LUND UNIVERSITY

Frostnedbrytning av natursten : lägesrapport mars 1992

Fagerlund, Göran; Wessman, Lubica

1992

Link to publication

Citation for published version (APA):
Fagerlund, G., & Wessman, L. (1992). *Frostnedbrytning av natursten : lägesrapport mars 1992*. (Rapport TVBM; Vol. 3047). 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

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

Avdelning byggnadsmaterial

FROSTNEDBRYTNING AV NATURSTEN

Lägesrapport mars 1992

Göran Fagerlund

Lubica Wessman

Rapport TVBM-3047

Lund, 1992

ERRATA - TVBM 3047

S 22 Tabell 4

	k ($kg/m^2(s)^{1/2}$)
Uddvide	0,259
Botvide	0,204
Valar	0,040

CODEN : LUTVDG/(TVBM-3047)/1-45/1992/

ISSN 0348-7911

FROSTNEDBRYTNING AV NATURSTEN

Lägesrapport mars 1992

FROST DESTRUCTION OF NATURAL STONE
Status Report, March 1992.

Göran Fagerlund

Lubica Wessman

Rapport TVBM-3047

Lund, Mars 1992

INNEHÅLL Sid

FÖRORD 2
1. KORTFATTAD TEORETISK BAKGRUND 3
1.1 Frostnedbrytning - mekanismer 3
1.1.1 Stenmaterialet som ett slutet kärl 3
1.1.2 Hydrauliskt tryck. Kritisk storlek 4
1.1.3 Iskristalltillväxt. "Osmotiskt tryck" 6
1.1.4 "The ordered water theory" 8
1.1.5 Inverkan av i porvattnet lösta ämnen 8
1.2 Kritisk vattenmättnadsgrad 9
1.2.1 Teoretisk bestämning 9
1.2.2 Experimentell bestämning 11
1.3 Vattenabsorption i praktiken. Den potentiella livslängden 12
1.4 Inverkan av ytbehandlingar och kemiska ytförändringar 14
2. GENOMFÖRDA MÄTNINGAR PÅ GOTLÄNDSK KALKBUNDEN SANDSTEN 16
2.1 Försöksmaterialet 16
2.2 Densitet och porositet 16
2.3 Kritisk vattenmättnadsgrad 17
2.4 Kapillär vattenmättnadsgrad 20
2.5 Frostbeständighet. Potentiell livslängd 23
3. UPPBYGGNAD AV FÖRSÖKSUTRUSTNING. FORTSATTA FÖRSÖK 25
3.1 Dilatationsmätningar. Dilatometer 25
3.2 Samtidig isbildning och längdändring. Kalorimeter-extensometer 25
3.3 Studier av vattenfixering och finporstruktur. Sorptionsapparat 26
3.4 Studier av grovstruktur. Bildanalys 27
3.5 Fortsatta försök 27
3.5.1 Översiktsstudier. Kartläggning av problemet 27
3.5.2 Mekanismstudier 28
3.5.3 Studier av kemiskt förändrat eller ytbehandlat material 28
SAMMANFATTNING-*SUMMARY* 29
LITTERATUR 30
FIGURER 32
FOTOGRAFIER 45

FÖRORD

Huvudparten av all forskning som bedrivits inom området miljörelaterad nedbrytning av natursten i byggnader, konstföremål och monument har rört olika typer av renodlat kemiskt angrepp. De rent fysikaliska angreppen på natursten, dvs vittring och frostnedbrytning förorsakade av temperaturväxlingar resp frysning, har studerats i mindre omfattning. Det kombinerade angreppet, där såväl en kemisk som en fysikalisk effekt antingen samverkar under den pågående nedbrytningsprocessen eller där den kemiska effekten föregår den fysikaliska genom att tex modifiera materialstrukturen så att ett frostangrepp blir möjligt, har veterligen aldrig studerats på ett djupgående sätt när det gäller natursten. Det är dock välkänt för betong att just en "samverkan mellan kemi och fysik" kan ha en dramatiskt förvärrande effekt på frostangreppet. Även små mängder av föroreningar i det vatten som omger en betongkonstruktion kan vara tillräckliga för att förstöra betongens ytskikt i samband med en frysning. Man kan inte utesluta att liknande effekter gäller även för natursten.

Riksantikvarieämbetet beviljade vår avdelning medel för budgetåret 1991/92 så att forskning inom området frostnedbrytning av natursten skulle kunna startas. Föreliggande rapport utgör en lägesrapport för tiden fram till mitten av mars 1992. Projektet kom sent igång eftersom det krävde nyanställning av en forskare som så småningom kommer att ta över projektledaransvaret. Frysförsöken är nu i full gång och preliminära resultat för tre typer av gotländsk kalkbunden sandsten redovisas nedan. Apparatur som är avsedd för den planerade fortsättningen under nästa budgetår är under uppbyggnad och bedöms vara klar under innevarande budgetår. Apparaturen beskrivs kortfattat liksom den planerade fortsättningen på arbetet.
Rapporten inleds med en komprimerad beskrivning av den teoretiska bakgrunden till projektet.

Lund den 23 mars 1992

Göran Fagerlund
Projektledare

Lubica Wessman
Forskare

1. KORTFATTAD TEORETISK BAKGRUND

1.1 Frostnedbrytning - mekanismer

1.1.1 Stenmaterialet som ett slutet kärl

Vatten volymutvidgas 9 % när det fryser. Detta gäller även för vatten som befinner sig inne i porerna på ett poröst material - tex en natursten. Enda sättet att motverka denna volymexpansion är att utsätta materialet för ett så högt tryck att isbildning inte kan ske. Det erforderliga trycket är mycket högt. Så till exempel erfordras ett tryck av ca 210 MPa för att förhindra isbildning vid -20°C. Inget poröst stenmaterial kan utsättas för detta tryck inifrån utan att sprängas.

Om man betraktar det porösa stenmaterialet som en sluten behållare kan man därför få fram följande samband för en absolut maximal vattenmättnadsgrad (porfyllnadsgrad), S_{max}:

$$S_{max} = \frac{w_f}{w_f + 0{,}09 \cdot w_f} = 0{,}917 \qquad (1)$$

där w_f är den frysbara vattenmängden i materialet i m^3/m^3.

Om man även tar hänsyn till materialets töjbarhet, ε_{BR}, och Poisson´s tal, ν, ökar värdet på S_{max} något; /1/

$$S_{max} = 0{,}917 + \frac{3 \cdot \varepsilon_{BR} \cdot (1 - \nu)}{1{,}09 \cdot w_f} \qquad (2)$$

För stenmaterial är $\varepsilon_{BR} \leq 0{,}5$ ‰ och $\nu \approx 0{,}20$, dvs

$$S_{max} = 0{,}917 + \frac{1{,}1 \cdot 10^{-3}}{w_f} \qquad (3)$$

Ur detta samband kan vi beräkna vilken frysbar vattenmängd som maximalt får finnas i ett stenmaterial om det skall kunna vara fullständigt vattenmättat (S=1) utan att frysa sönder

$(w_f)_{max} = 0{,}013\ m^3/m^3 = 1{,}3\ \%$

Dvs stenmaterial med en porositet som är högre än ca 1 à 1,5 % och som har en sådan porstruktur att den lätt fylls fullständigt under naturliga förhållanden kommer att frysa sönder. Av Ekv (3) framgår också att stenmaterial med porositeter överstigande ett par procent aldrig får frysa i helt vattenmättat tillstånd om de skall vara frostbeständiga.

I verkligheten fryser inte allt vatten inne i porsystemet. Samband mellan pordiameter och fryspunkt visas i Tabell 1.

Tabell 1: Fryspunkt hos vatten i fina porer, /2/.
Table 1: Freezing point of water in pores.

Fryspunkt (°C)	Pordiameter (Å)	RH[1)] (%)
-2	1290	98
-6	450	95
-10	285	92
-15	200	88
-20	160	85

1) Den relativa fuktighet vid vilken, enligt Kelvinekvationen, kapillär kondensation av vatten sker i poren.

Flertalet naturstensmaterial är så grovporösa att i stort sett allt vatten har frusit när temperaturen understiger -10°C.

1.1.2 Hydrauliskt tryck. Kritisk storlek.

Ett verkligt material är inget slutet kärl utan vatten kan pressas undan mot ytan eller till ett luftfyllt utrymme inne i materialet. Detta sker dock inte spänningslöst utan ett sk *hyd-*

rauliskt tryck uppstår. För en helt vattenmättad skiva av materialet med tjockleken D blir det maximala trycket, /3/

$$P_{max} = \frac{1}{K} \cdot \frac{D^2}{8} \cdot 0{,}09 \cdot \frac{dw_f}{dt} \qquad (4)$$

Där K är permeabiliteten och dw_f/dt är isbildningshastigheten. Trycket ökar således med ökad skivtjocklek. Skivan brister när den inre spänningen P_{max} överstiger materialets draghållfasthet, f_t, dvs det existerar en *kritisk skikttjocklek* D_{KR}.

$$D_{KR} = \left\{ \frac{8 \cdot f_t \cdot K}{0{,}09 \cdot dw_f/dt} \right\}^{1/2} \qquad (5)$$

Ju tätare materialet är och ju snabbare isbildningen sker desto mindre blir den kritiska tjockleken.

I Fig 1 visas exempel på mätningar av den kritiska tjockleken hos två typer av tegel. Skivor av olika tjocklek har sågats, vattenmättats med hjälp av vakuum, förseglats och frusits. Skivor med en tjocklek som översteg det kritiska värdet har delaminerats vid frysningen.

För natursten torde den kritiska tjockleken ofta vara mindre än för tegel eftersom tätheten troligen oftast är högre. Man kan räkna med värden av storleksordningen någon mm. När vattenmättad sten fryser kan man förvänta sig att ytavskalningar med en tjocklek motsvarande den kritiska tjockleken uppkommer.

För de inre delarna av stenmaterialet är det mera realistiskt att använda följande materialmodell. En luftfylld por inne i materialet antas vara omgiven av ett skal med tjockleken L av helt vattenmättat material. Den luftfyllda poren tjänstgör alltså som recipient av undanpressat vatten från skalet. Man kan visa att följande maximala hydrauliska tryck uppstår i materialet, /3/

$$P_{max} = \frac{1}{K} \cdot \frac{1}{3} \cdot \{ \frac{2 \cdot L^3}{d} + \frac{3 \cdot L^2}{2} \} \cdot 0{,}09 \cdot \frac{dw_f}{dt} \qquad (6)$$

Materialet brister när P_{max} överskrider materialets draghållfasthet f_t. Det existerar således en *kritisk skaltjocklek,* L_{KR}.

En direkt jämförelse med uttrycket för den kritiska skikttjockleken, D_{KR}, visar att följande samband råder mellan de bägge värdena

$$\{ \frac{2 \cdot L_{KR}^3}{d} + \frac{3 \cdot L_{KR}^2}{2} \} = \frac{3}{8} \cdot D_{KR}^2 \qquad (7)$$

Exempel: Antag att en porös natursten har den kritiska skikttjockleken D_{KR}=1 mm. Antag vidare att inre frostskador sker när vattenhalten i materialet är så högt att medelstorleken hos de ännu inte vattenfyllda porerna är 10 µm; dvs d=0,01 mm. Ur ekv (7) fås då att L_{KR}= 0,12 mm. Den kritiska skaltjockleken är således alltid mindre än den kritiska skikttjockleken.

L_{KR} kallas ofta den *kritiska avståndsfaktorn* viket beror på att den i princip är ett mått på det maximalt tillåtna halva medelavståndet mellan porer som måste vara luftfyllda om stenen inte skall frysa sönder.

1.1.3 Iskristalltillväxt. "Osmotiskt tryck"

Hos stenmaterial som är så finporösa att en stor andel vatten inte kan frysa (Tabell 1) kan en annan förstörelseprocess uppkomma. Iskroppar som bildats i större kapillärer eller som bildats av vatten som pressats undan till delvis luftfyllda grövre porer kommer att dra åt sig vatten från omgivande fina porer, som enbart innehåller ofruset vatten. Iskroppen kommer därvid att växa och utöva ett successivt ökande tryck mot porväggen. Drivkraften för iskristalltillväxten är skillnaden i fri energi mellan is respektive ofruset vatten. Iskristalltillväxten avstannar inte förrän trycket i iskroppen blivit så stort att dess fria energi nått upp tll det ofrusna vattnets fria energi.

Denna minskar gradvis eftersom vattentransporten innebär en uttorkningseffekt hos det fina porsystemet och därmed uppkomst av negativa vattentryck vilka sänker vattnets fria energi.

Mekanismen, som just beskrivits, kallas ibland "den osmotiska tryckmekanismen" eftersom den drivande kraften för vattentransporten påminner om en osmotisk kraft, särskilt om porerna dessutom innehåller salthaltigt vatten. Mekanismen förstärks då av att saltgradienter ger upphov till ytterligare vattenflöden mot iskroppen och därmed ännu högre spänningar; se nedan.

Mekanismen är av exakt samma typ som den som leder till tjälskjutning i vägar. Mycket stora tryck kan byggas upp innan iskristaltillväxten stoppar. Man kan inte utesluta att finporösa stenmaterial kan sprängas sönder av denna mekanism. I princip krävs emellertid rätt hög porositet hos stenen varav en stor andel är så finporös att vattnet inte kan frysa in-situ under normalt förekommande utetemperaturer, se Tabell 1.

Till skillnad från det hydrauliska trycket gynnas iskristalltillväxten av långsam och varaktig frysning.

Vid början av processen diffunderar vatten såväl till iskroppar som är instängda i helt fyllda porer som till iskroppar som befinner sig i bara delvis fyllda, grövre porer. I de senare kan iskristalltillväxten ske spänningslöst. Detta innebär att så småningom kommer all vattendiffusion att ske till iskropparna i de grövre, delvis luftfyllda porerna. Samtidigt kommer de iskroppar som tillväxte i ett tidigare skede i helt fyllda porer att gradvis smälta på grund av sitt alltför höga energiinnehåll jämfört med den spänningslösa isen och avleverera det producerade vattnet till de spänningslösa iskropparna. Ju kortare avståndet är mellan grövre luftfyllda porer desto mindre tryck kan byggas upp inne i materialet av iskristalltillväxt i fyllda porer, /4/. Även nedbrytningsmekanismen "iskristalltillväxt" förutsäger således *existensen av kritiska storlekar*. Dessa är dock svåra att kvantifiera.

1.1.4 "The ordered water theory"

Enligt en teori som uppställts av Dunn & Hudec /5/ och Hudec /6/ skulle skador, som starkt påminner om frostskador, kunna uppstå pga tryckförändringar hos vatten som är adsorberat i mycket fina porer inne i stenen. Sådana porer har en vidd som enbart motsvarar ett par vattenmolekyldiametrar. Detta vatten - "ordered water"- är mycket hårt bundet till porväggarna. För varje temperatur och relativ fuktighet existerar ett visst jämviktstryck hos vattnet. När temperaturen -och ev även den relativa fuktigheten- ändras kommer tryckförhållandena vid jämvikt att förändras varvid, enligt författarna, så stora tryck kan byggas upp att stenen sprängs. Mekanismen antas ha en viss betydelse för stenvittring i ökenmiljö. Det är emellertid osäkert om den har någon betydelse för vanlig stenvittring i vårt land och när frystemperaturer förekommer.

1.1.5 Inverkan av i porvattnet lösta ämnen

För betong har det visat sig att små mängder lösta ämnen i det vatten som omger betongen i samband med en oförseglad frysning eller som finns inne i porsystemet vid en förseglad frysning ger starkt förvärrade frostskador. Med "förseglad" frysning avses att provkroppens yta isolerats på ett sådant sätt att inget fuktutbyte med omgivningen är möjlig under frysförsöket. Koncentrationer av storleksordningen 0,5 % kan vara tillräckliga för att en märkbar förvärrande effekt skall noteras. De farligast koncentrationerna är ofta 3 à 4 % /7/.

Orsaken till detta fenomen är inte klarlagd. Man kan emellertid tänka sig följande effekter:

1: En ökad (salt)koncentration hos porvattnet medför att den frysbara vattenmängden minskar. Detta innebär såväl att det hydrauliska trycket minskar som att antalet iskroppar som kan utöva tryck genom iskristalltillväxt minskar. Bägge effekterna är *positiva*. En minskad mängd frysbart vatten innebär dessutom att materialets permeabilitet i fruset tillstånd ökar vilket minskar det hydrauliska trycket; ekv (4).

2: En ökad (salt)koncentration hos porvattnet innebär att koncentrationsskillnader uppstår mellan ofruset vatten inne i porer som innehåller iskroppar och vatten i finare porer utan iskroppar. Lösta joner vandrar betydligt långsammare än

vatten i ett finporöst system. Detta leder till ett ökat osmotiskt tryck med ökande salthalt vilket är en *negativ* faktor.

Nettoeffekten kan mycket väl bli att den kritiska storleken får ett minimum vid en koncentration hos porvattnet som är några få procent; såväl lägre som högre koncentrationer än denna "pessimala" koncentration leder till mindre påfrestningar och därmed till ökade kritiska storlekar och följakligen till lägre risk för skador; se nedan.

En annan potentiellt negativ effekt är att lösta ämnen i det vatten som står i kontakt med framförallt ett finporöst stenmaterial kommer att dra till sig rent porvatten från stenens inre delar. Vatten vandrar nämligen snabbare än lösta joner om porerna är mycket små. Vattenmättnadsgraden ökar därför i stenens ytparti vilket är starkt negativt; se nedan.

1.2 Kritisk vattenmättnadsgrad

1.2.1 Teoretisk bestämning av S_{KR}

Det faktum att kritiska materialstorlekar existerar i samband med frysning innebär av rent geometriska skäl att en *kritisk vattenmättnadsgrad* ,S_{KR}, existerar. Om man successivt fyller upp ett poröst material med vatten kommer nämligen medelavståndet mellan de porer som fortfarande är luftfyllda att alltmer minska. Så småningom -vid en viss kritisk vattenmättnadsgrad- motsvarar medelavståndet det kritiska avståndet, L_{KR}. En ytterligare ökning av vattenmättnadsgraden innebär att stenen sprängs sönder vid frysning.Denna kritiska vattenmättnadsgrad är alltid lägre än det maximalvärde som anges i ekv (1) och (2). Orsaken till detta är att av frysningen undanpressat vatten måste transporteras ganska långa sträckor genom ett mer eller mindre tätt porsystem innan det kan tas om hand i någon luftfylld por.

Man kan beräkna den kritiska vattenmättnadsgraden när den kritiska tjockleken, D_{KR}, och storleksfördelningen hos stenmateri-

alets porer, f(r), är kända. Metoden beskrivs kortfattat nedan. En mera utförlig teoretisk beskrivning ges i /8/. Det förutsätts i beräkningen att en mindre por vattenfylls innan en större por fylls. Detta är ett termodynamiskt rimligt antagande.

Den resulterande luftfyllda porvolymen ,v_r, efter uppfyllning av alla porer med radier <r är

$$v_r = \int_r^{\infty} f(r) \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot dr \qquad (8)$$

Där f(r) är frekvensfunktionen för porradien r.

Den resterande inre porarean hos ännu luftfyllda porer ,s_r, är

$$s_r = \int_r^{\infty} f(r) \cdot 4\pi r^2 \cdot dr \qquad (9)$$

Specifika arean, α_r, hos den luftfyllda delen av porsystemet är

$$\alpha_r = \frac{s_r}{v_r} \qquad (10)$$

Medeldiametern d_r hos de ännu luftfyllda porerna är

$$d_r = \frac{6}{\alpha_r} = 6 \cdot \frac{v_r}{s_r} \qquad (11)$$

Man kan visa att halva medelavståndet, dvs avståndsfaktorn L_r (se ovan), mellan ännu luftfyllda porer är

$$L_r = \frac{d_r}{2} [1,40 \cdot \{\frac{1}{v_r}\}^{1/3} - 1] \qquad (12)$$

När v_r blivit så litet ,$(v_r)_{KR}$, att L_r motsvarar den kritiska skaltjockleken (eller den kritiska skikttjockleken) ,L_{KR}, har den kritiska vattenmättnadsgraden ,S_{KR}, uppnåtts. Denna blir definitionsmässigt

$$S_{KR} = 1 - \frac{(v_r)_{KR}}{v_o} \qquad (13)$$

Där v_o är totala porvolymen hos provet. Denna kan mätas experimentellt eller beräknas ur

$$v_o = \int_0^\infty f(r) \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot dr \qquad (14)$$

Genom insättning av ekv (12) i (13) fås ett analytiskt uttryck för sambandet mellan kritisk avståndsfaktor L_{KR} och kritisk vattenmättnadsgrad S_{KR}.

1.2.2 Experimentell bestämning av S_{KR}

Den kritiska vattenmättnadsgraden kan således ,som nämnts ovan,beräknas analytiskt när den kritiska skikttjockleken, D_{KR}, och frekvensfunktionen för alla porer, f(r), är kända. Det enklaste är emellertid att bestämma den kritiska vattenmättnadsgraden experimentellt. Metoden anges i /9/. Metoden går ut på att man fryser ett antal förseglade prover, som förkonditionerats till olika vattenmättnadsgrad. Frysskadorna mäts på något sätt; tex genom kontinuerlig längdmätning under frysningen eller genom mätning av E-modulen före och efter frysning. Prover som har en vattenmättnadsgrad, som överstiger den kri-

tiska, får ofta mycket omfattande skador; hög och kvarstående expansion eller stor E-modulförlust. Exempel på en mätning av S_{KR} för tegel visas i Fig 2. I detta fall används E-modulbestämning på prover som frusits och upptinats cykliskt. Den uppmätta kritiska vattenmättnadsgraden är ca 0,85. Ett exempel på en bestämning av S_{KR} för samma tegel med hjälp av expansionsmätningar under frysningen visas i Fig 3. Som synes sker de stora expansionerna när vattenmättnadsgraden S överstiger ca 0,80 à 0,85. Det kritiska värdet är något mera oprecist än vid flercykelfrysningen beroende på att differenserna mellan de olika vattenmättnadsgrader som användes i försöket är tämligen stora.

Expansionsmätningar och E-modulbestämningar på natursten vilka antyder att kritiska vattenmättnadsgrader existerar för dessa material har utförts av Thomas /10/. I Fig 4 visas ett exempel på en sådan bestämning. Prover av en viss sorts sten försågs med olika mängd vatten före frysningen under vilken längdförändringarna mättes. När vattenmättnadsgraden i stenen översteg ca 0,76 började provet att expandera under nedfrysningsfasen. Detta är således stenens kritiska vattenmättnadsgrad.

I Fig 5 visas ytterligare exempel på resultat av frysprovning av 11 olika stentyper /10/. I dessa fall mättes förändringen i den statiska E-modulen förorsakad av frysning. Som synes varierar S_{KR}-värdena kraftigt för de olika stensorterna; från ca 0,71 till ca 0,90.

Eftersom den kritiska storleken är beroende av koncentrationen av lösta ämnen i porvattnet kommer även värdet på S_{KR} att vara koncentrationsberoende. Det lägsta värdet, dvs det farligaste värdet, uppnås vid den koncentration där även den kritiska storleken är lägst. Att så är fallet framgår av ekv (12).

1.3 Vattenabsorption i praktiken. Den potentiella livslängden

I praktiken kommer stenen att absorbera vatten. Fuktinnehållet -*den aktuella vattenmättnadsgraden*, S_{AKT}- kommer att variera med de yttre klimatvariationerna.

En kraftig frostskada i ett representativt volymelement i stenen uppstår när den aktuella vattenmättnadsgraden i elementet för första gången överskrider dess kritiska vattenmättnadsgrad samtidigt som frystemperaturer råder; se Fig 6. Att förutse när denna ogynnsamma kombination av fukt och temperatur inträffar, dvs att förutse volymselementets livslängd, är omöjligt. Man kan emellertid få en god uppfattning av en sk potentiell livslängd genom att studera vattenabsorptionen hos en provkropp vid ett enkelt kapillärsugningsexperiment; Fig 7. *Den kapillära vattenmättnadsgraden*, S_{KAP} följs under ca 1 månad i försöket.

Frostbeständigheten, F(t) vid en viss tidpunkt ,t, från start av kapillärsugningstesten definieras

$$F(t) = S_{KR} - S_{KAP}(t) \qquad (15)$$

Där $S_{KAP}(t)$ är den vattenmättnadsgrad som uppnåtts i provet efter tiden t. I Fig 8 visas exempel på beräknade frostbeständigheter hos några fasadmaterial av tegel och kalksandsten /11/. Som synes uppnås obeständighet efter kapillärsugningstider som varierar mellan ca 1/2 och 10 dygn. I ett fall -material nr 2 som är ett välbränt tegel- torde den potentiella livslängden vara mer än 100 dygn vilket innebär en hög grad av frostbeständighet.

Genom att bestämma värdena S_{KR} och S_{KAP} för olika stenmaterial kan man således göra en kvantifierad bedömning av deras frostbeständighet och av deras potentiella livslängd.

Man kan inte genomföra ett kapillärsugningstest mer än ca 1 månad. Oftast tvingas man därför att extrapolera den uppmätta S_{KAP}-kurvan tills dess S_{KR}- värdet uppnås. Denna extrapolation är osäker. Den enklaste extrapolationen får man om man antar att S_{KAP}-kurvan följer ett enkellogaritmiskt samband

$$S_{KAP}(t) = A + B \cdot \log(t) \qquad (16)$$

Den potentiella livslängden t_1 blir då enligt ekv (15)

$$t_1 = 10^{(S_{KR}-A)/B} \qquad (17)$$

De tre experimentellt bestämda konstanterna S_{KR}, A och B ger således ett kvantifierat mått på frostbeständigheten och livslängden.

Man kan härleda teoretiskt sett bättre uttryck för extrapolationen varvid hänsyn även kan tas till porsystemets utseende /12/. En sådan extrapolation har ofta det principiella utseendet

$$S_{KAP}(t) = S_o + \Delta S_{KAP}(t) \qquad (18)$$

Där

$$\Delta S_{KAP}(t) = A \cdot \{\log t\}^B \qquad (19)$$

Konstanten S_o beror på andelen porer som är mindre än ca 0,1 µm medan konstanterna A och B beror på de grövre porernas storleksfördelning och utseende. Samtliga konstanter kan bestämmas experimentellt vid ett kapillärsugningstest.

När porvattnet, eller vattnet som omger stenen, innehåller lösta ämnen kan vattenabsorptionen förändras. Den kan antingen öka eller minska lokalt genom att vatten omfördelas av de koncentrationsgradienter som uppstår över stenens tvärsnitt. Effekten av lösta ämnen på vattenhalten i olika stenmaterial är hittills mycket bristfälligt utredd.

1.4 Effekt av ytbehandlingar och kemiska ytförändringar

Stenens yta kan förändras på olika sätt; genom olika åldringsfenomen, genom ytreaktioner eller genom ytbehandling. Sådana förändringar ändrar sannolikt värdena på såväl S_{KR} som S_{AKT}. Nettoresultatet kan bli positivt, dvs differensen $S_{KR}-S_{AKT}$ ökar eller det kan bli negativt, differensen $S_{KR}-S_{AKT}$ minskar eller

blir rentav negativ.

Förändringen av S_{KR} går via en förändring av värdet på den kritiska storleken. Ytförändringar som medför en minskning av permeabiliteten -tex krustabildning- eller som medför en sänkning av draghållfastheten eller en ökning av den frysbara vattenmängden -tex urlakning- innebär en minskning av den kritiska storleken; se ekv (5) och (6). De medför därför en minskning av den kritiska vattenmättnadsgraden vid i övrigt oförändrade förhållanden; se ekv (12) och (13). Sådana ytförändringar, som alltså ändrar värdet på S_{KR}, kan bero på kemiska reaktioner men de kan också bero på medvetna ytbehandlingar, tex anbringande av tätande skikt eller hydrofobering eller konsolidering av stenen.

Ytförändringar kan emellertid också medföra att den naturliga vattenmättnadsgraden S_{AKT} i stenen ändras. Om ytan blir tätare kan vatteninsugningen försvåras vilket är en positiv faktor. Å andra sidan kan den tätande ytförändringen också innebära att fukt som ändå trängt in genom defekter i det tätare ytskiktet får svårare att ta sig ut. Fukt som kommer inifrån stenen kan dessutom kondensera mot ett tätare ytlager när detta kyls av varvid en fuktackumulering omedelbart under den täta ytan kan ske. Bägge effekterna höjer värdet på S_{AKT} och är därmed negativa med avseende på frostbeständigheten.

Effekten av ett förändrat ytskikt på frostbeständighete kan i princip alltid kvantifieras genom studier av dess effekt på de båda grundläggande egenskaperna S_{KR} och S_{AKT}.

2. GENOMFÖRDA MÄTNINGAR PÅ GOTLÄNDSK KALKBUNDEN SANDSTEN

2.1 Försöksmaterialet

Tre olika typer av gotländsk kalkbunden sandsten har levererats från Slite Stenhuggeri genom förmedling av Runo Löfvendahl vid Riksantikvarieämbetet. Stenmaterialet var nybrutet, dvs icke-åldrat.

De tre stensorterna benämns:

1: Uddvide
2: Botvide
3: Valar

Ur de levererade större "blocken" sågades prover för de undersökningar som redovisas nedan. Resterande stenmaterial kommer att användas för fortsatta undersökningar enligt kapitel 3.

2.2 Densitet och porositet

Den öppna porositeten P bestämdes för samtliga frysprovkroppar -se nedan- genom vägning av vid +50°C torkade prover respektive vägning av helt vattenmättade prover. Vattenmättningen åstadkoms genom insugning av vatten i torra prover som utsatts för långvarig vakuumbehandling vid <2 torr resttryck.
Volymbestämning av proverna skedde genom vägning av de vattenmättade proverna i luft och nedsänkta i vatten. Ur dessa vägningar fås även skrymdensiteten γ direkt och kompaktdensiteten ρ indirekt ur ekvationen

$$\rho = \frac{\gamma}{1 - P} \qquad (18)$$

Uppmätta värden ges i Tabell 2. Spridningarna är små för alla tre stensorterna vilket tyder på att det levererade materialet är mycket homogent. Porositeten är relativt hög.

Det faktum att kompaktdensiteten är lika hög för alla de tre stenarna tyder på att de är uppbyggda av i stort sett samma mineral i samma proportioner. Värdet på kompaktdensiteten är ungefär så hög som kan förväntas hos ett icke poröst material av aktuell sammansättning. Detta tyder på att i stort sett hela porositeten var vattenfylld vid porstorleksbestämningen. Den slutna porositeten är således i stort sett noll.

Tabell 2: Porositet och densitet. (15 à 17 prover per sten).
Table 2: Gothland sandstones. Porosity and density.

Stensort	Porositet,P (%) m[1)]	s[2)]	Skrym-densitet, γ (kg/m^3) m	s	Kompakt-densitet, ρ (kg/m^3) m
Uddvide	22,1	0,2	2073	11	2661
Botvide	21,6	0,2	2079	6	2652
Valar	17,5	0,5	2199	15	2666

1) Medelvärde. 2) Standardavvikelse.

2.3 Kritisk vattenmättnadsgrad

Den kritiska vattenmättnadsgraden bestämdes på prover med den nominella storleken 30·30·120 mm. För varje stensort användes 15 à 17 provkroppar vilka före frysningen anpassades till olika vattenmättnadsgrader genom torkning från helt vattenmättat tillstånd. Vattenmättnsadsgraderna varierades inom området ca 0,50-1,00. Provningen genomfördes enligt den metod som beskrivs i /9/.

Före första frysningen och efter sista upptiningen mättes den dynamiska E-modulen på provet genom bestämning av egenfrekvensen vid påtvingad böjsvängning. Relativa E-modulen är proportionell mot kvadraten på egenfrekvensen. Försök gjordes även

att bestämma den inre friktionen genom mätning av amplitud-frekvenskurvans bredd. På grund av att det var rätt stora svårigheter att få precisa värden på såväl egenfrekvensen som amplituden fick dock inre friktionsmätningarna överges. Även de uppmätta egenfrekvenserna är något osäkra -framförallt hos frysskadade prover.

För varje provkropp bestämdes volym och porositet före och

efter frysning genom vägning i luft och i vatten av vakuummättade prover. Vissa prover var så svårt skadade efter frysningen att sprickor kunde ses på ytorna; se Foto 1 och 2.

Fryscykelns utseende famgår av Fig 9. Fryscykeln bestod av 16 tim nedfrysning till -18°C och 8 tim upptining till +20°C. 9 fryscykler genomfördes för varje stentyp. Som synes är fryshastigheten mycket stor. Medelvärdet på temperatursänkningshastigheten i området 0°C - -10°C är 12°C/tim vilket är i paritet med den högsta fryshastighet som uppmätts i naturen; /11/. Fortsatta försök kommer att göras med en lägre fryshastighet. Undersökningar på andra material har dock visat att fryshastigheten har en mycket liten inverkan på S_{KR}-värdet; /14/.

Resultatet av E-modulmätningarna visas i Fig 10-12. Som synes minskar den resterande dynamiska E-modulen, E_n/E_o, med ökande vattenmättnadsgrad, S. Nedgången i E-modul är dock inte så drastisk när ett visst "mycket kritiskt" värde på en viss vattenmättnadsgrad överskrids som i det fall som visas i Fig 2, utan E-modulminskningen sker gradvis i alla stensorterna. Sambandet mellan E och S kan beskrivas med ett linjärt samband som bestäms med linjär regression.

$$E_n/E_o = a - b \cdot S \qquad (19)$$

Koefficienterna a och b listas i Tabell 3.

Ett *minimivärde* på S_{KR} uppnås där ekv (19) skär linjen $E_n/E_o=1$ dvs

$$(S_{KR})_{min} = \frac{a - 1}{b} \qquad (20)$$

Detta värde innebär att ingen som helst förstörelse accepteras. En viss E-modulnedgång behöver emellertid inte innebära att materialet helt förlorar sin funktion. Enligt Thomas /10/ gäller i stort sett följande samband mellan hållfasthetsförlust och E-modulförlust hos natursten

$$f_n/f_o = \{E_n/E_o\}^{3/4} \qquad (21)$$

Detta samband är emellertid mycket oklart och måste studeras ytterligare i de kommande undersökningarna. Enligt ekv (21) är nämligen effekten av en E-modulnedgång på hållfasthetsnedgången rätt begränsad. Andra författare ger betydligt högre hållfasthetsförluster. För betong anser man att exponenten i högra ledet av ekv (21) är ca 2, dvs inverkan av en viss E-modulnedgång på hållfastheten är mycket större än enligt ekv (21). Exempel: 10 % E-modulförlust ger 7,5 % hållfasthetsförlust när exponenten i ekv (21) är 3/4 men hela 19 % när exponenten är 2.

Tills vidare accepteras dock ekv (21). Om man maximalt accepterar 10 % hållfasthetsförlust kan man då maximalt tillåta 15 % förlust i E-modul. *Maximivärdet* på S_{KR} fås när ekv (19) skär linjen $E_n/E_o=0,85$, dvs

$$(S_{KR})_{max} = \frac{a - 0,85}{b} \qquad (22)$$

Värden på $(S_{KR})_{min}$ och $(S_{KR})_{max}$ ges i Tabell 3.

Tabell 3: Bestämning av kritisk vattenmättnadsgrad
Table 3: Determination of the critical degree of saturation.

Stensort	Koefficienter i ekv (19) a	b	$(S_{KR})_{min}$ ekv (20)	$(S_{KR})_{max}$ ekv (22)
Uddvide	2,00	1,59	0,63	0,72
Botvide	2,30	2,00	0,65	0,73
Valar	1,64	1,12	0,57	0,71

Den kritiska vattenmättnadsgraden är således inte helt väldefinierad utan är beroende av hur stor skadegrad som accepteras. Vill man vara på säkra sidan bör värdet $(S_{KR})_{min}$ användas. Detta beror på att skadorna vid vattenmättnadsgrader som är högre än $(S_{KR})_{min}$ torde öka med ökande antal fryscykler; se Fig 13 som visar resultatet av frysprovningar av cementbruk; /14/. Ju flera fryscykler materialet utsätts för desto större E-modulnedgång sker när värdet $(S_{KR})_{min}$ överskrids. Vid vattenmättnadsgrader understigande $(S_{KR})_{min}$ sker däremot inga skador trots ett stort antal fryscykler. Som nämnts ovan kommer ytterligare undersökningar av det verkliga värdet på S_{KR} att göras. Därvid kommer i första hand dilatationsmätningar att användas eftersom dessa troligen är betydligt känsligare än E-modulmätningar för denna typ av material.

2.4 Kapillär vattenmättnadsgrad

Torra provkroppar med samma sorlek som de som användes för bestämning av S_{KR} (30·30·120 mm) användes för bestämning av kapillär uppsugning.. För varje stentyp användes 7 provkroppar. Proverna placerades med ena långsidan neddoppad någon millimeter i vatten. Mätprincipen framgår av Fig 7.

Vattenupptagningen har hittills följts under 30 dygn. Ur viktökningen och genom kännedom om provkropparnas porvolym kan den kapillära vattenmättnadsgraden S_{KAP} beräknas. De uppmätta kur-

vorna med sugtiden i kvadratrotskala visas i Fig 14-16.

Under den allra första fasen vandrar fuktfronten uppåt i provkroppen. Följande samband råder då

$$t = m \cdot z^2 \qquad (23)$$

Där z är den höjd över vattenytan som nåtts av fuktfronten efter sugtiden t. Konstanten m kallas *motståndstalet* och är ett mått på hur finporöst materialet är. Ju högre värde på m desto långsammare vandrar fukten.

När fuktfronten når provkroppens överyta, dvs när z= provkroppens tjocklek, h, vinkelrätt mot vattenytan,fås en "knickpunkt" i vattenabsorptions-tidskurvan. Ur denna "knickpunktstid", t_k kan motståndstalet m beräknas

$$m = \frac{t_k}{h^2} \qquad (24)$$

Knickpunktstiden, t_k, och knickpunktsabsorptionen, $(S_{KAP})_k$, fås lätt genom att vattenabsorptionen eller S_{KAP} plottas mot tiden i kvadratrotskala.

Den absorberade vattenmängden, W, är direkt proportionell mot kvadratroten ur tiden så länge vattenfronten stiger i provet

$$W = k \cdot (t)^{1/2} \qquad (25)$$

Där k är kapillaritetstalet. Detta kan lätt utvärderas ur knickpunktsabsorptionen $(S_{KAP})_k$

$$k = \frac{[(S_{KAP})_k - (S_{KAP})_o] \cdot P \cdot h}{(t)^{1/2}} \qquad (26)$$

Där P är porositeten hos materialet och $(S_{KAP})_o$ är vattenmättnadsgraden när försöket startar. I det aktuella fallet är $(S_{KAP})_o=0$.

Uppmätta värden på materialegenskaperna t_k, $(S_{KAP})_k$, m och k ges i Tabell 4.

Tabell 4: Kapillaritetsdata.
Table 4: Capillarity.

Stensort	Knickpunkt t_k (tim)	$(S_{KAP})_k$	m (s/m^2)	k (kg/m$^2\cdot\sqrt{s}$)
Uddvide	0,084	0,679	$33,6\cdot10^4$	$2,59\cdot10^{-4}$
Botvide	0,125	0,669	$50,0\cdot10^4$	$2,04\cdot10^{-4}$
Valar	2,19	0,683	$876,0\cdot10^4$	$0,40\cdot10^{-4}$

Kapillärsugningen är således snabb hos samtliga stenar. Som jämförelse kan nämnas att en vanlig husbyggnadsbetong av enklaste slag avsedd för inomhusbruk har ett motståndstal av storleksordningen 10^7 s/m^2. Redan efter mindre än 10 minuter har stenar av typerna Uddvide och Botvide fyllt sig till en vattenmättnadsgrad av ca 0,67 à 0,68 till ett djup från sugytan som är 3 cm. Detta är en mycket snabb och kraftig sugning. Dess betydelse för frostbeständigheten behandlas i nästa avsnitt.

Efter det att knickpunktssugningen uppnåtts sker den betydligt långsammare absorptionen i det grövre porsystemet. Detta absorptionsförlopp kan beskrivas med ett lin-log-samband; se ekv (16)

$$S_{KAP}(t) = A + B\cdot\log t \qquad (16)$$

Koefficienterna A och B med tiden t i timmar listas i Tabell 5. Som synes är konstanten A, vilken i princip är den kapillära vattenmättnadsgraden efter 1 timmes vattenupptagning, i stort

sett lika stor som vattenmättnadsgraden vid knickpunkten, $(S_{KAP})_k$; se Tabell 4.

Tabell 5: Långtidsabsorptionen; koefficienter i ekv (16).
Table 5: Long term water absorption; see eq(16).

Stensort	A	B
Uddvide	0,678	0,0516
Botvide	0,654	0,0546
Valar	0,613	0,0843

2.5 Frostbeständighet. Potentiell livslängd

Frostbeständigheten beräknas ur ekv (15). Det är av stort intresse att jämföra den kapillära vattenmättnadsgraden vid "knickpunktsabsorptionen", $(S_{KAP})_k$, med värdet på S_{KR}. $(S_{KAP})_k$ kan förväntas uppträda i ytpartiet av en exponerad sten intill någon millimeters djup varje gång stenen utsätts för regn. Frostbeständigheten vid knickpunktssugningen, F_k, kan beräknas ur

$$F_k = S_{KR} - (S_{KAP})_k \qquad (15')$$

Av säkerhetsskäl bör värdet $(S_{KR})_{min}$ enligt Tabell 3 användas. Man får då följande frostbeständighet F_k

Uddvide: $F_k = 0,63 - 0,68 = -0,05$
Botvide: $F_k = 0,65 - 0,67 = -0,02$
Valar: $F_k = 0,57 - 0,68 = -0,11$

Samtliga stensorter har en mycket låg grad av frostbeständighet när utgångspunkten är värdena på $(S_{KR})_{min}$ enligt Tabell 3. Som nämnts ovan är värdena dock preliminära. Noggrannare värden kommer att bestämmas med dilatationsmätningar.

Om man antar att den kritiska tjockleken D_{KR} för samtliga stenar är 5 mm så får man med motståndstal för kapillärsugning en-

ligt Tabell 4 potentiella livslängder som understiger 5 minuter, dvs ett slagregn som pågår 5 minuter kommer att fylla ytan till en så hög nivå att en frostskada kommer att ske om regnet direkt åtföljs av minustemperaturer.

Man kan naturligtvis använda ett något osäkrare värde på S_{KR}, tex de $(S_{KR})_{max}$ som anges i Tabell 3 och som innebär att en viss skada accepteras vid varje fryscykel där $(S_{KR})_{max}$ överskrids. I så fall får man följande frostbeständighet F_k vid knickpunktsabsorptionen

Uddvide: $F_k = 0,72 - 0,68 = +0,04$
Botvide: $F_k = 0,73 - 0,67 = +0,06$
Valar: $F_k = 0,71 - 0,68 = +0,03$

Den potentiella livslängden t_l blir i detta fall med koefficientvärden A och B enligt Tabell 5; Se ekv (17).

Uddvide: $t_l = 6,5$ tim
Botvide: $t_l = 24,6$ tim
Valar: $t_l = 14,2$ tim

Ytterligare en möjlighet är att använda sig av ett generellt högsta värde på S_{KR} av 0,80. Detta innebär att E-modulreduktionen för samtliga stenar motsvarar ungefär 25 à 30 %, dvs hållfastreduktionen efter de 9 fryscyklerna motsvarar enligt ekv (21) ungefär 20 à 25 %. Den potentiella livslängden t_l blir då enligt ekv (17).

Uddvide: $t_l = 231$ tim (10 dygn)
Botvide: $t_l = 472$ tim (20 dygn)
Valar: $t_l = 165$ tim (7 dygn)

I samtliga fall visar sig således stenen Botvide ha den högsta frostbeständigheten. Ingen av stenarna har emellertid någon hög grad av frostbeständighet vilket i första hand beror på den snabba och höga vattenuppsugningen. Noggrannare försök att bestämma den kritiska vattenmättnadsgraden kommer att göras. Detta kan komma att nyansera bedömningen något, främst vad avser den sk potentiella livslängden.

3. UPPBYGGNAD AV FÖRSÖKSUTRUSTNING. FORTSATTA FÖRSÖK

3.1 Dilatationsmätningar. Dilatometer

Många sedimentära stenar ,tex de nu testade gotländska kalkbundna sandstenarna, är rätt svagt konsoliderade. Det är därför ibland svårt att att få precisa värden på egenfrekvensen och den inre friktionen vid påtvingad böjsvängning. Andra stenar kan förväntas ha så låg frysbar vattenmängd även i vattenmättat tillstånd att egenfrekvensen blir ett okänsligt mått på förstörelsegraden. I dessa fall ger en dilatationsmätning under frysning ett betydligt känsligare mått på skadorna. En vattenmättad provkropp med enbart 1 % porositet får teoretiskt en expansion av ca 0,3 ‰ vilket är lätt att observera med moderna längdmätningsgivare.

Genom dilatationsmätningar på prover med olika vattenmättnadsgrad kan man dessutom snabbt få fram ett värde på den kritiska vattenmättnadsgraden; jfr mätningarna i Fig 3 och Fig 4.

En mätrigg, i vilken längdmätning under en frysnings-uppti-ningscykel kan ske i 6 prover samtidigt, byggs för närvarande upp vid avdelningen; Mätprincipen åskådliggörs i Fig 17 där dock endast en provkropp inritats. Mätriggen skall användas för en kartering av den kritiska vattenmättnadsgraden i olika stenmaterial och för studier av betydelsen av fryshastigheten, av fryscykelns utseende, av lägsta frystemperaturen och av porlösningens koncentration av olika ämnen, tex sulfater och klorider. Mätriggen skall även användas för studier av kritisk vattenmättnadsgrad hos åldrat stenmaterial.

Utrustningen är klar i juni 1992.

3.2 Samtidig isbildning och längdändring. Kalorimeter-dilatometer

Skademekanismen vid frysning av natursten är inte klarlagd; den kan vara huvudsakligen av typ hydrauliskt tryck -se 1.1.2-eller

den kan vara av typen iskristalltillväxt -se 1.1.3. Genom att följa såväl isbildningshastigheten som längdändringshastigheten hos samma sten när den fryser kan man få en klarare uppfattning om vilken mekanism som är dominant i olika stenar och i olika skeden av frysningen. Man kan också se om förändringar i sammansättningen hos porlösningen medför förändringar i den dominerande skademekanismen.

För att sådana studier skall kunna göras byggs för närvarande en kombinerad kalorimeter-dilatometer upp vid avdelningen. En principbild av försöksuppställningen visas i Fig 18. Utrustningen kommer att vara central i det fortsatta projektet.

Utrustningen beräknas vara klar att tas i drift i augusti 1992.

3.3 Studier av vattenfixering och finporstruktur. Sorptionsapparat

Porer med diameter som är mindre än ca 0,1 µm kan förväntas vara helt vattenfyllda under naturliga fuktförhållanden. En stor andel sådana fina porer i en sten innebär därför att risken för frostskador är stor. Å andra sidan, om porerna är mycket små, kan vatten i dem inte frysa men väl delta som vattenmagasin för iskristalltillväxt i grövre porer. Det är därför mycket viktigt att stenens finporstruktur klarläggs. Detta görs lättast genom studier av hur mycket vatten som binds i stenen vid jämvikt med olika yttre relativa fuktigheter.

En apparat för studier av vattensorption i området 33 %<RH<98 % byggs därför upp vid avdelningen. De olika relativa fuktigheterna i apparaten åstadkoms med hjälp av mättade saltlösningar med olika mättnads-RH. Fuktfixering i sex olika klimat kan studeras samtidigt. Såväl desorptions- som adsorptionskurvor kan bestämmas samtidigt i apparaten.

Sorptionsapparaten är färdig att tas i bruk under juni 1992.

3.4 Studier av grovstruktur. Bildanalys

Grovporstrukturen, dvs mängd och diameter hos porer med diameter som är större än ca 1 µm, avgör värdet på S_{KR}. Likaså har formen och kontinuiteten hos dessa porer avgörande betydelse för vattenfyllnaden under naturliga betingelser och därmed på frostbeständigheten. Alla stenar som ingår i undersökningen kommer därför att studeras med det bildanalyssystem, Labeye, som finns vid avdelningen.

Mätningar kommer dels att göras på infärgade planslip, dels på tunnslip som impregnerats med fluoriscerande epoxi. Avdelningen har utrustning för sådan provpreparering.

3.5 Fortsatta försök

3.5.1 Översiktsstudie- kartläggning av problemet

Fortsatta studier kommer att göras av frostbeständigheten hos de tre typer av gotländsk kalkbunden sandsten vilka studerats översiktligt enligt kapitel 2 ovan.

Ett antal andra naturstenar av olika typ, graniter, kalksten, sandsten, marmor, skiffer, har dessutom inskaffats. Stenarna har olika karakteristika vad avser porositet, porstorlek, porstruktur. För samtliga dessa stenmaterial kommer S_{KR}, S_{KAP}, potentiell livslängd, saltavskalning, och porstruktur att bestämmas experimentellt med följande rutinmetoder:

* Flercykelfrysning kombinerat med bestämning av E-dyn.
* En-cykelfrysning i dilatometer.
* Saltavskalning enligt "betongfrysningsmetod".
* Kapillär vattenabsorption
* Bestämning av finporstruktur med vattenångsorption.
* Bestämning av "mesoporstruktur" med Hg-porosimeter.
* Bestämning av grovporstruktur med bildanalys.

Inverkan av olika föroreningar lösta i porvattnet, tex sulfat och klorid, på S_{KR}-värdet kommer också att bestämmas liksom ef-

fekten av samma föroreningar på vattenabsorptionen dvs på S_{KAP}-värdet.

Ur alla dessa mätdata bör enkla relationer mellan ett stenmaterials strukturella uppbyggnad och dess frostbeständighet kunna uppställas. Likaså bör man kunna få en god uppfattning av frostbeständighetsproblemets relevans när det gäller natursten liksom av vilka parametrar som är avgörande.

Försöksmaterialet är omfattande liksom de olika mätningarna. Studien kommer därför att pågå under ca 2 år.

3.5.2 Mekanismstudier

Genom mätning av den samtidiga längdändringen och isbildningen skall skademekanismen vid frysning av stenmaterial av principiellt olika typ studeras. Den kritiska storleken skall bestämmas för olika stenmaterial vid olika försöksbetingelser vad avser fryshastighet, frystemperatur och koncentration av ämnen i porvattnet. Samspelet mellan stenens strukturella uppbyggnad och dess beteende under frostbelastning skall klarläggas.

Dessa försök kommer att starta under augusti 1992 då utrustningen kommer att vara klar. Försöken är omfattande och kommer att pågå under ca 2 år jämsides med de undersökningar som beskrivs under punkt 3.5.1.

3.5.3 Studier av kemiskt förändrat eller ytbehandlat material

I ett något senare skede kommer effekten av ytförändringar på den potentiella livslängden att studeras. Detta kräver samarbete med andra forskare som studerar kemiska förändringar hos stenmaterialens yta förorsakade av luftföroreningar som deponerats torrt på stenytan eller som lösts i regnvatten som sugits in i stenen. Detaljplanering av projektet kommer att göras senare. I huvudsak kommer samma typ av mätningar, vilka beskrivits ovan, att göras; dvs studier av nedbrytningsmekanismer, av värden på S_{KR} och S_{KAP} samt strukturstudier.

SAMMANFATTNING - *SUMMARY*

Ett forskningsprojekt i vilket frostnedbrytning av natursten skall studeras startades vid avdelningen för några månader sedan. Projektet finansieras av Riksantikvarieämbetet. Föreliggande rapport är en lägesrapport i vilken preliminära resultat av frysprovning och kapillärsugning hos tre typer av gotländsk kalkbunden sandsten redovisas. Den "kritiska vattenmättnadsgradsmetoden" har använts. Resultaten visar att alla tre sandstenarna är tämligen frostkänsliga. Alla stensorterna har nämligen låg kritisk vattenmättnadsgrad (Tabell 3) och vattenuppsugningen är såväl hög som snabb (Tabell 4). Man kan misstänka att frostskador lätt uppstår om frysning inträffar omedelbart efter det att stenen utsatts för långvarig vattenabsorption; tex några timmars slagregn.

I rapporten görs också en kort genomgång av olika frostskademekanismer (Kapitel 1) och av planerna för den fortsatta forskningen (Kapitel 3).

A research project in which frost destruction of natural stone is studied started some months ago. The present report is a status report in which the preliminary freeze/thaw tests and capillary absorption tests are presented. The stones tested are three types of Gothland sandstones. Their physical properties are shown in Table 2. The so called "Critical Degree of Saturation Method" was used, /9/. The results indicate that all three sandstones are rather susceptible to frost damage. All stone types have rather low values of the critical degree of saturation (Table 3) and the water absorption is high and very rapid (Table 4). One can expect that frost damage will occur in all sandstones in a case where freezing takes place only a short time after a long time of water absorption is ended.

In the report is also made a short presentation of different types of frost destruction mechanisms. Plans for the coming research are presented.

LITTERATUR

/1/ G. Fagerlund: Frost resistance of porous and brittle materials in relation to their structure- theory and experiments. Avd Byggnadsmaterial, LTH. Rapport under utarbetande, 1992.

/2/ G. Fagerlund: Non-freezable water contents of porous building materials. Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Report 42, 1974.

/3/ G. Fagerlund: The critical size in connection with freezing of porous materials. Cementa Technical Report CMT 86039, Danderyd, 1986.

/4/ T.C. Powers & R.A. Helmuth: Theory of volume change in hardened portland cement paste during freezing. Proceedings Highway Research Board, 32, 1953.

/5/ J.R. Dunn & P.P. Hudec: The influence of clay on water and ice in rock pores. Physical Research Report RR65-5, New York State Deparment of Public Works, 1965.

/6/ P.P. Hudec: Weathering of rocks in arctic and sub-arctic environment. Geology Department University of Windsor, Canada. Unpublished Manuscript, 1973.

/7/ G.J. Verbeck & P. Klieger: Studies of the salt scaling of concrete. Highway Research Board Bulletin, 150, 1957.

/8/ G. Fagerlund: Prediction of the service life of concrete exposed to frost action. In "Studies on Concrete Technology", Dedicated to Professor Sven G. Bergström on his 60th Anniversary, Swedish Cement and Concrete Researh Institute, Stockholm, 1979.

/9/ G. Fagerlund: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Materials and Structures, Vol 10, No 58, 1977.

/10/W. N. Thomas: Experiments on the freezing of certain building materials. Department of Scientific and Industrial Research, Building Research Technical Paper No 17, His Majesty´s Stationery Office, London, 1938.

/11/G. Fagerlund: Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material. Institutionen för Byggnadsteknik, LTH, Rapport 34, 1972.

/12/G. Fagerlund: Extrapolation in time of the water absorption process in coarse-porous pore systems. Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Rapport under utarbetande, 1992.

/13/G. Fagerlund: Significance of critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials. In "Durability of Concrete", American Concrete Institute, Special Publication SP-47-2, Detroit, 1973.

/14/G. Fagerlund: Testing of frost resistance. General Report at "The International Colloquium on Frost Resistance of Concrete", Wien 26-27 juni, 1980.

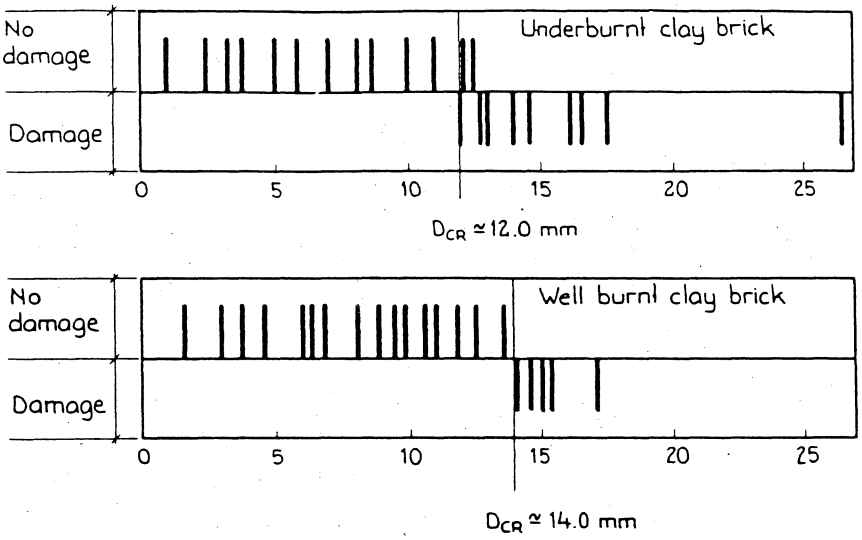

Fig 1: Kritisk skikttjocklek hos två typer tegel /13/.
The critical thickness of two types of clay brick.

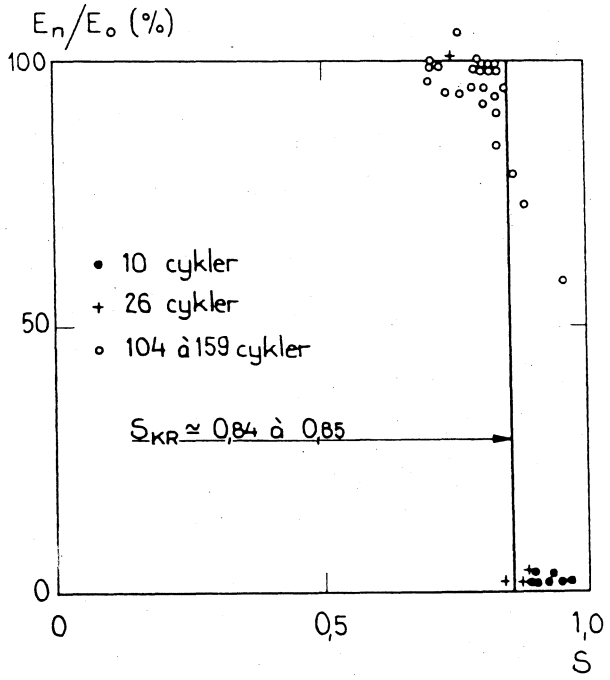

Fig 2: Bestämning av den kritiska vattenmättnadsgraden för en lösbränd tegelsort /11/. (Samma tegel som sorten "Underburnt clay brick" i Fig 1 och samma som teglet i Fig 3).
Determination of the critical degree of saturation of one type of underburnt clay brick (The same brick as in Fig 1 and 3).

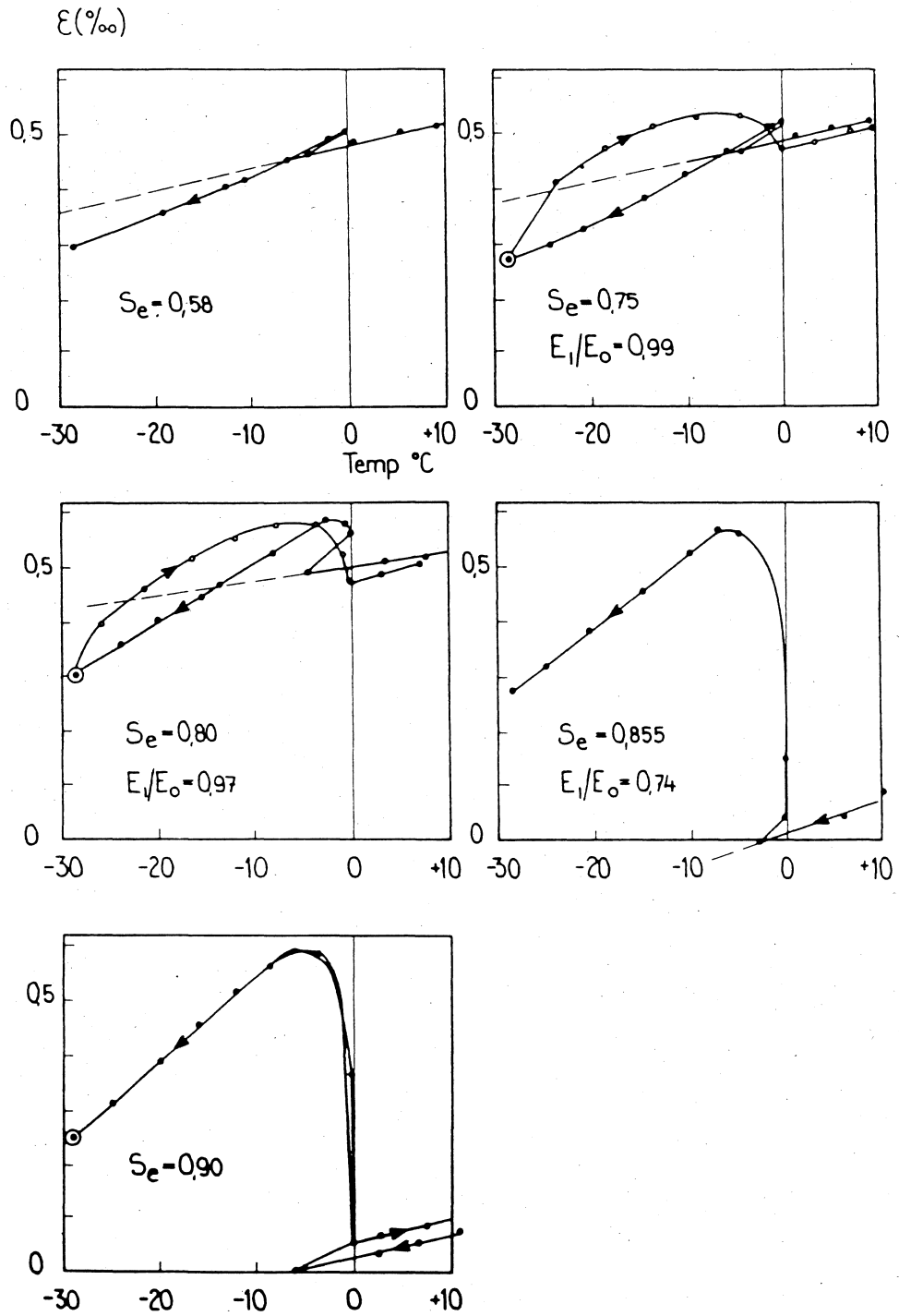

Fig 3: Mätning av längdändringen under frysning och upptining av en tegelsort vid olika vattenmättnadsgrad hos stenen, /11/.
Measurements of the length change of a clay brick frozen and thawed at different degrees of saturation.

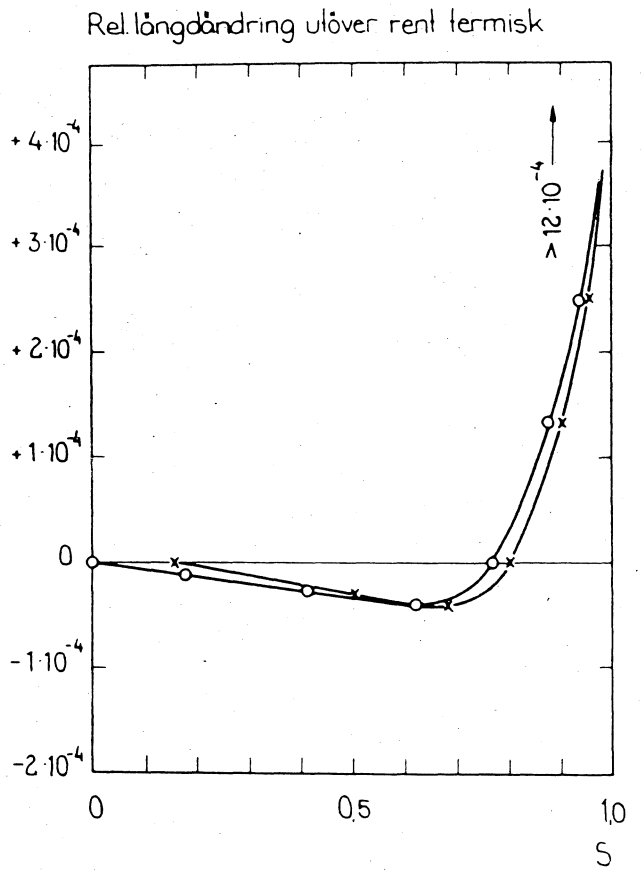

Fig 4: Frysning av en sorts kalksandsten. Inverkan av vattenmättnadsgraden på längdändringen utöver den rent termiska hos det frusna materialet. Minusvärden innebär att materialet har kontraherat under frysningen, positiva värden innebär att det har expanderat; /10/.
Freezing of a certain lime-sandstone. Effect of the degree of saturation on the maximum deviation at freezing temperatures from the normal length-temperature curve.

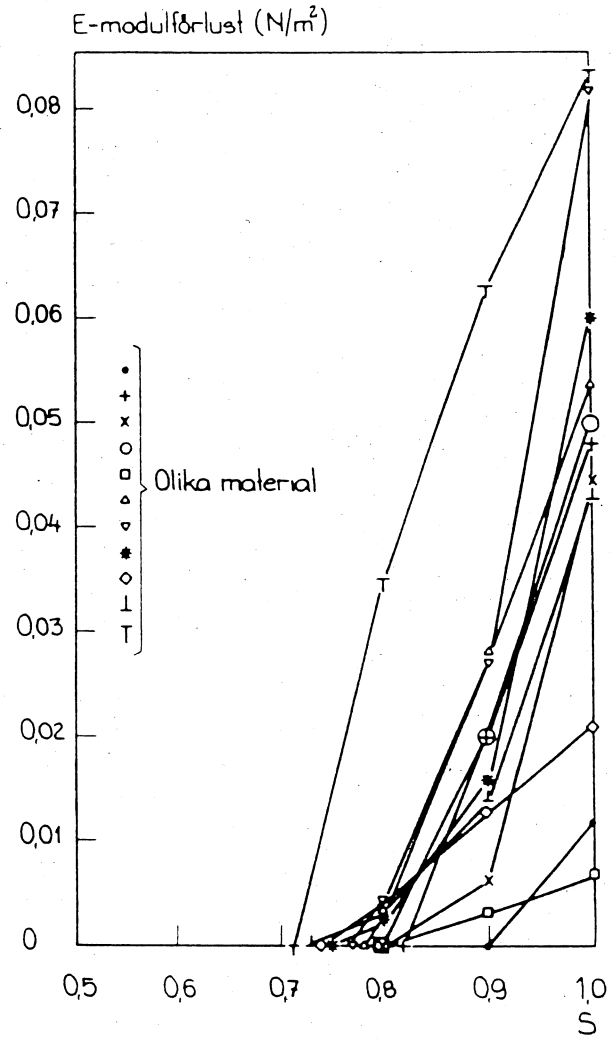

Fig 5: Frysprovning av elva olika stensorter. Förlust i statisk E-modul förorsakad av frysningen som funktion av stenens vattenmättnadsgrad; /10/.
Freeze-testing of eleven types of stone. Loss in static E-modulus as function of the degree of saturation.

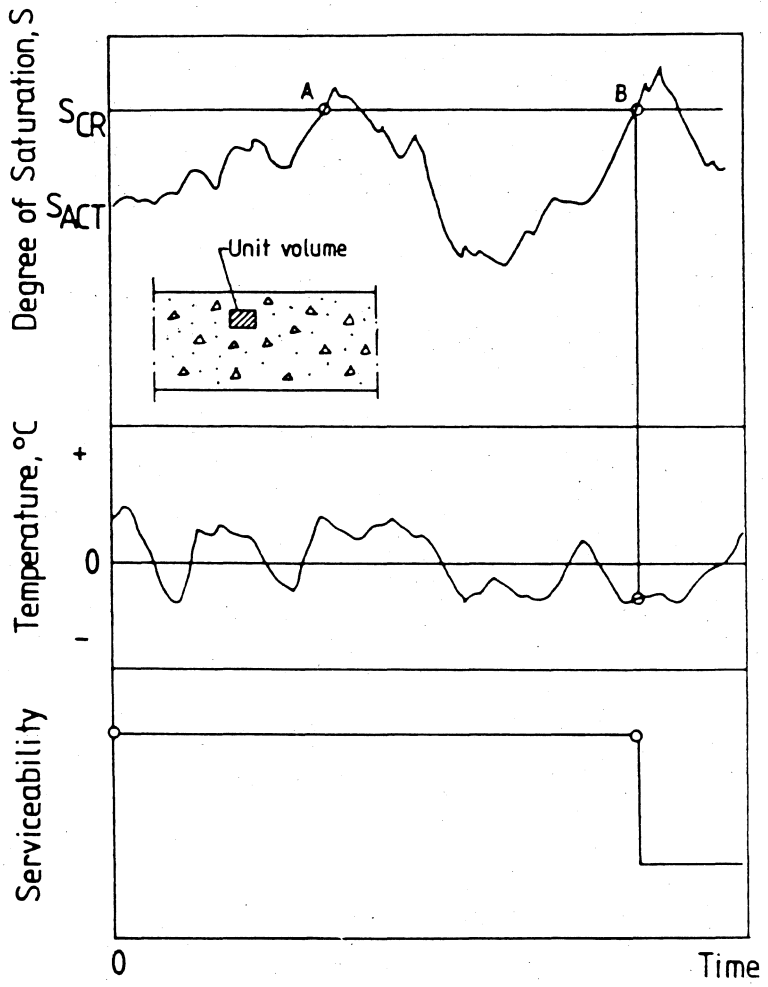

Fig 6: Frostbeständigheten hos ett representativt volymselement inne i stenen.
The frost resistance of a representative unit volume inside the stone.

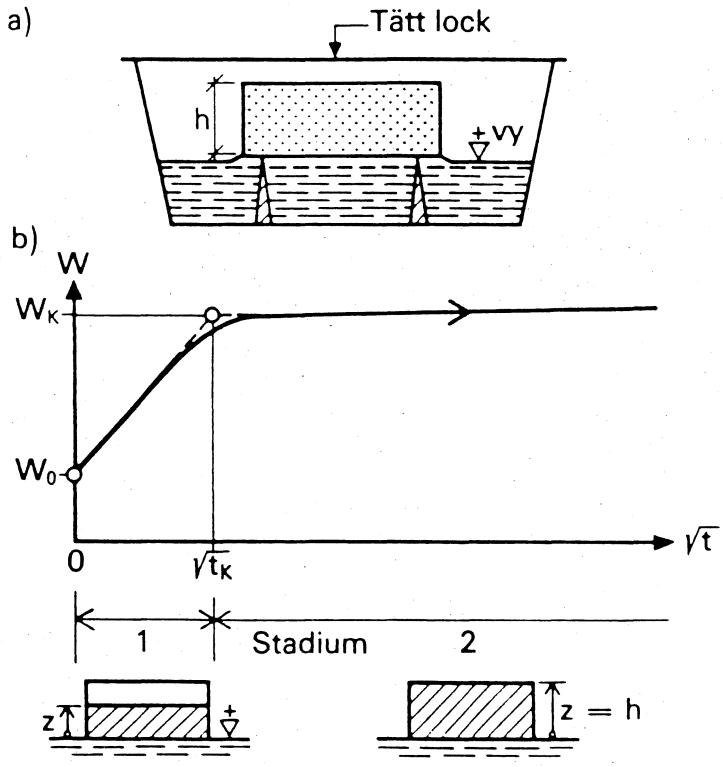

Fig 7: Kapillärsugningsprovning för bestämning av den kapillära vattenmättnadsgraden, S_{KAP}.
The capillarity test for the determination of the capillary degree of saturation.

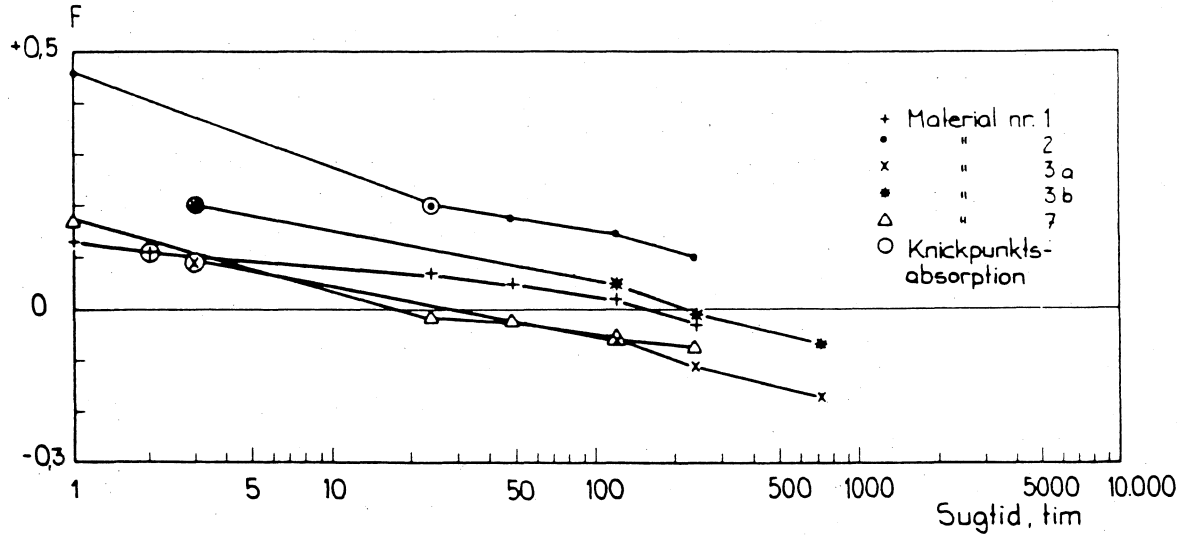

Fig 8: Frostbeständigheten F(t) hos fem olika fasadstenar av tegel och kalksandsten; /11/. Frostbeständigheten definieras $F(t)=S_{KR}-S_{KAP}$; se ekv(15).
The frost resistance of five types of clay brick and sand-lime stone. The frost resistance is defined by eq(15).

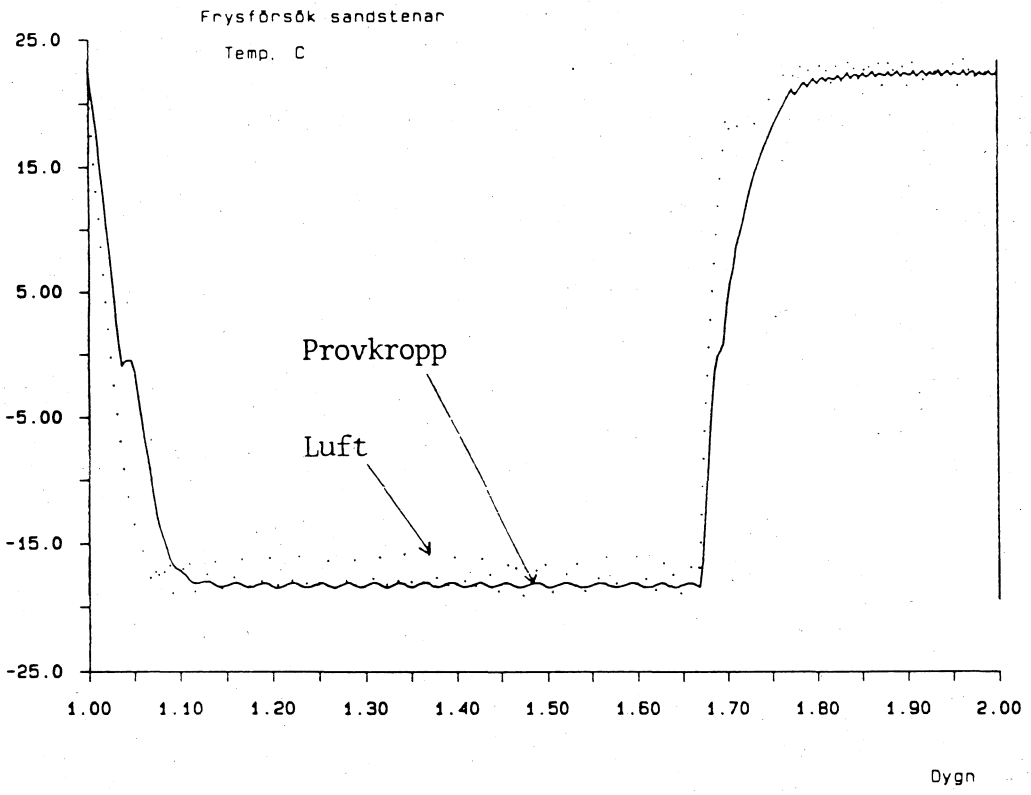

Fig 9: Frysnings-upptiningscykel.
The freeze/thaw cycle used in the test.

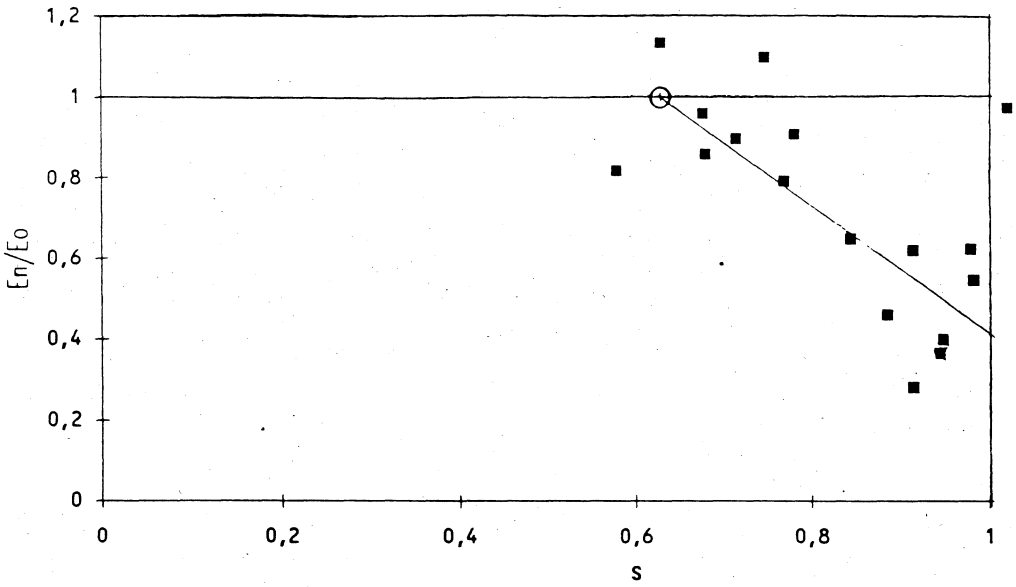

Fig 10: Sten av typ Uddvide. Resultat av frysprovning.
Stone of type Uddvide. Result of the freeze test.

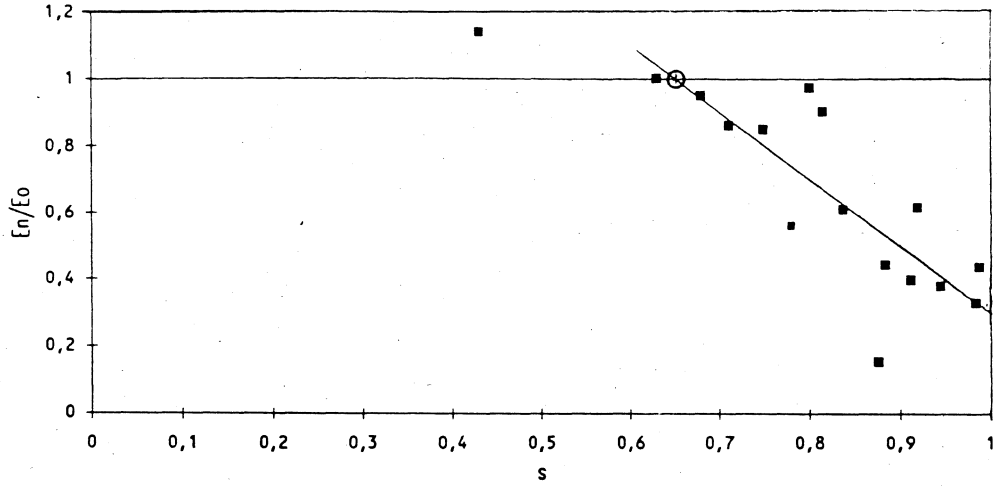

Fig 11: Sten av typ Botvide. Resultat av frysprovning.
Stone of type Botvide. Result of the freeze test.

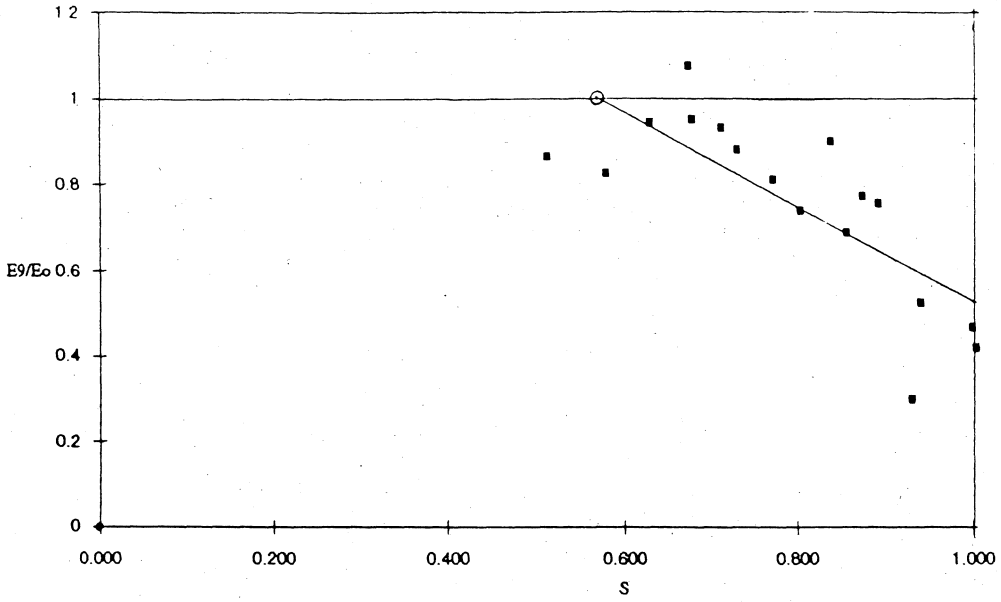

Fig 12: Sten av typ Valar. Resultat av frysprovning.
Stone of type Valar. Result of the freeze test.

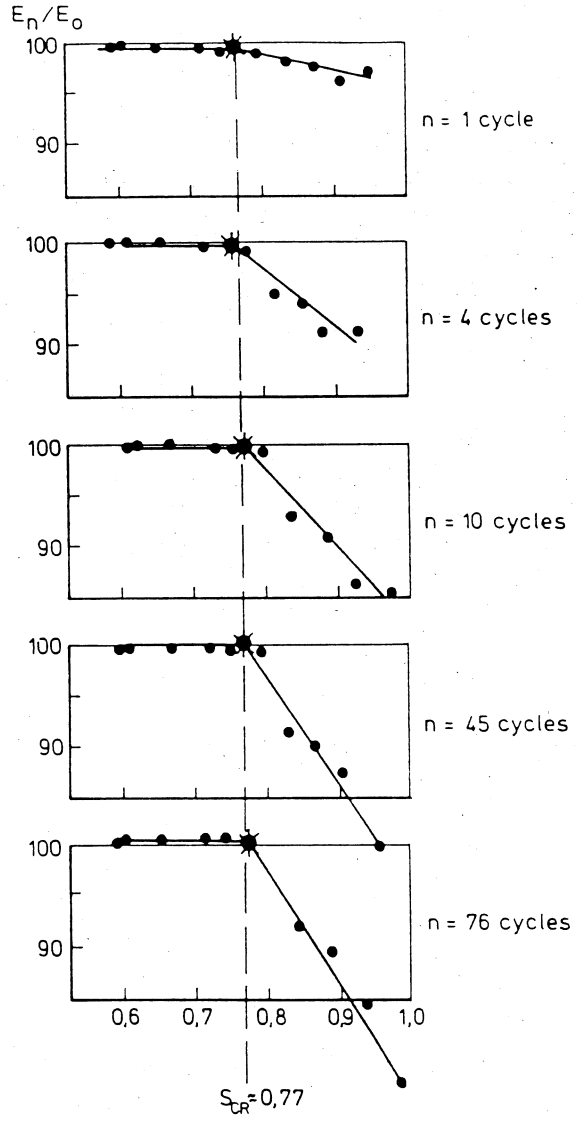

Fig 13: Exempel på inverkan av antalet fryscykler på S_{KR}-värdet och på skadeomfattningen hos prover av cementbruk; /14/
Example of the effect of the number of froeeze/thaw cycles on the S_{CR}-value of a cement mortar.

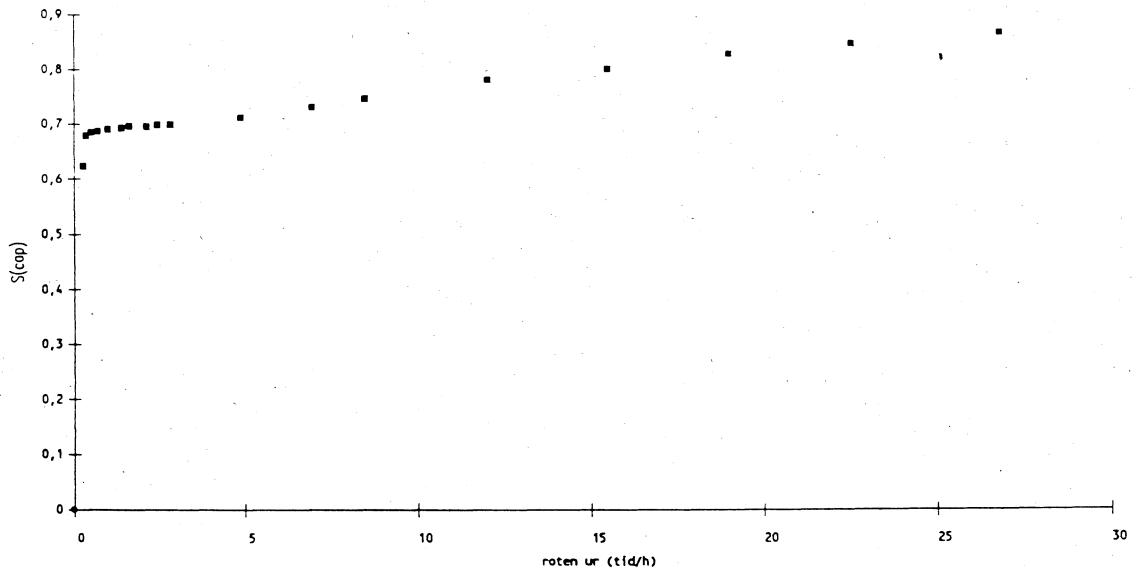

Fig 14: Sten av typ Uddvide. Resultat av kapillärsugningsmätningar.
Stone of type Uddvide. Result of the capillarity test.

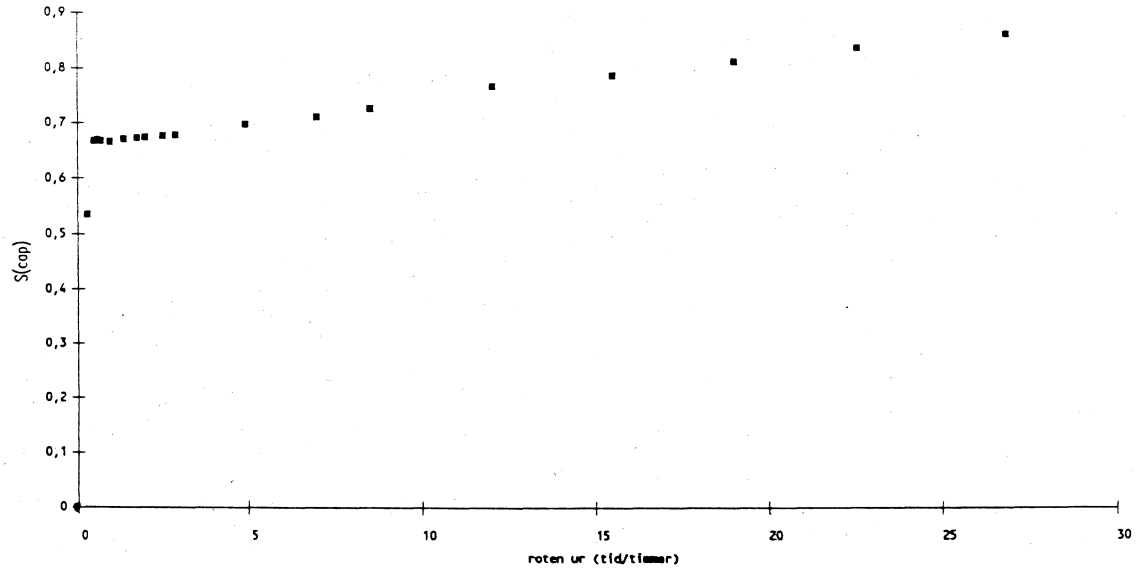

Fig 15: Sten av typ Botvide. Resultat av kapillärsugningsmätningar.
Stone of type Botvide. Result of the capillarity test.

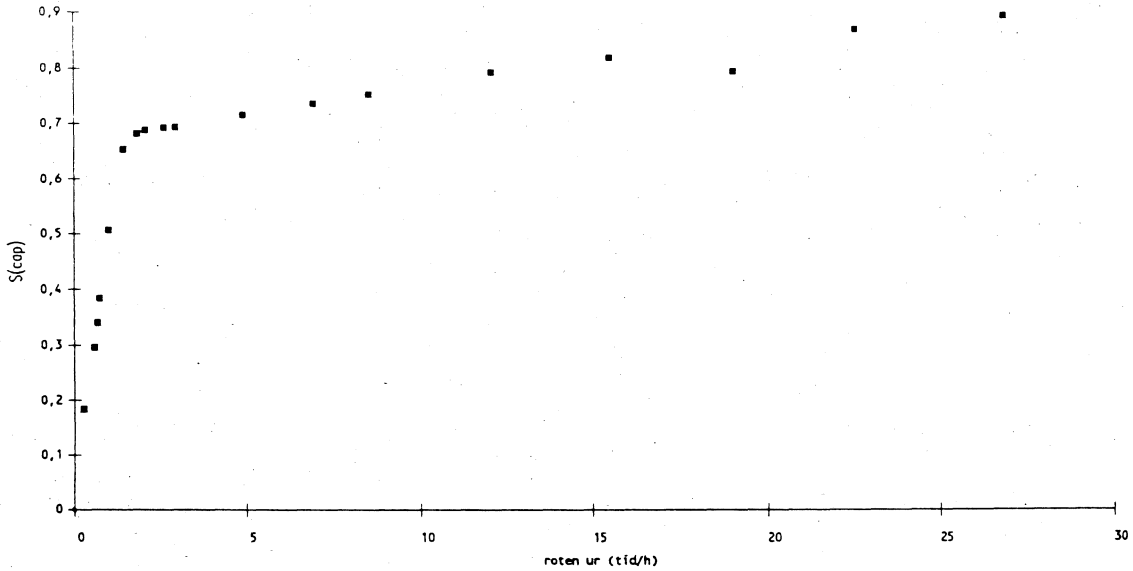

Fig 16: Sten av typ Valar. Resultat av kapillärsugningsmätningar.
Stone of type Valar. Result of the capillarity test.

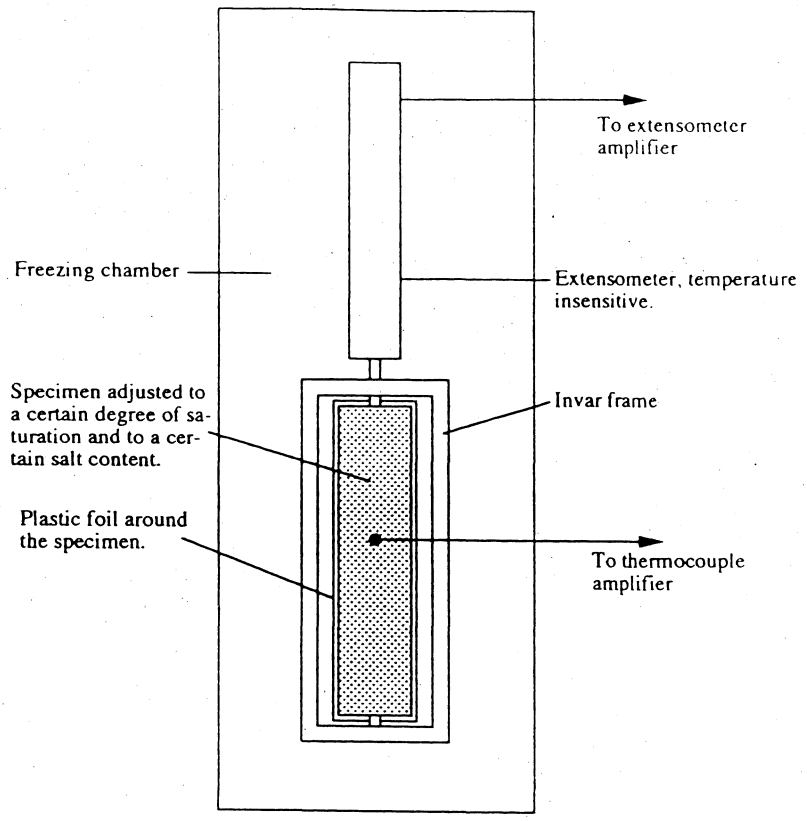

Fig 17: Dilatometer. Principiell uppbyggnad.
Dilatometer.

(a) (b)

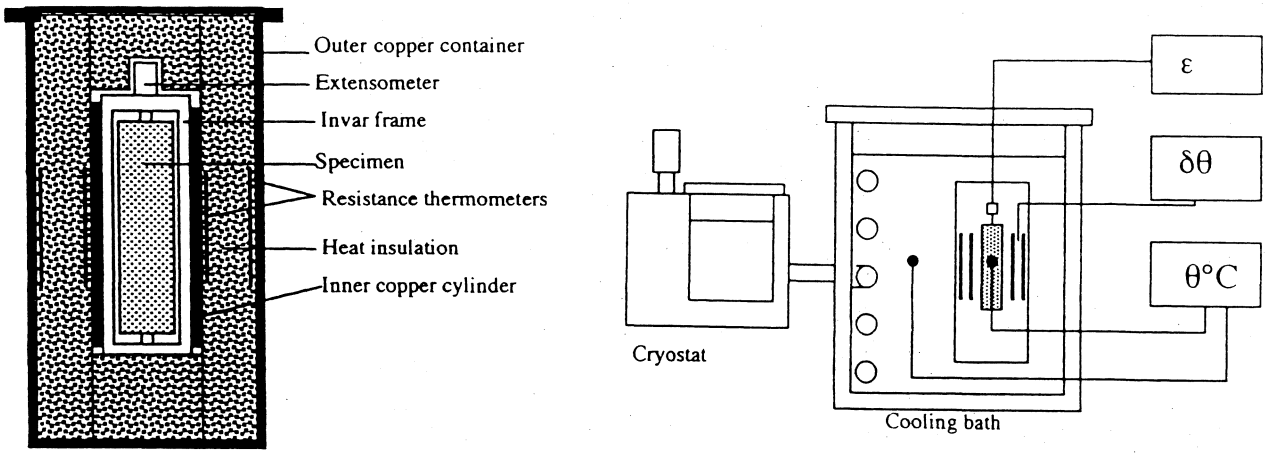

Fig 18: Kombinerad kalorimeter-dilatometer.
(a) Kalorimeter-dilatometerkärlet.
(b) Mätuppställningen.
Combined calorimeter-dilatometer.
(a) The calorimeter-dilatometer vessel.
(b) The measurement arrangement.

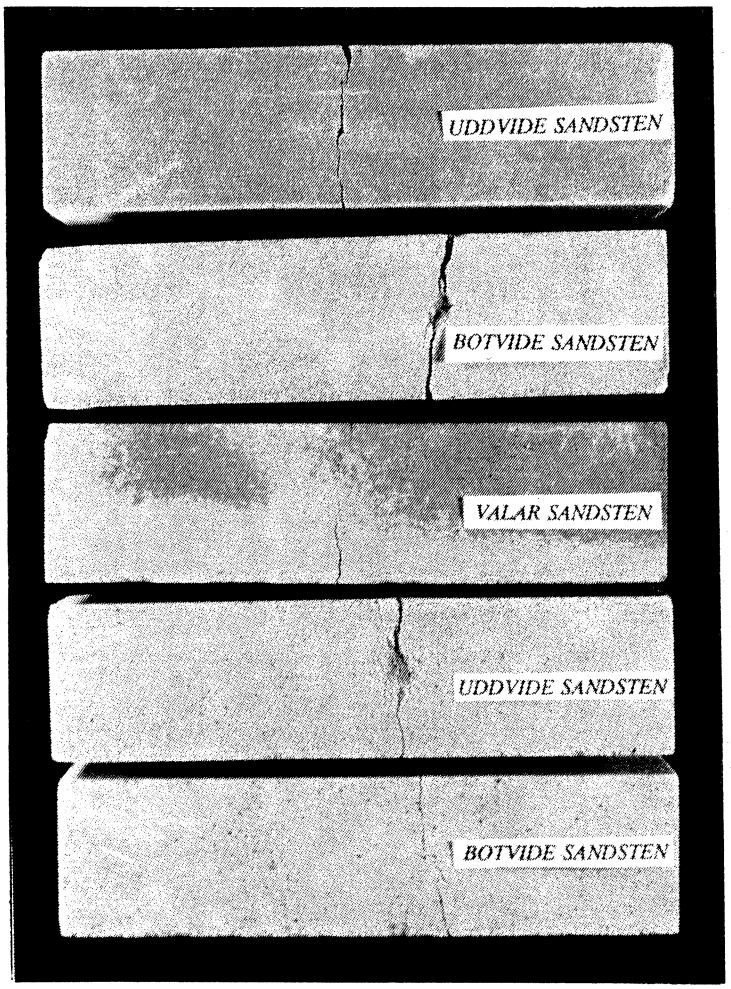

Foto 1: Exempel på tvärgående sprickbildning förorsakad av frysning.
Example of traverse cracks caused by freezing.

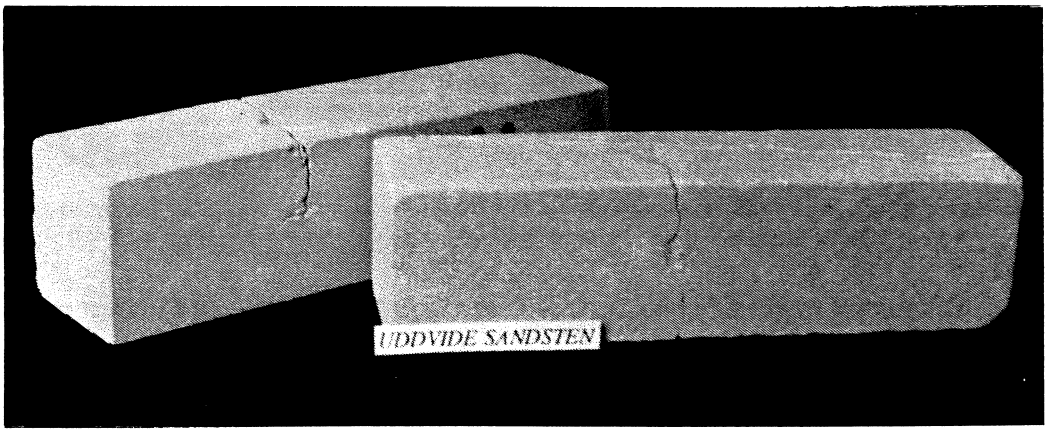

Foto 2: Exempel på tvär- och längsgående sprickbildning förorsakad av frysning.
Example of transverse and longitudinal cracks caused by freezing.