

## **SBUF projekt 11044**

### **Betong för lagring av flytande naturgas. Beständighet vid låg temperatur. Steg I**

## **Sammanfattning**

### **Rapporttitel**

*Betong för lagring av flytande naturgas. Frysfenomen och frostbeständighet vid frysning till -50°C.* Avd byggnadsmaterial, LTH, Rapport TVBM-7174, 2003. Rapporten författad av Björn Johannesson och Göran Fagerlund

### **Allmänt om projektet**

Det finns behov av att använda betong till behållare för lagring av flytande naturgas (LPG). Lagringen sker vid extremt låg temperatur. Beständigheten hos betong under dessa temperaturförhållanden var tidigare i stort sett helt utforskad. Skanska Teknik initierade därför hösten 2001 ett projekt som genomfördes vid avdelning byggnadsmaterial vid LTH. Nu rapporterad undersökningen omfattar *Steg I* av en tänkt undersökning omfattande två steg. I Steg I genomfördes mätningar av frysbart vatten och frostbeständighet hos vattenlagrad betong vid temperaturnivåer ned till ca -50°C à -60°C. I steg II planeras att genomföra samma typ av mätningar för betong som före nedfrysning utsatts för mycket hög fuktbelastning. Dessutom avses att närmare studera isbildning och issmältning vid temperaturer inom området -50°C och -190°C.

Den experimentella delen av projektet genomfördes av Tekn dr. Björn Johannesson<sup>1</sup>. En sammanfattande analys av resultaten genomfördes av Göran Fagerlund.

Till projektet knöts en referensgrupp bestående av följande personer:

Kyösti Tuutti, Skanska Teknik

Sture Forshällen, Skanska

Per-Erik Petersson, Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut (SP)

Jan Alemo, Vattenfall Utveckling AB (VUAB)

---

<sup>1</sup> ) Vid sidan av projektet, men inspirerad av detta, utarbetade Björn Johannesson även en generell teoretisk analys av frysning av vatten i porösa material. Denna ingår inte i projektet men kommer att publiceras i en separat rapport från avd byggnadsmaterial, LTH.

## Problemställning

Gasol och annan naturgas (Liquified Petroleum Gas, LPG) kan lagras vid normalt tryck om temperaturen sänks till ca  $-50^{\circ}\text{C}$ . Den exakta temperatur som erfordras beror på gasens sammansättning, såväl högre som betydligt lägre temperatur än  $-50^{\circ}\text{C}$  kan krävas. Gasen lagras ofta i betongtankar 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  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Betong innehåller rätt stor mängd *potentiellt frysbar vatten*. En teoretisk beräkning visar att ca 5 à 10 liter vatten per  $\text{m}^3$  räcker för att spränga sönder vattenmättad betong. En teoretisk analys visar dessutom att temperatur  $-50^{\circ}\text{C}$  ger ca 35% högre potentiellt frysbar vattenmängd än  $-25^{\circ}\text{C}$ . Detta behöver inte medföra att betongen fryser sönder eftersom den alltid har viss mängd icke vattenfyllda porer som kan skydda mer eller mindre väl. Troligen erfordras dock högre lufthalt vid extremt låg temperatur än vid normaltemperatur. *Betong som är beständig under normala klimatbetingelser kan därför bli obeständig under extrema temperaturförhållanden.*

Det finns emellertid ett annat fenomen som torde ge ännu större inverkan av extremt låg temperatur, nämligen *homogen isbildning av underkyllt vatten*. Detta fenomen inträffar vid ca  $-40^{\circ}\text{C}$ . När temperaturen sänks i en betong fryser inte allt vatten vid den teoretiska frystemperaturen, utan en stor andel av vattnet förblir *underkyllt*. Ju mindre por vattnet befinner sig i, desto större sannolikhet är det att vattnet är underkyllt, förutsatt att poren isoleras från andra porer som innehåller iskroppar genom att omges av ett finporöst nätverk av ofrysbar vatten. Detta fall gäller s.k. vattentät betong, dvs. betong med vct lägre än ca 0,60. En sådan betong innehåller alltid en viss andel vattenfyllda kapillärporer som är onåbara av den is som bildats i större porer eftersom de är omgivna av fina gelporer i vilka vatten inte kan frysa. Sannolikheten är därför stor att vattnet förblir ofruset.

*Vid ca  $-40^{\circ}\text{C}$  kan inte vatten längre vara underkyllt*, utan isbildning sker momentant av allt potentiellt frysbar vatten. Den stora och snabba isbildning av underkyllt vatten som sker vid temperaturer understigande ca  $-40^{\circ}\text{C}$  kan troligen medföra frostnedbrytning som inte noteras vid konventionell frysprovning. Vid en sådan används en frystemperatur av ca  $-17^{\circ}\text{C}$  enligt den ASTM-frysmetod som används i USA och många andra länder, och ca  $-20^{\circ}\text{C}$  enligt svensk frysprovningmetod. Risken för skador ökar också på grund av att betongen vid temperatur lägre än  $-40^{\circ}\text{C}$  är betydligt tätare än vad den är vid högre temperatur, eftersom is som bildats vid högre temperatur kan förväntas täppa till porsystemet så att vatten har svårt att pressas undan vid isbildningen.

## Syfte

Syftet med undersökningen var

- att undersöka isbildning i betong vid mycket låg temperatur, ca  $-50^{\circ}\text{C}$  à  $-60^{\circ}\text{C}$ .
- att genom frysprovning klargöra risken för frostsador hos betong som fryses ner till den mycket låga temperatur som används vid lagring av flytande naturgas.
- att utreda inverkan av betongkvaliteten (vct, lufthalt) på frysskaderisken och att därigenom ge underlag till val av betongkvalitet till gaslager.

## Genomförande

### Betongtyper

Betongtyper valdes med tanke på de som kan tänkas bli använda i gaslager;

- vct 0,40, 0,50 och 0,60
- betong såväl utan extra luft som med lufttillsättning.
- ballast av icke sedimentärt ursprung med försumbar porositet.
- lågalkaliskt och sulfatresistent cement (Anläggningscement).

### Provkroppar

Av varje betongsats tillverkades två betongblock. Följande prover togs ut ur blocken:

- cylindrar med diameter 1,4 cm och längd 6 cm använda för mätningar av frysbart vatten.
- Stavar med tvärsnitt 2x2 cm och längd 16 cm använda för undersökning av längdändring under frysning (dilatometri).
- Plattor med area 10x10 cm och tjocklek 15 cm använda för bestämning av luftporstruktur.

### Luftporstruktur

Luftporstrukturen bestämdes genom automatisk bildanalys av en polerad betongyta; Tabell 1.

Tabell 1: 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

### Vattenlagring före frysning

Betongproverna vattenlagrades vid atmosfärstryck under 4 månader. Start av vattenlagring skedde dagen efter gjutning. Avslutning av vattenlagring skedde direkt före frysning eller bestämning av frysbart vatten. Vattnet i lagringsbassängen var mättat med kalciumhydroxid för att undvika urlakning. Uppnådda vattenmättnadsgrader (total vattenhalt/totalporvolym) och andel vattenfylld luftporvolym visas i Tabell 2.

### Frysförsök och bestämning av nedbrytning

Frostpåverkan undersöktes genom två successiva frysningar ned till ca -50°C à -60°C direkt följda av upptiningar. Skador detekterades genom följande mätningar:

- Expansion under nedfrysning. Expansion definieras enligt Figur 1.
- Permanent expansion efter upptining. Se Figur 1.
- Förändring av dynamisk E-modul

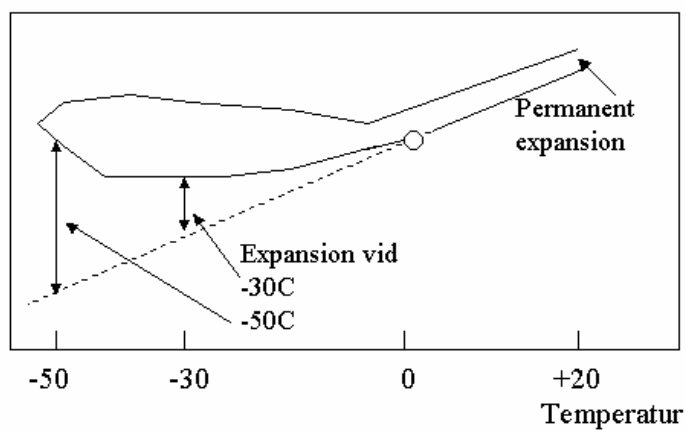
### Bestämning av isbildning/issmältning

Isbildning och issmältning som funktion av temperaturen bestämdes med scanningkalorimetri. Mätningar gjordes inom temperaturintervallet 0 °C till ca -50°C à -60 °C. Enstaka frysningar gjordes till -190 °C.

Tabell 2: Fukttillstånd efter vattenlagring.

vct	Lufthalt hård betong (%)	Vattenmättnads-grad	Genomsnittlig andel vattenfylld luftporvolym
0,60	3,2	0,94±0,03	66 %
	4,6	0,89±0,01	51%
	8,4	0,69±0,01	14%
0,50	2,1	0,94±0,02	50%
	3,1	0,95±0,04	70%
	4,9	0,79±0,01	7%
0,40	2,7	0,87±0,03	21%
	4,3	0,96	84%
	4,9	0,92±0,08	70%

Provkroppslängd

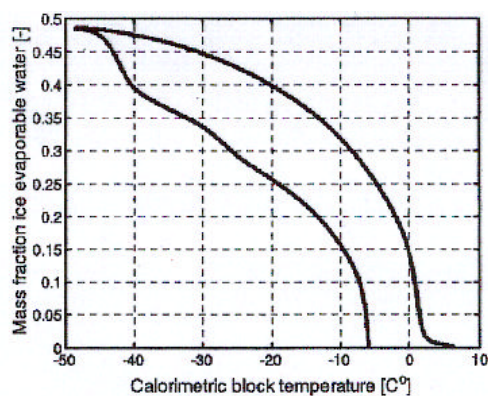


Figur 1: Definition av expansion.

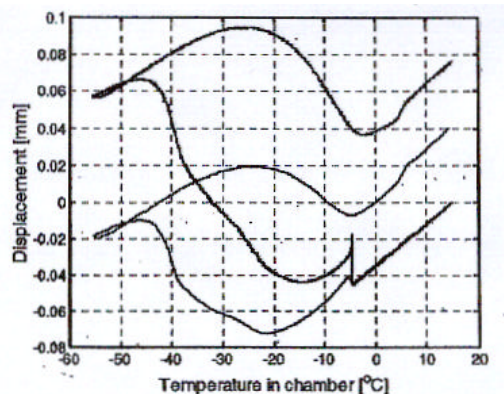
## Resultat

Exempel på en uppmätt isbildnings-smältningskurva visas i Figur 2.

Exempel på en längdändringskurva visas i Figur 3.



Figur 2: Exempel på bestämning av isbildning och issmältning. vct=0,60, lufthalt 2,6%



Figur 3: Exempel på mätning av längdändring vid nedfrysning och upptining. Två efter varandra följande fryscykler. Samma betong som i figur 2.

En sammanfattning av samtliga resultat av bestämning av frysbart vatten vid nedfrysning, längdändring vid nedfrysning och efter upptining, samt ändring av dynamisk E-modul förorsakad av frysning visas i Tabell 3.

Tabell 3: Sammanfattning av resultat

vct	Lufthalt färsk betong (%)*	Frysbart vatten under nedfrysning (% av total vattenhalt)		Längdändring vid första cykeln (%)			Ändring av dynamisk E-modul (%)
		Vid -30°C	Vid -50°C	Vid -30°C	Vid -50°C	Efter upptining	
0,60	2,6	34	48	+0,26	+0,9	+0,26	-22
	4,7	42	55	±0	+0,2	±0	-2
	7,8	39	50	±0	+0,04	+0,02	+1
0,50	2,0	24	39	+0,44	+1,09	+0,35	-27
	3,6	30	44	+0,06	+0,31	±0	-4
	5,4	31	45	±0	+0,10	±0	-3
0,40	2,5	18	31	±0	+0,39	±0	-8
	4,2	22,5	36	±0	+0,07	±0	±0
	6,1	27,5	42	±0	+0,05	±0	+5

## Analys av resultat

### Isbildning-issmältning

Följande iakttagelser gjordes:

- (1) Vid nedfrysning av prover uppträder alltid en avsevärd isbildning vid ca -40°C. Detta styrker hypotesen om homogen isbildning av vatten utsatt för lokal underkylning i isolerade kapillärporer.
- (2) Ökningen av bildad mängd is mellan temperaturnivåerna -20°C och -50°C, resp. mellan -30°C och -50°C är påfallande stor, Tabell 4. Detta innebär att man kan förvänta ökade påfrestningar om temperaturen sänks till lägre nivåer än de som normalt används vid frysprovning av betong; ca -20°C.
- (3) I stort sett all isbildning har avslutats vid -50°C. Några få kalorimetermätningar gjordes ned till -190°C. Ingen ytterligare isbildning kunde noteras inom området -50°C till -190°C.
- (4) Frysbara vattenmängder per m<sup>3</sup> betong visas i Tabell 5. Frysbara vattenmängden är tämligen hög även i betong med lågt vct

- (5) De högsta frysbara vattenmängderna gäller i flertalet fall vid högsta lufthalten (Tabell 5) vilket visar att luftporer absorberar vatten vid långvarig vattenlagring. De frysbara vattenhalterna är så höga att de teoretiskt sett kan ge allvarliga frostsador, förutsatt att betongen är vattenmättad (eller har vattenhalt överstigande den kritiska).
- (6) Den *icke frysbara vattenmängden* är ur rent teoretisk synpunkt mer intressant än den frysbara vattenmängden eftersom den i princip är en "materialegenskap" bestämd enbart av materialstrukturen. Den icke frysbara vattenmängden kan därför vid given frystemperatur förväntas vara oberoende av den totala vattenhalten så länge denna är högre än den icke frysbara vattenmängden. Dessutom bör den vara oberoende av mängden luftporer. Icke frysbar vattenmängd visas i Tabell 6. Som förväntat är den i stort sett helt oberoende av lufthalten. Däremot minskar den som förväntat med sänkt frystemperatur.
- (7) Det är mycket stor hysteresis mellan isbildningskurvor och issmältningsskurvor. Smältning sker vid betydligt högre temperatur än frysning. Orsaken är sannolikt den lokala underkyllning i isolerade prover som beskrevs ovan; smältkurvor utgående från en temperatur av  $-50^{\circ}\text{C}$  är väldefinierade "jämviktskurvor", medan fryskurvor är av "stokastisk natur" med ett utseende som beror på frysförhållandena och som kan påverkas av strukturella förändringar i materialet, t.ex. mikrospäckbildning, torkning etc.

Tabell 4: Ökning av bildad is inom intervallen  $-20^{\circ}\text{C}$  och  $-50^{\circ}\text{C}$ , respektive mellan  $-30^{\circ}\text{C}$  och  $-50^{\circ}\text{C}$ .

Vct	Lufthalt (%)	Procentuell ökning av mängd bildad is	
		Mellan $-20^{\circ}\text{C}$ och $-50^{\circ}\text{C}$	Mellan $-30^{\circ}\text{C}$ och $-50^{\circ}\text{C}$
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%

Tabell 5: Frysbar vattenmängd vid nedfrysning.

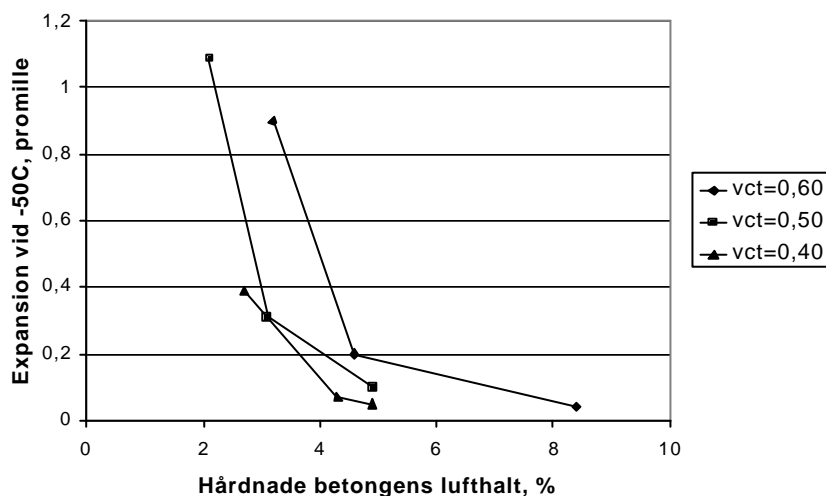
vct	Lufthalt hårdnad betong (%)	Mätt frysbar vattenmängd vid nedfrysning ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			Teoretisk frysbar vattenmängd beräknad från jämviktsfuktkurvan vid desorption ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
		$-20^{\circ}\text{C}$	$-30^{\circ}\text{C}$	$-50^{\circ}\text{C}$	
0,60	2,6	44	58	82	104
	4,7	65	76	100	106
	7,8	48	52	80	107
0,50	2,0	25	40	64	87
	3,6	40	53	78	90
	5,4	38	53	77	85
0,40	2,5	15	26	44	63
	4,2	23	36	58	87
	6,1	32	46	70	89

Tabell 6: Icke frysbar vattenmängd.

vct	Lufthalt hårdnad betong (%)	Mätt ofrysbar vattenmängd vid nedfrysning (kg/m <sup>3</sup> )		
		-20° C	-30° C	-50° C
0,60	2,6	126	112	88
	4,7	116	105	81
	8,7	112	108	80
0,50	2,0	140	125	101
	3,6	137	124	99
	5,4	133	118	94
0,40	2,5	127	116	98
	4,2	138	125	103
	6,1	135	121	97

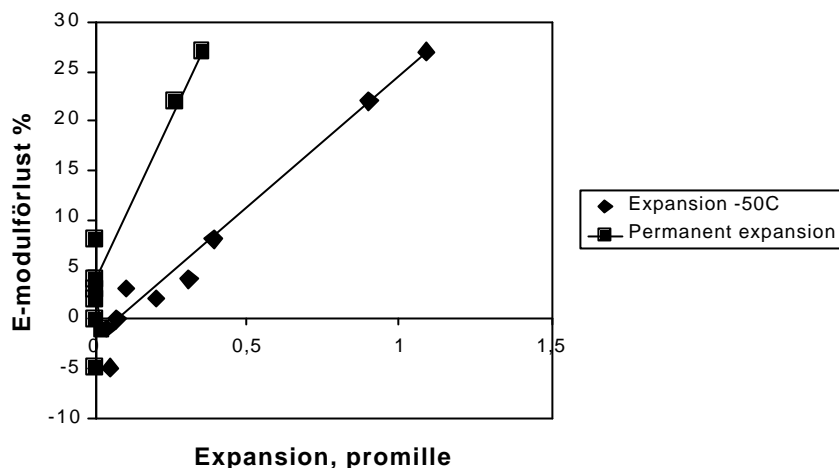
### Frysskador

Expansionen vid -50°C under nedfrysningsskedet som funktion av hårdnade betongens lufthalt visas i Figur 4. Som synes ökar expansionen vid given lufthalt med ökat vct. För betong med vct=0,40 kan ungefär 4% lufthalt räcka för att betongen skall klara nedfrysning till -50°C. För vct=0,60 krävs upp till 7% luft när maximalt tillåten 0,1 ‰ expansion under frysning används som kriterium. Erforderlig lufthalt är emellertid till stor del en funktion av luftporsystemets utseende. Andra cementsorter och andra typer av luftporbildare och flyttillsatsmedel än de som använts i denna undersökning kan ge sämre utbildade luftporsystem och därmed kräva högre lufthalt.



Figur 4: Expansion vid -50°C under nedfrysningsskedet som funktion av hårdnade betongens lufthalt.

De båda metoderna att bestämma om skada inträffat, förlust i E-modul resp. expansion under och efter frysning, jämförs i Figur 5. Som synes kan betongen ha avsevärd expansion under frysning utan att E-modulen påverkas. Dessutom förefaller det som om en expansion efter upptining på 0,1‰ ungefär motsvarar E-modulförlusten 10%.



Figur 6: samband mellan permanent expansion och E-modulförlust.

I Tabell 7 visas en sammanfattande översikt över erforderlig lufthalt vid olika kriterier för skada.

Om luftporerna skulle fyllas med ännu mer vatten än det som tas upp under 4 månaders kontinuerlig vattenlagring är risken överhängande att betongen förstörs, såvida den inte har så hög initiell lufthalt att resterande effektiva lufthalt, trots lång vattenlagring, räcker för att ge skydd.

Tabell 7: Lägsta tillåtna lufthalt och högsta tillåtna avståndsfaktor enligt olika kriterier.

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

### Slutsatser

Undersökningen visar att betong med lufthalt hos hårdnad betong av lägst ca 4% inte torde skadas av frystemperaturer ner till ca -50°C eller lägre, förutsatt att betongens vattenhalt inte överstiger den som nås efter ca 4 månaders kontinuerlig vattenlagring, och samtidigt vct understiger ca 0,50. Vid ännu långvarigare vattenabsorption erfordras högre lufthalt. En ytterligare förutsättning är att *luftporsystemet har hög kvalitet och inte utbildar ett mer eller mindre kontinuerligt kanalsystem*. Ett sådant torde aldrig kunna ge hög frostbeständighet under fuktiga förhållanden eftersom det kan förväntas bli vattenfyllt.

Betong som kan komma att utsättas för ständig exponering för vatten, eller som av andra skäl, t.ex. högt vattentryck hos omgivande vatten, kan nå högre fuktnivå än vad som fås genom 4 månaders vattenlagring. Risken för skador ökar därför kraftigt. Detsamma gäller betong som innehåller porös ballast eller som innehåller defekter, t.ex. sprickor.