stipulerad uttorkningsgrad hos betongen nås, oberoende av väder och vind, en viss tid efter det att värmen satts på i byggnaden. Denna funktionsanpassade kvalitet hos betongen har länge efterfrågats av beställare och entreprenörer. Betongen har med sina självtorkande egenskaper erhållit ett ökat kundvärde.

Referenser

1. Bertil Persson: Högpresterande betongs hydratation, struktur och hållfasthet. TVBM-1009. LTH Byggnadsmaterial. 1992.

2. Bertil Persson: Fuktmätning vid SIAB:s FoU-projekt i Finspång. LTH Byggnadsmaterial. 1992.

3. Bertil Persson: Högpresterande betong på lättklinkerfyllning. LTH Byggnadsmaterial. 1992.

4. Bertil Persson: Uttorkningsgrad hos självtorkande betong i Billeberga och Svalöv. LTH Byggnadsmaterial. 1992.

5. Bertil Persson: Provtagning och mätning av betong från Laröd, Helsingborg. LTH Byggnadsmaterial. 1992.

6. Bertil Persson: Rönnowska skolan; mätning av fukt i högpresterande betong. LTH Byggnadsmaterial. 1992.

7. L Bjerkén: High-Strength Concrete. State of the Art. SINTEF rapport 0333-257865. Forskningsinstituttet for Cement och Betong, NTH. Trondheim 1989.

8. Hans G Forsberg: Framsteg inom FORSKNING OCH TEKNIK 1992. Nytänkande för moderna hus. IVA-Nytt 1992:5.

9. Carl-Gustav Bornehag: Betongkvalitetens inverkan på uttorkningstiden för nygjuten betong. En fältstudie av olika betongkvaliteters uttorkningsförlopp. Opublicerat manus. Statens Provningsanstalt, SBUF, JM Bygg AB etc, Cementa AB. 1992.

10. Thomas Kutti: Projekt Kumleskär, Göteborg. Färdig Betong AB. Personlig information. 1993.

11. Mari Karlsson: Gjutning av Tyst hus, Motala. Stråbruken AB. Personlig information. 1993.

12. Jan Byfors: Projekt Uller, Uppsala, m m. Betongindustri AB. Personlig information. 1993.