LUND UNIVERSITY

Betong för lagring av flytande naturgas : undersökning steg II : inverkan av mycket hög fuktnivå : inverkan av extremt låg temperatur, -196°C

Fagerlund, Göran; Johannesson, Björn

2005

Link to publication

Citation for published version (APA):
Fagerlund, G., & Johannesson, B. (2005). *Betong för lagring av flytande naturgas : undersökning steg II : inverkan av mycket hög fuktnivå : inverkan av extremt låg temperatur, -196°C*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7185). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:
2

General rights
Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.
• Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
• You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
• You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

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

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

LUND UNIVERSITY

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

Download date: 19. Dec. 2025

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
LUNDS UNIVERSITET
Avd Byggnadsmaterial

Betong för lagring av flytande naturgas
Undersökning Steg II

Inverkan av mycket hög fuktnivå
Inverkan av extremt låg temperatur, -196°C

Göran Fagerlund
Björn Johannesson

TVBM-7185 Lund 2005

Förord

I rapporten redovisas resultatet av Steg II av en undersökning av frysbart vatten och frostbeständighet hos starkt fuktbelastad betong som fryses vid extremt låg temperatur. Två olika frysnivåer har studerats; ca -55°C resp. -196°C (frysning i flytande kväve).

Bakgrunden till projektet är att betong kan komma att användas i samband med lagring av naturgas under normaltryck. Beroende på typ av gas kan temperaturer ända ned till -164°C bli aktuella (-164°C är kokpunkten för flytande metan). Betongen kan periodvis tänkas bli utsatt för fritt vatten, varför vattenhalten kan bli tämligen hög. Den låga temperaturen i kombination med hög vattenhalt medför att frostskador kan tänkas inträffa även i betong som skulle vara frostbeständig vid normala frystemperaturer, ned till ca -30°C.

I Steg I av undersökningen visades att fuktlagrad betong med rimligt hög lufthalt förblir i stort sett helt oskadad vid nedfrysning till ca -55°C trots att mycket stor isbildning sker inom intervallet -20°C och -55°C.[1]

I Steg II som redovisas i föreliggande rapport studerades inverkan av ytterligare förhöjd fukthalt på frostbeständigheten vid frysning till ca -55°C. Dessutom studerades inverkan av frysning i flytande kväve (-196°C).

Projektet initierades av Skanska Teknik, som även formellt administrerade Steg I av projektet. Steg II initierades av Skanska International. I båda fallen har Skanskas medarbetare Kyösti Tuutti varit initiativtagare. Till projktet har följande referensgruppvarit knuten:

Prof. Kyösti Tuutti, Skanska International
Prof. Per-Erik Petersson, SP
Prof. Jan Alemo, Vattenfall Utveckling.

LTH:s del av projektet har finansierats genom anslag från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF. Vi vill tacka Skanska och SBUF för att de gett oss möjlighet att genomföra studien.

Lund i juni 2005

Göran Fagerlund

Tillkännagivande
Allt experimentellt arbete i Steg I och i Delstudie 1 av Steg II och alla utvärderingar av isbildning/issmältning har utförts av Björn Johannesson.
Experimentellt arbete i Delstudie 2 av Steg II har utförts av Göran Fagerlund, som också författat rapporten.

[1] Steg I redovisas i följande rapport:
Johannesson, B., Fagerlund, G.: Betong för lagring av flytande naturgas. Frysfenomen och frostbeständighet vid frysning till -50°C. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7174, Lund 2003.

Innehåll Sid

Förord
1 Inledning 1
1.1 Problemställning 1
1.2 Indelning av projektet i steg 1
1.3 Resultat av Steg I 2
1.3.1 Frysbart vatten 2
1.3.2 Frostskador 2
1.4 Slutsatser av Steg I 3
2 Steg II. Delstudier 4
3 Betongtyper 4
4 Provkroppar 5
5 Delstudie 1: "Gasoltemperatur". Extremt hög fukthalt 6
5.1 Vattenlagring före provning 6
5.2 Frysförsök. Metodik 8
5.3 Bestämning av isbildning och issmältning. Metodik 8
5.4 Bestämning av inre nedbrytning 8
5.5 Resultat 9
5.5.1 Frysbart och icke frysbart vatten 9
5.5.2 Frostskador 11
5.6 Sammanfattning av Steg II, Delstudie 1 15
5.6.1 Kalorimeterförsök 15
5.6.2 Frysförsök 15
6 Delstudie 2."Metantemperatur". Hög fukthalt 17
6.1 Försöksserier 17
6.2 Huvudserie. Frostskador vid frysning till -196°C 17
6.2.1 Målsättning 17
6.2.2 Försöksmetodik 17
6.2.3 Resultat 18
6.3 Specialserie 1.Frostskador inom området -50°C till -196°C 19
6.3.1 Målsättning 19
6.3.2 Försöksmetodik 19
6.3.3 Resultat 19
6.4 Specialserie 2. Inverkan av en uttorknings-uppfuktningscykel 20
6.4.1 Målsättning 20
6.4.2 Försöksmetodik 20
6.4.3 Resultat 21
6.5 Sammanfattning av Steg II. Delstudie 2 22
6.5.1 Frysskador vid frysning i flytande kväve vid -196°C 22
6.5.2 Inverkan av en uttorknings-uppfuktningscykel på frostskador 23
6.5.3 E-modul hos frusen betong 23
7 Slutsatser 26

BILAGA: Provningsresultat i Steg II. Delstudie 1 B-1 – B-16

1 Inledning

1.1 Problemställning

Naturgas kan lagras vid normalt tryck under förutsättning av att temperaturen är extremt låg. Den exakta temperatur som erfordras beror på gasens sammansättning. Gasol och liknande gastyper (Liquified Petroleum Gas, LPG) kräver temperatur inom området -30°C till -50°C. Metan, som är den huvudsakliga naturgasen, kräver -164°C. Gasen lagras ofta i betongtankar som kan vara insprängda i berg. Betongen kan bli utsatt för mycket låg temperatur. Är den dessutom periodvis exponerad för vatten, t.ex. grundvatten, kan man inte utesluta att frostsprängning sker trots att detta inte skulle ske vid normal användning av samma betong vid normal utomhustemperatur, dvs. minimum ca -25°C. Även om betongen bara skulle utsättas för omgivande luft, kommer den att ta upp vatten hygroskopiskt. Man kan inte utesluta att detta s.k. kapillärkondenserade vatten i porsystemet är frysbart vid extremt låg temperatur och därmed kan medföra frostskador.

Normalt skyddas betong mot frostskador genom inblandning av luftporer, vilka normalt förblir luftfyllda trots att betongen exponeras för vatten under lång tid. Luftporerna fungerar som "tryckutjämnare" i vilka porvatten, som trängs undan när isen bildas, kan tas om hand utan att skadliga inre spänningar uppkommer. Vid normala frystemperaturer och fuktnivåer räcker ofta ca 3 à 4 volymprocent luftporer räknat på total betongvolym för att betongen skall vara frostbeständig. Vid extremt låg temperatur kommer mängden frysbart vatten att vara högre varför högre lufthalt troligen erfordras. Vid mycket hög fuktbelastning krävs också högre lufthalt eftersom en viss andel av luftporerna då kommer att vara vattenfylld.

Avsikten med projektet är att klargöra risken för uppkomst av frostskador hos betong som utsätts för mycket låg temperatur efter det att den varit fuktexponerad under mer eller mindre svåra fuktförhållanden.

1.2 Indelning av projektet i steg

Projektet genomförs i två steg:

Steg I: Inverkan på frostbeständigheten av *hög fuktbelastning* (4 månaders vattenlagring) och *"gasoltemperatur"*, dvs. -50°C à -60°C).

Steg II: (i) Inverkan på frostbeständigheten av *extremt hög fuktbelastning* (vattenupptagning efter vakuumbehandling) och *"gasoltemperatur"*.
(ii) Inverkan på frostbeständigheten av *hög fuktbelastning* (4 månaders vattenlagring) och *extremt låg frystemperatur, "metantemperatur", dvs.* -196°C.

Resultat av Steg I har redovisats i en tidigare rapport[1]. Resultat av Steg II redovisas i föreliggande rapport.

Samma 9 betongsorter, tillverkade vid samma gjuttillfälle, användes i såväl Steg I som Steg II.

[1] *Johannesson, B., Fagerlund,G.*: Betong för lagring av flytande naturgas. Frysfenomen och frostbeständighet vid frysning till -50°C. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7174, Lund 2003.

1.3 Resultat av Steg I

I Steg I undersöktes den frysbara vattenmängden och frostskador hos betong som lagrats under 4 månader i vatten och därefter frysprovats vid -50 à -60°C. En kortfattad sammanfattning av resultaten från Steg I följer nedan.

1.3.1 Frysbart vatten

En teoretisk analys som genomfördes i rapporten över Steg I visar att betong kan innehålla en stor mängd frysbart vatten vid temperatur långt under -20°C à -30°C. Detta kunde också bekräftas genom laboratorieförsök; se Tabell 1.1. Vid sänkning av temperaturen från -20°C till -30°C mer än fördubblas ismängden för flertalet betongsorter. Vid sänkning av temperaturen från -30°C till -50°C ökade ismängden med mellan 30 och 70%.

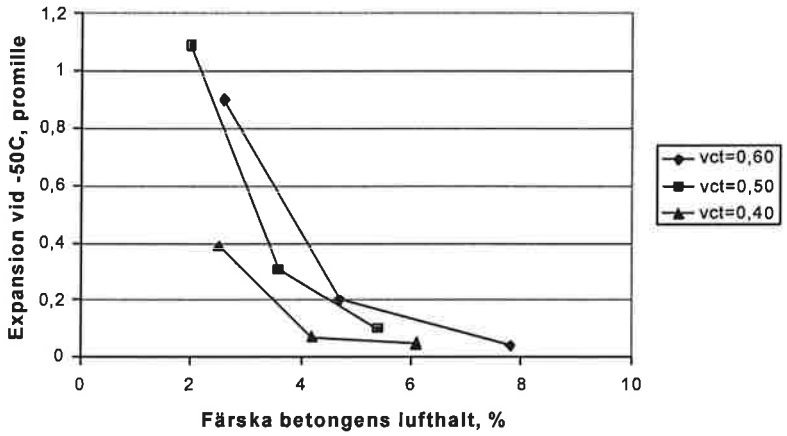
Tabell 1.1: Steg I: Ökning av bildad is inom intervallet -20°C och -50°C, respektive intervallet -30°C och -50°C.

Vct	Lufthalt (%) *	Procentuell ökning av mängd bildad is	
		Mellan -20°C och -50°C	Mellan -30°C och -50°C
0,60	2,6	92	41
	4,7	53	72
	7,8	67	28
0,50	2,0	160	63
	3,6	96	47
	5,4	93	45
0,40	2,5	182	72
	4,2	157	60
	6,1	121	53

* Färsk betongs lufthalt

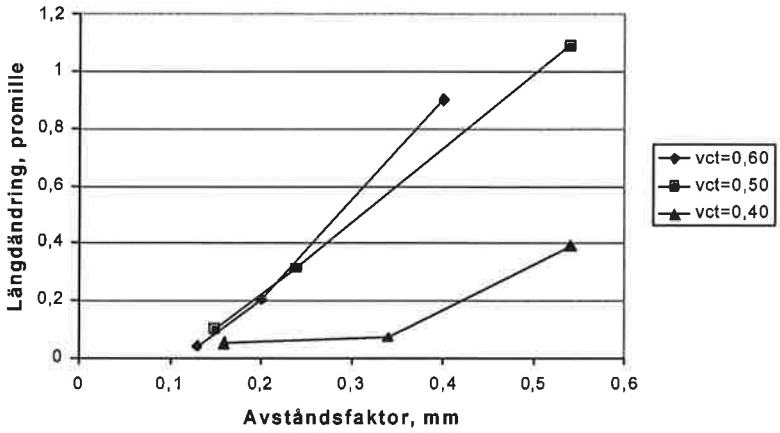
1.3.2 Frostskador

Skador förorsakade av nedfrysning till -50°C detekterades genom mätning av längdändring och förlust i dynamisk E-modul. I Figur 1.1 och 1.2 visas provkropparnas expansion vid -50°C som funktion av lufthalten respektive avståndsfaktorn[2]. I Figur 1.3 visas minskningen i dynamisk E-modul som funktion av lufthalten.

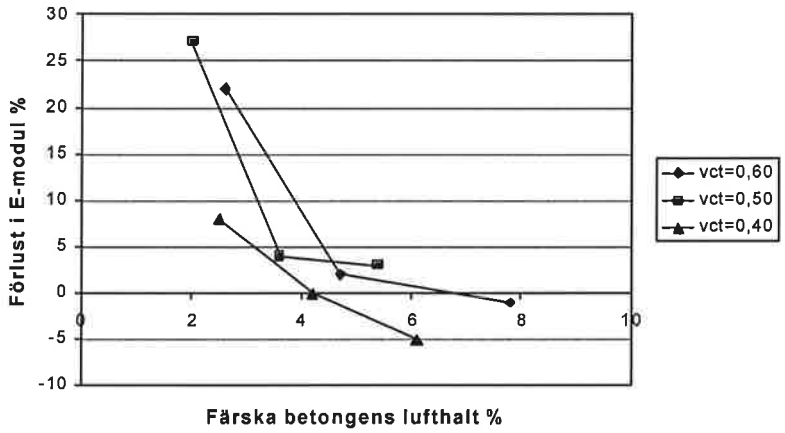


Figur 1.1: Steg I: Expansion vid -50°C under som funktion av färska betongens lufthalt.

[2] Avståndsfaktorn är ett mått på medelavståndet mellan luftporerna.



Figur 1.2: Steg I: Expansion vid -50°C som funktion av avståndsfaktorn.



Figur 1.3: Steg I: Samband mellan färska betongens lufthalt och förlust i dynamisk E-modul.

1.4 Slutsatser av Steg I

Steg I visade att betong som har en fuktnivå som motsvarar 4 månades vattenlagring, med start direkt efter gjutning, klarar nedfrysning till -55°C utan att skadas, förutsatt att betongen är försedd med luftinblandning av god kvalitet. Den erforderliga lufthalten ökar med ökat vattencementtal. Erforderlig kvalitet hos luftporsystemet avgörs av vilket skadekriterium som används; se Tabell 1.2. Högsta krav gäller om expansion under nedfrysningsskedet används som mått på skada. Då krävs lägst ca 7% respektive 4% luft för vct 0,60 resp.0,40.

Tabell 1.2: Steg I: Lägsta tillåtna lufthalt och högsta tillåtna avståndsfaktor enligt olika kriterier.

Kriterium för största tillåtna skada	vct	Lägsta lufthalt färsk betong (%)	Lägsta lufthalt hårdnad betong (%)	Högsta tillåtna avståndsfaktor (mm)
Max expansion vid -50°C: 0,1‰	0,60 0,50 0,40	7 5,5 4	7 4,5 4	0,15 0,15 0,35
Max expansion efter upptining: 0,1‰	0,60 0,50 0,40	4 3,5 2	Samma som för färsk betong	0,27 0,39 >0,55
Max förlust i E-modul 5%	0,60 0,50 0,40	4,5 3,5 3	Samma som för färsk betong	0,22 0,24 0,47

2 Steg II. Delstudier

I Steg II genomfördes 2 delstudier:

Delstudie 1: "Gasoltemperatur". Extremt hög fukthalt

Exakt samma betongtyper som i Steg I testades med avseende på isbildning och frostskador vid frysning ned till ca -55°C. Vattenhalten var förhöjd i förhållande till Steg I genom att prover, som tidigare vattenlagrats under 4 månader, utsattes för vakuumbehandling med efterföljande vatteninsugning. Den uppnådda vattenhalten kan antas motsvara den som *maximalt* kan uppnås under mycket fuktiga förhållanden.

Syftet med Delstudie 1 var att undersöka vattenhaltens betydelse för frostskador. Resultaten kan nämligen direkt jämföras med resultat från Steg I där "normal" fukthalt studerades vid samma temperaturnivå som i Delstudie 1.

Delstudie 2: "Metantemperatur". Hög fukthalt

Exakt samma betongtyper som i Steg I testas med avseende på frostskador vid nedfrysning till -196°C (frysning i flytande kväve). Vattenhalten är densamma som i Steg I, dvs 4 månaders kontinuerlig vattenlagring från gjuttillfället.

Syftet med Delstudie 2 var att undersöka om nedfrysning till extremt låg temperatur ger ökade skador. Resultaten kan jämföras med resultat från Steg I där frystemperatur ca -55°C studerades vid samma fukthalt som i Delstudie 2.

3 Betongtyper

Betongtyper enligt Tabell 3.1 användes i Steg II. De har samma sammansättning som de prover som användes i Steg I och tillverkades vid samma tillfälle. Maximal ballaststorlek var 8 mm. Ballasten var av icke sedimentärt ursprung med försumbar porositet. Cementet var lågalkaliskt och sulfatresistent (Anläggningscement).

Tabell 3.1: Provade betongtyper

vct	Lufthalt färsk betong (%)	Cementhalt (kg/m^3) **	Totalporositet * (%)
0,60	2,6	340	18,1±0,6
	4,7	350	20,3±0,2
	7,8	335	23,2±0,3
0,50	2,0	480	17,5±0,4
	3,6	480	18,6±0,8
	5,4	480	21,6±0,2
0,40	2,5	515	16,4±0,4
	4,2	525	16,8±0,0
	6,1	525	18,1±1,5

* Bestämd genom vägning av vakuummättat prov och torrt prov
** Baserad på antagen ballastdensitet 2650 kg/m^3

Luftporstrukturen bestämdes genom bildanalys av en polerad betongyta. Analysen ger värden på totala lufthalten, a %, och luftporsystemets specifika yta, α mm^{-1}. Den senare definieras som total mantelyta hos alla luftporer dividerad med total luftporvolym. Ur dessa båda värden kan den s.k. Power's avståndsfaktor L mm beräknas[3].

$$L = (3/\alpha)\{1{,}4(V_p/a+1)^{1/3} - 1\} \qquad (3.1)$$

Där V_p % är cementpastahalten (exklusive luftporer).

Mätta värden på a tillsammans beräknade värden på L ges i Tabell 3.2.

Tabell 3.2: Luftporstruktur

vct	Färska betongens lufthalt (%)	Luftporanalys, hårdnad betong	
		Lufthalt (%)	Avståndsfaktor (mm)
0,60	2,6	3,2	0,40
	4,7	4,6	0,20
	7,8	8,4	0,13
0,50	2,0	2,1	0,54
	3,6	3,1	0,24
	5,4	4,9	0,15
0,40	2,5	2,7	0,54
	4,2	4,3	0,34
	6,1	4,9	0,16

4 Provkroppar

Av varje betongsats tillverkades två betongblock med tjocklek 20 cm och area 50x50 cm. Dessutom tillverkades kuber med 10 cm sida avsedda för hållfasthetsbestämning. Den färska betongens densitet och lufthalt bestämdes.

Efter ett dygn togs följande prover ut ur blocken:

- Cylindrar med diameter 1,4 cm och längd 6 cm avsedda för mätningar av frysbart vatten.
- Stavar med tvärsnitt 2x2 cm och längd 16 cm avsedda för undersökning av skador under frysning i Delstudie 1.
- Stavar med tvärsnitt 3x3 cm och längd 12 cm avsedda för undersökning av skador under frysning i Delstudie 2.

[3] Metoden beskrivs i, *Johannesson, B., Fagerlund,G.*: Betong för lagring av flytande naturgas. Frysfenomen och frostbeständighet vid frysning till -50°C. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7174, Lund 2003.

5 Delstudie 1: "Gasoltemperatur". Extremt hög fukthalt

5.1 Vattenlagring före provning

Vattenhalten i betongen är avgörande för frostbeständigheten[4]. Betong i ett gaslager under mark kan komma att utsättas för yttre vatten under lång tid. Dessutom kan vattnet stå under yttre övertryck. Följaktligen kan mycket höga fuktnivåer uppnås. I andra situationer kommer vattenbelastningen att vara lägre.

I Steg I av denna undersökning exponerades betongproverna för vattenlagring vid atmosfärstryck under 4 månader. Start av vattenlagring skedde dagen efter gjutning. Avslutning av vattenlagring skedde direkt före frysprovning eller bestämning av frysbart vatten. Vattnet i lagringsbassängen var mättat med kalciumhydroxid för att undvika urlakning.

I Steg II, Delstudie 2 ökades fukthalten genom att prover efter 4 månaders vattenlagring placerades i ett vakuumkärl där de utsattes för högt vakuum under 1 dygn (ca 2 torr resttryck). Därvid torkade proverna något, samtidigt som luft drevs ut från luftfyllda porer. Under pågående vakuumbehandling fylldes vakuumkärlet med vatten varefter kärlet öppnades så att normalt atmosfärstryck kunde verka, varvid vatten sögs in i proverna.

Uppnådda vattenhalter uppmättes i prover för kalorimeterexperiment genom vägning av torkat prov efter avslutade försök. Vattenhalterna anges i Tabell 5.1. Värdena i gram har omräknats till vattenhalt i kg/m^3 betong. Dessa värden baseras på antagandet att provkropparna är representativa för betongen och att samtliga provers volym är 9,23 cm^3 (diameter 1,4 cm, längd 6 cm). I tabellen visas också de vattenhalter som enligt Tabell 3.1 (kolumnen för totalporositet) skulle gälla om alla porer i betongen var helt vattenfyllda.

[4] Inverkan av vattenhalten på materials frostbeständighet behandlas ingående i följande arbeten:

- *Fagerlund, G.*: Internal frost attack - State of the art. "Int. Workshop on Resistance of Concrete to Freezing and Thawing. Essen, September 22-23, 1997". Proceedings (editors Setzer, M.J and Auberg) RILEM. Cachan 1997.
- *Fagerlund, G.*: A service life model for internal frost damage in concrete. Div. Building Materials, Lund Institute of Technology. Report TVBM-3119, 2004.

Tabell 5.1: Vattenhalt vid provning i Steg II, Delstudie 1. Värdena baseras på mätning av vattenhalten i prover för bestämning av frysbart vatten.
Ungefär samma vattenmängd i kg/m³ gäller även för frysprovade stavar.

vct	Lufthalt (%)*	Vattenhalt i prover för frysbart vatten		Vattenhalt vid fullständig vattenmättnad enligt mätt totalporositet kg/m³
		gram	kg/m³	
0,60	3,2	1,654	179	175 à 187
	4,6	1,934	209	201 à 205
	8,4	2,045	221	229 à 235
0,50	2,1	1,582	171	171 à 179
	3,1	1,811	196	178 à 194
	4,9	1,985	215	214 à 218
0,40	2,7	1,500	163	160 à 168
	4,3	1,612	175	168
	4,9	1,852	201	166 à 196

* Hårdnad betongs lufthalt

Det exakta värdet på *vattenmättnadsgraden* i proverna har inte beräknats. Under förutsättning av att värdena i sista kolumnen i Tabell 5.1 motsvarar fullständig vattenmättnad (vattenmättnadsgrad =1) gäller de vattenmättnadsgrader som anges i Tabell 5.2. I Tabellen har även de vattenmättnadsgrader som användes i Steg I och Delstudie 2 (Kap 6 nedan) lagts in (4 månaders vattenlagring).

Tabell 5.2: Ungefärlig vattenmättnadsgrad hos prover i Steg II, Delstudier 1 och 2 samt i Steg I.

vct	Lufthalt (%) *	Vattenmättnadsgrad	
		Steg II, Delstudie 1	Steg I Steg II, Delstudie 2
0,60	3,2	0,96 à 1,02	0,91 à 0,97
	4,6	1,02 à 1,04	0,88 à 0,90
	8,4	0,94 à 0,97	0,68 à 0,70
0,50	2,1	0,96 à 1,00	0,92 à 0,96
	3,1	1,01 à 1,10	0,91 à 0,99
	4,9	0,99 à 1,00	0,78 à 0,80
0,40	2,7	0,97 à 1,02	0,84 à 0,90
	4,3	1,04	0,96
	4,9	1,03 à 1,21	0,84 à 1,00

* Hårdnad betongs lufthalt

Som synes har proverna i Delstudie 1 betydligt högre vattenhalt än i Steg I och Delstudie 2. Proverna torde vara i stort sett helt vattenmättade. Orsaken till att beräknad vattenmättnadsgrad för vissa prover är högre än 1 beror på osäkerheten i beräknade vattenhalter, och på osäkerheter i antagen lufthalt, och därmed osäkerhet i verklig porvolym.

5.2 Frysförsök. Metodik

Frostpåverkan på de fuktlagrade betongproverna (stavar 2x2x16 cm) undersöktes genom två successiva nedfrysningar direkt följda av upptiningar. Stavarna var fuktisolerade genom insvepning i plastfolie. Under frysnings-upptiningscyklerna var stavarna monterade i en dilatometerram tillverkad av INVAR, som är ett rostfritt stål med mycket låg längdutvidgningskoefficient. Proverna understöddes i undre änden av en spetsig dubb och i övre änden av en lägesgivare (LVDT-givare).

Frysförsöken genomfördes i frysskåp genom sänkning av lufttemperaturen ned till ca -50°C à -60 °C. Nedfrysningshastigheten var ca 4°C/tim. Därefter tinades prover upp med ungefär samma hastighet. Längdändringen under frysnings- och uppvärmningsförloppen mättes.

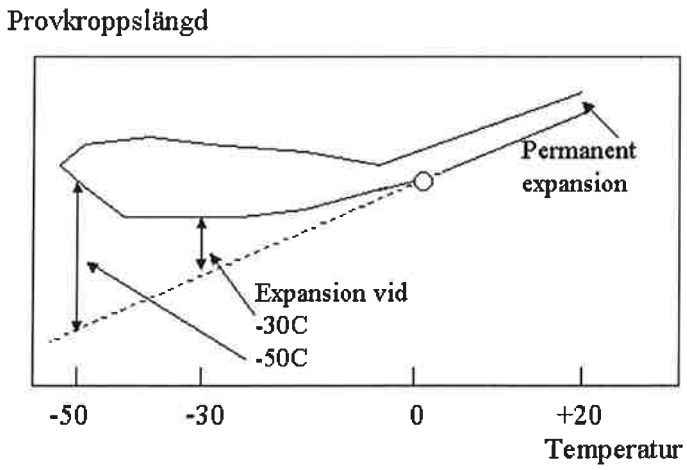
5.3 Bestämning av isbildning och issmältning. Metodik

Isbildning och issmältning som funktion av temperaturen bestämdes med en Scanning-kalorimeter av fabrikat Setaram. Provet placeras i en mätcell som i sin tur placeras i ett sk kalorimeterblock beläget centralt i kalorimetern. Kalorimeterblockets temperatur ändras (sänks eller höjs) enligt ett förutbestämt program. Varje skillnad mellan mätcellens och blockets temperatur mäts med mycket hög precision. Vid isbildning utvecklas värme vilket höjer mätcellens temperatur, och vice versa vid issmältning. Ur temperaturdifferensen mellan block och mätcell kan mängden bildad is i provet, respektive mängden smält is, mätas med hög precision[5]. Mätningar gjordes inom temperaturintervallet 0 °C till ca -50°C à -60 °C.

5.4 Bestämning av inre nedbrytning

Ett mått på inre nedbrytning fås ur följande mätningar.

- Expansion under nedfrysning. Expansion definieras i Figur 5.1.
- Permanent expansion efter upptining. Se Figur 5.1.
- Förändring av dynamisk E-modul (dynamisk E definieras av $E=\text{konstant}\cdot f_e^2$ där f_e är provkroppens egenfrekvens vid transversell vibration.)



Figur 5.1: Definition av expansion.

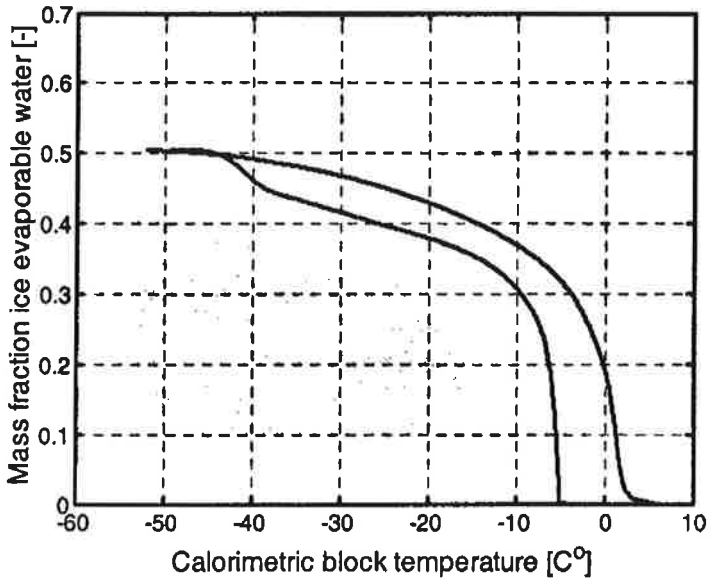
[5] Försöksmetoden och metod för utvärdering av försök beskrivs i, *Fridh, K.*: Internal frost damage in concrete. Experimental studies of destruction mechanisms. Div. Building Materials, Lund Institute of Technology. Report TVBM-1023, Lund 2005.

5.5 Resultat

Resultaten från samtliga försök redovisas i BILAGAN. Nedan ges en översiktlig sammanställning i tabellform.

5.5.1 Frysbart och icke frysbart vatten

Ett exempel på en kalorimeterbestämning av frysning och smältning av vatten visas i Figur 5.2.



Figur 5.2: Exempel på bestämning av frysning och smältning av vatten. Betong med vct 0,60 utan luftinblandning. Undre kurvan visar nedfrysning och övre kurvan smältning.

Resultat av bestämning av frysbart vatten vid nedfrysning visas i Tabell 5.3 för samtliga 9 betongtyper. I tabellen har även data från Steg I lagts in.

Tabell 5.3: Frysbar vattenmängd vid -20°C och -50°C.

vct	Lufthalt (%) *	Frysbar vattenmängd % av total vattenhalt			
		Steg II, Delstudie 1 Vakuumbehandlad betong		Steg I "Normal" fukthalt	
		-20°C	-50°C	-20°C	-50°C
0,60	2,6	39	50	26	48
	4,7	49	59	33	55
	7,8	51	59	30	50
0,50	2,0	35	45	15	39
	3,6	38	45	23	44
	5,4	40	51	22	45
0,40	2,5	24	36	11	31
	4,2	31	42	14	36
	6,1	36	47	19	42
Genomsnittlig ökning mellan -20°C och -50°C		28%		115%	

* Färsk betongs lufthalt

Uppenbarligen har vakuumbehandlingen medfört att frysning av vatten aktiverats vid högre temperatur än i icke vakuumbehandlad betong. Detta beror troligen på den torkning som vakuumbehandlingen medför. Att torkning -även ganska mild sådan- kan aktivera frysning av porvatten, som annars skulle vara lokalt underkylt i isolerade kapillärporer, har tidigare observerats av flera forskare[6,7].

Vakuumbehandlingen har även medfört att totala mängden frysbart vatten ökar i förhållande till den mängd vatten som fryser hos betong med naturligt fukttillstånd. Orsaken är naturligtvis att totala vattenhalten är högre, och att det "extra" vatten som vakuumbehandlingen tillför befinner sig i grova porer (luftporer) där det fryser redan i närheten av 0°C.

Den vattenmängd som inte kan frysa bör inte påverkas av vakuumbehandlingen, såvida inte denna förorsakar någon form av kollaps av materialstrukturen. Detta är dock osannolikt eftersom torkningen vid vakuumbehandlingen är mild och sker vid rumstemperatur. I Tabell 5.4 visas icke frysbar vattenmängd vid -50°C. Jämförelse görs med mätningar i Steg I.

Skillnaden i ofrysbar vattenmängd mellan vakuummättade prover och prover med normal vattenhalt är liten, som förväntat. Dessutom har lufthalten ingen större påverkan på den ofrysbara vattenmängden, vilket också är förväntat, eftersom denna bestäms av finstrukturen, vilken avgörs av vct och hydratationsgrad och inte av den grova luftporstrukturen.

Tabell 5.4: Icke frysbar vattenmängd vid -50°C.

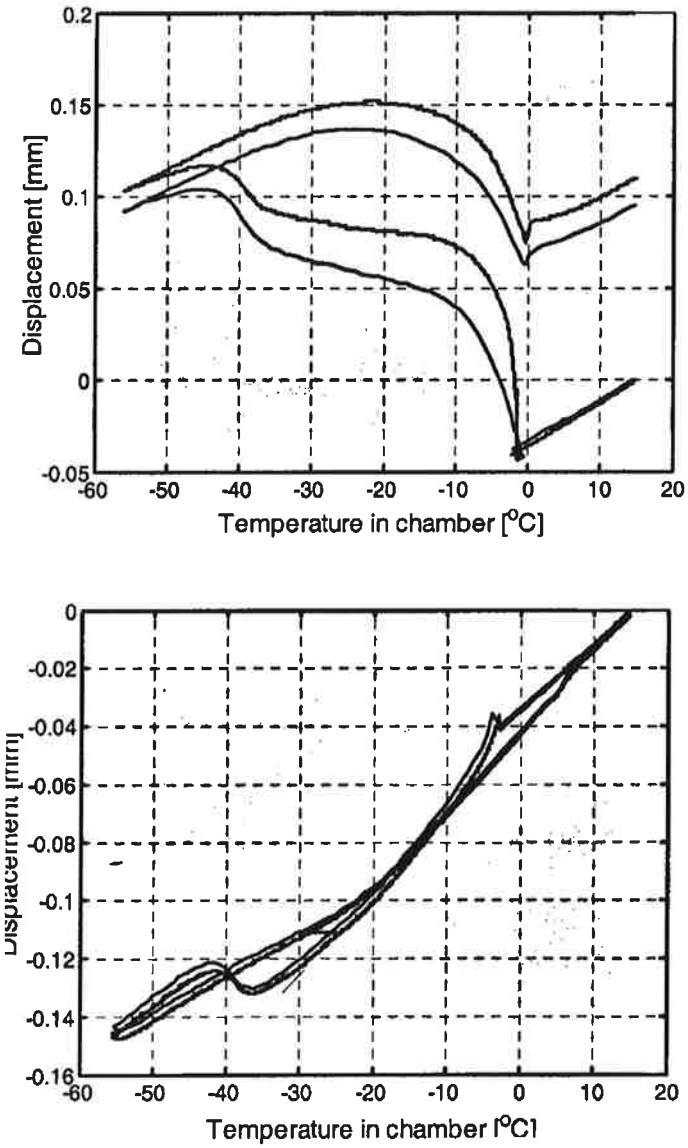
Vct	Lufthalt (%) *	Icke frysbar vattenmängd vid -50°C kg/m³	
		Steg II, Delstudie 1 Vakuumbehandlad betong	Steg I "Normal" fukthalt
0,60	2,6	89	88
	4,7	86	81
	7,8	91	80
		86 (4) **	
0,50	2,0	94	101
	3,6	108	99
	5,4	105	94
		100 (6) **	
0,40	2,5	104	98
	4,2	102	103
	6,1	106	97
		102 (4) **	

* Färska betongens lufthalt
** Medelvärde (std.avvikelse) kg/m³

[6] Exempelpå studier av inverkan av torkning på frysbart vatten är:
Vuorinen, J.: On determination of effective degree of saturation of concrete. Imatran Voima OY, Uleåborg, 1973.
[7] *Fridh, K.* Internal frost damage in concrete. Experimental studies of destruction mechanisms. Div. Building Materials, Lund Institute of Technology. Report TVBM-1023, Lund 2005.

5.5.2 Frostskador

Exempel på längdändringsmätningar visas i Figur 5.3. Jämförelse görs mellan prover som "vakuummättats" och prover med normal fukthalt (4 månaders vattenlagring). Som synes expanderar det vakuumbehandlade provet kraftigt vilket beror på den höga vatten-mättnadsgraden. Vid normal vattenhalt kontraherar provet, bortsett från en viss liten expansion i närheten av -40°C då en stor mängd is bildas.



Figur 5.3: Exempel på längdändringsmätningar. Betong med vct 0,60, lufthalt 4,7%. Två efter varandra följande fryscykler.
Övre bilden: Vakuumbehandlad betong. Steg II, Delstudie 1.
Undre bilden: Betong med normal vattenhalt (figuren tagen från Steg I[8])

[8] *Johannesson, B. , Fagerlund, G.*: Betong för lagring av flytande naturgas. Frysfenomen och frostbeständighet vid frysning till -50°C. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7174, Lund 2003.

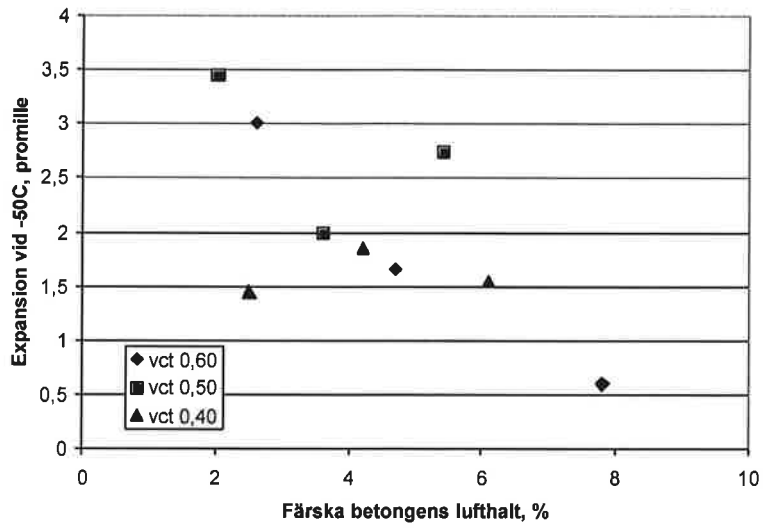
Resultat av samtliga expansionsmätningar och ändring av dynamisk E-modul visas i Tabell 5.5.

Tabell 5.5: Expansion vid -30°C, -50°C och efter upptining. Förlust i dynamisk E-modul.

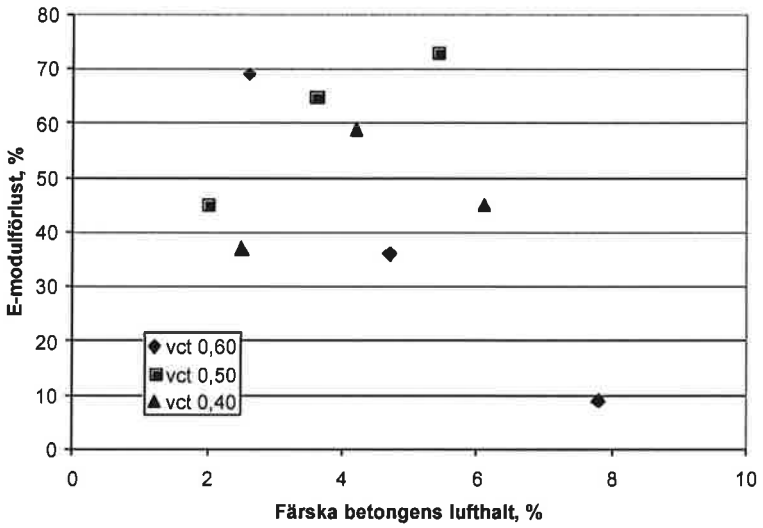
vct	Lufthalt (%)*	Längdändring Övre värdet: Första fryscykeln Undre värdet: Andra fryscykeln (‰)						Ändring av E-modul (medelvärde av 2 fryscykler) (%) Steg II, Delstudie 1 Vakuumbehandlad betong
		Steg II, Delstudie 1 Vakuumbehandlad betong			Steg I "Normal" fukthalt			
		-30°C	-50°C	Efter upptining	-30°C	-50°C	Efter upptining	
0,60	2,6	2,4 2,4	3,0 3,0	1,4 1,4	0,26	0,9	0,26	-69
	4,7	1,1 1,2	1,6 1,7	0,6 0,7	0	0,2	0	-36
	7,8	0,23 0,27	0,6 0,6	0,23 0,23	0	0,04	0,02	-9
0,50	2,0	2,5 3,3	3,0 3,9	1,3 1,7	0,44	1,09	0,35	-45
	3,6	1,5 1,6	1,9 2,1	0,8 0,9	0,06	0,31	0	-65
	5,4	2,1 2,4	2,6 2,9	1,1 1,4	0	0,10	0	-73
0,40	2,5	0,9 1,1	1,4 1,5	0,8 0,8	0	0,39	0	-37
	4,2	1,4 1,7	1,8 1,9	1,0 1,1	0	0,07	0	-59
	6,1	0,9 1,4	1,3 1,8	0,7 0,9	0	0,05	0	-45

* Färsk betongs lufthalt

Samtliga provkroppar utom den med 7,8% lufthalt är allvarligt skadade. För alla betongtyper utom en enda är expansionen flerfalt högre än brottöjningen, vilken är ca 0,15‰. E-modulförlusten varierar mellan ca 40 och 70% med ett enstaka undantag på 9%. Luftinblandning kan inte helt skydda betongen eftersom även större delen av luftporerna vattenfyllts vid vakuumbehandlingen. Detta framgår av Figur 5.4 och 5.5 där expansion resp. E-modulförlust plottats som funktion av lufthalten. Det finns dock en klar tendens att ökad lufthalt ger mindre skador, vilket kan förklaras av att prover med högre lufthalt inte var fullständigt vattenmättade. Se även kommentarer till Figur 5.6 nedan.



Figur 5.4: Steg II, Delstudie 1. Expansion vid -50°C som funktion av färska betongens lufthalt.



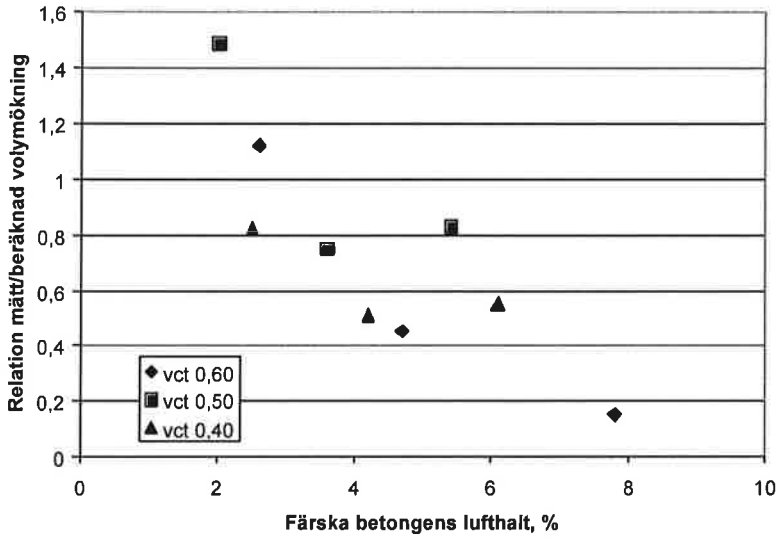
Figur 5.5: Steg II, Delstudie 2. E-modulförlust som funktion av färska betongens lufthalt.

Volymexpansionen kan jämföras med den 9-procentiga volymökning som sker hos vattnet när detta fryser. Om provet är helt vattenmättat bör uppmätt volymexpansion överensstämma med den teoretiska. En sådan jämförelse gällande -50°C visas i Tabell 5.6 och Figur 5.6.

Tabell 5.6: Steg II, Delstudie 1. Samband mellan uppmätt volymökning och beräknad volymökning vid -50°C.

vct	Lufthalt (%) *	Mätt volymökning vid -50°C (3 gånger längdexpansion) (‰)	Beräknad volymökning (9% av fruset vatten) (‰)	Mätt/Beräknad volymökning
0,60	2,6	9,0	8,1	1,11
	4,7	5,0	11,1	0,45
	7,8	1,8	11,7	0,15
0,50	2,0	10,4	6,9	1,51
	3,6	6,0	7,9	0,75
	5,4	8,3	9,9	0,84
0,40	2,5	4,4	5,3	0,83
	4,2	3,2	6,2	0,52
	6,1	4,7	8,5	0,55

* Färsk betongs lufthalt



Figur 5.6: Relationen mätt/beräknad volymökning som funktion av färska betongens lufthalt.

Figur 5.6 visar att betong med högre lufthalt fortfarande har en del luftfyllda porer trots vakuumbehandlingen eftersom större andelen av volymökningen kunde tas om hand utan att provet expanderade. Betongen med ca 8% luft har en kvarstående längdexpansion av enbart 0,23‰ vilket är av samma storleksordning som betongens brottöjning. E-modulförlusten är enbart 9% hos denna betong.

5.6 Sammanfattning av Steg II, Delstudie 1

5.6.1 Kalorimeterförsök

Den ökade vattenhalten i Steg II, Delstudie 1 jämfört med Steg I har som förväntat medfört något högre frysbar vattenmängd vid -50°C. Den ofrysbara vattenmängden vid -50°C är däremot nästan exakt densamma i de båda studierna, vilket visar att en viss ökning av vattenhalten innebär en i stort sett identiskt lika hög ökning av mängden frysbart vatten.

En markant skillnad i förhållande till Steg I är att betydligt större mängd is bildas redan vid -20°C. Ytterligare sänkning av temperaturen till -50°C medför enbart en ökning av mängden is med ca 30%. I Steg I var motsvarande ökning ca 115%. Orsaken till denna förändring är sannolikt att vakuumbehandlingen i Delstudie 1 medför en ökad kontinuitet hos porsystemet genom uppkomst av mikrosprickor vid den uttorkning som sker vid vakuumsugningen. Isbildning av vatten i isolerade kapillärer kan därför initieras av fruset vatten i angränsande porer. I det jungfruliga provet förblir detta vatten isolerat och därmed ofruset.

Inte mindre än ca 50 à 60% av allt porvatten förblir ofruset vid så låg temperatur som -50°C à -60°C. Detta vatten är troligen så hårt bundet att det redan vid rumstemperatur har ett slags "isstruktur". Enligt en approximativ beräkning, baserad på att isen alltid står under normalt atmosfärstryck, motsvarar temperaturen -60°C frystemperaturen hos vatten i porer med radie 27Å. En alternativ beräkning baserad på att isen är helt omsluten av ofruset vatten ger porradien 13Å.
I sådana porer sker fysikalisk fuktbindning vid ca 67% RH resp. ca 40%. Vatten i de allra minsta porerna, de s.k. gelporerna är med stor säkerhet ofruset vid -60°C. Mängden gelporer ($V_{p,gel}$) är ungefär följande vid en antagen hydratationsgrad av 80% för vct 0,50 och 0,60, och 70% för vct 0,40:

vct 0,60: $V_{P,gel}$=55 liter/m^3
vct 0,50: $V_{P,gel}$=75 liter/m^3
vct 0,40: $V_{P,gel}$=75 liter/m^3

En jämförelse av gelporvolymen med uppmätt ofrysbart vatten enligt Tabell 5. 4 visar att även en liten del av det s.k. kapillärporvattnet (25 à 30 kg/m^3) är ofrysbart vid -50°C.

5.6.2 Frysförsök

Vakuumbehandlingen medförde att en stor andel av luftporsystemet vattenfylldes. Frostskadorna blev därför mycket stora i alla prover. Det finns dock en klar tendens att ökad lufthalt ger minskade skador. *Det förefaller därför som om betong kan klara frysning ned till -50°C även under extremt fuktiga förhållanden förutsatt att lufthalten uppgår till minst ca 8%.* Vid så hög lufthalt kommer fortfarande en tillräckligt hög andel av luftporerna att vara luftfyllda och därvid fungera som skyddande "tryckutjämnare".

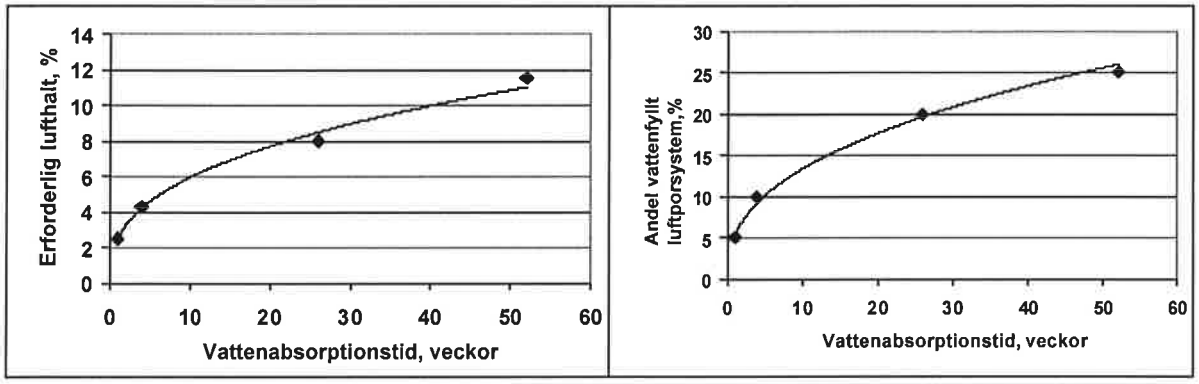
Den erforderliga lufthalten vid given fuktbelastning kan beräknas teoretiskt under förutsättning av att luftporsystemets utseende är känt[9]. En ökad fuktbelastning, t.ex. i form av en ökad tid som betongen kan ta upp vatten resulterar i ett ökat lufthaltsbehov.

Om man vet hur yttre fuktbelastningen ser ut kan man i princip bedöma erforderlig lufthalt för att betongen skall klara denna fuktbelastning. I rapporten i fotnot 9 ges följande exempel på en beräkning av luftbehovet som funktion av den tid en viss betong absorberar vatten.

Tabell 5.7: Beräkning av effekten av vattenlagringstiden på andel vattenfyllt luftporsystem och erforderlig lufthalt. Betong med given diffusivitet för luft löst i vatten och given from på luftporsystemet.

Vattenabsorptionstid	Volymandel vattenfyllt luftporsystem (%)	Erforderlig lufthalt (%)
1 vecka	5	2,5
1 månad	10	4,3
6 månader	20	8,0
1 år	25	11,5

Tabelldata har plottats i Figur 5.7.



Figur 5.7: Data från Tabell 5.7

[9] *Fagerlund, G.*: A service life model for internal frost damage in concrete. Div. Building Materials, Lund Institute of Technology. Report TVBM-3119, 2004.

6 Delstudie 2. "Metantemperatur". Hög fukthalt

6.1 Försöksserier

Samma betongtyper som i Steg I och i Steg II, Delstudie 1 studerades. Däremot utelämnades prover med vct 0,50.

Fuktnivån var "naturlig", dvs proverna hade hela tiden legat i kalkmättat vatten. Lagringstiden för frysprover var ca 1,5 år, dvs fuktnivån är något högre än i Steg I där tiden enbart var 4 månader.

Följande försöksserier genomfördes:

Frysning. Huvudserie: Frysning i flytande kväve vid -196°C efter det att "temperering" skett vid -50°C för att minska risken för "fryschock".

Frysning. Specialserie 1: Jämförelse av skador i intervallet 0°C till -50°C med skador i intervallet -50°C till -196°C.

Frysning. Specialserie 2: Test av inverkan av en torknings-uppfuktningscykel på skador vid frysning vid -196C.

Kalorimeterförsök: Bestämning av frysbart vatten ned till -150°C.

6.2 Huvudserie. Frostskador vid frysning till -196°C

6.2.1 Målsättning

Målsättningen med huvudserien var att undersöka om betong kan motstå frysning i flytande kväve efter det att den har varit vattenlagrad under 1,5 år.

6.2.2 Försöksmetodik

Sammansättningen på betongproverna visas i Tabell 3.1

Följande försöksprogram genomfördes:

1. Provstavar 30x30x120 mm sågades ur block som varit vattenlagrade under ca 1,5 år. 2 prover användes för varje betongtyp.
2. Vikt och dynamisk E-modul bestämdes. Den senare bestämdes ur egenfrekvensen vid fri böjsvängning.
3. Proverna sveptes in i tjock aluminiumfolie och placerades i frysskåp vid -50°C.
4. Efter ca 1 dygn bestämdes egenfrekvensen hos prover vid temperatur -50°C.
5. Prover sänktes ned i flytande kväve. Referensprov med termoelement användes för att kontrollera att sluttemperaturen, ca -196°C, uppnåtts.
6. Dynamisk E-modul bestämdes hos prover vid temperatur -196°C.
7. Prover tinades i rumstemperatur.
8. Efter upptining bestämdes vikt och dynamisk E-modul.
9. Prover torkades till jämvikt i +105°C och vägdes.
10. Prover vakuummättades. Vakuummättad vikt bestämdes.
11. Ur vikt vid frysning, torrvikt och mättad vikt beräknades vattenmättnadsgraden under frysförsöket.

6.2.2 Resultat

Resultat av Huvudserien visas i Tabell 6.1. Värdet på den dynamiska E-modulen i GPa har inte beräknats. I stället anges E-modul relativt utgångsvärdet hos provet före frysning. (E_{dyn}=konstant·f^2, där f är egenfrekvensen). Resultaten redovisas även i Figur 6.2.

Tabell 6.1: Resultat från Steg II, Delstudie 2, Huvudserie

vct	lufthalt (%)*	Vattenmätt-nadsgrad	E_{-196}/E_0**	E_{efter}/E_0***
0,60	2,6	0,94	1,38	0,77
		0,93	ej mätt	0,74
	4,7	0,87	1,40	0,96
		0,89	1,40	0,95
	7,8	0,77	1,60	0,98
		0,79	1,72	0,95
0,40	2,5	0,95	1,34	0,94
		0,94	1,31	0,89
	4,2	0,85	1,34	0,99
		0,89	1,40	0,99
	6,1	0,85	1,36	0,91
		0,85	1,30	0,98

* Färska betongens lufthalt
** E-modul vid -196°C relativt E-modul före frysning
*** E-modul efter upptining relativt E-modul före frysning

Vattenmättnadsgraderna är något osäkra eftersom det inte är helt klart om proverna med hög lufthalt blev fullständigt vattenmättade vid vakuumbehandlingen.

Resultatet visar att betong med luftinblandning klarar nedfrysning till -196°C utan att skadas trots att den varit vattenlagrad under ca 1,5 år. Detta överensstämmer med resultat från Steg I där samma betong enbart frystes ned till -50°C. Orsaken till att inga skador uppkommer vid ytterligare sänkning till -196C är med all sannolikhet att ingen mer is bildas inom intervallet -50°C till -196°C.

Det är intressant att notera att E-modulen vid -196°C är mycket högre än hos ofrusen betong. Till stor del, men inte helt, kan detta förklaras av isens styvhetshöjande effekt, se avsnitt 6.6.3.

6.3 Specialserie 1. Frostskador inom området -50°C till -196°C

6.3.1 Målsättning

Målsättningen med specialserien var att undersöka om de ev. skador som upptäcks efter nedfrysning till -196°C uppkommit redan innan betongen nått -50°C eller om de uppkommer vid frysning i intervallet -50°C till -196°C.

6.3.2 Försöksmetodik

Sammansättningen på betongproverna visas i Tabell 3.1

Följande försöksprogram genomfördes:

Frysning nr 1 till -50°C:

1. Provstavar 30x30x120 mm sågades ur block som varit vattenlagrade under ca 1,5 år. 1, 2 eller 3 prover användes för varje betongtyp.
2. Vikt och dynamisk E-modul bestämdes.
3. Prover sveptes in i tjock aluminiumfolie och placerades i frysskåp vid -50°C.
4. Efter ca 1 dygn bestämdes egenfrekvensen hos prover vid temperatur -50°C.
5. Prover tinades i rumstemperatur.
6. Efter upptining bestämdes vikt och dynamisk E-modul.

Frysning nr 2 till -50°C och därefter till -196°C:

7. Prover sveptes in i tjock aluminiumfolie och placerades i frysskåp vid -50°C.
8. Efter ca 1 dygn bestämdes egenfrekvensen hos prover vid temperatur -50°C.
9. Prover sänktes ned i flytande kväve.
10. Dynamisk E-modul bestämdes hos prover vid temperatur -196°C.
11. Prover tinades i rumstemperatur.
12. Efter upptining bestämdes vikt och dynamisk E-modul.
13. Prover användes direkt i Specialstudie 2 utan förändring av fuktnivån.

6.3.3 Resultat

Resultatet av Specialserie 1 visas i Tabell 6.2.

Relationen mellan E-modul efter frysning till -196°C och E-modulen efter frysning till -50°C visas i Figur 6.3. Resultatet visar att inga nya skador uppträder när temperaturen sänks från -50°C till -196°C. Resultaten från huvudserien bekräftas alltså.

Samtliga värden från Huvudserien och från Specialserie 1 över E-modulförlust efter frysning vid -196°C har plottats i Figur 6.2.

Relationen mellan E-modul hos frusen betong vid -50°C och -196°C visas i Figur 6.5. E-modulen vid -196°C är mycket hög; i genomsnitt ca 60% högre än för ofrusen betong och ca 25% högre än vid -50°C. Den ökade E-modulen kan inte förklaras av ökad mängd is eftersom denna inte har ökat i förhållande till -50°C. Frusen betongs E-modul diskuteras vidare i avsnitt 6.6.3.

Tabell 6.2: Resultat från Steg II, Delstudie 2, Specialserie 1

vct	lufthalt (%)*	Första frysning till -50°C		Andra frysning till -50°C och sedan -196°C		
		E_{-50}/E_0**	E_{efter}/E_0***	E_{-50}/E_0**	E_{-196}/E_0****	E_{efter}/E_0***
0,60	2,6	1,18	0,79	1,50	1,78	0,74
	4,7	1,20	0,93	1,29	1,58	0,99
		1,21	0,96	1,29	1,55	0,97
	7,8	1,30	0,95	1,34	1,88	1,00
		1,27	0,98	1,31	1,57	0,99
0,40	2,5	1,11	0,97	1,14	1,65	0,95
	4,2	1,21	0,97	1,18	1,53	0,98
		1,13	0,98	1,17	1,41	1,00
	6,1	1,13	0,97	1,16	1,43	0,98
		1,18	0,99	1,19	1,58	0,99
		1,16	0,98	1,20	1,42	0,99
Medelvärden		1,19		1,25	1,58	

* Färska betongens lufthalt
** E-modul vid -50°C relativt E-modul före frysning
*** E-modul efter upptining från -50°C resp. -196°C relativt E-modul före frysning
**** E-modul vid -196°C relativt E-modul före frysning

6.4 Specialserie 2. Inverkan av en uttorknings-uppfuktningscykel

6.4.1 Målsättning

I samtliga tidigare studier genomfördes frysprovningen med prover som helt tiden legat i vatten. I en riktig konstruktion kan man förvänta sig att betongen under vissa perioder kan torka. Målsättningen med Specialserie 2 var att undersöka om en uttorknings-uppfuktningscykel före nedfrysning till -196°C ger ökad risk för frostskador.

6.4.2 Försöksmetodik

Sammansättningen på betongproverna visas i Tabell 3.1

Följande försöksprogram genomfördes

1. Samma prover som i Specialstudie 1 användes direkt efter avslutning av denna.
2. Proverna torkades under 16 dygn i +50C.
3. De torkade proverna vakuummättades med vatten.
4. De vakuummättade proverna torkades till samma vattenmättnadsgrad som i Specialserie 1.
5. Vikt och dynamisk E-modul bestämdes.
6. Prover sveptes in i tjock aluminiumfolie och placerades i frysskåp vid -50°C.
7. Efter ca 1 dygn bestämdes egenfrekvensen hos prover vid temperatur -50°C.
8. Prover sänktes ned i flytande kväve.
9. Prover tinades i rumstemperatur.
10. Efter upptining bestämdes vikt och dynamisk E-modul.
11. Prover torkades till jämvikt i +105°C och vägdes.
12. Prover vakuummättades. Vakuummättad vikt bestämdes.
13. Ur vikt vid frysning, torrvikt och mättad vikt beräknades vattenmättnadsgraden under såväl Specialserie 1 som Specialserie 2.

6.4.3 Resultat

Resultatet av Specialserie 2 visas i Tabell 6.3. E-modulförlusten hos otorkade prover respektive torkade och återuppfuktade prover har även plottats i Figur 6.4.

Tabell 6.3: Resultat från Steg II, Delstudie 2, Specialserie 2.

vct	Lufthalt (%)*	Vattenmätt-nadsgrad****	E_{efter}/E_0 ***	
			Otorkade prover (Specialserie 1)**	Torkade och återuppfuktade prover (Specialserie 2)
0,60	2,6	0,82/0,83	0,74	0,65
	4,7	0,78/0,81 0,73/0,75	0,99 0,97	0,92 0,96
	7,8	0,82/0,84 0,73/0,76	1,00 0,99	0,97 0,93
0,40	2,5	0,87/0,88	0,95	0,83
	4,2	0,81/0,83 0,77/0,79	0,98 1,00	0,99 0,92
	6,1	0,82/0,84 0,77/0,75 0,77/0,79	0,98 0,99 0,99	0,99 0,98 0,94

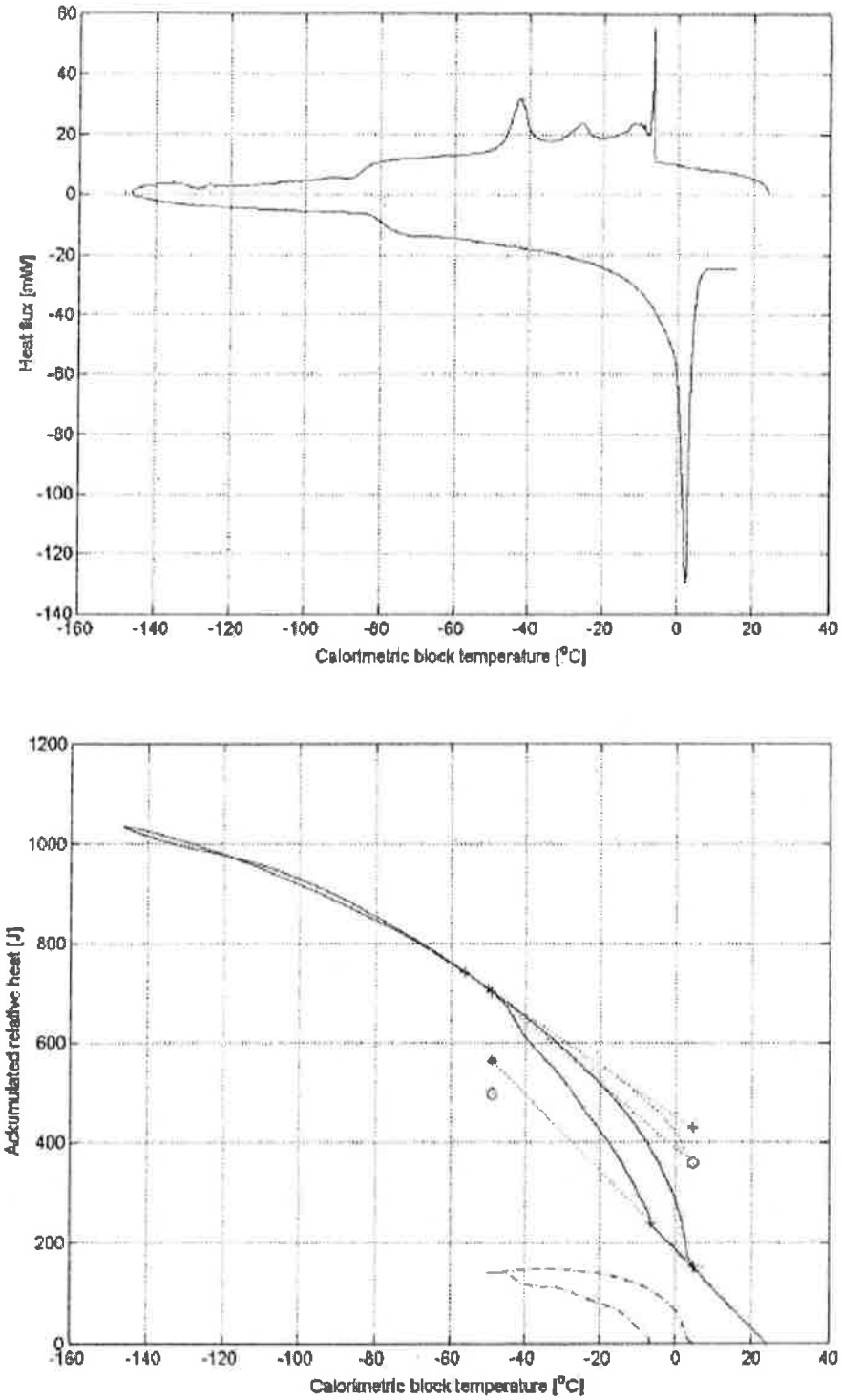
* Färsk betongs lufthalt
** Data från Tabell 6.2
*** E-modul efter upptining från -196°C relativt E-modul före frysning
**** Specialserie 1/Specialserie 2

Torknings-uppfuktningsproceduren har medfört en viss ökning av skadorna hos de två betongtyper som saknar luftinblandning. Däremot har den inte haft någon effekt på de lufttillsatta betongerna.

6.5 Isbildning vid extremt låg temperatur

Normalt avslutades kalorimetermätningarna vid -90°C; se figurer i BILAGAN. Samtliga dessa mätningar visar att all isbildning var avslutad redan vid ca -45°C. Ett exempel visas i Figur 5.2. Vid lägre temperatur än -45°C sammanfaller fryskurvan med smältkurvan vilket är ett ytterligare indicium på att ingen isbildning har skett.

För att undersöka om isbildning trots allt sker vid ännu lägre temperatur genomfördes ett försök där temperaturen sänktes till -150°C. Mätning av värmeflöde och ackumulerat värmeflöde visas i Figur 6.1. Den sista stora isbildningen skedde vid ca -40 à -45°C. Vid ca -90°C sker en påtaglig endoterm reaktion vilken motsvaras av en exoterm reaktion vid uppvärmningen. Orsaken till detta fenomen är inte klar. Det kan dock inte bero på isbildning eftersom denna är en exoterm reaktion. Möjligen sker en omstrukturering av adsorberat vatten, ett fenomen som då enligt mätningen skulle kräva energitillförsel.

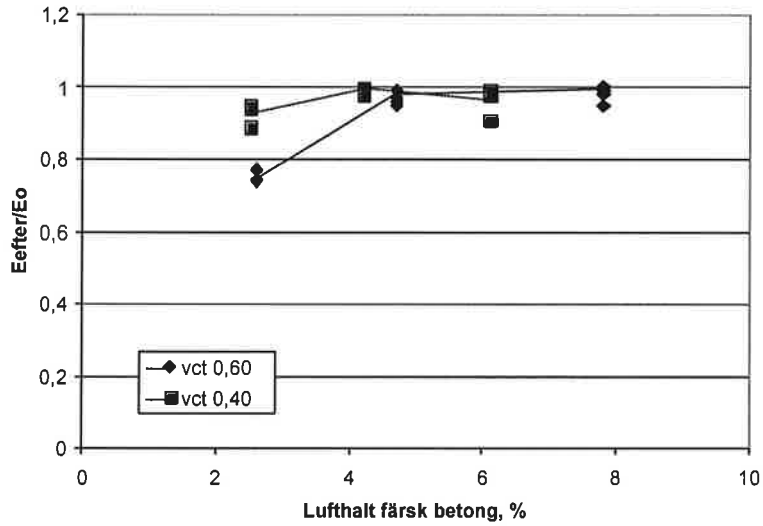


Figur 6.1: Kalorimetermätning av värmeflöde och totalt utvecklad värmemängd vid frysning till -150°C. Betong med vct 0,50 ,lufthalt 3,6%. Vattenhalt 1,664 g, motsvarande 4 månaders kontinuerlig vattenlagring.
Övre bilden: Värmeflöde.(Övre kurva, nedfrysning. Undre kurva uppvärmning).
Undre bilden: Totalt värmeflöde (Övre kurva, uppvärmning. Undre kurva, nedfrysning).

6.6 Sammanfattning av Steg II, Delstudie 2

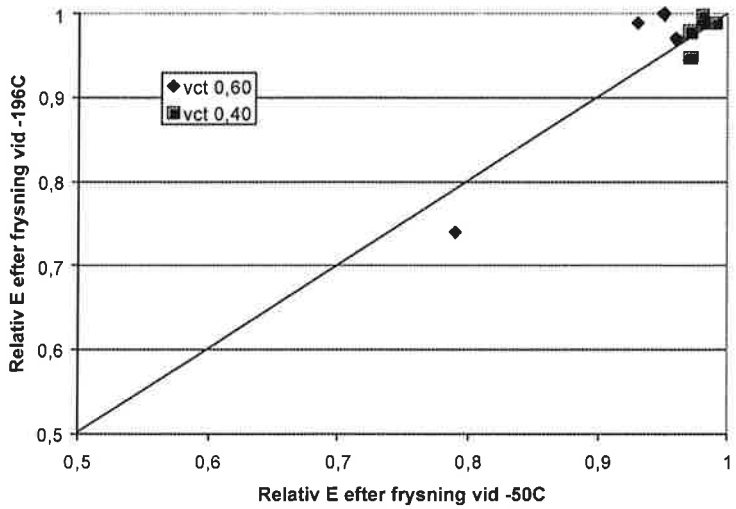
6.6.1 Frysskador vid frysning i flytande kväve vid -196°C

I Figur 6.2 visas E-modulen hos upptinad betong efter frysning vid -196°C som funktion av färska betongens lufthalt. Data från såväl Huvudserien som Specialserie 1 har lags in. Som synes är det enbart betong som saknar luftinblandning som fått vissa skador vilka dessutom är störst för betong med vct 0,60. Orsaken till att frysning vid -196°C inte ger större skador än frysning vid -50°C är sannolikt att mängden is inte ökar vid temperatursänkningen.



Figur 6.2: Resultat från Huvudserien och Specialserie 1. E-modulen efter upptining för betong som frusits vid -196°C relaterad till E-modulen före frysning.

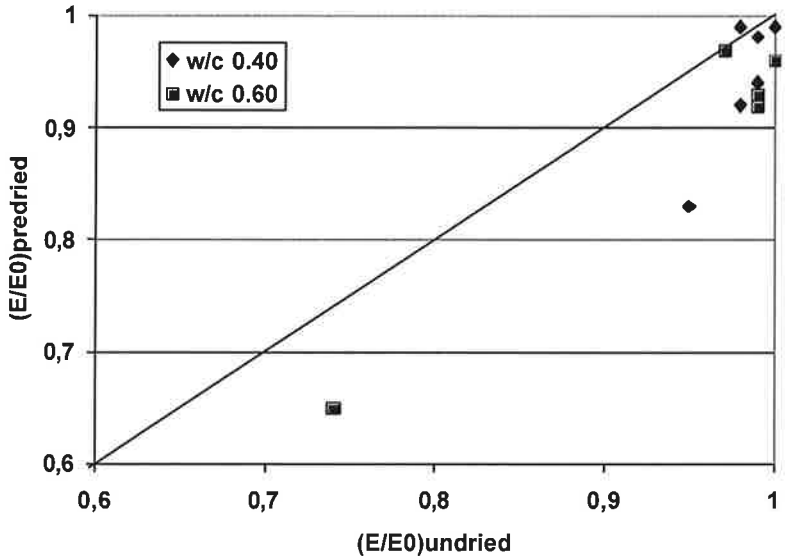
I Figur 6.3 har E-modulen efter upptining av prover som frusits vid -196°C plottats mot E-modulen efter upptining av prover som enbart frusits vid -50°C. Skillnaden är liten vilket visar att frysning vid -196°C inte ger större skador än frysning vid -50°C.



Figur 6.3: Resultat av Specialserie 1. Relationen mellan E-modulen efter frysning till -196°C och E-modulen efter frysning till -50°C. Båda E-modulerna gäller upptinad betong och är relaterade till E-modulen före frysning.

6.6.2 Inverkan av en uttorknings-uppfuktningscykel på frostskador

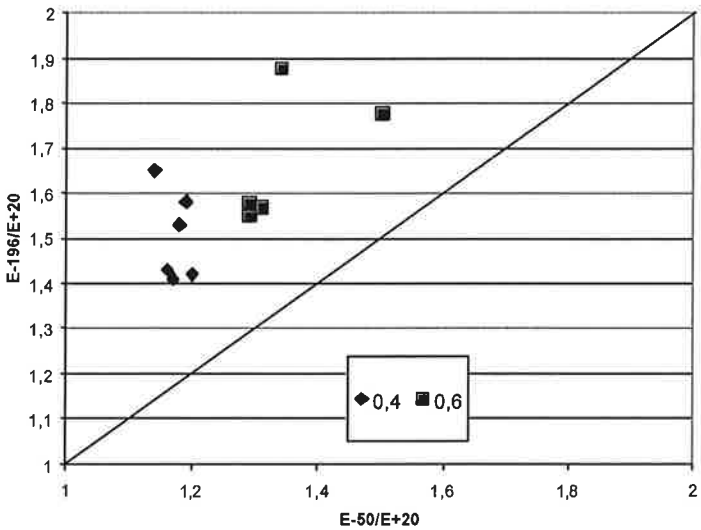
I Figur 6.4 har E-modulen efter upptining av uttorkade och därefter återuppfuktade prover plottats mot E-modulen hos otorkade prover. I båda fallen har frysning skett vid -196°C. En viss negativ påverkan av uttorkningen kan ses, vilket beror på att frysbara vattenmängden troligen ökat något på grund av torkningen. Enbart 2 betongtyper har emellertid större E-modulförlust än 10%. Båda dessa betongtyper saknar luftinblandning.



Figur 6.4: Jämförelse av E-modulförlusten mellan betong som aldrig torkats och betong som genomgått en uttorknings-uppfuktningscykel. I båda fallen har frysning skett vid -196°C.

6.5.3 E-modul hos frusen betong

Frusen betong har avsevärt högre E-modul än ofrusen betong. Detta framgår av Tabell 6.2. E-modulen vid -196°C är dessutom betydligt högre än vid -50°C vilket framgår av Figur 6.5.



Figur 6.5: Resultat av Delstudie 2, Specialserie 1. E-modul hos frusen betong vid -50°C resp -196°C. E-modulen är relaterad till E-modulen vid +20°C före frysning.

En rimlig orsak till E-modulökningen är att den bildade isen medför en uppstyvande effekt. E-modulen hos is vid -50°C är ca 15,5 GPa och vid -180°C ca 16,5 GPa[10] vilket kan jämföras med betongens E-modul som är ca 35 à 40 GPa. E-modulökningen vid -50°C kan förklaras med detta vilket visas med följande exempel.

Exempel 1

En approximativ beräkning av E-modulhöjningen orsakad av isbildning görs för betongen med vct 0,60 utan luftinblandning.

Lufthalt 3,2% i hårdnad betong, dvs 9 liter/m^3 cementpasta. Cementpastahalt 35,4% (inkl luft)

E-modulen för cementpasta kan beräknas ur:
$E_p=70(1-P_p)^2$ GPa där P är pastans porositet.

Cementpastans porositet är:
$P_p=(0,60-0,19\cdot0,8)/(0,60+0,32)+0,09=0,58$ m^3/m^3 där 0,8 är hydratationsgraden och 0,32 är spec. volym hos cement

Den ofrusna cementpastans E-modul blir:
$E_p=70(1-0,58)^2= 12,5$ GPa

Den ofrysta betongens E-modul beräknas med Hashins formel[11]:
$E_b=12,5(0,354\cdot12,5+1,646\cdot65)/(1,646\cdot12,5+0,354\cdot65)=$ **32 GPa** (65GPa är ballastens E-modul, 0,646 är volymandelen ballast)

Vid -50°C har ca 85 liter vatten frusit i en m^3 av betongen. I cementpastan motsvarar detta 24% av totalvolymen och 40% av totalporositeten. Resterande porositet hos den del av pastan som inte är isfylld är 45%. E-modulen hos resterande del av cementpastan är då
$Ep=70(1-0,45)^2=21$GPa

Isens E-modul är ca 15,5GPa vid . Hashins formel ger då följande E-modul hos frusen cementpasta:
$E_{p,f}=21(0,76\cdot21+1,24\cdot15,5)/(1,24\cdot21+0,76\cdot15,5)=19,5$ GPa

Den frusna betongens E-modul blir:
$E_{b,f}=19,5(0,354\cdot19,5+1,646\cdot65)/(1,646\cdot19,5+0,354\cdot65)=$**40 GPa**

Förhållandet i E-modul hos fruset resp. ofruset prov är 40/32=**1,25**. Det observerade förhållandet enligt Tabell 6.2 är **1,19 à 1,25**.

---

[10] *Fletcher, N. H.:* The chemical physics of ice. Cambridge University Press, 1970.
[11] Hashin, Z.: The elastic moduli of heterogeneous materials. J. of Applied Mechanics,1962.

Hashins ekvation skrivs:
E=Ek[(1-Vp)Ek+(1+Vp)Ep]/[(1+Vp)Ek+(1-Vp)Ep]
där Ek och Ep är E-modulerna hos kontinuerlig fas resp partikelfas. Vp är volymandelen partikelfas.

E-modulökningen vid -196°C är så stor att den inte kan förklaras enbart med isbildningen. Ingen mer is bildas nämligen i intervallet -50°C till -196°C. Därför skulle man förvänta en ökning av E i förhållande till ofrusen betong med ca 20% även vid -196°C. Den verkliga ökningen är emellertid ca 60%. Om allt porvatten skulle ha *isstruktur* vid -196°C kan detta förklara den ökade E-modulen vilket visas med följande beräkning för samma betong som den som analyserades i Exempel 1. Ofruset vatten antas ha samma uppstyvande effekt som is vid -196°C,dvs det antas ha en fiktiv "E-modul" av 16,5 GPa.

Exempel 2

Vattenmättnadsgraden hos betong med vct 0,60 utan luftinblandning är 0,94, dvs vattenhalten i cementpastan är 0,94·580= är 545 kg/m^3. eller 54,5% av pastavolymen.

Volymen av den del av pastan som inte är vattenfylld är 0,06·580=35kg/m^3.

Porositeten hos den del av pastan som inte är vattenfylld är då 45/(420+35)=0,10 m^3/m^3.
E-modulen hos icke vattenfylld del av cementpastan är då
$E_p=70(1-0,10)^2=56$ GPa

Isens E-modul är ca 16,5 GPa. Hashins formel ger följande E-modul hos frusen cementpasta:
$E_{p,f}=56(0,46\cdot 56+1,54\cdot 16,5)/(1,54\cdot 56+0,46\cdot 16,5)=30,5$ GPa

Den frusna betongens E-modul blir:
$E_{b,f}=30,5(0,354\cdot 30,5+1,646\cdot 65)/(1,646\cdot 30,5+0,354\cdot 65)=$**49 GPa**

Förhållandet i E-modul hos fruset resp. ofruset prov är 49/32=**1,53**. Det experimentellt observerade förhållandet är enligt Tabell 6.2 **1,58**.

En alternativ orsak till en ökade E-modulen vid låg temperatur är att själva betongmaterialets styvhet ökar vid låg temperatur. Detta har undersökts genom att några helt uttorkade betongstavar har sänkts ned i flytande kväve och därefter tempererats i ett frysskåp vid -30°C. Egenfrekvensen hos betong vid -196°C och -30°C jämfördes med egenfrekvensen hos samma prover vid rumstemperatur. I Tabell 6.4 visas resultatet. Som synes har E-modulen beräknad ur kvadraten på egenfrekvensen minskat något vid sänkt temperatur. Minskningen är ungefär lika stor vid både temperaturnivåerna. Den observerade E-modulökningen hos nedfrusen vattenhaltig betong kan således inte bero på att betongmaterialets E-modul ökar, utan måste bero på isbildning och samverkan mellan ofruset vatten och fast material.

Tabell 6.4: Dynamisk E-modul hos helt uttorkad betong vid -196°C och -30°C jämförd med E-modulen vid rumstemperatur.

vct	Lufthalt	E_{-196}/E_{+20}	E_{-30}/E_{+20}
0,60	2,6	0,92	0,93
	7,8	0,94	0,97
0,40	2,5	0,89	0,92

7 Slutsatser

Följande slutsatser kan dras av undersökningens Steg I och Steg II:

Hög fuktbelastning motsvarande 4 månaders kontinuerlig vattenlagring:

1. Betong med vattencementtal upp till 0,60 motstår frystemperatur ned till -196°C utan att få allvarliga frostskador, förutsatt att den har en viss luftinblandning.

2. Sänkt vattencementtal gör att lufthaltsbehovet blir mindre. Riktvärden på lufthaltskravet är ca 4 à 5% för vct 0,40 à 0,50 och 7% för vct 0,60. Lufthaltskravet är således högre än vad som gäller för frysning vid måttliga temperaturer (ca -20°C). Detta gäller särskilt betong med högt vct. Orsaken till det större lufthaltsbehovet är att ismängden ökar kraftigt när temperaturen sänks från -20°C till -50°C. I stort sett fördubblas ismängden inom detta temperaturintervall.

3. Betong som saknar luftinblandning är inte frostbeständig vid -50°C och inte heller vid -196°C. Detta gäller alla vattencementtal. Skadorna ökar kraftigt med ökat vct.

4. Vid sänkning av lägsta frystemperatur från -50°C till -196°C uppstår inga ytterligare frostskador. Detta innebär att en betong som är frostbeständig vid -50°C, dvs en betong med en viss lägsta lufthalt, också är frostbeständig vid -196°C.

Extremt hög fuktbelastning uppnådd genom vatteninsugning efter vakuumbehandling:

1. Mycket stora frostskador uppstår i all betong vid frysning till -50°C. Även betong med normal luftinblandning skadas. Orsaken är att en stor andel av luftporsystemet inaktiveras genom vattenabsorption.

2. Mycket hög luftinblandning kan skydda betongen tämligen effektivt. Enstaka resultat tyder på att en lufthalt av storleksordningen 8 à 9% kan erfordras.
   OBS: Detta förutsätter att luftporbildande tillsatsmedel och cement av hög kvalitet används, samt att luftporbildare och cement är kompatibla. I annat fall torde man inte få frostbeständighet ens vid mycket hög lufthalt.

Inverkan av "naturlig åldring" av betongen:

1. Betong kan "åldras" genom att utsättas för uttorknings-uppfuktningscykler. Därvid kan den frysbara vattenmängden öka. Samtidigt medför torkning att isbildning sker vid högre temperatur. Vakuumtorkning under några dygn följd av vatteninsugning medförde att 70% mer vatten frös vid -20°C än hos det jungfruliga provet som aldrig utsatts för torkning. Däremot var mängden fruset vatten vid -50°C oförändrad.

2. En kraftig uttorkning vid +50°C och därefter följande vattenupptagning visade sig inte ha någon påtaglig effekt på frostbeständigheten hos lufttillsatt betong som frystes vid -196°C. Betong utan luftinblandning skadas dock något mer då den tidigare utsatts för en uttorknings-uppfuktningscykel.

Inverkan av låg temperatur på betongens E-modul:

1. Frusen betong har betydligt högre dynamisk E-modul än ofrusen betong. Detta gäller trots att betongen fått vissa frostskador.

2. Ökningen av E-modulen är ca 20% vid -50°C och ca 60% vid -196°C.

3. Troligen ökar även den frusna betongens hållfasthet genom isens "armerande" verkan. Detta har dock inte undersökts.

BILAGA

Provningsresultat i Steg II
Delstudie 1: Vakuumbehandlade prover

Innehåll **Sid**

Använda provningsmetoder	B-2
Bestämning av frysning och smältning av vatten inom området 0°C till ca -50°C	B-3
Längdändringar	B-13

Använda provningsmetoder

Följande provningsmetoder användes:

- Lågtemperatur scanning kalorimeter av typ SETARAM, DSC.
- Dilatometer-ram av Invar för mätning av längdändringar under frysning-upptining.
- Utrustning för mätning av egenfrekvens vid fri böjsvängning av typ Grindosonic.

Mätmetoderna beskrivs i slutrapporten över Steg I[1].

Kalorimetermätningar och mätningar av längdändring visas i denna bilaga. Mätningar av dynamisk E-modul visas i resp. kapitel i huvudrapporten.

[1] *Johannesson, B., Fagerlund,G.*: Betong för lagring av flytande naturgas. Frysfenomen och frostbeständighet vid frysning till -50°C. Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7174, Lund 2003.

Samtliga mätningar som redovisas i denna Bilaga samt alla utvärderingar av försöken har genomförts av Björn Johannesson.

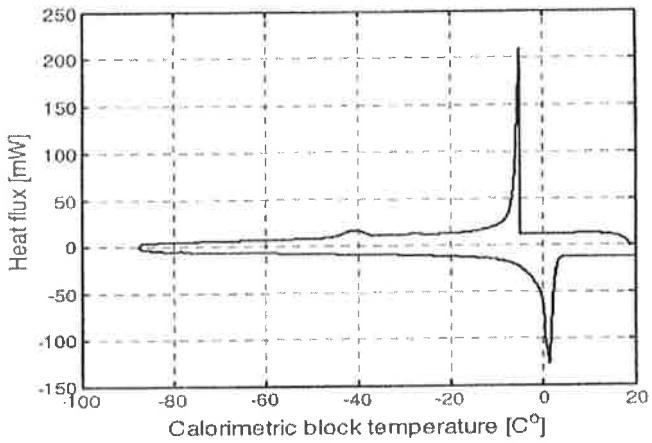
Bestämning av frysning och smältning av vatten inom området 0°C till ca -50°C

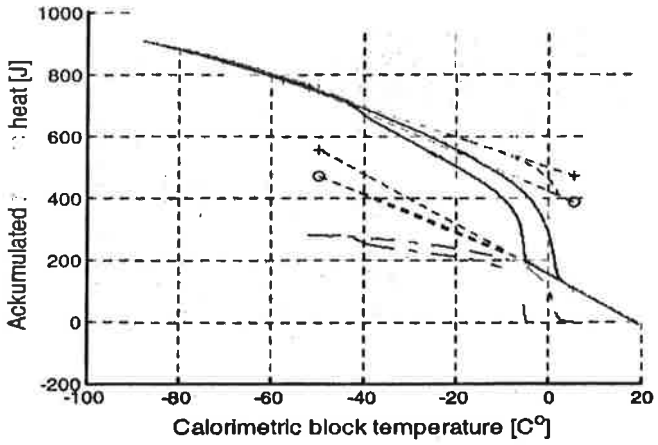
För varje betongtyp visas tre diagram:

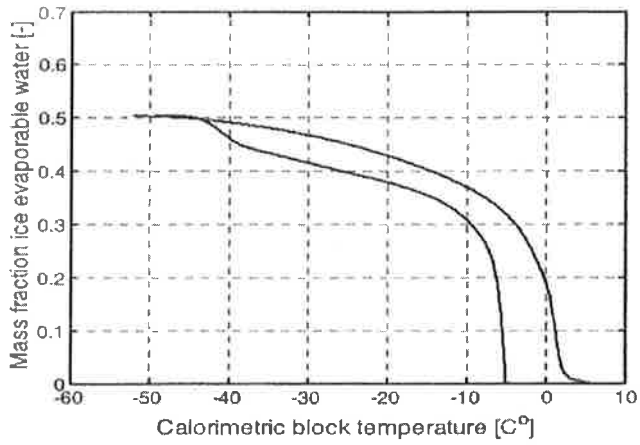
1. Värmeflöde som funktion av temperaturen ("Heat flux")
2. Summa värmeflöde från provet ("Ackumulated relative heat")
3. Beräknad bildad och smält ismängd som andel av total vattenhalt ("Mass fraction ice evaporable water")

"Calorimetric block temperature" på x-axeln i figurerna är temperaturen hos det aluminumblock som omger provkroppen. Provkroppens temperatur kan vara någon grad högre än kalorimeterblockets temperatur vid nedfrysning och någon grad lägre vid smältning.

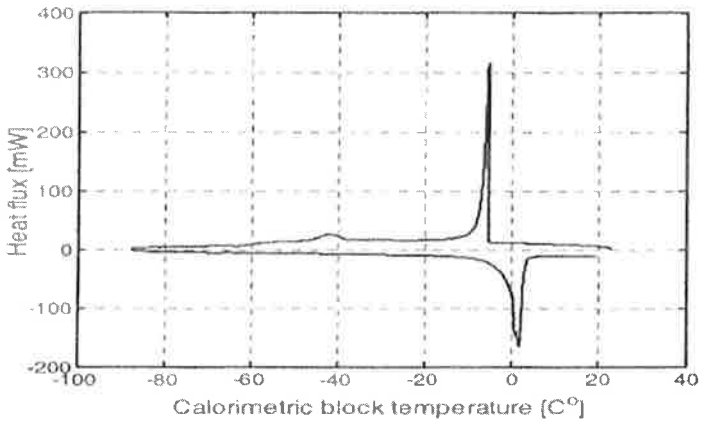
vct 0,60; 2,6% luft
vattenhalt i provet: 1,654 g

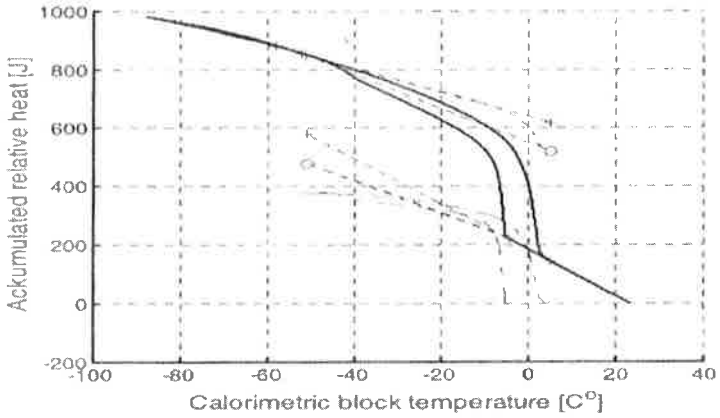


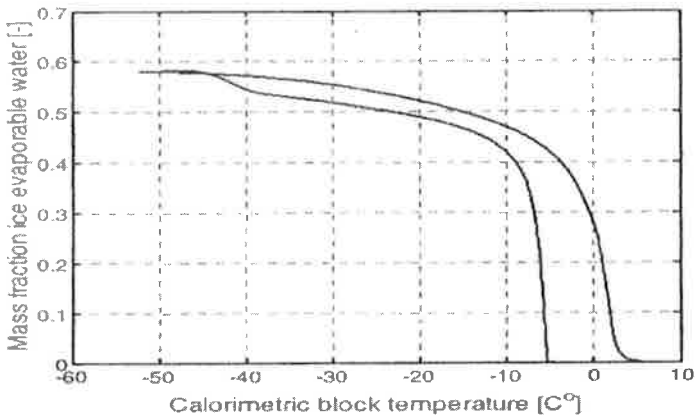




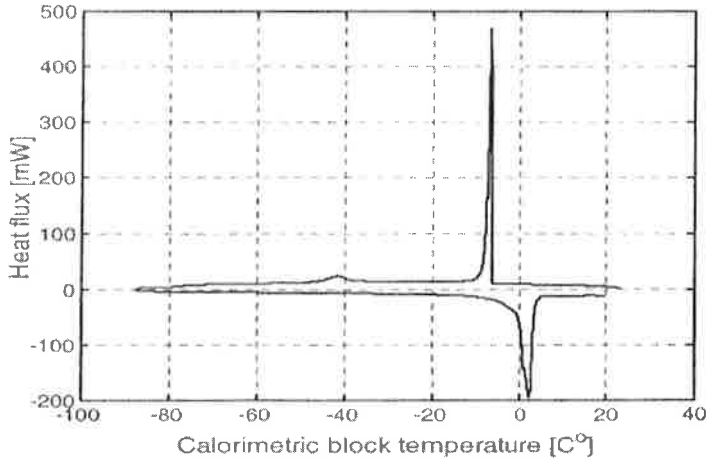
vct 0,60; 4,7% luft
vattenhalt i provet: 1,934 g

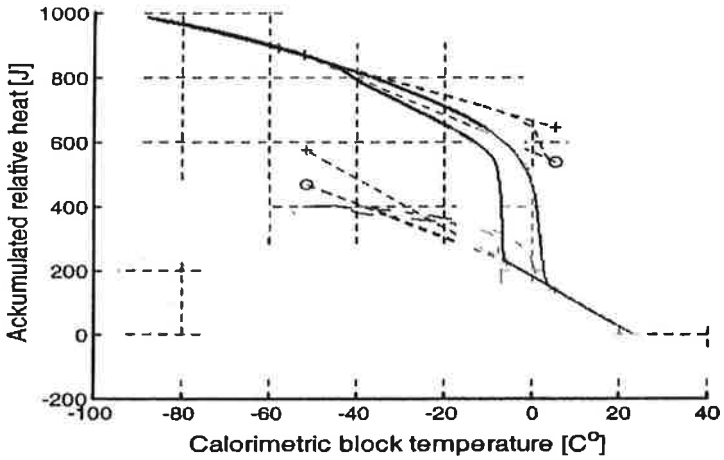


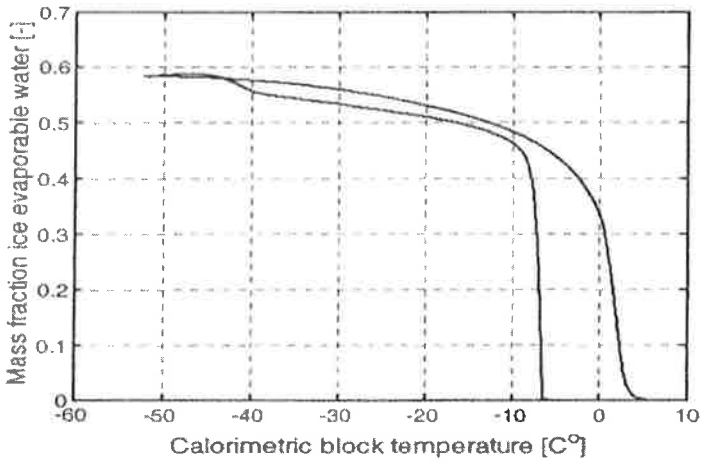




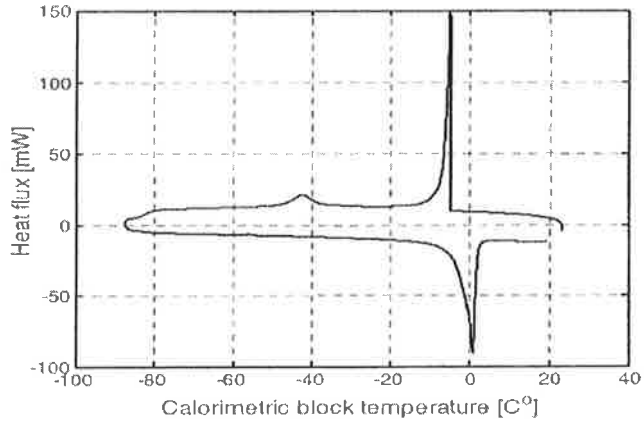
vct 0,60; 7,8% luft
vattenhalt i provet: 2,045 g

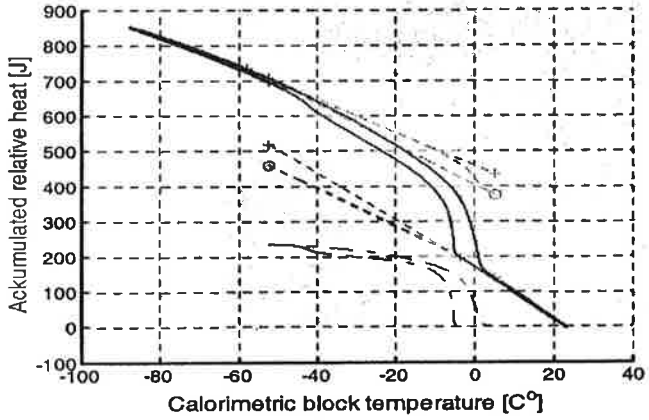


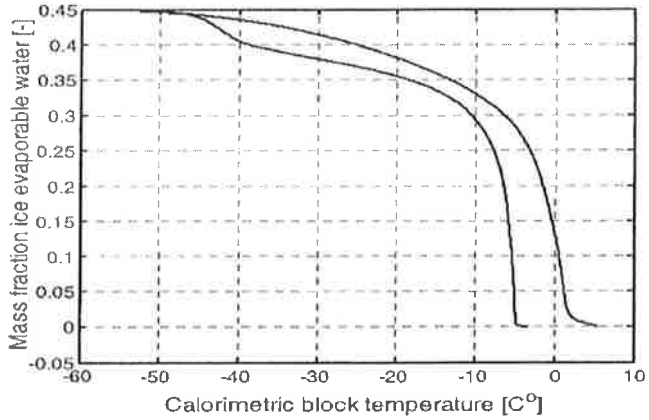




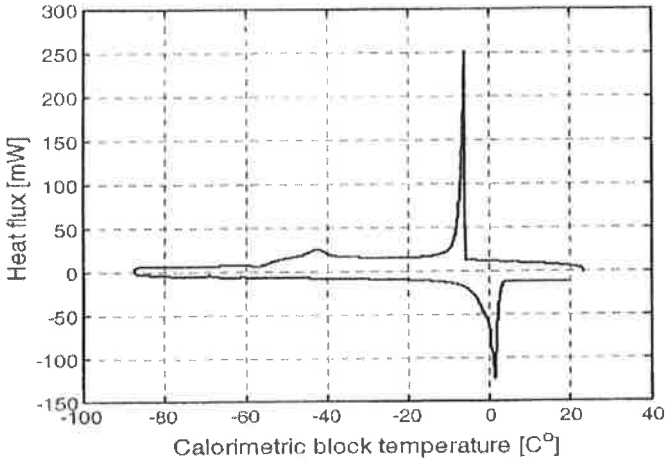
vct 0,50; 2,0% luft
vattenhalt i provet: 1,582 g

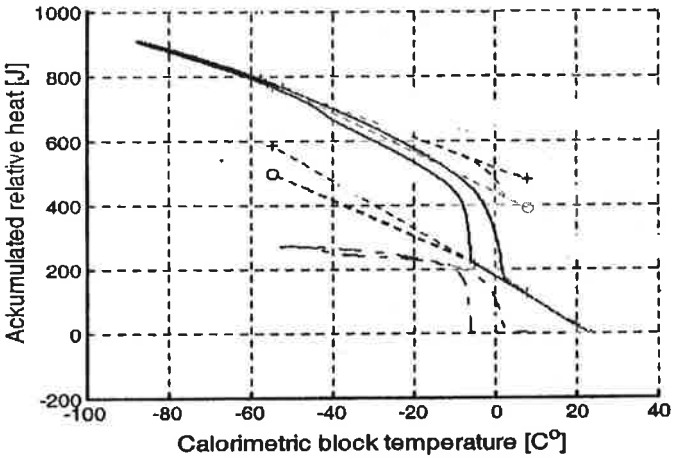


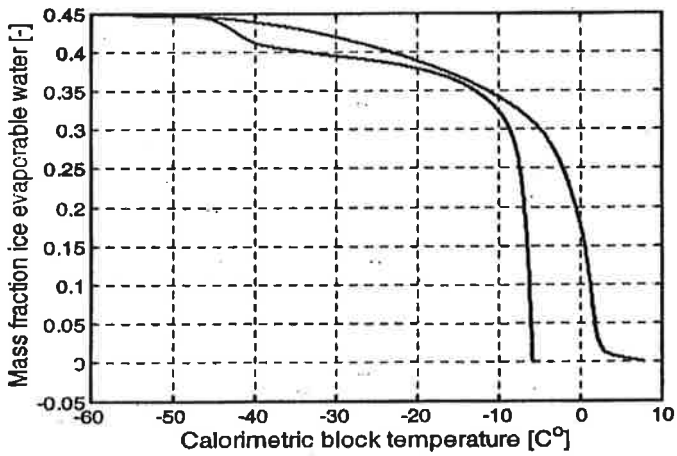




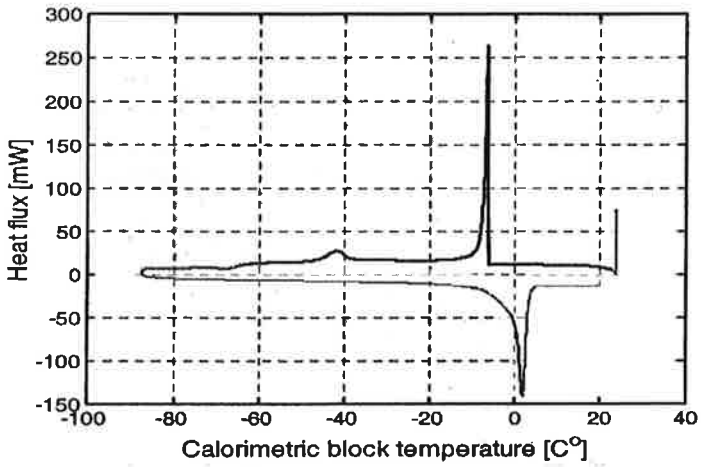
vct 0,50; 3,6% luft
vattenhalt i provet: 1,811 g

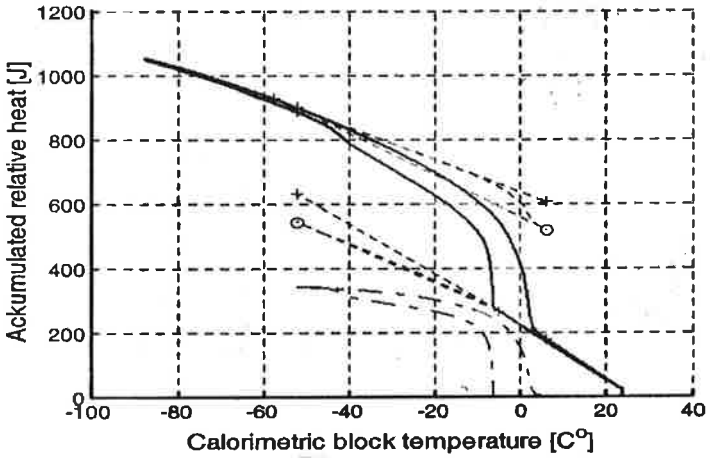


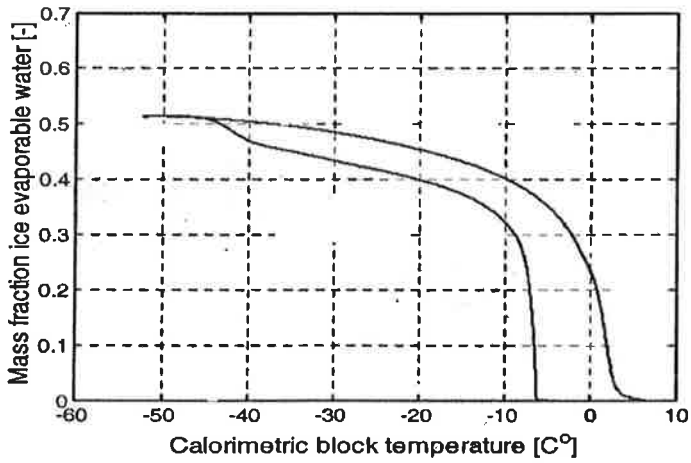




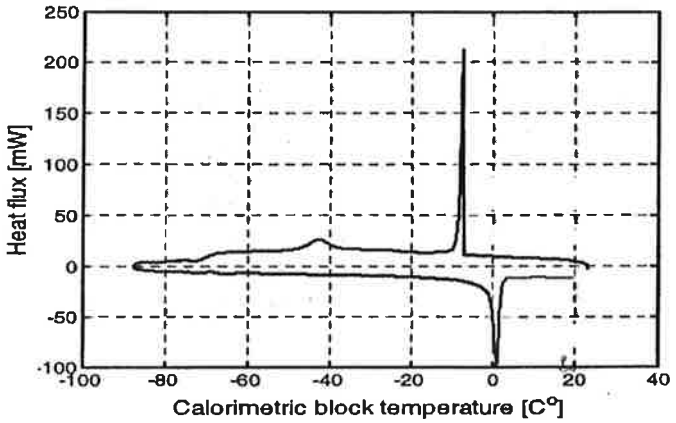
vct 0,50; 5,4% luft
vattenhalt i provet: 1,985 g

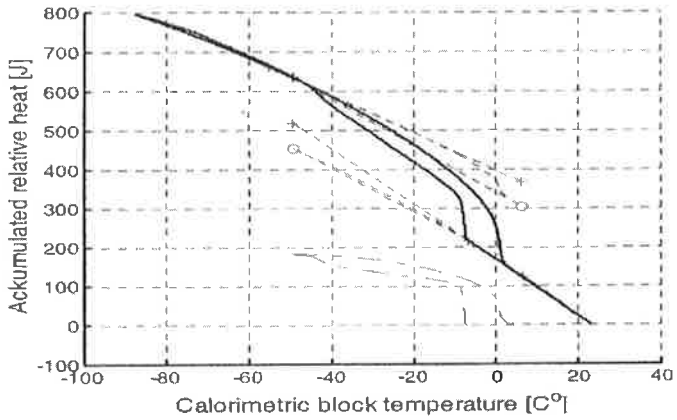


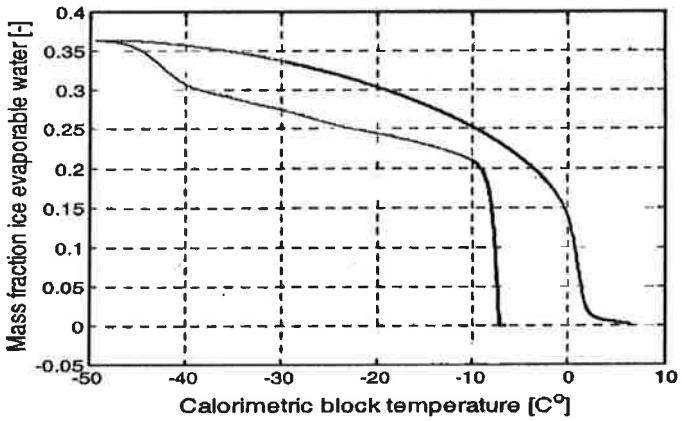




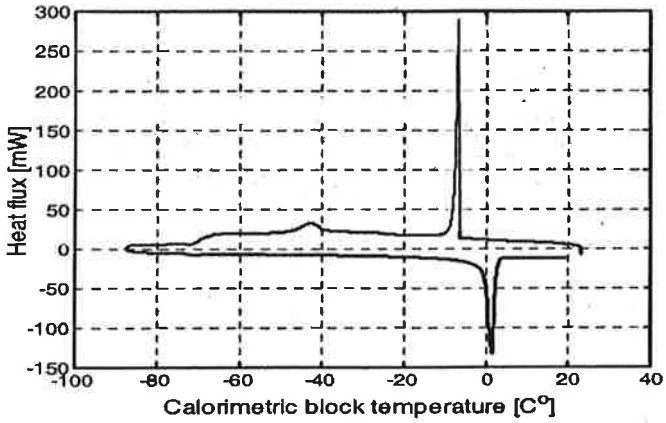
vct 0,40; 2,5% luft
vattenhalt i provet: 1,500 g

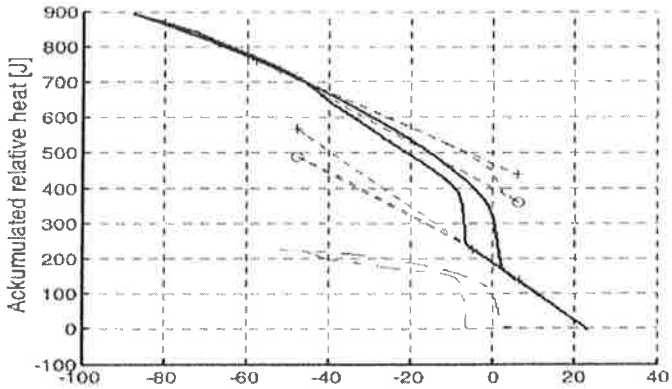


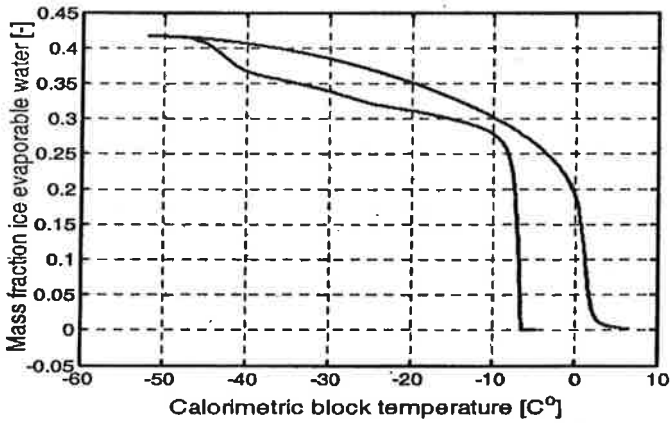




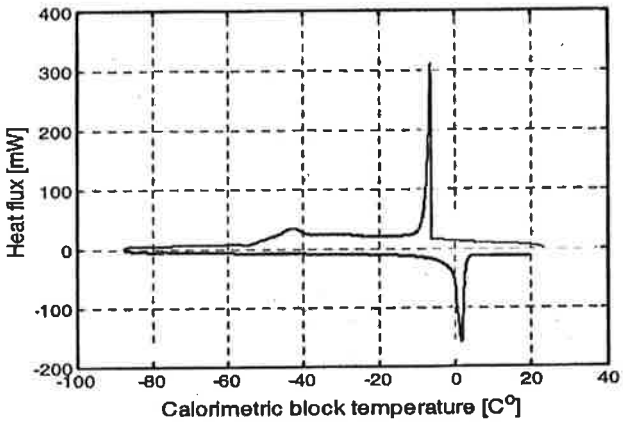
vct 0,40; 4,2% luft
vattenhalt i provet: 1,612 g

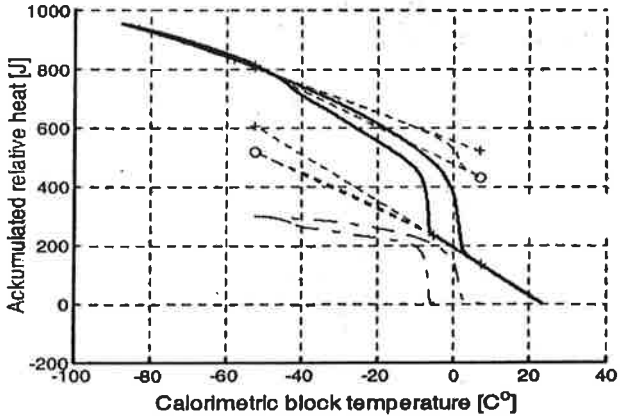


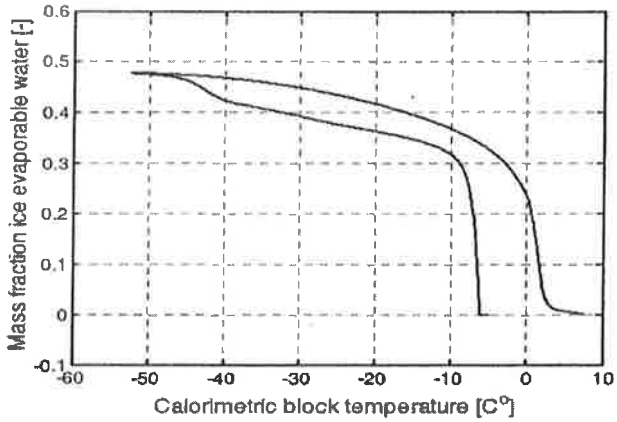




vct 0,40; 6,1% luft
vattenhalt i provet: 1,852 g





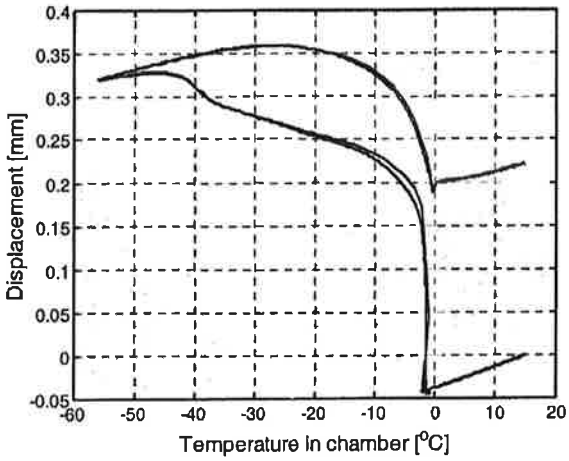


Längdändringar

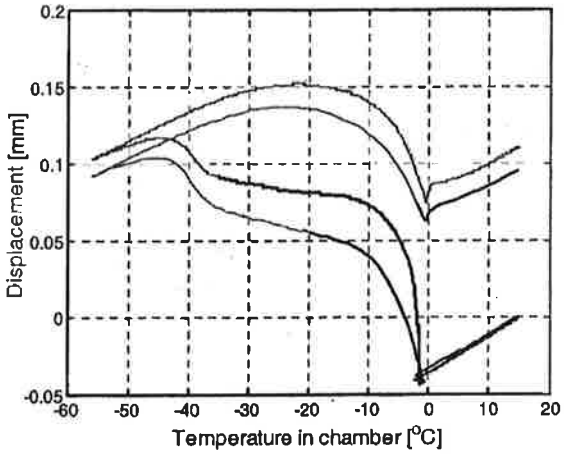
I diagrammen nedan visas uppmätt provkroppslängd som funktion av temperaturen i frysskåpet. På grund av att provet är så tunt (2 cm) är provkroppstemperaturen ungefär densamma som frysskåpets temperatur.

För varje prov visas längdändringen vid två direkt efter varandra följande fryscykler.

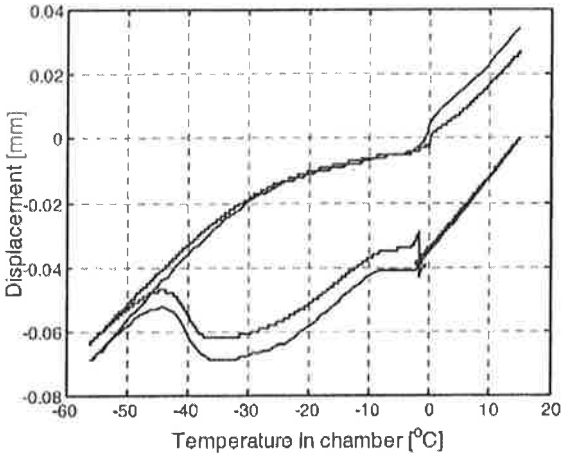
vct 0,60; 2,6% luft



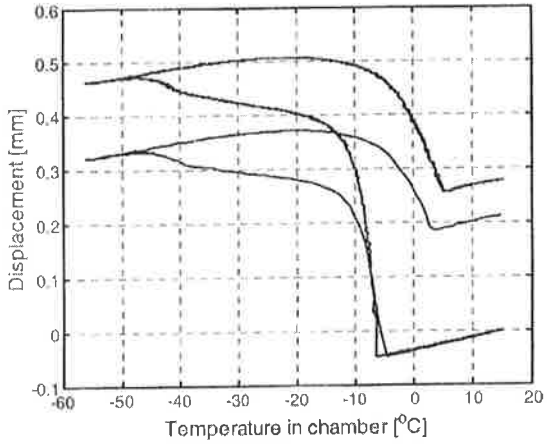
vct 0,60; 4,7% luft



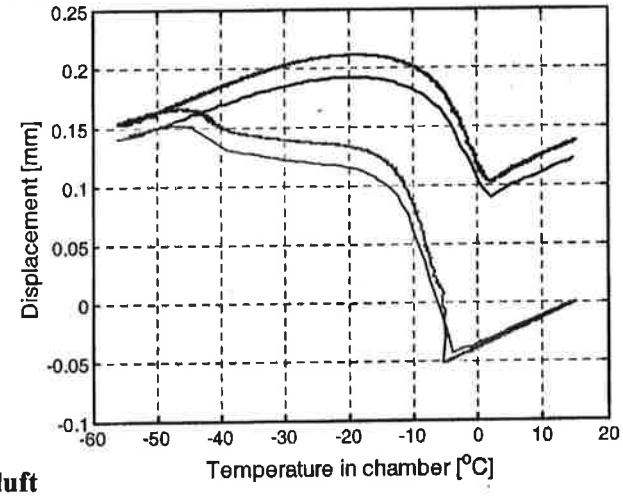
vct 0,60; 7,8% luft



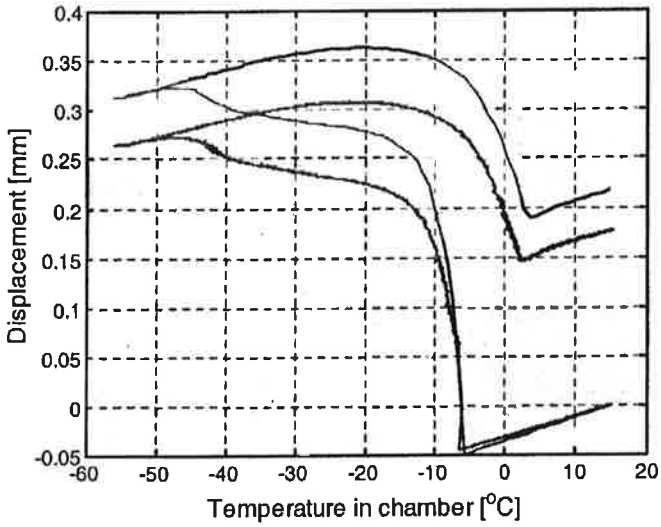
vct 0,50; 2,0% luft



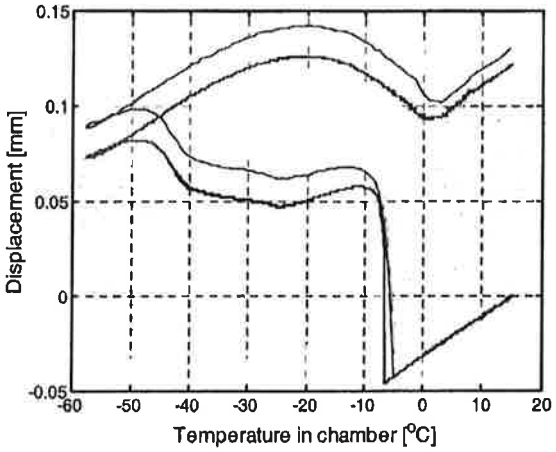
vct 0,50; 3,6% luft



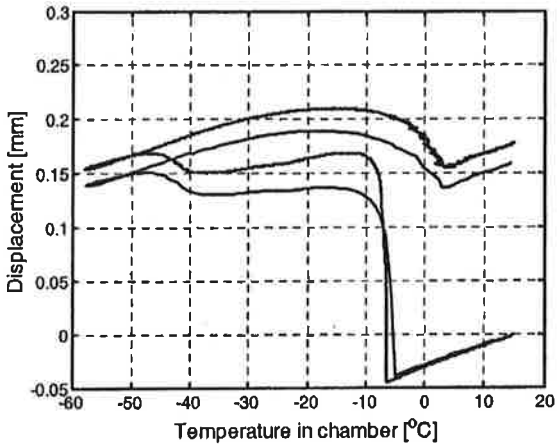
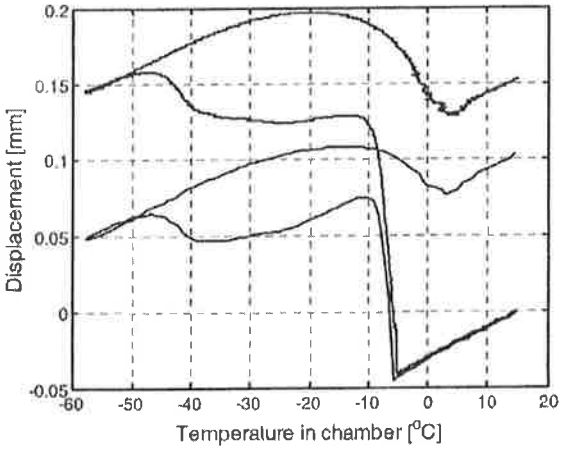
vct 0,50; 5,4% luft



vct 0,40; 2,5% luft



vct 0,40; 4,2% luft



vct 0,40; 6,1% luft