



# HETEK

Frostprøvningsmetoder til bestemmelse af  
højkvalitetsbetons frostbestandighed  
Opsummering, Konklusion og Anvisning



Rapport nr. 105  
1997



Vejdirektoratet

# IRRD Information

Titel på dansk	<b>HETEK, Frostprøvningsmetoder til bestemmelse af Høj-kvalitetsbetons Frostbestandighed. Opsummering, Konklusion og Anvisning</b>	
Titel på engelsk	<b>HETEK, Method for test of the Frost Resistance of High Performance Concrete. Summary, Conclusions and Recommendations.</b>	
Forfattere	Anders Henrichsen, Peter Laugesen, Mette Geiker, Erik Jørgen Pedersen, Niels Thaulow	
Emne klassifikation	Beton	32
Nøgleord	Absorption	6758
	Cracking (Revnedannelse)	5211
	Deterioration (Nedbrydning)	5255
	Drying (Udtørring)	5184
	Freezing Thawing Cycle (Frost-tø cyklus)	2577
	Frost Damage (Frostskader)	5278
	Gradient	2806
	Ice (Is)	2578
	Micro (Mikro)	9045
	Moisture Content (Fugtindhold)	5920
	Porosity (Porøsitet)	5938
	Research Project (Forskning)	8557
	Salt	2598
	Saturation (Vandmætning)	9125
	Spalling (Afskalning)	5231
	Stress Analysis (Spændings analyse)	5573
	Structure (Konstruktion)	5937
	Test Method (Prøvnings metode)	6288
UDK	691.32	
	666.972.5	
ISSN	0909-4288	
ISBN	87-7491-816-8	

# Indholdsfortegnelse

Side

<b>1.</b>	<b>Opsummering</b>	2
1.1	Indledning	2
1.1.1	Om frostprøvning af beton	2
1.1.2	Baggrund, HETEK Opgave 2, Frostbestandighed af beton	2
1.1.3	Forskningsstrategi	3
1.2	Beskrivelse af forskningen	5
1.2.1	Formål	5
1.2.2	Præsentation af resultater	6
1.3	Konklusioner	7
1.3.1	SS 137244, 1995 (III)	7
1.3.2	ASTM C 666, Fremgangsmåde A (Modificeret)	8
1.3.3	Porebeskyttelsesforhold	9
1.3.4	Indbyrdes overensstemmelse mellem prøvningsresultater ved accelereret frostprøvning og porebeskyttelsesprøvning	10
1.3.5	Materialeparametrenes indflydelse på frostbestandighed	10
1.3.6	Konditionering af prøver	10
1.4	Forbehold	12
<b>2.</b>	<b>Retningslinier for frostprøvning af beton</b>	13
2.1	Indledning	13
2.2	Klassificering af betonkonstruktioner efter eksponeringsmiljø	13
2.3	Anbefalede prøvningsmetoder	14
2.4	Anbefalede acceptkriterier	14
2.5	Forbehold til retningslinierne	16
<b>3.</b>	<b>Anbefaling af yderligere forskning</b>	17
3.1	Oversigt over erfaringer opnået under forskningsforløbet	17
3.2	Anbefalinger	17
<b>4.</b>	<b>Appendix - prøvningsmetoder</b>	19
1	Modificeret SS 137245, Borås	19
2	Modificeret ASTM C 666-A	25
3	Porebeskyttelsesforholdet	32

# 1 Opsummering

## 1.1 Indledning

### 1.1.1 Om frostprøvning af beton

Betons frostbestandighed er en af de væsentlige usikkerheder for bestemmelse af en betonkonstruktions levetid. Pålidelige modeller og metoder er nødvendige til at verificere en krævet eller forudsagt levetid med hensyn til frostskader og salt/frostskader af høj kvalitetsbeton, men disse modeller og metoder findes desværre ikke. I dag er behovet imidlertid forstærket, som følge af den øgede tendens til at foreskrive levetider på 100 år for stærkt udsatte konstruktioner.

Analyse af danske og udenlandske standarder og betonspecifikationer viser, at det har været den fremherskende metode til sikring af et betonmateriales frostbestandighed, at foreskrive krav til tilslagsmaterialers egenskaber eller oprindelse (f.eks. klippegranit, klasse A materialer el.lign.), til cementpastaens tæthed (vand/cement-forhold), samt kvalitet og mængde af det indblandede luftporesystem.

Denne fremgangsmåde har, når reglerne er fulgt i praksis, under normale omstændigheder medført, at det ønskede kvalitetsniveau er opnået, d.v.s. at konstruktionerne i en lang periode kan ses at have været modstandsdygtige overfor frost/tø-, salt- og fugtbelastninger.

Krav til direkte prøvning af frostbestandigheden af de udførte konstruktioner har til gengæld ikke været almindelige. Dette skyldes antageligt, at pålidelighed og reproducerbarhed af de hidtil kendte frostprøvningsmetoder er ringe, samt at relationer mellem prøvningsresultater og faktiske egenskaber er stort set ukendte.

Derfor er det særdeles vanskeligt at godkende eller forkaste betonkonstruktioner ved hjælp af direkte frostprøvning. Pålidelige og præcise prøvningsmetoder er stærkt påkrævede.

### 1.1.2 Baggrund, HETEK Task 2, Frostbestandighed af beton

Nærværende forskning er udført som del af forsknings og udviklingsprogrammet HETEK (Høj kvalitetsbeton - Entreprenørens Teknologi). Forskningen er udført på grundlag af en bevilling fra Industri- og Handelsstyrelsen, administreret af Vejdirektoratet.

Forskningen er udført af et konsortium bestående af Dansk Beton Teknik A/S, Dansk Teknologisk Institut og Dansk Betoninstitut a/s.

Høj kvalitetsbeton er af Vejdirektoratet defineret som "Beton med 100 års levetid i aggressivt miljø". Konsortiet har til brug for projektet udvidet denne definition til:

" Beton med 100 års levetid i aggressivt miljø, sammensat med et ækvivalent V/C-forhold på 0,35-0,45 og i overensstemmelse med gældende danske normer for materialer, sammensætninger m.v."

Resultatet af forskningen er præsenteret i følgende VD-rapporter:

Rapport nr. 55, 1996: State-of-the Art.

Rapport nr. 86, 1996: Supplerende Forskning.

Rapport nr. 93, 1997: Funktionsprøvning Versus In-Situ Observationer.

Rapport nr. 105, 1997: Opsummering, Konklusion og Anvisning (Rapport nr. 97, engelsk udgave).

### 1.1.3 Forskningsstrategi

Det konkluderes (se afsnit 1.1.1) at materiale videnskaben endnu ikke har udviklet endelige modeller til at beskrive frostnedbrydning af betonkonstruktioner.

Det kan yderligere konstateres, at der ikke er fastlagt en relation mellem betonkonstruktioners holdbarhed og resultater fra funktionsprøvning på enten prøver udboret fra konstruktionerne eller støbte prøvelegemer. Direkte prøvning udført med eksisterende metoder på konstruktioner er kun rapporteret i meget begrænset omfang.

Sigtet med forskningen er derfor i første fase at undersøge en korrelation mellem funktionsprøvning efter givne metoder, sammenholdt med in-situ frostbestandighed af et større antal konstruktioner, for hvilke der kan fastlægges:

- i) Eksponeringsmiljø
- ii) Frostnedbrydningsgrad

Det er i denne sammenhæng væsentligt at bemærke, at der i konstruktionerne foregår en række forskellige frostnedbrydnings typer, bl.a som resultat af forskelle i betonsammensætning, bestanddele og alder. Der kan fastslås mindst to typer frostnedbrydning:

- frost-afskalning
- indre revnedannelse.

I forlængelse heraf har den nærværende forskning lagt op til, at der kræves mere end én metode til at dokumentere betons frostbestandighed.

Endvidere skal frostprøvningsmetoder, der kan være aktuelle i denne sammenhæng, tage hensyn til det væsentlige faktum, at en betonkonstruktions frostbestandighed er primært afhængig af dens maksimale vandmætningsgrad sammenholdt med kritiske vandmætningsgrader.

Baseret på ovennævnte overvejelser valgtes følgende fremgangsmåde:

1. Udvalgelse af en eller flere metoder der kunne anses for relevante for danske konstruktioner, baseret på en State-of-the Art undersøgelse
2. Dokumentation af de udvalgte metoders egnethed, ved en begrænset supplerende forskningsindsats.
3. Udvalgelse af et antal betonkonstruktioner der opfylder kravene:
  - a. Cementpastaens kapillarporøsitet skal svare til et ækvivalent V/C-forhold på 0,35-0,45 i en beton på 28 modenheds-døgn.
  - b. Frostnedbrydningsgraden for den pågældende konstruktionsdel skal kunne beskrives med rimelig god repræsentativitet.
  - c. Den udvalgte konstruktionsdel skal ikke være påvirket af andre nedbrydnings-mekanismer, så som korrosionsskader eller markante alkalikiselreaktioner.
  - d. Konstruktionerne skal repræsentere såvel frost-afskalning som indre revnedannelse.
  - e. De udvalgte konstruktioner skal repræsentere mindst 3 nedbrydningsgrader:
    - ingen frost skader
    - nogen frostskaeder
    - kraftig frostnedbrydning

- f. De udvalgte konstruktioner skal have været udsat for frost og deres eksponeringsmiljø eller mikroklima skal repræsentere:
  - kraftig vandbelastning
  - moderat vandbelastning
  - begrænset vandbelastning
4. Dokumentation af et klassifikationssystem for nedbrydningsgrad.
5. Dokumentation af et klassifikationssystem for eksponeringsmiljøer.
6. Udtagning af boreprøver fra ikke skadede dele af betonkonstruktionerne. Udtagning af boreprøver af skadede dele af konstruktionerne til verifikation af besigtigelsesrapporterne, ved hjælp af strukturanalyse.
7. Endelig fastlæggelse af nedbrydningsgrad.
8. Fastlæggelse af eksponeringsmiljøet for den enkelte konstruktion.
9. Frostprøvning af beton fra borekernerne.
10. Evaluering af prøvningsresultater, godkendelse af prøvningsmetoder og fastlæggelse af acceptgrænser for frostprøvning af prøver udtaget fra konstruktioner.
11. Udarbejdelse af retningslinier for frostprøvning af beton som forprøvning og i konstruktioner.
12. Udarbejdelse af forslag til dokumentation af de kriterier der er præsenteret i HETEK Retningslinier for Frostprøvning af Beton.

## **1.2 Beskrivelse af forskningen**

### **1.2.1 Formål**

En kontrakt for HETEK, Opgave 2 blev tildelt konsortiet d. 21. december 1995. Forskningen blev afsluttet d. 31. marts 1997.

Baseret på State-of-the Art Rapporten (marts 1996) og resultaterne af den Supplerende forskning (august 1996), blev hovedopgaven: Funktionsprøvning versus in-situ observationer, påbegyndt i august 1996.

Formålet med arbejdet blev defineret i overensstemmelse med forskningsstrategien:

- at anbefale et klassifikationssystem for nedbrydningsgrad
- at anbefale et klassifikationssystem for eksponeringsmiljøer
- at tilvejebringe oplysninger om anvendelighed og foreslå acceptgrænser for følgende udvalgte accelererede frostprøvningsmetoder:
  - \* Boråsmetoden, SS 137 244, 1995 (III)
  - \* En modificeret Boråsmetode (konditionering ved 50°C i 14 dage efterfulgt af 14 dages genmætning)
  - \* En modificeret ASTM C 666-A (reduceret prøvelængde)

til bedømmelse af frostbestandigheden af beton i konstruktioner, ved at sammenligne faktuelle frostnedbrydningsgrader med resultaterne af frostprøvningsmetoderne, eksponeringsmiljøerne og materiale-karakteristika.

- at dokumentere anvendeligheden af en supplerende metode til at vurdere frostbestandighed ved fastlæggelse af "porebeskyttelsesforholdet", se Appendix 3.

### 1.2.2 Præsentation af resultater

Tohundredeogfire borekerner fra 26 danske betonkonstruktioner med variende alder (1953-1985), eksponeringsmiljø, sammensætning og visuel tilstand er blevet undersøgt ved hjælp af en række metoder, for at søge at fastlægge en mulig sammenhæng mellem resultaterne af accelererede laboratorie-frostprøvningsmetoder og den faktiske in-situ tilstand, med hensyn til frostpåvirkning af betonen.

Undersøgelsen omfatter prøvning af portland cement betoner (ækvivalent V/C-forhold generelt på 0,35-0,45) med eller uden flyveaske og mikrosilika.

Konstruktionernes eksponeringsmiljø er inddelt i tre klasser:

1. Konstruktioner eksponeret til frost og vand, med eller uden salt.
2. Konstruktioner eksponeret til frost og ind imellem vand, med eller uden salt.
3. Lodrette overflader eksponeret til frost, men sjældent vand og ingen salt.

Frost-skadesgraden blev dokumenteret ved visuelle undersøgelser (tilstandsrapporter) og ved strukturaanalyser af udborede kerner. Skadesgraderne opdeltes i 4 klasser: 0, 1, 2 og 3, rækkende fra ingen frostskafer til kraftige frostskafer. Det fremgår af resultat-



erne af dette projekt, at andelen af betonkonstruktioner med frostskaeder varierer i de forskellige eksponeringsmiljøer. For eksponerings-klasse 1 er 5 ud af 14 konstruktioner frostskaedede, mens der hverken er frostskaeder i de 7 konstruktioner i eksponerings-klasse 2 eller i de 5 konstruktioner i eksponerings-klasse 3.

Fra hver konstruktion blev der fra et lille område udboret 8 kerner, der formodedes at være repræsentative og af en ensartet betonkvalitet. Prøvningen blev generelt udført på den uskadede, indre del af kernerne. Eksponeringsmiljøet, overfladeorientering og betonens visuelle tilstand blev beskrevet for hver prøvetagningslokalitet.

Seks kerner fra hver konstruktion blev anvendt til 3 forskellige prøvningsmetoder, med formodet relevans for frostbestandighed, to baseret på accelereret frostprøvning og én baseret på fugtindtrængningsprøvning. De anvendte metoder var:

- \* Borås frostprøvning (både med standardiseret og modificeret konditionering)
- \* ASTM C 666-A frostprøvning (modificeret)
- \* Porebeskyttelsesforholdet (Vuorinnen)

De resterende 2 kerner fra hver konstruktion blev anvendt til undersøgelse af:

- \* Luftporestruktur
- \* Makrostruktur og mikrostruktur (fluorescensimprægnerede, gennemskårne kerner og tyndslib)
- \* Fugtforhold: Relativ fugtighed, kapillar vandmætningsgrad, og fugtindhold.

### **1.3 Konklusioner**

Følgende konklusioner er baseret på en sammenligning mellem vurderingen af in situ tilstanden og udfaldet af laboratorieprøvningen.

#### **1.3.1 SS 137244, 1995 (III)**

Borås prøvningsmetoden bør først og fremmest bruges til vurdering af risikoen for frostafskalning.

På grundlag af de foreliggende resultater kunne følgende krav til prøver fra kerner udboret af betonbygværker og afprøvet i.h.t. standard Borås metoden anføres som relevant:

Eksponeringsklasse 1:  $m_{56} < 1,0 \text{ kg/m}^2$

Kun én type beton med afskalning efter 56 frost/tø cykler under det angivne kriterium for frostfølsomhed blev klassificeret som skadet in situ. Men da afskalningen af denne beton kun var  $0,1 \text{ kg/m}^2$  med lille standardafvigelse i frostprøvningen blev det konkluderet, at der ikke var nogen indbyrdes overensstemmelse mellem den afprøvede materialekvalitet og kvaliteten af materialet i bygværket som forårsagede klassificeringen 'skadet'.

Det foreslåede kriterium svarer til de i den svenske standardspecifikation for brobygværker anvendte krav.

Det anbefales, at kravet underkastes fornyet vurdering under en fremtidig verifikationsfase. Det fremhæves yderligere, at sandsynligheden for at acceptere/ forkaste beton med uacceptabel/acceptabel in situ opførsel bør vælges af bygherren.

Krav til den såkaldte accelerationsfaktor,  $m_{56}/m_{28} < 2$  er undladt her. Den forudsatte lave risiko for at acceptere beton med lav frost/tø modstand bør dokumenteres yderligere.

Der findes for få data for skadede bygværker (skadesgrad 2-3) til at foretage konklusioner angående krav til betonbygværker i eksponeringsklasse 2 og 3. På grundlag af en evaluering af de mulige eksponeringsbetingelser in situ foreslås det dog foreløbigt at samme krav anvendes til udborede kerner fra bygværker i eksponeringsklasse 1 og 2, mens de nuværende undersøgelser ikke kan anvendes som grundlag for formulering af krav til in situ beton i eksponeringsklasse 3.

På basis af den begrænsede mængde data synes den modificerede Borås metode, incl. en hård udtørring under konditioneringen, at forårsage mindre afskalning end standard Borås metoden og ikke at sørge for tilstrækkelig differentiering mellem forskellige betonkvaliteter. Den modificerede Borås metode anbefales ikke anvendt.

Der kan ikke konkluderes noget sikkert angående muligheden for at evaluere indre revnedannelse ved måling af længdeændring under Borås afprøvningen, på grundlag af nuværende resultater.

### **1.3.2 ASTM C 666, Fremgangsmåde A (Modificeret)**

ASTM C 666-A prøvningsmetoden bør først og fremmest bruges til vurdering af sandsynligheden for indre revnedannelse. Metoden omfatter p.t. ikke eksponerings med salt.

På grundlag af undersøgelserne vurderes det, at den modificerede ASTM C 666-A prøvningsmetode er relevant for afprøvning af frostbestandigheden i betonbygværker i eksponeringsklasse 1, idet man anvender følgende krav til kerner udboret fra bygværket:

Eksponeringsklasse 1: Eksposering efter 300 frost/tø cykler  $< 0,1\%$

Ekspansion over  $0,1\%$  ledsages af synlig revnedannelse i laboratorieprøver. På denne baggrund og til trods for at  $0,1\%$  ekspansion er otte gange deformationskapaciteten vurderes det p.t. som en anvendelig grænse.

Sandsynligheden for at acceptere/forkaste beton med uacceptabel/acceptabel in situ opførsel bør vælges af bygherren, f.eks. ved at kræve et andet antal frost/tø cykler.

De nuværende data er for begrænsede til at konkludere noget sikkert angående muligheden for at vurdere frostbestandigheden af eksponeringsklasse 2 eller eksponeringsklasse 3 bygværker vha. den modificerede ASTM C 666-A prøvning. Under den forudsætning, at miljøvirkningen af klasse 2 og klasse 3 eksponering ikke resulterer i kritiske vandmætningsgrader for betonen, anses metoden ikke for relevant for disse eksponeringstilstande.

### **1.3.3 Porebeskyttelsesforhold**

Afprøvningen af porebeskyttelsesforholdet anbefales som en supplerende metode til vurdering af sandsynligheden for frostskader in situ. Det kritiske porebeskyttelsesforhold afhænger af v/c-forholdet i betonen og eksponeringsbetingelserne.

Skønt der synes at være stor sandsynlighed for at forkaste en acceptabel beton foreslås foreløbigt følgende krav til porebeskyttelsesforhold i kerner udboret fra betonbygværker i eksponeringsklasse 1:

Porebeskyttelsesforhold  $> 0,25$

Yderligere forskning er nødvendig for at bekræfte dette, især for beton med lavt v/c forhold.

På grundlag af de nuværende få resultater vurderes det, at frostbestandigheden af bygværker i eksponeringsklasse 2 eller eksponeringsklasse 3 ikke kan vurderes ved bestemmelse af porebeskyttelsesforholdet. Men de nuværende data er for begrænsede til at uddrage sikre konklusioner.

#### **1.3.4 Indbyrdes overensstemmelse mellem prøvningsresultater ved accelereret frostprøvning og porebeskyttelsesprøvning**

Med anvendelse af de foreslåede krav til frostbestandigheden for udborede kerner fra betonbygværker i eksponeringsklasse 1:

- \* ASTM C 666-A (modificeret): Mindre end 0,1% ekspansion efter 300 cykler
- \* Borås (III): Mindre end 0,5 kg/m<sup>2</sup> efter 56 frost/tø cykler

ser det ud som om ASTM prøvningen er hårdere end Borås prøvningen.

Ved at sammenligne resultaterne fra den accelererede funktionsprøvning med det fastlagte porebeskyttelsesforhold og ved at anvende det foreløbige foreslåede krav

- 
- \* Porebeskyttelsesforhold større end 0,25

kan man se, at tre betoner, der tilsyneladende har tilstrækkelig porebeskyttelsesforhold, afvises af ASTM prøvningen, og to af Borås prøvningen. Resultaterne indikerer, at de høje porebeskyttelsesforholdsværdier der er målt på tætte betoner kan skyldes utilstrækkelig kapillarsugning i begyndelsen.

#### **1.3.5 Materialeparametrenes indflydelse på frostbestandigheden**

De frostbeskadede bygværker fandtes at være karakteriseret ved en eller flere af følgende tilstande:

- \* Højt indre fugtindhold
- \* Ingen iblandet luft eller meget lavt indhold af iblandet luft
- \* Lavt porebeskyttelsesforhold

Den nuværende undersøgelse bekræfter det traditionelle krav til luftporestruktur og luftindhold, der er nødvendigt for at opnå beton der er modstanddygtigt overfor frost/tø. Da en væsentlig del af den undersøgte beton har egenskaber, der kan sammenlignes med moderne højstyrkebeton, antyder de ovennævnte resultater, at sådanne betoner også behøver luftiblanding for at modstå frost/tø påvirkning.

#### **1.3.6 Konditionering af prøver**

##### **Generelt**

Når de ovenfor foreslåede frostprøvningsmetoder anvendes til at dokumentere frostbestandigheden af en betonkonstruktion, vil prøverne altid være borekerner udtaget fra konstruktionen. Prøvning af konstruktioner ved en alder lavere end 28 modenheds-

døgn er ikke påtænkt. Derfor vil en særlig forkonditioneringsfase ikke være påkrævet for sådan prøvning.

Når de foreslåede metoder anvendes ved forprøvning af et betonmateriale, kan det forventes at prøverne fremstilles i laboratoriet. For sådanne prøver kræves en fastlagt lagring (forkonditionering) som beskrevet nedenfor.

### **Lagring (for-konditionering)**

Den nærværende anvisning vil foreskrive danske lagringsprocedurer for prøver til Borås prøvning, se Appendix 1. Dette vil lette anvendelsen af metoden i Danmark.

Danske metoder til bestemmelse af hærdnet betons egenskaber foreskriver generelt følgende procedurer:

- \* udstøbning af cylindre, afformning efter 1 døgn
- \* vandlagring (i lagringskar) fra afformningstidspunktet til prøvning starter

De svenske metoder til prøvning af hærdnet beton, og således også Borås metoden SS 137 244, foreskriver generelt følgende fremgangsmåde:

- \* udstøbning af terningforme, afformning efter 1 døgn
- \* vandlagring (i lagringskar) i 6 døgn
- \* opbevaring i laboratorieatmosfære (40-80 % RH, 15-25°C) indtil prøvning starter

Det er påkrævet at dokumentere den ændrede lagringsprocedures indflydelse på Borås prøvningsresultaterne. Den begrænsede dokumentation der foreligger (se Rapport nr. 86, Supplerende forskning) indikerer, at det har ringe eller ingen betydning på prøvningsresultaterne af højkvalitetsbeton, om prøverne er lagrede (forkonditionerede) efter den danske eller den svenske praksis. Det kan derimod ikke afvises at have indflydelse på betoner med højere kapillarporøsitet, fx. for ækvivalente V/C-forhold over 0,45.

### **Konditionering af prøver**

Konditionering af prøver til frostprøvning har været genstand for megen debat.

Konditionering efter Borås metoden, d.v.s. udtørring (65% relativ fugtighed, 20°C) og genmætning, resulterede i et svagt fugttab i prøverne. Konditionering efter hårdere kriterier (10% relativ fugt, 50°C) og efterfølgende genmætning resulterede i et yderligere fugttab.

Disse to typer konditionerings indflydelse på resultatet af den efterfølgende frostprøvning blev undersøgt på prøver udboret fra konstruktioner. Dette viste at prøvning efter

den hårdere konditionering gav samme eller (lidt) mindre afskalning end den normale konditionering. Således kunne det konkluderes, at prøvning uden forudgående udtørring giver den hårdeste frostprøvning.

Resultaterne opnået under dette projekt antyder, at for højkvalitetsbeton med ækvivalent V/C-forhold på 0,35-0,45 har variationer i konditioneringen forsvindende indflydelse på frostprøvningsresultatet.

Af hensyn til harmonisering mellem de nordiske lande, bibeholdes prøvningskonditioneringen som beskrevet i Borås metoden (SS 137 244).

#### **1.4 Forbehold**

Konklusionerne er baseret på adskillige antagelser:

- \* De skader der lægges til grund for klassificeringen af skadesgrad er frostska-der
- \* Fugtforholdene i konstruktionerne har indstillet sig i ligevægt
- \* Borekernerne der indgår i undersøgelserne er repræsentative for betonen i konstruktionen.
- \* Det rubricerede eksponeringsmiljø for den enkelte konstruktion er repræsentativt for den faktuelle konstruktionsdel.
- \* De undersøgte betoner repræsenterer materiale, der er sammenligneligt med moderne højkvalitetsbetoner.

Disse antagelser er ikke alle gældende for samtlige undersøgte konstruktioner.

## 2 Retningslinier for Prøvning af Betons Frostbestandighed

### 2.1 Indledning

Dokumentationen af højkvalitetsbetons frostbestandighed foretages efter følgende procedurer:

- i) konstruktionen klassificeres efter eksponeringsmiljø, se afsnit 2.2
- ii) de pågældende metoder anvendes, se afsnit 2.3
- iii) de pågældende acceptkriterier anvendes, se afsnit 2.4

Nærværende retningslinier tænkes anvendt ved såvel forprøvning som ved dokumentation af konstruktioners frostbestandighed.

### 2.2 Klassificering af betonkonstruktioner efter eksponeringsmiljø

De 3 miljøklasser er opstillet i henhold til følgende definitioner:

1. Konstruktioner eksponeret til frost og vand, med eller uden salt, f.eks.:

- konstruktioner i opsprøjts-zonen
- betonbelægninger
- kantbjælker
- betondæk uden membraner
- søjler og lodrette vægge med vedvarende fugtbelastning
- bagfyldte støttevægge og sidevægge uden membraner

2. Konstruktioner eksponeret til frost og til tider vand, med eller uden salt, f.eks.:

- betondæk med intakte membraner
- autoværn
- søjler og lodrette vægge, der ikke er udsat for kapillarsugning, men med mindre afstand til sprøjt end 1,5 m

3. Lodrette overflader eksponeret til frost, men sjældent vand og ingen salt, f.eks.:

- bagfyldte støttevægge og sidevægge med membraner
- afskærmede søjler

Ovenstående beskrivelse af miljøklasser bør harmoniseres med beskrivelserne i de europæiske standarder når de er tilgængelige.

### 2.3 Anbefalede prøvningsmetoder

Til dokumentation af højkvalitetsbetons frostbestandighed anvendes følgende prøvningsmetoder:

- \* Borås til frostafskalning, se Appendix 1
- \* Modificeret ASTM C 666-A for indre revnedannelse, se Appendix 2
- \* Porebeskyttelsesforholdet, se Appendix 3

De foreskrevne prøvningsmetoder indenfor den enkelte miljøklasse er angivet i tabel 1.

Tabel 1. *Prøvningsmetoder til fastlæggelse af betons frostbestandighed.*

Miljøklasse 1	Miljøklasse 2 <sup>note 1</sup>	Miljøklasse 3 <sup>note 1</sup>
Borås <sup>note 2</sup>	Borås	(Borås) <sup>note 3</sup>
Mod. ASTM C 666-A	n/a	n/a
Porebeskyttelse <sup>note 4</sup>	n/a	n/a

Note 1: Betonkonstruktioner i miljøklasse 2 og 3 skal opgraderes til miljøklasse 1, hvis:  
- konstruktionerne ikke kan repareres  
- eksponeringsmiljøet kan ændres, f.eks. som følge af nedbrydning af betonen

Note 2: De danske lagringsprocedurer for støbte prøvelegemer vil blive anvendt (se også Appendix 1):  
- udstøbning af cylindre, afformning efter 1 døgn  
- vandlagring fra afformningstidspunktet til prøvningen starter  
Det er påkrævet at dokumentere denne ændrede lagringsprocedures (for-konditionerings) indflydelse på Borås prøvningsresultaterne. Den begrænsede dokumentation der foreligger (se Rapport nr. 86 Supplerende Forskning) indikerer, at det har ringe eller ingen betydning på prøvningsresultaterne af højkvalitetsbeton, om prøverne er lagrede (forkonditionerede) efter den danske eller den svenske praksis.

Note 3: Borås metoden kan være relevant ved forprøvning af beton i miljøklasse 3. Der er dog ingen antydninger i nærværende projekt af, at konstruktioner i miljøklasse 3 er frostfølsomme.

Note 4: Porebeskyttelsesforholdet medtages ved forprøvning som supplerende information.

### 2.4 Anbefaling af acceptkriterier

#### Miljøklasse 1

Anbefalingen til acceptkriterier for den foreskrevne frostprøvning i miljøklasse 1 er angivet i tabel 2.



Tabel 2. Anbefaling af acceptkriterier for miljøklasse 1.

Prøvningsmetode	Forprøvning	In Situ prøvning
Borås	$m_{56} < 0.2 \text{ kg/m}^2$ eller $m_{56} < 0.5 \text{ kg/m}^2$ og $m_{56}/m_{28} < 2$	$m_{56} < 1.0 \text{ kg/m}^2$ <sup>note 1</sup>
Mod. ASTM C 666-A	udvidelse <sub>300</sub> < 0.05 %	udvidelse <sub>300</sub> < 0.1 %
Porebeskyttelse	min. 25 % <sup>note 2</sup>	n/a

Note 1: Dette krav kunne ændres, f.eks. til 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Den foreliggende dokumentation antyder ikke at der er behov for en sådan ændring.

Note 2: Porebeskyttelsesforholdet kan betragtes som yderligere information. Såfremt kravet ikke er opfyldt bør betonens frostbestandighed dokumenteres yderligere.

### Miljøklasse 2

Anbefalingen til acceptkriterier for den foreskrevne frostprøvning i miljøklasse 2 er angivet i tabel 3.

Tabel 3. Anbefaling af acceptkriterier for miljøklasse 2.

Prøvningsmetode	Forprøvning	In Situ prøvning
Borås	$m_{56} < 0.2 \text{ kg/m}^2$ eller $m_{56} < 0.5 \text{ kg/m}^2$ og $m_{56}/m_{28} < 2$	$m_{56} < 1.0 \text{ kg/m}^2$ <sup>note 1</sup>
Mod. ASTM C 666-A	n/a	n/a
Porebeskyttelse	n/a	n/a

Note 1: Dette krav kunne ændres, f.eks. til 0,5 kg/m<sup>2</sup>. Den foreliggende dokumentation antyder ikke at der er behov for en sådan ændring.

### Miljøklasse 3

Der kan ikke anbefales acceptkriterier for konstruktioner i miljøklasse 3, da der ikke er dokumentation i nærværende projekt af, at konstruktioner i miljøklasse 3 er frostfølsomme.

Det skal imidlertid bemærkes, at betonkonstruktioner i miljøklasse 2 og 3 skal opgrades til miljøklasse 1, hvis konstruktionerne ikke kan reparerer eller hvis eksponeringsmiljøet kan ændres, f.eks. som følge af nedbrydning af betonen

### **2.5 Forbehold til retningslinierne**

Retningslinierne til dokumentation af frostbestandighed er baseret på resultaterne af projektet HETEK, Opgave 2. Retningslinierne er opstillet med følgende forbehold:

- \* Materialet og resultaterne fra Opgave 2 er begrænsede. Retningslinierne er således foreløbige.
- \* Retningslinierne er kun gyldige for portland cement betoner med eller uden flyveaske og mikrosilika.
- \* Frostbestandigheden af visse, særligt tætte betontyper, kan måske ikke dokumenteres af de nærværende retningslinier

## 3 Anbefaling af yderligere forskning

### 3.1 Oversigt over erfaringer opnået under forskningsforløbet

Under forløbet af dette forskningsprojekt er der sket gode fremskridt med hensyn til at formulere en fremadrettet frostprøvnings-strategi for forprøvning og for dokumentation af konstruktioners frostbestandighed. To prøvningsmetoder er anbefalet og retningslinier for deres anvendelse samt acceptkriterier er fremlagt.

For et forskningsprojekt med en så kort tidshorison som for dette, må konklusionerne uundgåeligt indeholde anbefalinger af yderligere forskning. Dette er først og fremmest nødvendigt for at verificere de acceptkriterier, der er fastlagt på baggrund af resultaterne af den indeværende forskning. Dernæst, fordi der er opstillet en række forbehold for resultaterne, tolkningerne og konklusionerne. Disse forbehold relaterer sig til:

- Korrekt klassificering af konstruktionernes in-situ tilstand
- Korrekt klassificering af det aktuelle eksponeringsmiljø
- Opnåelse af ligevægtstilstand i konstruktionerne med hensyn til fugtforhold og dermed også frostpåvirkning
- Formodningen om, at de undersøgte betoner er sammenlignelige med moderne højkvalitetsbeton, og at de undersøgte borekerner er repræsentative for den pågældende konstruktionsdel og dens frost-skadesgrad
- Sammenhængen mellem kriterier baseret på prøvning af konstruktioner og krav/kriterier anvendt ved forprøvning.

### 3.2 Anbefalinger

Baseret på den erfaring og de resultater der er opnået i løbet af den indeværende forskning under HETEK, Opgave 2: "Prøvningsmetoder til bedømmelse af højkvalitetsbetons frostbestandighed", skal det anbefales, at den videre anvendelse af de opnåede resultater sikres gennem implementering i et udvidet forskningssamarbejde, med deltagelse fra et større geografisk område, f.eks. de nordiske lande.

Fortsættelsen af denne forskning burde koncentreres om følgende mål:

1. Dokumentation og konsensus verifikation af retningslinierne for klassificering af in-situ tilstand, og dermed klassificeringen af frost-nedbrydningsgraden.
2. Dokumentation og verifikation af, at retningslinierne for klassificering af eksponeringsmiljøer er sammenlignelige med den europæiske standard (EN 206, EC 2).
3. Formulering af kriterier for homogenitet af betonen i en given konstruktion.
4. Formulering af en strategi, der skal dokumentere opnåelse af ligevægtforhold vedr. fugt i et betonlegeme.
5. Udvalgelse af et stort antal anvendelige betonkonstruktioner, beskrivelse af tilstand og klassificering af eksponeringsmiljø.
6. Dokumentation af, om introduktion af hurtige metoder til fastlæggelse af fugttransport, f.eks. porebeskyttelsesforholdet, er relevante
7. Udførelse af prøvning for at dokumentere godkendelses-kriterierne for betonkonstruktioners frostbestandighed.
8. Verifikation gennem laboratorie forskning af, at godkendelseskriterierne for forprøvning er realistiske, samt dokumentere disse kriteriers økonomiske indflydelse
9. Planlægning af et nordisk/europæisk langtidsprojekt for frostprøvning af beton. Projektet skal omfatte produktion af fuldskala-konstruktioner og indeholde mindst følgende faser:
  - i) Forprøvning
  - ii) Total kvalitetsdokumentation af konstruktionen
  - iii) Prøvning udført på konstruktionen ved modenheder svarende til forholdene ved forprøvningen
  - iv) Overvågning af konstruktionen

## 4 Appendix - Prøvningsmetoder

### **Appendix 1: HETEK, Opgave 2: Forslag til metode til bedømmelse af holdbarhed mod afskalning (Modificeret SS 137245, Borås)**

Denne metode følger grundlæggende Borås metoden SS 13 72 45.

Der beskrives to metoder til prøvning af betons frostbestandighed. Metode A anvender opløsning med tørsalt, 3 % NaCl, som frysemedium. Metode B anvender demineraliseret vand som frysemedium.

Begge metoder kan anvendes i forbindelse med forprøvning af beton og til prøvning af betonemner, der er udtaget i betonkonstruktion.

I forbindelse med forprøvning skal betonemnerne hærde i 19 dage før selve prøvningsproceduren begynder.

De støbte betoncylindere lagres i 1 døgn i et rum med  $20 \pm 2$  °C. Derefter afformes cylindrene og betoncylindrene lagres i vand ved  $20 \pm 2$  °C indtil prøvningsproceduren begynder. Dette udgør modificeringen af Borås metoden.

### **Prøveemner og konditionering**

#### *Forprøvning*

I forbindelse med forprøvning er prøveemnerne betonskiver, som er savet af de støbte betoncylindere. Cylindrene bør ankomme til prøvningslaboratorium ved en alder på 19 døgn lagret i vand efter afformning ved  $20 \pm 2$  °C. Straks efter ankomst til laboratorium anbringes betoncylindrene i konditioneringsklima.

Efter  $21 \pm 1$  døgn skæres skiver med tykkelsen  $50 \pm 2$  mm fra betoncylindrene. Skiverne skæres mindst 20 mm fra cylindernes endeflader.

Straks efter savningen vaskes skiverne med vand fra vandværk, tørres med et fugtigt klæde og anbringes i konditioneringsklimaet. Skiverne stilles på højkant på cylinderfrembringerens side med en indbyrdes afstand på mindst 50 mm.

#### *Prøvning af betonprøver fra konstruktion*

I forbindelse med prøvning på betonprøver udtaget fra konstruktion skal prøverne, hvis de udsaves eller udbores, vaskes med vandværksvand, tørres til overfladetør tilstand og indpakkes i vandtæt plastfolie for at forhindre udveksling af fugt med den omgivende luft.

Når betonemnerne ankommer til prøvningslaboratorium skal de placeres i konditioneringsklimaet i mindst 1 døgn før prøveskiver udsaves. Så vidt muligt bør armeringsjern undgås ved udsavning af skiver med tykkelsen  $50 \pm 2$  mm.

Straks efter savning vaskes skiverne med vandværksvand, tørres med et fugtigt klæde og anbringes i konditioneringsklimaet. Skiverne stilles på højkant på cylinderfrembringerens side med en indbyrdes afstand på mindst 50 mm.

#### *Antal prøveemner*

I forbindelse med forprøvning udsaves 5 skiver fra 3 cylindre med diameteren 150 mm.

I forbindelse med prøvning på emner fra konstruktion skal det totale areal af emnerne være mere end  $42000 \text{ mm}^2$ , hvilket svarer til 5 skiver med diameteren 100 mm.

#### *Konditionering i forbindelse med prøvning*

Efter savning af skiver anbringes disse prøveemner i 7 døgn i et klima med temperatur  $20 \pm 2$  °C og  $65 \pm 5$  % RF. I løbet af denne periode skal alle flader undtagen prøvefladen påføres et vandtætnende materiale, der skal limes til overfladerne. Limen skal påføres i et jævnt lag over hele fladen. Kanterne af det anvendte materiale skal rage  $20 \pm 1$  mm op over betonfladen, som skal frost/tø prøves. For at sikre mod at vand kan trænge ned mellem materialet og betonsiden, skal der lægges en streng af f.eks. fugemasse langs kanten mellem materialet og betonoverfladen.

Straks efter limningen skal emnerne igen anbringes i konditioneringsklimaet.

Efter 7 døgn overhældes fladen, der skal frost/tø prøves, med demineraliseret vand med temperaturen  $20 \pm 2$  °C og til en højde på 3 mm. Denne opfugtning skal bevares i  $72 \pm 2$  timer.

#### **Frost/tø prøvning**

*Metode A: Prøvning med anvendelse af opløsning med tøsalt, 3.0% opløsning af NaCl*  
Inden frost/tø prøvningen skal alle flader undtagen prøvefladen isoleres termisk med et isoleringsmateriale med isolerende egenskaber svarende til polystyrencelleplast med tykkelse  $20 \pm 1$  mm. Inden for 15 minutter før prøveemnerne anbringes i fryse/varmeskab, skal det demineraliserede vand på prøvefladen udskiftes med en 3.0 % vandig

opløsning af NaCl. Opløsningen skal bevares til en højde på 3 mm gennem hele prøvningsforløbet. Det svarer til en opløsningsmængde på 53 ml for cylindriske skiver med en diameter på 150 mm. Opløsningen skal have temperaturen  $20 \pm 2$  °C, når den hældes på betonfladen. Derefter anbringes en tynd plastfolie tætsluttende til det vandtætnende materiale og isoleringslaget, så fordampning fra opløsningen forhindres. Tildækningen skal holdes vandret i fryse/varmeskabet under hele prøvningen.

I fryse/varmeskabet udsættes prøverne for gentagen frysning og optøning, i cykler der skal styres således, at temperaturen i frysemediet følger kravene angivet i figur 1. Temperaturforløbet skal registreres kontinuert i frysemediet i centerområdet af den prøvede overflade på mindst en prøve i skabet. Dette prøveemne kan være et dummyemne, hvis den anvendte beton er af tilsvarende kvalitet som den beton, der er under prøvning.

Begyndelsen af prøvningen sker ved at anbringe prøveemnerne i fryse/varmeskabet til tiden  $0 \pm 30$  minutter vist i figur 1.

Grænserne til kurverne i figur 1 er givet i følgende tabel:

Øvre grænselinie		Nedre grænselinie	
Tid, timer	Temp. °C	Tid, timer	Temp. °C
0	24	0	16
5	-2	3	-4
12	-14	12	-20
16	-16	16	-20
18	0	20	0
22	24	24	16

Det skal sikres, at alle prøveemner gennemløber den krævede temperaturcyklus. Afstanden indbyrdes mellem prøverne bør være mindst 50 mm og afstanden mellem prøver og skabets væg bør være 50 mm.

Efter 7, 14, 28, 42 og 56 cykler skal følgende procedure udføres for alle prøveemner i optøet tilstand i løbet af optøningsperioden mellem 20 og 24 timer i den definerede cyklus:

- Materiale som er afskallet fra den prøvede overflade skal opsamles fra hver prøve individuelt i filter.

- Ny frysevæske overhældes den prøvede flade som tidligere beskrevet.
- Prøveemnerne anbringes i fryse/varmeskabet til videre prøvning.
- Det afskallede materiale tørres til konstant vægt ved  $105 \pm 5$  °C.
- Massen vejes med en nøjagtighed på 0.1 g. Den tørre masse rapporteres.

For hver måling og for hvert prøveemne beregnes og rapporteres følgende :

$$M_n / A \text{ [kg / m}^2 \text{ ]}$$

$M_n$  er vægten af det afskallede materiale efter n cykler

A er arealet af den prøvede overflade.

#### *Metode B: Prøvning med demineraliseret vand*

Metode B udføres som metode A bortset fra, at der anvendes demineraliseret vand som frysemedium.

#### *Prøvningsresultater*

Prøvningsresultater rapporteres i overensstemmelse med kriterier for overensstemmelse givet i afsnit 2.4 i Recommendations to Acceptance Criteria.

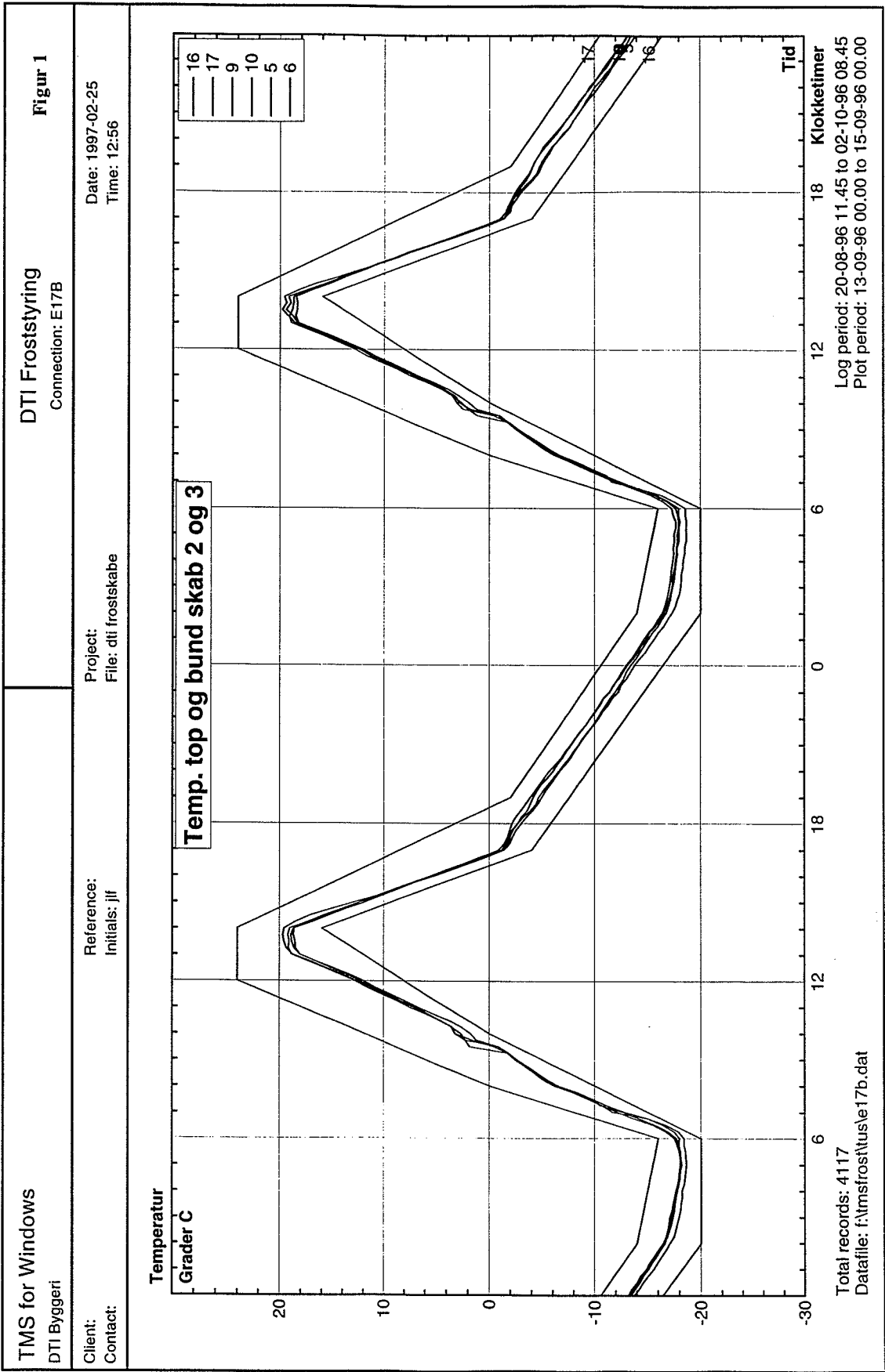
#### *Rapport*

Prøvningsrapporten skal informere om følgende:

- prøveemnernes geometri, størrelse, areal af prøvet flade, oprindelse, identifikation,
- betonrecept hvis den er kendt
- betonprøvens alder på prøvningstidspunktet, hvor det er relevant oplyst som modenhed
- type af frostmedium
- type af prøvning, prøvning af støbte cylindre som forprøvning eller på udborede eller savede prøver fra en konstruktion eller på et betonprodukt



- for hvert prøveemne rapporteres den afskallede mængde i  $\text{kg/m}^2$  afrundet til 2 decimaler. Middelværdien rapporteres for hvert sæt af prøver
- generelle oplysninger der kan have betydning for vurdering af resultater, særlige observationer på prøveemnerne f.eks. armeringsjern, separering i betonen. Afvigelser fra den foreskrevne prøvningsprocedure.



TMS for Windows. Copyright (c) 1996 DTI Building Technology

## **Appendix 2: HETEK, Opgave 2: Forslag til metode til bedømmelse af holdbarhed mod indre frost-revnedannelser (Modificeret ASTM C 666-A)**

### *Referencer*

ASTM C 666-A: Resistance of concrete to rapid freezing and thawing

ASTM C 490: Standard practice for the use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar and concrete

### *Måleprincip*

Længdeudvidelsen af betonprøver som følge af frost/tø-belastninger tages som udtryk for betonens potentielle frostbestandighed. Således udviser frostbestandig beton ingen eller ringe længdeudvidelse.

Modificeringen af metoden i forhold til ASTM C 666-A vedrører en formindsket prøvelængde.

Ændringen af prøvelegemernes dynamiske E-modul kan eventuelt bestemmes under prøvningen. I så fald henvises til teksten i ASTM C 666-A. Emnet behandles ikke videre her.

### *Prøvelegemer*

Prøvelegemerne består af:

A) Støbte cylindre (Ø: 100 mm, længde 200 mm)

B) Beton kerner (diameter: 100 mm  $\pm$  5 mm, længde mindst 200 mm)

Antallet af prøvelegemer bør ikke være mindre end 6 ved dokumentation af en betons frostbestandighed. Betonens modenhed bør ikke være under 28 modenhedsdøgn ved påbegyndelse af prøvningen.

A) Støbte cylindre

Prøvelegemerne skal anvendes i fuld størrelse.

B) Udborede kerner

Prøvelegemerne udgøres af borekerner med en diameter på 100 mm ( $\pm$  5 mm) og en længde på mindst 200 mm. I laboratoriet renskæres kernerne til en længde på 150 mm ( $\pm$  10 mm).

Borekerner udtaget fra konstruktioner må ikke tillades at udtørre mere end de opnår i konstruktionen. Straks efter udboring vaskes kernerne rene for boreslam, aftørres med en opvredet klud og forsegles i en tæt plasticindpakning.

Borekerner der indeholder støbeskel kan ikke anvendes til at dokumentere den generelle betonkvalitets frostbetandighed. Kerner der indeholder adskillige armeringsjern kan ikke anvendes.

Note: Borekerner der indeholder et enkelt armeringsjern, med en diameter på op til 12 mm, har været anvendt i prøvningen uden skadesdannelse relateret til armeringen [se VD-Rapport nr. 93].

Ved modtagelse i laboratoriet, pakkes kernerne ud og skæres varsomt med diamantsav til den foreskrevne længde. Såfremt den ydre ende af kernen er uden tydelige defekter eller karbonatisering, kan prøvelegemet placeres fra den eksponerede ende og indad. Hvis dette ikke er tilfældet placeres prøvelegemet dybere i kernen til opnåelse af et intakt prøvelegeme.

Under håndteringen af prøverne må de ikke tørre ud. Behandling der involverer vand, f.eks. savningen, skal afsluttes med en renvaskning af prøven og en aftørring med en opvredet klud, og opbevaring i tætsluttende plastic.

#### *Konditionering*

Støbte cylindre vandlagres ved 20°C indtil prøvningen starter. Hvis støbte cylindre transporteres til laboratoriet, skal de indpakkes i våde klude/papir og forsegles i tæt plastic. Prøvelegemerne skal beskyttes mod udtørring under tilskæring (for kerner), montering af måletappe, og forberedelse til prøvning.

#### *Montering af måletappe*

Prøvelegemerne monteres med måletappe i henhold til ASTM C 490. Følgende procedurer kan anvendes:

- \* Kernen placeres i en borestand og med diamantbor (Ø:10 mm) og vandkøling bores et centralt placeret, 16 mm ±2 mm dybt hul i hver ende af kernen.
- \* I hvert udboret hul monteres en måletap, se figur 1. Måletappen fæstnes centralt i plastholderen med et lille stykke dobbeltklæbende tape. Kernen stilles lodret. Det opadvendte hul i betonborekernen fyldes til 2-3 mm fra kanten med *X-60 Strain gauge lim* (hurtighærdende og sundhedsskadelig) uden at spille lim på beton-overfladen. Straks efter placeres plastholderen med måletap centralt over hullet og tappen sænkes varsomt ned i hullet med en svagt koncentrisk bevægelse, indtil plastholderen står på kernen, se figur 1.
- \* Kernen med plastholder forbliver lodret i mindst 30 minutter, hvorefter plastholderen forsigtigt "vippes af" med et knivblad. Kernen vendes om og placeres nu på en stor O-ring for at undgå belastning af måletappen. Derefter monteres

den anden måletap på samme måde. Efter montering af måletappe må kernerne aldrig placeres direkte på enderne.

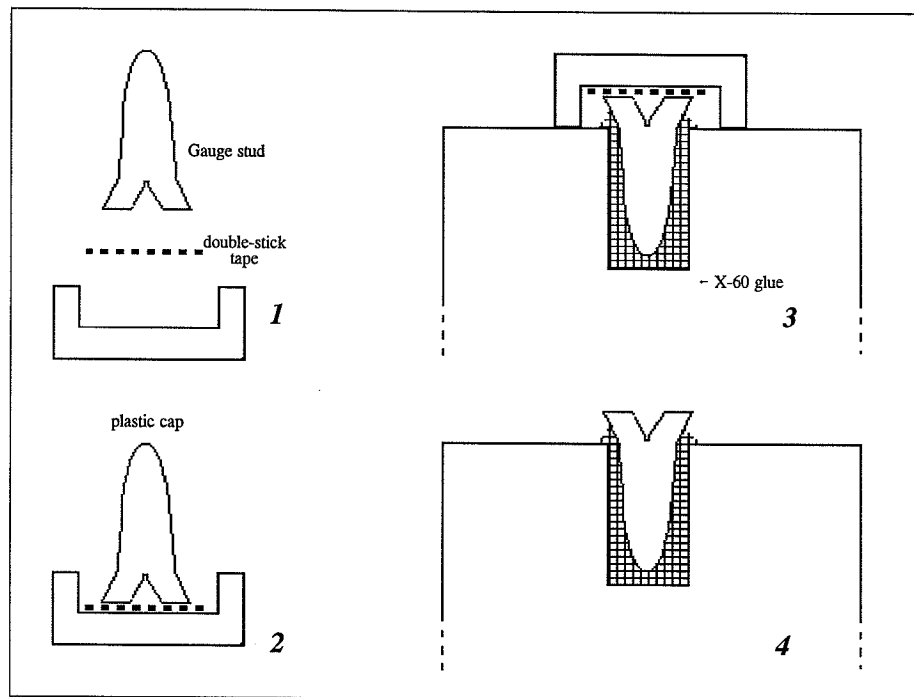


Figure 1 Fastgørelse af måletappe i kernen.

#### Forberedelse af prøvelegemer til prøvning

Prøvelegemerne skal være omgivet af et 1-3 mm tykt lag vand under frostprøvningen. Det skal sikres at frysning af dette vandlag ikke i sig selv kan skade prøverne. Derfor må stive beholdere, fx. stålrør, ikke benyttes.

Følgende procedurer kan anvendes:

- \* Prøvelegemets endflader dækkes af beskyttelsesplader, bestående af 10 mm tykke flamingoskiver med samme diameter som prøven. Prøvelegemet samt flamingoskiverne placeres i et "afstandsnet" (f.eks. Aksel-net: 2C blå), se figur 2.
- \* Prøvelegemet placeres nu i en stærk plast pose (f.eks. Codex: 650 x 200 x 0,15 mm PVC, med special svejsning) som holdes stramt ind til prøvelegeme og afstandsnet med 50 mm bred tape omviklet langs bund, midte og top. Bunden af plastposen holdes ligeledes tæt ind til prøvelegemet med tape.
- \* Den indpakkede prøve placeres derefter i et "beskyttelsesnet" (f.eks.: Aksel-net, 2A sort), der dækker side og bund.

- \* Plastposen fyldes op med vand til 2-3 mm over prøvelegemets top. Vandlagets tykkelse om prøvelegemet er derefter 1-2 mm, som det er sikret med "afstandsnettet" og beskyttelsesnettet.
- \* Den færdigindpakkede prøve placeres nu i frostkarret. Toppen af plastposen, som stikker mindst 100 mm op over frostvædsken i frostkarret, monteres derefter i den øvre metalramme - det sikres at der ikke skyller frostvædske ind i plastposen under monteringen. Prøvelegemet skal derefter være helt neddyppet under frostvædskens overflade.

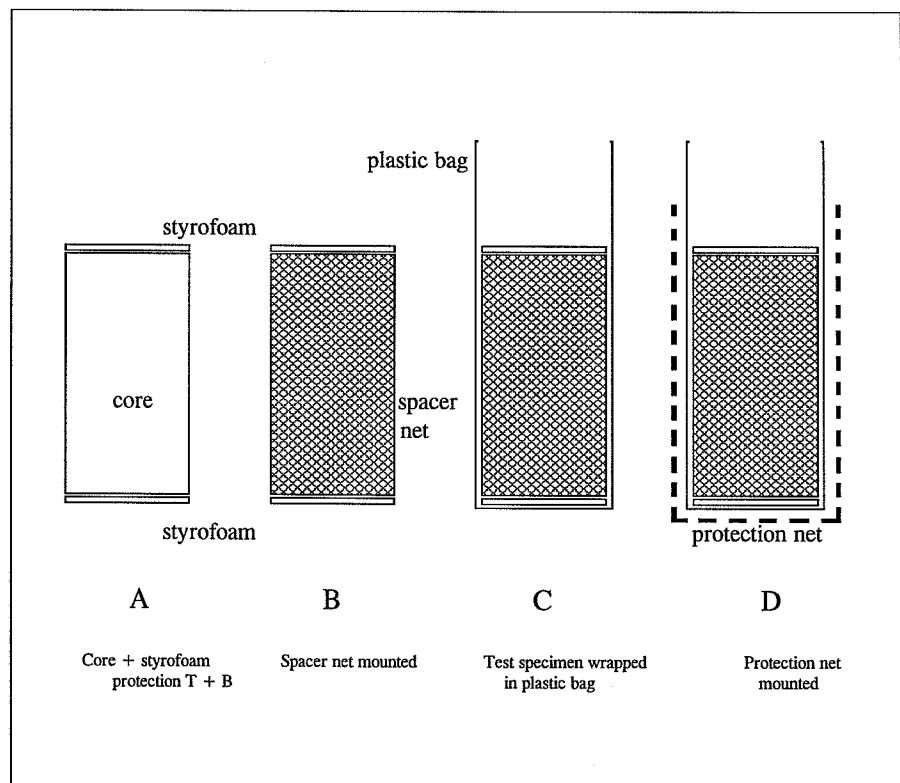


Figure 2 Indpakningsprocedure for prøver til frost/tø prøvning.

#### Frost/tø prøvningen

Frostprøvningen påbegyndes og efter 300 frost/tø cykler standses prøvningen. Prøvningen standses inden da, såfremt specificerede grænser er overskredet. For hver 36 frost/tø cykler måles prøvelegemernes længde.

Frost/tø-udstyret skal opfylde kravene defineret i ASTM C 666-A, se tabel 1. Følgende system kan foreslås:

Frostvædsken styres automatisk til at henholdsvis nedkøle og opvarme frostvædsken, således at temperaturen i prøvelegemerne varierer cyklisk mellem  $+4,4^{\circ}\text{C}$  og  $-17,8^{\circ}\text{C}$  (begge  $\pm 1,7^{\circ}\text{C}$ ) indenfor en cyklusid på 3, 6 time ( $\pm 1,6$  time).

Frostkarret indeholder frostvædske (Antifrogen N) og kan rumme op til 120 prøvelegemer. Frostkarret er monteret med en metalramme over frostvæske-standen til fastgørelse af prøvelegemer. For at sikre en ensartet temperatur i frostvædsken i hele frostkarret, udskiftes frostvædsken 1 gang hvert andet minut ved pumpning.

Tabel 1. Definitioner og krav til frost/tø systemet.

Parameter	Definition	Krav
Cyklus [timer]	Tid: $T_{max1} - T_{max2}$	2 - 5
$T_{max}$ [°C]	Højeste temp. i centrum af prøve	$4,4 \pm 1,7$
$T_{min}$ [°C]	Laveste temp. i centrum af prøve	$\div 17,8 \pm 1,7$
Tø-periode: TP (thawing period) [timer]	$T_{min} \rightarrow T_{max}$	<b>TP</b> $\geq \frac{1}{2} \cdot VP$ <b>TP</b> $\geq \frac{1}{4} \cdot Cyclus$
Fryse-periode: FP (freezing period) [timer]	$T_{max} \rightarrow T_{min}$	<b>FP</b> $\geq \frac{1}{2} \cdot KP$
Varmeperiode: VP (heating period) [timer]	Den tid systemet (=frostvæsken) varmer	---
Køleperiode: KP (cooling period) [timer]	Den tid systemet (=frostvæsken) køler	---
Prøve-størrelse [mm]	Længde: L Diameter: D	$L_{støbe\ cyl.}$ : 200 $L_{kerner}$ : 200 (afskæres til 150) D: 90-110
Prøve-alder [M-døgn]	Prøvens maturity	28 M-døgn for støbte cylindre
Prøve-konditionering	-	Prøven må aldrig udtørres mere end i konstruktionen. Støbte cylindre vandlagres til prøvestart.
Vandmængde om prøve [mm]	Tykkelse af vandlag (alm. "hane"-vand)	1-3
Standsning af prøvning	Antal cykler, længdeændr.: $\Delta L$	300 cykler, $\Delta L \geq \max.$ længdeudvidelse

### *Længdemåling af prøvelegemerne*

Prøvelegemerne måles før frostprøvningens start og derefter for hver 36 frost/tø cykler (eller mindre) indtil prøvningen afsluttes.

Længdemålingerne udføres ved en laboratorietemperatur på 20°C. Målingen (af de noget koldere prøvelegemer) skal foregå så hurtigt at prøvelegemernes temperatur ikke forandres.

Længdemålingen kan udføres efter følgende procedurer:

- \* Prøvelegemet fjernes varsomt fra frostkarret. Vandet hældes fra. Plastpose, "beskyttelsesnet" og "afstandsnet" fjernes varsomt.
- \* Prøvelegemet aftørres varsomt med en vredet klud. Måletappene pustes tørre.
- \* Prøvelegemet placeres varsomt i længde-målestanden. Ved hver måling placeres og orienteres prøven på præcis samme måde. Aflæsningen af præcisionsmåleuret gentages for at sikre et korrekt resultat. Længden registreres.
- \* Prøvelegemet inspiceres derefter med hjælp af en håndlup. Alle observationer vedrørende f.eks. smuldrende pasta, revnedannelser, "pop-outs", generel ekspansion, misfarvning m.m. noteres.

Prøvelegemet pakkes straks derefter ind, forberedes for prøvning og returneres til frostkarret, ifølge de foreskrevne procedurer.

### *Prøvningsresultater*

Længdeudvidelsen beregnes ifølge (1):

$$\text{Expansion} = \Delta l / L_0 \times 100 \% \quad (1)$$

hvor:

$L_0$ : Prøvelegemets længde (i mm) før frostprøvning

$l_0$ : Aflæsning på præcisions-måleur (mm med 3 decimaler) efter 0 frost/tø cykler

$l_i$ : Aflæsning på præcisions-måleur (mm med 3 decimaler) efter  $i$  frost/tø cykler

$\Delta l$ :  $l_i - l_0$

### *Rapportering*

Almindelig rapport oplysninger medtages. For hvert sæt prøvelegemer afrapporteres følgende for hver måletermin:

- måleuraflæsning for hvert prøvelegeme
- beregnet længdeudvidelse for hvert prøvelegeme,
- middelværdi for længdeændring,



- de visuelle observationer,

Endvidere afbildes længdeudvidelsen som funktion af antallet af frost/tø-cykler for hvert prøvelegeme.

De anvendte temperaturforløb for frost/tø-cyklerne dokumenteres i form af en tids/temperatur-kuve fra den faktuelle prøvning.

### **Appendix 3: HETEK, Opgave 2: Forslag til metode til bestemmelse af porebeskyttelsesforholdet**

#### *Referencer*

Vuorinen, J. (1984): Om skyddsporförhållandet hos betong. DBF publikation nr. 22, Nordisk Workshop Beton & Frost, 1884. Køge.

#### *Måleprincip*

Det effektive fri porevolumen i en kapillært vandmættet betonprøve bestemmes ved vejning efter forskellige prøvebehandlinger.

#### *Prøvelegemer*

Prøvelegemerne kan være støbte prøver, f.eks. betoncylindre, eller kerner udtaget fra konstruktioner. Under transport må prøvelegemerne ikke udtørre.

Før prøvningen afknækkes prøven til skiver på 20-30 mm, fx. med kæde-"hundehalsbånd". Antallet af prøver til fastlæggelse af en betons porebeskyttelsesforhold bør ikke være mindre end 6. Betonen bør have en modenhed på mindst 28 modenhedsdøgn ved prøvningens start.

#### *Fremgangsmåde*

Prøvningen omfatter følgende trin:

- \* Kapillarsugning indtil "konstant" vægt er opnået (ca. 400 timer)
- \* Vandmætning ved et tryk på 15 MPa, i 24 timer
- \* Tørring ved 105°C til konstant vægt (ca. 24 timer)

Vejning af prøver foregår i overfladetør tilstand (opnås ved aftørring med en opvredet klud). Vejninger udføres med en præcision på 0,01 g.

Til absorptionerne anvendes afkogt vandværksvand, afkølet til 20°C.

Udstyret til tryk-vandmætningen, skal sikre at der vedvarende opnåes et tryk på 15 MPa. Der skal således kompenseres for porefyldningen.

Vejningen efter 24 timers tryk-mætning skal udføres umiddelbart efter - trykaflastningen.

### *Prøvningsresultater*

Porebeskyttelsesforholdet beregnes efter (1):

$$P_r = \frac{m_{press} - m_{capp}}{m_{press} - m_{105}}$$

hvor

$m_{capp}$ : er prøvevægt efter vandmætning til vægtkonstans (ca. 400 timers kapillarsugning)

$m_{press}$ : er prøvevægten efter 24 timers tryk-vandmætning ved 15 MPa

$m_{105}$ : er prøvevægten efter udtørring til vægtkonstans ved 105°C

### *Rapportering*

Almindelige rapportoplysninger medtages. For hvert sæt prøvelegemer angives følgende parametre:

- alle vægtresultater
- porebeskyttelsesforholdet for hver skive
- middelværdien for porebeskyttelsesforholdet for prøvesættet

Endvidere afbildes absorptionen som funktion af kvadratrod-tid, for yderligere evaluering af prøvningen.