



LUND UNIVERSITY

Expansioner och avskalningar vid frysning av Gotländsk sandsten och Öländsk kalksten i NaCl och Na₂ SO₄- lösningar : Frostnedbrytning av natursten : preliminär lägesrapport till Riksantikvarieämbetet mars 1995

Wessman, Lubica

1995

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Wessman, L. (1995). *Expansioner och avskalningar vid frysning av Gotländsk sandsten och Öländsk kalksten i NaCl och Na₂ SO₄- lösningar : Frostnedbrytning av natursten : preliminär lägesrapport till Riksantikvarieämbetet mars 1995*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7089). 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



LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Byggnadsmaterial

UNIVERSITY OF LUND
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Division of Building Materials

**EXPANSIONER OCH AVSKALNINGAR VID FRYSNING
AV GOTLÄNSK SANDSTEN OCH ÖLÄNSK KALKSTEN
I NaCl- OCH Na₂SO₄-LÖSNINGAR**

**Frostnedbrytning av natursten
Preliminär lägesrapport till Riksantikvarieämbetet
Mars 1995**

Lubica Wessman

ERRATA - TVBM 7089

BILAGA 2, s. 26-29: Skalan på y-axeln (length mm) multipliceras med 0.3.

BILAGA 3, s. 30, diagrammet Valar, Pure water: Skalan på y-axeln (length mm) multipliceras med 0.3.

BILAGA 3, s. 31-34: Skalan på y-axeln (length mm) multipliceras med 0.3.

Tabell 2.2., s. 8: Alla värden, utom töjningen för Botvide och Uddvide i rent vatten (värdena 0.31 resp. 0.24) multipliceras med 0.3.

Innehåll

| | sida |
|--|------|
| Sammanfattning | 2 |
| 1 Inledning | 3 |
| 2 Expansionsförsök | 4 |
| 2.1 Metod | 4 |
| 2.2 Mättnadsgrader | 5 |
| 2.3 Resultat | 6 |
| 2.4 Slutsatser | 9 |
| 2.5 Noggrannhet och felanalys | 9 |
| 3 Avskalningsförsök | 11 |
| 3.1 Sammanfattning från tidigare avskalningsförsök | 11 |
| 3.2 Metod | 12 |
| 3.3 Resultat | 14 |
| 3.4 Slutsatser | 16 |
| 3.5 Noggrannhet och felanalys | 17 |
| 4 Diskussion kring jämförelse av resultat från expansions- och avskalningsförsök | 18 |
| 5 Transport av salt | 19 |
| 6 Fuktttransport | 20 |
| 7 Förslag till fortsatta studier | 21 |
| 7.1 Expansionsförsök med olika fryscyklar | 21 |
| 7.2 Expansionsförsök med prover nedsänkta i lösning | 21 |
| 7.3 Avskalningsförsök | 21 |
| 7.4 Porstorleksfördelning | 21 |
| 7.5 Studier av vittrad och ovittrad bohusgranit | 22 |
| 7.6 Övriga försök | 22 |
| 8 Referenser | 24 |
| BILAGA 1 Beskrivning av försöksutförandet för expansionsförsök | 25 |
| BILAGA 2 Expansionsförsök. Exempel på utskrifter från mätfiler för mättade sandstensprover | 26 |
| 0,5% NaCl | 26 |
| 1,0% NaCl | 27 |
| 0,5% Na ₂ SO ₄ | 28 |
| 1,0% Na ₂ SO ₄ | 29 |
| BILAGA 3 Resultat från expansionsförsök | 30 |
| Rent vatten | 30 |
| 0,5% NaCl | 31 |
| 1,0% NaCl | 32 |
| 0,5% Na ₂ SO ₄ | 33 |
| 1,0% Na ₂ SO ₄ | 34 |
| BILAGA 4 Fotografier från avskalningsförsök | 35 |
| BILAGA 5 Beskrivning av försöksutförandet för avskalningsförsök | 44 |
| BILAGA 6 Fuktttransport | 45 |

Sammanfattning

Skador som uppkommer i samband med frysning har uppmätts på olika gotländska sandstenar och en öländsk kalksten. Skadegradens variation med fuktinnehåll och saltkoncentration för salterna NaCl och Na₂SO₄ har studerats. Två metoder har använts: expansionsförsök och avskalningsförsök. I expansionsförsöken är proverna omgivna av luft. De utsätts för en enda fryscykel och skadan kvantifieras som en permanent längdändring eller töjning. I avskalningsförsöken är proverna omgivna av lösning. De utsätts för flera fryscykler och skadan kvantifieras som mängden avskalat material.

Ur resultatet från expansionsförsöken kan man dra följande slutsatser:

- Skadegraden ökar kraftigt med fuktinnehållet i provet.
- Då proverna innehåller saltlösningar blir skadan större än då proverna innehåller rent vatten.
- Porösa stensorter skadas mera än täta sorter.

Ur resultatet från avskalningsförsöken kan man bl.a. dra följande slutsatser:

- Kalkstenen skadas extremt mycket vid frysning i NaCl-lösning.
- Sandstenen Valar skadas värre vid frysning i NaCl-lösningar än övriga studerade sandstenssorter. För Valar framkommer också att skadan blir värre i lösningar med låga NaCl-koncentrationer (0,5 vikts%) än i lösningar med högre koncentrationer eller i rent vatten.

Vid en jämförelse av resultaten från expansions- och avskalningsförsöken finner man att metoderna ger olika resultat:

- Kalksten skadas betydligt mer av NaCl-lösning i avskalningsförsöken än vad sandsten gör. I expansionsförsöken gäller det omvända.
- Kalksten skadas betydligt mer av NaCl-lösning i avskalningsförsöken än av Na₂SO₄-lösning. I expansionsförsöken är skillnaden mellan de båda salterna mindre, med det omvända tenderar att gälla, dvs Na₂SO₄ ger värre skador än NaCl.
- Sandstenen Valar är den mest känsliga av sandstenarna vid avskalningsförsöken, medan den är minst känslig i expansionsförsöken. (Valar har endast utsatts för avskalningsförsök i NaCl-lösningar.)

1 Inledning

Problem med vittring av monument, fasader, stendetaljer, hållristningar och andra ur antikvarisk synpunkt viktiga och intressanta naturstensföremål har uppmärksamats de senaste åren. Riksantikvarieämbetet finansierar ett flertal forskningsprojekt rörande denna fråga. Syftet med projekten är att ge en ökad förståelse och kunskap kring mekanismerna bakom nedbrytningsprocesserna, för att därmed förbättra möjligheterna till reovering och konservering. Ett av projekten är *frostnedbrytning av natursten*. Resultat från detta projekt, som framkommit sedan den senaste rapporten publicerades, kommer att presenteras i denna rapport.

Följande rapporter har tidigare utgivits vid avdelningen för byggnadsmaterial, LTH, inom ramen för projektet *frostnedbrytning av natursten*, finansierat av Riksantikvarieämbetet:

1. Fagerlund, G. och Wessman, L. Frostnedbrytning av natursten, Lägesrapport mars 1992, Rapport TVBM-3047, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1992
2. Wessman, L. Frostnedbrytning av natursten, Försöksmetodik, Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, december 1992, Rapport TVBM-7036, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1992
3. Wessman, L. Saltfrostnedbrytning av gotländsk sandsten, Preliminära försök, januari 1993, Rapport TVBM-7038, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1993
4. Wessman, L. Frostnedbrytning av natursten, Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, Mars 1993, Rapport TVBM-7046, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1993
5. Wessman, L. Frostnedbrytning av natursten, Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, Mars 1994, Rapport TVBM-7073, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1994

Nedan presenteras resultaten från två försök, där svenska naturstenar utsätts för frysning i närvaro av dels rent vatten och dels olika saltlösningar. Skadan som därvid uppkommer kvantifieras i det första försöket, kallat expansionsförsök, som permanent längdändring eller töjning, och i det andra försöket, kallat avskalningsförsök, som mängd avskalat material. I expansionsförsöket är det en skada i form av sprickbildning i det inre av stenen som mäts, medan det i avskalningsförsöket är en ytskada som mäts. Stenar som studerats är kalcitbunden sandsten från Gotland och kalksten från Öland. Salter som studerats är NaCl och Na₂SO₄.

2 Expansionsförsök

2.1 Metod

Stenar med olika mätnadsgrader, S, av NaCl- och Na₂SO₄-lösningar i porsystemet utsätts för en fryscykel. Den därvid uppkomna skadan mäts med hjälp av en s.k. dilatometer som en permanent längdändring eller töjning. En permanent förlängning av en provkropp är en indikation på att en eller flera sprickor har bildats.

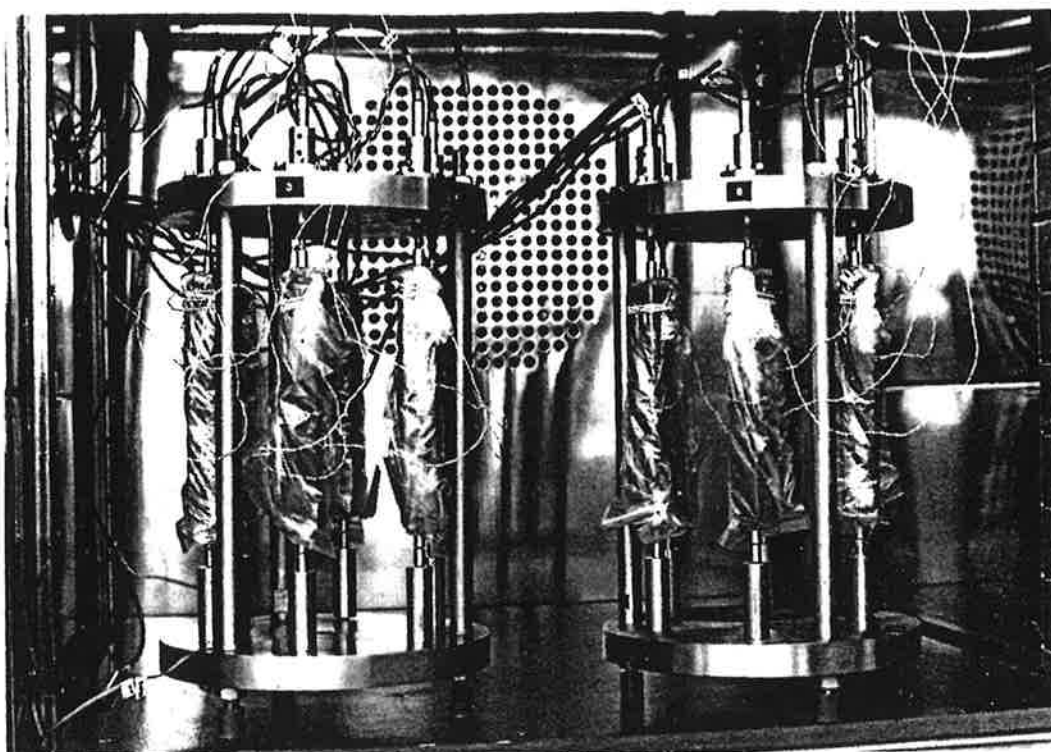
Provkroppar med dimensionen 20 x 20 x 150 mm används i försöket. I centrum av provkropparnas båda kortsidor limmas skruvar för att infästning i den så kallade dilatometern skall vara möjlig. Ett fotografi på provkroppar placerade i dilatometern visas i figur 2.1. Provkropparnas längd registreras under frysningens gång med hjälp av en s.k. LVDT- givare varje minut i en dator. Samtidigt registreras temperaturen med hjälp av termoelement som är placerade i ett litet borrarat hål i centrum av varje provkropp. Under frysningens gång är provkropparna invirade i plastpåsar för att förhindra fuktutbyte med omgivningen. Provkroppens längd vid start sätts till noll. Temperaturen i luften runt provkropparna varierar med tiden så som visas i figur 2.2. En mer detaljerad beskrivning av försöksutförandet finns i bilaga 1.

Tabell 2.1 ger en överblick över hur försöket är upplagt, samt vilka variabler som ingår. Siffrorna i tabellen anger antalet mätnadsgrader som studerats för varje kombination på lösning och stensort. Stensorter som studerats är fyra olika kalcitbundna sandstenar från Gotland, kallade Botvide, Uddvide, Valar och X:1. (X:1 är en ny sten som börjat brytas relativt nyligen och, som i motsats till övriga här nämnda stenar, inte studerats tidigare.) Dessutom har en röd, öländsk kalksten, B1, studerats. Lösningar som använts är rent vatten, samt NaCl- och Na₂SO₄-lösningar innehållande 0,5 respektive 1,0 vikts% salt. För stenarna Botvide, Uddvide och Valar har en komplett studie gjorts. Därvid har för varje kombination på sten och lösning 7 (för rent vatten endast sex) olika mätnadsgrader studerats. För stenen X:1 har endast de tre (inga för rent vatten) motsvarande högsta mätnadsgraderna studerats. För kalkstenen har endast helt mättade prover studerats.

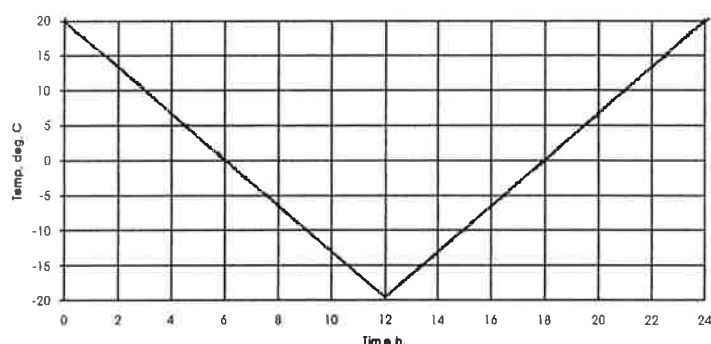
Tabell 2.1.

Antalet prover med olika mätnadsgrader för olika kombinationer på stensort och lösning

| | Rent vatten | 0,5% NaCl | 1,0% NaCl | 0,5% Na ₂ SO ₄ | 1,0% Na ₂ SO ₄ |
|----------|-------------|--------------|--------------|---|---|
| Botvide | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Uddvide | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| Valar | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| X:1 | - | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Kalksten | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |



Figur 2.1. Expansionsförsök. Provkroppar placerade i dilatometer.



Figur 2.2. Lufttemperaturen som funktion av tiden vid expansionsförsöken.

2.2 Mättnadsgrader

Mättnadsgraden S beräknas på basis av medelvärdet av provkropparnas fuktinnehåll före och efter frysning, utom för helt mättade prover, där mättnadsgraden definitionsmässigt sätts till 1.

Ett prov mäts helt (så att $S=1$) genom att utsättas för vakuum (< 1 mbar resttryck) i torrt tillstånd i minst tre timmar, varefter det täcks med lösning. Pumpen får suga i ytterligare en timme. Atmosfärtrycket får därefter trycka in lösning i porsystemet, som därmed anses vara helt fyllt. För proverna innehållande rent vatten åstadkoms de olika mättnadsgraderna genom att helt mättade prover torkas olika mycket. Detta går inte att göra då proverna innehåller saltlösningar, eftersom saltet inte försvinner från provet samtidigt med vattnet. I stället åstadkoms de fyra lägsta mättnadsgraderna genom att torra prover nedsänks helt i lösning och får kapillarsuga i 1 dygn, 7 dygn, 21 dygn respektive 3 månader. De olika sugtiderna ger en lämplig fördelning av mättnadsgraderna. De två näst högsta mättnadsgraderna åstadkoms

genom att torra provkroppar utsätts för olika resttryck högre än vakuum men lägre än atmosfärstryck. I detta fall gav resttrycken ca 250 mbar samt ca 280 mbar lämpliga mättnadsgrader. (Trycket var i dessa fall instabilt.) I övrigt är tillvägagångssättet detsamma som vid vakuummätning.

Under frysningens gång är provkropparna invirade i plastpåsar för att minimera torkning. Provkropparna vägs före och efter frysning. Under frysningen uppkommer en viss, närmast försumbar, fuktförlust dels i form av kondens på insidan av plastpåsen och dels i form av torkning i samband med hanteringen av provkropparna. Storleksordningen på denna fuktförlust är 0,2 g, vilket motsvarar ca 2% av det ursprungliga fuktinnehållet i ett helt mättat sandstensprov.

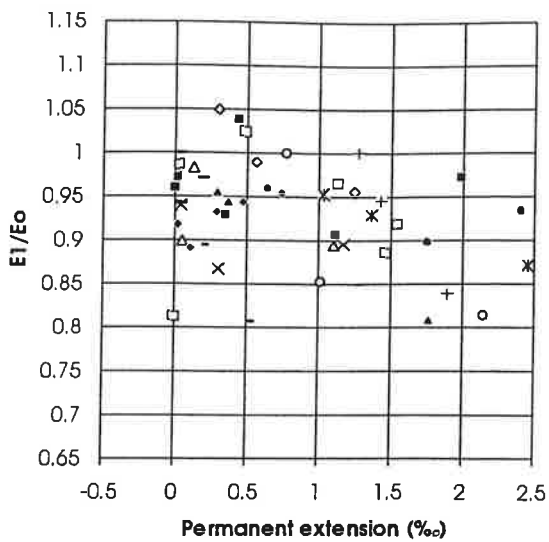
Efter avslutat försök vägs samtliga provkroppar i torrt tillstånd, vakuummätas och vägs i luft och vatten för att individuella värden på porositet och densitet skall kunna beräknas.

2.3 Resultat

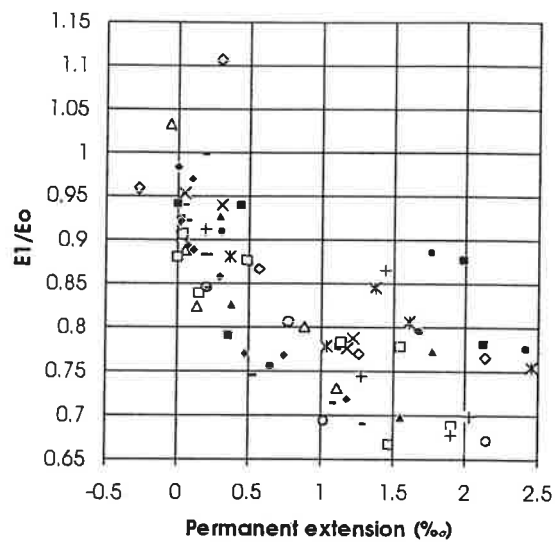
Resultatet från en frysning av en provkropp erhålls i form av ett diagram med samhörande värden på längd och temperatur. Sådana diagram finns för alla 119 provkroppar som studerats i detta försök. Exempel på utskrifter från sådana mätfiler visas i bilaga 2. Principiellt ser resultatet från alla provkroppar likartat ut.

När temperaturen sjunker krymper provet. Denna krympning beror på materialets längdutvidgningskoefficient. Vid en viss underkylning sker en plötslig isbildning som på grund av sin exoterma karaktär får temperaturen i provet att stiga. I vissa fall registreras i samband med denna temperaturstegring en plötslig, relativt liten, längdändring. (Här bör påpekas att upplösningen vid längd- och temperaturregistrering endast är en minut, samt att längd- och temperaturregistrering inte är exakt synkroniserade, utan registreringen sker med några sekunders förskjutning. Mycket snabba och plötsliga händelseförlopp registreras därför inte alltid korrekt.) Därefter uppkommer någon form av skada om provet innehåller tillräckligt mycket lösning. När skadan är fullt utvecklad krymper provet åter, denna gång med en något annorlunda längdutvidgningskoefficient, eftersom porsystemet nu, åtminstone delvis, innehåller is i stället för vatten.

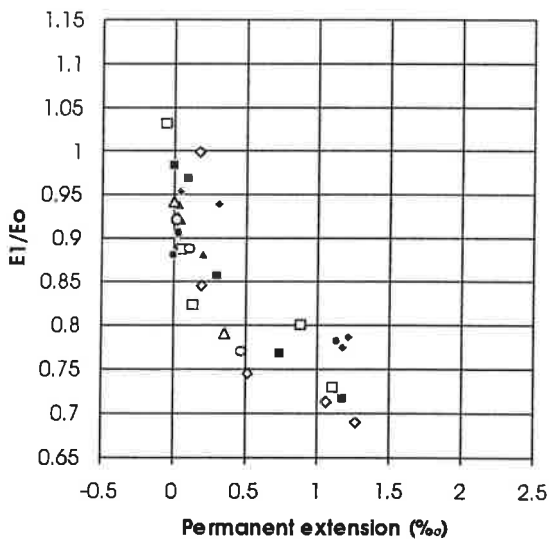
När temperaturen i provet därefter stiger utvidgas provet termiskt för att sedan vid en viss negativ temperatur åter börjar krympa. Innan den slutliga smälttemperaturen uppnås utvidgas provet. Detta skulle kunna bero på att isen i viss mån håller emot en del av den utvidgning som uppstår på grund av sprickor, så att ett slags inre spänningstillstånd uppkommer i materialet. När isen smälter släpper spänningen och materialet utvidgas. När all is smält utvidgas provet med samma längdutvidgningskoefficient som före frysningen. Storleken på den kvarstående deformationen vid t ex 20 °C, som i första figuren i bilaga 2 är markerat med en dubbelpil, är ett kvantitativt mått på den skada som frysningen orsakat. Skadan är osynlig för blotta ögat. Normalt är skadan inte heller möjlig att registrera som en förlust i dynamisk E-modul, vilket syns i figurerna 2.3 - 2.4, som visar förlusten i dynamisk E-modul som funktion av den permanenta töjningen för torra respektive våta provkroppar. Sambandet är något tydligare för de våta provkropparna. (Något fler mätningar har gjorts på våta prover än på torra.) Allra tydligast syns sambandet för de tätare, bättre konsoliderade stenarna Valar och X:1. Figur 2.5 visar detta samband för våta Valar och X:1. Sammantaget visar figurerna 2.3-2.5 att mätning av dynamisk E-modul i detta sammanhang är en olämplig metod att mäta inre skador.



Figur 2.3. Förlusten i dynamisk E-modul som funktion av den permanenta töjningen för torra provkroppar



Figur 2.4. Förlusten i dynamisk E-modul som funktion av den permanenta töjningen för våta provkroppar.



Figur 2.5. Förlusten i dynamisk E-modul som funktion av den permanenta töjningen för våta provkroppar av stensorterna Valar och X:1.

En viss genomgående skillnad mellan längd - temperaturdiagrammen för prover frysta i NaCl och prover frysta i Na₂SO₄-lösning framkommer vid högre mättnadsgrader. Denna skillnad syns i figurerna i bilaga 2 för stenarna Botvide och Uddvide innehållande 1% -iga lösningar: I fruset tillstånd är skillnaden i längdutvidgningskoefficienterna mellan skadat och oskadat prov större då provet innehåller NaCl än då det innehåller Na₂SO₄. Expansionen i samband med att isen smälter sker i ett större temperaturintervall för prover innehållande NaCl. För Botvide och Uddvide mättade med 1,0% Na₂SO₄ uppkommer en liten, relativt plötslig, expansion i samband med nedfrysningen vid ca -7 °C. För Botvide gäller detta de fyra mest mättade proverna och för Uddvide de sex mest mättade. Denna expansion har tidigare iakttagits i ett

opublicerat expansionsförsök där två prover av Uddvide fått kapillärsuga lösning innehållande 2,0 vikts% Na₂SO₄ till mätnadsgrader på 0,79 och 0,80.

Den kvarstående deformationen angiven som provets töjning i promille har avsatts mot mätnadsgraden i figurerna i bilaga 3. En punkt motsvarar en provkropp. Provkroppar som motsvarar inringade punkter för stenen Valar har en porositet som avsevärt avviker från övriga Valar. Valar har (i denna omgång) en porositet på 17,4 % med en standardavvikelse på 0,5%. De inringade provkropparnas porositet varierar mellan 6 och 12 %. Punkterna i varje diagram är numrerade 1 - 7. Numreringarna betyder följande:

1. Provkroppen har legat i lösning i 1 dygn (ger S ~ 0,69).
2. Provkroppen har legat i lösning i 7 dygn (ger S ~ 0,82).
3. Provkroppen har legat i lösning i 21 dygn (ger S ~ 0,88).
4. Provkroppen har legat i lösning i 3 månader (ger S ~ 0,99).
5. Provkroppen är mättad med lösning vid resttrycket ca 280 mbar (ger S ~ 0,94).
6. Provkroppen är mättad med lösning vid resttrycket ca 250 mbar (ger S ~ 0,97).
7. Provkroppen är mättad med lösning vid resttrycket ca 1 mbar (vakuum) (ger S = 1,0).

En sammanställning av de maximala permanenta töjningarna för varje kombination av stensort och lösning visas i tabell 2.2. Maximal permanent töjning uppkommer ibland för vakuummättade prover (märkt *vac* i tabellen) och ibland för prover som fått kapillärsuga lösning i 3 månader (märkt *cap* i tabellen). För stenen X:1 och kalksten förekommer inga prover som fått kapillärsuga, varför alla dessa prover i tabellen är vakuummättade. Detta gäller även alla prover i rent vatten.

Tabell 2.2. Maximal permanent töjning (‰).

| | Rent vatten | 0,5% NaCl | 1,0% NaCl | 0,5% Na ₂ SO ₄ | 1,0% Na ₂ SO ₄ |
|----------|-------------|---------------------|---------------------|---|---|
| Botvide | 0,31 | 2,12 (<i>cap</i>) | 2,13 (<i>cap</i>) | 2,41 (<i>vac</i>) | 2,45 (<i>vac</i>) |
| Uddvide | 0,24 | 1,90 (<i>cap</i>) | 1,77 (<i>vac</i>) | 2,15 (<i>vac</i>) | 2,03 (<i>cap</i>) |
| Valar | 0,71 | 1,17 (<i>cap</i>) | 1,11 (<i>vac</i>) | 1,21 (<i>cap</i>) | 1,27 (<i>vac</i>) |
| X:1 | - | 0,20 | 0,35 | 1,13 | 0,47 |
| Kalksten | ~ 0 | ~ 0 | 0,18 | 0,22 | 0,29 |

vac = vakuummättade prover. *cap* = prover som fått kapillärsuga lösning i 3 månader. (Prover utan märkning är vakuummättade.)

I samband med ovan beskrivna försök har en ny mätning av stenarnas porositet och densitet gjorts. Värdena är sammanställda i tabell 2.3.

Tabell 2.3. Porositet och densitet.

| Stensort | Porositet (%) | | Skrymdensitet (kg/m ³) | | Kompaktdensitet (kg/m ³) | | antal prover |
|----------|---------------|-----|------------------------------------|----|--------------------------------------|---|--------------|
| | m | s | m | s | m | s | |
| Botvide | 22,2 | 0,2 | 2089 | 6 | 2684 | 7 | 28 |
| Uddvide | 21,9 | 0,2 | 2096 | 7 | 2684 | 3 | 28 |
| Valar | 17,4 | 0,5 | 2231 | 13 | 2702 | 5 | 24 |
| X:1 | 16,8 | 0,1 | 2236 | 4 | 2689 | 6 | 12 |
| Kalksten | 2,9 | 0,1 | 2656 | 2 | 2735 | 3 | 4 |

m = medelvärde, s = standardavvikelse.

2.4 Slutsatser

Det som framgår i diagrammen i bilaga 3 är följande:

1. Den permanenta töjningen är kraftigt beroende av mättnadsgraden och beroendet ökar med mättnadsgraden. I diagrammen är det dock många gånger svårt att avläsa en entydig kritisk mättnadsgrad, dvs en mättnadsgrad under vilken ingen skada sker och över vilken skada alltid sker. Den kritiska mättnadsgraden kan i stället definieras, t ex som den mättnadsgrad där den permanenta töjningen överskrider t ex 0,2 ‰. Alla jämförelser som görs nedan gäller vid höga mättnadsgrader - $S > 0,9$.
2. Saltlösningar ger större permanenta töjningar än rent vatten. Någon skillnad mellan saltlösningarna är svår att se, men ur tabell framgår att Na₂SO₄ tenderar att ge värre skador än NaCl för de här studerade koncentrationerna. Skillnaden mellan de olika koncentrationerna är insignifikant.
3. Stenarnas känslighet minskar ("kvalitén" ökar) i ordningen Botvide, Uddvide, Valar, X:1, kalksten, undantaget Valar i rent vatten. (Den permanenta töjningen av öländsk kalksten har endast mätts för helt mättade prover och visas i tabell 2.2.) Skillnaden mellan Botvide och Uddvide är dock liten.

Vissa stenar uppvisar en permanent krympning vid låga mättnadsgrader. Detta har tidigare konstaterats vid liknade försök utförda på kalksandsten och gasbetong av G. Fagerlund (1972) [6]. Krympningen kan bero på en slags kollaps av porsystemet (ungefär så som sker när ett poröst material krossas).

2.5 Noggrannhet och felanalys

Provkropparnas längd mäts i dilatometern med en noggrannhet på ca 2 µm, vilket på en 150 mm lång provkropp motsvarar en töjning på ca 0,01 ‰.

Vägningen sker med noggrannhet på 0,01 g. Eftersom de våta provkropparna torkar och de torra tar upp fukt från rumsluften är vägnoggrannheten uppskattningsvis mindre än 0,03 g. Med tanke på att fukt försvinner i samband med frysning och hantering kan mättnadsgraden S inte anges med större noggrannhet än $S \pm 0,02$.

Eftersom porositeten och densiteten hos provkropparna mäts efter frysning krävs en kontroll av att dessa egenskaper inte ändrats märkbart i samband med frysningen. Därför jämförs porositeter och densiteter före och efter frysningen för vakuummättade prover. Före frysningen är proverna mättade med saltlösning. Efter frysningen torkas provet och vakuummätas med rent vatten. Saltet är då kvar i porsystemet, varför saltets eventuella inverkan troligen är densamma vid vägning före och efter frysning. Resultaten visas i tabell 2.4. Ändringarna är mycket små och standardavvikelseerna är förhållandevis stora, vilket innebär att ändringarna är insignifikanta. Kompaktdensiteten kan dessutom teoretisk sett inte ändras, och porositeten verkar enligt tabellen ha minskat, trots att en tydlig, permanent expansion har konstaterats med dilatometern. Eftersom skillnaden i porositet och densitet före och efter frysning är försumbar för helt mättade prover är den det troligen även för övriga. Därför är det godtagbart att mäta provkropparnas individuella porositeter efter frysningen.

Tabell 2.4. Ändringar i porositet och densitet efter en fryscykel för helt mättade prover.

| Stensort | Porositet (%) | | Skrymdensitet (kg/m ³) | | Kompaktdensitet (kg/m ³) | | antal prover |
|----------|---------------|------|------------------------------------|-----|--------------------------------------|-----|--------------|
| | m | s | m | s | m | s | |
| Botvide | -0,20 | 0,15 | -2,0 | 4,0 | -9,3 | 5,5 | 4 |
| Uddvide | -0,17 | 0,18 | -0,9 | 3,0 | -7,0 | 4,2 | 4 |
| Valar | -0,08 | 0,03 | -1,7 | 2,7 | -4,7 | 2,7 | 4 |
| X:1 | -0,01 | 0,34 | -1,7 | 3,4 | -2,3 | 7,3 | 4 |
| Kalksten | 0,07 | 0,18 | -2,4 | 3,7 | -0,5 | 2,9 | 4 |

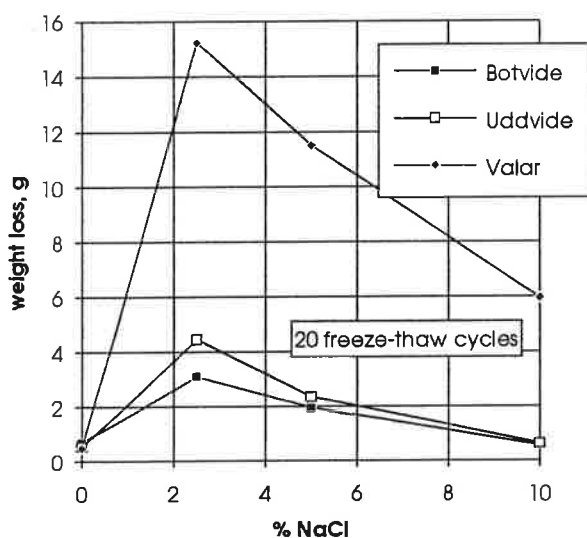
m = medelvärde. s = standardavvikelse

3 Avskalningsförsök

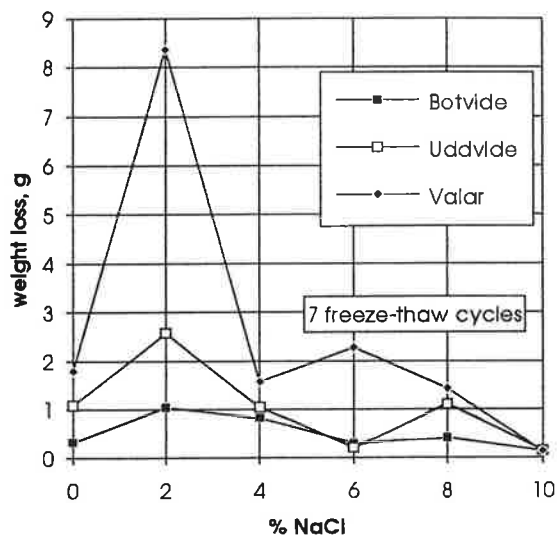
3.1 Sammanfattning från tidigare avskalningsförsök

Tidigare har ett antal avskalningsförsök med de gotländska, kalcitbundna sandstenarna Botvide, Uddvide och Valar i NaCl-lösningar av olika koncentration utförts [3,6]. Mängden avskalat material som funktion av saltkoncentration från dessa försök, kallade avskalningsförsök 1-3, visas i figurerna 3.1-3.3. Försöken är inte direkt jämförbara med varandra vad gäller kvantitet, eftersom fryscyklerna är olika antingen till antal eller utseende.

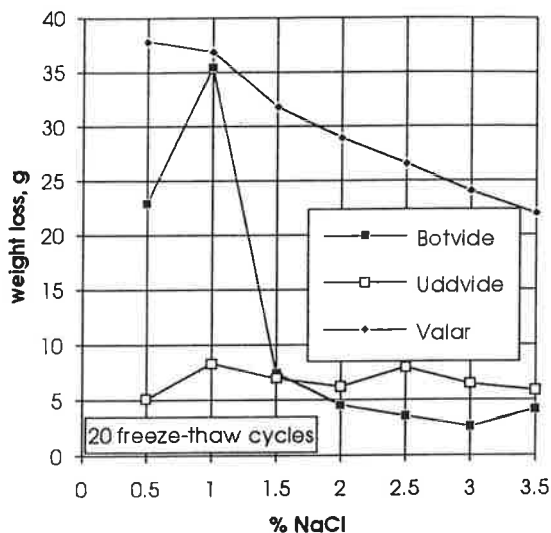
Sammanfattningsvis kan man dra följande slutsatser från dessa försök: Sandstenen Valar skiljer sig från de övriga två genom att avskalningarna är avsevärt mer omfattande samt varierar betydligt mer med saltkoncentrationen. Den pessimala saltkoncentrationen för Valar är 0,5 vikts% NaCl eller lägre. Inre skador påvisas som en minskning i dynamisk E-modul, men när det gäller denna typ av skador kan varken någon signifikant skillnad mellan stensorterna eller något tydligt beroende av saltkoncentrationen påvisas.



Figur 3.1. Resultat från avskalningsförsök 1 [3]. Sandstenar har utsatts för 20 fryscykler i NaCl-lösningar av olika koncentration.



Figur 3.2. Resultat från avskalningsförsök 2 [3]. Sandstenar har utsatts för 7 fryscykler i NaCl-lösningar av olika koncentration.



Figur 3.3. Resultat från avskalningsförsök 3 [6]. Sandstenar har utsatts för 20 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration.

Avskalningsförsök 3, som redovisas i rapport TVBM-7073 [6], har nu kompletterats genom att de tre sandstenssorterna har utsatts för tjugo fryscyklar, som är likadana som de i försök TVBM - 7073, i rent vatten. Alla tre proverna gick därvid sönder i två delar. Den mindre delen smulades sönder hos stenarna Botvide och Uddvide, varför den inte gick att skilja från det övriga avskalade materialet. Mängden avskalat material för dessa stenar kommer alltså att bli mycket hög vid 0% NaCl, men detta ger på grund av sönderdelningen ingen rättvisande bild. För sandstenen Valar blir mängden avskalat material ca 0,9 g, vilket, som synes i figur 3.3, är betydligt mindre än avskalningen vid 0,5% NaCl.

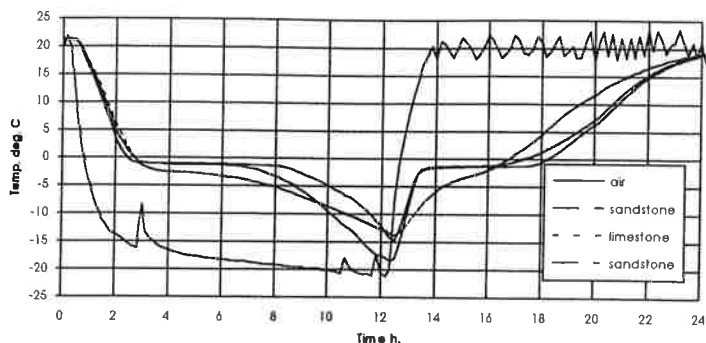
Fotografier på provkropparna från dessa avskalningsförsök visas i bilaga 4. Avskalningsförsök 1 visas i figurerna B4:1-B4:3, avskalningsförsök 2 i figurerna B4:4-B4:6 och avskalningsförsök 3 i figurerna B4:7-B4:9.

3.2 Metod

Detta försök är tänkt som ett komplement till tidigare gjorda avskalningsförsök. Tillvägagångssättet är därför detsamma som vid dessa tidigare försök. Dubbelprover av öländsk kalksten, röd, B1, frystes i NaCl (4 cykler) och Na₂SO₄-lösningar (20 cykler) innehållande 0, 0,5, 1,0, 2,0, 3,0 och 4,0 vikts% salt. Anledningen till att kalksten endast frystes i 4 cykler i NaCl-lösning är att skadorna blev så omfattande att materialet riskerade att smulas sönder helt efter fler cykler, så att ingen skillnad skulle märkas mellan de olika koncentrationerna. Dessutom frystes enkelprover av den gotländska, kalcitbundna sandstenen Uddvide i Na₂SO₄-lösningar av nämnda koncentrationer (20 cykler).

Provkroppar med dimensionen 30 x 30 x 120 mm användes i försöket. Torra prover placerades stående på ena kortsidan i lösning och fick kapillärsuga denna i fyra dygn innan de placerades i frysskåp, där de utsattes för fryscyklar. Fryscykeln är densamma som i försöket beskrivet ovan i figur 3.3 och visas i figur 3.4. Ett fotografi på försöksupställningen visas i figur 3.5. Efter ett

antal (4 eller 20) cykler avbröts försöket och provkropparna och det avskalade material torkades och vägdes. En mer detaljerad beskrivning av försöksutförandet finns i bilaga 5.



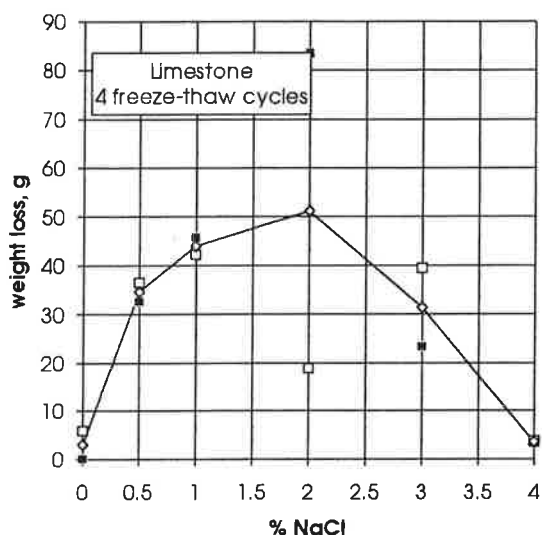
Figur 3.4. Lufttemperaturen som funktion av tiden vid avskalningsförsöken.



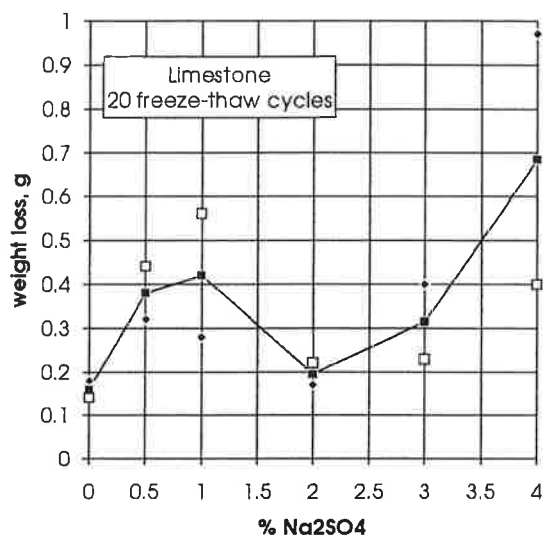
Figur 3.5. Avskalningsförsök. Bägare med prover placerade i frysskåp.

3.3 Resultat

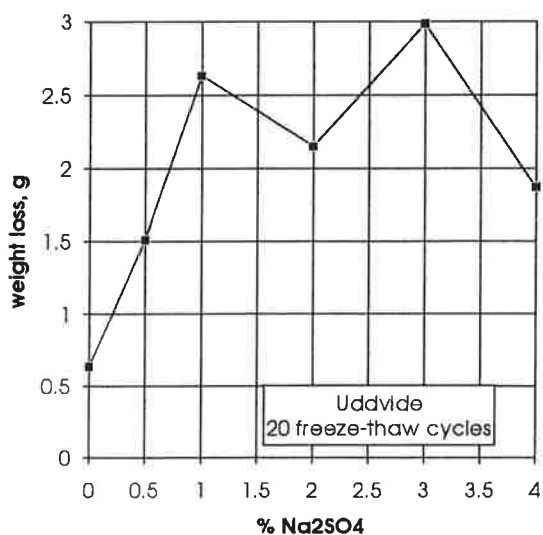
Resultaten från dessa försök, angivna som viktförlust i gram, visas i figurerna 3.6-3.8. Värdet för varje enskild provkropp, samt medelvärdet av dessa, är angivet. Medelvärdena är förbundna med en heldragen linje. E-modulförlusterna för torra respektive våta provkroppar redovisas på samma sätt i figurerna 3.9-3.14. Observera att skalan på lodräta axeln är olika för diagrammen som visar mängden avskalat material, samt att kalkstenarna i NaCl-lösning utsatts för endast fyra fryscyklar medan övriga stenar utsatts för 20 cykler. Anledningen till att kalksten endast frystes i 4 cykler i NaCl-lösning är att skadorna blev så omfattande att materialet riskerade att smulas sönder helt efter fler cykler, så att ingen skillnad skulle märkas mellan de olika koncentrationerna.



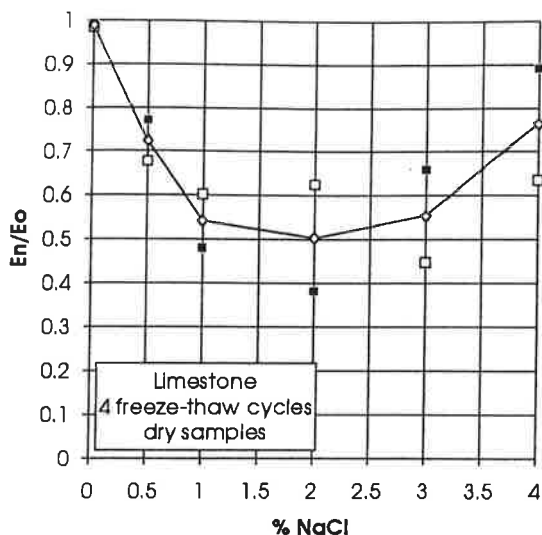
Figur 3.6. Resultat från avskalningsförsök. Kalkstenar har utsatts för 4 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration.



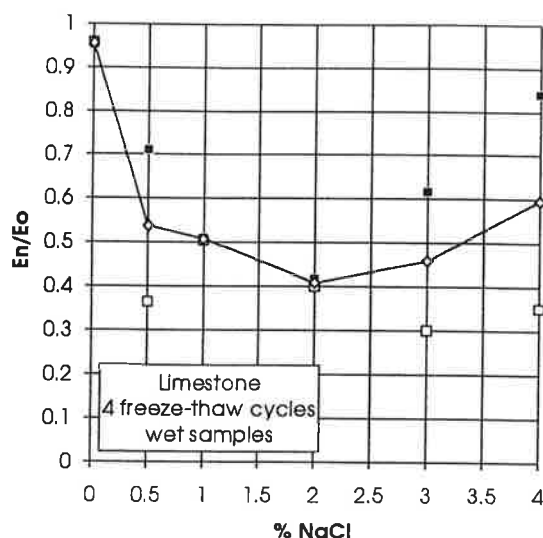
Figur 3.7. Resultat från avskalningsförsök. Kalkstenar har utsatts för 20 fryscyklar i Na₂SO₄-lösningar av olika koncentration.



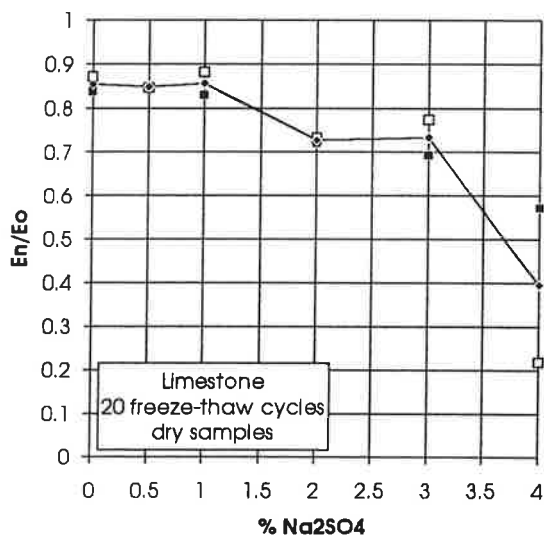
Figur 3.8. Resultat från avskalningsförsök. Sandstenen Uddvide har utsatts för 20 fryscyklar i Na₂SO₄-lösningar av olika koncentration.



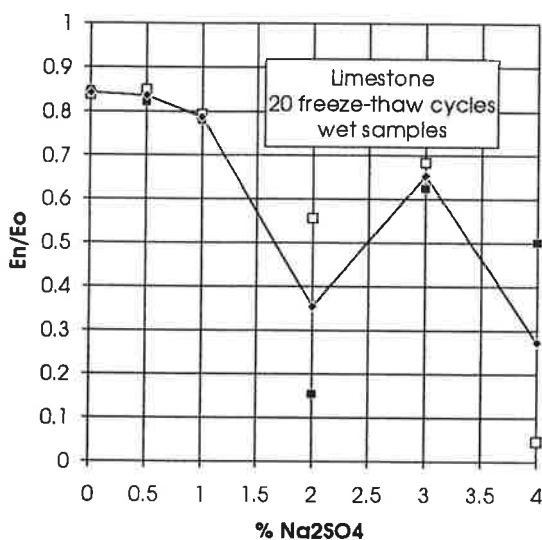
Figur 3.9. E-modulförlust mätt på torra provkroppar. Kalkstenar har utsatts för 4 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration.



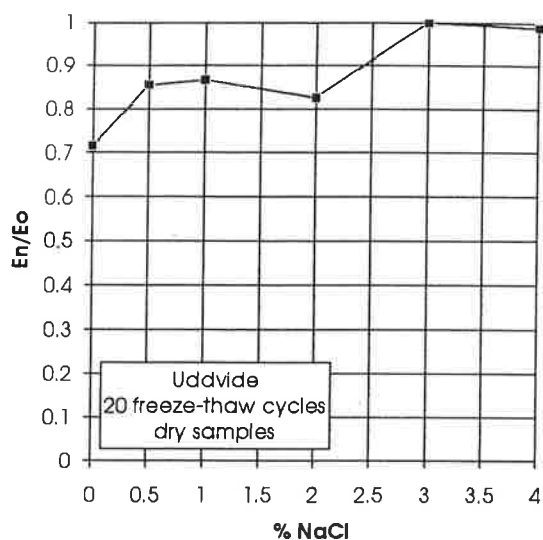
Figur 3.10. E-modulförlust mätt på våta provkroppar. Kalkstenar har utsatts för 4 i fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration.



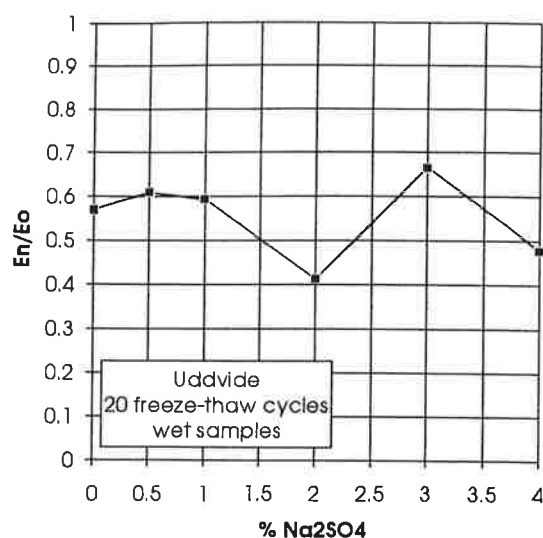
Figur 3.11. Resultat från avskalningsförsök. E-modulförlust mätt på torra provkroppar. Kalkstenar har utsatts för 20 fryscyklar i Na₂SO₄-lösningar av olika koncentration.



Figur 3.12. Resultat från avskalningsförsök. E-modulförlust mätt på våta provkroppar. Kalkstenar har utsatts för 20 fryscyklar i Na₂SO₄-lösningar av olika koncentration.



Figur 3.13. Resultat från avskalningsförsök. E-modulförlust mätt på torra provkroppar. Sandstenen Uddvide har utsatts för 20 fryscykler i Na_2SO_4 -lösningar av olika koncentration.



Figur 3.14. Resultat från avskalningsförsök. E-modulförlust mätt på våta provkroppar. Sandstenen Uddvide har utsatts i för 20 fryscykler i Na_2SO_4 -lösningar av olika koncentration.

Fotografier på alla stenar visas i bilaga 4. På kalkstenen som frusits i NaCl -lösning uppkommer de värsta skadorna på den nedre delen av provet, se figurerna B4:10 och B4:11, medan det omvända gäller för sandsten, dvs de värsta skadorna uppkommer på den övre delen av provet, se t ex figur B4:9.

3.4 Slutsatser

Det mest uppenbara i dessa försök är att kalksten är extremt känslig mot frysning i NaCl -lösning, speciellt då NaCl -koncentrationen understiger 4,0 vikts%. Detta framkommer både när det gäller avskalningar (figur 3.6) och inre skador i form av E-modulförlust (figurerna 3.9 och 3.10). Generellt kan dock sägas att det är en större osäkerhet i mätningen av E-modulförlust. Frysning av kalksten i Na_2SO_4 -lösning ger betydligt mindre omfattande skador.

Resultatet från frysningen av sandstenen Uddvide i figur 3.8 kan jämföras med resultatet från frysförsök 3 i figur 3.3, eftersom fryscyklerna i dessa båda fall var lika både till antal och utseende. Behållarna var emellertid inte identiska i de två försöken. Vid denna jämförelse framkommer att för sandsten blir avskalningarna värre vid frysning i NaCl -lösning än i Na_2SO_4 -lösning. De värsta skadorna uppkommer vid 1,0-3,0 vikts% Na_2SO_4 . Vad de inre skadorna beträffar tenderar dessa att öka med ökande Na_2SO_4 -koncentration.

3.5 Noggrannhet och felanalys

Vägningen sker med noggrannhet på 0,01 g. Den stora felkällan i samband med vägningen är den kvantitativa uppsamlingen av det avskalade materialet, särskilt när det gäller kalksten, där materialet lossnar i ganska stora bitar. Allt material som med lätthet kan lossas med fingrarna räknas som avskalat, men karaktären på denna definition ger utrymme för individuella bedömningar.

De filter som används för uppsamling av det avskalade materialet tar upp icke oansenliga fuktmängder ur rumsluften på endast några få minuter: Vikten på ett filter direkt uttaget ur torkskåp vid 105 °C kan i sämsta fall väga 0,1 g mer då det ställt in sig i jämvikt med rumsluft. Vid försöken med Na₂SO₄-lösningar vägdes varje filter individuellt i jämvikt med rumsluft.

4 Diskussion kring jämförelse av resultat från expansions- och avskalningsförsök

Vid avskalningsförsöken har proverna fått kapillärsuga lösning i fyra dygn, varefter de utsatts för 20 fryscyklar. Fryscyklerna ser ut som i figur 3.4, där det framgår att proverna är tinade ca 8 timmar per dygn. Eftersom avskalningsproverna inte kan suga lösning under den tid de befinner sig i fruset tillstånd, motsvarar provernas sluttillstånd ungefär att de kapillärsugit lösning i 11 dygn. Avskalningsprovernas tillstånd kommer därmed att närmast vara jämförbara med de expansionsprover som fått kapillärsuga lösning i 7 eller 21 dygn. Den slankare dimensionen hos expansionsproverna gör emellertid att dessa blir genomvättade på kortare tid. Expansionerna hos sandstensprover som fått suga 7 - 21 dygn är många gånger så små att det är svårt att konstatera några skillnader mellan de olika stensorterna och saltlösningarna. Dessutom är skillnaden mellan prover som fått suga 7 och 21 dygn i vissa fall avsevärd, eftersom mätnadsgraden just under denna tid överskrider ett kritiskt värde. Se bilaga 3. Alla ovan nämnda fakta, samt att fryshastigheten är olika i de olika försöken, gör att det är svårt att jämföra resultat från avskalningsförsök med resultat från expansionsförsök. Vid en jämförelse kan man ändå konstatera att:

1. Kalksten är betydligt mer känslig mot NaCl i avskalningsförsöken än vad sandsten är. I expansionsförsöken gäller det omvända.
2. Kalksten är betydligt mer känslig mot NaCl i avskalningsförsöken än mot Na₂SO₄. I expansionsförsöken är skillnaden mellan de båda salterna mindre, med det omvända tenderar att gälla, dvs Na₂SO₄ ger värre skador än NaCl.
3. Sandstenen Valar är den mest känsliga av sandstenarna vid avskalningsförsöken, medan den är minst känslig i expansionsförsöken. (Valar har endast utsatts för avskalningsförsök i NaCl-lösningar.)

Utifrån detta kan man konstatera att olika frysmetoder kan ge helt olika resultat, vilket förmodligen beror på att mekanismen bakom förstörelseprocessen är olika. Detta bekräftar än en gång hur viktigt det är att förstå vad som händer vid nedbrytning för att kunna tolka ett fenomen korrekt. Metoden att mäta expansion har dock två fördelar jämfört med avskalningsmetoden: Först och främst är den betydligt snabbare, eftersom det endast krävs en fryscykel för att ett resultat skall erhållas. Dessutom efterliknas förhållandena i verkligheten bättre, eftersom fasader och liknande sällan är omgivna av vatten.

5 Transport av salt

I samband med de här redovisade studierna uppkommer frågan om saltjonerna i omgivande lösning transporteras in i porsystemet så att saltkoncentrationen i porlösningen är densamma som i omgivande lösning. Tidigare avskalningsförsök har visat att detta är fallet åtminstone när det gäller sandsten och NaCl-lösning, se figurerna 4.1 och 4.2. Den "verkliga" saltmängden, S_r , har erhållits som skillnaden i vikt hos de torra provkropparna före och efter försöket, med korrektion för det avskalade materialet, Q_{ds} (ekv. 4.2).

Eftersom provkropparna som frusits i rent vatten minskat något i vikt (på grund av urlakning?) justeras samtliga vikter för detta genom att denna viktminskning, a , (ekv. 4.1) adderas till vikterna efter frysning. Beräknad saltmängd är den saltmängd som erhålls genom att mängden lösning i provet är känd, liksom lösningens koncentration, C (ekv. 4.3). Detta samband har inte kunnat visas på samma sätt i de försök som redovisas i denna rapport, varken då det gäller expansionsförsöken eller avskalningsförsöken. Detta beror på att mängden salt som kan inlagras i materialen i dessa försök är betydligt lägre, dels beroende på lägre porositet hos materialet (kalksten) och dels beroende på lägre saltkoncentrationer. Förmodligen är det ändå rimligt att anta att omgivande lösning transporteras in i porsystemet i en torr sten utan att saltjonerna hindras eller ackumuleras i porsystemet. Detta antagande grundar sig på att porerna i stenen är tillräckligt stora för att fri kapillärsugning av lösning skall kunna ske och att materialet i stenen är inert och inte interagerar kemiskt med varken vattnet eller saltjonerna. Detta skulle emellertid behöva studeras och visas i ett separat försök.

$$\text{För provkropp frusen i rent vatten gäller:} \quad Q_{dn}^{(0\%)} + Q_{ds}^{(0\%)} - Q_{d0}^{(0\%)} = -a \quad (4.1)$$

$$S_r = Q_{dn} + Q_{ds} - Q_{d0} + a \quad (4.2)$$

$$S_c = (Q_{wn} + Q_{ds} - Q_{d0}) \cdot C \quad (4.3)$$

Q_{dn} torr vikt efter frysning

Q_{ds} torr vikt avskalat material

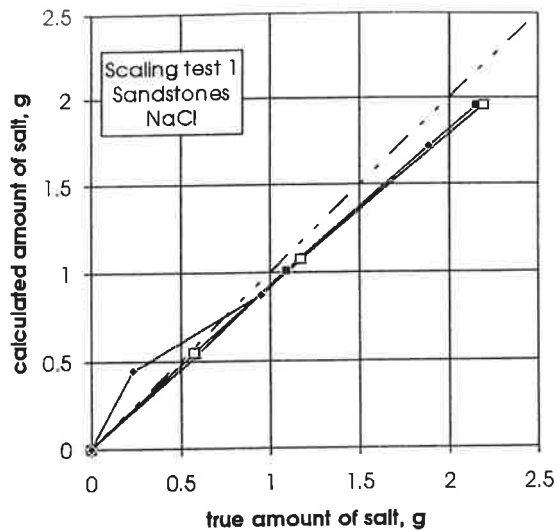
Q_{d0} torr vikt före frysning

S_r "verklig" saltmängd

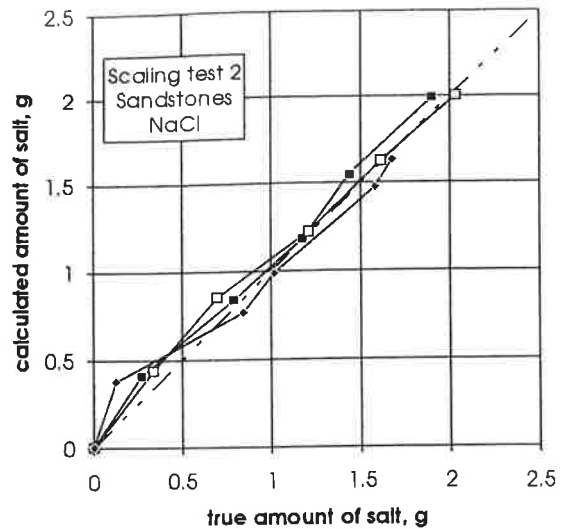
Q_{wn} våt vikt efter frysning

S_c beräknad saltmängd

C masskoncentration salt



Figur 4.1. Sambandet mellan beräknad och uppvägd saltmängd efter avskalningsförsök 1 [3]. (Streckade linjen: $Y = X$)



Figur 4.2. Sambandet mellan beräknad och uppvägd saltmängd efter avskalningsförsök 2 [3]. (Streckade linjen: $Y = X$)

6 Fuktransport

Med den skoppmetoden har fuktransportkoefficienter erhållits för den gotländska sandstenen Valar och för en bohusgranit (Bohus Röd Bratteby). Teoretisk bakgrund, metodbeskrivning och resultat presenteras i bilaga 6. Bilagan är författad av univ. adj. Göran Hedenblad och försöken är utförda av tekn. dr. Wojciech Roszak. Till dessa riktas härmed ett varmt tack.

7 Förslag till fortsatta studier

7.1 Expansionsförsök med olika fryscyklar

Ett urval av kombinationer av mätnadsgrad och salthalt testas för olika stensorter med syfte att se hur fryscykelns utseende påverkar expansionen. Fryscykeln varieras därvid på tre sätt:

1. Ett uppehåll i fryscykeln görs vid olika negativa temperaturer.
2. Fryshastigheten varieras.
3. Effekten av upprepade fryscyklar studeras.

Dessutom görs enstaka test med lägsta frystemperatur lägre än -20 °C för att se om något oväntat därvid sker. Expansionförsöket som redovisats i denna rapport kan kompletteras, exempelvis med lägre saltkoncentrationer. Eftersom det kan konstateras att mätnad kan uppnås genom kapillärsugning är det fortsättningsvis tillräckligt att studera prover som fått kapillärsuga lösning olika lång tid för att uppnå olika mätnadsgrader.

7.2 Expansionsförsök med prover nedsänkta i lösning

Behållare tillverkas till dilatometern så att proverna kan vara omgivna av lösning samtidigt som längden mäts. Prover kan därvid frysas med olika inre och yttre salthalt för att få en ökad förståelse för skillnader och likheter mellan förstörelsemekanismerna i avskalningsförsöken och expansionsförsöken.

Med hjälp av denna utrustning kan en eventuell längdändring i samband med jonbyte i lermineral studeras. Denna studie görs vid konstant temperatur. Ett sådant projekt är utarbetat av Peter Schweda, Avdelningen för geologi och geokemi, Stockolms Universitet, och är tänkt att utföras i samarbete med Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.

7.3 Avskalningsförsök

Olika kombinationer av inre och yttre salthalt studeras för en sandsten (Valar) och kalksten (Öland B1). Låga saltkoncentrationer är av särskilt intresse, eftersom de i naturen förekommande halterna är låga. Låga saltkoncentrationen ger dessutom stora skador. Efter exempelvis 7, 14, 28, 42 och 56 fryscyklar avlägsnas det avskalade materialet för vägning, och provkroppens massa och E-modul mäts, varefter provkroppen placeras i ny lösning och åter utsätts för frysningar och upptiningar.

7.4 Porstorleksfördelning

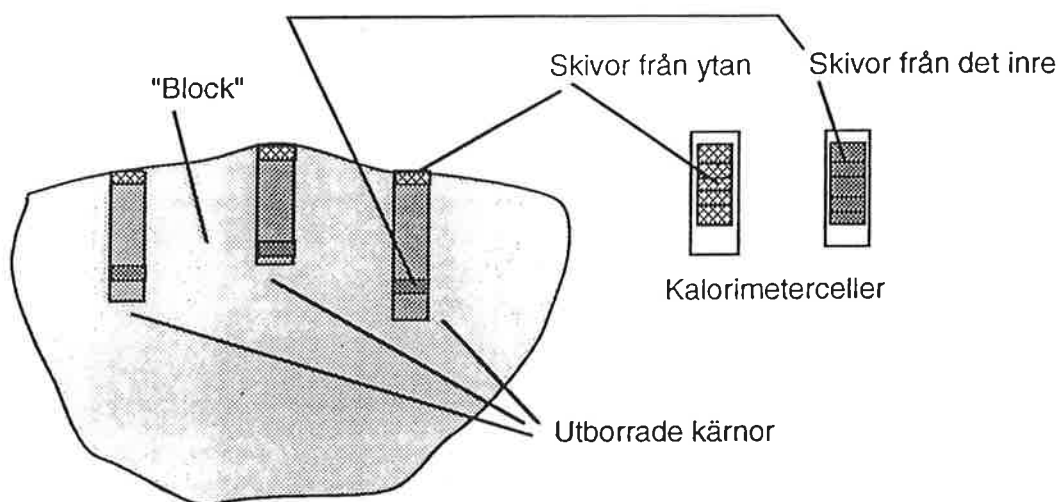
Porstorleksfördelning för materialen kan erhållas med ett flertal olika metoder. Det är därvid intressant att jämföra dessa resultat.

Jämviktsfuktkurvor vid desorption och adsorption i hygroskopiskt område ger en inre yta med hjälp av BET-ekvationen. Utifrån vissa antaganden om porernas utseende kan en porstorleksfördelning räknas fram ur den inre ytan. Jämviktsfuktkurvor vid desorption och adsorption ovanför hygroskopiskt område erhålls med hjälp av s. k. suctionkurvor.

BET-ekvationen används även då den inre ytan beräknas med N_2 -sorption. Utrustning för detta ändamål kan hyras på Kemicentrum i Lund. En porstorleksfördelning kan även erhållas med kvicksilverporosimetri. Även denna utrustning kan hyras på Kemicentrum i Lund.

7.5 Studier av vittrad och ovittrad bohusgranit

Vittrad och ovittrad bohusgranit studeras i lågtemperaturkalorimeter för att få en uppfattning om isbildningen i den vittrade ytan skiljer sig från isbildningen i den ovittrade. Cylindrar borrar ur ett vittrat granitblock, sågas och läggs i en kalorimetercell så som visas i figur 6.1. Kalorimetern som skall användas finns på Danmarks Tekniska Højskole.



Figur 6.1. Vittrat material från ytan och ovittrat material från det inre av ett granitblock erhålls genom sågning av borrhärnor [7].

Adsorption av vattenånga på täta stenar, exempelvis granit, studeras lämpligen med hjälp av mikrogravimetri och isoterm mikrokalorimetri. Dessa utrustningar finns tillgängliga på Kemicentrum i Lund.

7.6 Övriga försök

Med DTA/TG, som finns på Kemicentrum i Lund, kan exempelvis vattenbindningen hos olika material vid olika temperaturer studeras.

Fukttransportkoefficienter med koppmetoden har erhållits för sandstenen Valar. Försöksresultaten är dock ännu inte färdigutvärderade. Koppförsök pågår för en bohusgranit (Röd Bratteby). Koppförsök kan utföras för ytterligare stenar.

Urlakning av kalцит studeras genom att tunna skivor eller krossat material lagras i en stor mängd destillerat eller avjonat vatten, som omrörs.

Ett urval av ovan beskrivna försök utförs för konsoliderade och hydrofoberade stenar.

Kopplad salttransport och fukttransport studeras.

Texturen på kalksten och sandsten kan analyseras med tunnslipsmikroskop med tillhörande mjukvara som finns på Avdelningen Byggnadsmaterial, LTH. Kornstorleksfördelningen i sandstenen kan eventuellt studeras med formler för luftporfördelning i betong.

8 Referenser

1. Fagerlund, G. och Wessman, L. Frostnedbrytning av natursten, Lägesrapport mars 1992, Rapport TVBM-3047, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1992
2. Wessman, L. Frostnedbrytning av natursten, Försöksmetodik, Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, december 1992, Rapport TVBM-7036, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1992
3. Wessman, L. Saltfrostnedbrytning av gotländsk sandsten, Preliminära försök, januari 1993, Rapport TVBM-7038, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1993
4. Wessman, L. Frostnedbrytning av natursten, Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, Mars 1993, Rapport TVBM-7046, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1993
5. Wessman, L. Frostnedbrytning av natursten, Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, Mars 1994, Rapport TVBM-7073, LTH Byggnadsmaterial, Lund 1994
6. Fagerlund, G. Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material, Rapport 34, Institutionen för byggnadsteknik, LTH, Lund 1972
7. Fagerlund, G. Anteckningar från möte med Runo Löfvendahl 95-02-03, samt anteckningar från programförslag diskuterat 94-09-28.

BILAGA 1

Beskrivning av försöksutförandet för expansionsförsök

Provkroppsdimension: 2x2x15 cm

1. Skruvar limmas så centralt som möjligt i kortändarna för infästning i dilatometern. För placering av termoelement borrar ett 1 cm djupt hål i centrum av ena långsidan på varje provkropp.
2. Provkropparna torkas i 105 °C under minst 4 dygn.
3. Provkropparna får svalna i exsickator och vägs.
4. Egenfrekvensen mäts på de torra provkropparna.
5. Provkropparna konditioneras till önskad mätnadsgrad med önskad lösning antingen genom kapillärsugning eller genom vakuummätning.
6. De våta (surface dry) provkropparna vägs i luft och vatten och egenfrekvensen mäts.
7. Termoelement placeras i hålen och provkropparna viras in i plastpåsar, placeras i dilatometern och utsätts för 1 fryscykel. Temperatur och längd för varje provkropp registreras en gång per minut under frysningen.
8. Efter avslutad fryscykel vägs de tinade provkropparna och egenfrekvensen mäts.
9. Provkropparna torkas i 105°C under minst 4 dygn.
10. Provkropparna får svalna i exsickator och vägs.
11. Egenfrekvensen mäts på de torra provkropparna.
12. De torra provkropparna vakuummätas med vatten och vägs i luft och vatten.

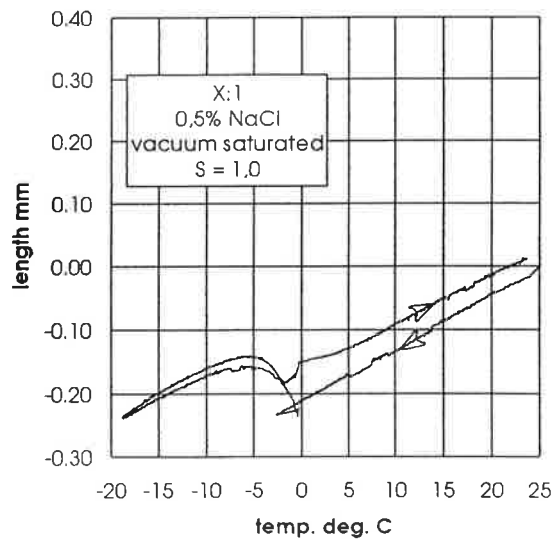
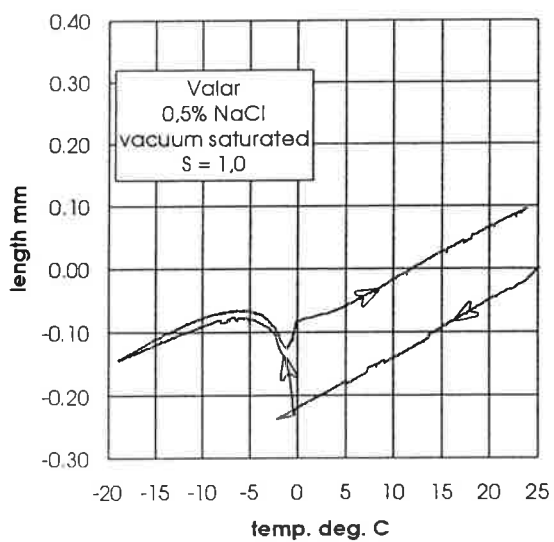
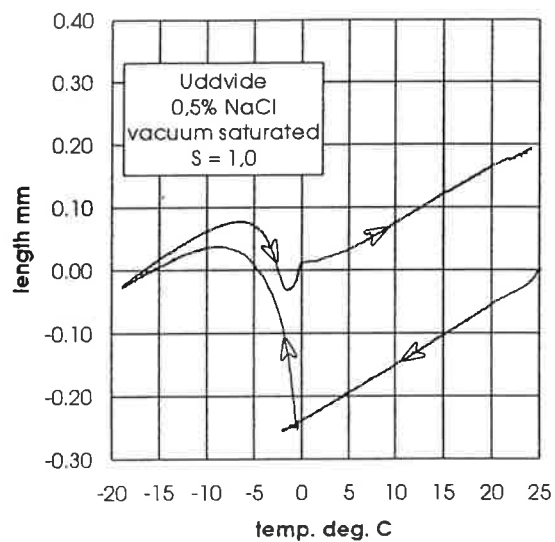
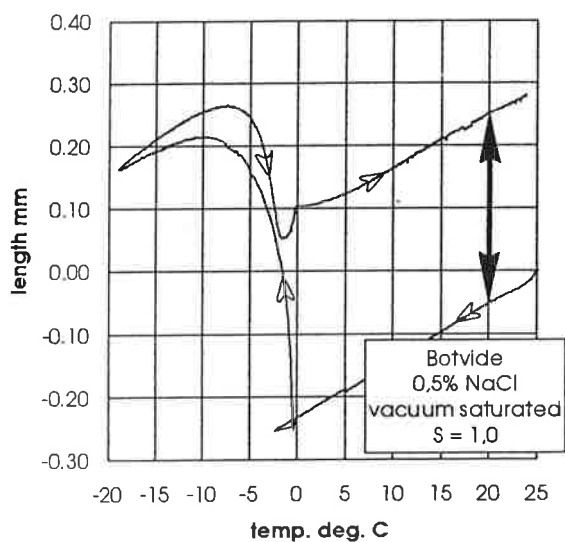
BILAGA 2

Expansionsförsök

Utskrifter från mätfiler

Mättade sandstensprover

0,5% NaCl



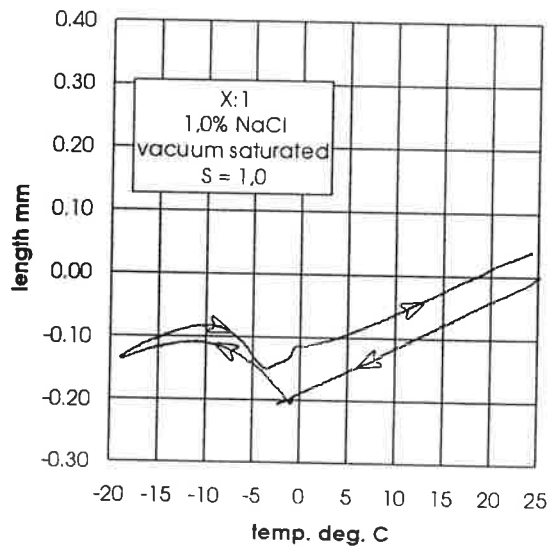
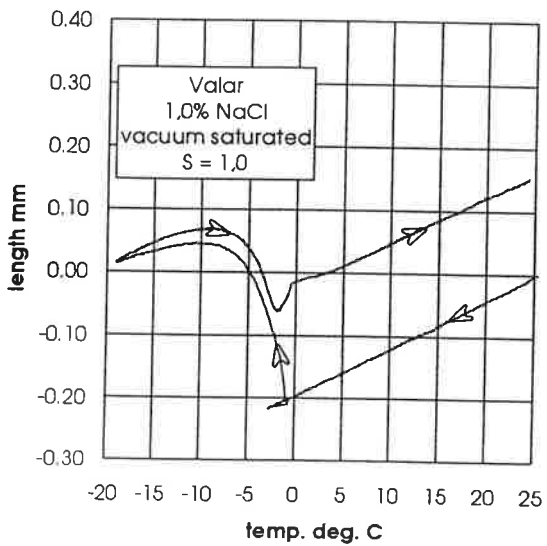
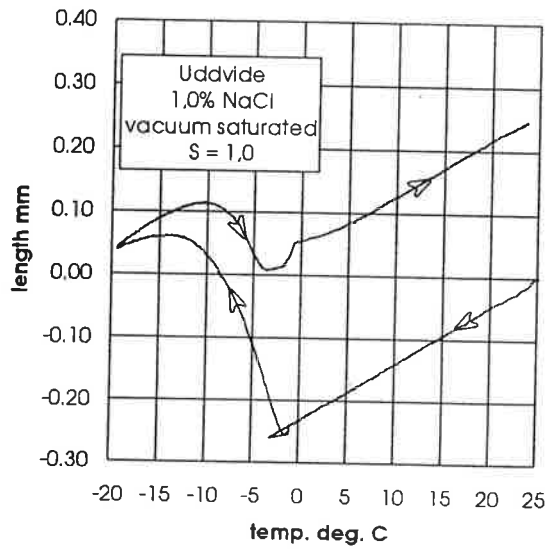
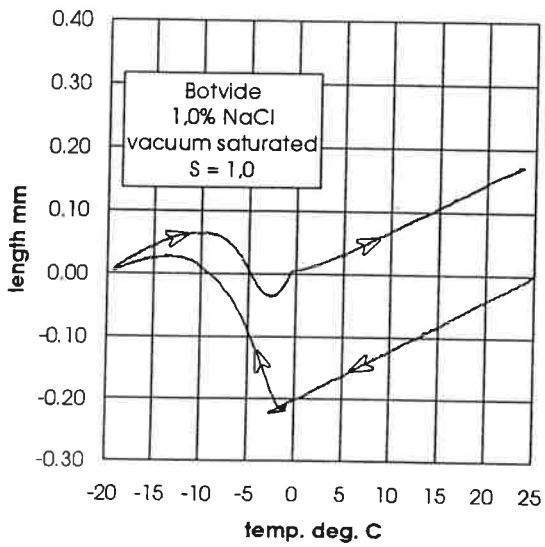
BILAGA 2

Expansionsförsök

Utskrifter från mätfiler

Mättade sandstensprover

1,0% NaCl



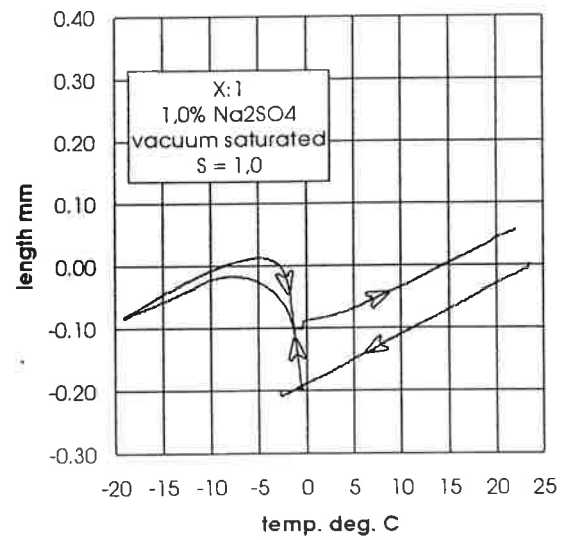
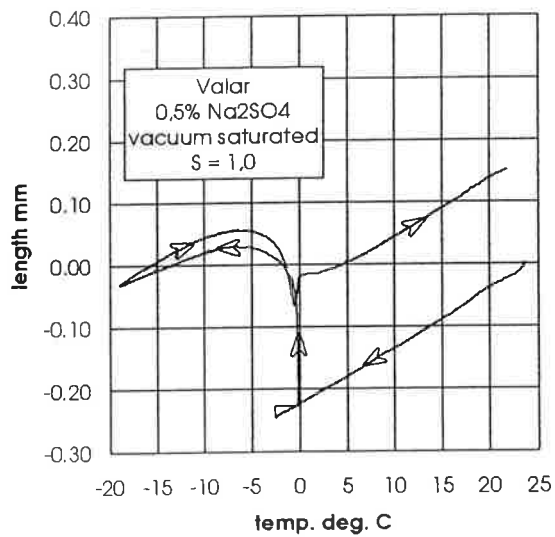
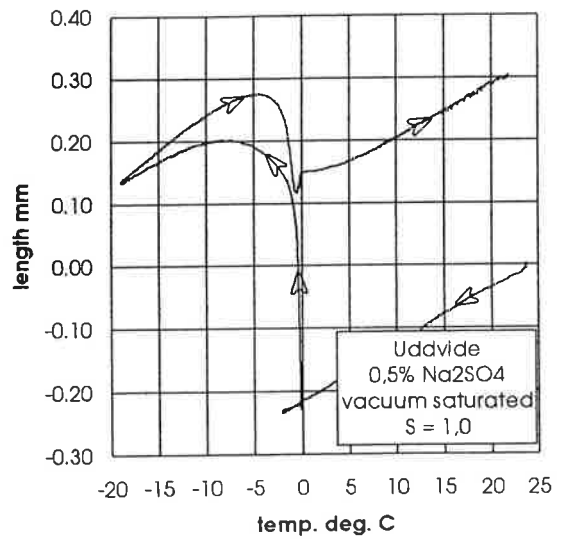
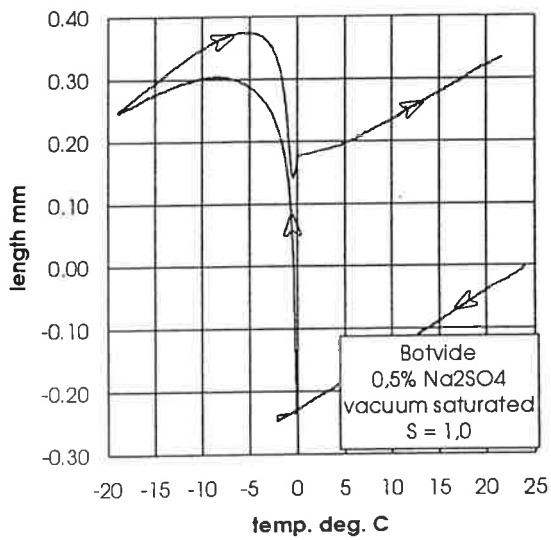
BILAGA 2

Expansionsförsök

Utskrifter från mätfiler

Mättade sandstensprover

0,5% Na₂SO₄



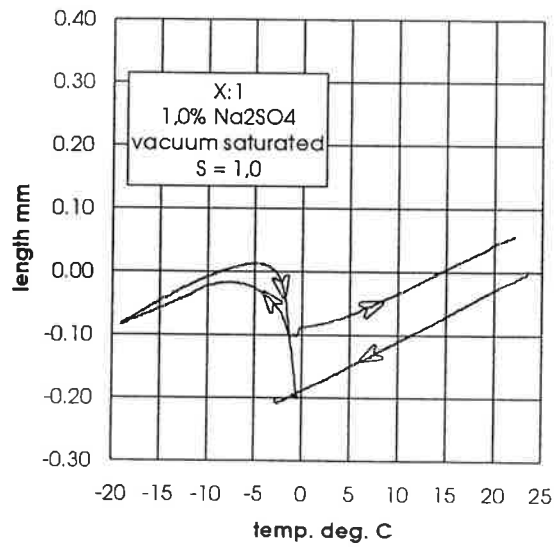
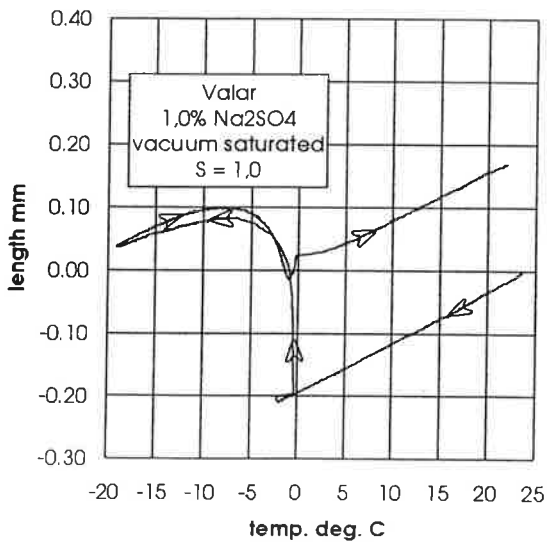
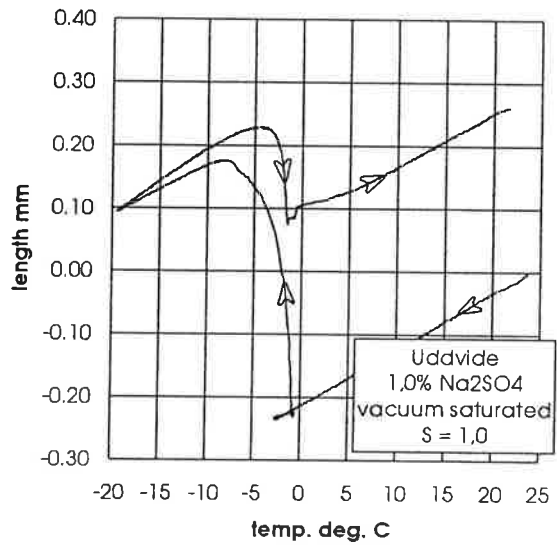
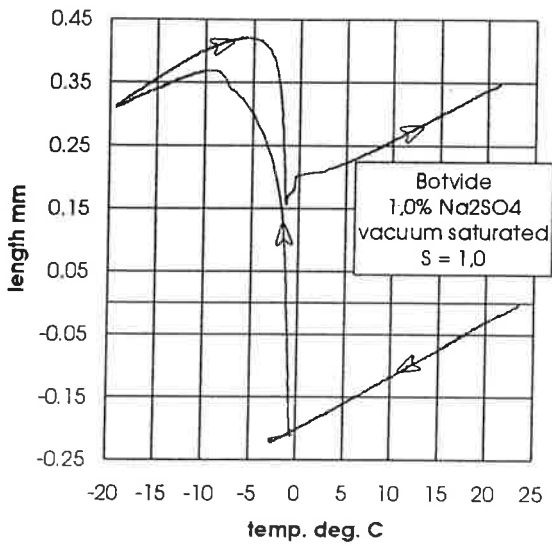
BILAGA 2

Expansionsförsök

Utskrifter från mätfiler

Mättade sandstensprover

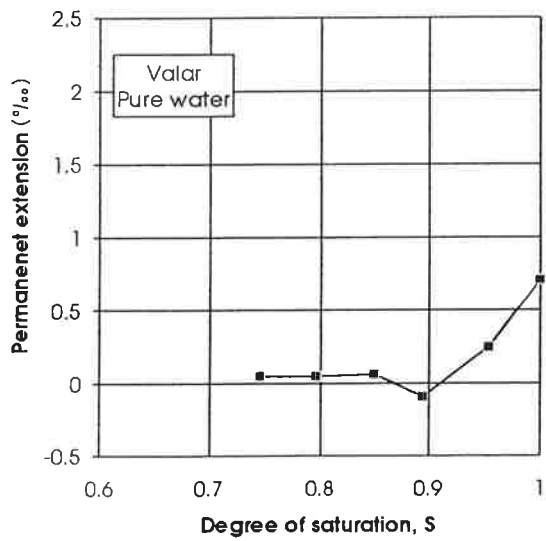
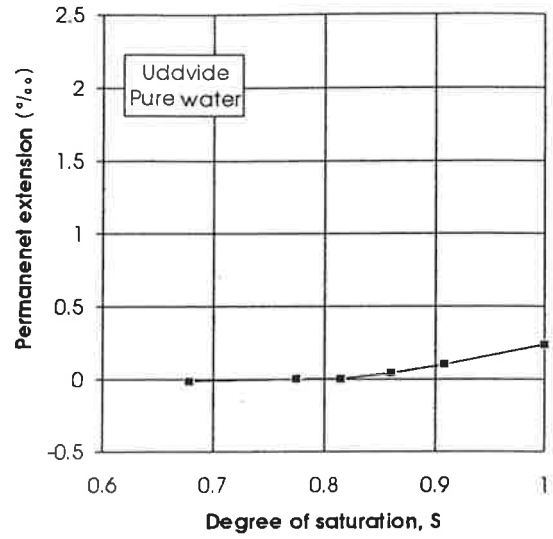
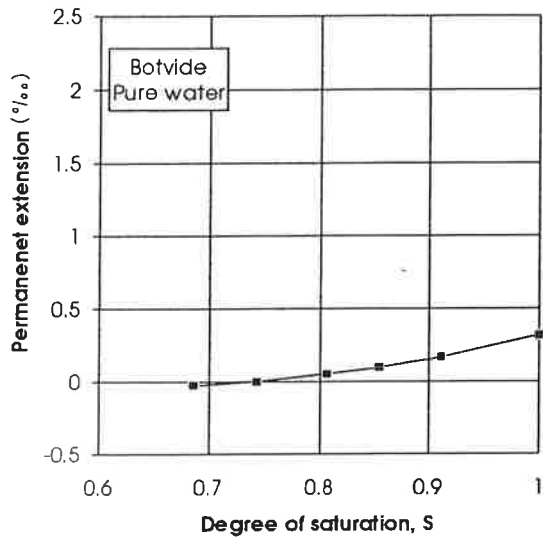
1,0% Na₂SO₄



BILAGA 3

Resultat från expansionsförsök

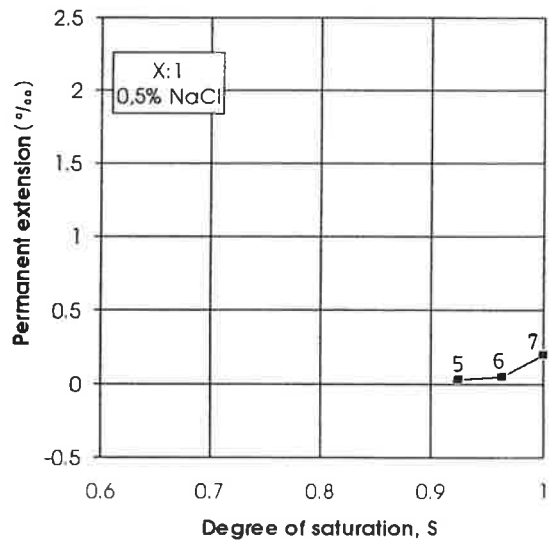
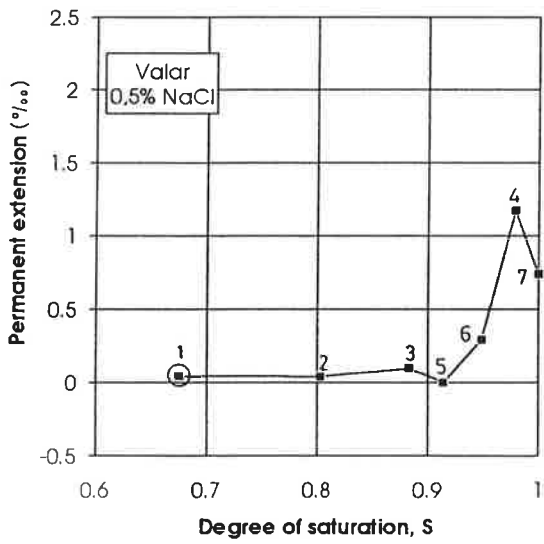
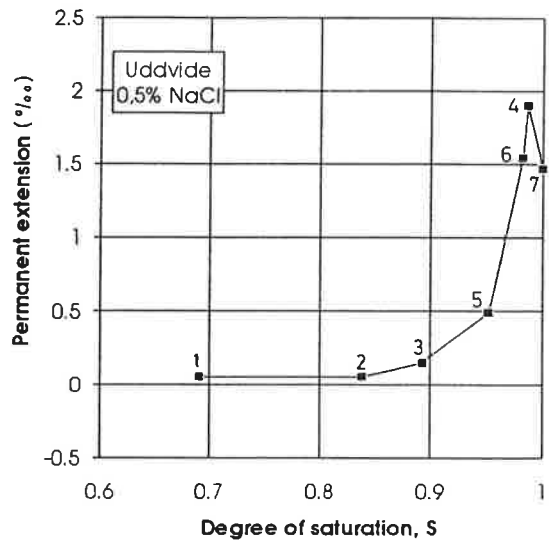
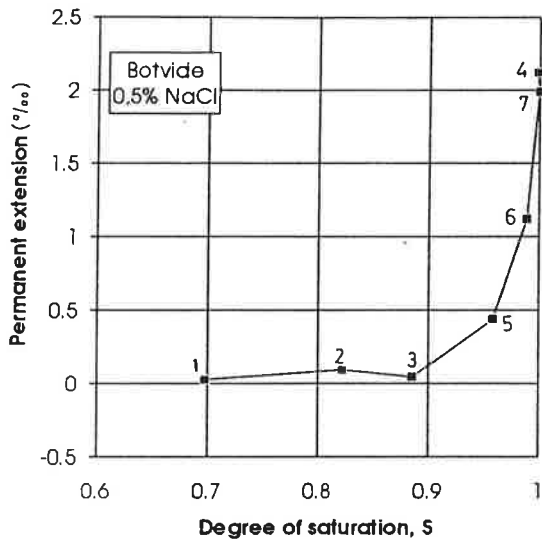
Rent vatten



BILAGA 3

Resultat från expansionsförsök.

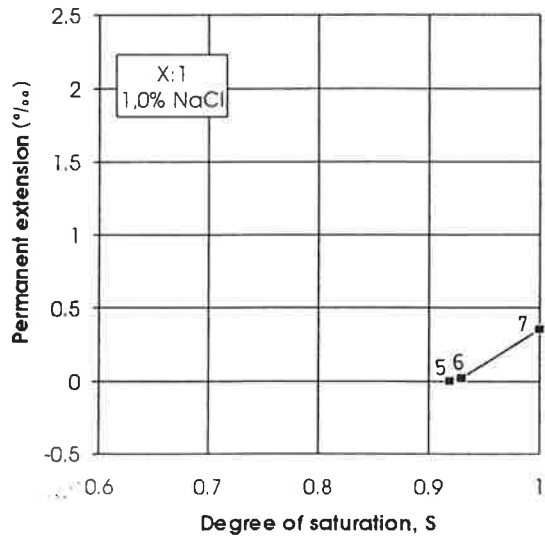
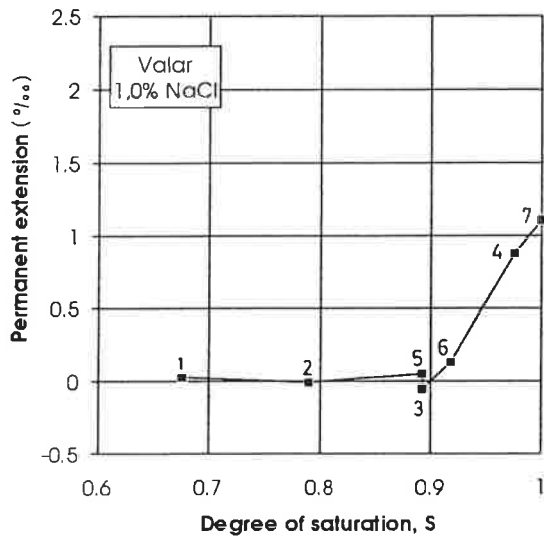
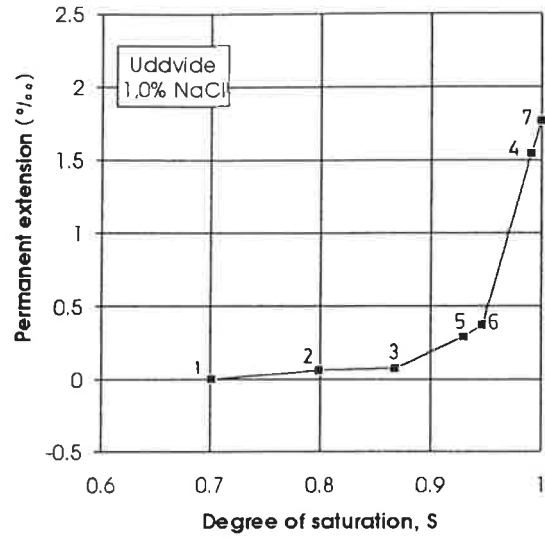
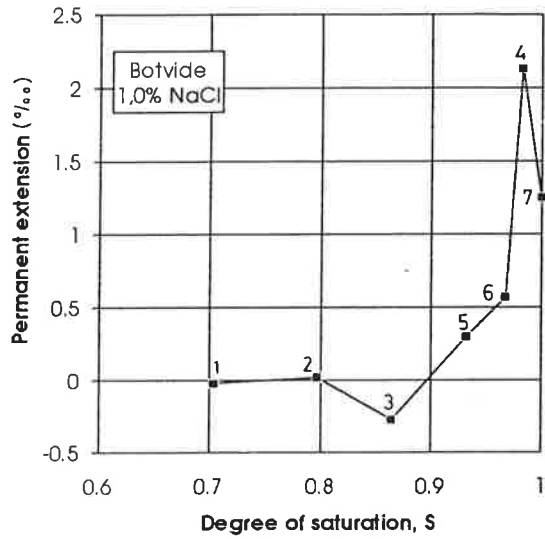
0,5% NaCl



BILAGA 3

Resultat från expansionsförsök

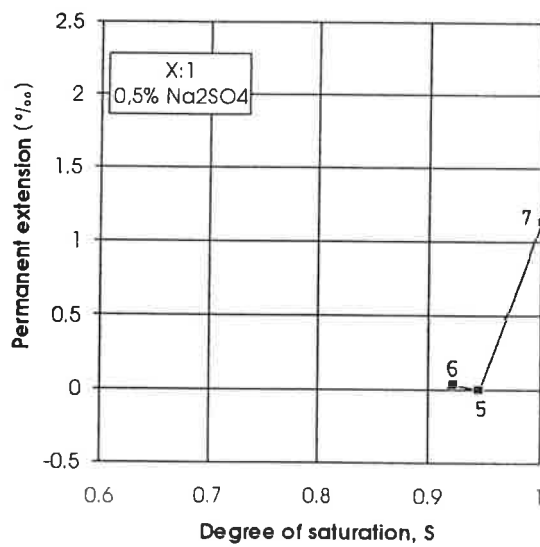
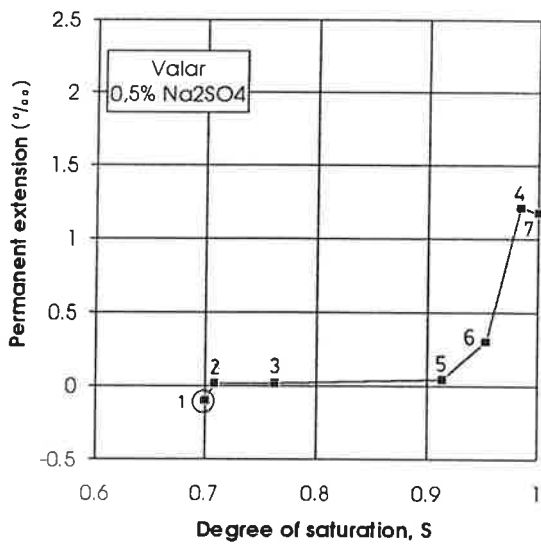
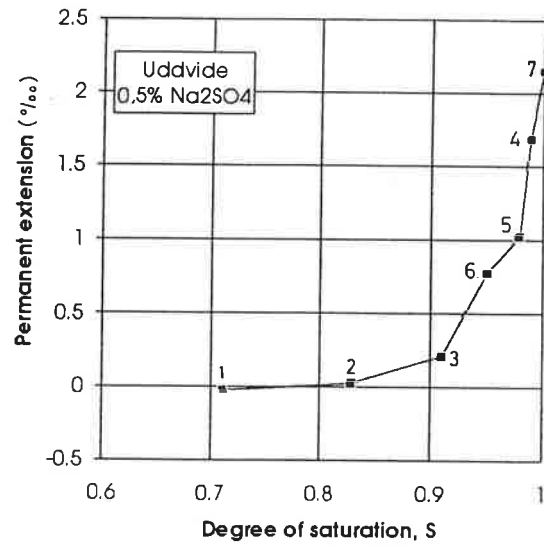
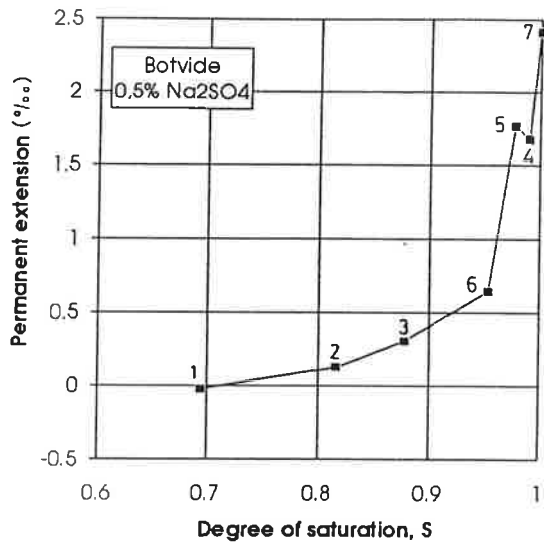
1,0% NaCl



BILAGA 3

Resultat från expansionsförsök

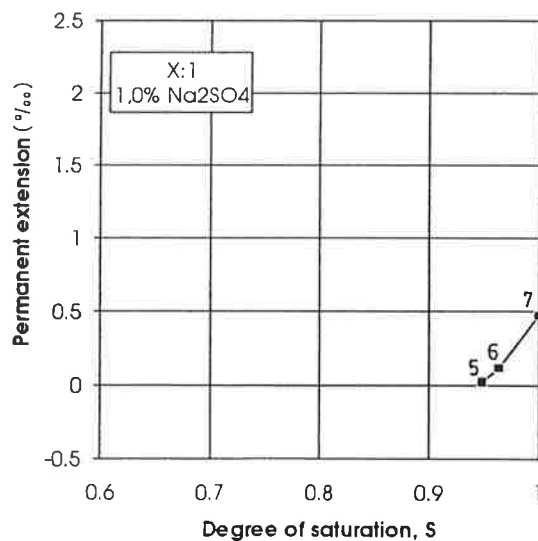
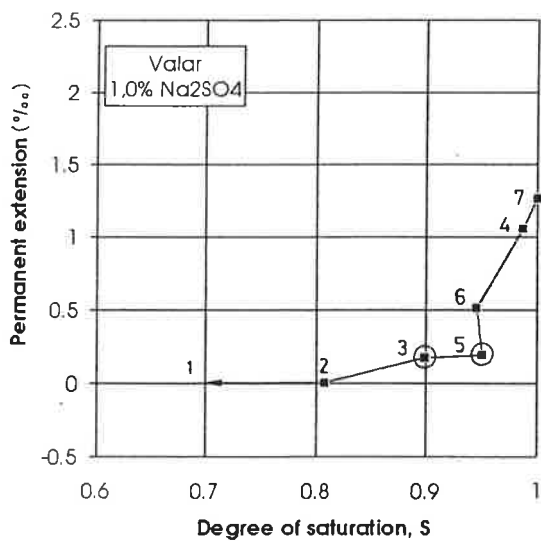
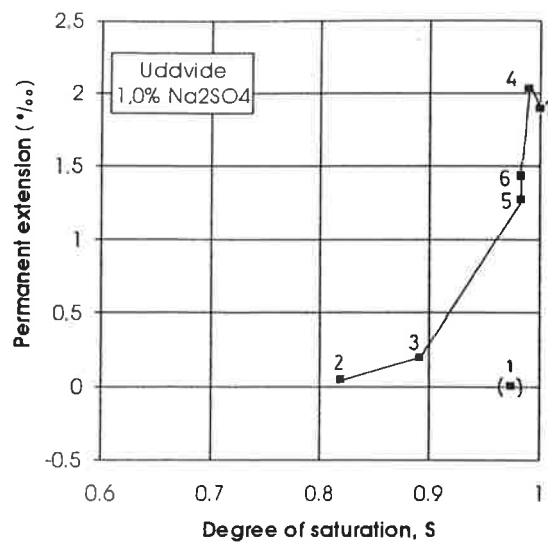
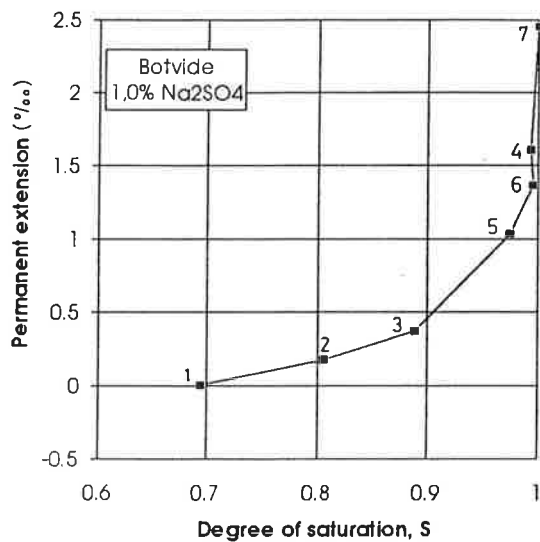
0,5% Na₂SO₄



BILAGA 3

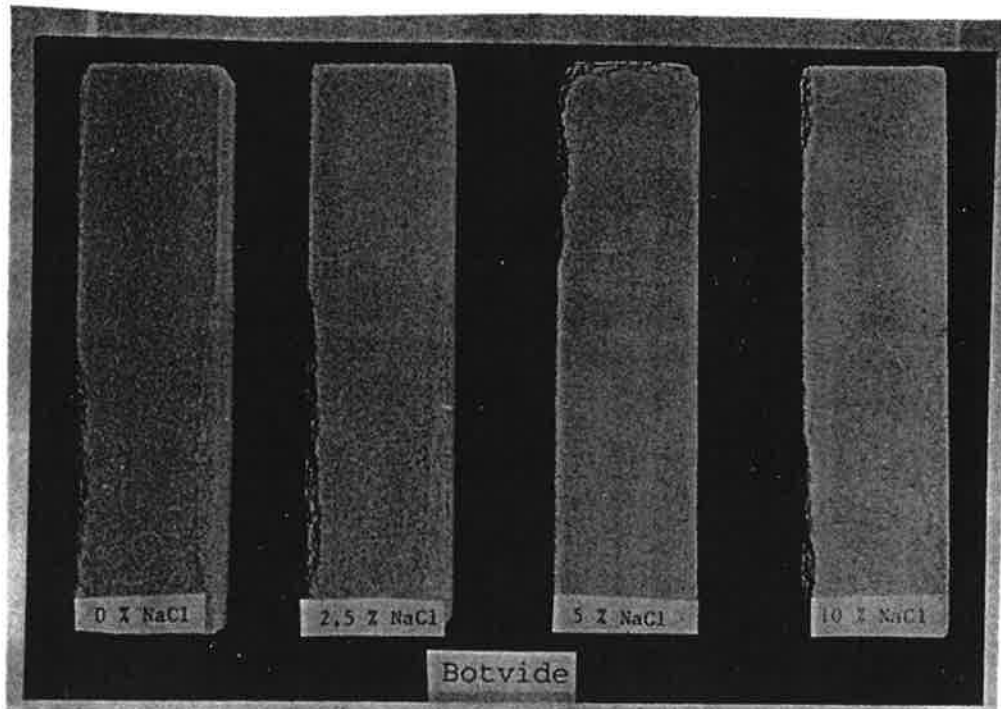
Resultat från expansionsförsök

1,0% Na₂SO₄

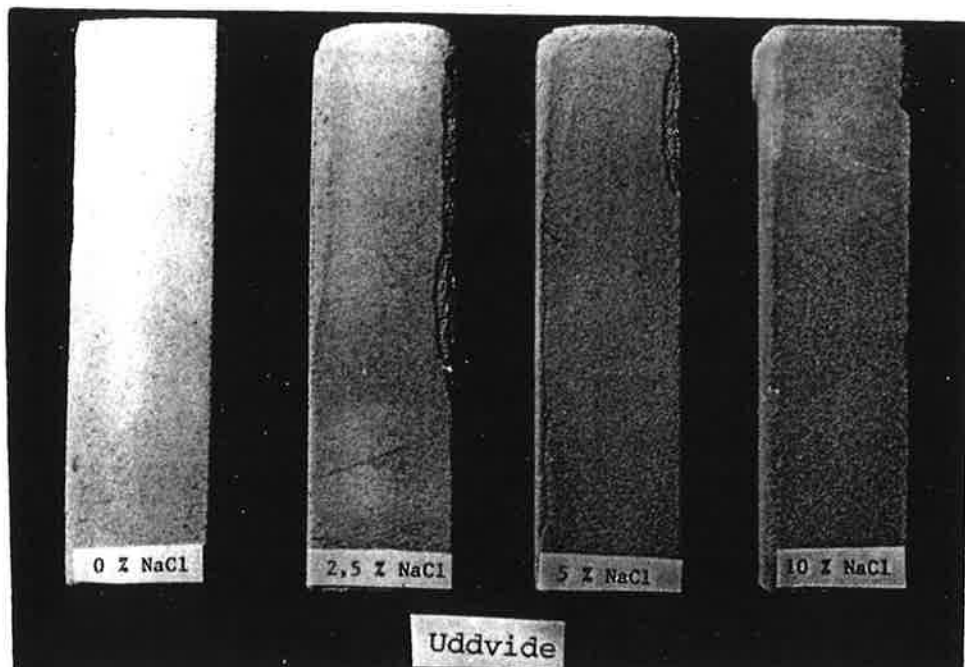


BILAGA 4

Fotografier från avskalningsförsök



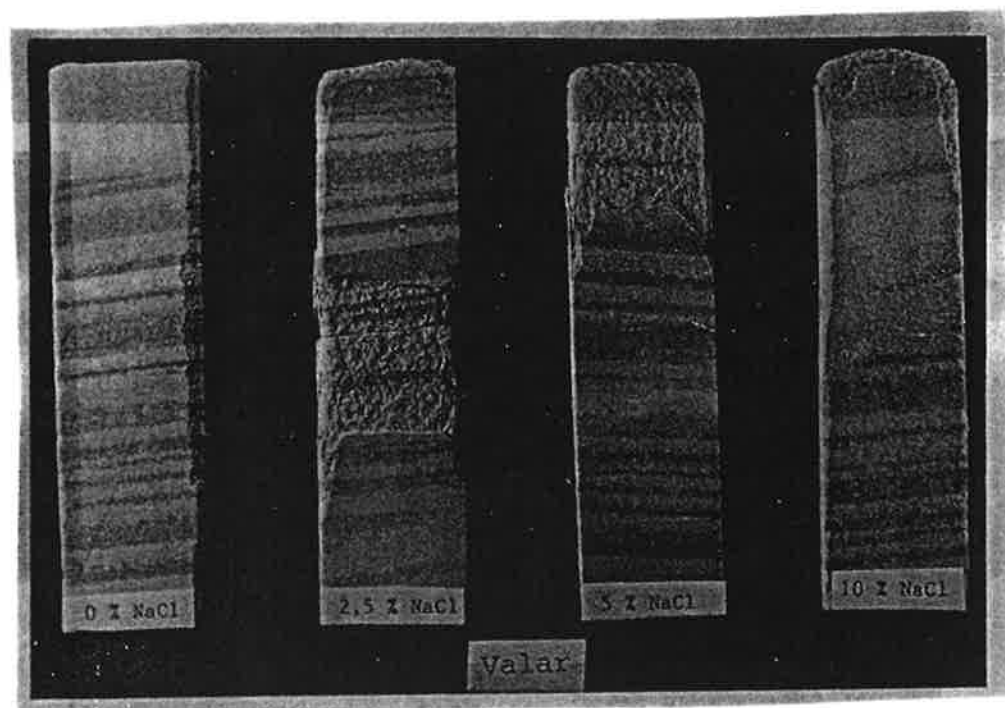
Figur B4:1. Avskalningsförsök 1 [3]. Sandstenen Botvide har utsatts för 20 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.



Figur B4:2. Avskalningsförsök 1 [3]. Sandstenen Uddvide har utsatts för 20 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.

BILAGA 4

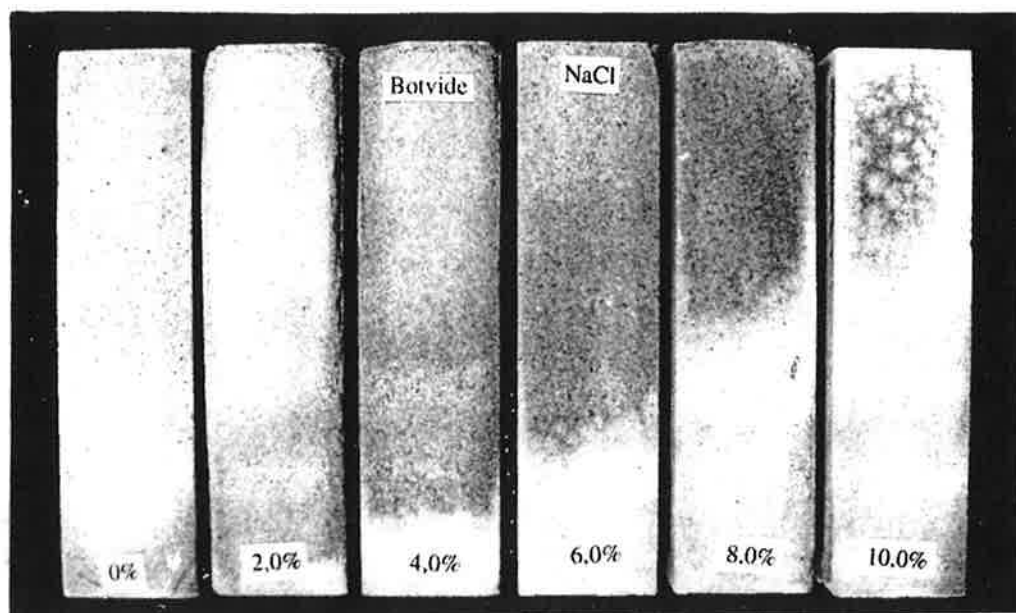
Fotografier från avskalningsförsök



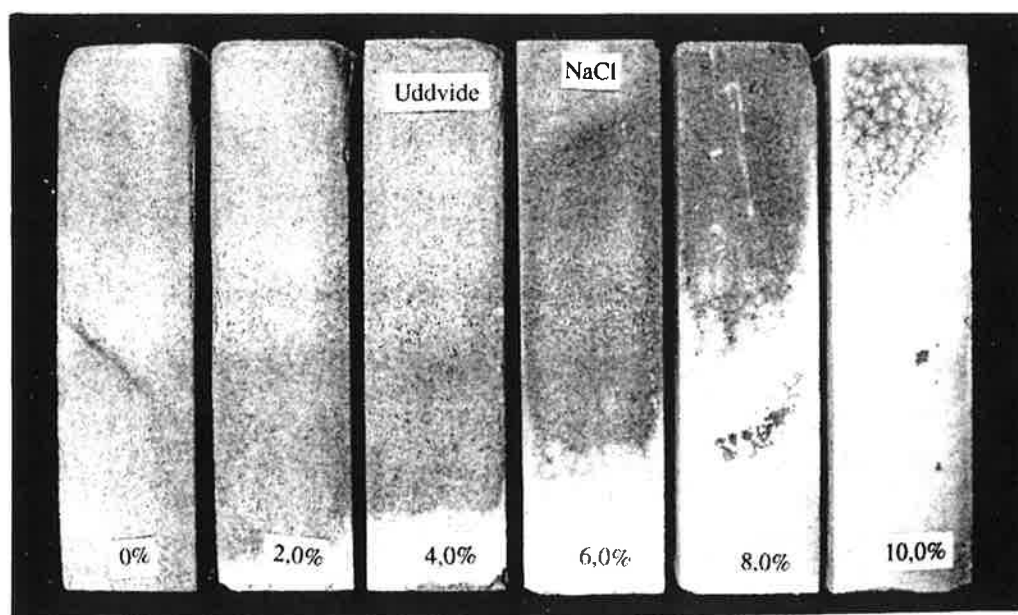
Figur B4:3. Avskalningsförsök 1 [3]. Sandstenen Valar har utsatts för 20 fryscykler i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.

BILAGA 4

Fotografier från avskalningsförsök



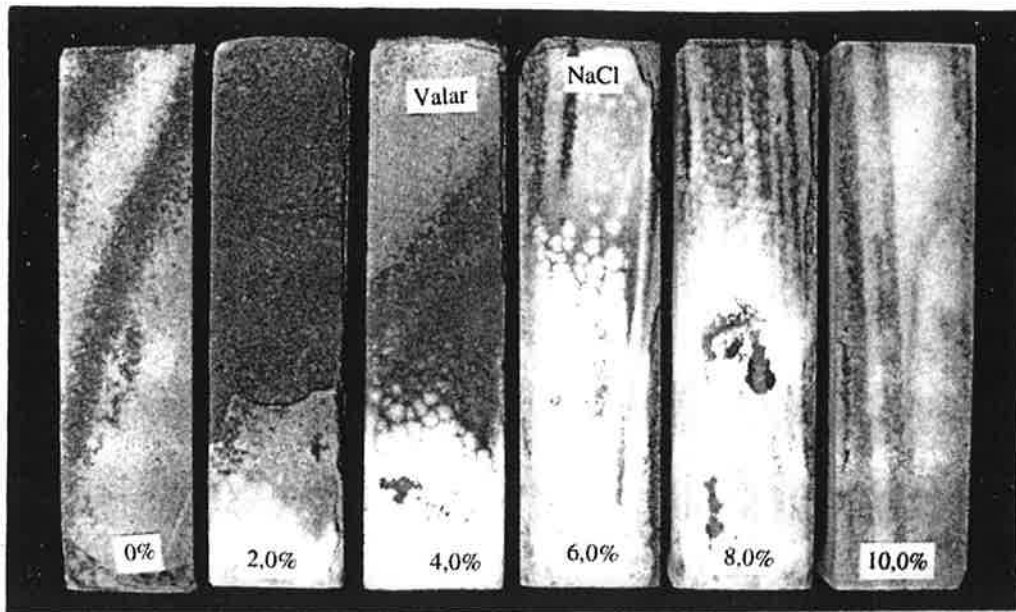
Figur B4:4. Avskalningsförsök 2 [3] Sandstenen Botvide har utsatts för 7 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket. (Det vita är saltutfällningar.)



Figur B4:5. Avskalningsförsök 2 [3]. Sandstenen Uddvide har utsatts för 7 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket. (Det vita är saltutfällningar.)

BILAGA 4

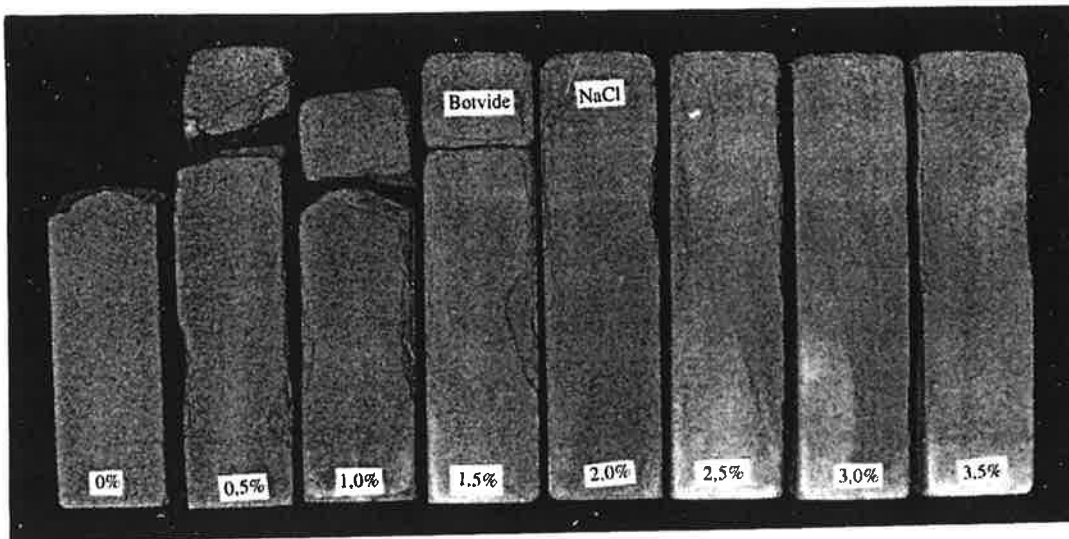
Fotografier från avskalningsförsök



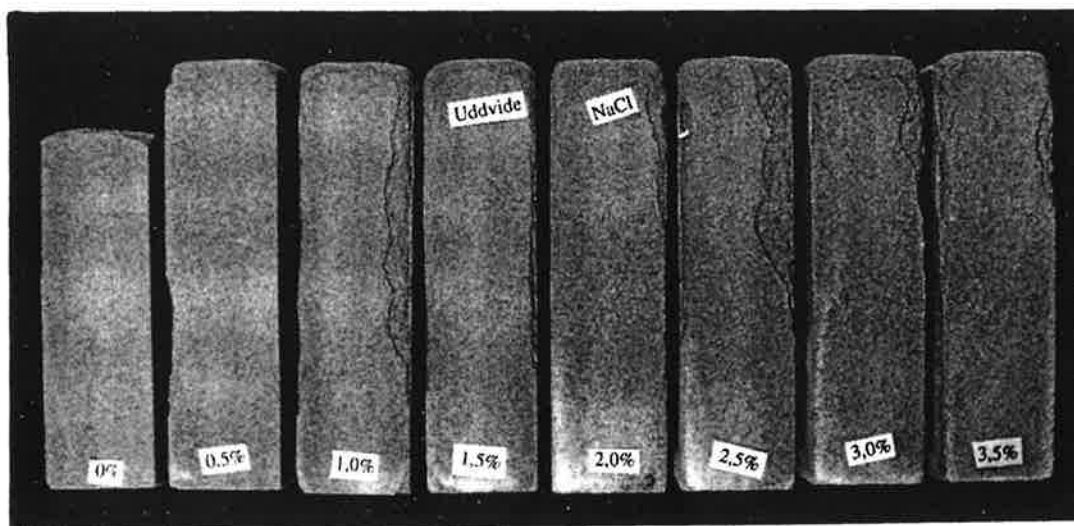
Figur B4:6. Avskalningsförsök 2 [3]. Sandstenen Valar har utsatts för 7 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket. (Det vita är saltutfällningar.)

BILAGA 4

Fotografier från avskalningsförsök



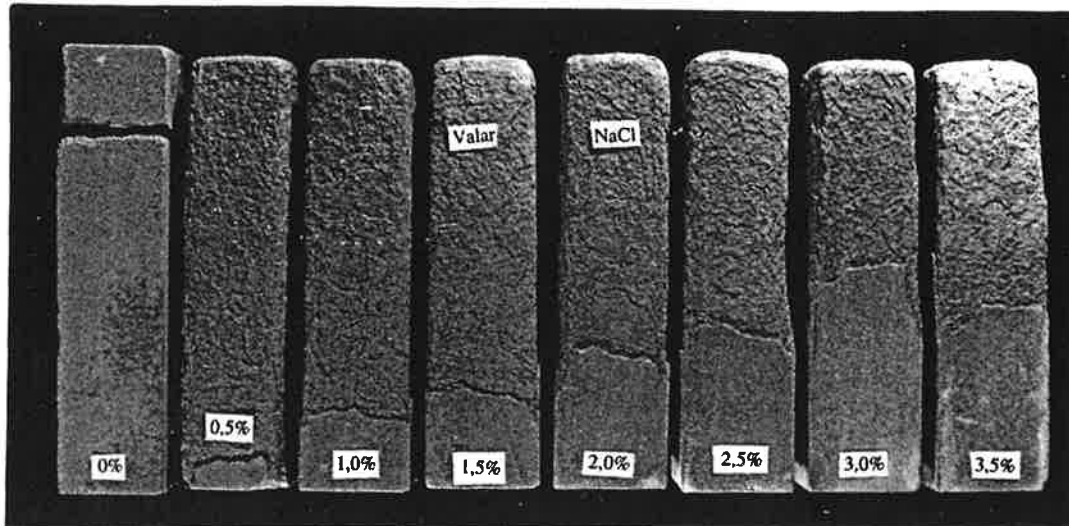
Figur B4:7. Avskalningsförsök 3 [6]. Sandstenen Botvide har utsatts för 20 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.



Figur B4:8. Avskalningsförsök 3 [6]. Sandstenen Uddvide har utsatts för 20 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.

BILAGA 4

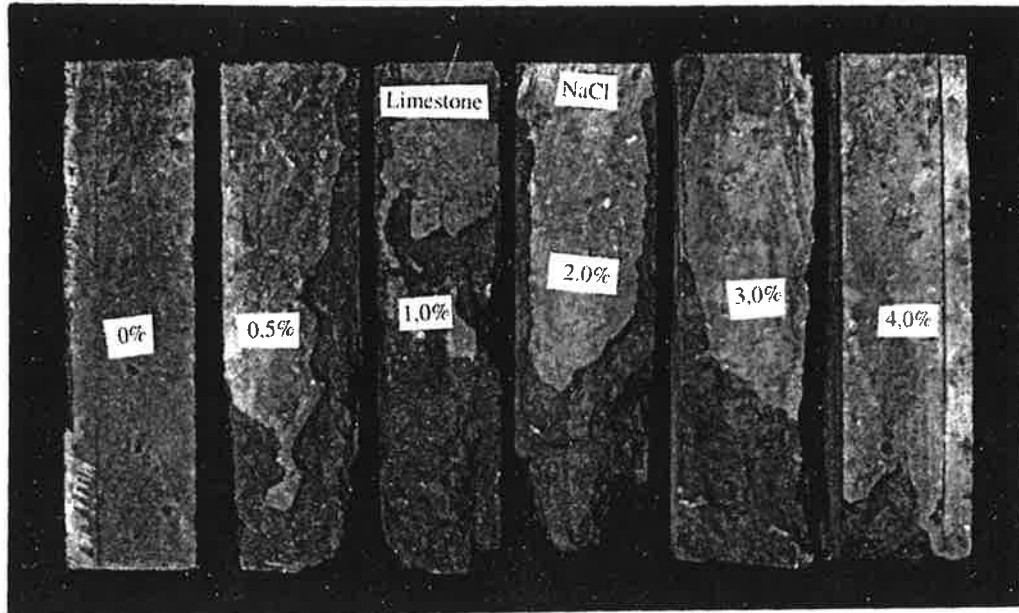
Fotografier från avskalningsförsök



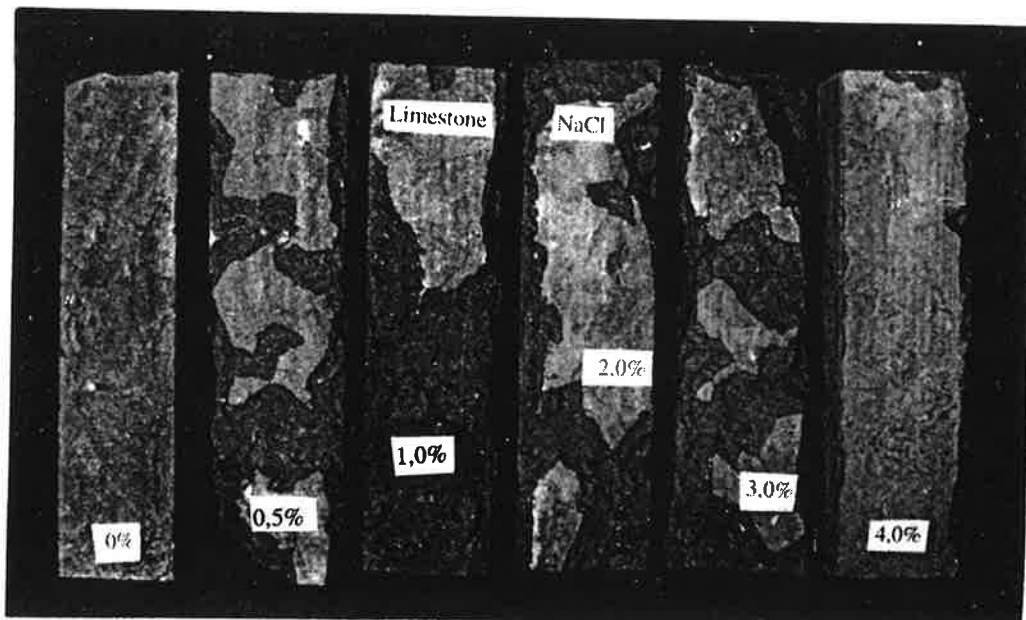
Figur B4:9. Avskalningsförsök 3 [6]. Sandstenen Valar har utsatts för 20 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.

BILAGA 4

Fotografier från avskalningsförsök



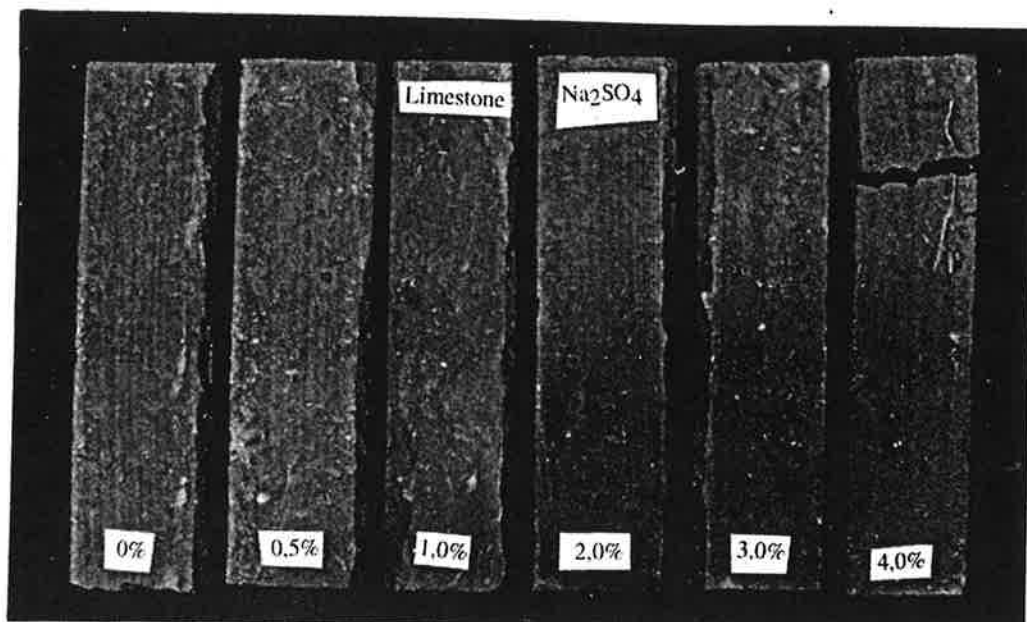
Figur B4:10. Avskalningsförsök. Kalksten har utsatts för 4 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. Stenarna i figurerna B4:10 och B4:11 har utsatts för identisk behandling. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.



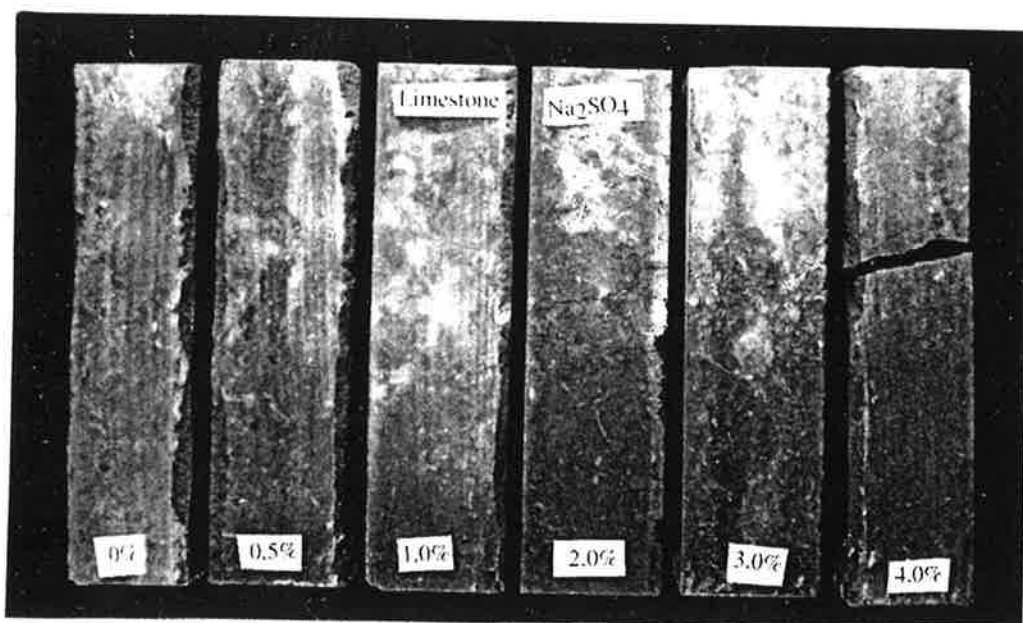
Figur B4:11. Avskalningsförsök. Kalksten har utsatts för 4 fryscyklar i NaCl-lösningar av olika koncentration. Stenarna i figurerna B4:10 och B4:11 har utsatts för identisk behandling. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.

BILAGA 4

Fotografier från avskalningsförsök



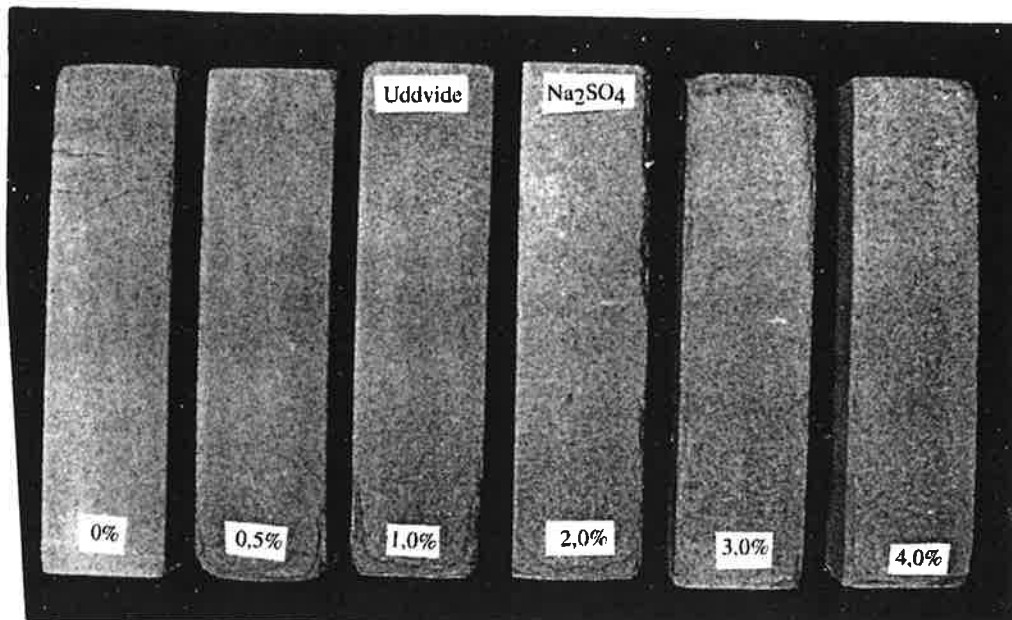
Figur B4:12. Avskalningsförsök. Kalksten har utsatts för 20 fryscyklar i Na_2SO_4 -lösningar av olika koncentration. Stenarna i figurerna B4:12 och B4:13 har utsatts för identisk behandling. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.



Figur B4:13. Avskalningsförsök. Kalksten har utsatts för 20 fryscyklar i Na_2SO_4 -lösningar av olika koncentration. Stenarna i figurerna B4:12 och B4:13 har utsatts för identisk behandling. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.

BILAGA 4

Fotografier från avskalningsförsök



Figur B4:14. Avskalningsförsök. Sandstenen Uddvide har utsatts för 20 fryscyklar i Na_2SO_4 -lösningar av olika koncentration. På fotot är provkropparna placerade med samma sida ner som under försöket.

BILAGA 5

Beskrivning av försöksutförandet för avskalningsförsök

Provkroppsdimension: 3x3x12 cm

1. Provkropparna torkas i 105 °C under minst 4 dygn.
2. Provkropparna får svalna i exsickator och vägs.
3. Egenfrekvensen mäts på de torra provkropparna.
4. Provkropparna placeras i bågare med saltlösning och lagras i 4 dygn.
5. De våta (surface dry) provkropparna vägs och egenfrekvensen mäts.
6. Provkropparna placeras åter i bågarna med saltlösning och utsätts för 4 (kalksten i NaCl) respektive 20 (övriga prover) fryscyklar.
7. Efter 4 respektive 20 fryscyklar vägs de tinade provkropparna och egenfrekvensen mäts. Saltlösningarna med allt avflagnat stenmaterial filtreras genom filter varvid det avflagnade materialet samlas upp.
8. Provkropparna och det avflagnade materialet torkas i 105°C under minst 4 dygn.
9. Provkropparna får svalna i exsickator och vägs.
10. Egenfrekvensen mäts på de torra provkropparna.

BILAGA 6

Fukttransport Av Göran Hedenblad

Teori

Enligt Ficks första lag kan fukttransporten vid stationära förhållanden och i en dimension tecknas som

$$g = - \delta_v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1)$$

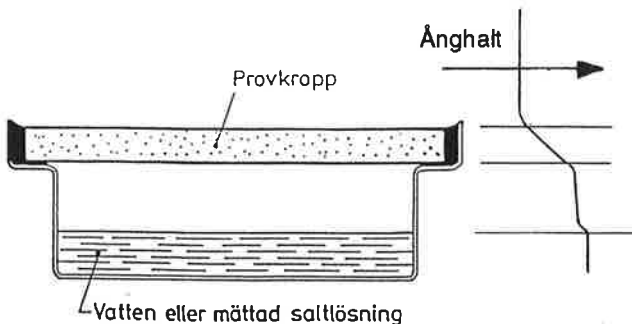
g = fuktflödet per ytenhet ($\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$).

δ_v = ångpermeabiliteten med ånghalt som potential (drivkraft) (m^2/s).

v = ånghalten i materialets porluft (kg/m^3).

x = längdkoordinat (m).

Ångpermeabiliteten (δ_v) beskriver totala fukttransporten i materialet. Fuktflödet kan teoretiskt delas i två delar, en del som beror på ren ångdiffusion i porluften och en del som beror på porvattenundertryck som verkar på fukten i vätskeform, s k kapillärtransport. Det är dock svårt att i praktiken skilja de två processerna från varandra, bl a beroende på mätsvårigheter samt på att de påverkar varandra. Genom att använda koppmetoden (skålmetsoden) på ett speciellt sätt så är det möjligt att bestämma δ_v som funktion av relativa fuktigheten RF. Metoden har utvecklats för praktisk användning av Nilsson [1]. En kopp med prov och ånghaltsfördelning visas i figuren nedan.



Kopp för diffusionsmätning [2].

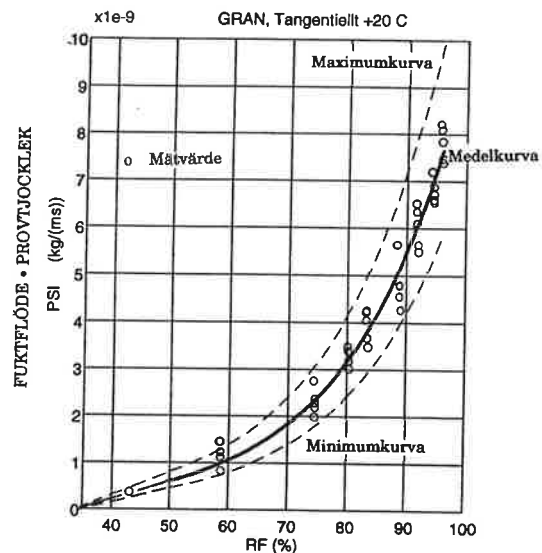
Ekv (1) skrivs om som

$$\int g \cdot \partial x = - \int \delta_v \cdot \partial v \quad (2)$$

där varje led integreras var för sig. Vänstra ledet integreras från $x=0$ till $x=L$. Högra ledet integreras från v_1 till v_2 . Vi får

$$g \cdot L = \int_{v_1}^{v_2} \delta_v(v) \cdot \partial v \quad (3)$$

v i parentesen i $\delta_v(v)$ anger att δ_v kan variera inom integrationsområdet och att man använder det för varje v aktuella δ_v . Låt oss anta att klimatet på översidan, dvs v_1 , är konstant medan vi stegvis ändrar klimatet på undersidan, v_2 , genom att byta saltlösning. Mellan varje saltbyte får provet komma till jämvikt. Vi får då ett samband mellan uppmätt fuktflöde och ånghalten v_2 . Om fuktflödet multipliceras med tjockleken på proverna, som är konstant, så fås Kirchhoffs fuktflödespotential Ψ , se figuren nedan.



Kirchhoffs fuktflödespotential, Ψ .

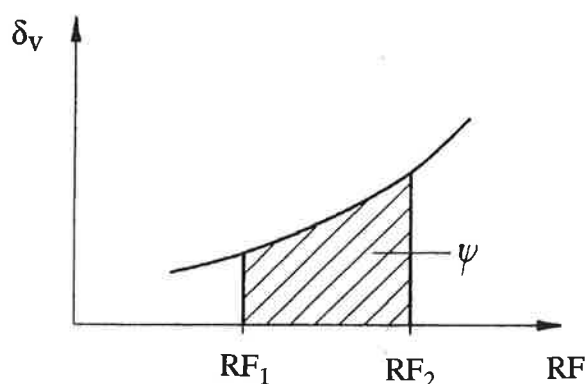
Ekv (3) deriveras nu med avseende på den variabla ånghalten v_2 , vi får

$$\frac{\partial q}{\partial v_2} \cdot L = \frac{\partial}{\partial v_2} \int_{v_1=\text{konst.}}^{v_2} \delta_v(v) \cdot \partial v = \delta_v(v_2)$$

Detta innebär att δ_v vid ånghalten v_2 (i princip RF eftersom temperaturen är konstant

och därmed mätnadsånghalten v_s , $RF = v/v_s$) är lutningen på Kirchhoffs flödespotential i punkten v_2 . Genom denna mät- och utvärderingsteknik fås alltså ångpermeabiliteten i diskreta punkter och ett mera exakt samband mellan δ_v och RF än då koppmetoden används på konventionellt sätt (med enbart två klimat, t ex mellan 50 och 100% RF). Ovanstående är hämtat från Fagerlund [2].

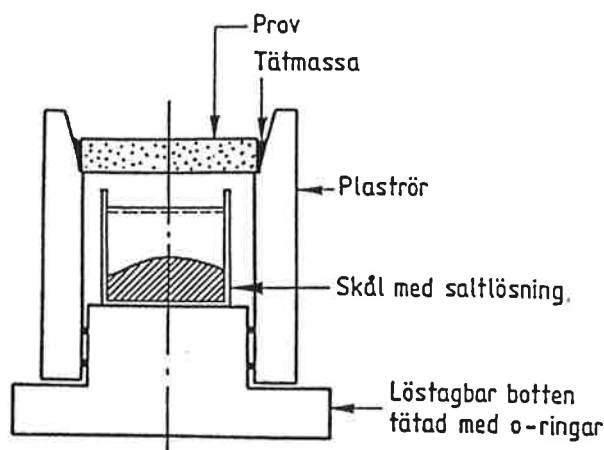
I figuren nedan ges en grafisk tolkning av Kirchhoffs fuktflödespotential.



Kirchhoffs fuktflödespotential, Ψ , är arean under δ_v -kurvan, mellan det konstanta värdet RF_1 och det variabla värdet RF_2 [3].

Metod

Variationen i transportkoefficienten som funktion av RF mellan ca 35 % RF och 100 % har tagits fram med koppmetoden enligt ovan. Detta har gjorts för ett stort antal byggnadsmaterial, däribland sandsten och granit. RF utanför kopparna har konstant varit ca 35 % RF. Inne i mätkopparna har man haft olika saltlösningar som ger olika RF. Ca 60, 75, 82, 85, 90, 94, 97 och 100 % (rent vatten) RF har använts. Mätkoppens utseende framgår av följande figur.



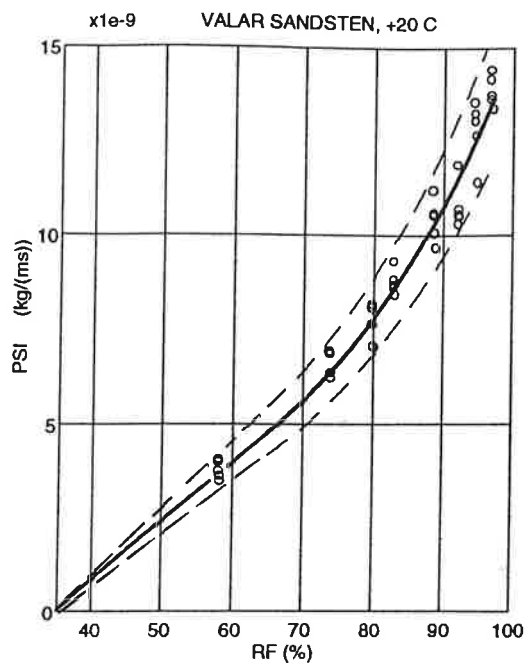
Principfigur av mätkopp.

Genom att botten är löstagbar kan vätska fyllas på skålen med mättad saltlösning. Härigenom kan vätskenivån hållas nästan konstant och nära provets undersida. Detta är viktigt då det gäller öppna material, t ex gotländsk sandsten, som är relativt porös. Om detta avstånd ökas så blir luftspaltens diffusionsmotstånd stort i förhållande till materialprovets diffusionsmotstånd och RF på provets undersida kan bli en helt annan än den avsedda. Vid utvärderingen av resultaten har hänsyn tagits till luftspaltens diffusionsmotstånd.

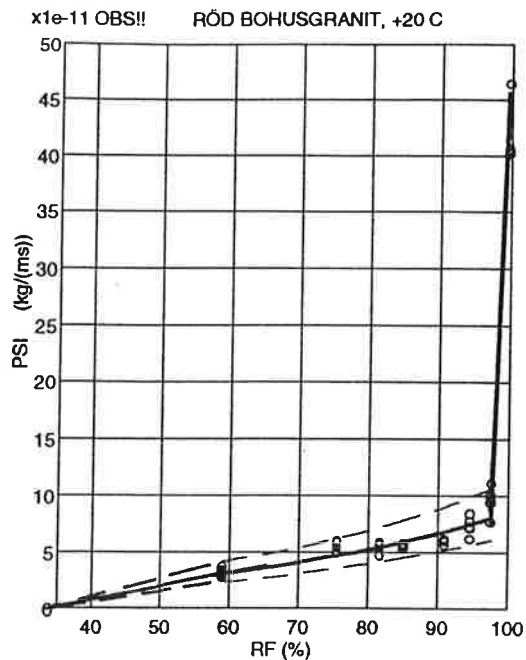
Resultat

För både Kirchhoffs fuktflödespotential (Ψ) och för ångpermeabiliteten (δ_v) är tre kurvor redovisade. Normalt ger dessa kurvor medelvärden och spridningen i Ψ resp δ_v . Spridningen är beräknad så att ungefär 5 % av de uppmätta värdena skall ligga utanför spridningskurvorna. För de här redovisade stenarna har 40 st prover använts för att bestämma fukttransportdata, dvs spridningen har bestämts på ett ganska omfattande material. Ringarna i Ψ -diagrammen är mätvärden.

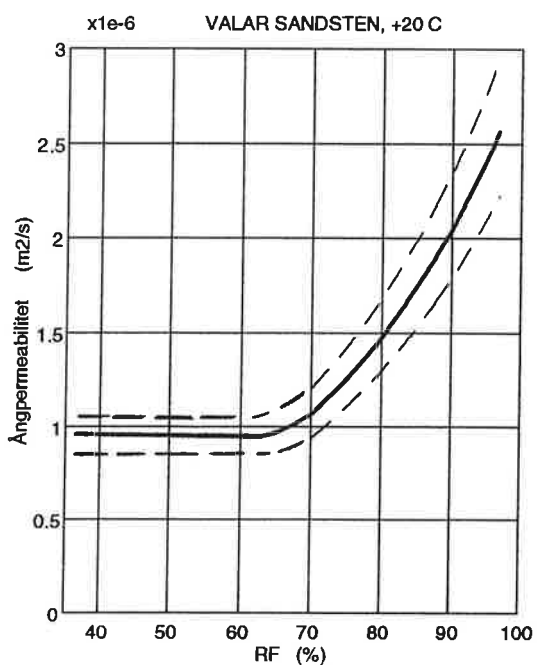
Kirchhoffs fuktflödespotential (Ψ) och ångpermeabiliteten (δ_v) som funktion av RF för den gotländska sandstenen Valar och för graniten Bohus Röd Bratteby redovisas nedan.



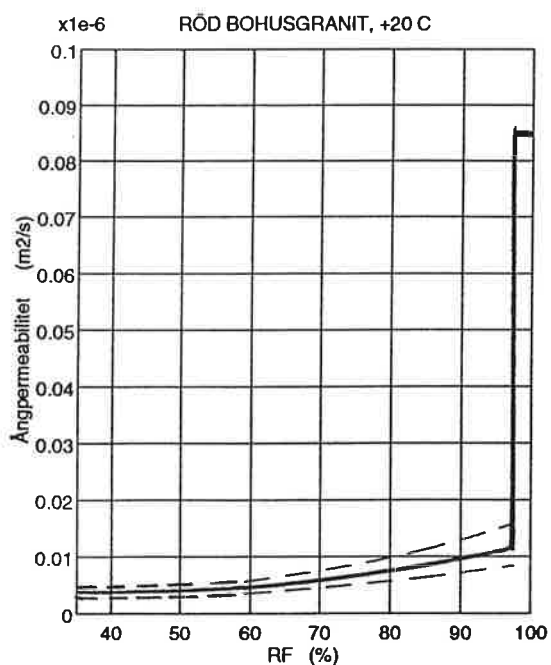
Kirchhoffs fuktflödespotential, Ψ , för den gotländsk sandstenen Valar.



Kirchhoffs fuktflödespotential, Ψ , för graniten Bohus Röd Bratteby.



Ångpermeabiliteten, δ_v , för den gotländska sandstenen Valar.



Ångpermeabiliteten, δ_v , för graniten Bohus Röd Bratteby.

Mätresultaten för granit visar att fukttransporten ökar kraftigt mellan ca 97 och 100% RF. Detta beror troligtvis på att kondensation har skett i granitens porer (ca 0,6% porositet) och att fukten då transporteras i vätskeform. Detta resultat tyder på att fukttransporten i graniten vid kapillärsugning (i kontakt med fritt vatten, t ex regn) är betydligt större än vid diffusion.

Referenser

1. Nilsson, L-O. Fuktproblem vid betonggolv. Rapport TVBM-3002. Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, 1977, Lund.
2. Fagerlund, G. Kompendium i Byggnadsmaterial FK, Del 1, kap. materialprovning, Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola, 1992, Lund.
3. Arfvidsson, J. Isoterma fuktförlopp i porösa material, Beräkning och utvärdering av mätdata. Rapport TVBH-1007. Avd. Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola, 1994, Lund.