LUND UNIVERSITY

Frostnedbrytning av natursten : lägesrapport till Riksantikvarieämbetet mars 1994

Wessman, Lubica

1994

Link to publication

Citation for published version (APA):
Wessman, L. (1994). *Frostnedbrytning av natursten : lägesrapport till Riksantikvarieämbetet mars 1994*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7073). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:
1

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

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

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

LUND UNIVERSITY

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

Download date: 19. Dec. 2025

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Byggnadsmaterial

UNIVERSITY OF LUND
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Division of Building Materials

FROSTNEDBRYTNING AV NATURSTEN

LÄGESRAPPORT TILL RIKSANTIKVARIEÄMBETET MARS 1994

Lubica Wessman

Rapport TVBM - 7073

Lund, 1994

Innehåll sida

1. Inledning 1

2. Material 1

3. Frostbeständighet uttryckt som kritisk vattenmättnadsgrad hos gotländsk sandsten 2
3.1 Flercykelfrysningar 3
3.2 Encykelfrysningar 3
3.3 Jämförelse av resultat från flercykelfrysningar och encykelfrysningar
3.4 Frostbeständighet - jämförelse mellan kritisk och kapillär vattenmättnadsgrad 4

4. Icke fuktisolerade flercykelförsök av gotländska sandstenar
i lösningar med olika NaCl-koncentration 6

5. Kapillärsugningsförsök på bohusgranit 7

6. Fuktisolerade flercykelförsök av öländsk kalksten och bohusgranit 7

7. Kalorimeterstudier av öländsk kalksten och bohusgranit 7

8. Icke fuktisolerade flercykelförsök av öländsk kalksten och
bohusgranit i NaCl - och Na_2SO_4 - lösningar 7

Litteratur 9

Figurer 10

Bilaga 1

1. Inledning

Att frost skadar porösa, spröda byggnadsmaterial har varit känt länge, liksom det faktum att salter och andra i vatten lösta ämnen förvärrar skadorna. Mycket forskning har gjorts på frostnedbrytning av tegel och betong. Eftersom natursten har vissa likheter med dessa material är det troligt att skademekanismerna delvis är desamma.

Projektet *frostnedbrytning av natursten* finansieras av Riksantikvarieämbetet. Det har till syfte

1. Att kvantifiera frostbeständigheten hos ett antal naturstenar. Detta görs genom den s.k. *kritiska vattenmättnadsgradsmetoden* [1]. I denna metod jämförs ett materials kritiska vattenmättnadsgrad S_{kr}, dvs den vattenmängd ett material högst kan innehålla vid frysning utan att gå sönder, med dess kapillära vattenmättnadsgrad S_{kap}, dvs den vattenmängd materialet högst kan tänkas innehålla i praktiken. Ju större differensen S_{kr} - S_{kap} är desto mindre är risken att materialet skall frysa sönder.

2. Att finna ett samband mellan olika stenars struktur och deras beständighet mot frost samt att studera mekanismerna bakom frostnedbrytningen. Detta är önskvärt för att man med hjälp av enkla laborativa metoder eller kunskaper om en stens struktur skall kunna vidta lämpliga åtgärder vid konservering av gammal sten eller välja en lämplig ersättningssten vid restaurering.

3. Att studera hur salter påverkar frostnedbrytningen. Detta är viktigt eftersom salter och andra i vatten lösta ämnen i kombination med frost tidigare visat sig ha en förvärrande effekt på skador hos porösa, spröda byggnadsmaterial [2]. Man finner ofta utfällningar av olika salter på fasader och andra utomhusexponerade ytor [3,4]. Dessa kan härstamma antingen från stenen själv, från salter lösta i grundvattnet eller från luftföroreningar.

I denna rapport redovisas resultat som kommit fram sedan senaste rapporten i mars 1993.

2. Material

Fem olika stensorter har studerats - tre olika gotländska sandstenar (Botvide - Burgsvik, Uddvide - Gröttlingbo och Valar), en öländsk kalksten (röd Öland B1 från Horns udde) och en bohusgranit (Röd Bratteby från Hunnebostrand).

Sandsten från Gottland är kalcitbunden. Den är lätt att bearbeta och förekommer därför främst som utsmyckningsdetaljer på fasader, men även som fasadmaterial i byggnader från främst 1600-talet. Problemen med vittring av denna sten är mycket stora.

Kalksten förekommer som fasadmaterial från 1600-talet fram till i dag. Problem med vittring av kalksten förekommer, dock inte i lika stor omfattning som hos den gotländska kalkstenen.

Granit är svårbearbetat och började därför användas i bearbetat skick som fasadmaterial först i mitten av 1800-talet, med störst förekomst i byggnader från sekelskiftet. Det är sällan man finner några vittringsskador på sådan granit. Problem med vittring förekommer däremot på granithällar med hällristningar.

De studerade stenarna täcker ett stort porositetsintervall. Sandstenarna är mycket porösa. Porositeten är hos dessa ca 20 %. Bohusgraniten är mycket tät med en porositet på endast ca

0,6 %, medan kalkstenen intar ett mellanläge med en porositet på ca 3,6 %. Porositetsdata med mera för de berörda stenarna presenteras i tabellen nedan.

Tabell 1: Porositet och densitet.

Stensort	Porositet (%)		Skrym-densitet (kg/m^3)		Kompakt-densitet (kg/m^3)
	m[1)]	s[2)]	m	s	
Botvide	21,6	0,2	2079	6	2652
Uddvide	22,1	0,2	2073	11	2661
Valar	17,5	0,5	2199	15	2666
Bohusgranit Röd Bratteby	0,62	0,04	2653	7	2669
Öländsk kalksten Röd Öland B1	3,64	0,07	2629	2	2728

1) Medelvärde 2) Standardavvikelse

3. Frostbeständighet uttryckt som kritisk vattenmättnadsgrad hos gotländska sandstenar

Den kritiska vattenmättnadsgraden hos ett poröst, sprött material är ett mått på hur mycket vatten materialet tål innan det går sönder vid frysning. Den kritiska vattenmättnadsgraden har mätts på de gotländska sandstenarna Botvide, Uddvide och Valar med två olika metoder:

1. Provkroppar innehållande olika mycket vatten utsätts för flera fryscykler. Skadan hos en provkropp mäts som en minskning i dess E-modul eller som en ökning i dess volym, dvs en porositetsökning.

2. Provkroppar innehållande olika mycket vatten utsätts för en enda fryscykel, under vilken provkroppens längd registreras kontinuerligt. Skadan mäts antingen som provkroppens maximala expansion vid frysning eller som den expansion som kvarstår då provkroppen varit frusen och därefter återfått en viss temperatur, t ex 20 °C.

3.1 Flercykelfrysningar

Metod

Ett antal, i detta fall 14 - 15 st, provkroppar innehållande olika mycket vatten utsätts för flera fryscykler. Provkropparnas dimensioner var i detta fall 20 x 20 x 150 mm. Under frysningen är provkropparna förslutna i plastpåsar för att vara isolerade mot fuktutbyte med omgivningen. Proverna utsattes för 15 temperaturcykler av det slag som visas i figur 1. Skadorna mäts som en minskning i provkropparnas egenfrekvens. Kvadraten på egenfrekvensen är i detta fall proportionell mot E-modulen, se bilaga 1.

Resultat

I figurerna 2-7 visas kvoten mellan E-modulen efter och före frysning som funktion av vattenmättnadsgraden för de tre sandstenarna Botvide, Uddvide och Valar. Egenfrekvensen mättes på både torra provkroppar (figurerna 2-4) och på provkroppar konditionerade till önskad vattenmättnadsgrad (figurerna 5-7). Ingen märkbar skillnad kan konstateras om egenfrekvensen mäts på torra eller fuktkonditionerade provkroppar. Eftersom en viss mängd vatten avgick under frysningen motsvaras varje provkropp i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före och en för vattenmättnadsgraden efter frysning. I diagrammen framgår det klart att endast de två provkroppar med högst vattenmättnadsgrad skadats hos stensorterna Botvide och Uddvide. Hos stensorten Valar har endast den provkropp med högst vattenmättnadsgrad skadats. Den kritiska vattenmättnadsgraden ligger alltså för stensorten Botvide i intervallet 0,88 - 0,95, för Uddvide i intervallet 0,89 - 0,96 och för Valar i intervallet 0,94 - 1,00. Samma resultat erhålles då volymökningen avsätts som funktion av vattenmättnadsgraden, vilket visas i figurerna 8-10.

3.2 Encykelfrysningar

Metod

Längdändringen vid frysning mäts på provkroppar innehållande olika mycket vatten. Detta görs med hjälp av den dilatometer som beskrivits i referens [5]. Provkropparna hade samma dimensioner som vid flercykelförsöken, dvs 20 x 20 x 150 mm, och var isolerade mot fuktutbyte med omgivningen på samma sätt, dvs med plastpåsar. Den omgivande luftens temperatur som funktion av tiden visas i figur 11.

Resultat

Figurerna 12-14 visar den maximala töjningen vid frysning som funktion av vattenmättnadsgraden för sex provkroppar för var och en av stensorterna Botvide, Uddvide och Valar. Den vattenmättnadsgrad vid vilken den maximala töjningen plötsligt ökar kraftigt definieras i detta fall som den kritiska. Enligt denna metod ligger den kritiska vattenmättnadsgraden i intervallet 0,85 - 0,91 för Botvide, 0,79 - 0,83 för Uddvide samt 0,93-0,97 för Valar.

På stenen Valar mättes temperaturen inne i varje enskild provkropp vid längdändringsmätningarna (vilket inte gjordes för de två andra stenarna). Det var därför möjligt

att mäta den kvarstående deformationen vid provkroppstemperaturen 20 °C. Denna avsatt mot vattenmättnadsgraden visas i figur 15. Den kritiska vattenmättnadsgraden är densamma som vid mätning av maximal expansion vid frysning, dvs 0,93-0,97.

Figurerna 16 och 17 visar expansionen hos en och samma provkropp av stensorten Valar vid samma tillfälle som funktion av luft- respektive provkroppstemperaturen. Provkroppens maximala expansion avläses enklast i figur 16 (märkt med *) medan den kvarstående deformationen vid en viss provkroppstemperatur avläses i figur 17 (märkt med **). I figur 17 kan det observeras att den största expansionen och därmed skadan verkar uppkomma då provkroppen tinar.

3.3 Jämförelse av resultat från flercykelfrysningar och encykelfrysningar

Resultaten från de två olika metoderna att mäta kritisk vattenmättnadsgrad beskrivna ovan stämmer relativt väl överens för stensorterna Botvide och Valar men skiljer sig för stensorten Uddvide. Vad detta kan bero på är oklart. Försöken måste upprepas för att resultatspridningen och reproducerbarheten skall framgå. Det är t ex möjligt att man lyckats vattenmätta stenarna olika väl vid olika tillfällen. Fagerlund [1] fann emellertid att de kritiska vattenmättnadsgraderna generellt var lägre vid encykelfrysningar med dilatometer än vid flercykelfrysningar. Detta kunde enligt samma källa bero på att fryshastigheten var något högre vid encykelfrysningarna, vilket dock inte gäller i detta fall. Fryshastigheten i flercykelförsöken är 5,6 °C/h medan den i encykelförsöken är 4,2 °C/h.

3.4 Frostbeständighet - jämförelse mellan kritisk och kapillär vattenmättnadsgrad

Experimentella resultat och teori rörande kapillärsugningen hos gotländsk sandsten redovisas i detalj i referens [6]. En kort sammanfattning ges här.

Metod

För att mäta kapillärsugningen hos ett poröst material placeras torra provkroppar, i detta fall med dimensionerna 30 x 30 x 120 mm, med ena långsidan neddoppad någon millimeter i vatten. De vägs därefter med allt glesare tidsintervall. I detta fall användes 7 provkroppar för varje stensort.

Resultat och diskussion

Resultatet från kapillärsugningsförsöken för de tre gotländska sandstenarna Botvide, Uddvide och Valar redovisas i figurerna 18-20 som den kapillära vattenmättnadsgraden S_{kap} avsatt mot kvadratroten ur tiden. Efter att knickpunktssugningen (märkt med * i figurerna 18 - 20) uppnåtts kan absorptionsförloppet beskrivas med

$$S_{kap} = A + B * \log(t) \qquad (1)$$

Koefficienterna A och B med tiden t i timmar visas i tabell 2.

Tabell 2: Långtidsabsorbtionen; koefficienter i ekv. (1)

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

Med hjälp av ekvation (1) kan man få fram den tid *t* under vilken ett material behöver suga vatten innan den kritiska vattenmättnadsgraden uppnås. Denna tid redovisas i tabell 3 nedan för det minsta värdet på kritiska vattenmättnadsgraden S_{kr}(min) för var och en av de gotländska sandstenarna Botvide, Uddvide och Valar. Den på så sätt framräknade tiden är emellertid beroende av vilken provkroppsdimension som använts vid kapillärsugningsförsöket. Resultatet är därmed endast användbart för jämförelse mellan olika materials frostbeständighet (under förutsättning att försöken utförts identiskt för de olika materialen) och ger föga uppfattning om hur frostbeständigt materialet är i realiteten. Den kritiska vattenmättnadsgraden kan uppnås i ett tunt skikt närmast ytan i t ex en fasad redan efter en relativt kort tid i kontakt med fritt vatten, t ex efter ett regn. Om det därefter blir frostgrader innan ytskiktet hunnit torka till under den kritiska vattenmättnadsgraden går detta skikt sönder. Om den kritiska vattenmättnadsgraden inte överskrids då materialet är 100%igt kapillärmättat, är materialet beständigt mot frost.

Ett annat relativt mått på frostbeständigheten är frostbeständigheten vid knickpunktssugnignen, F_k.

$$F_k = S_{kr} - (S_{kap})_k \qquad (2)$$

$(S_{kap})_k$ är den kapillära vattenmättnadsgraden vid knickpunktssugningen. Värden på $(S_{kap})_k$ och F_k redovisas i tabell 3 för $S_{kr} = S_{kr}$(min).

Tabell 3

Stensort	S_{kr}(min)	tid *t* (dagar)	$(S_{kap})_k$	F_k
Botvide	0,85	90	0,67	0,18
Uddvide	0,79	13	0,68	0,11
Valar	0,93	240	0,68	0,25

Ur tabell 3 framgår att tiden *t* och frostbeständigheten F_k enligt denna metod är störst för stensorten Valar och minst för stensorten Uddvide.

4. Icke fuktisolerade flercykelförsök av gotländska sandstenar i lösningar med olika NaCl-koncentration

Metod

Provkroppar med dimesionerna 30 x 30 x 120 mm av de tre gotländska sandstenarna Botvide; Uddvide och Valar torkades under 4 dygn i 50 °C. Därefter vägdes provkropparna och egenfrekvensen mättes. Kvadraten på egenfrekvensen är proportionell mot E - modulen, se bilaga 1. De torra provkropparna placerades på högkant i enliters plastbägare med de ungefärliga måtten 8 x 8 x 14 cm. Bägarna innehöll lösningar med 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, samt 3,5 vikts% NaCl. En provkropp användes för varje saltkoncentration. För att lösningen skulle sugas in kapillärt fick proverna stå i lösningen i 10 dygn, varefter de åter vägdes och egenfrekvensen mättes. Därefter placerades bägarna innehållande provkroppar och saltlösning i en frys och utsattes för 20 fryscykler med det utseende som visas i figur 21. Efter sista fryscykeln vägdes proverna och egenfrekvensen mättes. Avskalat material, inklusive material som satt kvar på provkropparna men kunde lossas med fingrarna, samlades upp i filterpapper som först torkats och vägts. Provkropparna och det avskalade materialet fick torka i 50 °C i fyra dygn varefter de åter vägdes och egenfrekvensen mättes.

Resultat

Figur 22 visar mängden avskalat material som funktion av salthalten för de tre sandstenarna. Avflagningen i rent vatten mättes ej i detta fall, men det är från tidigare liknande försök [7] känt att avflagningen i rent vatten är mindre än avflagningen vid [NaCl] = 2,0 vikts%.

De tre provkroppar av stenen Botvide som frysts i de lägsta saltkoncentrationerna gick sönder i två delar vid frysning. Dessa är inringade i diagrammet. Den mindre delen inräknas inte i det avflagnade materialet. På grund av delningen blir ytan som står i kontakt med lösningen större. Hänsyn till detta har tagits då mängd avskalat material per ytenhet har beräknats. Enligt detta resultat är den pessimala NaCl-koncentrationen ca 0,5 % för Valar och 1,0 för Botvide. För stenen Uddvide går det inte att utifrån försöksresultatet uttala sig om den pessimala koncentrationen. Detta försök bekräftar resultat från tidigare försök [7], som visar att stenen Valar är mer känslig för avskalningar i samband med frysning i NaCl - lösningar än vad de två övriga sandstenarna är.

Figurerna 23 och 24 visar den relativa E-modulminskningen som funktion av salthalten för de tre sandstenarna i torrt respektive vått tillstånd. Den relativa E-modulminskningen har beräknats som kvoten mellan kvadraten på egenfrekvensen före och efter frysning för alla provkroppar utom för de tre söndersprückna Botvide, där en justering gjorts för minskad massa och längd. E-modulminskningen, dvs kvoten mellan E-modulen efter och före frysning E_n/E_0, är ett mått på inre skador. Eftersom värdet på denna kvot är betydligt mindre än 1 har inre skador uppkommit i samtliga prover. Något uttalande om de inre skadornas beroende av saltkoncentrationen kan dock inte göras utifrån försöksresultatet.

5. Kapillärsugningsförsök på Bohusgranit

Ett materials förmåga att uppta vatten, som mäts med kapillärsugningsförsök, är essentiell ur frosbeständighetssynpunkt. Denna förmåga ger också en bild av materialets struktur, som är viktiga att känna till om man vill förstå mekanismen bakom olika förstörelseprocesser.

Kapillärsugningsförsök har utförts på bohusgraniten *Röd Bratteby*. Fyra provkroppar med dimensionerna 30 x 30 x 120 mm användes vid försöken. Två prover torkades före förökets början vid temperaturen 50 °C och två vid 105 °C. Proverna vägdes med allt glesare tidsintervall och viktökningen uttryckt som uppsugen mängd vatten per areaenhet sugyta plottades som funktion av roten ur tiden. Resultatet visas i figur 25. Förmågan att suga vatten är större för proverna torkade vid den högre temperaturen, vilket beror på att porerna är bättre tömda.

6. Fuktisolerade flercykelförsök av öländsk kalksten och bohusgranit

Provkroppar med dimensionerna 20 x 20 x 150 mm av öländsk kalksten och bohusgranit mättades med vatten respektive saltlösning innehållande 2 vikt% Na_2SO_4 och utsattes för 15 fryscykler av det slag som visas i figur 1. Under frysningen var provkropparna placerade i plastpåsar för att förhindra fuktutbyte med omgivningen. Ingen skada i form av E-modulförlust kunde emellertid konstateras.

7. Kalorimeterstudier av öländsk kalksten och bohusgranit

Vid studier av öländsk kalksten och bohusgranit i differentiell scanningkalorimeter kan ingen isbildning konstateras [8]. Anledningen till detta är att provbitarna är för små och deras vatteninnehåll därmed för litet för att instrumentets känslighet skall räcka till. På Laboratoriet for byggningsmaterialer, Danmarks Tekniske Højskole finns en kalorimeter som klarar större prover och vars känslighet därför är större. Denna kalorimeter visar att is bildas även i täta stenar, se figurerna 26 och 27. Vid kvantifiering av ismängden är osäkerheten emellertid stor.

8. Icke fuktisolerade flercykelförsök av öländsk kalksten och bohusgranit i NaCl - och Na_2SO_4 - lösningar

Metod

Provkroppar av öländsk kalksten och bohusgranit med dimensionerna 30 x 30 x 120 mm placerades i enliters plastbägare med de ungefärliga måtten 8 x 8 x 14 cm innehållande lösning. Lösningen var antingen rent vatten eller saltlösning innehållande 2 vikt% NaCl eller 2 vikt% Na_2SO_4. Proverna var före placeringen i lösning antingen torra eller vacuummättade med den omgivande lösningen. För att kapillärmättas fick de torra proverna ligga i lösningen i tio dagar innan de utsattes för fryscykler. Proverna var helt nedsänkta i lösningen. Fryscykelns utseende visas i figur 28. Redan efter ett fåtal fryscykler (<5) var de öländska kalkstenar som omgavs av NaCl-lösning så gott som helt förstörda. Frysningen av dessa stenar avbröts därför redan efter 7 cykler. Att mäta avskalningar på dessa prover var inte möjligt, eftersom provkropparna var helt söndersmulade. På övriga provkroppar mättes skadorna efter 35 cykler dels som mängd avskalat material och dels som E-modulförlust. E-modulförlusten är ett mått på inre skador i form av t ex mikrosprickbildning.

Beteckningar i figurerna 29 - 32

Varje provkropp betecknas i figurerna 29 - 32 med en bokstavskombination AB(c). Den första bokstaven i bokstavskombinationen betecknar vilken lösning som omger provkroppen, den andra bokstaven betecknar om provkroppen är vacuummättad eller kapillärmättad med lösningen och den tredje bokstaven är en beteckning på dubbelprov.

A = S ; Sulphate, 2%ig Na_2SO_4-lösning

A = C ; Chloride, 2%ig NaCl-lösning

A = H ; H_2O, vatten

B = V ; Vacuummättat prov

B = C ; Cappilary, kapillärmättat prov

c = a eller b ; Dubbelprover (gäller kalksten)

Resultat

Ingen E-modulförlust kunde konstateras på någon av granitproverna. Små mängder material lossnade emellertid från proverna, vilket presenteras i figur 29. Na_2SO_4 verkar mer skadligt än NaCl, som i sin tur verkar något mindre skadligt än rent vatten. Någon skillnad mellan kapillärmättade och vacuummättade prover kan inte konstateras. På grund av de små mängderna lossnat material är det emellertid svårt att dra några egentliga slutsatser.

Både de vacuummättade och de kapillärmättade kalkstensproverna som omgavs av NaCl-lösning smulades sönder helt redan efter färre än 5 fryscykler. Detta markeras med ∞ i figurerena 30-32. Figurerna 30 och 31 visar relativa E-modulminskningen mätt på torra respektive våta provkroppar hos övriga kalkstenprover. Skillnaden mellan E-modulminskningen mätt på torra respektive våta provkroppar kan delvis förklaras med att alla kalkstensprover, utom de som vacuummättats med vatten och en av dem som kapillärmättats med vatten, gick sönder i två delar. Detta bidrog till att det blev svårt att mäta egenfrekvensen på delarna efter frysning, eftersom de ofta var för "knubbiga" för att kunna bringas i svängning på ett tillfredsställande sätt. Egenfrekvensen mättes endast på den längre delen. Trots detta framgår det att skillnaden mellan kapillärmättade och vacuummättade prover är liten. Det framgår också att NaCl orsakar värre inre skador än Na_2SO_4, som i sin tur orsakar värre inre skador än rent vatten. Detta gäller även skador i form av "avskalhingar" (figur 32). Hos kalksten lossnar material främst från brottytan. Ytavskalningarna är inte lika markanta som hos de gotländska sandstenarna.

Litteratur

[1] Fagerlund G., Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material, rapport 34, Institutionen för byggnadsteknik, LTH, Lund 1972.

[2] Verbeck G.J. & Klieger P, Studies of "salt" Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bulletin 150,1957.

[3] Gullman J. (editor), Konserveringstekniska studier, Air Pollution and the Swedish Heritage. Progress 1988 - 1991, RAÄ, Stockholm.

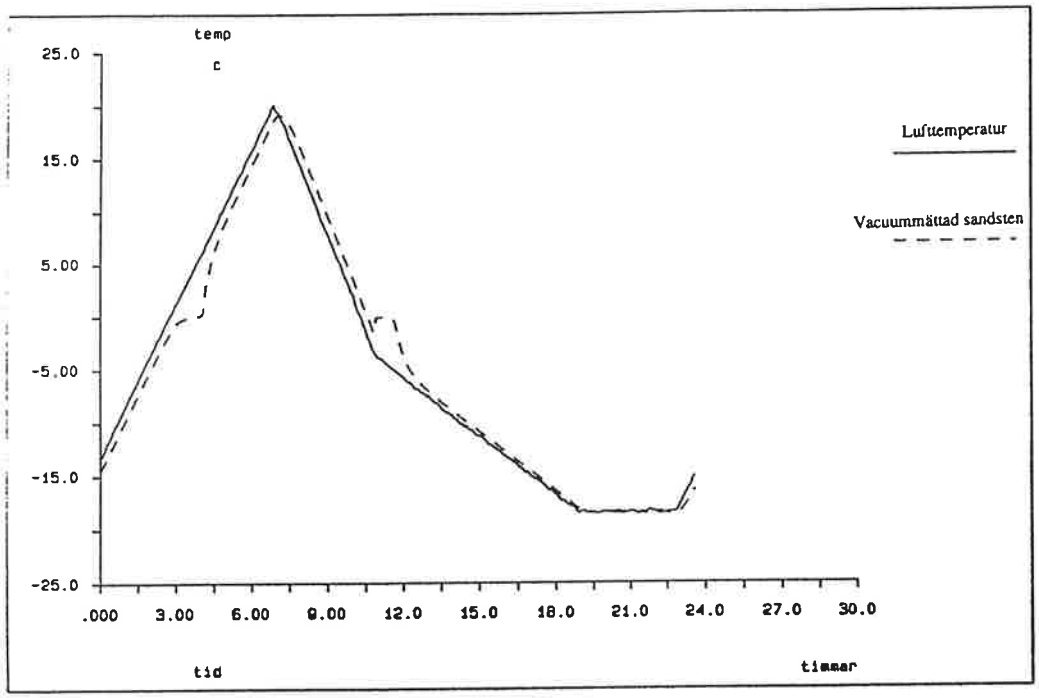
[4] Nord A.G. & Tronner K., Konserveringstekniska studier, Stone Weathering, Air Pollution Effects Evidensed by Chemical Analysis, RAÄ, Stockholm 1991.

[5] Wessman, L., Frostnedbrytning av natursten, Försöksmetodik, Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, december 1992, Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund.

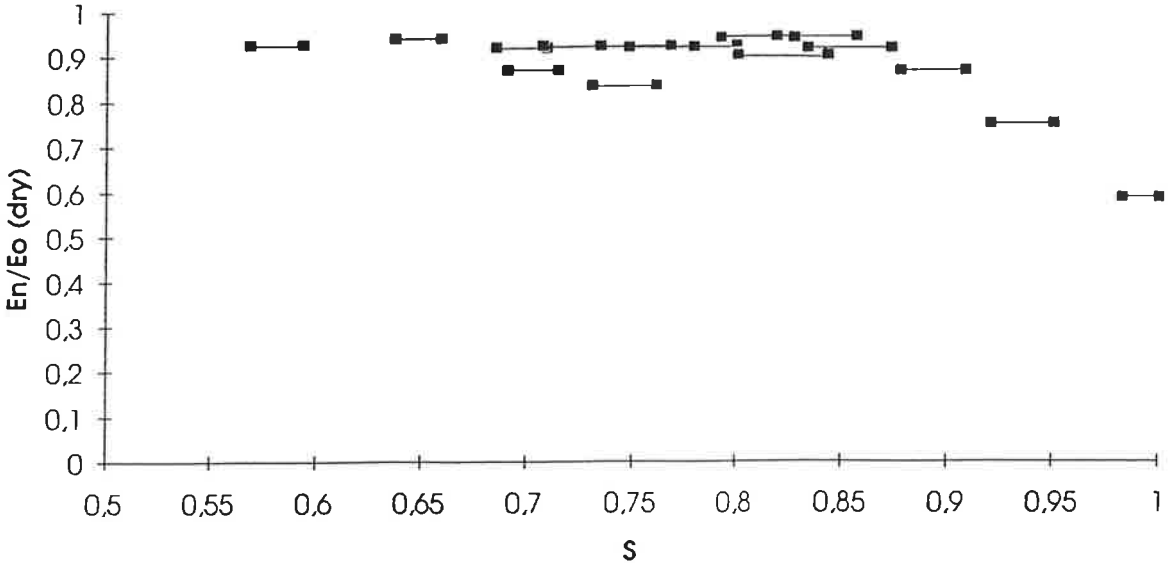
[6] Fagerlund G. & Wessman L., Frostnedbrytning av natursten, Lägesrapport mars 1992, Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund.

[7] Wessman, L., Saltfrostnedbrytning av gotländsk sandsten, Preliminära försök, Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund 1992.

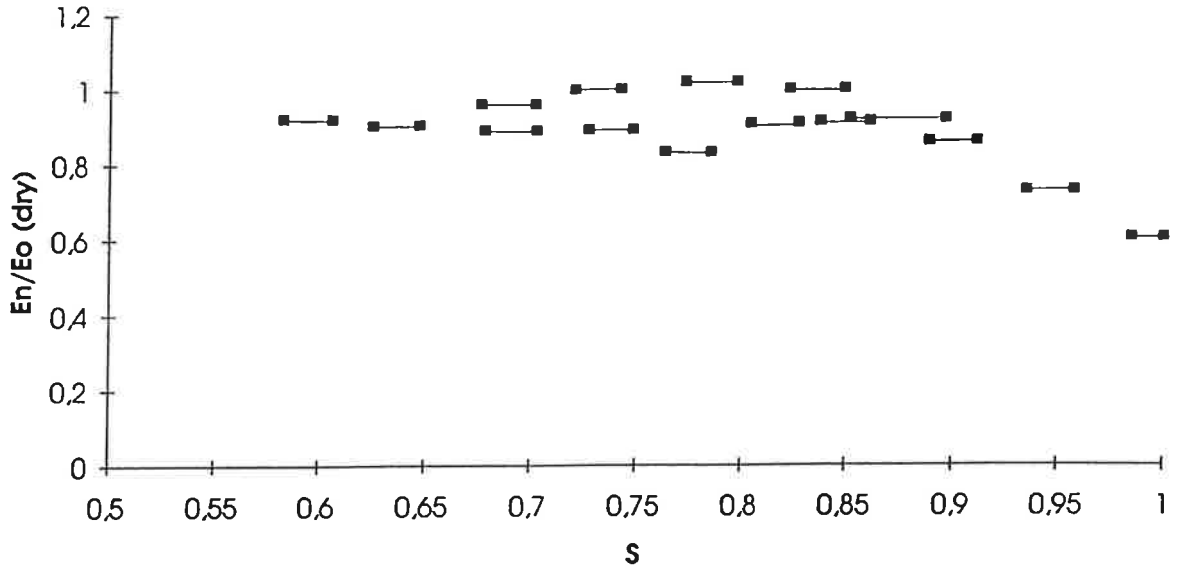
[8] Wessman, L., Frostnedbrytning av natursten, Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, mars 1993, Avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, Lund.



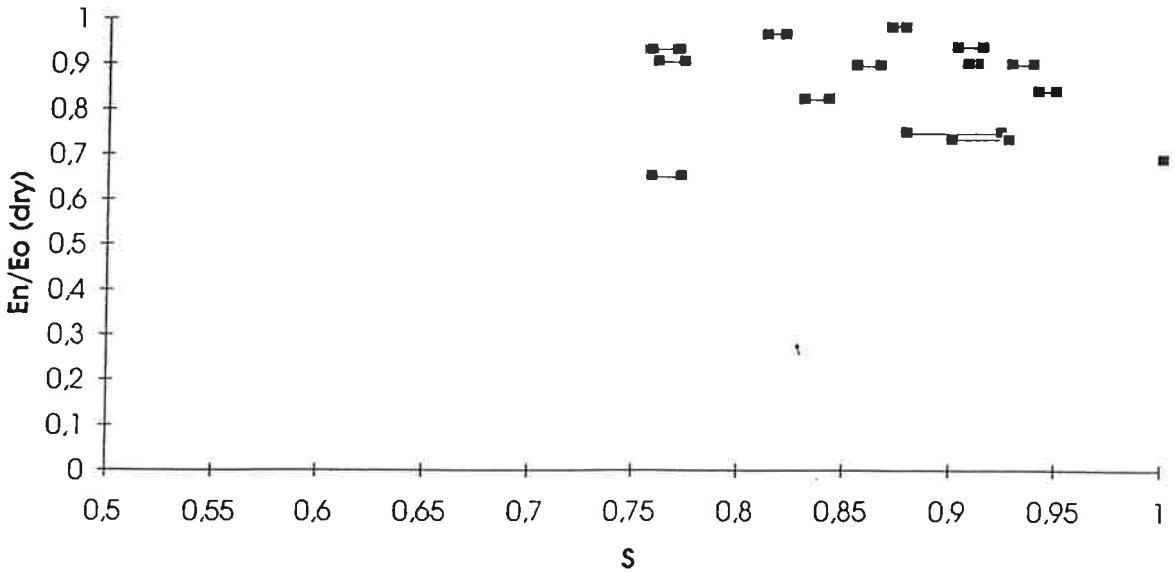
Figur 1. Temperaturcykel vid fuktisolerad frysning av gotländska sandstenar. Proverna utsattes för 15 sådana cykler.



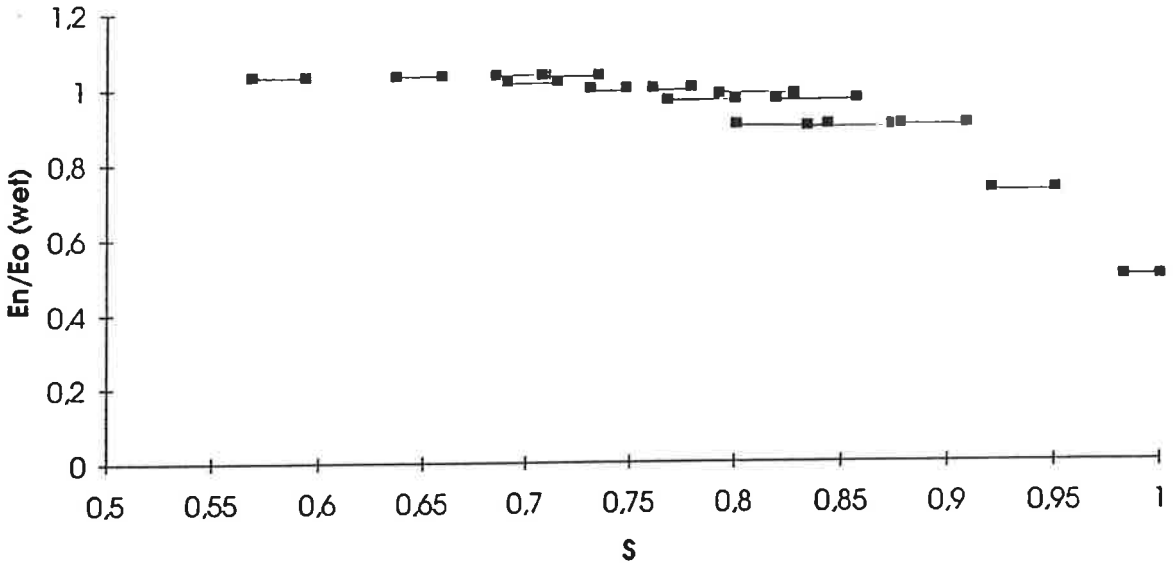
Figur 2. Skada efter 15 fryscykler uttryckt som relativ E-modulförlust som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandsten *Botvide*. E_n = E-modul efter 15 cykler. E_0 = E-modul före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning. Egenfrekvensen är mätt på *torra* provkroppar.



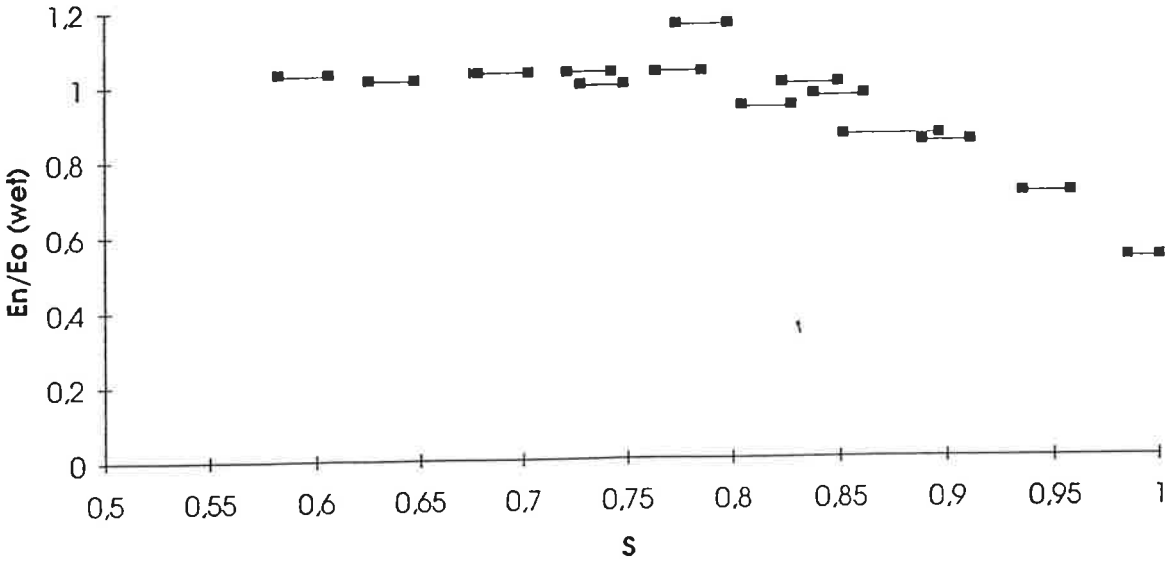
Figur 3. Skada efter 15 fryscykler uttryckt som relativ E-modulförlust som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen *Uddvide*. E_n = E-modul efter 15 cykler. E_0 = E-modul före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning. Egenfrekvensen är mätt på *torra* provkroppar.



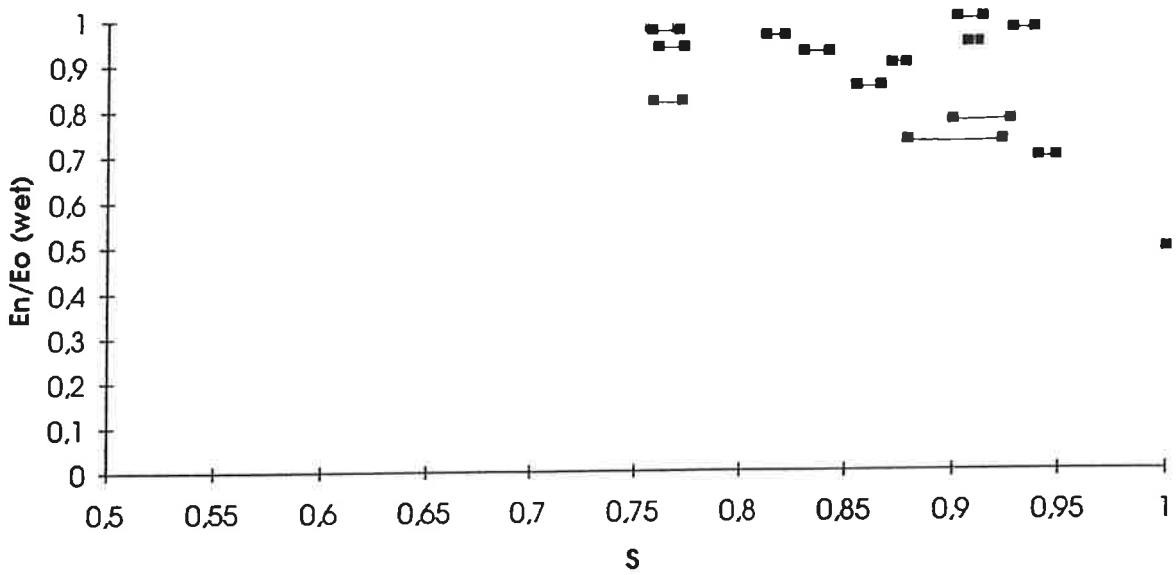
Figur 4. Skada efter 15 fryscykler uttryckt som relativ E-modulförlust som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen *Valar*. E_n = E-modul efter 15 cykler. E_0 = E-modul före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning. Egenfrekvensen är mätt på *torra* provkroppar.



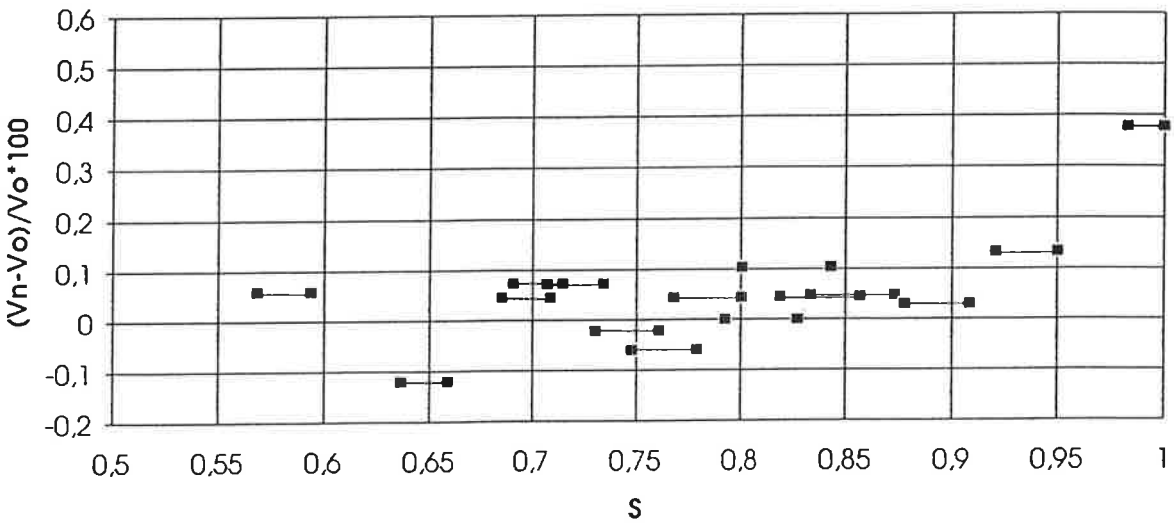
Figur 5. Skada efter 15 fryscykler uttryckt som relativ E-modulförlust som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen *Botvide*. E_n = E-modul efter 15 cykler. E_0 = E-modul före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning. Egenfrekvensen är mätt på *våta* provkroppar.



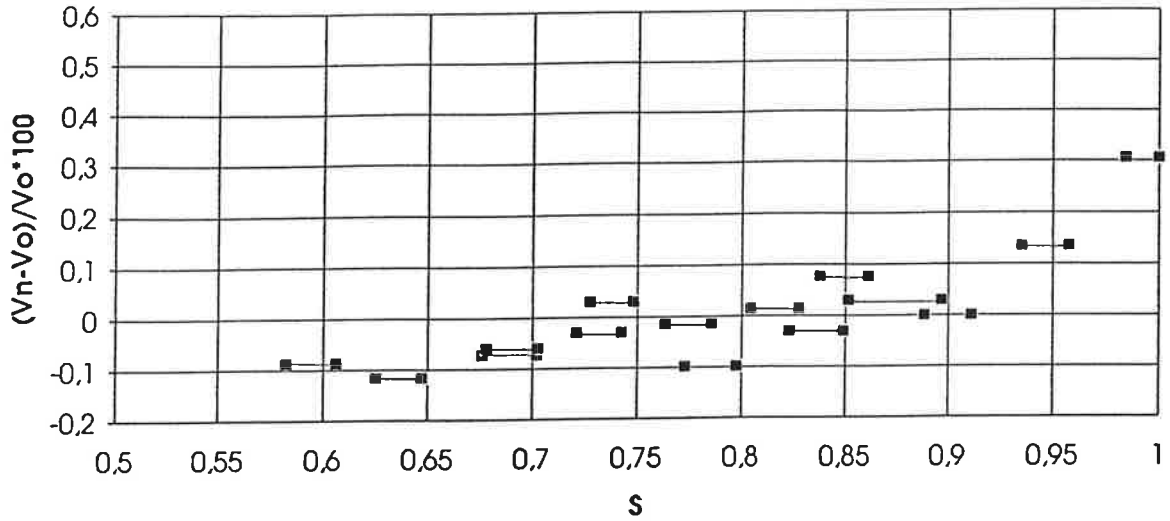
Figur 6. Skada efter 15 fryscykler uttryckt som relativ E-modulförlust som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen *Uddvide*. E_n = E-modul efter 15 cykler. E_0 = E-modul före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning. Egenfrekvensen är mätt på *våta* provkroppar.



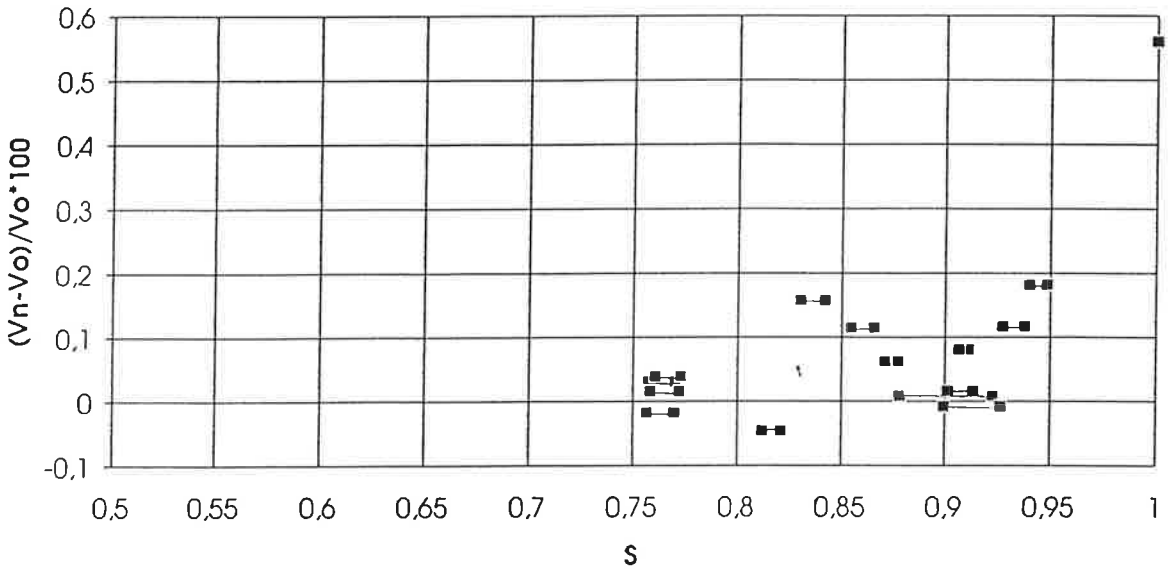
Figur 7. Skada efter 15 fryscykler uttryckt som relativ E-modulförlust som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen *Valar*. E_n = E-modul efter 15 cykler. E_0 = E-modul före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning. Egenfrekvensen är mätt på *våta* provkroppar.



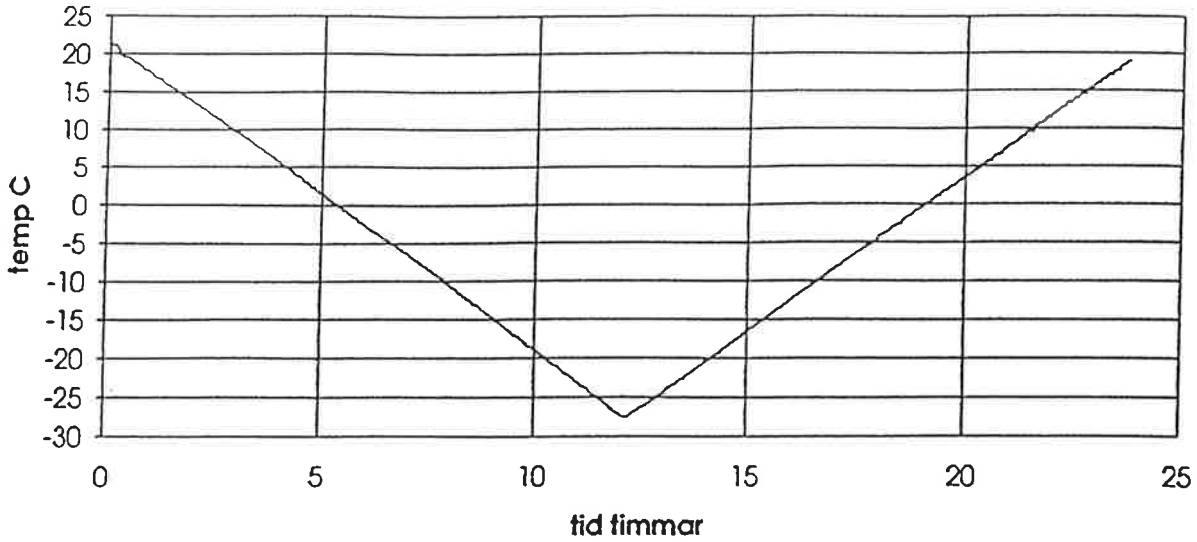
Figur 8. Relativ volymökning efter 15 fryscykler som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen *Botvide*. V_n = provkroppsvolym efter 15 cykler. V_0 = provkroppsvolym före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning.



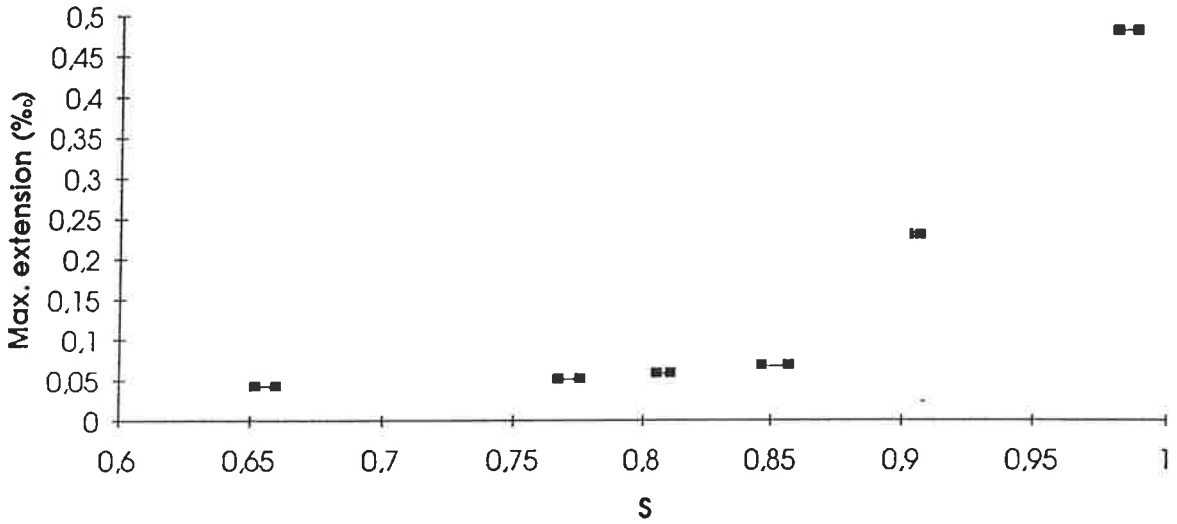
Figur 9. Relativ volymökning efter 15 fryscykler som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen *Uddvide*. V_n = provkroppsvolym efter 15 cykler. V_0 = provkroppsvolym före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning.



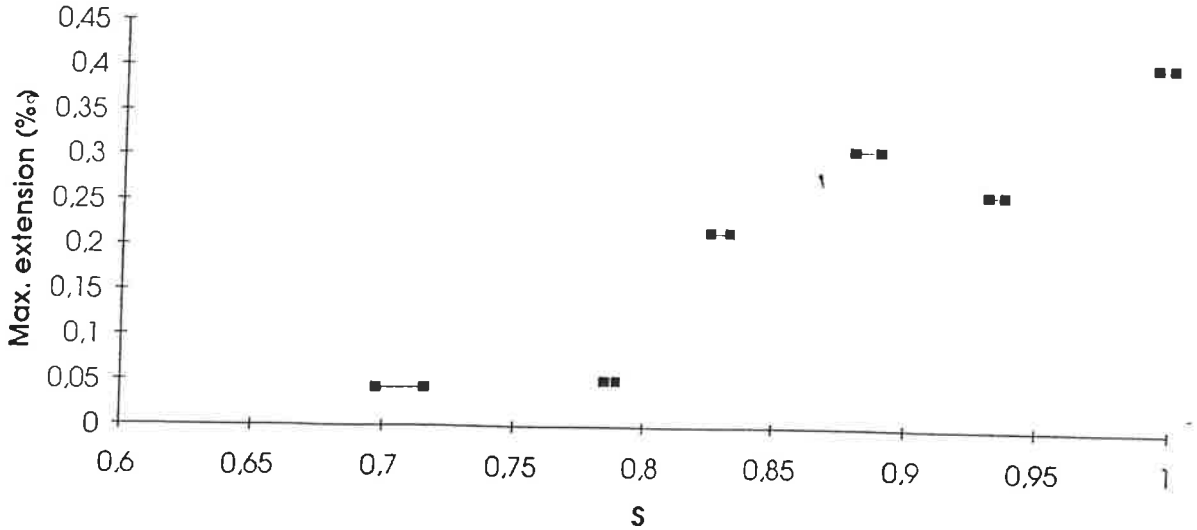
Figur 10. Relativ volymökning efter 15 fryscykler som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen *Valar*. V_n = provkroppsvolym efter 15 cykler. V_0 = provkroppsvolym före frysning. Varje enskild provkropp motsvaras i diagrammet av två punkter förbundna med en linje - en punkt för vattenmättnadsgraden före (det högre S-värdet) och en för vattenmättnadsgraden efter frysning.



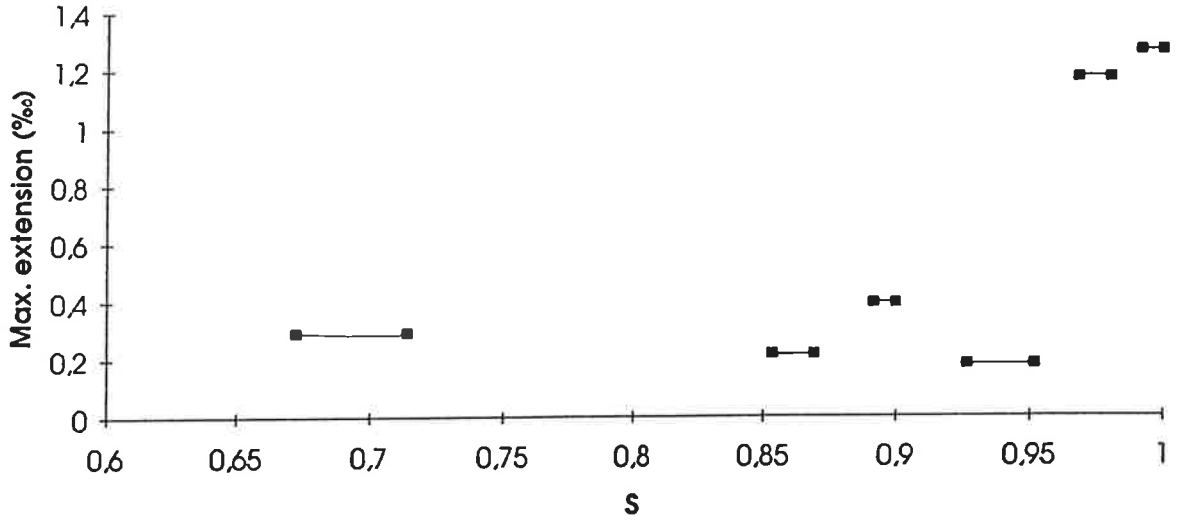
Figur 11. Lufttemperatur vid encykelfrysningar med dilatometer.



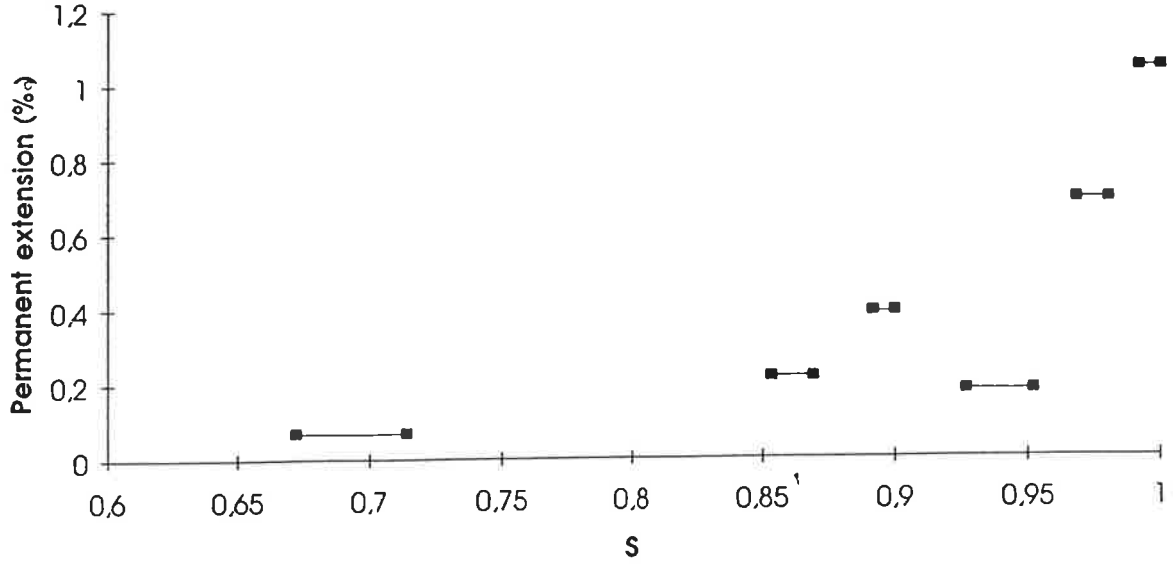
Figur 12. Maximal töjning vid frysning som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen Botvide.



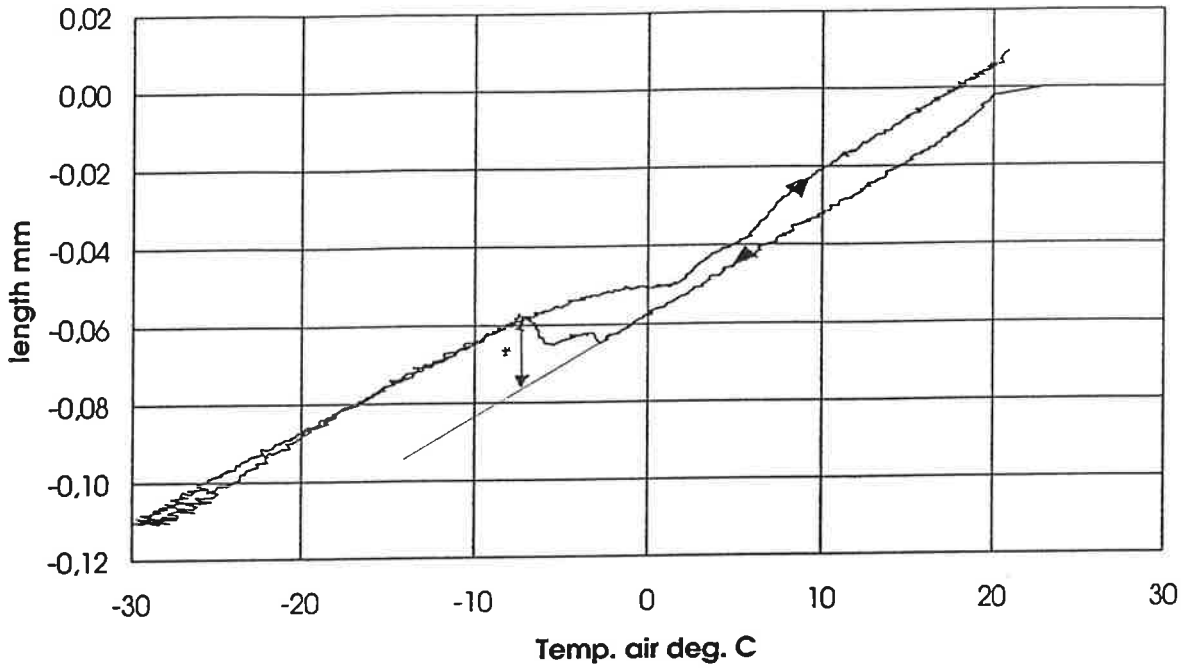
Figur 13. Maximal töjning vid frysning som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen Uddvide.



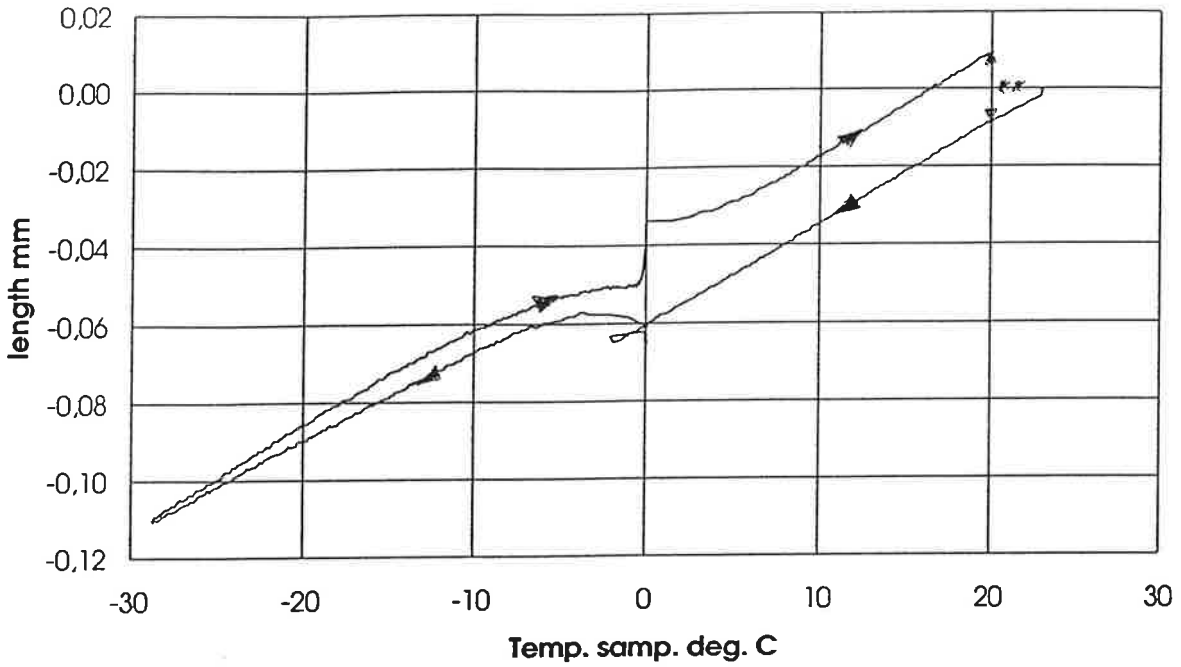
Figur 14. Maximal töjning vid frysning som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen Valar.



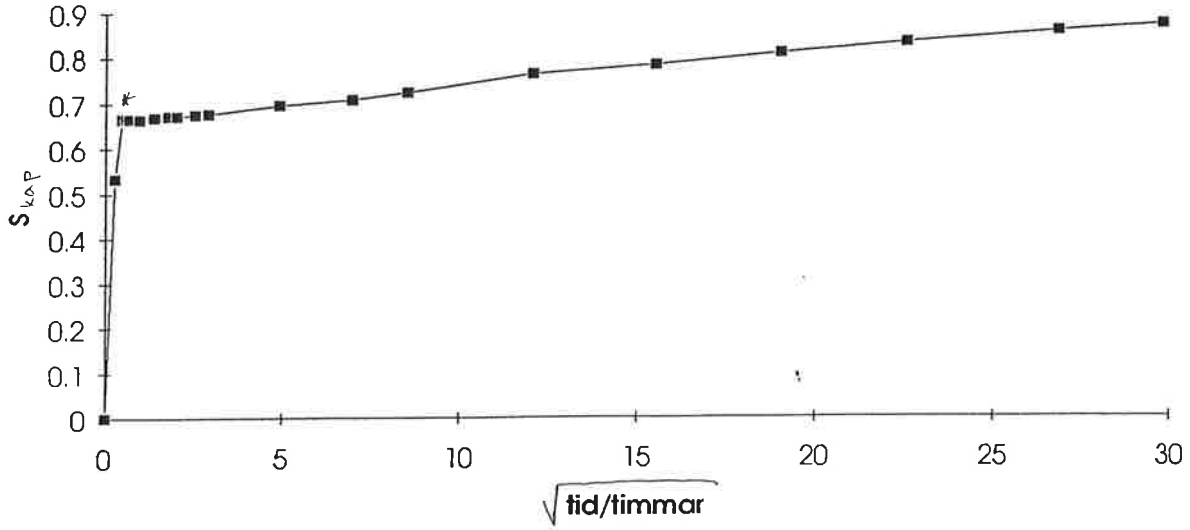
Figur 15. Permanent töjning efter frysning som funktion av vattenmättnadsgraden S för den gotländska sandstenen Valar.



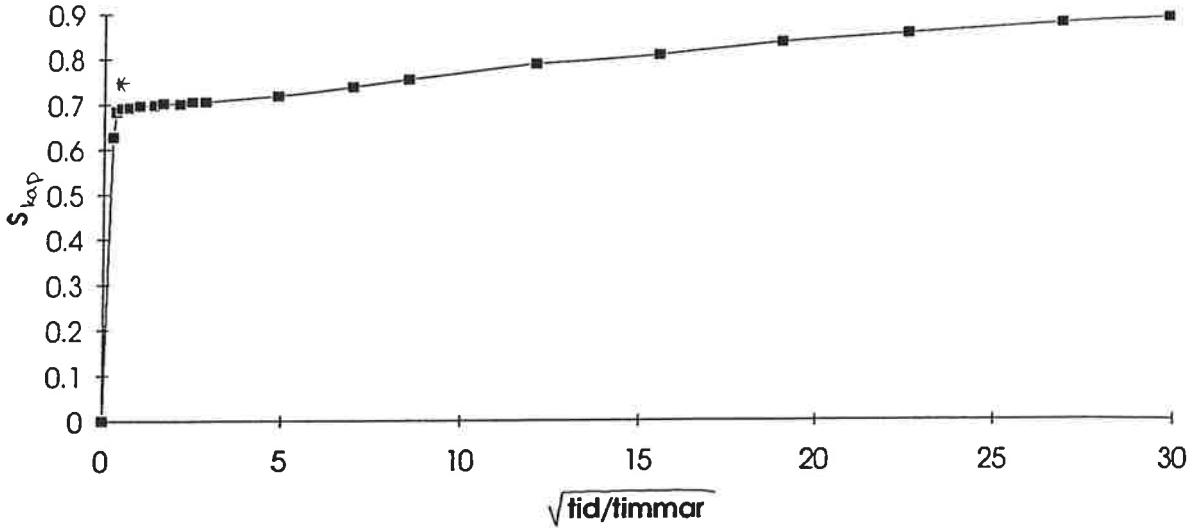
Figur 16. En provkropps längdändring som funktion av lufttemperaturen hos en vattenmättad gotländsk sandsten av typen Valar. Provkroppens längd vid försökets start är satt till 0.



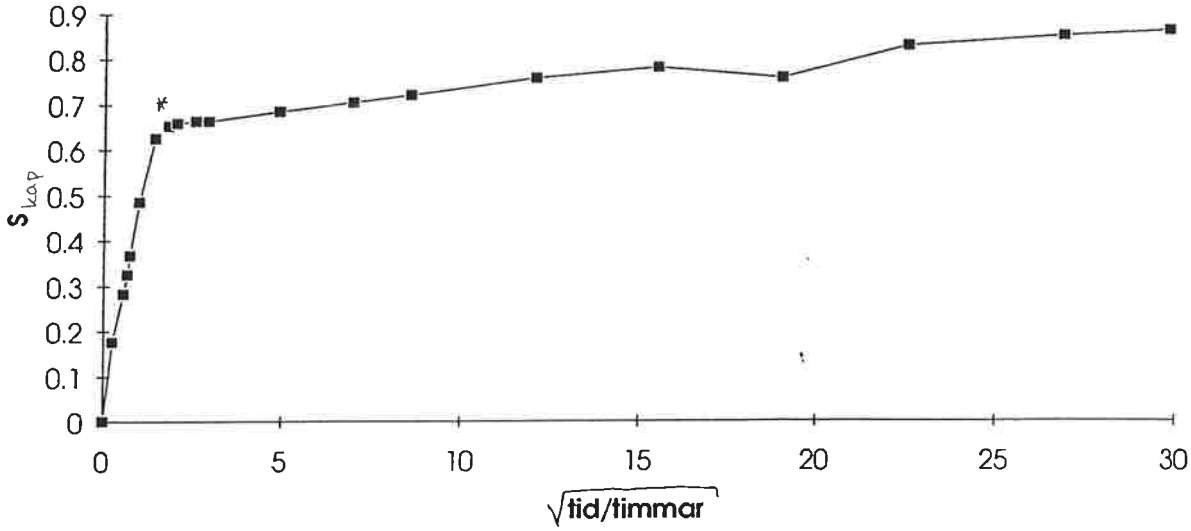
Figur 17. En provkropps längdändring som funktion av provkroppstemperaturen hos en vattenmättad gotländsk sandsten av typen Valar. Provkroppens längd vid försökets start är satt till 0.



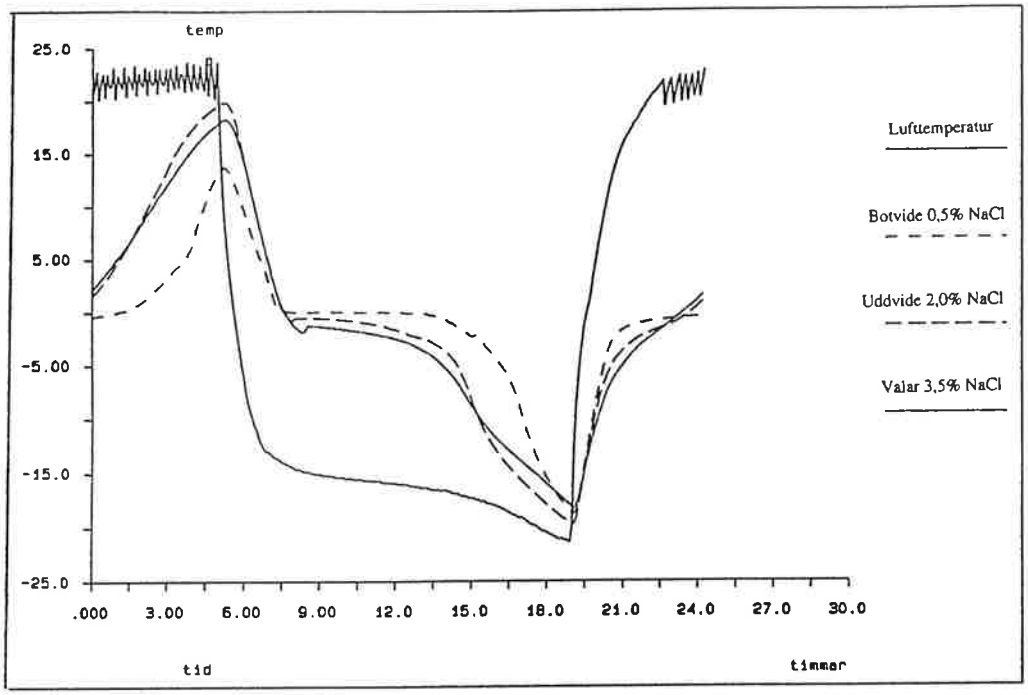
Figur 18. Kapillär vattenmättnadsgrad S_{kap} som funktion av roten ur tiden för sandstenen Botvide.



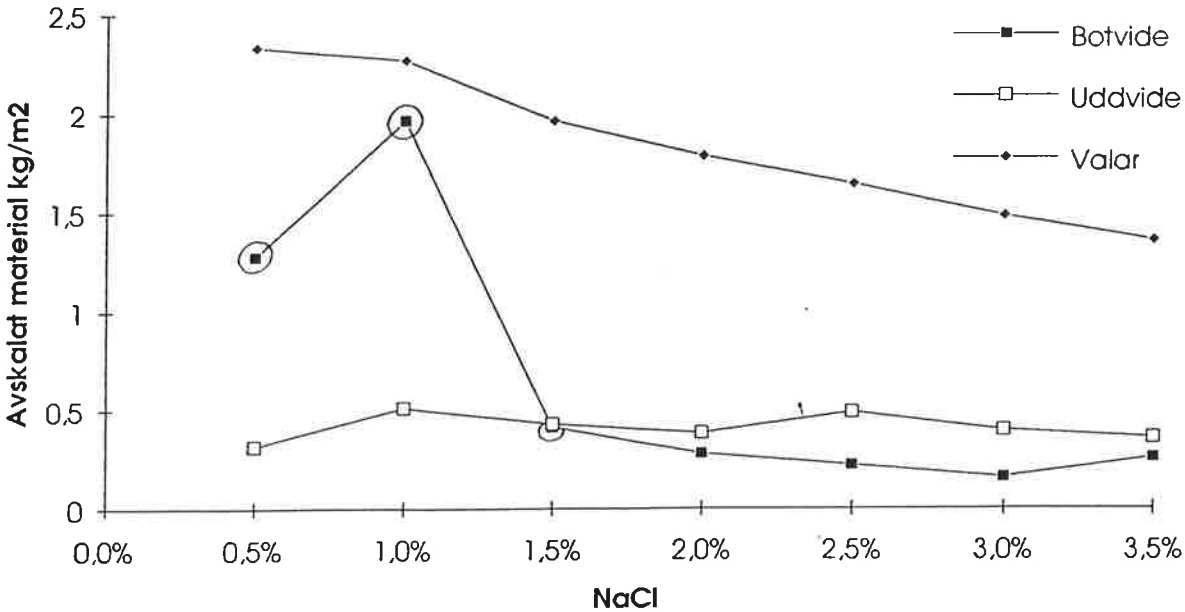
Figur 19. Kapillära vattenmättnadsgraden S_{kap} som funktion av roten ur tiden för sandstenen Uddvide.



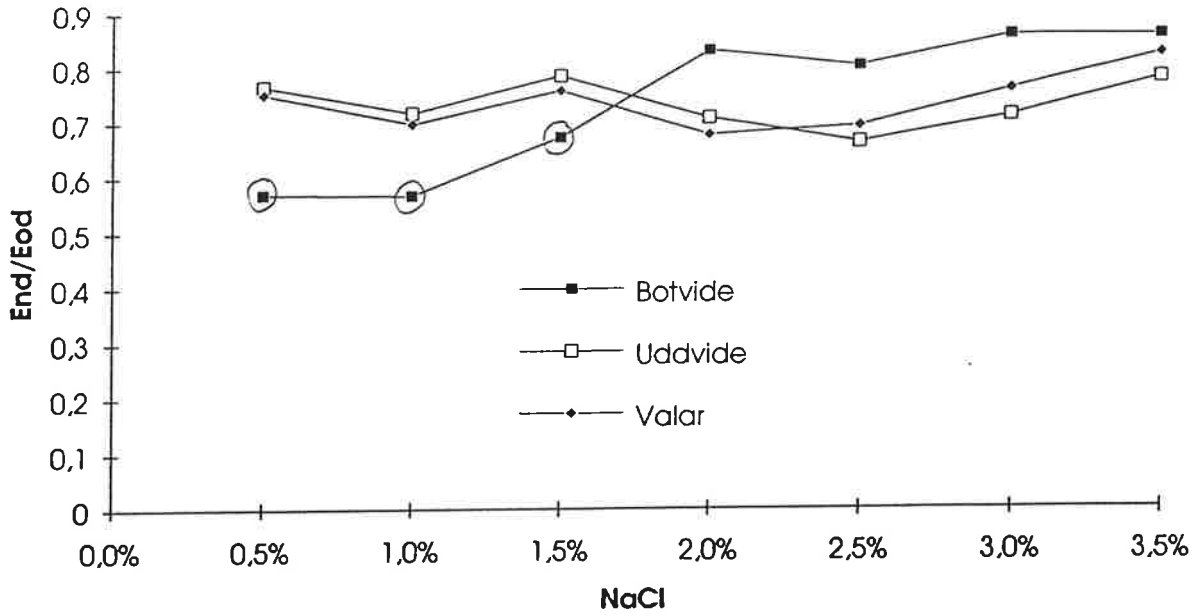
Figur 20. Kapillära vattenmättnadsgraden S_{kap} som funktion av roten ur tiden för sandstenen Valar.



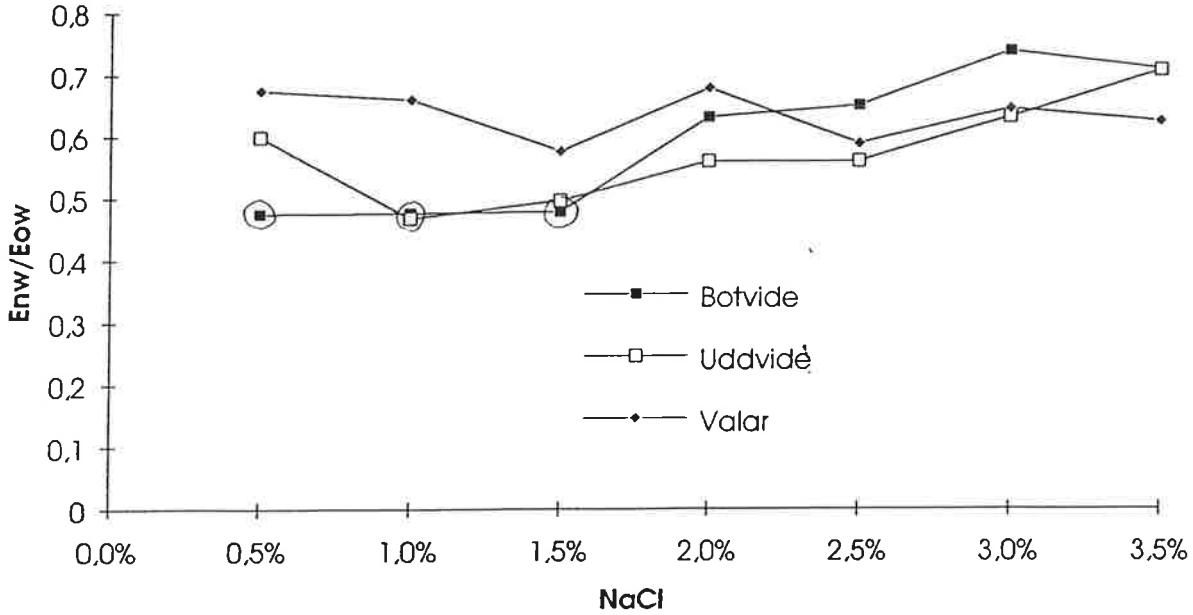
Figur 21. Temperaturcykel vid icke fuktisolerad frysning av gotländska sandstenar. Proverna utsattes för 20 sådana cykler.



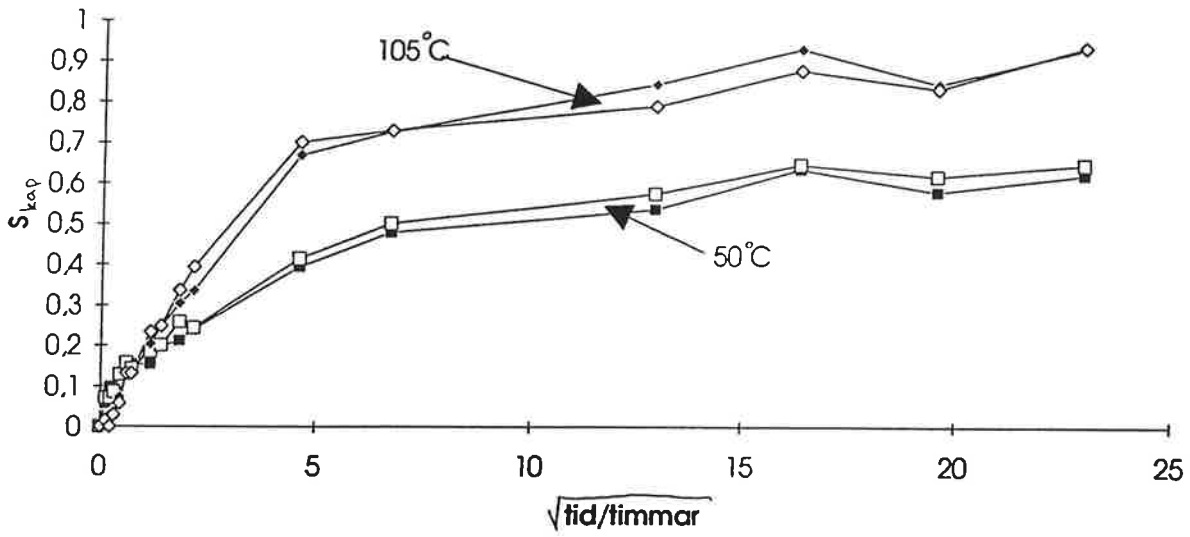
Figur 22. Mängd avskalat material efter 20 fryscykler som funktion av saltkoncentrationen för de tre gotländska sandstenarna Botvide, Uddvide och Valar. En punkt i diagrammet motsvarar en provkropp. De inringade punkterna innebär att provkroppen gått sönder i två delar. (Avflagningen i rent vatten mättes ej i detta fall, men det är från tidigare liknande försök [7] känt att avflagningen i rent vatten är mindre än avflagningen vid [NaCl] = 2,0 vikts%.)



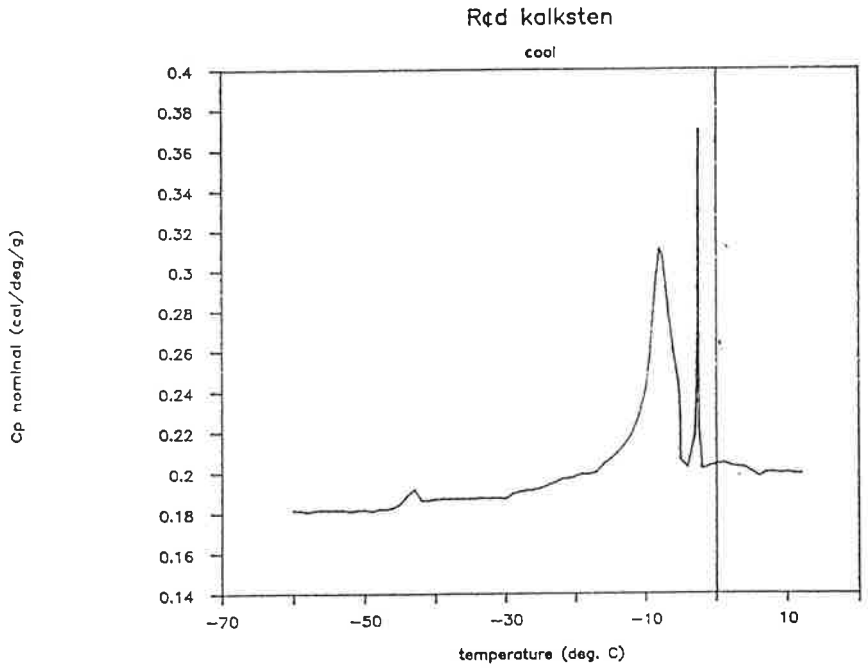
Figur 23. Inre skada uttryckt som relativ E-modulminskning efter 20 fryscykler som funktion av saltkoncentrationen för de tre gotländska sandstenarna Botvide, Uddvide och Valar. E-modulen är mätt på torra provkroppar. De inringade punkterna innebär att provkroppen gått sönder i två delar.



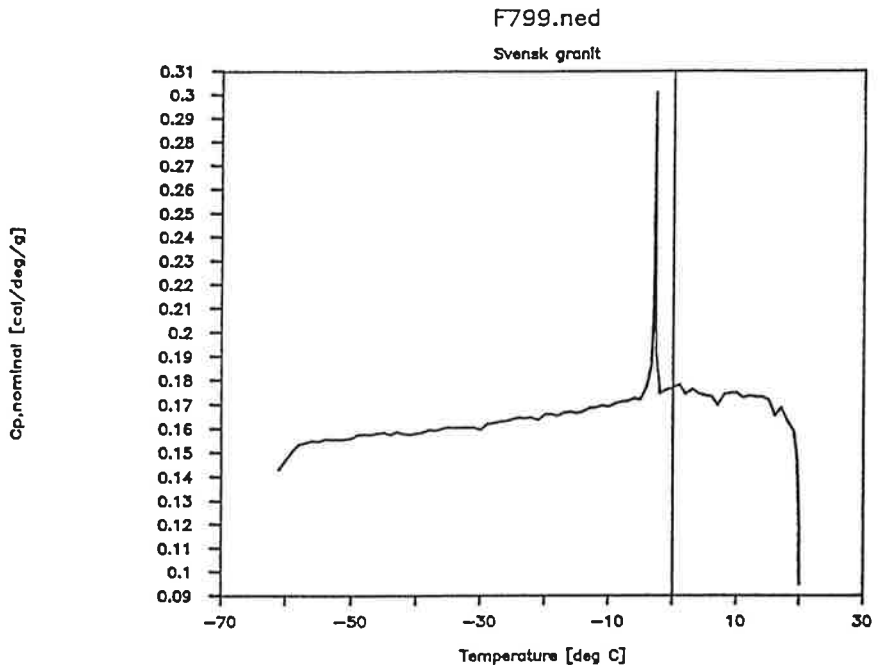
Figur 24. Inre skada uttryckt som relativ E-modulminskning efter 20 fryscykler som funktion av saltkoncentrationen för de tre gotländska sandstenarna Botvide, Uddvide och Valar. E-modulen är mätt på våta provkroppar. De inringade punkterna innebär att provkroppen gått sönder i två delar.



Figur 25. Kapillär vattenmättnadsgrad S_{kap} som funktion av roten ur tiden för bohusgraniten Röd Bratteby.



Figur 26. Nedfrysning av vattenmättad kalksten i kalorimeter. Arean under topparna är proportionell mot bildad ismängd.



Figur 27. Nedfrysning av vattenmättad granit i kalorimeter. Arean under topparna är proportionell mot bildad ismängd.

Förklaring till beteckningar i figurerna 28 - 32

Varje provkropp betecknas i figurerna 29 - 32 med en bokstavskombination AB(c). Den första bokstaven i bokstavskombinationen betecknar vilken lösning som omger provkroppen, den andra bokstaven betecknar om provkroppen är vacuummättad eller kapillärmättad med den omgivande lösningen och den tredje bokstaven är en beteckning på dubbelprov.

A = S ; Sulphate, 2%ig Na_2SO_4-lösning

A = C ; Chloride, 2%ig NaCl-lösning

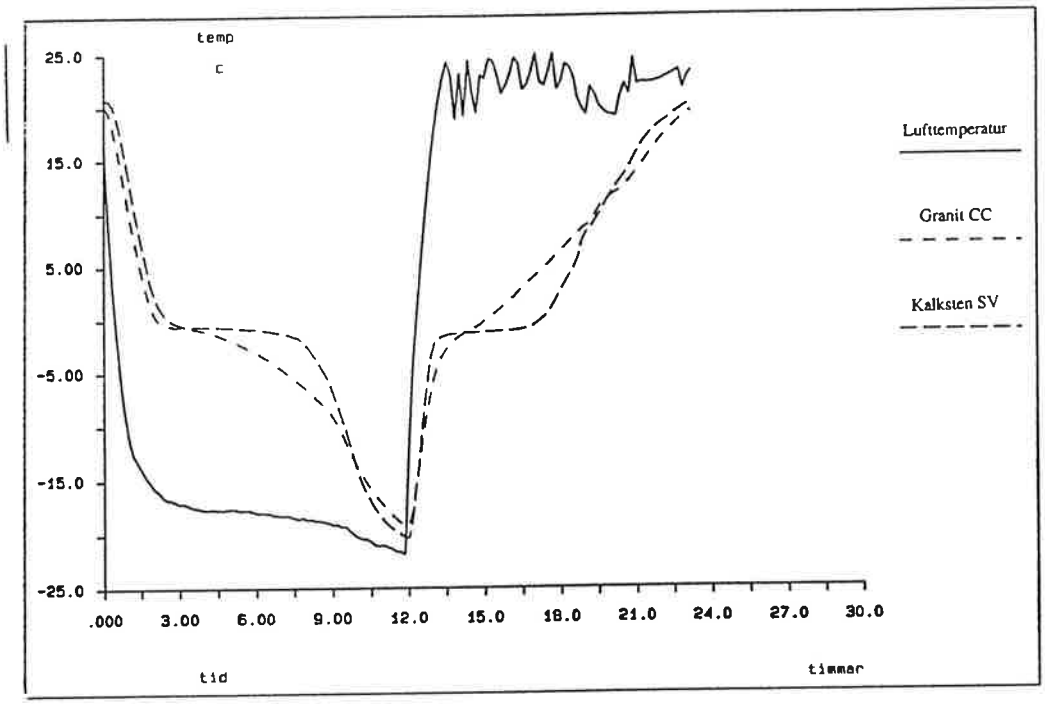
A = H ; H_2O, vatten

B = V ; Vacuummättat prov

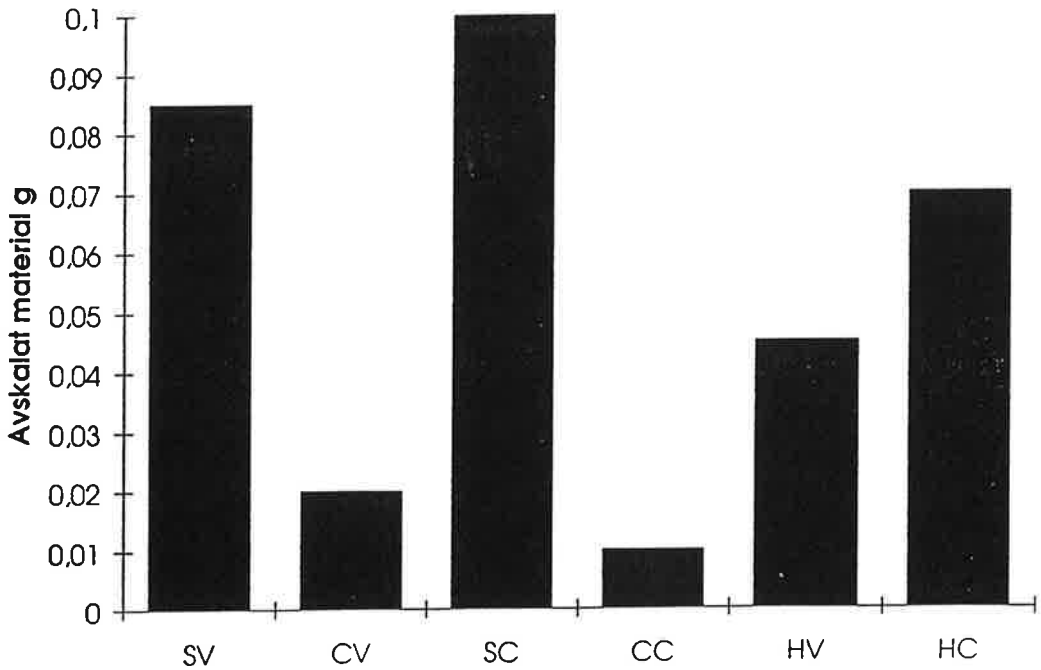
B = C ; Cappilary, kapillärmättat prov

c = a eller b ; Dubbelprover (gäller kalksten)

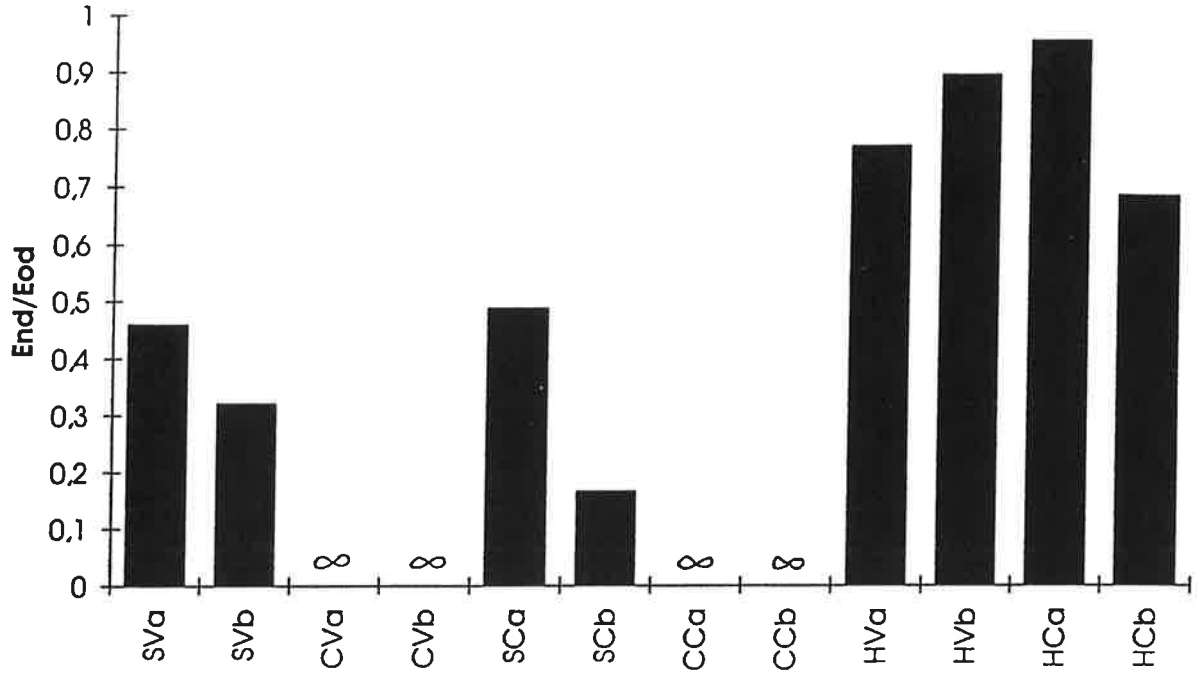
Tecknet ∞ betyder att provkropparna är helt söndersmulade redan efter ett fåtal (<5) cykler.



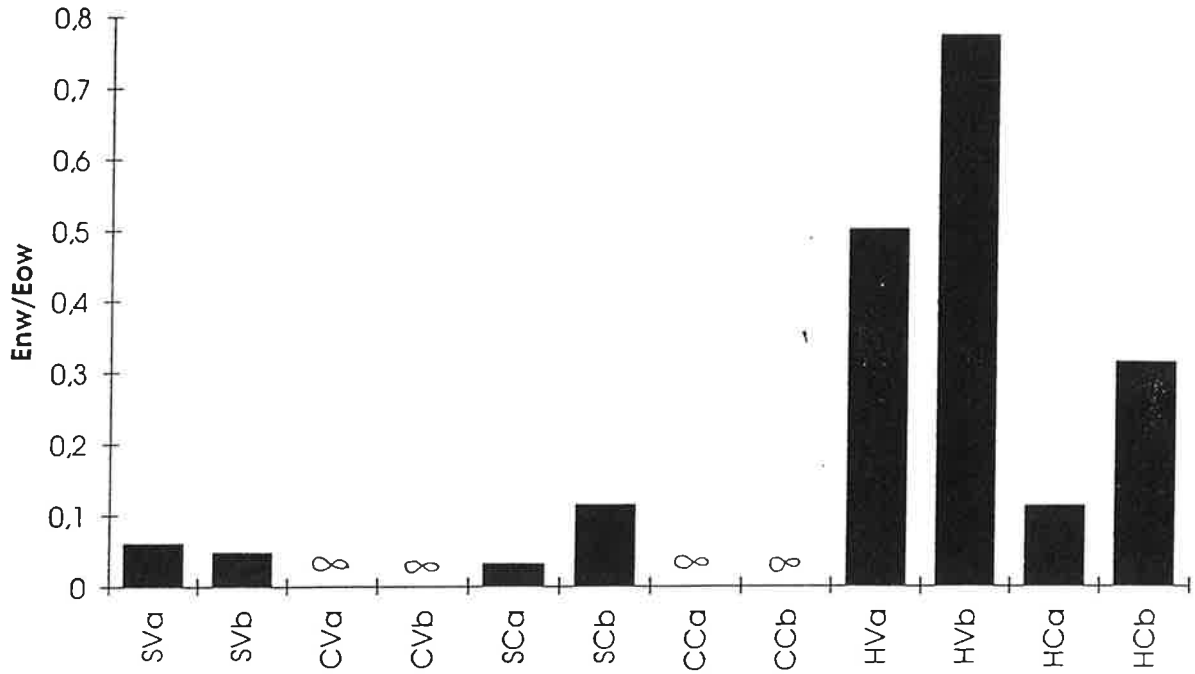
Figur 28. Temperaturcykel vid icke fuktisolerad frysning av öländska kalksten och bohusgranit. Proverna utsattes för 35 sådana cykler. Beteckningarna förklaras ovan.



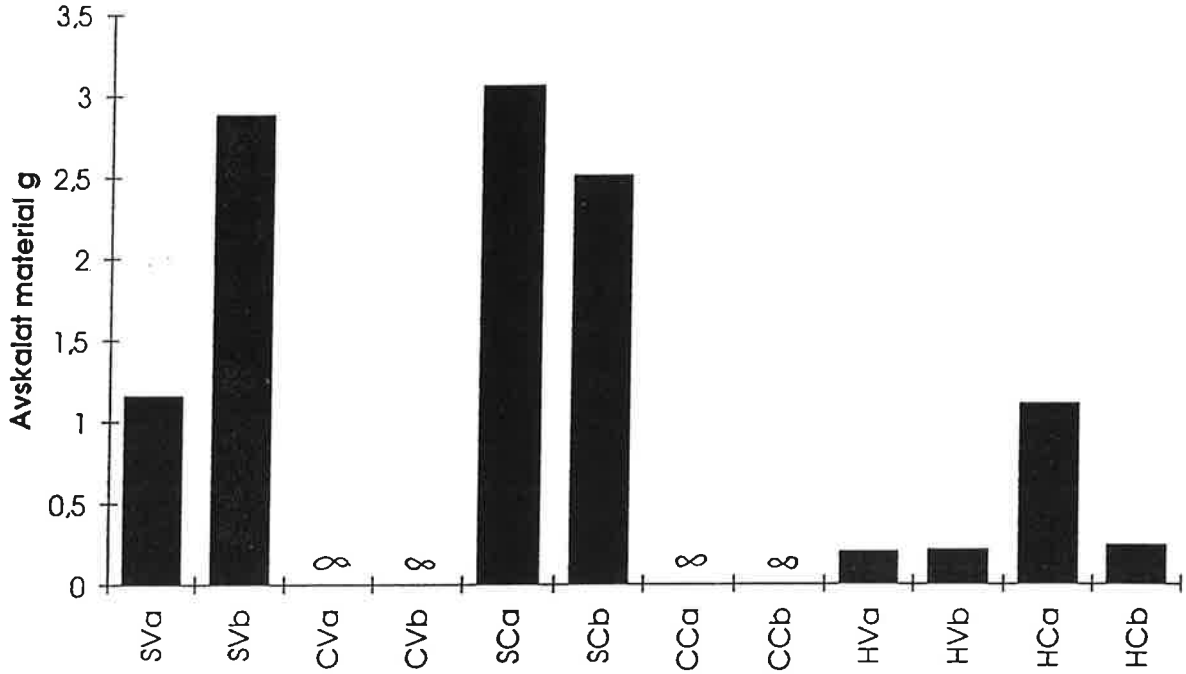
Figur 29. Mängd avskalat material efter 35 fryscykler för bohusgranit. Beteckningarna förklaras ovan.



Figur 30. Skada uttryckt som relativ dynamisk E-modulförlust för öländsk kalksten. Egenfrekvensen är mätt på *våta* provkroppar. Beteckningarna förklaras ovan.



Figur 31. Skada uttryckt som relativ dynamisk E-modulförlust för öländsk kalksten. Egenfrekvensen är mätt på *torra* provkroppar. Beteckningarna förklaras ovan.

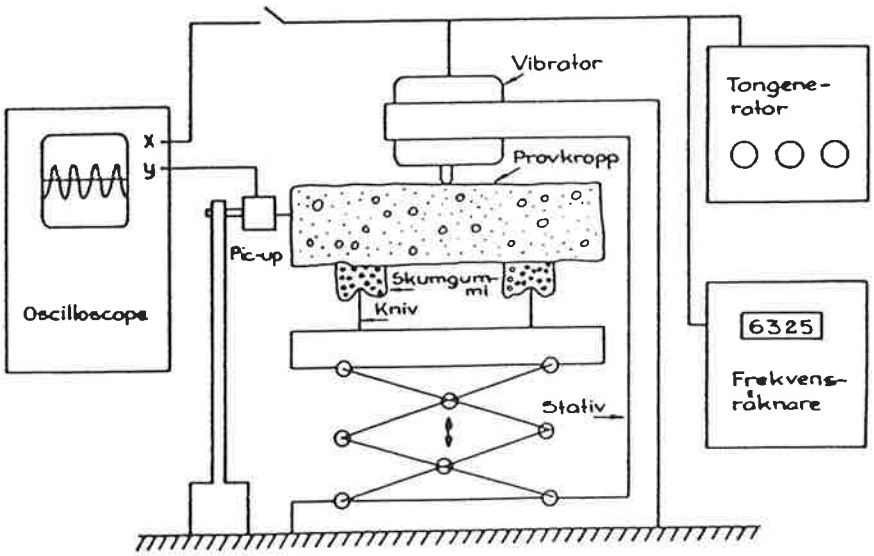


Figur 32. Mängd avskalat material efter 35 fryscykler för öländsk kalksten. Beteckningarna förklaras ovan.

BILAGA 1

Dynamisk E-modul

Förändringen i dynamisk E-modul har visat sig vara en bra metod att mäta skador pga frysning. Mätningen går till så att en provkropp med lämpliga dimensioner sätts i transversell svängning med hjälp av en vibrator. På provkroppen monteras en sensor av något slag, t ex en pic-up eller en accelerometer. Sensorns utslag avläses på ett oscilloskop. Se figuren nedan.



Apparatur för bestämning av dynamisk E-modul (Göran Fagerlund 1972). I försöken som beskrivs i denna rapport användes en accelerometer i stället för pic-up.

Den dynamiska E-modulen E beräknas utifrån egenfrekvensen f enligt formeln nedan.

$$E = (f^2 * m * l^3 * T) / (I * C^2)$$

E = dynamisk E-modul

f = egenfrekvens

m = massa

l = längd

T = korrektionsfaktor som beror på provkroppens form och Poisson's tal. För en provkropp med dimensionerna 30 x 30 x 120 mm är T = 1,38 då Poisson´s tal = 0,17 (Picket 1945).

I = yttröghetsmomentet. För en rektangel är I = $(b*h^3)/12$. I detta fall är b = h = 30 mm.

C = en konstant som beror på sättet för svängning. Vid grundtonen är C = 3,56 (Fagerlund 1972).

I denna undersökning har ingen hänsyn tagits till dimensionsförändringar som beror på ytavskalningar vid beräkning av den dynamiska E-modulen.