LUND UNIVERSITY

Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material.

Fagerlund, Göran

1972

Link to publication

Citation for published version (APA):
Fagerlund, G. (1972). *Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material.* (Rapport 34). Tid. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska högskolan i Lund.

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: 17. Dec. 2025

INSTITUTIONEN FÖR BYGGNADSTEKNIK
TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

DIVISION OF BUILDING TECHNOLOGY
THE LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

KRITISKA VATTENMÄTTNADS-GRADER I SAMBAND MED FRYSNING AV PORÖSA OCH SPRÖDA MATERIAL

CRITICAL DEGREES OF SATURATION AT FREEZING OF POROUS AND BRITTLE MATERIALS

GÖRAN FAGERLUND

RAPPORT/REPORT 34

LUND SWEDEN 1972

Dupli-Konsult
Eslöv 1973

I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I N G SID

FÖRORD		9
BETECKNINGAR		11
1	INLEDNING	17
2	PRINCIPIELL BETYDELSE AV KRITISKA VATTENMÄTTNADSGRADER I SAMBAND MED FRYSNING	19
2.1	Definition av vattenmättnadsgrad	19
2.2	Definition av frostbeständighet	20
2.3	Val av material med avseende på frostbeständighet	23
2.4	Provningsmetod för frostbeständighet	26
2.5	Förståelse av samband mellan materialstruktur och frostbeständighet	28
3	TIDIGARE UNDERSÖKNINGAR AV KRITISK VATTENMÄTTNADSGRAD - LITTERATURSTUDIE	33
3.1	Teoretiska studier	33
3.2	Experimentella studier	40
4	METODIK FÖR EMPIRISK BESTÄMNING AV KRITISKA VATTENMÄTTNADSGRADER MED FLERCYKELFRYSNINGAR	47
4.1	Inledning	47
4.2	Provkroppar	49
4.2.1	Storlek och form	49
4.2.2	Urval och antal	59
4.3	Karakterisering av materialegenskaper	61
4.3.1	Inledning	61
4.3.2	Porositet och densitet	61
4.3.3	Icke frysbar vattenmängd	68
4.4	Anpassning av provkroppar till rätt vattenhalt	75
4.4.1	Beräkning av samband provkroppsvikt-fukttillstånd	75
4.4.2	Metodik för anpassning	75
4.4.3	Inverkan av anpassningsmetodik på kritisk vattenmättnadsgrad	76
4.5	Frysmetodik	79
4.5.1	Principiellt	79
4.5.2	Vattenmättnadsgradens konstans	79
4.5.3	Fuktgradienter under frysning	81
4.5.4	Fryscykel	81
4.5.5	Antal fryscykler	87
4.5.6	Frysapparatur	88
4.6	Mätning av skador	92
4.6.1	Principiellt	92
4.6.2	Dynamisk E-modul och inre friktion	92

forts I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I N G SID

4.6.3	Längd- och tjockleksändring	97
4.6.4	Viktminskning	98
4.6.5	Densitetsökning	98
4.6.6	Förändring av vattenabsorptionsförmåga	99
5	METODIK FÖR EMPIRISK BESTÄMNING AV KRITISKA VATTENMÄTTNADSGRADER MED EN-CYKELFRYSNINGAR	100
5.1	Inledning	100
5.2	Provkroppar	101
5.3	Frysmetodik	102
5.3.1	Principiellt	102
5.3.2	Fryscykel	102
5.3.3	Frysapparatur	102
6	METODIK FÖR BESTÄMNING AV VATTENMÄTTNADSGRADER UPPNÅDDA I PRAKTIKEN	105
6.1	Inledning	105
6.2	Bestämning av samband mellan vattenmättnadsgrad och fuktfrontens djup från materialytan	108
6.3	Vattenupptagning vid sugning från en fri vattenyta	114
6.4	Vattenupptagning vid doppning under vattenyta	117
6.5	Upptagning av vatten vid frysning och upptining i vatten	118
6.6	Hygroskopisk fuktupptagning	120
6.7	Mätning av fukt in situ	121
7	EXPERIMENTELLA RESULTAT AV FLERCYKELFRYSNINGAR	124
7.1	Inledning	124
7.2	Testade material	125
7.3	Provkroppsstorlekar, -form, -antal och -urval	129
7.4	Porositeter och densiteter före frysning	130
7.5	Icke frysbara vattenmängder	132
7.6	Kritiska fukttillstånd	135
8	EXPERIMENTELLA RESULTAT AV ENCYKELFRYSNINGAR	149
9	RESULTAT AV VATTENUPPSUGNINGSFÖRSÖK	153
9.1	Inledning	153
9.2	Resultat av sugförsöken	154
10	BERÄKNING AV FROSTBESTÄNDIGHETER	156
10.1	Inledning	156
10.2	Resultat	157
11	SAMMANFATTNING	160
12	SUMMARY	161

forts I N N E H Å L L S F Ö R T E C K N I N G SID

LITTERATUR 162
TABELLER 175
FIGURER 215
BILAGA - VATTENABSORPTIONSFÖRSÖK, TABELLER OCH DIAGRAM 369

FÖRORD

Planeringen av det experimentella arbete, som redovisas i denna rapport, påbörjades våren 1967. Avd Byggnadsmaterialllära vid LTH var då nystartad sedan 2 1/2 år. Vårt laboratorium var därför mycket ofullständigt utrustat och rutinen för vetenskapligt laboratoriearbete saknades i stor utsträckning, framförallt då hos mig själv. Men entusiasmen var stor. De initialsvårigheter som fanns övervanns därför relativt snabbt, framförallt genom storartade insatser av mina medarbetare.

Experimenten kom så småningom igång under 1968 och pågick ända fram till sommaren 1972. Hela tiden vidgades undersökningen allteftersom nya idéer växte fram. Idéer som ofta krävde uppbyggnad av ny apparatur för att bli genomarbetade.

I och med denna rapport har ett streck dragits i mina frostbeständighetsstudier. Ännu återstår emellertid att testa vissa hypoteser t ex rörande det mycket väsentliga problemet frysning i närvaro av salt, ett problem som snarare har ökat än minskat i aktualitet. Det är min önskan att i framtiden på ett eller annat sätt få fullfölja denna del av studierna.

Av det experimentella arbete, som genomfördes under åren 1968-1971, återstår dessutom att bearbeta och publicera en omfattande rapport rörande frysförhållanden hos porvatten i porösa material.

Att arbeta med frostbeständighetsproblemet är utomordentligt stimulerande eftersom man därigenom hamnar mycket centralt inom byggnadsfysiken och byggnadsmaterialläran. Ett flertal materialegenskaper av såväl fysikalisk, strukturell som mekanisk art är direkt avgörande för ett materials frostbeständighet. Dessutom är en analys av samverkan mellan miljö- och materialegenskaper, genomförd t ex med avancerad fuktmekanik, nödvändig för en exakt lösning av frostbeständighetsproblemet.

Ett generellt studium av materials frostbeständighet medför därför mycket lätt vad som på engelsk-svenska kallas "spin-off-effekter". I mitt fall består de bl a av att jag fått förmånen att delta i ett omfattande internationellt arbete i RILEM-regi. Detta arbete har till en del varit direkt inriktat på frostbeständighetsproblemet men till stor del också på generella problemställningar i samband med porösa material.

När nu resultatet av frostbeständighetsstudierna publiceras i samlad form för första gången, vill jag framföra ett stort tack till alla mina medarbetare förutan vilka detta arbete inte kunnat komma till stånd.

Först och främst tackar jag professor Sven G Bergström, som tog initiativet till undersökningen, som ligger bakom en stor del av de tankar som här framförs och som inte minst uppmuntrat mig i mitt arbete och gett mig ett stöd som inte kan överskattas.

Jag tackar forskningsingenjör Leif Erlandsson för hans uppslagsrikedom och stora kunnighet i samband med uppbyggandet av apparaturen samt för hans utomordentliga arbetsinsatser i övrigt.

Instrumentmakare Allan Berlin och institutionstekniker Sture Sahlén tackas för att apparaturen förvandlats från tankar till verklighet samt för allmän hjälpsamhet och trevligt samarbete under hela tiden.

Ingenjör Jan Tykesson och institutionstekniker Bo Johansson har utfört en stor del av det praktiska arbetet. Detta har gjorts med skicklighet och precision.

Att utnyttja Lunds Universitets datoranläggning är förknippat med i det närmaste oöverstigliga hinder för den normale byggnadsforskaren. Civilingenjör Lars-Olof Nilsson har här hjälpt mig på ett strålande sätt och sett till att resultat av bestämningar av frysbara vattenmängder blivit utvärderade.

Fru Britt Andersson och fröken Anni-Britt Wärmark har ritat figurerna resp maskinskrivit texten. Detta har p g a knapphet på tid inneburit en stor arbetsbelastning men har genomförts med fermitet och skicklighet.

Jag har otaliga gånger utbytt tankar med de bägge teknologie doktorerna Lennart Ahlgren och Anders Nielsen och därvid fått värdefulla sunpunkter på mitt arbete.

Undersökningen har till största delen finansierats av Statens Råd för Byggnadsforskning till vilket jag vill framföra ett varmt tack för att jag fått tillfälle att arbeta med frostbeständighetsproblemet under så många år. Jag är nämligen övertygad om att det ofta är mycket fruktbart, att på det sätt som jag fått göra, få möjlighet att under relativt lång tid tänka igenom och arbeta med ett och samma projekt, framförallt om forskningsmiljön är så stimulerande som den har varit vid vår avdelning, där projekt av tämligen olika typ genomförs sida vid sida.

Till sist vill jag tacka min fru Anne-Marie och mina barn som med tålamod accepterat och stött en make och far som p g a arten av sitt arbete varit oregelbunden i både tid och sätt.

BETECKNINGAR

På grund av det stora antalet ekvationer förekommer samma beteckning ofta flera gånger. Normalt uppstår inga problem eftersom det är uppenbart av ekvationen vilken tolkning av beteckningen som är riktig. Där tveksamhet föreligger anges nedan för vilken ekvation beteckningen i fråga gäller.

A	Sugyta vid kapillärsugning (m^2)
A	Vikt av tom pyknometer (kg)
B	Permeabilitetskonstanten vid frystemperaturer ($m^3 \cdot s/kg$)
B	Kalorimeterkonstant ($j/^oC \cdot s$)
B	Vikt av pynometer + pulver (kg)
C	Mängd cement (kg/m^3)
C	Totalt specifikt värme för upptinad provkropp ($j/^oC$)
C	Konstant i ekv (107) (1)
C	Vikt av pyknometer fylld med vatten (kg)
C_i	Specifikt värme för is ($j/^oC \cdot kg$)
C_p	Specifikt värme hos innerbruk med provkropp ($j/^oC$)
C_w	Specifikt värme för vatten ($j/^oC \cdot kg$)
D	Vikt av pyknometer med pulver och därefter uppfylld med vatten (kg)
D_{KR}	Kritisk skikttjocklek (m)
E	E-modul (N/m^2)
E_o	E-modul hos fast fas ekv (136) (N/m^2)
E_o	E-modul före frysning (N/m^2)
E_n	E-modul efter n cykler (N/m^2)
E_B	Sekantmodul vid brott (N/m^2)
F	Frostbeständigheten
G	Skjuvmodul (N/m^2)
G_o	" hos fast fas (N/m^2)
H	Provkroppstjocklek vinkelrätt mot sugriktningen (m)
I	Yttröghetsmoment (m^4)
K	Andel icke frysbart vatten vid fullständig vattenmättnad. Ekv (7) (m^3/m^3)
K	Kompressionsmodul ekv (73) (N/m^2)
K_o	" hos fast fas (N/m^2)
K_1-K_3	Konstanter i ekv (108)
K_1;K_2	Specifik volym för vatten (m^3/kg)
L	Provkroppslängd (m)
$\bar{L}$	Halva medelavstånd mellan luftfyllda sfäriska porer (m)
M	Vätskans molekylvikt (kg/k mol)
N	Antal luftfyllda porer ($1/m^3$)
N	Antal lameller hos delaminerad provkropp
P	Porositet (m^3/m^3)

P	Spänningsvolym ekv (53) (N)
P	Tillförd effekt till innerburk i adiabatisk kalorimeter (W)
P_B	Ballastens porositet (m^3/m^3)
P_{KR}	Kritisk Philleo spacing factor ekv (32) och (33) (m).
P_s	Sluten porositet (m^3/m^3)
$P_ö$	Öppen porositet (m^3/m^3)
$(P_ö)_o$	Öppen porositet före frysning (m^3/m^3)
$(P_ö)_t$	Öppen porositet efter frysning (m^3/m^3)
Q	Provkroppsvikt (kg)
Q	Värmeflöde från provkropp (j/s)
Q_o	Vikt av oskadad provkropp (kg)
Q^{-1}	Inre friktion
Q_{BR}	Belastning vid brott (N)
Q_f	Vikt av provkropp torkad vid +105°C (kg)
$(Q_f)_x$	Mätt "torrvikt"vid relativa fuktigheten x % (kg)
Q_m^{ℓ}	Vattenmättad provkropp vägd i luft (kg)
Q_m^{v}	Vattenmättad provkropp vägd i vatten (kg)
Q_n	Vikt efter n frysningar (kg)
Q_{TILL}	Tillåten belastning (N)
Q_w	Vikt av vatten i provkropp (kg)
$(Q_w)_{MAX}$	Maximal vattenupptagning vid lång tids vattensugning (kg)
R	Allmänna gaskonstanten (j/°K·k mol)
R	Radie hos vattenfylld sfär (m)
S	Vattenmättnadsgrad i allmänhet
S_e	Porfyllnadsgrad ekv (2)
S_f	Effektiv vattenmättnadsgrad vid frysning ekv (3)
$S_{f\ KAP}$	Kapillär vattenmättnadsgrad d v s vattenmättnadsgrad för material mellan luftporer i en cementpasta
S_{AKT}	Aktuell vattenmättnadsgrad (S_e eller S_f)
S_{KR}	Kritisk vattenmättnadsgrad (S_e eller S_f)
$(S_{KR})_o$	Kritisk vattenmättnadsgrad för den lilla provkroppen
S_{KN}	Vattenmättnadsgrad vid "knickpunktsabsorptionen"
S-värde	Definieras i ekv (48)
T	Absolut temperatur(°K)
T	Tortuosity Factor (m/m)
T	Korrektionskonstant i ekv (107) (1)
T_o	Vätskans normala fryspunkt vid atmosfärstryck (°K)
U	Likspänning på värmeslinga i innerburk i adiabatisk kalorimeter (Volt)
U_o	"Jämviktsspänning" se sid 71 (Volt)
V	Total volym (m^3)

V_{cp}	Volym cementpasta i en betong (m^3)
V_f	Fast volym hos poröst material (m^3)
V_m	Cementgels yta uttryckt i adsorberad vattenmängd vid ett molekyllager adsorbat (kg/m^3)
V_p	Porvolym (m^3)
$V_{pö}$	Öppen porvolym (m^3)
W	Total tillförd energi till provkropp i adiabatisk kalorimeter (j)
W_e	Förångningsbart vatten (m^3/m^3)
$(W_e)_{MAX}$	Maximal vattenupptagning vid lång tids vattensugning (m^3/m^3)
W_f	Frysbar vattenmängd vid lägsta använda temperatur (m^3/m^3)
W_f'	Frysbart vatten i materialet mellan luftporer i en cementpasta (m^3/m^3)
$W_f \cdot \frac{d\beta}{dt}$	Isbildningshastighet ($m^3/m^3 \cdot s$)
W_{if}	Icke frysbar vattenmängd vid lägsta använda temperatur (enbart förångningsbart vatten ingår i W_{if}) (m^3/m^3)
W_n	Icke förångningsbar vattenmängd (m^3/m^3)
Y	Specifik yta hos det vattenfyllda porsystemet ekv (21) (m^2/m^3 material)
Y	Provkropps mantelyta ekv (58) (m^2)
Y	Provkropps tvärsnittsyta ekv (55) (m^2)
Y/V	Provkropps yt- volymförhållande (m^2/m^3)
Z	Kapillär stighöjd (m)
a, a_r, a_o	Motsvarar ℓ, ℓ_r och ℓ_o men med annan sort (ℓ/m^3)
a, b	Konstanter i ekv (125)
b	Provkroppps bredd (m)
dQ/dt	Vattenabsorptionshastighet (kg/s)
f_e	Egenfrekvens (hz)
$(f_e)_n$	Egenfrekvens efter n cykler (hz)
g	Jordaccelerationen (m/s^2)
h	Provkropps höjd (m)
k	Kapillaritetstalet. Betr sort se ekv (124)
k;k_1; k_2 etc	Konstanter
ℓ	Kantlängd hos provkropp ekv (53) (m)
ℓ	Lufthalt före frysning ekv (3) (m^3/m^3)
ℓ'	Lufthalt i kapillärporer (OBS s k luftporer inräknas inte i ℓ') (m^3/m^3)
ℓ_o	Lufthalt i en cementpasta före eventuell vattenabsorption i luftporerna (m^3/m^3)
ℓ_B	Lufthalt i betong ekv (34) (m^3/m^3)
ℓ_ℓ	Volym av "grövre porer" (m^3/m^3)
ℓ_r	Kvarvarande ej vattenfyllda "luftporer" i en cementpasta (m^3/m^3)
m	Motståndstal för kapillärsugning. Betr sort se ekv (123)

m	Massa per längdenhet (kg/m)
p/ps	Relativt ångtryck (=relativ fuktighet när det gäller vatten)
pF	10-logaritmen för kapillär stighöjd i cm
r	Porradie (m)
s	Säkerhetsfaktor vid statisk dimensionering
s_f	Säkerhetsfaktor vid frostbeständighetsdimensionering
t	Asbestcements tjocklek (m)
t	Tid (s)
t_l	Erforderlig tid för att frysa eller tina upp rent vatten i adiabatisk kalorimeter vid oreglerat försök (s)
t_s	Erforderlig tid för att smälta rent vatten i adiabatisk kalorimeter vid reglerat försök (s)
u	Fuktkvot ekv (1) (vikt-%)
u_o	Fuktkvot när materialet är helt vattenmättat (vikt-%)
u_v	Fuktkvot (vol-%)
v	Lufthastighet (m/s)
$vct = \frac{w_o}{c}$	Vattencementtal (kg/kg)
w_o	Mängd blandningsvatten i en cementpasta eller betong (kg/m^3)
w_a	Absorberad vattenmängd i en cementpasta eller betong utöver blandningsvattnet (kg/m^3)
w_f	Frysbar vattenmängd ekv (92), (95) (kg) OBS sorten!
w_f	Frysbar vattenmängd i en cementpasta eller betong (kg/m^3)
w_{if}	Icke frysbar vattenmängd hos en cementpasta eller betong (kg/m^3)
w_n	Mängd icke förångningsbart vatten i en cementpasta eller betong (kg/m^3)
x_k	Längd av avskuren porkorda vid bestämning av ℓ_ℓ (m)
x_{TOT}	Total traverserad längd vid bestämning av ℓ_ℓ (m)
α	Hydratationsgrad
α	Längdutvidgningskoefficient (m/m ^oC)
α_o	" hos fast fas (m/m ^oC)
α	Specifik yta hos luftfyllda porer (m^2/m^3 porvolym)
α_o	Specifik yta hos luftfyllda porer före eventuell absorption i dessa (m^2/m^3 porvolym)
α_k	Ytöverföringstal för värmetransport genom konvektion (j/m^2.^{o}C.s)
α_r	Kvarvarande specifik yta hos luftfyllda porer (m^2/m^3 porvolym)
α_s	Ytöverföringstal för värmetransport genom konvektion (j/m^2.^{o}C.s)
β	Andel av total frysbar vattenmängd som har frusit
γ	Skrymdensitet (kg/m^3)
γ_o	Skrymdensitet före frysning (kg/m^3)
γ_t	Skrymdensitet efter frysning (kg/m^3)
ΔH	Vätskans molara smältvärme (j/K mol)
ΔP	Porvattenundertryck (N/m^2)
ΔP	Övertryck innne i en luftfylld por (N/m^2)

$\Delta P^{1}_{ö}$ Ökning i öppen porositet vid frysning på sluten porositets bekostnad (m^3/m^3)

ΔQ_w Vattenupptagning vid temperatursänkning ekv (72) (kg)

ΔT Fryspunktsnedsättning (^oC)

ΔV Volymändring vid frysning (m^3)

ΔV_{AKT} Aktuell volymändring vid frysning (m^3)

ΔV_{BR} Volymändring vid hydrostatiskt dragbrott (m^3)

ΔW Totalt energiflöde p g a felreglerad adiabatisk kalorimeter (j)

Δh Smältvärmet (j/kg)

$\Delta \ell$ Provkroppsförlängning vid frysning (m)

Δt Tjockleksökning av asbestcement (m)

Δt Tidsintervall (s)

$\Delta\theta_{iy}$ Total temperaturdifferens mellan ytter- och innerburk i adiabatisk kalorimeter. Positivt $\Delta\theta$ innebär att innerburken är kallare (^oC)

$\Delta\theta_{iy}'$ Felreglering p g a att temperaturregulatorn är proportionell (utgör del av $\Delta\theta_{iy}$) (^oC)

$\Delta\theta_{iy}''$ Konstant felreglering (utgör en del av $\Delta\theta_{iy}$) (^oC)

$\Delta\theta_{iy}'''$ Felreglering p g a att motståndstermometrar har olika temperaturkoefficient (utgör del av $\Delta\theta_{iy}$) (^oC)

$\Delta\theta_p$ Temperaturdifferens hos provkroppen under tiden Δt (^oC)

ε Enaxiell töjning

ε_o Brottöjning hos fast fas

ε_B Emissionstal hos frysboxvägg

ε_{BR} Brottöjning

ε_p Emissionstal hos provkroppsyta

ε_p Permanent töjning efter upptining

μ Vatten-isblandningens viskositet vid frystemperaturer ekv (21) (Ns/m^2)

μ Viskositet hos vatten ekv (121) (Ns/m^2)

ν Poisson´s tal

ν_o Poisson´s tal hos fast fas

ρ Kompaktdensitet (kg/m^3)

ρ_ℓ Vätskans densitet (kg/m^3)

ρ_w Vattens densitet (kg/m^3)

ρ_{w_1} Vattens densitet vid bestämning av C (kg/m^3)

ρ_{w_2} Vattens densitet vid bestämning av D (kg/m^3)

σ Ytspänning (N/m)

σ_B Brotthållfasthet (N/m^2)

σ_{BD} Böjdraghållfasthet (N/m^2)

σ_{DR} Draghållfasthet (N/m^2)

$\sigma_{\ell g}$ Ytspänning vätska-gas (N/m)

θ	Kontaktvinkel (radianer)
θ	Fasvinkel spänning-töjning vid dynamisk belastning ekv (114)
θ	Temperatur (^{O}C)
θ_{ℓ}	Ytterluftens temperatur (^{O}C)
θ_{ℓ}^{T}	Ytterluftens temperatur (^{O}K)
θ_{y}	Provkropps yttemperatur (^{O}C)
θ_{y}^{T}	Provkropps yttemperatur (^{O}K)
ω	Formfaktor för iskristall

Index: KR Kritiskt värde
AKT Aktuellt värde

INLEDNING

Frostbeständigheten är utan tvekan en av de mest studerade egenskaperna hos byggnadsmaterial. Tiotusentals vetenskapliga arbeten har publicerats sedan detta sekels början men trots all denna forskarmöda envisas material med att frysa sönder. Detta sker inte i undantagsfall inte heller regelmässigt men med tämligen stor frekvens.

Ett annat område som är minst lika intensivt studerat är byggnadsmaterialens hållfasthetsegenskaper. Även här har tiotusentals arbeten publicerats. En väsentlig skillnad gentemot frostbeständighetsproblemet finns dock; det är ytterligt sällsynt att en byggnadskonstruktion havererar p g a bristande hållfasthet.

Tydligen föreligger en avsevärd skillnad i de båda problemställningarnas svårighetsgrad. Beständighetsproblemet är av en annan dignitet än hållfasthetsproblemet.

Orsaken till detta är uppenbar. I fallet ren hållfasthet kan en klar distinktion göras mellan konstruktionens bärförmåga och erforderlig bärförmåga, d v s yttre belastning. Förhållandet mellan dessa båda fundamentala parametrar kan kvantifieras d v s riktiga materialval och konstruktionsutformningar göras.

I fallet frostbeständighet föreligger inte denna klara distinktion mellan materialegenskaper och yttre belastning. Man skulle rent av kunna påstå att det aldrig har insetts att en sådan distinktion bör göras om ett materialval med avseende på frostbeständighet skall kunna ske.

Istället för att klart skilja på materialegenskaper och miljöegenskaper har frostbeständighetsforskningen i stället så gott som undantagslöst inriktats på att genom olika frystester försöka efterlikna vad som händer det testade materialet i naturen. Man har på detta sätt fått fram en ofantlig flora av varierande frystestmetoder. Debatten bland forskarna har till större delen kommit att kretsa kring vilken metod som skall väljas för vilket material och vilken situation.

Den egentligen föga avundsvärde person som skall välja material bl a med avseende på frostbeständighet har naturligtvis inte större möjlighet än forskaren att värdera vilket material som är bäst i det aktuella fallet. Frostbeständighetsproblemet beaktas därför inte i någon större utsträckning vid det normala materialvalet.

Följden blir, som så ofta när kunskaper saknas, att misstag görs. I detta fall yttrar de sig i frostskadade konstruktionsdelar.

Möjligheterna att lösa frostbeständighetsproblemet skulle uppenbarligen bli mycket större om man, i analogi med vad som är fallet vid en statisk dimensionering, kunde skilja på den materialberoende och miljöberoende delen av problemet.

Det erfordras alltså en parameter i vilken såväl material - som miljö - egenskaper skulle kunna uttryckas.

En tänkbar sådan parameter är materialets vattenmättnadsgrad. Det är nämligen självklart på det sättet, att ju våtare omgivningen är desto högre blir vattenhalten i materialet. Miljön bör alltså i princip gå att uttrycka i materialets vattenmättnadsgrad.

I rapporten skall visas att denna miljöbeskrivning kan göras mycket enkel i en första approximation.

Den materialberoende delen skulle motsvara en brotthållfasthet vid statisk dimensionering och kallas därför "kritisk vattenmättnadsgrad med avseende på frysning".

Utgångspunkten för detta arbete var just att påvisa existensen av kri-

tiska vattenmättnadsgrader, som om de existerade skulle förenkla frostbeständighetsproblemet avsevärt.

Några år innandetta arbete påbörjades hade Warris /1964/ publicerat en avhandling i vilken gavs ett teoretiskt bevis och en beräkningsmetod för kritiska vattenmättnadsgrader hos betong. Några övertygande experimentella resultat som styrkte teorien finns dock inte tillgängliga. Det verkade som om renodlade studier av vattenhaltens inverkan på frostbeständigheten saknades inom alla materialfamiljer. Många författare, varav en del åtnjuter stor auktoritet,betraktade för övrigt begreppet "kritisk vattenmättnadsgrad" med misstro.

Trots allt sattes en undersökning igång. Arbetet har inte varit inriktat på något speciellt byggnadsmaterial utan problemställningen, "frostbeständighet", har ansetts vara viktigare än materialet.

Avsikten med här publicerat arbete är att med omfattande experimentella resultat påvisa att väl definierade kritiska vattenhalter verkligen existerar i samband med frysning av porösa byggnadsmaterial.

Samtidigt anvisas och diskuteras ingående en helt ny frystestmetod baserad på existensen av kritiska vattenmättnadsgrader.

Mycket kortfattat kommer dessutom att beskrivas hur existensen av kritiska vattenmättnadsgrader underlättar förståelsen av det komplicerade frostbeständighetsproblemet. Denna aspekt på de kritiska vattenmättnadsgraderna behandlas dock betydligt mera utförligt i följande arbeten:
Fagerlund /1972 A, 1972 C, 1973 A/.

Arbetet kommer enbart att behandla frysning utan närvaro av tösalter. Studier av frostbeständighet i närvaro av tösalter har igångsatts. Dessa försök bedrivs efter i princip samma riktlinjer som anvisas nedan. Enda skillnaden är att det rena vattnet byts ut mot saltlösningar av olika koncentrationer. Preliminära resultat av dessa experiment kommer att publiceras i någon form under år 1973 eller 1974.

2 PRINCIPIELL BETYDELSE AV KRITISKA VATTENMÄTTNADSGRADER I SAMBAND MED FRYSNING

2.1 Definition av vattenmättnadsgrad

Fukttillståndet hos ett material definieras vanligen på något av följande två sätt:

- Som fuktkvot

$$u = \frac{Q_w}{Q_f} \cdot 100 \ \% \qquad (1)$$

- Som porfyllnadsgrad

$$S_e = \frac{Q_w}{V_p \cdot 10^3} = \frac{W_e}{P} \qquad (2)$$

Inget av dessa båda sätt är emellertid lämpligt när det gäller att definiera fukttillstånd i samband med materials frostbeständighet. Orsaken till detta är att i normala material är endast en del av det förångningsbara vattnet frysbart vid normalt förekommande temperaturer. Detta förhållande diskuteras även under punkt 4.3.3.

Hänsyn kan tas till förekomst av icke frysbart vatten genom införande av en effektiv vattenmättnadsgrad, S_f, definierad enligt ekv (3)

$$S_f = \frac{W_f}{W_f + \ell} \qquad (3)$$

Mellan de tre olika definitionerna av fukttillstånd existerar följande samband

$$S_f = \frac{S_e - K}{1 - K} \qquad (4)$$

$$S_f = \frac{\gamma \cdot u}{10^5 \cdot P(1-K)} - \frac{K}{1 - K} \qquad (5)$$

$$S_e = \frac{u \cdot \gamma}{P \cdot 10^5} \qquad (6)$$

Där parametern K uttrycker mängden icke frysbart vatten enligt ekv (7)

$$K = \frac{W_{if}}{P} \qquad (7)$$

I princip är det likgiltigt vilket av dessa tre uttryck för fukttillstånd som används. Så t ex innebär existensen av en kritisk fuktkvot också existensen av en kritisk porfyllnadsgrad eller kritisk (effektiv) vattenmättnadsgrad.

Definition ekv (3) är emellertid klart överlägsen när det gäller att jämföra olika materials frostbeständighet, se punkt 2.2.

När det gäller att förklara samband mellan materialstruktur och frostbeständighet är också definition (3) erforderlig men även kännedomen om total vattenhalt.

2.2 Definition av frostbeständighet

I inledningen konstaterades att den väsentligaste svagheten med det sätt på vilket frostbeständighetsproblemet attackeras för närvarande är att man inte separerar de miljöberoende och materialberoende delarna av problemet. Istället sammanblandas dessa till ett komplicerat helt, som ofta uttrycks i standardiserade frystester som då blir olika för olika material och olika användningssätt av material.

Materialvalet görs sedan med ledning av hur materialen har bestått testen. Är då denna felaktigt utformad görs felaktiga materialval. Felen kan vara av två typer:

- Man väljer ett material som visar sig bli obeständigt i praktiken men som klarade testen.
- Man avstår från ett i övrigt fördelaktigt material som inte bestod beständighetstesten. I praktiken hade dock materialet varit beständigt.

Bägge felen är allvarliga eftersom de kan ha ekonomiska konsekvenser. Det förra felet kan dessutom medföra andra faror.

Utvecklingen av nya material kan också snedvridas eftersom en viss frystest redan på förhand kan tänkas döma ut produkter som egentligen är beständiga.

I inledningen skisserades emellertid också att problemet skulle kunna tänkas lösas med användning av parametern vattenmättnadsgrad.

Den miljöberoende delen av problemet uttrycks med materialets aktuella vattenmättnadsgrad, S_{AKT}, medan den materialberoende delen uttryckes med en kritisk vattenmättnadsgrad, S_{KR}, Den kritiska vattenmättnadsgraden motsvarar den högsta vattenhalt som inte medför skador vid en enda frysning.

Principen är densamma som den som dagligen används för hållfasthetsberäkningar av konstruktionselement. Den aktuella vattenmättnadsgraden motsvarar den yttre statiska belastningen medan den kritiska vattenmättnadsgraden motsvarar bärförmågan, Se Fagerlund /1971 A/.

Vid en hållfasthetsdimensionering av traditionellt slag införs en säkerhetsfaktor, s, enligt

$$s = \frac{Q_{BR}}{Q_{TILL}} \tag{8}$$

Tanken med en konstant säkerhetsfaktor är tydligen att storleken av sannolika överskridanden av tillåten last är proportionell mot dennas storlek.

Tillämpat på frostbeständighet skulle samma dimensioneringskriterium lyda

$$s_f = \frac{S_{KR}}{S_{AKT}} \tag{9}$$

I fallet frostbeständighet är emellertid detta ett olämpligt dimensioneringskriterium. För det första kan ett överskridande av det kritiska värdet med ett visst belopp ha samma effekt oavsett det kritiska värdets storlek. I detta avseende överensstämmer frostbeständighetsproblemet med hållfasthetsproblemet, men för det andra är sannolikheten att S_{KR} överskrids helt oberoende av storleken på S_{KR}. I detta avseende skiljer sig de båda problemställningarna åt. Om två material A och B har de båda kritiska vattenmättnadsgraderna 0,30 resp 0,80 och i en viss situation uppnår de båda aktuella vattenmättnadsgraderna 0,25 resp 0,75 så innebär detta enligt ekv (9) att säkerhetsfaktorerna är 1,20 resp 1,07 under förutsättning av att ett oändligt litet överskridande av S_{KR} medför kollaps. Se t ex fig 100 . Det skulle innebära att material B har sämre frostbeständighet än material A. Som nämnts ovan finns det emellertid ingen anledning att värdet på S_{KR} skulle påverka värdet S_{AKT}. Det senare beror enbart på materialets porkarakteristika på ett sätt som med mycket

stor osannolikhet är detsamma som samma porkarakteristikas inverkan på S_{KR}. Ett bättre dimensioneringskriterium är därför ekv (10):

$$F = S_{KR} - S_{AKT} \tag{10}$$

där F står för "frostbeständighet". Även denna ekvation är dock i någon mån ologisk eftersom den förutsätter att samma gap, F, mellan S_{KR} och S_{AKT} ger samma säkerhet mot frostskador. Även om två material har samma F vid en viss fuktbelastning är det dock troligt att de aktuella fukttillstånden ökar olika mycket vid en ökning av fuktbelastningen, varvid de reella säkerheterna blir olika. Dessutom förutsätter ekvation (10) att effekten av ett överskridande av S_{KR} blir lika för alla material. Den senare effekten kan man dock kompensera genom att definiera värdet S_{KR} på olika sätt för "sega" respektive spröda material. Se även punkt 7.6.

Logiskt sett är det den effektiva vattenmättnadsgraden, S_f, enligt ekv (3) som skall användas i ekv (10)

$$\boxed{F = S_{fKR} - S_{fAKT}} \tag{11}$$

Därmed behandlas alla material lika.

Definieras vattenmättnadsgrad enligt ekv (2) d v s som porfyllnadsgrad, fås därför följande uttryck för frostbeständighet

$$F = \frac{S_{eKR} - S_{eAKT}}{1 - K} \tag{12}$$

På samma sätt blir frostbeständigheten vid användande av fuktkvoten

$$F = \frac{u_{KR} - u_{AKT}}{u_o(1-K)} \tag{13}$$

Två specialfall fordrar en särskild kommentar. Det första fallet är ett material för vilket $S_{fKR} = 1,0$ och $S_{fAKT} = 1,0$. Ett tänkbart sådant material är antingen mycket töjbart eller också har det så liten porositet att vattnets svällning vid isbildningen kan tas om hand av en volymökning hos materialet som är mindre än brottöjningen.

Enligt ekv (11) är frostbeständigheten noll för detta material, vilket är orimligt. För ett sådant material kan det vara lämpligt att istället beräkna ett fiktivt S_{KR} enligt följande formel

$$(S_{fKR})_{FIKTIV} = \frac{\Delta V_{BR}}{\Delta V_{AKT}} \tag{14}$$

Utnyttjas t ex 80 % av materialets brottöjning vid fullständig vattenmättnad är $(S_{fKR})_{FIKTIV} = 1,25$.

Sambandet mellan relativ längdändring och bildad ismängd i en vattenfylld behållare är enligt Fagerlund /1973 A/

$$\varepsilon = \frac{1}{3(1-2\nu)} \cdot 0,09 \cdot W_f \tag{15}$$

För ett material med $\varepsilon_{BR} = 0,4$ ‰ och $\nu = 0,15$ fås då ett $W_f = 0,009$. Enbart 0,9 % porer med frysbart vatten får finnas. Ett material med samma hållfasthetsegenskaper men som har enbart 0,5 % porer med frysbart

vatten får då ett $(S_{fKR})_{FIKTIV} = 0,9/0,5 = 1,8$; Frostbeständigheten blir 0,8.

Det andra fallet gäller ett material som är poröst men som saknar frysbart vatten till och med vid total vattenmättnad. Ett sådant material måste vara extremt finporöst. Se ekv (83), som visar samband mellan frysputhktsnedsättning och kapillärradie.

Men ett sådant material fyller sig fullständigt genom kapillärkondensation vid måttliga relativa fuktigheter. Se ekv (85).

För ett sådant material blir $S_{fKR} = 0$ och $S_{fAKT} = 0$. Frostbeständigheten skulle alltså bli noll enligt ekv (11). Materialet är emellertid enbart av akademiskt intresse eftersom frostbeständighetsproblem existerar lika litet för ett sådant material som för material som är icke porösa,såsom plaster, metaller etc. Möjligheten finns dock att ett sådant finporöst material kan spricka. Sprickan fylls lätt med frysbart vatten, varefter frostskador uppstår, Vuorinen /1970/.

2.3 Val av material med avseende på frostbeständighet

För att man skall kunna göra ett riktigt materialval där även beständighetsproblemen beaktas, erfordras följande kunskaper; Fagerlund /1972 E/:

1. Formulerade funktionskrav
2. Överföring av funktionskrav till begreppet "tjänsteduglighet" (t ex"frostbeständighet") och slutligen till krav på ett komplex av materialegenskaper.
3. Möjlighet att mäta tjänsteduglighetenpå ett riktigt sätt.
4. Exakt kännedom om miljöns egenskaper.
5. Kännedom om sambandet; Miljöegenskaper-materialegenskaper-nedbrytningsmekanism.
6. Mätning (eller beräkning) av nedbrytningsförloppet, t ex med beständighetsprovning av någon typ.

Till dessa kunskaper kommer naturligtvis kunskaper om kostnader för material och reparationer, kostnader för bristande tjänsteduglighet etc.

Man kan nog utan överdrift påstå att man i dagens läge inte har någon av ovan listade kunskaper i varje fall inte i tillräcklig omfattning.

Vad gäller funktionskrav,pågår avsevärd forskning i avsikt att försöka finna ut vad människor kräver av byggnader och material i byggnader. Svårigheten är att formulera dessa krav på ett vettigt sätt.

När det gäller överförandet av funktionskrav till materialegenskaper finns uppenbarligen en del kunskaper. Så t ex har en stor del av den "klassiska" byggnadsmaterialläran sysslat med att försöka finna samband mellan materialkarakteristika och funktionskraven hållfasthet och deformation. När det däremot gäller funktionskrav av typ rengöringsbarhet, nötningshållfasthet, halkfrihet etc är materialstrukturens inverkan mycketokänd.

Miljöns egenskaper är kända i stort men i samband med byggnader är det ofta inte klimatet på orten ifråga som avgör funktionen utan det s k mikroklimatet omedelbart intill materialet ifråga eller rent av inne i materialet. Mikroklimatet bestäms till stor del av hur byggnaden utformas.

Till miljön kan också räknas inverkan på ett material av angränsande material.

Mikroklimatets påverkan av byggnaders utformning är i det närmaste okänd.

Komplexet miljöegenskaper-materialegenskaper-nedbrytningsmekanismer är känt i vissa fall men i andra fall inte. Miljöinverkan på frostbeständighetsproblemet är ett klart exempel på ett område där kunskaper till stor del saknats men där här skisserad metodik verkar bringa en del klarhet.

Vad gäller mätning av beständighet är denna förenad med stora svårigheter. Svårigheterna hänger ihop med punkten ovan. Man kan nämligen inte utforma en rationell mätmetod om man inte känner samspelet mellan miljöegenskaper och nedbrytningsmekanism. Fagerlund /1972 E/.

I detta arbete skisserat sätt att angripa frostbeständighetsproblemet är ett exempel på hur kännedom om sambandet miljöegenskaper-materialegenskaper-nedbrytningsmekanism kan förenkla materialvalet.

Relevanta materialegenskaper är kapillär sugförmåga, porstorleksfördelning, permeabilitet, hållfasthet, töjbarhet etc. Möjligen kan alla dessa egenskaper reduceras vidare till enbart poregenskaper som storleksfördelning, form och mängd. Se Fagerlund /1972 C/.

Nedbrytningsmekanismen har av flera forskare ansetts vara utmattning, se t ex Plum & al/1966/Här presenterad undersökning vill emellertid

visa att mekanismen är ett rent korttidsbrott.

Därmed förenklas problemet avsevärt. Korttidsbrottet vid en frysning uppstår om den kritiska vattenhalten överskrids. Temperaturförhållandena tycks inte spela så stor roll för värdet på den kritiska vattenhalten.

Miljön påverkar därmed enbart genom det sätt på vilket den påverkar vattenabsorptionen. Sedan är miljön bortrensad.

Återstår sambanden mellan materialegenskaper (poregenskaper) och materialens kritiska vattenhalt resp den vattenhalt som kommer att uppnås i den aktuella miljön.

När det gäller samband materialegenskaper-kritisk vattenhalt, krävs en förståelse av vad som händer inne i materialet vid en frysning. Man måste ha en skademekanism. Sådana har uppställts av flera forskare. Genom att utforma lämpliga experiment, kan man bekräfta vilken mekanism som är troligast. I fallet frostbeständighet verkar den s k "hydrauliska tryckteorien" ge bästa förståelsen av iaktagna fenomen. Därmed är samband materialstruktur och kritisk vattenhalt relativt lätt att utreda. Se Fagerlund /1972 C, 1973 A/.

När det gäller samband mellan materialstruktur och i verkligheten absorberad vattenmängd finns också en viss kunskap i form av s k fuktmekanik.

I det komplicerade fallet frostbeständighet har man alltså kunnat göra en logisk sammanknytning mellan miljöegenskaper, materialegenskaper och nedbrytningsmekanism. Ännu återstår naturligtvis stora svårigheter, framförallt vad beträffar miljöns fuktegenskaper och materialets fuktabsorption.

Vad som trots detta gör frostbeständighetsproblemet svårt att hantera är dess statistiska karaktär. Skador sker bara när fukttillståndet i materialet överskrider det kritiska. Detta överskridande kan i princip komma när som helst lika väl 1:a året som det 50:e. Det kan också, om miljön är mycket våt, komma flera gånger under materialets livstid. Detta gör att kontinuerliga nedbrytningskurvor i princip inte gäller för nedbrytning p g a frostangrepp.

Problemställningen åskådliggörs i figurerna 1 och 2. I figur 1 utritas det aktuella fukttillståndet, S_{AKT}, och det kritiska, S_{KR}, som funktion av tiden. Gapet mellan de båda fukttillstånden varierar med tiden. Detta gör att beständigheten uttryckt som detta gap varierar med tiden. Vid tider t_1; t_2; t_3 sker ett överskridande av det kritiska fukttillståndet och en skada inträffar. Förutsätter man nu att ett enda överskridande räcker för att helt demolera materialet blir materialets brukstid bara t_1.

Man kan emellertid tänka sig att ett överskridande bara ger en liten skada, t ex proportionell mot storleken på överskridandet. Kvaliteten frostbeständighet kan då i stället uttryckas t ex med kvarvarande hållfasthet. Man kan då mycket väl tänka sig att överskridanden vid t_1 och t_2 är acceptabla medan materialets hållfasthet, Q, efter överskridande t_3 understiger Q_{min}. Materialets brukstid blir i detta fall t_3. Detta visas i figur 2.

Vid många små överskridanden fås en kontinuerlig nerbrytningskurva.

Normalt kan ett enda överskridande av S_{KR} räcka för att göra materialet odugligt.

Brukstiden hos materialet blir därför svårt att beräkna. Enda möjligheten är en statistisk kalkyl.

Ett approximativt materialval med avseende på frostbeständighet skulle emellertid kunna göras på följande sätt;

- Uppgifter om värden på kritiska fukttillstånd för olika tänkbara material införskaffas.

- Den aktuella miljöns egenskaper analyseras varefter en bestämning görs av aktuella fukttillstånd för de olika materialen.
- Bland sådana material som befinns vara frostbeständiga enligt ekv (11) väljs bästa materialet ut. Därvid utnyttjas en ekv av typ (16) nedan liksom hänsyn naturligtvis tas till övriga faktorer som bör bestämma materialvalet.

Förhållandet mellan två materials, A och B, frostbeständighet, F_A och F_B, blir enligt ekv (11)

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{(S_{fKR})_A - (S_{fAKT})_A}{(S_{fKR})_B - (S_{fAKT})_B} \tag{16}$$

Eller enligt ekv (12);

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{\left\{(S_{eKR})_A - (S_{eAKT})_A\right\}(1-K_B)}{\left\{(S_{eKR})_B - (S_{eAKT})_B\right\}(1-K_A)} \tag{17}$$

Eller enligt ekv (13);

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{\left\{(u_{KR})_A - (u_{AKT})_A\right\}(1-K_B)\cdot(u_o)_B}{\left\{(u_{KR})_B - (u_{AKT})_B\right\}(1-K_A)\cdot(u_o)_A} \tag{18}$$

Ekv (17) och (18) visar att två materials frostbeständighet kan jämföras **rätt**vist genom att använda följande enkla uttryck såvida konstanterna K_A och K_B är ungefär lika för de båda materialen;

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{(S_{eKR})_A - (S_{eAKT})_A}{(S_{eKR})_B - (S_{eAKT})_B} \tag{19}$$

Eller om också u_o är någorlunda lika

$$\frac{F_A}{F_B} = \frac{\left\{(u_{KR})_A - (u_{AKT})_A\right\}(u_o)_B}{\left\{(u_{KR})_B - (u_{AKT})_B\right\}(u_o)_A} \tag{20}$$

I detta fall bortfaller alltså kravet på att bestämma icke frysbara vattenmängder.

2,4 Provningsmetod för frostbeständighet

Ovan nämndes att en rationell beständighetsprovning inte kan åstadkommas om man inte känner sambandet mellan miljöegenskaper och nedbrytningsmekanism.

Frostbeständighetstestningar som de är normerade i olika länder är typiska exempel på att detta samband inte är beaktat på ett riktigt sätt.

Försöken utförs ofta som om mekanismen vore utmattning. Diskussionerna kring frostbeständighetsprovningar behandlar till stor del hur många cykler som skall användas för att få fram ett riktigt mått på frostbeständigheten.

Miljöinflytandet försöker man beakta genom att utforma testen mer eller mindre "våt". Vattenhalterna i provkroppar före frysning är kanske desamma i olika variationer av frystestningar t ex i de fyra metoderna, enligt ASTM att frystesta betong, men frysningarna och upptiningarna sker i olika våt miljö.

Ofta görs dessutom en acceleration i form av ökad fryshastighet.

Såväl ökningen av testens "våthet" som ökningen av fryshastigheten (isbildningshastigheten) kan också anses vara ett utslag av tron att frostskador är ett utmattningsfenomen. Bägge åtgärderna bidrar nämligen till att öka "spänningsamplituden" vid utmattningsförsöket. I och med detta minskas också antal cykler före brott. Man får på detta sätt en acceleration.

Någon genomtänkt analys av samspelet mellan materialets utmattningsegenskaper och spänningar uppkommande vid frysningar vid olika vattenhalt och isbildningshastighet görs dock inte vid vanliga frostbeständighetstester. Inte heller görs någon analys av vilka frekvenser av vattenhalter, temperatursänkningshastigheter och fryspunktspassager, som förekommer i den situation i vilken materialet skall användas. Testningen görs i stället på måfå, varefter resultatet ibland återkopplas till vad som händer samma material i praktiken. Skulle diskrepanser föreligga mellan test- och praktikresultat justeras i bästa fall frysmetoden.

Vore frostbeständighetsproblemet verkligen ett utmattningsproblem kunde man mycket väl tänka sig att en frostbeständighetstest skulle utformas på följande sätt:

- Materialets utmattningsegenskaper bestäms genom utmattningsförsök vid olika spänningsamplituder (enbart dragspänningar utgående från spänningen noll).
  Resultatet blir ett antal s k Wöhler-kurvor.
- Genom kännedom om frysmekanismen (vilken med stor sannolikhet är hydrauliskt tryck av undanpressat vatten) beräknas vilka verkliga spänningar som olika vattenhalter och olika isbildningshastigheter förorsakar.
- Miljön analyseras och uttrycks med vattenhalter i materialet och med isbildningshastigheter vid de frysningar av porvatten som beräknas förekomma under materialets livstid.
- Miljöns inverkan kan nu överföras till spänningstillstånd i materialet genom att frysmeknismen är känd. Resultatet av miljöinverkan blir alltså ett spektrum av dragspänningar i materialet under dess livstid.
- Dragspänningsspektrumet jämförs med materialets utmattningsegenskaper genom användning av t ex en delskadehypotes.
- Som slutresultat fås en siffermässig uppgift om hur stor andel av materialets potentiella utmattningshållfasthet som tagits i anspråk av frostpåkänningen. Frostbeständigheten är kvantifierad.

Den enda test, som görs är alltså en utmattningstest. Hela miljöinverkan beräknas analytiskt.

Man kan emellertid undvika beräkningen av spänningar och därmed göra sig fri från tvånget att känna frysmekanismerna genom att i ett utmattningsförsök baserat på frysningar reproducera det ur miljöegenskaperna beräknade spektrumet av vattenhalter och isbildningshastigheter.

Resultatet av detta utmattningsförsök blir inte kvantifierat. Man får enbart besked om huruvida materialet klarar sig utan skador eller inte, liksom om hur stora skador som uppkommer.

Metoden är emellertid orimlig enbart av det skälet att antalet frys-punktspassager under ett materials livstid är 3000 à 5000. Se punkt 4.5.5 Mellan varje frysning skulle vattenhalten i materialet förändras på ett visst sätt, varför testen skulle ta mycket lång tid. Det fuktmekaniska problemet i sammanhanget är dessutom praktiskt sett olösligt.

I denna rapport redovisade frysförsök visar emellertid att redan en enda frysning kan leda till allvarliga skador. Se figurer 100-191.
Detta innebär att utmattningsanalysen enligt ovan blir överflödig. Istället skulle frostbeständighetstestningen kunna utföras på följande sätt:

- Det högsta värde på vattenhalten som inte ger frostskador, d v s den kritiska vattenmättnadsgraden, bestäms med frysförsök, som består av några cyklers nedfrysning och upptining.
- Det högsta värde på vattenhalt i samband med frysperioder som statistiskt sett kan tänkas uppnås i materialet, bestäms experimentellt eller beräknas.

En ekvation av typ (11) ger sedan materialets frostbeständighet.

Frostbeständighetstesten kommer alltså att uppdelas i två tester av olika typ;

- En frystest
- En test av fuktmekanisk typ.

Principen är egentligen densamma som den som skisserades ovan för fallet utmattning. Skillnaden är bara den att man slipper ta hänsyn till de speciella utmattningsproblemen spänningsamplitud, delskadeanalys etc genom att bara en enda cykel till brott beaktas.

Metoden är dessutom snabb. I princip skall det räcka med en enda frysning om flera provkroppar med olika vattenhalt testas samtidigt. Även den del av testen som behandlar vilka vattenhalter, som uppnås i praktiken kan lösas approximativt med relativt kortvariga försök.

Trots den förenklade metodiken återstår för en exakt analys det ytterligt komplicerade samspelet fuktmiljö-vattenabsorption-temperaturförhållanden att lösa.

Hela i denna rapport redovisade experimentella arbete är baserat på en frostbeständighetstestning av ovannämnda typ.

I kapitel 4 och 5 kommer olika aspekter på bestämningen av de kritiska vattenhalterna att diskuteras.

I kapitel 6 gås igenom en tänkbar förenklad metodik för bestämning av vilka vattenhalter som kommer att uppnås i praktiken.

I kapitel 7-9 redovisas försöksresultat och i kapitel 10 beräknas frostbeständigheter.

2.5 Förståelse av samband mellan materialstruktur och frostbeständighet

2.5.1 Principiellt

Ett materials frostbeständighet är i huvudsak en funktion av dess struktur.

Flera författare har t ex funnit klara samband mellan porstorleksfördelning och frostbeständighet. Exempel på detta är studier av Gérard/1964,1969/, Motteu /1968/, Muresan /1970 /, Širhal /1968/, Mamillan /1967/, Carlsson /1954/, Saarima /1971/, Pilz /1970/.

Ingen av dessa författare ger emellertid någon förklaring till de iakttagna sambanden. Då är att märka att jämförelsen oftast baseras på materialens frostbeständighet vid frystester eller i praktiken, varvid även ett miljöinflytande föreligger.

En variation av en strukturparameter, t ex porstorleksfördelningen, kan alltså tydligen innebära en förändring av den iakttagna frostbeständigheten. Man får emellertid ingen information om huruvida effekten ligger i enbart en förändring av de påkänningar som uppstår vid frysningen eller om den ligger i en förändrad vattenabsorption. I klartext: Påverkar förändringen i porstorleksfördelning värdet på S_{KR} eller värdet på S_{AKT}?

Denna frågeställning, som borde vara klar, är det inte därför att frostbeständighetsproblemets "dubbla ansikte", miljö- resp materialberoendet, inte alltid är klart för forskaren.

Vill man studera hur en enskild strukturparameter påverkar frostbeständigheten, bör man söka dess påverkan på dels S_{KR} och dels S_{AKT}.

Fortsättningsvis skall göras en mycket kortfattad genomgång av sambanden materialstruktur-frostbeständighet. För en fylligare redogörelse hänvisas till Fagerlund /1972 C,1973 A /.

2.5.2 Inverkan av materialstruktur på den kritiska vattenmättnadsgraden

För full förståelse av hur strukturparametrar påverkar S_{KR} erfordras kännedom om vilken frysmekanism som ger skador.

Åtminstone fyra frysmekanismer är fysikaliskt sett tänkbara:

- Hydrauliskt tryck p g a undanpressat vatten från det ställe där isen bildas. Denna teori fick sin matematiska behandling av Powers /1945, 1949, 1956/ men hade dessförinnan använts av Thomas /1938/. Frysning av vatten in situ i en sluten vattenmättad behållare är ett specialfall av hydrauliska tryckteorin. Permeabiliteten sätts då till noll.
- Mikroskopisk islinstillväxt i fina kapillärer p g a olikheter i fri energi hos iskroppar i grövre porer och ofruset vatten i finare porer. Som en följd härav vandrar ofruset vatten till iskropparna där det fryser, varvid iskropparna sväller. Mekanismen är ett specialfall av osmotiska tryckteorien, där svällningar förorsakas av att det råder koncentrationsskillnader mellan ofruset vatten i fina kapillärer och ofruset vatten tillsammans med is i grövre kapillärer. Koncentrationsskillnaderna medför ett osmotiskt tryck. Även denna teori utvecklades av Powers tillsammans med Helmuth /1953/. Teorien har fått en uttömmande fysikaliskt teoretisk behandling av Everett /1961/. Andra bidrag är Pickett /1953/, Powers /1956/, Haynes /1964/, Everett & Haynes /1965/, Penner /1957,1958/, Gold /1957/, Collins /1944, 1945/.

- Makroskopisk islinstillväxt. Mekanismen är egentligen densamma som ovan men islinserna anses kunna växa obegränsat så länge det finns tillgång till fritt vatten. Mekanismen förutsätter därför att materialets draghållfasthet är låg så att linsen får utrymme att växa och att det finns mycket stor tillgång till ofruset vatten. Denna teori har ursprungligen utvecklats för tjälbildning i jordarter av Beskow /1935/, Taber /1929,1930/, Wiederkorn /1955/ men har övertagits till byggnadsmaterial av Collins/1944/45/och Powers /1956/. Andra arbeten är Williams /1967/, Miller & al /1960/, Jumikis /1957/, Hoehstra /1969/, Jansson /1964/.

- "The ordered water theory". Enligt denna teori beror frostskador inte på svällningar av kapillärvatten när det övergår till is,utan av en temperaturberoende volymförändring av det adsorberade vattnet (eller "the ordered water") i porer av storleksordningen 5 molekyldiametrar (≈15 Å). Teorien utvecklades av Dunn & Hudec /1965/ för att kunna förklara vissa märkliga försöksresultat. Vid frysexperiment med ballastkorn för betongändamål visade det sig genom användning av DTA-teknik, att mindre vatten frös i icke frostbeständiga material än i frostbeständiga. I vissa fall iakttogs ingen isbildning alls i icke frostbeständigt material. Dessa resultat stod alltså i motsatsförhållande till hydrauliska tryckteorien. En konklusion av undersökningen var att icke beständiga bergartsmaterial verkade ha större andelar adsorberat vatten och större mängder kapillärkondenserat vatten än beständiga material.

  Cady /1969/ har studerat denna teori experimentellt och jämfört den med Powers´ hydrauliska tryckteori. Genom mätningar av värmeutveckling hos provkroppar och längdändringsmätningar fann författaren att det hydrauliska trycket var anledning till huvuddelen av de skadliga volymökningarna. Dunn & Hudeks mekanism kunde dock påvisas men den var i alla fall utom ett av mindre betydelse.

Av alla framförda teorier för frostmekanismer hos porösa icke granulära material är den hydrauliska tryckteorien den mest närliggande, enklaste och klaraste. En väsentlig fördel med teorien är dessutom att den mycket lättare än de övriga kan knytas ihop med fundamentala materialegenskaper som hållfasthet, elasticitetsegenskaper, porstruktur etc.

Det är därför ytterligt positivt att den hydrauliska tryckteorien genomgående är den teori som bäst förklarar iakttagna fenomen. Ovan nämndes dess överlägsenhet gentemot "The ordered water theory". Islinsmekanismerna är verksammast vid tillstånd av termodynamisk jämvikt t ex vid lång tids konstant temperatur. Vid sådana förhållanden är de hydrauliska trycken försumbara. Dessutom förutsätter islinsmekanismerna en samtidig förekomst av is och och ofruset vatten. Av denna orsak kan de bara tänkas uppstå i material som är så finporösa att vatten är ofruset även vid låg temperatur. Jfr ekv (83). Ett sådant material är portlandcementpasta i vilken gelvatten inte kan frysa in situ förrän temperaturen sjunkit ner till ∿ -70 à -80°C. Vill man därför testa vilken mekanism av mikroskopisk islinstillväxt eller hydrauliskt tryck som är väsentligast vid en normal frysning skulle man kunna utföra frysförsök med portlandcementpasta, där fryshastigheterna varierades. Bomberg /1972/ redovisar försök utförda av Litvan (se även Litvan /1972/), där cementpasta frusits ner till -45°C under en cykel som varat i 5 månader. Efter varje temperatursänkning av 2 à 3°C har provkroppen fått komma i jämvikt. Inga som helst svällningar iakttogs under detta förlopp som inneburit stora möjligheter till utbildning av islinser. Vid normala fryshastigheter hos samma material observerades en klar svällning.

Detta försök är alltså ett bevis för förekomsten av hydrauliska tryck vid isbildningen men också ett bevis för att dessa tryck är av en större betydelse även i ett finporöst material som cementpasta än eventuella krafter från islinstillväxt.

De hydrauliska tryckens storlek är huvudsakligen beroende på det frysande materialets permeabilitet. Denna är emellertid starkt varierande för olika material. Ruettgers et al /1935/ anger följande förhållanden mellan olika materials permeabiliteter för vatten:

Betong vct 0,50 à 0,60:Betong vct 0,70 à 0,80 ≈ $3 \cdot 10^{-2}$ à $2 \cdot 10^{-1}$

- " - - " - :Betong vct 0,80 à 1,00 ≈ $4 \cdot 10^{-3}$ à 10^{-1}

- " - - " - :Sandsten ≈ 10^{-4} à $6 \cdot 10^{-4}$

- " " - " - :Fasadtegel ≈ 10^{-5} à $3 \cdot 10^{-4}$

Vid identiska förhållanden förutom permeabiliteten skulle alltså påkänningarna i t ex en betong med vct 0,50 à 0,60 bli ungefär 10^3 à 10^5 gånger så stora som i ett fasadtegel. Det visar sig vid experiment att vattenmättade strimlor med tjocklekar $\leq 0{,}5$ mm av cementpasta fryser sönder vid en normal frysning men att tjocklekar därunder är för små för att skador skall uppstå, Powers /1949/. Detta skulle alltså innebära att ett fasadtegel vid samma frysbara vattenmängd, samma hållfasthet och samma isbildningshastighet skulle vara beständigt i tjocklekar upp till 20 000 mm à 50 000 mm även om det vore helt vattenmättat. Sådana mått är emellertid avsevärt mycket större än en hel tegelsten, varför en sådan aldrig skulle kunna frysa sönder. Detta strider självklart mot erfarenheten.

Dylika överläggningar om permeabilitet har lett till att vissa författare, t ex Haynes /1964/, ansett att hydrauliska tryck är av underordnad betydelse för t ex keramiska material.

Man kan emellertid visa att permeabiliteten hos just dessa materialtyper sjunker mycket kraftigt med ökande andel bildad is i porsystemet. I Fagerlund /1972C, 1973A/ anges följande uttryck för permeabiliteten hos den vattenfyllda delen av porsystemet hos ett poröst material med is i porsystemet

$$B_\theta = \text{konst} \cdot (W_{if})_\theta^3 \cdot \frac{1}{T_\theta^2 \cdot Y_\theta^2 \cdot \mu_\theta} \qquad (21)$$

där θ står för aktuell temperatur.

I ett keramiskt material är icke frysbara vattenmängden mycket liten. Se tabell 4.

Förhållandet i permeabilitet mellan -10^oC och $\pm 0^oC$ för det hårdbrända teglet i tabell 4 blir då $0{,}017^3/0{,}75^3 = 1{,}17 \cdot 10^{-5}$ om porfyllnadsgraden är 0,75 och om faktorerna T och Y antas vara oförändrade i ekv (21).

Under samma förutsättning blir förhållandet mellan samma permeabiliteter $0{,}288^3/0{,}75^3 = 5{,}7 \cdot 10^{-2}$ för cementbruket med vct = 0,54.

Om därför förhållandet mellan permeabiliteter hos teglet och bruket var 10^{-5} vid 0^oC blir det enbart $10^{-5} \cdot 5{,}7 \cdot 10^{-2}/1{,}17 \cdot 10^{-5} = 0{,}05$ vid -10^oC.

En kritisk tjocklek enligt ovan av 0,5 mm för bruket ger således 0,5/0,05 = 10 mm hos teglet under förutsättning av att alla betydelsefulla parametrar utom permeabiliteten är konstanta.

Experimentella bestämningar av kritiska tjocklekar hos tegel är av storleksordningen 12 à 14 mm, Fagerlund /1973 A/.

Genom de mycket stora förändringar av permeabiliteten som man får p g a isbildningen kan hydrauliska tryckteorien anses gälla även för grovporösa material.

Genom att generellt anta att inre spänningar p g a frysning beror på de uppkomna hydrauliska trycken kan samband härledas mellan materialegenska-

per och den kritiska vattenmättnadsgraden.

Sådana samband ges i Powers /1949/, Warris /1964/ och Fagerlund /1972 C, 1973A/. Här anges enbart slututtryck.

Basekvationen är ett samband mellan den kritiska vattenmättnadsgraden, definierad enligt ekv (3) och en kritisk lufthalt före frysning

$$S_{fKR} = 1 - \frac{\ell_{KR}}{P(1 - K)} \tag{22}$$

Det gäller således att finna ett uttryck för den kritiska lufthalten. Här kan hydrauliska tryckteorien utnyttjas. Det råder nämligen relativt enkla geometriska samband mellan luftporernas storlek och avstånden mellan dessa porer under förutsättning av att man antar att porerna har en enkel geometrisk form t ex sfärisk.

Powers /1949/ anger två sådana uttryck

$$\ell_{KR} = \frac{1}{0{,}364\left(\frac{\alpha \cdot \bar{L}_{KR}}{3} + 1\right)^3} \quad \text{för } \ell_{KR} \leq 0{,}188 \tag{23}$$

$$\ell_{KR} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \bar{L}_{KR}} \quad \text{för } \ell_{KR} > 0{,}188 \tag{24}$$

$\bar{L}_{KR}$ är halva medelavstånden mellan luftporernas periferier. De båda ekvationerna visar alltså fullt rimligt att lufthalten ökar med ökande porstorlek (α) vid konstant poravstånd eller med minskande poravstånd vid konstant porstorlek.

Indexet KR på $\bar{L}$ markerar att poravstånden har ett kritiskt avstånd som inte får överskridas. Det kritiska avståndet är en direkt följd av förekomsten av hydrauliskt tryck. Ju mindre permeabiliteten är hos det vattenmättade materialet mellan luftfyllda porer desto kortare blir det kritiska poravståndet.

Värden på $\bar{L}_{KR}$ kan beräknas mycket lätt under förutsättning av att d'Arcys lag gäller och materialegenskaperna permeabilitet, draghållfasthet, porositet och isbildningshastighet är kända. Se Powers /1949/.

Warris /1964/ har använt ett annat uttryck för den kritiska lufthalten, vid ett luftporsystem av sfäriska porer

$$\ell_{KR} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot D_{KR}/2} \tag{25}$$

där D_{KR} är den s k kritiska skikttjockleken d v s den tjockaste vattenmättade skiva som inte fryser sönder.

Även värden på D_{KR} kan mycket lätt härledas med d'Arcys lag. Resultatet blir; Se Fagerlund /1972 C/.

$$D_{KR} = \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma_{DR} \cdot B(1-P(1-S_e))}{0{,}09 \cdot W_f \cdot d\beta/dt}} \tag{26}$$

Mellan $\bar{L}_{KR}$ och D_{KR} råder ett visst enkelt samband eftersom båda är härledda ur samma teori (d'Arcys lag)

$$D_{KR}^2 = \frac{8}{3}\left(\frac{\bar{L}_{LR}^3 \cdot \alpha}{3} + \frac{3\bar{L}_{KR}^2}{2}\right)$$

Vid tillräckligt små värden på $\bar{L}_{KR}$ blir $D_{KR}=\bar{L}_{KR}\cdot 2$

Normalt gäller emellertid att $D_{KR}>\bar{L}_{KR}\cdot 2$
Generellt sett anger alltså ekv (25) mindre kritiska lufthalter än ekv (23,24) Den kommer alltså enligt ekv (22) att ge högre värden på den kritiska vattenmättnadsgraden.

Genom ekvationerna (22-27) har gjorts en koppling mellan den kritiska vattenmättnadsgradens storlek och materialets struktur. Det finns ingen parameter vid beräkningen av S_{KR} som det inte är möjligt att bestämma i laboratoriet. I Warris /1964/ och Fagerlund/1973A/ utvecklas de olika parametrarna ytterligare.

I de speciella fall där andra frysmekanismer är aktuella, t ex islinstillväxt i ett material som har stor tillgång till ofruset vatten och där isfronten i materialet ligger still, är det avsevärt mycket mera komplicerat att finna samband mellan materialstruktur och frostbeständigheten.
I sådana fall har en egenskap som värmeledningsförmågan stor betydelse men även permeabiliteten. För övrigt torde det vara omöjligt att överhuvudtaget tala om kritiska vattenmättnadsgrader i detta specialfall eftersom vatten hela tiden tillförs utifrån.

2.5.3 Inverkan av materialstruktur på den aktuella vattenmättnadsgraden

Samband mellan materialstruktur och vattenabsorption är ett "klassiskt" fuktmekaniskt problem. Det skulle föra alldeles för långt att här gå igenom allt vad som är känt inom detta forskningsområde. Vissa synpunkter, som är väsentliga i samband med frostbeständighetsproblemet, framförs dock i Fagerlund/1972C,1973A/och även under punkt 6 nedan.

Det är emellertid självklart på det sättet att frostbeständighetsproblemet är i mycket hög utsträckning ett fuktmekaniskt problem. Detta har kanske inte alltid insetts av "frostforskarna", men blir uppenbart genom det nya sättet att spalta upp frostbeständighetsproblemet i en material- och en miljöberoende del.

Exempelvis nämndes under punkt 2.5.1 studier av porstorleksfördelningens inflytande på frostbeständigheten. De samband mellan porstorleksfördelning och frostbeständighet som dessa studier lett fram till är med säkerhet till stor del betingade av porstorleksfördelningens inverkan på vattenabsorptionen och kanske inte i så stor utsträckning av dess inverkan på den kritiska vattenmättnadsgraden.

Det har under senare år blivit alltmer populärt att studera just porstorleksfördelningar i avsikt att rent av kunna förutsäga materials frostbeständighet. Vissa författare har t o m föreslagit att direkta frystester skulle ersättas med enbart en indirekt test bestående av bestämning av en porstorleksfördelning. Liksom vid andra indirekta värderingar av frostbeständighet uppstår emellertid härvid problem med att finna lämpliga kriterier för vilken porfördelning som motsvarar beständigt material i en viss miljö. Man skulle därför önska att det istället studerades samband mellan porstorleksfördelningar bestämda med en viss metodik och framförallt vattenabsorptionen (S_{AKT}) men även den kritiska vattenmättnadsgraden (S_{KR}).

Genom sådana studier skulle man kanske lättare vinna förståelse av sambanden mellan porstrukturen och frostbeständigheten hos ett godtyckligt material.

3 TIDIGARE UNDERSÖKNING AV KRITISKA VATTENMÄTTNADSGRADER-LITTERATURSTUDIE

3.1 Teoretiska studier

3.1.1 Sluten behållare

Det mest citerade uttrycket för en kritisk vattenmättnadsgrad fås ur villkoret att lufthalten i en sluten behållare måste vara stor nog att härbärgera all is utan att några svällningar hos behållaren uppstår. Uttryckt i effektiv vattenmättnadsgrad fås då följande kritiska värde om lufttrycket i behållaren försummas och isen antas vara luftfri

$$S_{f\ KR} = \frac{W_f}{W_f + 0{,}09 \cdot W_f} = 0{,}917 \qquad (28)$$

Detta uttryck kan åtminstone härledas tillbaka till Hirschwald /1912/. Denne författare använder dock i stället uttryck (2.) d v s porfyllnadsgraden varvid fås

$$S_{e\ KR} = 0{,}917 \qquad (29)$$

Hirschwald ställde dock upp sitt uttryck för natursten och keramiska material. Hos denna typ av material är de icke frysbara vattenmängderna normalt mycket små, varför skillnaden mellan ekv (28) och (29) är försumbar.

Fagerlund /1971 A/ har modifierat ekv (28) med hänsyn till att alla material har en viss töjbarhet. Då fås

$$S_{f\ KR} = 0{,}917 + \frac{\varepsilon_{BR} \cdot 3(1-2\nu)}{1{,}09 \cdot P(1-K)} \qquad (30)$$

Denna ekvation ger något högre värden på kritisk vattenmättnadsgrad än ekv (28).

Man kan också få $S_{f\ KR} > 0{,}917$ under vissa andra förhållanden.

- Vid tunna provkroppar pressas isen ut ur provkroppen varvid den effektiva vattenmättnadsgraden i realiteten minskas. Detta yttrar sig då i att $S_{f\ KR} > 0{,}917$ eftersom S_f definieras med utgångspunkt från de värden på W_f och ℓ som gäller före frysning.
- Om provkroppen har mycket stor draghållfasthet kommer vattnet att förbli ofruset även under normala fryspunkten eftersom isbildningen förhindras av de tryckspänningar som överförs från porväggarna så fort is bildas i porerna i ett vattenmättat material. Vattens fryspunkt sjunker nämligen med ökande tryck. Denna mekanism har bl a föreslagits av Lehmann /1959/ för att förklara förekomsten av ofruset vatten i material vid låga temperaturer. Fagerlund /1972 C/ har emellertid visat teoretiskt att denna mekanism bara kan vara aktuell ner till några få grader under den normala fryspunkten. Normala porösa material har nämligen mycket begränsade draghållfastheter.

3.1.2 Powers /1949/ teori för kritisk kapillär vattenmättnadsgrad i cementpasta

Teorien bygger på hydrauliska tryckteorien (se ovan sid 28). I en isolerad kapillärpor har man en viss vattenmättnadsgrad,

$$S_{f\ KAP} = \frac{W_f'}{W_{f+\ell}'} \cdot$$

Se figur 3 . Kapillären befinner sig helt omgiven av fina gelporer någonstans mellan två luftblåsor på det inbördes avståndet D_{KR}. Observera att kapillären antas vara mycket liten jämfört med D_{KR}. Om nu $S_{f\ KAP}<0,917$ räcker själva kapillären till för att härbärgera den bildade isen i kapillären. Inga krafter uppstår vid isbildningen. Luftblåsavståndet kan vara oändligt stort. Om däremot $0,917<S_{f\ KAP}\leq 1,00$ måste överskottsvatten pressas genom de ofrusna gelporerna ut i luftporerna vid vattnets expansion vid isbildningen. Detta förutsätter att töjningsförmågan är mindre än svällningen vid isbildningen. Därvid uppstår ett hydrauliskt tryck, vars storlek beror på fryshastighet, permeabilitet och avstånd till luftporen enligt en ekvation av typ 26. För varje luftblåsavstånd, D , kan man ha en maximal kapillär vattenmättnadsgrad om inte materialet skall brista. Den kritiska kapillära vattenmättnasgraden enligt Powers blir alltså en funktion av luftblåsavståndet i princip enligt heldragen kurva i figur 4, vilken är beräknad med ledning av en ekvation av typ (26). För $S_{f\ KAP}\leq 0,917$ kan luftblåsavståndet vara oändligt d v s luftporinblandning behöver ej förekomma.

För $S_{f\ KAP}>0,917$ går luftblåsavståndet snabbt mot ett gränsvärde som inte får överskridas och vars storlek kan bestämmas ur ekv (26) (ev ur ekv (26) i kombination med ekv (27)) för $S_{f\ KAP} = 1,0$. Observera att W_f i ekv (26) är definierat för materialvolymen inklusive luftblåsor. Vid full kapillär vattenmättnad har därför S_e i ekv (26) ett värde som innebär att alla porer utom luftbubblorna är vattenfyllda.

Det värde på D_{KR} eller ev $\bar{L}_{KR}$ som således beräknas motsvarar det kritiska värdet D_{KR} i ekv (25) eller $\bar{L}_{KR}$ i ekv (23) och (24).

Praktiska frysförsök (t ex av Beaudoin & Mac Innis /1968/, se nedan punkt 3.2.4 fig 9) har emellertid visat att bruk utan luftinblandning fryser sönder vid kapillära vattenmättnadsgrader, som är något lägre än 0,917. Detta kan bero på någon av följande orsaker:

- Trots att det testade materialet saknar luftinlbandningsporer har de troligen haft en viss mängd grova bearbetningsporer. Om dessa försummats så kommer den kapillära vattenmättnadsgraden att bli skenbart för låg genom att de kommer att inkluderas i luftfylld porvolym i nämnaren i ekvationen för effektiv vattenmättnadsgrad. Som beräkningsexempel kan användas en cementpasta med vattencementtal 0,60, hydratationsgrad 0,60 och den rimliga mängden bearbetningsporer av 4 %.

  En effektiv vattenmättnadsgrad av 0,917 hos porer exklusive bearbetningsporerna ger en effektiv vattenmättnadsgrad av ungefär 0,82 hos materialet inklusive bearbetningsporer. Bakgrunden till denna kalkyl är att den icke frysbara vattenmängden antas följa ett uttryck av typ (105).

- Kapillärerna har en sådan utsträckning att is inte kan bildas i dem utan att krafter av hydraulisk typ uppstår. Vid resonemanget ovan förutsattes nämligen att transportsträcka för undanpressat vatten inne i en enskild kapillär var försumbar. I verkligheten kan man emellertid tänka sig att vissa kapillärer är helt fyllda medan andra,vilka är åtskilda från de förra genom cementgel, är delvis eller helt tomma. I detta fall måste vatten pressas från de fyllda till de tomma kapillärerna. För att undgå skador måste därför den genomsnittliga kapillära vattenmättnadsgraden i alla kapillärporer i det generella fallet vara <0,917. Det exakta värdet blir beroende av kapillärporsystemets utseende. Den heldragna kurvan i figur 4 blir i detta fall parallellflyttad åt vänster till punktstreckad kurva.

- De destruktiva krafterna utgörs inte enbart av hydrauliskt tryck utan av en kombination av sådant tryck och krafter på grund av t ex islinstillväxt. Även i ett sådant fall fås en förflyttning åt vänster av den heldragna kurvan i figur 4.

Av de tre förklaringarna ovan till varför kritiska kapillära vattenmättnadsgrader<0,917 uppmätts torde den första vara den som är mest trolig.

Överhuvud taget är begreppet kapillär vattenmättnadsgrad olämpligt eftersom ingen hänsyn tas till att även "luftporerna", d v s de grövre porerna i cementpastan kan vara helt eller delvis vattenfyllda.

Faktum är emellertid att Powers med sina teoretiska studier, som bl a leder fram till existensen av kritiska kapillära vattenmättnadsgrader, i och med detta också ger den teoretiska grundvalen för existensen av kritiska totala vattenmättnadsgrader.

Så t ex leder hans studier fram till de två uttryck för erforderlig lufthalt som angetts ovan i ekvationer (23) och (24).

Powers utnyttjar emellertid inte möjligheten till en beräkning av kritiska vattenmättnadsgrader, tvärtom förnekar han kategoriskt att kritiska vattenmättnadsgrader kan existera (se Fagerlund /1973 A/).

Utnyttjandet av Powers studier med avsikt att bevisa existensen av kritiska totala vattenmättnadsgrader göres för första gången av Warris år 1964 d v s 15 år efter Powers grundläggande arbete.

Däremellan har dock också ett i detta sammanhang väsentligt arbete av Danielsson och Wastesson /1958/ publicerats.

3.1.3 Danielsson och Wastesson /1958/ betr erforderlig luftporvolym hos cementpasta

Även denna teori bygger på den hydrauliska tryckteorien. Samma pormodell som Powers, figur 3, används.

Enligt Powers erfordrades för frostbeständighet (se 3.1.2 ovan) endast att den kapillära vattenmättnadsgraden inte överskred ett visst värde vars storlek berodde på medelavståndet mellan luftporerna (figur 4). Danielsson och Wastesson tillfogade två villkor:

Villkor 1: Luftporvolymen måste vara så stor och fördelad på ett sådant sätt att hela provkroppsvolymen blir skyddad. Detta villkor kan tillsammans med Powers' villkor uttryckas med ett enda kriterium, vilket tolkat enligt Warris /1964/ är

$$\ell_{KR} = \frac{1}{1+\alpha \cdot \frac{D_{KR}}{2}} \qquad (25)$$

Detta uttryck har även redovisats ovan på sid 31 . Powers har som tidigare nämnts härlett två liknande samband, ekv (23) och (24). I dessa uttryck byts dock D_{KR} mot $\bar{L}_{KR}$, vilket har betydelse först vid större värden på D_{KR} t ex för tegel.

Av ekv (25) framgår att om D_{KR}, eller alternativt α minskas, så ökar luftbehovet i pastan. Detta innebär att vid en tät cementpasta, hög fryshastighet, hög kapillär vattenmättnadsgrad, vilka samtliga sänker D_{KR} och vid stora luftporer, vilket minskar α, så ökar behovet av luftinblandning.

Villkor 2: En bedömning av erforderlig lufthalt med ekv (25) kan teoretiskt sett för porösa cementpastor och höga specifika luftporytor ge så små lufthalter att det expanderande vattnet inte får plats.

Ett ytterligare villkor blir alltså

$$\ell_{KR} \geq 0{,}09 \cdot W_f' \qquad (31)$$

där $0{,}09\, W_f'$ är det frysbara vattnets (i kapillärporerna) expansion vid isbildningen.

Ekv (31) är ingenting annat än en omskrivning av ekv (28).

Det bör observeras att även Danielsson & Wastesson förutsätter att när den kapillära vattenmättnadsgraden är $\leq 0{,}917$ erfordras inga luftporer alls (förutom luftfyllda kapillärer naturligtvis).

För att ge en uppfattning av innebörden av ekv (25) och (31) har lufthaltbehovet enligt de båda ekvationerna beräknats för två av de cementpastor för vilka Warris /1964/ har beräknat teoretiska värden på kritiska tjockleken D_{KR}.

Pasta nr 1 har vct = 0,45 och D_{KR} = 0,22 cm
Pasta nr 2 har vct = 0,70 och D_{KR} = 1,68 cm

Bägge pastorna har sfäriska luftporer med specifika ytan 400 cm^2/cm^3. Fryshastigheten är $30^{\circ}C$/tim.

De frysbara vattenmängderna fås ur ekv (105) med konstanten k=5,5 enligt Warris /1964/. Hydratationsgraden antas vara 70 %.

Resultatet av beräkningan visas i figur 5. Vid en kapillär vattenmättnadsgrad av 0,917 är luftbehovet noll enligt bägge ekvationerna. Vid $S_{f\ kap} = 1{,}00$ fås luftbehovet ur ekv (25) genom insättning av de kritiska avstånden och ur ekv (31) genom insättning av den maximala frysbara vattenmängden i kapillärerna. Vid kapillära vattenmättnadsgrader mellan 0,917 och 1,00 sätts värden på D_{KR} enligt fig 4 in i ekv (25).

Av figuren framgår att villkor 1 är avgörande för den täta pastan medan villkor 2 bestämmer lufthalten i den porösare pastan.

De använda kritiska tjocklekarna verkar dock vara väl höga, vilket troligen beror på en överskattning av materialens permeabilitet vid frystemperaturer. Trots detta är troligen tendensen enligt fig 5 riktig nämligen att villkor 1 blir avgörande för täta material medan villkor 2 är avgörande för mera porösa material.

Även Danielsson-Wastessons teori förutser en kritisk kapillär vattenmättnadsgrad vars storlek blir beroende av materialets kritiska avstånd och luftporstorlek via ekv (25) och av den frysbara vattenmängden vid ekv (31). Teorien anger dock liksom Powers' ovan att alla cementpastor med kapillära vattenmättnadsgrader $\leq 0{,}917$ är frostbeständiga. Den kritik som framfördes ovan beträffande Powers teori gäller alltså även här. Danielsson-Wastessons teori har emellertid en ytterligare fördel. Genom villkor 1 och 2 kan hänsyn tas till att vissa "luftporer" kan vara vattenfyllda. Detta innebär nämligen att α i ekv (25) minskar och att W_f' i ekv (31) ökar om de vattenfyllda luftporerna hänförs till kapillärporerna. Bägge dessa förändringar ger till följd att kvarvarande luftporer måste öka i volym. Ju större vattenabsorptionen är desto större blir den kritiska lufthalten. Vid ett givet luftporsystem uppnås så småningom en så stor vattenabsorption att resterande lufthalt motsvarar den erforderliga. Man har då erhållit maximalabsorptionen och en kritisk total vattenmättnadsgrad kan beräknas.

Warris /1964/ utvecklade Danielsson-Wastessons teori enligt principerna ovan.

Larsson & al /1967/ har på senare år använt sig av samma idé som Danielsson-Wastesson, nämligen att luftporerna skall fördelas på ett sätt så att hela pastavolymen skyddas. I stället för att utnyttja den kritiska tjockleken och porstorleken via α i ett samband med lufthalten enligt ekv (25) använder man ett annat kritiskt avstånd, "Philleo spacing factor", och antalet luftblåsor per volymsenhet pasta. Philleo spacing factor är det avstånd som gäller med en viss sannolikhet mellan en godtycklig punkt inne i pastan och närmaste luftbubbla.

Vid sannolikheten 90 % övergår ekv (25) till

$$\ell_{KR} = 1{,}087 - 1{,}89 \cdot P_{KR} \cdot N^{1/3} \qquad \ell_{KR} \geq 0{,}12 \qquad (32)$$

$$\ell_{KR} = 0{,}474 - 0{,}694 \cdot P_{KR} \cdot N^{1/3} \qquad \ell_{KR} < 0{,}12 \qquad (33)$$

Inte heller dessa författare tar hänsyn till att luftbubblor kan vattenfyllas, vilket gör att man enbart kan använda ekvationerna för att bedöma kritiska kapillära vattenmättnadsgrader. Till detta bidrar dessutom att ekvationerna förutsätter en viss storleksfördelning på luftporerna. Vid en vattenfyllning ändras storleksfördelningen varvid ekv (32) och (33) egentligen inte gäller längre trots att värdet N reduceras på ett riktigt sätt.

3.1.4 Warris betr kritisk vattenmättnadsgrad hos cementpasta och betong /1963/1964/

Warris har som tidigare nämnts vidarutvecklat Powers teori enligt 3.1.2 och Danielsson-Wastessons teori enligt 3.1.3. I princip utnyttjar han ekv (25) för bestämning av erforderlig lufthalt i en cementpasta men tar hänsyn till att vattenabsorption i luftporerna reducerar dessas specifika yta d v s α i ekv (25). Genom att man känner sambandet mellan vattenabsorption och reduktion i α kan man beräkna den kritiska vattenabsorptionen eller kritiska vattenmättnadsgraden med hjälp av (25).

Beräkningsgången är följande:

I en luftinblandad torr cementpasta har man en viss storleksfördelning av luftporerna och en viss lufthalt. Lufthalten = ℓ_o och porernas specifika yta = α_o. (Lufthalt=sfäriska artificiellt inblandade porer).

Vid en vattenabsorption antas att de minsta luftporerna fylls först och vid en viss porfyllnadsgrad är den kvarvarande luftvolymen ℓ_r och dess specifika yta är α_r. (Se figur 6 a).

För varje betong kan man genom att mäta porstorleksfördelningen för luftporerna rita upp sambandet mellan α_r och ℓ_r. En typisk kurva visas i figur 6 b. Av figuren framgår att α_r minskas mycket kraftigt vid en just påbörjad vattenabsorption men att minskningen av α_r sedan avtar vid ytterligare vattenupptagning. Detta indikerar att det är de minsta luftporerna, som står för den största specifika ytan.

Enligt ekv (25) finns det en viss minsta acceptabel luftvolym i betongen för varje α_r

$$\ell_{KR} = \frac{1}{1+\alpha_r \cdot D_{KR}/2} \qquad (25)$$

För en betong, som är tillverkad av den aktuella pastan blir motsvarande kritiska lufthalt

$$(\ell_B)_{KR} = \ell_{KR} \cdot \frac{V_{CP}}{V} \qquad (34)$$

Avståndet D_{KR} kan beräknas ur ekv (26) för en given pasta och fryshastighet under förutsättning av att $S_e = 1$ i ekvationen. Således kan man upprita ett samband mellan α_r och ℓ_{KR} för en given pasta vid given fryshastighet med hjälp av ekv (25). Se fig 6 c .

Villkor för brott i pastan blir nu

$$\ell_{KR} > \ell_r \tag{35}$$

d v s kritisk lufthalt är större än kvarvarande lufthalt efter vattenabsorption.

Man kan lätt rita upp ett samband mellan ℓ_{KR} och ℓ_r genom att använda figur 6 b och 6 c. Se figur 6 d. En 45°-linje från origo delar diagrammet i två hälfter varvid den övre markerar området för "icke frostbeständighet", $\ell_{KR} > \ell_r$, och den undre området för frostbeständighet, $\ell_{KR} < \ell_r$.

Det gäller nu att beräkna vilken vattenmättnadsgrad som motsvarar den kvarvarande luftvolymen ℓ_r d v s i det kritiska fallet vilken kritisk vattenmättnadsgrad som motsvarar den kritiska kvarvarande luftvolymen ℓ_{KR}.

Vattenmättnadsgraden hos en cementpasta kan uttryckas på följande sätt. För härledning se Warris /1964/

$$S_f = \frac{w_o + w_a - 2{,}5\, w_n}{w_o + a_o - 2{,}25\, w_n} = 1 - \frac{a}{w_o + a_o - 2{,}25\, w_n} \tag{36}$$

Lufthalten ℓ resp ℓ_o definierad som m^3/m^3 har i denna formel för enkelhetens skull ersatts med a resp a_o definierade som ℓ/m^3. Vattens densitet antas vara 1000 kg/m^3.

Ekvationen gäller under förutsättning av att det frysbara vattnet w_f är

$$w_f = w_o + w_a - 2{,}5\, w_n \tag{37}$$

Detta värde är något mindre än de som erhålls ur ekv (103).

Den aktuella lufthalten i cementpastan, a, är

$$a = a_o - w_a + 0{,}25\, w_n \tag{38}$$

När vattenmättnadsgraden blir kritisk, uppnår vattenabsorptionen och den kvarvarande lufthalten i cementpastan kritiska värden, $w_{a\ KR}$ och a_{KR}.

Ekv (36) kan då formuleras om till

$$S_{f\ KR} = 1 - \frac{a_{KR}}{w_o + a_o - 2{,}25\, w_n} \tag{39}$$

a_{KR} i ekv (39) kan nu ersättas med uttrycket (25) varvid erhålls

$$S_{f\ KR} = 1 - \frac{10^3}{(w_o + a_o - 2{,}25 \cdot w_n)(1 + \alpha_r \cdot D_{KR}/\bar{2})} \tag{40}$$

I ekv (40) är alla storheter kända. D_{KR} beräknas ur ekv (26). α_{KR} erhålls ur figur 6 b.

Av ekv (40) framgår att en tät cementpasta (eller betong) ger ett lågt S_{KR}. Skenbart skulle alltså en högvärdig betong ha sämre frostbeständighet än en porös svag betong. Detta strider mot erfarenheten och kan förklaras av att den tätare betongen i praktiken uppnår mycket lägre vattenmättnadsgrader än den porösa.

För att bedöma frostbeständigheten i ett aktuellt fall, måste nämligen även den aktuella vattenmättnadsgraden vara bekant, vilket diskuterats utförligt under punkt 2.

Ekv (36) kan skrivas om på följande sätt

$$w_a = S_f \cdot a_o + (S_f(w_o - 2{,}25\, w_n) - (w_o - 2{,}5\, w_n)) \qquad (41)$$

Termen inom parentesen är approximativt noll.

Således gäller vid det kritiska tillfället

$$(w_a)_{KR} \approx S_{f\,KR} \cdot a_o \qquad (42)$$

Villkoret för frostbeständighet blir

$$S_{f\,KR} \geq \frac{w_a}{a_o} \qquad (43)$$

S_{KR} beräknas ur ekv (40) och w_a och a_o mäts.

Det måste observeras att S_{KR} beräknad ur ekv (40) teoretiskt sett kan ge värden>0,917 vid stora värden på D_{KR} och α eftersom teorien enbart bygger på Danielsson-Wastessons villkor 1 (se sid 35). Villkor 2, att luftmängden i materialet skall vara tillräckligt stor för att ta hand om det expanderande vattnet, måste alltså tillfogas till teorien.

Teorien gäller alltså i följande område

$$0 < S_{KR} \leq 0{,}917 \qquad (44)$$

Detta under förutsättning av att inte provkroppen är mindre än den kritiska skikttjockleken, se ekv (26), och att töjbarheten är noll.

Warris har genomfört ovanstående beräkning av S_{KR} för 6 st betongsorter och lyckats få en viss överensstämmelse med frysförsök.

Teorien gäller i princip enbart för cementpasta men har av Warris överförts till att gälla för betong. Förutsättningen härför är att det använda ballastmaterialet i betongen är beständigt, d v s att cementpastan är den svaga länken ur frostbeständighetssynpunkt.

Warris påpekar också att teorin strängt bara gäller för en enda frysning och inte utan vidare kan överföras till upprepade frysningar, vilket dock har gjorts med gott resultat.

En mindre formell svaghet i teorien är att utgångspunkten är att ekv (25) gäller d v s att kritiska avstånd mellan luftfyllda porer existerar.

Dessutom baseras kalkylen av dessa avstånd på att den enda destruktiva kraften i samband med frysning är hydrauliskt tryck.

Powers & Helmuth /1953/ har emellertid visat att även vid förekomst av mikroskopisk islinstillväxt existerar teoretiskt kritiska maximala avstånd mellan luftporer. Dels p g a denna orsak, dels p g a att det hydrauliska trycket troligen är det väsentligaste fenomenet, är Warris ansats mycket rimlig.

Warris studier har karaktären av genombrottsarbeten. De har teoretiskt påvisat att kritiska vattenmättnadsgrader bör kunna existera och har därmed öppnat vägen för ett helt nytt sätt att se på frostbeständighetsproblemet.

Författaren till denna skrift har tagit över Warris idéer och tillämpat dem generellt för godtyckliga porösa material.

3.2 Experimentella studier

3.2.1 Inledning

Man bör kunna ställa följande huvudkrav på en experimentell bestämning av kritisk vattenmättnadsgrad:

- Vid undersökning av ett visst material skall göras en medveten variation av vattenhalten så att ett eventuellt kritiskt värde på denna kan ringas in.
- För varje provkropp som fryses måste vattenhalten hållas under kontroll. Ingen ökning eller minskning av vattenhalten får ske utan att effekten därav på materialets beteende vid frysningen är känd.

Det finns ytterligt få studier utförda som uppfyller båda kraven ovan. De enda som författaren kunnat uppbringa är utförda på cementbruk av Mac Innis & Beaudoin /1968/ och Mac Innis & Lau /1971/, på gasbetong av Purins /1967, 1968/ och på natursten av Thomas /1938/. De fyra förstnämnda arbetena lider dock av en del formella brister. Se nedan.

Även om alltså direkta undersökningar av kritiska vattenmättnadsgrader så gott som helt saknas, finns det otaliga andra undersökningar som indirekt ger stöd för existensen av kritiska fukthalter. Av dessa undersökningar refereras endast ett litet fåtal nedan. Litteraturreferenser ges till ytterligare ett antal. Warris /1964/ gör en analys av ett antal studier, som antyder existensen av kritiska vattenmättnadsgrader för betong.

3.2.2 Whiteside & Sweet /1950/ beträffande cementbruk och betong

Författarna testade ett stort antal olika betongblandningar med vattencementtal från 0,58 till 0,98. För att i möjligaste mån undvika inverkan av olika luftporsystem användes samma luftinblandningsmedel i samtliga blandningar med luftinblandning. Tyvärr testades inte betong med samma vct vid olika vattenmättnadsgrad varför direkta jämförelser med Warris' teori inte kan göras. Vattenmättnadsgraden definierades enligt ekv (3) och frysbara vattenmängden bestämdes enligt Powers & Brownyard /1948/ för $-20^{o}C$.

Resultaten visade att vattenmättnadsgrader >0,90 var förödande medan värden <0,85 gav god beständighet, se figur 7. I området mellan 0,85 och 0,90 förekommer betongsatser med både god och dålig beständighet. Vattencementtalet för betonger i detta område varierar mellan 0,63-0,71, varvid vct = 0,71 visar de högsta S_{KR}.
En punkt faller något ur ramen, nämligen en Durability-factor av 0,99 vid en så låg S som 0,77. Den gäller för en betongsats med vct = 0,58.

Det finns alltså en antydan till att ett lågt vct ger en låg S_{KR} i enlighet med vad Warris fann. Författarna pekar själva på det faktum att t ex en ogynnsammare porstorleksfördelning än den här använda kan föranleda betydligt lägre S_{KR} än 0,85. Warris fann också vid sina försök S_{KR} av storleksordningen 0,60.

Den gynnsamma effekten av en låg vattenmättnadsgrad hos betong har även bekräftats av Flack /1959/. Han fann att en viss tids (7, 14, 28 dygn) uttorkning vid 50 % RH flerdubblade det antal cykler, som erfordrades för att uppnå 25 % viktförlust i jämförelse med betong, som lagrades i dimrum till dagen för första frysning. Eftersom frysningarna skedde i vatten ökade vattenmättnadsgraden successivt, varför några S_{KR} inte kan bestämmas ur Flack's experiment.

Whiteside & Sweets experiment ger alltså klara indikationer på att kritiska vattenmättnadsgrader existerar. De är emellertid ologiska av följande skäl:

- Upptiningar skedde i vatten varvid vattenmättnadsgraden i ytan blev hög.
- Betonger med olika vct kan rimligen inte förväntas ha samma kritiska vattenhalt. Framförallt påverkas luftporsystemets utseende av vattencementtalet och därmed indirekt också S_{KR}. Se ekv (23)-(25).
- Frysbar vattenmängd bestämdes vid -20°C men lägsta frystemperatur i försöket var enbart -10°C. De reella vattenmättnadsgraderna var alltså avsevärt lägre än de beräknade. Se figur 60, som visar temperaturberoenden av frysbar vattenmängd hos betong.

3.2.3 Vuorinen /1969/1970/ beträffande betong

Vuorinen har utfört omfattande tester beträffande betongs frostbeständighet. Cylindrar eller prismor av betong frystes och tinades under en enda cykel, varvid längdändringar under cykeln mättes. Idén bygger på ett arbete av Powers /1955/.

Vattenmättnadsgraden definieras enligt ekv (3). Vuorinen /1970/1971/ har gjort egna mätningar för att bedöma frysbara vattenmängder.

Även Vuorinen /1970/ finner tämligen väl definierade kritiska vattenmättnadsgrader. Se figur 8. De är emellertid mycket lägre än de som uppmättes av Whiteside & Sweet. Enligt Vuorinen ligger de kritiska värdena mellan 0,60 och 0,70. Vuorinen anger själv värdet 0,70. Skillnaden mellan de båda försöken kan ligga i olika uppskattningar av frysbar vattenmängd.

Även Vuorinens försök är i viss mån ologiska eftersom alla betonger betraktas som ett enda material som skulle ha en gemensam kritisk vattenmättnadsgrad.

Vuorinens experiment är emellertid ändå i högsta grad intressanta eftersom de anvisar möjligheter att använda en enda cykel för att bestämma kritiska vattenmättnasgrader.

Vuorinen /1970/ gör dessutom en annan intressant iakttagelse. Om 16 à 19 % av all porositet förblir luftfylld efter 10 à 14 dygns vattenlagring är betongen alltid frostbeständig. Detta är en typisk bestämning av S_{AKT} som den beskrivs under punkt 6. Metoden är dessutom densamma som den s k S-värdes metoden som ofta används för keramik, se nedan punkt 3.2.6. Den goda korrelationen med frostbeständigheten måste anses vara en slump. S_{AKT} ensamt kan inte ge besked om frostbeständigheten utan det måste kompletteras med information om värdet på S_{KR}. Vuorinens egna försöksresultat visar dessutom att ett stort antal betonger är fullkomligt beständiga vid så låga värden som 4 % av total porvolym luftfylld.

3.2.4 Mac Innis och Beaudoin /1968/ beträffande cementbruk

Författarna har testat frostbeständigheten hos cementbruksblandningar. Variablerna har varit vattencementtalet, lufthalten och vattenmättnadsgraden. Testen tillgick på så sätt att provkroppens längdändringar mättes under en långsam nedfrysning. Kriteriet för frostbeständighet var att provkroppen inte fick uppvisa svällning utan helst kontraktion, ett fenomen som iakttogs vid små vattenmättnadsgrader. Jfr fig 201.

Vattenmättnadsgraden definierades av allt att döma enligt ekvation (2) d v s analogt med porfyllnadsgraden, S_e.

Med ledning av data om lufthalter och uppgiften att provkropparnas ålder var mer än 1 månad (d v s hydratationsgraden $\gtrsim$ 60 %) har porfyllnadsgraden kunnat räknas om till vattenmättnadsgrad enligt ekv (3). Icke frysbara vattenmängder enligt ekv(103) har använts. Grundformler för

omräkningen återfinns i Bergström /1967/. Slutresultatet blir

$$S_f = \frac{S_e(vct - 0{,}114 + a\cdot\frac{0{,}32+vct}{1-a}) - 0{,}96\cdot\frac{w_n}{C}}{vct - 0{,}114 + a\cdot\frac{0{,}32+vct}{1-a} - 0{,}96\cdot\frac{w_n}{C}} \qquad (45)$$

där S_e är av författarna angivna värden.

Det omräknade resultatet av testen redovisas i figur 9.

För de icke luftinblandade satserna och för de luftinblandade vid vct >0,60 finner vi den tidigare nämnda tendensen att en ökad täthet d v s, minskat vct ger en minskad S_{KR}. Tyvärr är värdena för de luftinblandade betongerna fåtaliga, varför skiljelinjen mellan beständigt och obeständigt "område" inte kan dras med skärpa. Mellan de luftinblandade och icke luftinblandade satserna med vct <0,58 förefinns en tydlig diskrepans. Av figuren verkar det som om luftinblandat cementbruk kan vara fullständigt vattenmättat utan att frostskador uppträder bara vct är tillräckligt lågt. Denna slutsats drar också författarna trots att den är uppenbart orimlig. Visserligen är provkropparna små, 2,5 x 2,5 x 25 cm, men vid vct=0,60 är D_{KR} d v s den kritiska skikttjockleken högst=0,3 cm, vilket kan beräknas ur ekvation (26) och fysikaliska data för cementpasta enligt Warris /1964/.

Den förklaring, som verkar mest trolig är att man fått för små värden vid bestämningen av provkropparnas porositet. Enligt uppgift i rapporten har man nämligen gjort så att man torkat provkropparna vid 200°F, varefter de placerats i en vattentank, som evakuerats under 1 tim tid. Därefter har provkropparna legat i vattnet i 24 tim innan de vägts. Purins /1968/ har dock visat att gasbetong med volymvikt 0,65 kg/dm^3 uppnår endast ≈34 % porfyllnadsgrad efter 1 tim evakuering till 0,1 kp/cm^2 om provkropparna förvaras nersänkta i vatten. Vid volymvikten 0,5 kg/dm^3 uppnås 87 % porfyllnadsgrad vid samma behandling. Det verkar därför rimligt att anta att en timmes evakuering av täta cementbruk med luftporer är otillräckligt för att uppnå full vattenmättnad i luftporerna.

Detta kan för övrigt förklaras rent fysikaliskt. I och med att provkropparna sänks ner i vattentanken sker en absorption. Därvid kan man teoretiskt visa att de fina porerna kommer att tömma de grövre på vatten i den mån de grövre porerna absorberat något vatten alls. De grövre porerna, t ex en luftpor i en cementpasta är nu omgivna av vattenfyllda fina porer. För att fylla luftporen erfordras att luften i poren försvinner. Detta kan bara ske när följande villkor på lufttrycket i poren är uppfyllt

$$\Delta P = -\frac{2\cdot\sigma}{r}\cos\ 0 \qquad (46)$$

där r är smalaste vattenfyllda passage för luften att passera. Vid vacuumbehandlingen blir ΔP bara ≈10N/m^2 och detta räcker inte för att fylla en luftpor i en betong eftersom kapillärporerna är fina.

För övrigt uppnås genom att evakuera över en vattenyta ett resttryck, som är ungefär lika med vattnets mättnadstryck vid den aktuella temperaturen d v s ungefär 15-20 mm Hg. Porerna kan därför inte fyllas fullständigt.

För cementbruk utan luftinblandning d v s med enbart kapillärporer är det troligt att de angivna porfyllnadsgraderna är mera riktiga.

En enkel kalkyl ger vid handen att om $S_{f\ KR}$ = 0,75 för luftinblandad betong vid vct = 0,40, vilket kan tänkas med ledning av en extrapolation ur figur 9, så skulle porfyllnadsgraden vara 0,83, vilket vid 9 %

luft innebär att 55 % av luftporerna är vattenfyllda.

För de icke luftinblandade satserna pekar försöket klart på existensen av en kritisk vattenmättnadsgrad.

Mac Innis & Lau /1971/ har senare använt samma teknik för att studera inverkan av vattenmättnadsgrad, vct och stenstorlek på betongs frostbeständighet. Även dessa experiment antyder klart existensen av kritiska vattenmättnadsgrader. Tyvärr är differenserna mellan olika vattenmättnadsgrader för stor för att de kritiska värdena skall gå att ringa in med någon nämnvärd precision.

3.2.5 Purins och Linden /1967/ beträffande högtrycksånghärdad gasbetong (Siporex)

Bestämningar av kritisk vattenhalt i volym-% har utförts för Siporex med de tre nominella volymvikterna, 0,4, 0,5 och 0,65 kg/dm^3.

I figur 10 har resultatet uttryckts i porfyllnadsgrad, varvid följande formel har använts för att översätta vattenhalt till porfyllnadsgrad

$$S_e = \frac{u_v}{100 \cdot P} = \frac{u_v}{(1 - \frac{\gamma}{\rho})100} \qquad (47)$$

γ antas vara 2700 kg/m^3. I figur 10 har även lagts in kurvor motsvarande den specifika vikt Purins bestämt nämligen 2160 kg/m^3. Detta värde verkar emellertid vara alldeles för lågt.

Vattenmättnadsgraden enligt ekvation (3) kan inte beräknas emedan den frysbara vattenmängden är obekant.

Resultatet står skenbart i motsats till vad som erhållits för betong. Vi finner ju här en högre kritisk porfyllnadsgrad ju högre volymvikten är dvs ju kompaktare materialet är. Materialet Siporex är sådant att en tillämpning av Warris' teori är tänkbar. Den utslagsgivande ekvationen enligt denna teori är ekv (25) för bestämning av kritiskt luftbehov. Ett lägre kritiskt luftbehov ger en högre kritisk vattenmättnadsgrad. För att minska det kritiska luftbehovet, ℓ_{KR}, ser vi av ekv (25) att α eller D_{KR} eller båda måste ökas.

Värdet D_{KR}, d v s det kritiska luftblåsavståndet bör bli större ju större volymvikten är. Av ekv (26) framgår nämligen att den enda variabel som påverkar D_{KR} vid en förändring av volymvikten är hållfastheten.

"Gelen" bör vara densamma hos alla volymvikter d v s permeabiliteten ungefär densamma. Porositetsförändringen är också liten.

Värdet α ökar om luftblåsornas storlek minskar. Författarna bestämde pordiameterfördelningen hos de tre lättbetongkvaliteterna och fann en stark förskjutning av porstorlekarna mot minskande värden vid ökande volymvikter, porstorleksklassen 0,2-0,5 mm ökar från 27 till 45 % vid övergång från volymvikt 0,46 till 0,50 och 0,69, och porer <0,2 mm ökar från 9 till 16 % vid övergång från volymvikt 0,46 och 0,50 till 0,69.

Specifika ytan för klotporerna ökar således med ökande volymvikt, medan det kritiska luftbubbelavståndet ökar på grund av ökande hållfasthet.

Resultatet står alltså i samklang med Warris' teori.

3.2.6 Thomas /1938/ beträffande natursten, tegel och kalksandsten

I sitt klassiska arbete om frostbeständighet hos vissa "byggnadsstenar" undersöktes Thomas, bland flera andra variabler, även vattenmättnadsgradens inverkan på frostbeständigheten. Thomas konkluderar att inga skador uppkom hos något material när porfyllnadsgraden var <70 %. I ett enda fall skedde inga skador när porfyllnadsgraden var så hög som 90 %.

Det primära ändamålet med undersökningen var inte att bestämma kritiska vattenmättnadsgrader. Detta genomfördes fullständigt egentligen endast för ett enda material, en kalksandsten. Av längdmätningar vid frysning visade det sig dock generellt att expansionerna blev större ju större porfyllnadsgraden var. Se figur 11., som visar encykelförsök ner till -10°C för olika naturstenar. Av figuren framgår att S_{KR} varierar mellan 0,71→0,90. Värdenas verkliga storlek beror på vilket kriterium man uppställer för frostskador, i detta fall hur stora E-modulförluster, som accepteras. Tyvärr saknas sådana upplysningar, som kan förklara de olika kritiska värdenas storlek. Längdmätningar hos den ovannämnda kalksandstenen redovisas i figur 12. Värdena gäller 1:a frysningen och vid -6°C.

Vid porfyllnadsgrader <15 % sker ingen längdändring, d v s den icke frysbara vattenmängden torde motsvara 15 % av den maximala. Med ledning av detta värde har vattenmättnadsgraden enligt ekvation (3) beräknats.

Mellan en vattenmättnadsgrad på $0 < S < 0,77$ har vi en kontraktion förmodligen beroende på islinstillväxt. Därefter sker en gradvist ökande expansion. $S_{f\ KR} = 0,77$, d v s värdet där en expansion inträder.

3.2.7 S-värdesteorin

Hirschwald /1912/ ifrågasatte sin tids metod att frystesta byggnadsmaterial genom att först vattenmätta dem och sedan frysa 24 gånger. Han ansåg att i naturen frostbeständiga material missgynnades med denna frysmetod och menade att provkropparna enbart skulle fyllas på ett "naturligt sätt" före frystesten. Hans avsikt var t o m att göra frystester överflödiga. I den mån den i naturen maximalt uppnådda porfyllnadsgraden eller det s k S-värdet var <0,917 så var materialet frostbeständigt enligt Hirschwald.

Tankegången är densamma, som ligger bakom idén om en kritisk vattenmättnadsgrad, men som många gånger påpekats så får man de flesta gånger frostskador även vid porfyllnadsgrader <0,917. Det gäller nämligen, vilket Danielsson-Wastesson påpekade, (punkt 3.1.3) inte endast att ha 9 % luft i materialet, det gäller dessutom att ha luften gynnsamt fördelad, vilket S-värdesteorin inte tar hänsyn till.

Hirschwald modifierade emellertid själv sitt frostbeständighetskriterium. Gränsen 0,917 betraktades inte längre som definitiv.

Hirschwalds idé har trots sina brister girigt anammats inom tegelbranschen, framförallt av Breyer /1955/1970/, som är dess främste förespråkare. S-värdet kan definieras på följande sätt

$$\text{S-värde} = \frac{(Q_w)_{MAX}}{V_{Pö} \cdot 10^3} = \frac{(W_e)_{MAX}}{P_ö} \qquad (48)$$

En svaghet med S-värdet är att dess storlek beror på sättet för bestämning av värdena $(W_e)_{MAX}$ och $P_ö$, vilket Schneider /1962/, som starkt kritiserat S-värdesteorin, påpekat. En vanlig åsikt är dock att $(W_e)_{MAX}$ skall bestämmas genom 5 dygns "vattenlagring" och $P_ö$ genom vakuumbehandling under vatten vid 20 torr resttryck och därefter vattenlagring vid atmosfärstryck i 2 timmar.

Med dessa metoder blir porositeten för låg, åtminstone hos material med luftporer (se ovan punkt 3.2.4). Troligen kan även den aktuella vattenhalten bli högre under vissa omständigheter. Flera undersökningar (se nedan punkt 6.7) visar att en tegelvägg i praktiken kan uppnå högre vattenhalter än vad som motsvarar flera dygns vattenlagring.

Breyer, som nyanserat Hirschwalds kriterium, anger följande gränser för en indirekt bedömning av frostbeständighet med hjälp av S-värdet:

S > 0,90	"Frostunbeständig"
0,80 < S < 0,90	"Bedingt Frostbeständig"
S < 0,80	"Frostbeständig"

Tyvärr har otaliga experiment visat att S-värden <0,80 ger obeständighet. Se t ex figur 105 . Dessutom är det så olyckligt att S-värdena för många tegelsorter hamnar i området 0,80-0,90 d v s det område där Breyer svävar på målet.

Det är helt enkelt så att materialgruppen tegel är så stor att det är omöjligt att på detta sätt ange ett enda kritiskt S-värde.

En jämförelse med Warris' teori för betongs kritiska vattenmättnadsgrad (sid 37) visar att man för att få samma kritiska S-värde för olika tegelsorter, måste hålla följande variabler konstanta; draghållfasthet, permeabilitet, specifika ytan hos de grövsta, d v s luftfyllda, porerna samt storleksfördelningen hos samma porer. (Jfr ekv (25) och (26)).

Det är helt orealistiskt att tänka sig att denna konstans kan hållas för tegel som är tillverkade av helt olika råvaror, med olika metoder för bearbetning av råvarorna, olika bränningsgrad osv. Däremot bör det vara rimligt att kunna bestämma ett kritiskt S-värde eller bättre en kritisk vattenmättnadsgrad för material med en väl definierad kombination av fysikaliska egenskaper, t ex för ett tegel från ett enda tegelbruk med god kvalitetskontroll. Härvid bör påpekas S-värdets stora förtjänster som en indirekt kontroll på jämnhet i produktionen.

Så länge S-värdet hålls konstant vid tillverkningen, kan man förvänta sig att även frostbeständigheten är under kontroll.

Ett exempel på sambandet mellan frostbeständighet och S-värde för taktegel redovisas av Schneider. (Se figur 13). Härvid bör observeras att frysprovningen har skett efter det att provkropparna har fått suga vatten i 13 dygn. De har därför porfyllnadsgrader vid frysningen, som är högre än vad som anges av det normala S-värdet. Till S-värdet skall därför adderas ungefär 0,06. Den använda metoden att frysprova , strider i högsta grad mot teorien för kritisk vattenmättnadsgrad. P g a att upptiningarna skedde i vatten ökade nämligen porfyllnadsgraderna väsentligt med tiden. (Se figur i Fagerlund /1971 A/).

Man ser emellertid en tydlig tendens till att ett högt S-värde ger en dålig frostbeständighet, men undantagen är legio. Framförallt är sorterna K och S avvikande. Tyvärr saknas sådana data i rapporten att dessa avvikelser kan förklaras.

Winkler /1958/1959/ redovisar porstorleksmätningar hos tegel med nästan samma S-värde men med helt olika frostbeständighet, se figur 14-15.

Under förutsättning att det är de grövsta porerna som är luftfyllda så framgår av figuren att för det frostbeständiga teglet är den minsta luftfyllda poren ≈1,5μ och för det icke frostbeständiga ≈0,6μ. Samtidigt är det icke frostbeständiga teglet avsevärt tätare än det icke frostbeständiga. Specifika ytan, α, för det frostbeständiga teglet är alltså mindre än för det icke frostbeständiga medan permeabiliteten, d v s den kritiska skikttjockleken är större. Om den i ekv (22-27) skisserade teorien skall gälla, måste därför differensen i permeabilitet (och hållfasthet) vara avsevärt mycket större än differensen i specifik yta.
Tyvärr saknas data om permeabiliteten, varför teorien inte kan testas.

Man får emellertid här en klar indikation på att två tegelsorter med samma S-värde inte nödvändigtvis behöver ha samma kritiska vattenmättnadsgrad. Diskrepanserna i figur 13 kan troligen förklaras på ett likartat sätt.

I princip kan man säga att man genom S-värdesteorien enbart beaktar delen S_{AKT} av frostbeständighetskomplexet som det uttrycks i ekv (11). Man utför visserligen frysförsök, men antar i princip att den kritiska vattenmättnadagraden d v s delen S_{KR} av frostbeständighetskomplexet är konstant. I denna rapport redovisade resultat visar att detta antagande är felaktigt. Hittills har alla försök att finna en entydig korrelation mellan S-värdet och frostbeständigheten misslyckats. Detta beror säkerligen på att de kritiska vattenmättnadsgraderna är så starkt varierande. I punkt 7.6.2 redovisas frysförsök av tegel där det visar sig att de kritiska vattenmättnadsgraderna varierar mellan <0,60 och 0,91. En diskussion av S-värdesteorien genomföres i Schneider /1963/.

Några renodlade försök att bestämma kritiska vattenmättnadsgrader för keramik har inte kunnat uppbringas i litteraturen. Däremot föreligger otaliga försök, där samband mellan S-värde och frostbeständighet studerats. Se nästa punkt.

3.2.8 Lista över försök som indikerar att kritiska fukthalter existerar

Exempel på väsentliga arbeten som pekar på existensen av kritiska vattenmättnadsgrader, men där inga direkta bestämningar av sådana görs är;

- Betr natursten; Mamillan /1958, 1967/, Camerman /1958/. Butterworth /1948/, Honeyborne & Harris /1958/, Tourenq /1970/.
- Betr betong; Verbeck & Landgren /1960/, Cordon & Merrill /1963/, Bergström /1955/, Valore /1950/, Buth & Ledbetter /1968/, Walker & Hsieh /1968/, Klieger & Hanson /1961/, Gaynor & Meininger /1967/, Landgren & Sweet /1952/. Tremper & Spellman /1961/, Ivey & Torrans /1970/, Schäfer /1964/, Ledbetter & Buth /1970/, Klieger /1952/, Harman & al /1970/, Walz & Schäfer /1965/, Beaudoin & Mac Innis /1972/, Blümel & Frey /1968/, Walz & Helms-Derfert /1966/, Maso /1969/.
- Betr keramik; Bergmann /1956/1957/ Markestad /odat/, Kreüger /1923/, Butterworth /1964 A, 1964 B/, Harkort /1960/, Dietzel & Weisner-Kieffer /1953/, Amrein & al /1963/, Mc Burney & Lovewell /1933/, Mc Burney /1935/, Amrein & Gloor /1968/, Poggi /1964/, Ohnemüller /1960/, Winkler /1958, 1959/, Mac Burney & Eberle /1939/.
- Betr kalksandsten; Rauschenfels /1970/
- Betr gips; Grosch /1970/

Av utrymmesskäl diskuteras inte innehållet i de nämnda rapporterna.

4 METODIK FÖR EMPIRISK BESTÄMNING AV KRITISKA VATTENMÄTTNADSGRADER MED FLERCYKELFRYSNINGAR

4.1 Inledning

När undersökningen startades betraktades existensen av kritiska vattenmättnadsgrader enbart som en hypotes. Visserligen fanns det vissa indikationer på att sådana kritiska värden kunde existera t ex undersökningarna av Whiteside & Sweet /1950/, Thomas /1938/ och Warris /1964/. Vi visste emellertid inte "hur kritiska" de var dvs med vilken precision de måste kunna bestämmas.

Följden blev att försöken redan från början planlades på ett sådant sätt att alla eventuella störningar skulle undvikas. Målsättningen var att om kritiska vattenmättnadsgrader verkligen existerade, skulle de också påvisas vid våra tester.

Störande faktorer som måste undvikas var framför allt:

- Variationer i vattenmättnadsgraden under själva testen.
- Fuktgradienter genom provkroppen.
- Temperaturgradienter genom provkroppen.
- Olikheter i materialegenskaper mellan olika provkroppar som skulle representera samma material.
- Felaktigheter vid bestämning av porvolymer.
- Osäkerheter vid bedömning av skador. Detta desto mer som normalt inga ytskador utan enbart inre skador kunde förväntas.
- Temperaturgradienter i själva frysutrymmet.
- Brister i reglering av fryscykeln.

Dessa förmodade svårigheter har helt satt sin prägel på hela frysmetodiken. Eftersom ingen apparatur alls fanns när forskningen påbörjades, måste allt byggas upp.

Strävan var därvid att åstadkomma bästa möjliga precision inom de ekonomiska ramar och den tid som stod till förfogande.

De första frysförsöken med två tegelsorter, en sorts kalksandsten och tre asbestcementprodukter utfördes med ett mycket stort mått av noggrannhet. Så t ex användes ett extremt stort antal provkroppar, som valts ut noga med hjälp av förförsök, mättes temperatur- och fuktgradienter, bestämdes frysbara vattenmängder, hölls fryscykeln under stor kontroll, studerades inverkan av fukttillstånd på dynamisk E-modul, inre friktion och längd (tjocklek), studerades fortgående hydratation med vatten i porsystemet etc.

Med dessa första grundläggande försök lärdes tekniken. En stor del av de förmodade svårigheterna visade sig lyckligt nog vara överdrivna. Antalet provkroppar och fryscykler kunde starkt begränsas.

De senare försöken har i stället gjorts i det närmaste rutinmässigt med få provkroppar som valts utan att någon speciell förstudie av deras egenskaper gjorts och med få fryscykler.

Metoden måste nu betraktas som både lätt och snabb och bör i princip kunna användas av varje någorlunda välutrustat laboratorium.

När detta skrivs planeras en internationell jämförande studie av betongs frostbeständighet baserad på begreppet vattenmättnadsgrad. Undersökningen skall göras i regi av RILEM's arbetsgrupp "Durability of Concrete".

De kritiska vattenmättnadsgraderna avses därvid undersökas med den utrustning, som respektive laboratorium förfogar över. Så t ex antas inte fryscykelns exakta utseende vara av så stor betydelse att den måste

styras noggrant. Det väsentliga är att en viss lägsta temperatur nås inte alltför snabbt och inte heller alltför långsamt.

Fortsättningsvis skall i detta kapitel gås igenom de avväganden som gjordes inför valet av olika mätmetoder. Dessutom beskrivs den använda apparaturen.

4.2 Provkroppar

4.2.1 Storlek och form

Den kritiska vattenmättnadsgraden måste betraktas som en materialkonstant. Detta förhållande utgör ju hela basen för det nya sätt att dimensionera ett material med avseende på dess frostbeständighet, som skisserades i punkt 2.3. S_{KR} skulle alltså generellt sett vara exakt densamma för varje liten frysande "enhetscell" inne i en större materialvolym.

Om den kritiska vattenmättnadsgraden skall vara en materialkonstant bör den därför vara oberoende av bl a provkroppsstorleken. Denna skulle alltså principiellt sett kunna väljas i vilket format som helst analogt med en enaxiell hållfasthetsprovning av t ex stål där hållfastheten görs oberoende av provkroppsstorlek genom division av den uppmätta brottkraften med tvärsnittsytan.

I fallet kritisk vattenmättnadsgrad är emellertid förhållandena inte så enkla.

För det första är det fråga om porösa material för vilka det i vissa fall finns ett påtagligt storleksberoende på hållfastheten. Draghållfastheten är en parameter som har en viss om än begränsad effekt på värdet av S_{KR}. Detta diskuteras närmare i Fagerlund/1972C/. Här kan enbart nämnas att maximalvärdet på denna effekt (det praktiska värdet är avsevärt mindre) kan approximativt fås ur ekv(49);

$$\frac{S_{KR}}{(S_{KR})_o} = \frac{1 - \dfrac{1}{(1 + k_1 \cdot \sqrt{\sigma_{DR}}) \cdot k_2}}{1 - \dfrac{1}{(1 + k_1 \cdot \sqrt{(\sigma_{DR})_o}) \cdot k_2}} \qquad (49)$$

Där konstanterna k_1 och k_2 är beroende av materialens porstruktur. Se Fagerlund/1972C, 1973A/

Eftersom $k_1 \cdot \sqrt{\sigma_{DR}}$ ofta är >>1 kan ekv(49) göras om till ekv(50);

$$\frac{S_{KR}}{(S_{KR})_o} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot \sqrt{\sigma_{DR}} - 1}{k_1 \cdot k_2 \cdot \sqrt{(\sigma_{DR})_o} - 1} \cdot \frac{\sqrt{(\sigma_{DR})_o}}{\sqrt{\sigma_{DR}}} \qquad (50)$$

Samband mellan hållfastheter vid olika provkroppsvolymer studerades teoretiskt första gången av Weibull/1939A,B/Sedermera har otaliga studier publicerats.

Hult /1966/ anger följande samband mellan medelhållfastheter vid olika provkroppsvolymer

$$\frac{\bar{\sigma}_{DR}}{(\bar{\sigma}_{DR})_o} = \left(\frac{1}{r}\right)^{1/m} \qquad (51)$$

Där konstanten r kan tolkas som förhållandet mellan den stora och lilla stavens volym.

Effekten av volymen på hållfasthet uttrycks genom konstanten m. Denna kan bestämmas empiriskt. m anger teoretiskt sett vilken spridning som erhålls vid en serie hållfasthetsmätningar vid en viss provkroppsstorlek. Sambandet mellan brottsannolikheten, S, och hållfastheten σ_B är enligt Hult /1966/

$$S = 1 - e^{k \cdot \sigma_B^m} \qquad (52)$$

när $m \to \infty$ finns ingen spridning i försöksresultaten, man har då inte heller någon volymseffekt, vilket framgår av ekv(51).

Vid små värden på m är såväl försökspridning som volymseffekt påtagliga. Weibull/1939A/ anger t ex värdet m = 5,1 för gips och m = 9,1 à 16,2 för olika porslinstyper. Coble & Kingery /1956/ har visat att konstanten m ökar med minskande porositet hos sintrad Al_2O_3. m = 8 vid porositeten 10 % och m = 11 vid porositeten 40 %. Spridningarna i hållfasthetsvärden minskade alltså med ökande porositet.

Vi kan nu göra en approximativ kalkyl av inverkan av provkroppsstorlek på värdet av S_{KR} för ett visst material. Antag att $(S_{KR})_o = 0,70$; $k_2 = 0,30$; $k_1 \cdot \sqrt{(\sigma_{DR})_o}$ blir då 10,1 enligt ekv(49); m=4(ett ganska lågt värde).

En ökning av provkroppsstorleken t ex från prismor 30 x 30 x 120 mm^3 till prismor 40 x 40 x 160 mm^3 ger en volymökning med 2,35 gånger.

Då blir förhållandet i medeldraghållfasthet enligt ekv(51);

$$\frac{\bar{\sigma}_{DR}}{(\bar{\sigma}_{DR})_o} = \left(\frac{1}{2,35}\right)^{1/4} = 0,81$$

Förhållandena mellan S_{KR} blir då enligt ekv(49);

$$\frac{(S_{KR})}{(S_{KR})_o} = \frac{1 - \frac{1}{(1 + 10,1\sqrt{0,81})\ 0,30}}{0,70} = \frac{0,67}{0,70} = 0,96$$

Något lägre förhållande erhålls med den approximativa ekv(50).

Tänker vi oss istället att en övergång sker t ex för betong eller cementbruk från prismor 40 x 40 x 160 mm^3 till för materialet mera representativa cylindrar ϕ100 mm x 200 mm blir volymförhållandet r = 6,1. Bibehålls det låga m-värdet 4 blir nu hållfasthetsförhållandet;

$$\frac{\bar{\sigma}_{DR}}{(\bar{\sigma}_{DR})_o} = \left(\frac{1}{6,1}\right)^{1/4} = 0,64$$

Förhållandet mellan S_{KR} blir då enligt ekv(49):

$$\frac{S_{KR}}{(S_{KR})_o} = \frac{0,63}{0,70} = 0,90;$$

I själva verket blir inte minskningen i S_{KR} så stor som ekvationerna (49) och (50) utsäger. Vid en förändring av en parameter, som bestämmer värdet på S_{KR} måste nämligen också hänsyn tas till denna parameterförändrings effekt på luftporsystemets utseende. Denna senare effekt kommer in på så sätt att konstanten k_1 inte förblir oförändrad. Mekanismen i detta visas i Fagerlund/1973A/. Trots detta har uppenbarligen storlekseffekten på hållfasthet en avsevärd betydelse på den kritiska vattenmättnadsgraden, åtminstone rent teoretiskt.

Man bör nämligen notera att även en så liten förändring som 0,01 i vattenmättnadsgrad kan ha en stor betydelse för materialets beständighet, jfr punkt 2.2 ovan.

Mot beräkningen ovan kan eventuellt framföras att det egentligen inte inte är provkroppens medelhållfasthet som avgör värdet på S_{KR} utan medelhållfastheten i ett litet parti inne i provkroppen som motsvarar den s k kritiska storleken, i detta fall den kritiska sfären, jfr Fagerlund/1973A/.

Den kritiska sfären är den största helt vattenfyllda sfär av materialet som inte fryser sönder. Inne i materialet kan man principiellt tänka sig att ett otal vattenfyllda sfärer existerar. De omskriver materialpartier mellan luftfyllda porer, se fig 16. Ju högre medelvattenmättnadsgraden är i materialet desto större blir de vattenfyllda sfärerna. Deras radie kan kallas R_{AKT}.

Men den kritiska sfären är lika stor oavsett hur stor provkroppen är så länge denna är större än den kritiska sfären. S_{KR} skulle i så fall vara oberoende av provkroppsstorleken.

Man kan emellertid tänka sig att på grund av varierande materialegenskaper över en provkroppsvolym kommer den kritiska sfären att få en viss storleksfördelning. Om man förser en liten provkropp med vatten till en viss vattenmättnadsgrad, som motsvarar den kritiska för provkroppen, antas alla vattenfyllda sfärer inne i provkroppen vara mindre än den minsta kritiska sfären. Inga skador sker då. Fyller vi istället en större provkropp till samma vattenmättnadsgrad är sannolikheten stor att det finns kritiska sfärer inne i materialet som är mindre än den största vattenfyllda sfären. I de lokala områden där detta sker uppstår då brott i materialet såvida alla kritiska sfärer antas vara opåverkade av förekomsten av andra sfärer (vilket i realiteten motsvarar att det porösa materialet antas bestå av granuler med en kornstorleksfördelning motsvarande de kritiska sfärerna). Följaktligen bör S_{KR} bli lägre för en stor provkropp än för en liten. Resonemanget ovan påminner om det resonemang som för fram till ekv(51). Principen visas i fig 17.

Antagandet ovan att materialet skulle bestå av ett antal diskreta kritiska sfärer är naturligtvis ytterst tveksamt vid första påseendet. Brott i en sfär sker naturligtvis inte lika lätt om den är ensam som om den utgör den del av en fast provkropp. Omgivande sfärer påverkar i hållfasthetshöjande riktning. Detta argument bortfaller emellertid om man definierar de kritiska sfärernas storlek inte som om de vore ensamma utan som påverkade av omgivande sfärer. Det är i så fall inte enbart närmast omgivande sfärer som påverkas utan också sfärer på större avstånd.

För tegel har vi uppmätt s k kritiska tjocklekar (Fagerlund/1973A/) av 12 à 14 mm, vilket motsvarar kritiska radier av 10,4 à 12,1 mm.

Det normalt använda provkroppsformatet är 30 x 30 x 120 mm^3. I fig 18a har kritiska medelsfärer utritats för denna provkropp. Som synes kommer varje sfär att i planet påverkas av två omgivande sfärer. Vi har också testat provkroppsformatet 40 x 40 x 120 mm^3. Kritiska sfärer enligt ovan för denna provkropp har utritats i fig 18b. Här påverkas varje hörnsfär av två andra medan mittsfären påverkas av inte mindre än 4 stycken andra sfärer i planet.

I genomsnitt bör alltså den kritiska sfärens genomsnittliga storlek bli större i den större provkroppen. Detta bör alltså i princip höja värdet på S_{KR} hos den större provkroppen såvida inte det statistiska resonemanget enligt ovan (fig17) beaktas utan man antar att alla kritiska sfärer har en viss lika stor medelstorlek.

För material som kalksandsten, gasbetong, betong är de kritiska sfärerna mycket små varför en ökning av en provkroppsstorlek enligt ovan inte kan spela någon roll.

Ett annat förhållande inträffar naturligtvis om frysning sker enbart i ytan medan ett kärnparti av provkroppen förblir ofruset. I detta fall ger det inre partiet ett motstånd mot expansion av det frysande partiet. Detta kan tolkas som en lokal höjning av hållfastheten, d v s av den kritiska sfärens storlek. Därmed stiger även S_{KR} för provkroppen. Hållfasthetshöjningen kan emellertid förväntas vara liten för en avspjälkning av ytskiktet varför denna funktionsskillnad mellan en liten provkropp och en stor materialvolym inte diskuteras mera. Fenomenet behandlas även av Warris /1964/.

Ytterligare en faktor som måste beaktas är isutträngning från provkroppen. I ett ytparti måste påfrestningarna i provkroppen bli mindre än inne i det inre av provkroppen. Orsaken till detta är att det hydratiska tryck som uppstår vid isbildningen måste vara noll vid materialets yta. Sedan växer det inåt tills det når ett maximalvärde som i ett idealt material är konstant över hela provkroppsvolymen. Det djup där maximalvärdet uppnås är minimalt halva kritiska tjockleken för materialet. Detta gäller för en helt vattenmättad provkropp. Djupet växer sedan något med minskande vattenmättnadsgrad.

Tryckgradienten antas approximativt vara rätlinjig från materialytan upp till det kritiska djupet. Detta gäller för ett ideellt material med konstanta materialegenskaper. I figur 19 har nu utritats tryckfördelningen i de två tvärsnitten i figur 18. Materialet är alltså tegel med D_{KR} = 13 mm; $S_{AKT} = S_{KR}$; Maximal spänning antas uppnås på djupet $D_{KR}/2$ från ytan.

Spänningsfördelningen i tvärsnittet bildar alltså en stympad pyramid.

Den generella formeln för spänningsvolymens storlek blir vid kvadratisk provkroppsyta

$$P = \sigma_{max}\{(\ell - D_{KR})^2 + D_{KR}(\ell - D_{KR}) + 0{,}33\, D_{KR}^2\} \qquad (53)$$

Provkroppens tvärsnittsyta är

$$Y = \ell^2 \qquad (54)$$

Medelspänningen i tvärsnittet blir då

$$\sigma_m = \frac{P}{Y} \qquad (55)$$

I de båda fallen i figur 19 blir medelspänningen enligt ekv (53)-(55)

storlek 30 x 30 x 120

$\sigma = 0{,}63 \cdot \sigma_{max}$;

storlek 40 x 40 x 120

$\sigma = 0{,}71 \cdot \sigma_{max}$;

Spänningsförhållandena blir alltså

$$\frac{\sigma_{stor}}{\sigma_{liten}} = 1{,}13;$$

För material med små D_{KR} blir skillnaden i spänning mellan olika provkroppsstorlekar obetydlig.

I figur 20 har ekv (55) ritats upp. Det är tydligen först vid tvärsnitt, som är av storleksordningen 3 à 4 gånger D_{KR} som effekten i spänningsreduktion börjar bli stor. För tegel är D_{KR} alltså åtminstone 12 à 14 mm, vilket gör att provkroppsstorleken rätteligen borde vara minst 36 à 42 mm som kantlängd. För betong är D_{KR} kanske enbart 0,5 à 1 mm, varför provkroppsstorleken kan göras mycket liten.

Vid nyss genomfört resonemang antas alltså att materialet har en sådan seghet att hela tvärsnittet kan delta i uppbärandet av last. I fallet tegel är dock detta tveksamt. För så spröda material är det troligen fortfarande maximalspänningen i den vattenfyllda "sfären" inne i materialet som avgör om det blir lokala brott eller inte, d v s resonemanget ovan på sid 51 och figur 17 och 18 skulle gälla.

Ett oavvisligt krav på provkroppsstorleken är naturligtvis att den är större än den kritiska storleken. Om inte, kommer t o m en helt vattenmättad provkropp att klara en frysning utan skador. Som tidigare nämnts är kritiska storlekarna normalt mycket små (betydligt mindre än den representativa cellen enligt nedan). Några problem uppstår därför inte.

För vissa materialtyper, framför allt mycket permeabla, kan emellertid den kritiska storleken bli avsevärd. Jfr tegel ovan med kritiska radier av 10 à 12 mm, Verbeck & Landgren /1960/ anger kritiska storlekar hos en viss typ av betongballast av ~10 mm.

För de i denna rapport testade materialen har alltid provkroppsstorleken varit större än den kritiska. I ett fall uppstod tveksamhet. Det är välbekant att asbestcementskivor ofta delamineras vid frysförsök och vid frysning i verkligheten. Delamineringen sker i plan som är parallella med skivans plan. Detta beror naturligtvis på att materialet är starkt anisotropt som följd av tillverkningsmetoden. Bl a är draghållfastheten vinkelrätt mot skivans plan avsevärt mycket lägre än de båda draghållfastheterna i skivans plan. Även om alltså skivans tjocklek är större än den kritiska tjockleken är det inte säkert att en provkroppsbredd av 3 cm, vilken vi använt, är tillräcklig. För anisotropa material finns alltså två kritiska tjocklekar, se fig 21. Bägge två måste överskridas. Warris /1965/ hade visat att 3,0 cm bredd på en viss typ av eternit gav frostskador men för säkerhets skulle gjorde vi frysförsök på två serier vardera av de tre asbestcementtyperna 17, 18, 19. I den ena serien tätades alla kanter (obs ej de båda ytorna i skivans plan) med smält vax. Den andra serien bestod av obehandlade provkroppar. Någon effekt av tätningen på S_{KR} kunde inte förmärkas, varför en bredd av 3 cm tydligen är bra mycket större än den kritiska tjockleken D_{KR} i fig 21.

Hittills genomfört resonemang har alltså inte gett något entydigt svar på provkroppsstorlekens inverkan på S_{KR}. För de flesta byggnadsmaterial verkar det emellertid rent teoretiskt som om storleken inte skulle ha så stor betydelse, vilket beror på att de "kritiska sfärerna" är så små att varje tänkbar minimal provkropp blir mycket större. För material av typ tegel är problemen större. Vi har därför testat olika storlekar på tegelsorter och därvid även funnit ett visst inflytande av provkroppsstorlek. Den större provkroppen gav något större värde på S_{KR}, se 7.6.2. Den enda mekanism som förklarar detta av de hittills nämnda är den som åskådliggörs av fig 18.

Vid val av provkroppsstorlek får emellertid inte tas hänsyn bara till inverkan på spänningstillståndet av varierande storlek.

Hänsyn måste också tas till fukt- och temperaturgradienter genom provkroppen, vilka båda påverkas av provkroppsstorleken. Vid valet måste även beaktas att provkroppen har en sådan storlek att den utgör en

representativ cell av materialet. Det senare kriteriet är speciellt viktigt för ett heterogent material som betong. Provkropparna måste i detta fall vara stora nog att innehålla såväl cementbruket som ett representativt urval av grov ballast. Om minsta tvärmåttet är 3 x maximal storlek antas kravet på representativitet vara uppfyllt.

Vid en stenstorlek av 32 mm blir då kravet att minsta provkroppsstorlek är en cylinder med 10 cm diameter. Så stora provkroppar har emellertid inte testats eftersom betongs frostbeständighet inte undersökts i den aktuella undersökningen.

Om kravet på representativ cell liksom eventuellt kravet på minimihållfasthet enligt sid 49 medför att provkroppsstorleken måste minimeras så medför kraven om små temperaturgradienter och eventuellt också fuktgradienter att provkroppsstorleken måste maximeras. Här föreligger uppenbarligen ett optimeringsproblem.

Vad gäller fuktgradienter före den första frysningen bör dessa inte påverkas av provkroppstorleken vid ett riktigt utförande av anpassningen till rätt fuktkvot. Detta problem diskuteras mera utförligt i punkt 4.4. På grund av temperaturgradienter under frysningarnas förlopp sker emellertid oundvikligen fukttransporter i ångfas och vätskefas.

Ångtransporten sker i riktning mot den högre temperaturen, Lykow /1958/. Detta innebär alltså att under nedfrysningsskedet (men före initiering av isbildningen) sker en fukttransport inåt provkroppen som då är varmare medan efter avslutad upptining sker en fukttransport utåt mot ytan.

Vätsketransporten går däremot från varmare till kallare temperatur, vilket är ganska uppenbart. Undertrycket i ett kapillärrör följer nämligen uttrycket

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cdot \cos \theta \qquad (56)$$

Men ytspänningen, σ, ökar med sänkt temperatur. I ett kapillärrör med temperaturgradient blir därför undertrycket störst i den kalla änden.

Vid 1°C temperaturgradient och medeltemperatur θ°C blir förhållandet i undertryck mellan kalla och varma änden

$$\frac{\Delta P_{varm}}{\Delta P_{kall}} = \frac{75,65}{75,80} = 0,9973$$

Detta är alltså den drivande potentialskillnaden för vätsketransport.

Vid en stor provkropp ökar temperaturgradienterna, vilket alltså ökar bägge typerna av fukttransport.

De hittills använda provkroppsstorlekarna är emellertid sådana att temperaturgradienterna är mycket små, se fig 26. Normalt är de <1°C i en provkropp med storlek 40 x 40 x 160. Vid en storlek av ϕ100 mm kan de proportioneras upp rätlinjigt till att bli <2,5°C. Gradienterna finns dessutom under tämligen kort tid, ∿30 à 45 min, vid såväl upptining som nedfrysning.

Vattentransporterna p g a temperaturgradient bör därför bli försumbara. Även Vos /1967/ har teoretiskt visat att de normalt är små.

Fuktgradientmätningar visar också att några transporter av vatten knappast sker. Tendensen är dessutom sådan att eventuella fuktgradienter i provkropparna före första frysning(förorsakade av felaktig anpassning) utjämnas efter ett antal cykler, punkt 4.5.3.

Förhållandet blir naturligtvis helt annorlunda när provkroppen blir så stor att den fryser med en inåt vandrande isfront. Då sker vattentransporter inåt från isfronten och villkoret om en konstant vattenmättnadsgrad under frysningen kan inte uppfyllas. Se även Fagerlund/1972C/.

Även om det alltså principiellt sett med hänsyn till fuktgradienter är lämpligt att ha så små provkroppar som möjligt får provkroppen inte bli hur liten som helst. Man kan nämligen inte undvika att en viss vattenmängd kondenserar på den plastfolie som omger provkroppen. Följaktligen sker en viss uttorkning av provkroppsytorna. Mängden kondenserat vatten är emellertid mycket liten. Hundratals mätningar av viktskillnader hos provkroppar före och efter frysning har också visat att viktförlusterna är mycket små <0,1 à 0,5 g, varav det mesta utgör vattenförlust p g a diffusion genom plastfolien.

Om således provkroppsstorleken inte har någon större betydelse för fuktgradienterna så är dess betydelse för frysförloppet av avgörande betydelse.

Hela idén med kritiska vattenmättnadsgrader förutsätter ju att vattenmättnadsgraden vid själva frysningen är i möjligaste mån konstant. Ett grundläggande villkor för att detta skall gälla är att frysning sker simultant i hela provkroppen. Sker frysning med en isfront som vandrar inåt ökar provkroppskärnans vattenmättnadsgrad hela tiden.

Teoretiskt sett kan man inte kyla ner en provkropp utan att få temperaturgradienter. Ytan blir kallast.

Under förutsättning av att porvattnet verkligen fryser när dess fryspunkt uppnås skulle man alltså alltid få en vandrande isfront, vilket skulle kunna möjliggöra bestämning av riktiga S_{KR}.

Vatten fryser emellertid ytterligt sällan vid sin normala fryspunkt utan man har en underkylning. Underkylningens storlek är vid s k heterogen frysning, d v s vid förekomst av föroreingar i porvattnet, beroende av vattenvolymens storlek. Bigg /1953/.

En vattendroppe med storleken 1 mm har en medelfrystemperatur av $-24^{o}C$. Vid absolut rent vatten sker homogen frysning vid $=-40^{o}C$ oavsett vattendroppens storlek.

Så stora underkylningar uppmäts aldrig, troligen beroende på att isbildningen initieras någonstans på materialytan.

Underkylningar på -3 à $-7^{o}C$ är dock normala i här redovisade experiment. Trots ett otal mätningar i olika typer av material har någon direkt frysning vid $0^{o}C$ inte kunnat iakttas.

Vid den i försöken använda nedkylningshastigheten är som tidigare nämnts och som framgår av fig 26 temperaturskillnaderna mellan yta och centrum aldrig mer än $=1^{o}C$. Inte ens vid provkroppar med 10 cm sida torde gradienterna bli större än $3^{o}C$. Detta gör att i hela provkroppen finns det vatten som är potentiellt frysbart vid den tidpunkt när isbildning initieras någonstans, t ex på provkroppens yta.

Isbildningen sätts sedan igång mycket snabbt i allt det underkylda vattnet. Detta sker genom att ett glest nät av iskristaller (dendriter) växer ut från det ställe där isbildningen först startas. Dessa kristaller tränger in i porer med frysbart vatten varefter den långsammare normala isbildningen vidtar.

Temperaturen i hela provkroppen stiger därvid upp till fryspunkten för vattnet i den grövsta vattenfyllda poren.

Hela provkroppen har nu till en början samma temperatur, och isbildning sker simultant i hela provkroppsvolymen. Principen visas i fig 22 a.

Är emellertid provkroppen för stor så har enbart ytpartiet frysbart vatten medan kärnans temperatur är för hög. Vid igångsättningen av frysningen bildas nu bara is i ytterdelen av provkroppen. Man kommer att få en vandrande isfront. Principen visas i fig 22 b.

Maximal provkroppsstorlek bestäms tydligen av följande villkor på temperaturen i provkroppens centrum

$$\theta_B < \theta_A \qquad (57)$$

Detta villkor är svårare att uppnå ju större provkroppen är och ju snabbare nerfrysningen sker.

Normalt sker den mesta isbildningen omkring 0^oC. Se fig 23 a som visar isbildningen hos ett hårdbränt tegel. Hos finporösa material däremot, t ex cementpastor, betonger etc, sker isbildningen över ett betydligt större temperaturintervall, fig 23 b.

I fallet tegel är hela provkroppen (såvida den inte är alltför stor) "färdigfrusen" ungefär samtidigt. Värmeutvecklingen vid den sista isbildningen i kärnan håller nämligen yttemperaturen vid ungefär samma temperatur som kärnans. För material där all isbildning sker vid 0^oC skulle alltså verkligen en simultan frysning ske under hela tiden.

I fallet cementpasta kan man däremot tänka sig att en form av "isfront" utbildas. Om en temperaturgradient på någon grad mellan ytan och kärnan utbildas, innebär detta att vatten i porer av en viss storlek fryser tidigare i ytpartiet än i kärnan. Man skulle alltså få lokala isfronter i porsystemet. Principen för detta visas i fig 24. Materialet består av 4 olika porer med olika porradier. Man har en temperaturgradient genom provkroppen. Ju mindre poren är desto lägre är fryspunkten. I ett visst stadium har därför allt vatten frusit i por 1. I por 2 har is bildats till ett djup från ytan som har en temperatur motsvarande fryspunkten i poren, θ_2^f. I por 3 är isfronten ännu längre ut och por 4 har inte frusit alls.

Uppkomsten av dessa isfronter är oundviklig. De har troligen ingen betydelse. Rent principiellt innebär emellertid detta att provkropparna bör göras så små som överhuvudtaget är tänkbart med hänsyn till andra faktorer.

I verkligheten får man däremot förmoda att frysning kanske med en vandrande isfront av typ fig 22 b. Man kan därför hävda att kanske även laboratorieprovkroppar borde frysas på samma sätt. Man kan nämligen inte utesluta att vatten stänges in bakom isfronten. Vid frysning kan det sedan bara pressas inåt i materialet, Warris /1964/. Följden blir att vattenmättnadsgraden ökar inåt, kanske till en farlig nivå. Man kan också hävda att i verkligheten kan vatten bli instängt mellan två isfronter, Kreüger /1923/. Mekanismen är då följande. Materialvolymen fryser först till ett visst djup. Temperaturen i ytan stiger sedan varvid vatten smälter enbart i ytzonen. Sker då en förnyad temperatursänkning, bildas en ny isfront i ytan. Fronten vandrar inåt varvid vattenmättnadsgraden mellan de båda isfronterna skulle kunna bli mycket hög.

Försvaret mot dessa båda argument är, att om man känner den kritiska vattenmättnadsgraden för en liten simultanfrysande provkropp bör det gå att behandla de båda nämnda praktiska fallen rent teoretiskt. Problemet består i så fall helt av att beräkna hur vattenmättnadsgraden framför isfronten förändras när isfronten vandrar. Detta är ett fuktmekaniskt problem. Det är nämligen först när vattenmättnadsgraden inne i en liten volym framför isfronten uppnår ett kritiskt värde som frostskador uppstår.

Teorier för en vandrande isfront har presenterats av Terzaghi /1945/ och Warris /1964/. Den sistnämnde författaren ger även ett uttryck för de krafter som uppstår under själva vattentransporten inåt. Även detta uttryck är emellertid intimt sammankopplat med ett motsvarande teoretiskt uttryck för S_{KR} hos en simultanfrysande provkropp, se även Fagerlund/1973A/.

Ju större provkroppen är desto större blir alltså temperaturgradienterna vid konstanta yttre temperaturförhållanden. En temperaturgradient medför alltid temperaturspänningar. Dessa kommer att överlagra spänningar från isbildning. Vid stora provkroppar eller stor nerfrysningshastighet kan temperaturspänningarna bli så stora att de påverkar den kritiska vattenmättnadsgraden signifikant i sänkande riktning.

Temperaturspänningarna kan beräknas enligt fig 25 . Om längdutvidgningskoefficienten antas vara konstant genom materialet, vilket är rimligt eftersom vattenmättnadsgraden är konstant, kommer man att få en töjningskurva, som är affin med temperaturkurvan. Spänningsfördelningen i tvärsnittet fås ur villkoren att resulterande krafter och moment i snittet skall vara noll. Vid symmetriska temperaturförhållanden och konstant E-modul fås då spänningarna enligt figuren ur villkoret att de båda dragytorna skall vara lika med tryckytan.

Temperaturgradienter har mätts för ett flertal olika material och provkroppsstorlekar. I fig 26 a-b visas några resultat dels för provkropp med tvärsnitt 40 x 40 mm^2 dels med tvärsnitt 30 x 30 mm^2.

Mycket tunna termoelement har stoppats ner i borrade hål till önskat djup. Termoelementen har sedan skarvats utanför provkroppen till grövre termoelement. Skarvställena är värmeisolerade så att extra spänningar inte skall uppstå.

Maximala gradienter under en cykel har ritats ut i fig 27 . Kurvan är oregelbunden p g a svårigheter att exakt avläsa skrivarremsan.

Ur en någorlunda anpassad kurva fås att maximal dragspänning i "yttersta fibern" blir $\approx 0{,}8 \cdot \alpha \cdot E$. Om $\alpha = 10 \cdot 10^{-6}$ och $E = 300.000$ kp/cm^2 fås då en spänning av 2,4 kp/cm^2. Experimentellt bestämd draghållfasthet på samma material är ≈ 50 kp/cm^2. Ur ekv(49) kan då härledas att effekten av temperaturgradienter på S_{KR} bör vara försumbar.

Slutligen finns ännu ett par villkor som lägger vissa restriktioner på storleken på provkropparna. Isbildningshastigheten måste dels vara någorlunda lik den som finns i naturen dels måste frysförhållandena vara ungefär lika i provkroppar av alla material.

Vad beträffar isbildningshastigheten så är det uppenbart att denna påverkas av provkroppsstorleken vid konstanta temperaturförhållanden hos den omgivande luften.

Vid isbildningen frigörs ju värme, som måste ledas bort från provkroppen. Värmeutflödet bör vid konstanta yttre förhållanden vara proportionellt mot provkroppens yta. Om provkroppen då är simultanfrysande omkring 0°C är medelisbildningshastigheten proportionell mot provkroppens yt-volymförhållanden d v s

$$W_f \cdot \frac{d\beta}{dt} = \text{konst} \cdot \frac{Y}{V} \qquad (58)$$

Samtidigt är värmeutflödet beroende av temperaturdifferensen mellan provkroppsyta och omgivande lufts temperatur.

Värmeutflödet bestäms av dels konvektion som i detta fall är påtvingad genom att luften i frysboxen sätts i rörelse av två fläktar och dels av strålning. Ekvationen för detta är

$$Q = Y(\theta_y - \theta_\ell)\ (\alpha_k + \alpha_s) \qquad (59)$$

där α_s kan uttryckas

$$\alpha_s = \frac{5{,}76}{(\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_B} - 1)\cdot(\theta_y - \theta_\ell)} \left((\frac{\theta_y^T}{100})^4 - (\frac{\theta_\ell^T}{100})^4 \right) \qquad (60)$$

Strålningsdelen blir för det första mindre än konvektionsdelen. Vid emissionstal hos provkroppen, ε_p, av 0,90 och hos frysboxväggen (alplåt) av 0,10 och vid en temperaturdifferens $\theta_y - \theta_\ell$ av 10°C vid θ_y = 0°C blir α_s=0,44 medan α_k enligt Schack /1957/ är vid påtvingad konvektion

$$\alpha_k = 6{,}2 + 4{,}2 \cdot v \qquad \text{för } v<5 \text{ m/s} \qquad (61)$$

Förhållandet α_k/α_s är alltså >6,2/0,44 = 14.

För det andra varierar strålningsdelen mycket litet vid varierande temperaturdifferens.

Ekv (59) kan därför formuleras

$$Q = \text{konst}(\theta_y - \theta_\ell) \qquad (62)$$

Ekv (58) och (59) är mycket intressanta därför att de visar att isbildningshastigheten i naturliga förhållanden hos normalstora byggnadsdelar kan efterliknas i laboratoriet på små provkroppar genom att förhållandet mellan yt- och lufttemperaturer förändras.

En vägbana av betong eller en tegelfasad, där frysning sker simultant i ett 1 cm tjockt skikt har ett yt-volymförhållande Y/V=1 cm^{-1}. En cylindrisk provkropp ϕ10 cm har däremot ett yt-volymförhållande Y/V= 0,40 cm^{-1} om basytorna försummas och en tegelstav tvärsnitt 3 x 3 cm^2 har ett yt-volymförhållande Y/V=1,3 cm^{-1}.

Vill man alltså exakt efterlikna naturliga förhållanden skulle enligt ekv (62) temperaturdifferensen mellan provkroppsyta och omgivande luft göras 2,5 gånger så stor i laboratoriet som i verkligheten när det gäller betong, men bara 0,8 gånger så stor när det gäller tegel. Denna beräkning förutsätter alltså att simultanfrysningen verkligen sker på ett djup av 1 cm i verkligheten. Detta kan diskuteras. Enligt Butterworth /1948/ förekommer det en så stor myckenhet av kristallisationskärnor i ytterluften att underkylhingsfenomen inte inträffar under naturliga förhållanden.

Detta skulle alltså reducera djupet för simultanfrysning varvid accelerationen i laboratoriet bör ökas vad gäller nerfrysningshastigheten hos luften. Man kan emellertid också tänka sig att avsevärda underkylningar inträffar varvid man får vara försiktigare med accelerationen och kanske rent av göra en retardation.

Diskussionen ovan visar emellertid att i princip vilken provkroppsstorlek som helst kan användas bara hänsyn tas till att vid ett byte av provkroppsstorlek måste även själva fryscykeln hos frysboxluften ändras. Görs inte detta blir inte S_{KR} bestämda för olika material med olika provkroppsstorlekar jämförbara. Ett av de fundamentala villkoren för materialval med avseende på frostbeständighet enligt vad som skisserades i avsnitt 2.3 uppfylls då inte.

Det finns dock undantag från regeln om att fryscykeln bör ändras med

ändrad provkroppsstorlek. Det gäller skivformiga produkter av typ asbestcement. Dessa har av naturliga skäl ungefär samma yt-volymförhållande i laboratoriet som i verkligheten.

Vid den slutliga bestämningen av provkroppsstorlekar ansågs kraven på simultan frysning, på att den kritiska storleken överskrids och på representativ volym vara avgörande.

För någorlunda homogena material som tegel, kalksandsten, gasbetong etc ansågs formatet 30 x 30 x 120 mm^3 vara en god kompromiss.

För material av mera heterogen struktur, vissa cementbruk, lättballastbetonger valdes formatet 40 x 40 x 160 mm^3. För dessa format fanns dessutom ordentliga gjutformar tillgängliga.

Asbestcementprodukter fick av naturliga skäl formatet t x 30 x 100 mm^3, där t utgör tjockleken.

Valet av provkroppsstorlek är uppenbarligen en mycket kritisk punkt i samband med bestämningen av S_{KR}. Därför gjordes också en omfattande test av inverkan av storlek för två tegeltyper och för en kalksandsten. Formatet varierades där från 30 x 30 x 120 mm till 40 x 40 x 120 mm d v s yt- och volymförhållande varierade från 1,3 till 1,0. Resultatet visas i punkt 7.6.2.

Vad beträffar provkroppsform så har det avgörande kriteriet varit att en dynamisk E-modul skulle gå att bestämma. Enligt ASTM /1964/ mätmetod litt C215-60 bör längd-tjockleksförhållandet ℓ/t ligga emellan 3 och 5, för att egenfrekvensen vid böjsvängning skall vara lätt att bestämma.

Provkroppsstorlek 30 x 30 x 120 mm^3 resp 40 x 40 x 160 mm^3 ger ℓ/t=4. Egenfrekvenser för dessa typer var också mycket lätta att bestämma. Provkroppsstorleken för asbestcementprodukter var 5 à 8 x 30 x 100 mm, vilket ger ℓ/t=12,5 à 20. För dessa provkroppar visade sig det också mycket riktigt svårt att bestämma ordentliga egenfrekvenser. Istället användes i stor utsträckning frekvensen vid 1:a övertonen.

4.2.2 Urval och antal

Urvalsmetodiken liksom antalet provkroppar har växlat under försökens gång. Detta beror på att, vilket även nämnts i punkt 4.1, undersökningen kan delas upp i två principiellt olika stadier.

Stadium 1: Existensen av kritiska vattenmättnadsgrader var obevisad. Ur ett stort antal provkroppar av ett och samma utgångsmaterial valdes ut ett antal som ansågs ha ungefär samma porositetsegenskaper. Dessa i sin tur karakteriserades med hjälp av vattenuppsugningsbestämningar.

Bestämningen av S_{KR} genomfördes sedan med ett mycket stort antal provkroppar ofta >50 à 60 st för att verkligen dokumentera resultaten.

För samtliga provkroppar bestämdes porositet, densitet och vattenuppsugningsförmåga såväl före som efter frysning.

Detta komplicerade urval gjordes för följande material:

Lösbränt massivt tegel	(material nr 1)
Hårdbränt " "	(" " 2)
Kalksandsten	(" " 7)
Asbestcementprodukter	(" " 17, 18, 19)

Stadium 2: När väl existensen av kritiska vattenmättnadsgrader och dessutom väldefinierade sådana hade bekräftats för ovannämnda material, skedde gradvis en förändring både beträffande antal och urval av provkroppar.

Vad beträffar antalet testades enbart så många som ansågs vara befogat för att få fram ett någorlunda väldefinierat värde på S_{KR}. För detta än-

damål kan 10 à 15 provkroppar räcka men ofta testades upp till 20 à 30. I de fall där antalet provkroppar var begränsat, t ex enbart 6 st, gjordes frystester i två omgångar. Först anpassades provkropparna till vattenmättnadsgrader som förmodades vara lägre än de kritiska. Efter ett antal cykler och vederbörliga tester, höjdes vattenmättnadsgraden i alla provkroppar varefter förnyade frysningar gjordes. På så sätt kunde S_{KR} inringas. Detta förfaringssätt har säkerligen inte på något sätt påverkat värdet på S_{KR}.

Vad beträffar urvalet så gjordes i detta stadium inga förhandsvärderingar av provkroppar. Dessa plockades i stället slumpvis ur ett större antal, som sågats ur samma "modermaterial".

På detta sätt erhölls möjligen något större osäkerhet i S_{KR}. För den praktiska användningsbarheten av begreppet kritisk vattenmättnadsgrad ansågs det emellertid vara väsentligt att såväl relevanta spridningar i S_{KR} som i S_{AKT} (vid vattenuppsugningsbestämningarna) skulle komma fram i försöken.

Vad beträffar "modermaterialen" varur provkroppar sågats eller gjutits så har dessa delvis tillverkats av oss själva eller valts ut av oss själva,delvis har de levererats direkt från materialtillverkaren. I det förra fallet är naturligtvis möjligheterna till ett homogent utgångsmaterial större än i det senare. Man kan dock troligen förutsätta att de levererade materialen av t ex tegel, kalksandsten, betongtakpannor, lecablock etc, har tillverkats vid ett och samma tillfälle. Full säkerhet om detta finns emellertid inte.

Valet av vilken provkropp som skulle ha en viss vattenhalt vid testen har skett helt slumpmässigt. För de båda tegelsorterna som testades först skedde valet med hjälp av slumptalstabell.

Vissa material t ex håltegel, betongtakpannor, korrugerade asbestcementskivor har betraktats som bestående av två eller flera material. Så t ex har håltegel delats upp i en "yttre del" och en "inre del". Fig 28a. Asbestcementskivorna har delats upp i "vågtopp","vågdal","mellanparti". Fig 28b . Betongtakpannor har delats upp i "vågtopp" och "vågdal". Fig 28c.

Orsaken till detta har varit att materialegenskaperna hos dessa material kan förväntas variera i olika delar inom en och samma materialenhet. Fagerlund/1971C/. Ett "medel-S_{KR}" för hela enheten kan därför tänkas ge en alltför onyanserad bild av produktens frostbeständighet. Genom uppdelningen i delar kommer man att få flera S_{KR} för samma materialenhet Man kommer också att få flera S_{AKT} varvid frostbeständighetens variation över materialenheten blir känd. Information ges därvid om svaga punkter i materialet med avseende på frostbeständighet.

Denna uppdelning har visat sig vara högst befogad. Se resultat under punkt 7.6.

4.3 Karakterisering av materialegenskaper

4.3.1 Inledning

Under begreppet "materialegenskaper" inräknas här sådana som har betydelse för definitionen av vattenmättnadsgrad, d v s porositet (densitet) och frysbar vattenmängd. Jfr ekv(2,3). Andra mätta egenskaper, t ex E-modul, inre friktion och kapillärsugningsegenskaper behandlas i punkter 4.6.2 och 6.

4.3.2 Porositet och densitet

Fig 29 visar en enhetsvolym av ett godtyckligt material med beteckningar på olika storheter. Följande elementära samband gäller:

(Skrym-)densitet (volymvikt) $$\gamma = \frac{Q_f}{V} \quad (63)$$

Kompaktdensitet (täthet) $$\rho = \frac{Q_f}{V_f} \quad (64)$$

Absoluta porositeten $$P = \frac{V_p}{V} = (1 - \frac{\gamma}{\rho}) \quad (65)$$

Öppna porositeten $$P_ö = \frac{V_{pö}}{V} \quad (66)$$

Slutna porositeten $$P_s = P - P_ö \quad (67)$$

Vissa material genomgår volymändringar vid ändingar i fukttillståndet. Därför måste man definiera vad som avses med volymerna i formlerna ovan. I frostbeständighetssammanhang arbetar man emellertid normalt med så höga fuktkvoter att all svällning p g a fukt har ägt rum, jfr Fagerlund/1972B/. Volymerna definieras därför som volymer vid helt vattenmättat material.

Skillnaden mellan öppen och sluten porositet är normalt mycket liten för de flesta byggnadsmaterial. De enda material för vilka någon väsentlig skillnad finns är sintrade keramiska produkter av typ expanderad lera, tegel, keramiska plattor. Kalciumsilikathydrater som finns i betong, cementbruk, kalksandsten, gasbetong etc har en öppen porstruktur.

Det kan diskuteras huruvida det är den totala lufthalten eller porvolymen som skall användas i ekv (2) resp (3) för definition av vattenmättnadsgrad eller om det är enbart den öppna.

Uppenbarligen är det så att även slutna porer kan tjäna som mottagare av undanpressat vatten vid isbildningen men detta kräver att porväggarna intill de slutna porerna bryts sönder. Detta måste ge en viss hållfasthetsförlust hos materialet. Man kan nämligen visa att en öppen porstruktur medför lägre hållfasthet än en sluten. Fagerlund/1972B/.

Graden av förstörelse blir naturligtvis beroende av mängden slutna porer som öppnas.

I normalfallet har vattenmättnadsgraden definierats med utgångspunkt från enbart den öppna porvolymen.

Torkning

Den första informationen som erfordras är torrvikten, Q_f. Denna har alltid bestämts efter torkning i +105°C. Torkningen har alltid skett under så lång tid att en rimlig jämvikt med ugnsatmosfären har uppnåtts. Normaltid är därvid en vecka. Med tanke på att provkropparna är små får

detta anses vara en rimlig tid för praktiskt bruk.

Naturligtvis uppnås aldrig en "fysikaliskt riktig" uttorkning med denna metod. Så t ex kommer inte relativa fuktigheten i ugnen att vara konstant. En variation i relativ fuktighet i det omgivande rummet av 50 %-70 % RH verkar trolig. Därvid fås en variation hos ugnsatmosfären av 0,9 %-1,8 % RH. En torkning vid förhöjd temperatur kan teoretiskt sett heller aldrig motsvara en isoterm torkning. Felen som uppträder är emellertid enbart av akademiskt intresse. Fördelarna med den använda torkmetoden är ur praktisk synpunkt så uppenbara att den kan försvaras.

Man bör emellertid observera att porvolymbestämmingen d v s värdet på vattenmättnadsgraderna är fullständigt bestämda av sättet att definiera "torrvikten".

Torkning av cementbundna icke autoklaverade material har i möjligaste mån undvikits tills dess alla frysförsök eller vattenuppsugningsförsök genomförts. I den mån torkning gjorts har temperaturen varit max +50°C. Orsaken till att fullständig torkning undvikits är att det är ett känt faktum att materialstrukturen kan förändras, sprickor kan bildas etc. Se t ex försöken där E-modul bestämts som funktion av vattenhalten. Efter en genomgången uppfuktnings-uttorkningscykel har E-modulen sjunkit avsevärt för det torra materialet. Se figur 70.

Även om inte torrvikten kan direkt bestämmas före frysning för vissa materialsorter, kan den dock beräknas med ganska stor säkerhet. Om torkning sker t ex vid +50°C så kan relativa fuktigheten inne i ugnen beräknas om det omgivande rummets relativa fuktighet och temperatur är kända.

Sedan kan torrvikten beräknas ur desorptionsisotermen för vattenånga vid +50°C om dennas utseende är känt. Principen visas i fig 30 och ekv (68).

$$Q_f = \frac{(Q_f)_x}{1+a\cdot 10^2} \qquad (68)$$

För material med cementpasta som bindemedel och icke porös ballast kan sorptionsisotermens utseende beräknas mycket noggrannt om sammansättningen är bekant. Bergström & Ahlgren /1969/.

En stor mängd vattenångisotermer för byggnadsmaterial har för övrigt publicerats av Ahlgren /1972/. I det låga RH-området det här är fråga om är sorptionsisotermen tämligen lika för alla varianter av material inom samma materialfamilj.

Temperaturberoendet hos isotermen är relativt liten för porösa silikatmaterial. Det kan bedömas genom användning av Kelvin´s lag. Vid en viss RH kommer nämligen förhållandet mellan de radier som motsvarar största vattenfyllda porer att vara beroende av temperaturen enligt

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{T_2}{T_1} \qquad (69)$$

Detta gör att t ex vid +50°C är största fyllda poren mindre än vid +20°C. Därför kommer också mängden adsorbat att vara mindre vid den höga temperaturen. Principen i förflyttning av isoterm vid en ändring från 20°C till 50°C visas i fig 31 .

Förhållandet $r_2:r_1$ är här 293:323 = 0,907. Ändringen i isoterm måste därför bli mycket liten. Om torkningen motsvarar RH=20 % blir r_1=7,4 Å enligt Kelvin´s lag. r_2 blir då 7,4·0,907=6,7 Å, vilket motsvarar RH=16,8 %. Förhållandet i fuktkvot mellan RH=20 % och 16,8 % är t ex för en tät cementpasta (Powers & Brownyard /1948/) =1,1.

För de material där torkning alltså inte kunnat göras före försöken och isotermen är okänd kan ett visst fel göras vad beträffar porositeten före frysning. Provkroppar som lagras med vatten i porsystemet under lång tid binder vatten kemiskt varvid torrvikten ökas. Detta är speciellt accentuerat för cementbundna material, som är starkt hydrofila. Felet kan begränsas genom att enbart ett litet antal fryscykler genomförs. Hydratiseringen blir då måttlig.

Våra försök ger en viss uppfattning om storleksordningen på denna fortgående hydratisering. För vissa material bestämdes nämligen torrvikten såväl före som efter frysningarna. För gasbetong är torrviktsökningen av storleksordningen 0,5 à 3,5 % efter ungefär 1 1/2 månad med vatten i porsystemet.

Dessa små hydratiseringar ger mycket liten förändring i porvolymen eller i vattenmättnadsgraden i provkroppen. Det kan emellertid bli värre när det gäller betong eller andra cementbundna icke autoklaverade material. Se nedan betr porvolymbestämning och punkt 4.5.2.

För material,som man av hänsyn till eventuella förändringar i strukturen inte kunnat torka före frystesten,har vi fått en viss kontroll av torrviktsförändringen och porvolymminskningen genom att en s k dummyprovkropp offrats före testen. För denna har såväl porositet som torrvikt bestämts.

I samband med redovisningen av resultaten i punkt 7 kommer att anges huruvida vattenmättnadsgraderna avser verkligen bestämda vattenmättnadsgrader för den aktuella provkroppen eller vattenmättnadsgrader, baserade på porositets- och torrviktsuppgifter för en dummy.

Porvolymen

Porvolymen har bestämts genom vägning av fullständigt vattenmättade från början helt torra eller "lufttorra" provkroppar.

För att vattenmättningen skulle kunna utföras, byggdes en apparatur enligt fig 32.

Till en början gjordes vattenmättningen på ett alldeles för omsorgsfullt sätt. Detta för att vi skulle vara absolut säkra på att all porvolym fylldes. Provkropparna evakuerades ofta 1-3 dygn till 1 à 2 torr restryck. Sedan släpptes kokat avjoniserat vatten in i dessicatorn och pumpen fick gå ytterligare i någon timme. Slutligen upphävdes vacuumet. Provkropparna lagrades slutligen i vatten från några dagar upp till ett par veckor. Ju finporösare material, ju längre lagringstid.

Så småningom övergavs denna rigorösa metod. Vacuumbehandlingen gjordes enbart 1/2-1 timme varefter vanligt vatten släpptes in. Enligt rekommendationer av en RILEM-grupp /1972/ är det nämligen tillräckligt om vattnet kokas i närvaro av provkropparna med hjälp av undertrycket. Däremot bibehålls den långa vattenlagringen fram till porvolymbestämningen.

Det drivande övertrycket för vatteninträngning är nämligen bara 1 kp/cm^2 varför finporösa material fylls mycket långsamt.

Före vägningen torkades provkropparna mot en fuktig svamp så att ytorna blev torra men porerna fyllda.

Den öppna porvolymen bestäms ur

$$V_{po} = (Q_m^{\ell} - Q_f) \cdot K_1 \qquad (70)$$

K_1 utgör specifika volymen för vatten. Denna är temperaturberoende enligt ekvationen:

$$K_1 = \frac{10^{-3}}{1{,}0022-0{,}00021\cdot\theta_p} \quad \text{för } 15^{o}C < \theta_p < 25^{o}C \qquad (71)$$

Provkroppstemperaturerna θ_p varierade normalt mellan +19,7 och +24,1^{o}C.

Helmuth /1960/ påpekar att specifika volymen för kapillärvatten i cementpasta är mindre än för vanligt vatten. Han anger värdet 0,99 i stället för normala 1,0.

Korrektioner för detta har emellertid inte gjorts dels därför att de flesta material är grovporösa dels därför att korrektionen ger liten inverkan på vattenmättnadsgraden.

För mycket grovporösa material av typ gasbetong och lecablock blir spridningarna i porvolymerna, bestämda enligt ekv (70) ganska stora eftersom de, liksom provkroppsvolymen, kommer att definieras av läget på menisken i porerna och läget är starkt beroende av torkmetoden, se fig 33.

För hålrumsbetonger av typ Lecablock kan överhuvudtaget vattenmättnadsmetoden inte användas utan densiteter bestäms med hjälp av volymmätning med skjutmått, beräkning av densiteten ur ekv (63), antagande av en kompaktdensitet av 2650 kg/m^3 och användande av ekv (65).

Härvid erhålls ungefärlig total porositet, vilket är olyckligt eftersom lecablock är just en av de materialtyper som kan förväntas ha en stor andel sluten porositet. Detta problem kommer man emellertid delvis ifrån genom att för dessa material inte tala om vattenmättnadsgrader utan om fuktkvoter. Härvid erfordras enbart vägningar och inga volymbestämningar. Problemet återkommer dock om man tänker jämföra frostbeständigheten hos t ex ett lecablock med frostbeständigheten hos ett annat material. Då måste man enligt ekv(18) känna u_o, d v s fuktkvot vid helt vattenmättat material.

Som nämnts gjordes porvolymbestämningarna vid ∿+20^{o}C. Helmuth /1960/ visar att för cementpasta sjunker vattenmättnadsgraden hos en helt vattenmättad provkropp när temperaturen sjunker ner till 0^{o}C. Detta tyder på att porvolymen är större vid 0^{o}C än vid rumstemperatur. Eftersom det är vattenmättnadsgraden vid frystemperaturer som är intressant, studerades även porvolymen vid ∿0^{o}C för två provkroppar vardera av 10 olika material. Provkropparna vacuummättades först på vanligt sätt, porvolymen bestämdes varefter de kyldes ner till +1,2 à +1,7^{o}C under 2 dygn och vägdes på nytt. Resultatet visas i tabell 1 varvid hänsyn har tagits till att vattnets täthet är större vid +1,5^{o}C än vid +22,5^{o}C.

Formeln blir följande

$$\Delta V_{pö} = \Delta Q_w \cdot 10^{-3} - V_{pö} \cdot \frac{\rho_w + 1{,}5}{\rho_w + 22.5} \qquad (72)$$

Som synes blir det ökning för alla material utom för kalksandsten. Ökningarna är dessutom klart störst för de finporösa materialen.

Den ökade vattenupptagningen vid låga temperaturer innebär ingenting annat än att den fasta fasen i materialet volymkrymper mera än det porösa materialet i sin helhet. Ett porositetsberoende på längdutvidgningskoefficienten har även dokumenterats rent teoretiskt av Kerner /1956/. Dennes uttryck blir tillämpad på en porös kropp. Fagerlund/1972B/.

$$\alpha = \alpha_o \cdot \frac{K_o}{K} \left(\frac{4G + 3K}{4G + 3K_o}\right)(1 - P) \qquad (73)$$

Enligt Fagerlund/1972B/ kan följande ekvationer antas gälla

$$\begin{cases} G \approx G_o(1 - P)^3 \\ K \approx K_o(1 - P)^3 \end{cases} \qquad (74)$$

Genom insättning av ekv (74) i (73) och med användning av sambandet mellan G- och K-modul fås

$$\alpha = \alpha_o \frac{2(1-2\upsilon_o) + (1+\upsilon_o)}{2(1-2\upsilon_o)(1-P)^3+(1+\upsilon_o)} \cdot (1-P) \qquad (75)$$

Denna ekvation ger generellt lägre längdutvidgningkoefficienter hos det porösa materialet än hos den fasta fas varav det är uppbyggt.

Vid υ=0,25 och P=0,5 blir α=0,82·α_o. Porositeten kommer alltså att variera enligt ekv (76):

$$\frac{\Delta V_p}{V} = 3(\alpha_o(1-P)-\alpha) \qquad (76)$$

d v s

$$\frac{\Delta V_p}{V} = 3\cdot\alpha_o(1-P)\left(1 - \frac{2(1-2\upsilon_o) + 1+\upsilon_o}{2(1-2\upsilon_o)(1-P)^3+1+\upsilon_o}\right) \qquad (77)$$

För det ovannämnda materialet blir förändringen i porositet vid en avkylning från +22,5°C till +1,5°C om $\alpha=7\cdot10^{-6}$; $\Delta V_p/V \approx 3\cdot7\cdot10^{-6}\cdot21\{0,5 - 0,82\} = -67\cdot10^{-6} \approx 0$.

Ökningarna av ΔV_p enligt tabell 1 kan alltså inte förklaras med den mekaniska effekten enligt ovan. Uppenbarligen är det även andra effekter som träder i funktion. Möjligen krymper kristallerna vid sänkt temperatur p g a att ytspänningarna ökas. Därvid skulle effekten öka med ökande specifik yta hos materialet. Denna tendens kan också spåras i tabell 1. Fenomenet behandlas ytterligare i Fagerlund/1972C/ , eftersom det för ett material som cementpasta kan ha mycket stor betydelse med avseende på frostbeständigheten.

Effekterna är emellertid normalt så små att de kan försummas, varför porvolymen vid rumstemperatur utnyttjas fortsättningsvis.

Det finns en möjlighet att porvolymerna blev något för små genom att vägningarna gjordes relativt tätt efter vacuumbehandlingen.

För att utröna detta gjordes en undersökning med vissa vacuumbehandlade provkroppar som fick ligga i vatten 5 à 6 månader med successiva vägningar.

Resultatet framgår av fig 34, där vattenupptagningen uttryckts i % av den ursprungligen mätta plottats som funktion av tiden från avslutande av vacuumbehandlingen. Varje punkt representerar medelvärde av 4 provkroppar.

Material som tegel och kalksandsten absorberar mindre än 0,5 % extra vatten under 1/2 års vattenlagring medan material som är cementbaserade t ex gasbetong typ 1 och asbestcement, absorberar vatten ända upp till 3 à 6 % av den ursprungliga. Denna vattenabsorption torde emellertid inte vara att hänföra till absorption i porer utan snarast utgöra hydratvatten. När vatten binds kemiskt sker nämligen en minskning av dess volym, varför porvolymen inte reduceras lika mycket som det kemiskt bundna vattnets volym. Nettoeffekten blir då en viktökning av provkroppen. Antas det kemiskt bundna vattnets specifika volym vara 0,75 (Powers /1960/), skulle alltså ifallet asbestcement nr 19 porvolymen reduceras

med =6•0,75=4,5 % av ursprunglig porvolym om provkropparna lagras i vatten 140 dygn. Redan vid 10 dygns vattenlagring, vilket mycket väl kan komma ifråga vid frysförsöken, reduceras porvolymen med =1•0,75=0,75 %. Denna reduktion bör i princip beaktas för "levande material" av typ "cementbundna icke autoklaverade".

Som ett exempel på storleksordningen av inverkan av hydratisering på porvolymen väljs en betong med vct=0,50, cementhalt 400 kg/m^3 och lufthalt 4 %.

Betongen frystestas när den är 14 dagar gammal och testen pågår i 14 dygn.

Hydratationsgraden kan enligt Danielsson /1966/ beräknas vara 56 % före och 63 % efter testen. Liknande värden har erhållits vid försök vid LTH, Fagerlund/1972F/.

Betongporositeten kan uttryckas enligt nedan. Bergström /1967/.

$$P = \frac{C}{1000}(vct - 0{,}19\cdot\alpha)+\ell_B \qquad (78)$$

Porositetsminskningen blir då

$$\Delta P = \frac{400}{1000}\cdot(0{,}63-0{,}56)\cdot 0{,}19 = 0{,}0053$$

Porositetsminskningen är alltså liten, <1 %. Inverkan på vattenmättnadsgraden kan emellertid bli mycket större. Detta diskuteras utförligare i punkt 4.5.2 .

Under förutsättning av att alla öppna porer är åtkomliga för evakueringen kan felet i porvolymbestämning p g a ofullständig evakuering beräknas ur Boyle´s lag.

$$V_1\cdot P_1 = V_2\cdot P_2 \qquad (79)$$

där V_2 = verkliga porvolymen. Vid P_1 = 760 mm Hg och P_2 = 2 mm Hg blir felet i porvolymen = $V_1 = V_2\cdot 2/760 \triangleq 0{,}026\cdot V_2$ d v s 2,6 %.

Vid porvolymen 30 % blir alltså den mätta porvolymen enbart 0,974•30 = 29,2 %.

Alla luftfyllda porer behöver emellertid inte nödvändigtvis vara tillgängliga för evakuering.

I den mån provkropparna bara är lufttorra finns nämligen adsorberat och eventuellt kapillärkondenserat vatten kvar i de finare porerna. En torkning vid RH=40 % ger t ex ingen uttorkning av porer med radie <12Å, vilket kan beräknas ur Kelvin´s lag.

Om nu en luftfylld grövre por är helt omgiven av fina vattenfyllda porer eller fast fas uppstår ett övertryck i luftporen. Övertryckets storlek är =1 kp/cm^2. Luften kan nu lämna luftporen om en luftbubbla kan passera de vattenfyllda porerna. För att få en bubbla igenom en por med radien r, erfordras dock ett övertryck ΔP som fås ur ekv (46) enligt Laplace

$$\Delta P = -\frac{2\cdot\sigma}{r}\cdot\cos\theta \qquad (46)$$

om ΔP = 1 kp/cm^2 och θ = 0 måste alltså den vattenfyllda poren ha minst radien 1,53 µ. Är de omgivande porerna mindre kan inte luften lämna poren.

Man kommer att få ett avsevärt fel vid porvolymbestämningen.

Att detta förhållande är en realitet har visats i våra experiment.

Provkroppar tillverkades av betong med pimpsten som ballast. Vattencementtalen var mycket låga ≤0,30. Så länge betongen var ung var det inga problem att fylla alla porer (även i pimpstenen) med vatten. Provkropparna lagrades sedan ett år i vatten varefter kritiska vattenmättnadsgraden skulle bestämmas. De skulle därvid fyllas upp med sådana vattenhalter att även pimpstenen delvis vattenfylldes. Provkropparna torkades därför först i +50°C, vilket ger en RH=17% i provkroppen. Detta innebär enligt Kelvin's lag att porer med radien 7Å är vattenfyllda.

Powers & Brownyard /1948/ har funnit att för en mycket tät cementpasta är en stor andel av porerna av denna storleksordning. I detta fall var cementpastorna mycket täta och dessutom fanns antydningar till kemisk reaktion med utbildning av täta reaktionsprodukter, i fasgränsen pasta-pimpsten, Fagerlund/1972A/. Man skulle alltså kunna tänka sig att pimpstensporerna inte skulle gå att fylla vid den efterföljande vacuumbehandlingen. Detta inträffade också. Pastaporerna fylldes men inte pimpstensporerna i vissa pimpstensbetonger. Vi tvingades därför torka i +105°C, varefter även alla pimpstensporer gick att fylla vid vacuumbehandlingen.

Fenomenet ovan måste beaktas mycket noggrannt vid en porvolymbestämning. Felen i porvolymer kan annars bli mycket stora. Som tidigare nämnts, pt 3.2.4 torde t ex försöken av Beaudoin & Mac Innis /1968/ kunna förklaras med att alla porer inte fylldes vid deras vacuumbehandling p g a att de förseglades av vattenmenisker på det sätt som diskuteras ovan.

Volymen

Volymbestämningen gjordes i samband med bestämningen av porvolym. De vattenmättade provkropparna vägdes i vatten omedelbart före det de vägdes i luft.

Genom att provkropparna var vattenmättade, uppstod inga problem med bristande vätning mellan provkropp och mätmedium. Precisionen i mätningarna var mycket god. Varje provkropp vägdes nämligen två gånger i luft och två gånger i vatten. Skillnaden vid de bägge vägningarna var normalt mycket liten.

Volymen fås ur ekv (80)

$$V = (Q_m^{\ell} - Q_m^{v}) \cdot K_2 \qquad (80)$$

där $K_2 = K_1$ i ekv (71) men med provkroppstemperaturen θ_p bytt mot vattentemperaturen θ_v.

Volymen bestämd med denna metod blir volymen innanför samtliga de vattenmenisker som erhölls vid torkningen före vägning i luft. Se fig 33 .

Som tidigare nämnts fås därvid en onyanserad volym för grovporösa material som lecablock och gasbetong. Meniskernas läge är nämligen svåra att definiera och volymen blir för liten. På så sätt blir t ex densiteten för stor. För dessa material bestämdes därför volymen även med skjutmått varvid man visserligen fick en något sämre precision än vanligt men dock fick en mera representativ volym.

Kompaktdensitet

Den slutna provolymen kan enbart beräknas om materialets kompaktdensitet är känd. Man kan approximativt anta att kompaktdensiteten för stenartade material är ungefär 2650 kg/m^3. Därefter beräknas total porositet ur ekv (65) och den slutna ur ekv (67).

För några material bestämdes den verkliga kompaktdensiteten i en apparat enligt fig 35 .

2 provkroppar av varje typ krossades ner till ett pulver. Därefter siktades pulvret genom siktserien 0,074; 0,125 och 0,25. Härvid fås då fraktionerna

<0,074 mm
0,074-0,125 mm
0,125-0,250 mm
>0,250 mm

För de tre finaste fraktionerna bestämdes kompaktdensiteten.

Pulvret torkades först i +105°C. Det torra pulvret vägdes upp i en 50 cm^3 pykometer som sedan monterades i apparaten.

Luften i pulvret evakuerades med en vacuumpump under ≈1 tim. Därefter öppnades förbindelsen till kolven med kokat avjoniserat vatten så att en liten mängd sögs in till pulvret och blandades med detta. Efter ytterligare en timme avbröts vacuumbehandlingen, pykometern fylldes helt med vatten, den fick stå över natten och fylldes på nytt dagen därpå i den mån någon sättning inträffat.

Kompaktdensitetn fås ur ekv (81)

$$\rho = \frac{(B-A)\cdot\rho_{w1}\cdot\rho_{w2}}{(C-A)\cdot\rho_{w2}-(D-B)\cdot\rho_{w1}} \qquad (81)$$

Resultat av bestämningen visas i punkt 7.4.

Den slutna porvolymen har naturligtvis ingen betydelse om vattenmättnadsgrad definieras enligt ekv (3). Som tidigare nämnts finns det emellertid en möjlighet att porväggar till slutna porer bryts ned och dessa blir tillgängliga för isens expansion. Kan detta ske utan större förstörelse bör även den slutna porositeten beaktas vid definitionen av vattenmättnadsgrad.

Genom att jämföra porositets- och densitetsvärden för frusna och ofrusna provkroppar finns det en möjlighet att studera en eventuell förvandling av sluten porvolym till öppen. Kompaktdensiteten är nämligen konstant. Ökningen i öppen porositet på slutna porositetens bekostnad blir

$$\Delta P_o^1 = (P_o)_t - 1 + \frac{\gamma_t}{\gamma_o}(1 - (P_o)_o) \qquad (82)$$

En eventuell ökning, ΔP_o^1 antyder alltså en inre förstörelse i materialet som eventuellt inte syns vid E-modulbestämningen och som kanske därför kan vara acceptabel.

4.3.3 Icke frysbar vattenmängd

I ekv (16) visas att om man vill jämföra frostbeständigheten hos olika material på ett rättvist sätt så måste man veta hur mycket vatten som förblir ofruset vid olika temperaturer.

Denna icke frysbara vattenmängd uttrycks lämpligen som en andel av den totala porvolymen

$$K = \frac{W_{if}}{P} \qquad (7)$$

K är en funktion av temperaturen, vilket gör att även vattenmättnadsgraden enligt ekv (3) blir en funktion av temperaturen.

Det är rimligt att definiera vattenmättnadsgraden som värdet vid lägsta tänkbara temperatur. Därvid minimeras såväl K som vattenmättnadsgraden.

För ett urval av de material för vilka S_{KR} bestämts har även bestämningar av frysbara vattenmängden skett. Dessutom har frysbara vattenmängden bestämts för ett stort antal andra material.

Dessa resultat kommer att redovisas i en separat rapport, Fagerlund/1973B/, där också bakomliggande teorier och apparatur kommer att beskrivas utförligt.

Viss information om frysbar vattenmängd under nedfrysningsskedet ges även i Fagerlund/1972C/. Dessa försök är baserade på en speciell apparatur. Se fig 81-82.

Samband mellan porositetsegenskaper och frysbar vattenmängd anges också i Fagerlund/1973C/ varur följande ekvationer och resonemang är hämtade.

Fryspunkten hos kapillärvatten är lägre än hos fritt vatten. Följande samband mellan porradie och fryspunktsnedsättning kan antas,

$$r = -\omega \cdot \frac{2 \cdot \sigma_{\ell g} \cdot M}{\rho_\ell \cdot \Delta H} \cdot \frac{1}{\ell n \frac{T_o - \Delta T}{T_o}} + 28{,}5 \cdot 10^{-10} \sqrt[3]{\frac{1}{\Delta T}} \qquad (83)$$

Där den sista termen är en korrektion för adsorberat vatten.

Ekvationen kan förenklas till

$$r = \frac{1}{8{,}061 \cdot 10^6 \Delta T - 6{,}12 \cdot 10^4 (\Delta T)^2 + 2 \cdot 10^2 (\Delta T)^3} \qquad (84)$$

Mängden icke frysbart vatten bör alltså öka med minskande porradier hos materialet . Detta är också ett väldokumenterat faktum. Ekv (83) visar t ex att om alla porer har radier <50Å så fryser inget vatten ens vid -30°C. Detta är ett utmärkt sätt att skapa ett frostbeständigt material.

Det finns också ett samband mellan sorptionsisotermernas utseende och mängden icke frysbart vatten. Fryspunkten är nämligen kopplad till relativa mättnadstrycket enligt (Fagerlund/1973C/)

$$-\ell n \frac{T_o - \Delta T}{T_o} = -\frac{1}{\omega} \cdot \frac{R(T_o - T)}{\Delta H} \cdot \ell n \, (p/p_s)_{T_o - \Delta T} \qquad (85)$$

där $(p/p_s)_{T_o - \Delta T}$ är relativa mättnadstrycket vid temperaturen $T_o - \Delta T$, d v s vid fryspunkten.

Ekvationerna (83)-(85) förutsätter att vattnet är saltfritt och i jämvikt. Man kan emellertid visa att det råder en hysteresis mellan icke frysbara vattenmängder, bestämda vid frysförsök och vid smältförsök. Fagerlund /1973C/.
I princip får man ytterligare fryspunktsnedsättningar utöver vad som framgår av ekvationerna ovan vid frysförsök. Detta beror på att vatten i isolerade kapillärporer förblir ofruset till relativt låga temperaturer p g a underkylning medan issmältning i samma porer sker vid rätt temperatur d v s enligt ekv (83)-(85).

Detta innebär att K_{min} vid en viss temperatur erhålls vid upptiningsexperiment på provkroppar som frusits till en lägre temperatur än den vid vilken K bestäms.

K_{min} motsvarar sedan S_{min}.
De icke frysbara vattenmängderna har därför huvudsakligen bestämts med upptiningsförsök. Lägsta frystemperatur har härvid varit -25°C medan

mätningarna startat vid -20°C. En viss uppfattning om hysteresiseffekterna issmältning-frysning har erhållits genom att provkropparna frusits till olika temperaturer före upptiningens start.

Upptiningsförsöken har ägt rum i en adiabatisk kalorimeter enligt fig 36-38.

Vissa studier av isbildning vid nedfrysning har gjorts i en kombinerad differenskalorimeter och extensometer, fig 81.

I fig 38 visas en principuppställning av den adiabatiska kalorimetern.

I en 300-liters frysbox placerades ett cylindriskt kopparkärl, den s k ytterburken. Kärlet är målat med aluminiumfärg på insidan. Dess mått är ϕ250 x 430 mm. Centriskt i kopparkärlet placeras provkroppen som är monterad i ett provkroppshölje, den s k innerburken. Innerburken hänger i en ram av vävbakelit.

Innerburken visas mera i detalj i fig 39-40. Den består av två vinkelböjda tunna plåtar av duraluminium. Dess mått är avpassade för provkroppar av storleken 30 x 30 120 mm^3.

På insidan av plåtarna är en värmeslinga av nichrom inlagd och fastlimmad i utgraverade spår. Slingans resistans vid rumstemperatur är 221,0 ohm. Detta värde har uppmätts genom noggranna mätningar av såväl ström som spänning liksom med mätningar med digitalvoltmeter. Ett eventuellt fel i slingans absoluta motstånd kompenseras för övrigt vid kalibreringsförsöken. Se nedan. Slingans temperaturkoefficient är försumbar. Monteringen av slingan är så utförd att hela ytan täcks och så att värmen fördelas jämnt på hela provkroppen.

Differensen i yttemperatur mellan de båda burkarna mättes ursprungligen med 34 st seriekopplade termoelement. Denna metod övergavs emellertid snart eftersom den med den teknik som stod till vårt förfogande vid den aktuella tidpunkten förutsatte manuell avläsning och reglering.

I stället mättes yttemperaturerna med fyra motståndstermometrar, två på varje burk. Givarna var av nickeltyp med en mätande yta av 11 x 28 mm^2 med nominell resistans vid 0°C av 100 ohm. Temperaturkoefficienten är 0,55ohm/°C. Varje givare klistrades på en tunn plåt av rostfritt stål. Plåtarna stacks ned i fickor av aluminiumplåt som monterats på burkarnas ytor. Givarna vändes in mot den yta vars temperatur skulle mätas. För att få en god termisk förbindning mellan givare och yta applicerades en värmeledande massa av s k Heat Sink Compound.

Ytterkärlet försågs med 4 st termoelement av koppar-konstantan, instuckna i hål i ytan. Provkroppen försågs med 2 st tunna hål, ett i toppen och ett i centrum. I dessa hål stacks ner extremt tunna termoelement, ϕ 0,1 mm av koppar-konstantan. Ett likadant termoelement monterades på innerburkens yta. Dessa tre tunna termoelement skarvades till tre grova. Alla grova termoelement leddes runt ett varv inne i kalorimeterkärlet innan de drogs ut i frysboxen.

På innerburkens topp monterades en kopplingsplint för anslutning av ledningar till likspänningsaggregat och temperaturregulator.

Energin för uppvärmning av innerburken med sin provkropp erhölls från ett stabiliserat likspänningsaggregat av typ Oltronix.

Mätning av energin kunde göras indirekt genom mätning av spänningen på provkroppens värmeslinga eftersom dennas temperaturkoefficient är försumbar. Spänningsmätningen pågick under hela försöket. Registreringen skedde på en 24 kanals punktskrivare av typ Philips.
Precisionen i såväl spänningskonstansen som mätningen var utomordenligt god.

Informationen från moståndstermometrarna fördes in till en tyristorstyrd

temperaturregulator av typ Swema TK.

Denna mätte skillnaden i resistans mellan de yttre och de inre givarna. Regulatorn fungerade på så sätt att om ingen resistansskillnad fanns, lämnades ut en viss normal regleringsspänning, U_o. Denna fördes ut till 4 st (alt 6 st) 200 w glödlampor i frysboxen. Detta innebär att vid resistansskillnaden noll stiger temperaturen i frysboxen trots att denna hela tiden går med full effekt. Tanken med regleringen är naturligtvis att frysboxtemperaturen (ytterburkens yttemperatur) skall stiga i samma takt som provkroppens temperatur. Detta innebär emellertid i normalfallet att effekten på lamperna måste öka alltefter som frysboxens temperatur stiger. Den använda regulatorn är tyvärr proportionell, vilket gör att den kräver en temperaturdifferens mellan ytter- och innerburkarnas ytor för att minska eller öka den utlagda spänningen utöver U_o. Denna temperaturdifferens-spänningskurva har utseende enligt fig 41. Kurvan har bestämts genom kalibreringar där temperaturdifferenser simulerats med hjälp av en obalanserad trådtöjningsmätbrygga i stället för med motståndstermometer. Temperaturkoefficienten hos givarna kan nämligen lätt översättas till en fiktiv mekanisk töjning. För de använda givarna motsvarar 0,1°C i temperaturdifferens en relativ mekanisk töjning av $275 \cdot 10^{-6}$ vid ±0°C och $296 \cdot 10^{-6}$ vid -20°C.

U_o har valts så att den motsvarar en jämviktstemperatur hos frysboxen av 0°C.

Eftersom normalt den mesta issmältningen sker vid 0°C kommer därför denna att mätas så gott som helt utan felreglering av kalorimetern.

Felreglering skulle också undvikas om uppvärmningshastigheten hos provkroppen kunde fås att exakt överensstämma med den naturliga uppvärmningshastigheten hos frysboxen när denna och fläktarna är igång och spänningen på lamporna är U_o. Denna naturliga uppvärmningskurva framgår av fig 42. För att i möjligaste mån anpassa uppvärmningshastighen hos innerburken till den naturliga kurvan minskas den pålagda spänningen på värmeslingan momentant vid =-10°C så att uppvärmningen därefter går långsammare. Eftersträvade temperaturstegringskurvor hos innerburken visas i fig 42. Reduktionen i spänning sker automatiskt genom att en termostat med sin känselkropp monterad på ytterburkens lock kopplar in ett extra konstantanmotstånd i serie med värmeslingan.

Vid temperaturen =+1°C kopplas ytterligare två stycken 200-w lampor i frysboxen in så att en viss utlevererad spänning från temperaturregulatorn medför en större uppvärmningskapacitet. Naturliga uppvärmningskurvan hos frysboxen vid U_o på 6 lampor visas i fig 42.

Genom dessa åtgärder reduceras felregleringens storlek. Den tillförda effekten till värmeslingan anpassas också före varje försök till ett lämpligt värde. En liten värmekapacitet hos provkroppen medför lägre effekt på värmeslingan än en stor värmekapacitet om uppvärmningshastigheten skall bli lika stor.

Trots alla försök att minska felregleringen uppstår vissa sådana. Deras storlek kan man bestämma genom att mäta den utreglerade spänningen till lamporna. Denna spänning transformeras ner, likriktas och skrivs på 24-punktsskrivaren. Felregleringen fås sedan ur fig 41.

Ett exempel på felreglering visas i fig 43. Storleksordningen är ±0,1 à 0,2°C.

Felregleringen medför värmetransporter till och från innerburken. Storleken på värmetransporten fås ur felregleringskurvan genom kännedom om kalorimeterkonstanten, B;

$$\Delta W = B \cdot \Delta\theta'_{iy} \cdot t \qquad (86)$$

Kalorimeterkonstanten som alltså uttrycker hur stor energi som transporteras från eller till ytterburken per grads temperaturdifferens och tidsenhet kan bestämmas på åtminstone två olika sätt:

- Mätning av nedkylnings- resp uppvärmningshastigheten hos innerkärlet med torr provkropp vid oreglerat försök utan värmetillförsel till provkroppen. Yttemperaturerna och provkroppstemperaturen mäts med termoelement. Med kännedom om specifika värmet hos innerkärlet med provkropp kan kalorimeterkonstanten beräknas

$$B = \frac{C_p}{|\Delta\theta_{iy}|} \cdot \frac{|\Delta\theta_p|}{\Delta t} \qquad (87)$$

  Som provkroppar har använts 4 st mässingsstavar av olika längd, varvid C_p varierats.

  Provkroppen har utbytts mot en stålbehållare med en känd mängd vatten. Kalorimeterkonstanten kan erhållas ur den tid det tar att frysa ner resp tina upp vattnet vid oreglerade försök utan värmetillförsel till provkroppen.

$$B = \frac{Q_w \cdot \Delta h}{t_1 |\Delta\theta_{iy}|} \qquad (88)$$

Den senare metoden är säkrast.

Kalorimeterkonstanten har bestämts för 14 försök med minsta kvadratmetoden till; (fig 44)

$$B = 0{,}122 + 8{,}8 \cdot 10^{-4} |\Delta\theta_{iy}| \qquad (89)$$

Att B ökar med ökande temperaturdifferens beror på att konvektion uppträder i kalorimeterkärlet.

Ekvationen gäller i området 0-15°C temperaturdifferens, $\Delta\theta_{iy}$. I verkligheten är som framgår av fig 43 temperaturdifferenserna bara ≈0,2°C.

För ett försök som varar 3 timmar med en konstant felreglering av 0,1°C blir total ut- eller intransporterad värmemängd 0,1 x 0,122 x 3 x 3600 = 131,8 Ws, vilket motsvarar en frysbar vattenmängd av 0,40 g. Totala frysbara vattenmängden för ett så pass långt försök är ∿10 g. Felregleringen står alltså för ungefär 4 % av total indikerad frysbar vattenmängd.

Felet är emellertid avsevärt mycket mindre. Av fig 44 framgår att ett fel i B på 0,005 är rimligt. Detta ger ett fel i indikerad frysbar vattenmängd i försöket ovan på enbart 0,005 x 0,122 x 3 x 3600/333,3 = 0,02 g, vilket utgör enbart 0,2 % av total frysbar vattenmängd.

Felen kan emellertid bli större. Fig 43 visar enbart felregleringens storlek från ett jämviktsläge som antas motsvara att temperaturdifferensen mellan ytter- och innerburk är noll. Men temperaturdifferensen noll behöver inte innebära att resistensen hos de båda yttre givarna är lika med resistansen hos de inre givarna. Dels är givarnas temperaturkoefficient något olika, dels mäter de temperaturen på enbart en liten del av resp burks yta.

Parallellt med motståndsgivarna lades därför in en precisionspotentiometer med vars hjälp relativa moståndet i givarna kunde justeras så att jämviktsspänningen U_o verkligen motsvarade temperaturdifferensen noll.

Injusteringen av potentiometern gjordes med hjälp av kalibreringsförsök med rent vatten. Vattnet till en mängd av ≈65 g hälldes i en rörformad behållare med yttermått 30 x 30 x 120 mm. Centralt i öret placerades

ett tunt kopparrör för att ge mindre temperaturgradienter i iskroppen. 2 termoelement monterades i röret, som försågs med "lock" av tejp. Fig 45.

Röret monterades i innerburken varefter nedfrysning skedde.

Uppvärmningskurvan kom att bestå av tre räta linjer (fig 46), eftersom all issmältning skedde vid 0°C. Med kännedom om tillförd effekt, mängd vatten och tid för issmältning kan storleken på en eventuell konstant temperaturdifferens mellan ytter- och innerburk beräknas.

$$\Delta\theta''_{iy} = \frac{(Q_w - \frac{P \cdot t_s}{\Delta h}) \cdot \Delta h}{B \cdot t_s} \qquad (90)$$

Blir den beräknade vattenmängden för stor har tydligen innerburken varit varmare än ytterburken så att en del värme transporterats ut. (Eventuellt har även värmeslingans motstånd felbestämts varvid den beräknade effekten är felaktig) I så fall kan justering ske med potentiometern så att $(\Delta\theta_{iy})_{konst}$ (eller felet i värmeslingans resistans) försvinner. 20 sådana kalibreringsförsök har gjorts spritt under försökens gång.

Precisionspotentiometern är inbyggd i en kalibreringspanel. För injustering av rätt jämviktsspänning U_o har panelen försetts med ytterligare en precisionspotentiometer och två fasta stabila motstånd som skall motsvara motståndstermometrarna. Potentiometern ställs in så att de båda motstånden får exakt samma motstånd. Detta sker med hjälp av en trådtöjningsbrygga. Sedan justeras U_o in med en potentiometer på temperaturregulatorn.

Kalibrering av konstant felreglering sker med den nämnda metoden enbart vid 0°C. Möjligheten finns emellertid att motståndstermometrarna har olika temperaturkoefficienter, vilket gör att en felreglering ändå uppstår vid lägre temperaturer. Storleksordningen av detta fel kan bestämmas genom mätningar av de absoluta yttemperaturerna. Man finner då en oreglerad differens i yttemperaturer av

$$\Delta\theta'''_{iy} = 0{,}0085 \cdot \theta \qquad (91)$$

Vid minustemperaturerna blir innerburken kallare än ytterburken, varför det sker en värmetransport inåt och tvärtom vid plustemperaturer.

Totalt värmeflöde p g a felreglering $\Delta\theta'''_{iy}$ fås ur ekv (86).

Försöket går praktiskt till på följande sätt:

Provkroppen (som i fallet skivformiga material utgör en stapel av mindre bitar), anpassas till en lämplig vattenhalt. Den förses med två termoelement, sveps in i två lager aluminiumfolie och monteras i innerburken. Frysboxen startas. Lämplig nedfrysningstemperatur erhålls genom att en viss spänning påläggs lamporna i boxen. Frysning sker normalt ett halvt dygn (under natten). Upptiningen startas genom att en lämplig spänning läggs på värmeslingan i innerburken. Samtidigt startas tre fläktar i frysboxen och temperaturregulatorn. Försöket sköter sedan sig själv ända upp till +20°C när en termostat bryter. Provkroppstemperatur, temperatur hos ytter- och innerburk, felreglering, tillförd spänning till innerburken skrivs av punktskrivaren.

Efter försöket vägs provkroppen på nytt.

Resultatet av ett försök blir kurvor av typ, fig 47 . Tidsaxeln görs sedan om till en energiaxel genom multiplikation av tiden med tillförd effekt via värmeslingan och via felregleringar $\Delta\theta'_{iy}$; $\Delta\theta''_{iy}$ och $\Delta\theta'''_{iy}$

Energi-temperaturkurvan delas upp i segment.
Frysbar vattenmängd vid temperatur θ_n fås nu ur ekv (92), Fagerlund /1973C/;

$$(w_f)_n = \frac{(w_f)_{n+1}\left\{\Delta h_n + \frac{1}{2}(\theta_{n+1} - \theta_n)\cdot(C_w - C_i)_n\right\} + W_{n+1} - W_n - C(\theta_{n+1} - \theta_n)}{\Delta h_n - \frac{1}{2}(\theta_{n+1} - \theta_n)(C_w - C_i)_n} \qquad (92)$$

där $(\Delta h)_n = 333700 + 2190 \cdot \theta_n$ (93)

$(C_w - C_i)_n = -9{,}9 \cdot \theta_n + 2107$ (94)

Värdet K (ekv (7)) fås nu ur ekv (95)

$$K_n = \frac{Q_w - (w_f)_n}{V_p \cdot 10^3} \qquad (95)$$

Beräkning av såväl tillförd energi som av K_n görs av dator. Försöksdata har därför överförts från skrivarpapperet till hålremsor genom en speciell utvärderingsapparat.

Med datorns hjälp beräknas också porstorleksfördelningen hos materialen genom ekv (83) och adsorptionsisotermens övre del genom ekv (85).

Försöken plottas med hjälp av en plotter.

Variationer i försöken har varit nedfrysningstemperatur och vattenhalt.

Nedfrysningstemperaturen kan förväntas påverka värdet K på ett sätt som visas principiellt i fig 48. Se även tabell 4.

Vattenhalten kan förväntas påverka värdet K enbart när den är mycket låg. Orsaken till detta är att vid låga vattenhalter kommer menisken is-luft i den grövsta isfyllda poren att påverka fryspunkten hos porvattnet. Menisken ger upphov till tryckspänningar i porvattnet varvid fryspunkten sänks, Fagerlund/1973C/. En principiell kurva över vattanhaltens inverkan på värdet K vid en viss temperatur visas i fig 49.

Exempel på bestämningar av frysbara vattenmängder visas i punkt 7.5. Icke frysbara vattenmängder har dock inte bestämts för alla de material för vilka S_{KR} bestämts.

Majoriteten av alla bestämningar av icke frysbara vattenmängder har gjorts i den adiabatiska kalorimetern.

Som tidigare nämnts har emellertid vissa bestämningar av frysbara vattenmängder vid nedfrysningsförsök gjorts. Dessa har utförts i en differenskalorimeter enligt fig 81. Dennas funktion genomgås inte här eftersom den beskrivs utförligt i Fagerlund/1972C/och även delvis i punkt 5.3.3 nedan.

Vissa resultat visas i punkt 7.5 .

4.4 Anpassning av provkroppar till rätt vattenhalt

4.4.1 Beräkning av samband provkroppsvikt-fukttillstånd

Frysmetodiken förutsätter att provkroppar ur samma utgångsmaterial kan anpassas till rätt fukttillstånd före frysning.

Om porvolymen och torrvikten hos varje provkropp är känd kan man beräkna den vikt som motsvarar en viss vattenmättnadsgrad S_e ur ekv (96)

$$Q = Q_f + S_e \cdot V_p \cdot 10^3 \qquad (96)$$

Vissa material kan emellertid inte torkas ur helt före testen eftersom man då förändrar materialstrukturen och därför kanske också den kritiska vattenmättnadsgraden. Man kan då som tidigare nämnts (sid 62) beräkna torrvikten ur desorptionsisotermen och sedan bestämma provolymen på vanligt sätt. Därefter används ekv (96).

Man kan emellertid nöja sig med att enbart torka ur enstaka provkroppar till +105°C och sedan använda data för dessa provkroppars densitet och porositet vid beräkning av vilken vikt en godtycklig provkropp skall ha vid anpassningen. Den enda bestämning man måste göra är varje provkropps vikt i luft när den är helt vacuummättad, Q_m^{ℓ}; Provkroppsvolymen blir nämligen

$$V = \frac{Q_m^{\ell}}{\gamma + P \cdot 1000} \qquad (97)$$

Provkroppsvikt vid en viss vattenmättnadsgrad fås sedan ur ekv (98)

$$Q = (\gamma + S_e \cdot P \cdot 1000) \cdot V \qquad (98)$$

4.4.2 Metodik för anpassning

Anpassning till rätt fukthalt kan ske på två principiellt olika sätt:

- Uttorkning från ett våtare tillstånd (t ex vacuummättat)
- Uppfuktning från ett torrare tillstånd (t ex "lufttorkat")

Majoriteten av alla anpassningar har gjorts med uttorkningsmetoden. Provkropparna har härvid vacuummättats med vatten varefter de "grovtorkats" vid ≈50°C (i vissa fall även +105°C). "Fintorkningen" har gjorts med en elektrisk varmluftsfläkt.

Fördelen med uttorkningsmetoden är att alla fukttillstånd från full mättnad till full uttorkning lätt kan erhållas. Nackdelarna är att permanenta fuktgradienter kan uppstå (Se 4.4.3), och att uttorkningen kan ta en mycket lång tid för täta material, framför allt då om provkropparna är stora.

Vissa anpassningar har utförts med uppfuktning. Den kritiska vattenmättnadsgraden är ofta större än de vattenmättnadsgrader som erhålls vid vattenlagring vid atmosfärstryck. Därför måste en viss vacuumbehandling av provkropparna utföras, för att ett erforderligt spektrum av vattenmättnadsgrader skall erhållas.

De "torkade" provkropparna har placerats i en dessicator, fig 50. Luften har evakuerats till ett visst resttryck varefter vatten har släppts in i dessicatorn. Provkroppen har sedan lagrats i vatten något dygn.

Genom att minska resttrycket fås successivt ökande vattenmättnadsgrader.

Små vattenmättnadsgrader erhålls genom doppning av provkroppar olika lång tid i vatten.

Fördelarna med metoden är att teoretiskt sett inga fuktgradienter uppstår eftersom hela provkroppsvolymen utsätts för samma behandling (se 3.4.3) och att den är snabb, enbart någon minuts vacuumbehandling erfordras för varje provkropp. Nackdelen med metoden är att det är omöjligt att i förväg veta vilket resttryck som ger vilken vattenmättnadsgrad. Man kommer att få en slumpvis fördelning av vattenmättnadsgraden hos de olika provkropparna.

Även om vi inte använt uppfuktningsmetoden i någon större omfattning så torde, vid ett praktiskt utnyttjande av begreppet vattenmättnadsgrad för bedömning av frostbeständighet, denna metod vara mest praktisk.

Vattenkvaliteten har i samtliga fall varit vanligt vattenledningsvatten.

4.4.3 Inverkan av anpassningsmetodik på kritisk vattenmättnadsgrad

Man kan teoretiskt visa att för ett material bestående av en vattenfylld porös matris med inneslutna luftfyllda porer ökar kritiska vattenmättnadsgraden med minskande storlek hos de luftfyllda porerna. Warris /1964/, Fagerlund/1973A/. Detta gör att för ett visst material kommer kritiska vattenmättnadsgraden att få ett minimum när alla porer under en viss storlek är vattenfyllda och alla porer över samma storlek är luftfyllda. All annan fördelning av vatten ger en högre kritisk vattenmättnadsgrad.

Man kan nu experimentellt (och även teoretiskt för vissa porsystem, de Boer /1958/) visa att vatten kommer att, vid en viss vattenmättnadsgrad, befinna sig i olika porer beroende på om vattenmättnadsgraden uppnåtts med torkning eller uppfuktning.

Man kan experimentellt bestämma s k jämviktsfuktkurvor.
I Fagerlund /1973C/ anges olika metoder. Dessa kurvor visar fuktkvoten när porvattnet är i jämvikt vid olika porvattenundertryck, ΔP.

Porvattenundertrycket, ΔP, kan även uttryckas som en porradie genom Laplaces´ lag

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cos \theta \qquad (56)$$

Det kan också uttryckas med s k suction-värden där suction, pF, definieras som 10-logaritmen av materialet kapillära stighöjd i cm

$$pF = {}^{10}\log(Z \cdot 10^2) \qquad (99)$$

Stighöjden Z är nämligen beroende av porvattenundertrycket, ΔP, enligt ekv (100)

$$\Delta P = -\rho_w \cdot g \cdot Z \qquad (100)$$

Man kommer att få två extremkurvor om materialet hela tiden torkas från vattenmättat stadium, uttorkningskurvan, och om det hela tiden uppfuktas från uttorkat stadium. I fig 51 visas ett exempel på två sådana extremkurvor för en typ av granved, Penner /1965/. På X-axeln anges porvattenundertrycket dels som pF-värden, dels som porradier.

Som synes ligger uttorkningskurvan betydligt högre än uppfuktningskurvan i så gott som hela det intressanta området, <pF4, pF>4 motsvarar sorptionsisotermområdet. Vid vattenhalter, som motsvarar detta område, är dock frostbeständighetensproblemet troligen av underordnad betydelse.

Kurvor av samma typ gäller för andra material, kanske normalt inte med denna enormt stora hysteresisyta mellan uttorkning och uppfuktning.

Av X-axeln framgår nu att en viss vattenmättnadsgrad motsvarar en mindre

porradie på uttorkningskurvan än på uppfuktningskurvan. Mekanismen visas schematiskt för en ideell por i figur 52 . Poren består av tre cylindrar i serie med radierna r_1, r_2 och r_1. Vid uttorkning från helt mättat tillstånd töms först den grova mittporen. Vattenmättnadsgraden S motsvarar att de båda små cylindrarna är fulla. Vattnet är då under ett undertryck som bestäms av radien r_1. Vid uppfuktning från ett helt vattenmättat tillstånd (poren suger från ena änden) fylls först den undre poren med radien r, dessutom antas vattnet stiga så långt upp i den grövre poren att porens vattenmättnadsgrad blir just S. Porvattenundertrycket bestäms då av radien $r_2 > r_1$ och är därför mindre än tidigare. Se ekv (56).

Av fig 51 framgår också att vid ett visst porvattenundertryck kommer vattenmättnadsgraden att vara lägre vid uppfuktning. Även detta kan åskådliggöras med pormodellen ovan. Se fig 53 .
Vid uttorkning till porvattenundertrycket ΔP_1 är bägge de små porerna fyllda. Vid uppfuktning till samma porvattenundertryck är enbart den undre poren fylld.

Av fig 52 framgår att vattnet i fallet uppfuktning är lokaliserat i genomsnittligt grövre porer än i fallet uttorkning. Porens "kritiska vattenmättnadsgrad" är alltså större i fallet uppfuktning enligt vad som postulerades ovan.

Tydligen kommer alltså minimalt S_{KR} att uppnås vid uttorkning från helt vattenmättat tillstånd.

Skillnader i S_{KR} vid de båda anpassningsmetoderna blir beroende dels av hysteresisytans storlek dels av porstorleksfördelningen.

Några renodlade studier av anpassningsmetodens inverkan på S_{KR} har inte gjorts ännu.

Undernaturliga förhållanden kommer jämviktstillståndet att vare sig utgöras av uttorknings- eller uppfuktningskurvan utan av en övergångskurva mellan dessa båda. En tänkt sådan kurva har ritats in i fig 51 I naturen sker nämligen både uppfuktningar och uttorkningar.

Vid anpassning genom uppfuktning kommer porvattnet i hela provkroppen att följa uppfuktningskurvan eftersom hela provkroppen från början utsatts för samma undertryck. Några fuktgradienter uppstår alltså inte.

Vid anpassning genom uttorkning finns det risk för fuktgradienter. Så länge uttorkningshastigheten är mindre än transportkapaciteten för vatten ut till materialytan, uppstår inga fuktgradienter i provkroppen. Detta gäller framför allt vid anpassning till höga vattenmättnadsgrader. När uttorkningen är intensivare eller mera omfattande uppstår så småningom en fuktgradient i provkroppen. Ytpartiet blir torrare än mittdelen. Hela provkroppen följer dock uttorkningskurvan. Se fig 54 .

När rätt medelfuktkvot uppnåtts kan man därför ha olika fuktkvoter i olika delar av provkroppen. Nu är det emellertid inte jämvikt i provkroppen. Ytterdelen har porvattenundertrycket ΔP_y och mittdelen ΔP_c. Därför sker en uppfuktning av den inre delen och en uttorkning av mittdelen. Uttorkningen följer uttorkningskurvan men uppfuktningen följer en övergångskurva. Vid jämvikt är porvattenundertrycket ΔP_m i allt porvatten men fukttillstånden är olika, S_y och S_c. Man har fått en fuktgradient i provkroppen.

Gradienten försvinner helt eller delvis eftersom avkylningen av provkroppen dels efter anpassningen och dels vid avkylningen före första frysningen medför att vatten från det inre kondenserar i ytpartiet.

Fuktgradienter är besvärande eftersom redan första frysningen är avgörande för om allvarliga skador skall uppstå eller ej. Genom att använda medelvattenmättnadsgrader underskattar man den verkliga fukthal-

ten i våtaste delen av materialet.

För ett antal provkroppar av fyra gasbetonger har fuktgradienter omedelbart före första frysningen bestämts. Provkropparna med storlek 30 x 30 x 120 mm^3 anpassades till olika fuktnivåer genom uttorkning på vanligt sätt. De monterades i frysapparaten också på vanligt sätt, och en fryscykel påbörjades. Omedelbart innan provkroppstemperaturen var 0^oC togs provkropparna ut en och en. Med mejsel och hammare höggs de i bitar. De var därvid fortfarande inkapslade i plastpåsar. Bitarna vägdes, torkades vid 105^oC och vägdes på nytt. Resultatet visas i fig 55a)-k). I figurerna har också lagts medelfukthalter i materialet. Sådana partier i provkroppen där uppmätt fukthalt är större än medelfukthalten har sgrafferats.

Som synes finns en tendens till att ytpartier är torrare än övrigt material. Detta syns framför allt på hörnbitarna, som har större andel ytparti än övriga bitar. Väsentligare är emellertid att vissa delar är våtare än medelvärdet. Detta gäller framför allt gasbetonger av typer 2 och 3. Fuktgradienterna är dessutom mest accentuerade i de torraste provkropparna av varje typ. Detta styrker denbeskrivna mekanismen, fig 54.

Vid en serie provkroppar av en viss typ kommer därför vattenmättnadsgraden hos de torraste att underskattas om medelvärdet begagnas.

Nu är gasbetong ett material i vilket stora fuktgradienter kan förväntas om medelfuktkvoten i materialet är så stor att även vissa sfäriska bubblor är vattenfyllda. En häftig uttorkning av ytan kommer nämligen att medföra att vissa ytliga luftbubblor töms på vatten. När uttorkningen avbryts kommer dessa bubblor inte att fyllas på nytt utan enbart porerna i väggarna mellan luftbubblor.

I ett material av typ tegel torde risken för stora fuktgradienter vara betydligt mindre.

Nu torde en betydligt bättre fuktfördelning i materialet kunna åstadkommas genom lämplig efterbehandling av provkroppen efter anpassning. Exempel på en sådan är en upprepad cyklisk uppvärmning och avkylning av de förseglade provkropparna så att fukt omfördelas p g a kondensationer inne i materialet.

Efter ett antal fryscykler är fuktgradienterna avsevärt utjämnade. Även detta har testats för olika material. Se fig 56a)-x).

4.5 Frysmetodik

4.5.1 Principiellt

Frysmetoden skall utformas så att materialegenskapen "kritisk vattenmättnadsgrad" går att bestämma.

Det bestämda värdet skall dessutom i möjligaste mån överensstämma med det kritiska värde som kan förväntas uppstå under naturliga förhållanden. Man kan nämligen inte utesluta en påverkan av omgivande temperaturförhållanden på det kritiska värdets storlek. Omgivningens påverkan sker i huvudsak via isbildningshastigheten. Följaktligen måste samspelet luftemperatur-provkroppsstorlek beaktas så att naturliga förhållanden efterliknas. Detta diskuteras utförligt ovan i punkt 4.2.1.

Vid normala frystester uppstår alltid det komplicerade problemet val av frysmetod. Valet kan gälla

- frysning i luft eller vatten
- upptining i luft eller vatten
- frysnings- resp upptiningshastighet (cykelns varaktighet)
- antal cykler
- fukttillstånd hos provkroppen före testen

Detta val förenklas nu avsevärt. Variationerna ovan har nämligen huvudsakligen sin effekt i att de påverkar fukttillståndet i provkropparna, Fagerlund/1972D/. Frysning och upptining i vatten liksom förlängd fryscykel och ökat antal cykler ger en ökning av fukthalten och ger därför större risk för frostskador.

För bestämning av kritisk vattenmättnadsgrad är det enda väsentliga kravet att vattenhalten i varje provkropp skall vara konstant under hela testen och lika i alla delar av provkroppen (förutom krav på en rimlig isbildningshastighet enligt ovan).

Varje provkropp måste därför frysas inkapslad i t ex plastfolie såväl vid nedfrysning som upptining. Provkropparna bör dessutom roteras hela tiden så att fuktgradienter p g a gravitation undviks.

En del ytterligare krav tillkommer:

- Temperatursänkningshastigheten hos omgivande luft måste i kombination med provkropparnas storlek ge en rimlig isbildningshastighet, se punkt 4.2.1.
- Temperaturen bör vid varje tidpunkt vara lika i hela frysutrymmet och kunna reproduceras cykel efter cykel så att alla provkroppar utsätts för samma klimatpåverkan.

  Val av antal fryscykler är som tidigare nämnts av väsentlig betydelse vid normal frysning, men relativt oväsentlig vid bestämning av kritisk vattenmättnadsgrad. Detta har framgått klart av våra omfattande försök.

4.5.2 Vattenmättnadsgradens konstans

Ett förförsök gjordes där vattenmättade provkroppar förseglades på olika sätt, med olika plastfolier och med aluminiumfolie, varpå de frystes och tinades ett antal cykler. Därvid visade sig de minsta viktförlusterna uppstå vid användning av vanliga polyetenpåsar för djupfrysning av matvaror. Påsarna virades runt provkropparna, "påsgavlarna" veks in och fästes med gummiband som spändes runt provkroppen.

Med denna förseglingsmetod uppstod mycket små (försumbara) vattenförluster t o m vid långvariga frysförsök. Detta beror troligen på att relativa fuktigheten inne i frysboxen är mycket hög under själva upptiningsproceduren

då risken för vattenförluster är som störst.

I de fall där provkroppar testats med avseende på E-modul flera gånger under samma frysförsök, har eventuella vattenförluster kompenserats innan provkropparna förseglats på nytt för nya frysningar.

Tidigare, i punkt 4.3.2 , har nämnts att porvolymen i materialet kan komma att minskas p g a fortgående hydratation. Effekten befanns dock vara liten. Däremot kan den fortgående hydratationens effekt på vattenmättnadsgraden vara mycket stor. Dels innebär den nämligen en reduktion av fritt vatten i den förseglade provkroppen, dels innebär den en ökning av icke frysbar vattenmängd.

Som exempel kan tas betongen på sid 66.

Begynnelseporositeten är 19,7 %. Om porfyllnadsgraden från början är 0,80, så innebär detta att mängden fritt vatten är 0,80 x 197 = 157 $1/m^3$. Men efter 14 dagars test har betongen bundit ytterligare 0,07 x 0,25 x x 400 = 7 1 vatten per m^3. Porfyllnadsgraden är då reducerad till

$$S_e = \frac{150}{0,192} = 0,78$$

Icke frysbara fria vattenmängder i betonger kan antas vara 1,5 x w_n, där w_n är hydratvattenmängden, Warris /1964/. Då är frysbara vattenmängden före testen

$$w_f = 157 - 1,5 \times 0,56 \times 0,25 \times 400 = 73\ 1/m^3$$

där 0,25 x 400 motsvarar hydratvattenmängden, w_n, vid fullständig hydratisering, Bergström /1967/.

Vattenmättnadsgraden S_f före testen blir

$$S_f = \frac{73}{73 + 197 - 157} = 0,647$$

Frysbara vattenmängden efter testen blir

$$w_f = 157 - 7 - 1,5 \times 0,63 \times 0,25 \times 400 = 56\ 1/m^3$$

Vattenmättnadsgraden efter testen blir

$$S_f = \frac{56}{56 + 192 - 150} = 0,572$$

Den generella formeln för vattenmättnadsgrad, S_f, för en betong eller cementpasta är

$$S_f = \frac{W_f}{W_f + \ell} = \frac{W_e - k \cdot W_n}{W_e - k \cdot W_n + P - W_e} = \frac{W_e - k \cdot W_n}{P - k \cdot W_n} \qquad (101)$$

där k ≈ 1,5 enligt Warris /1964/, lägre (k=1) enligt Powers & Brownyard/1948/

Ökar nu hydratvattenmängden med beloppet ΔW_n så förändras S_f enligt ekv(102). Förutsättningen är att hydratvatten har 75 % av ursprunglig volym

$$S_f = \frac{W_e - \Delta W_n + k(W_n + \Delta W_n)}{P - k(W_n + \Delta W_n) + 0,25 \cdot \Delta W_n} \qquad (102)$$

Effekten i S_f av hydratisering är alltså oerhört väsentlig eftersom vattenhalterna hålls konstanta vid testen. Inverkan av ålder är sådan att vattenmättnadsgraden minskar med tiden.

Det är därför väsentligt att testen av S_{KR} görs under så kort tid som möjligt d v s med minimalt antal cykler. Detta gäller framför allt vid ung ålder hos materialet.

Det är också väsentligt att ålderseffekten beaktas vid val av provkroppsålder för material av typ betong. Ekv (105) visar t ex hur starkt den icke frysbara vattenmängden ökar vid ökande provkroppsålder. Detta påverkar naturligtvis i sin tur värdet på S_{KR}.

En viss uppfattning om hydratationens storlek under frysförsöken kan man få genom jämförelser av vissa materials torrvikter före och efter testen. En eventuell ökning är troligen en ökning av hydratvattenmängden.

4.5.3 Fuktgradienter under frysning

Tidigare har visats att fuktgradienter kan uppstå i samband med anpassning av provkroppar till rätt fuktnivå, sid 76 fig 55. Tendensen är härvid att ytorna blir torrare än provkropparnas mittdelar.

Vid de cykliska frysningarna och upptiningarna kommer vattentransporter att ske inne i materialet. Det finns därför anledning att anta att eventuella fuktgradienter utjämnas. Möjligen kommer rentav nya gradienter i motsatt riktning att uppstå d v s ytorna på provkropparna blir våtare. Detta skulle i så fall bero på att vatten som pressas ut ur provkroppen vid isbildningen och fryser på materialytan inte skulle sugas tillbaka fullständigt inför nästa frysning.

Fuktgradienter efter ett antal fryscykler har därför mätts på provkroppar av tegel, kalksandsten och de fyra gasbetongsorterna. Metodiken var densamma som beskrevs ovan på sid 78.

Resultatet visas i fig 56 a)-x).

En jämförelse mellan fig 55 och 56 visar en klar tendens till att fuktgradienter utjämnas efter ett antal fryscykler, Jfr t ex gasbetonger typ 2 och 3.

Möjligen kan också skönjas en tendens till att ytorna nu är våtare än de centrala partierna. Se t ex gasbetong typ 1. Före första cykeln var ytorna (gavlarna på provkropparna) betydligt torrare än medelfukthalten. Efter 6 frysningar är förhållandet omvänt.

Härvid kan noteras att just gasbetong typ 1 var det enda material som frysskadades genom mycket kraftig ytavskalning, vilket tyder på att fuktkvoterna i ytan varit höga efter ett antal cykler.

4.5.4 Fryscykel

Temperatursänkningshastighet

Som teoretiskt visats på sid 58 bör tid-temperaturcykeln hos frysboxluften anpassas dels till naturliga klimatförhållanden dels till provkroppsstorleken.

Målet bör vara att samma isbildningshastighet skall erhållas i provkroppen i frysboxen som när en normalstor volym av samma material används på ett normalt sätt.

En utredning om temperatursänkningshastigheter hos ytterluft har gjorts i regi av TBE (Fédération Europeénne des Fabricants de Tuiles et de Briques). Butterworth / 1961/. Flera deltagare från olika länder rappor-

terade därvid maximala temperatursänkningshastigheter i närheten av 0°C av 6°C/tim, Butterworth/1964C/.

Amrein /1964/ som gjort omfattande mätningar av temperatursänkningshastigheten hos ytterluft anger att om intervallet +2°C → -2°C genomlöps på 50 à 60 min av en tegeltakpanna "innefattar man även den mest extrema temperatursänkning som kan förekomma i naturen".

Detta ger en medelhastighet av 4 à 4,8°C/tim, vilket måste innebära en ännu större temperatursänkningshastighet hos ytterluften.

Gjørv & Bratteland /1969/ har studerat temperaturförhållandena hos en norsk kajkonstruktion och hos omgivande luft under en treårsperiod. Maximal uppmätt temperaturvariation hos såväl luft som betong under en tretimmarsperiod var 5,5 à 8,0°C, vilket ger 1,8 à 2,7°C/tim. Variationen under en enskild timme kan naturligtvis vara större.

Swenson /1956/ redovisar en medeltemperatursänkningshastighet hos ytterluft i Kanada av ≈7 tim från +2°C till -4°C, vilket ger 0,88°C/tim.

Vinberg /1956/ anvisar att fryshastigheten vid enstaka fryscykler bör vara 5°C/tim och vid upprepade fryscykler 1,7°C/tim. Dessa uppgifter baseras på en analys av verkliga temperatursänkningshastigheter i Stockholm. Att hastigheten väljs lägre vid upprepade cykler, förklaras av att sannolikheten av att den snabba hastigheten 5°C/tim uppträder flera gånger i sträck är liten.

Ritchie & Davisson /1968/ har studerat temperatursänkningshastigheten hos murar, placerade utomhus i Kanada. Avkylningshastigheterna var normalt 2 à 3°C/tim vid 0°C. Maximalvärdet var 10°C/tim. Författarna anser därför att fryshastigheten vid ett laboratorieförsök inte bör överstiga 10°C/tim.

Bergmann /1955/ har gjort mätningar av temperaturfall i tegelpannor i Tyskland. Maximalvärdet uppmättes till 2 à 3°C/tim vid temperaturområdet +3 → -3°C. Bergmann skriver dock att "i extremfall torde denna temperaturväxling kunna inträda på betydligt kortare tid".

Schneider /1962/ har mätt temperatursänkningshastigheter hos taktegel och omgivande luft i Tyskland vintern 1955/56. Tegeltemperaturen på översidan sjönk från +2°C till -2°C på 40 à 105 min och från +5°C till -5°C på 125 à 250 min. Hastigheterna blir alltså 2,2 à 6°C/tim i första fallet och 2,4 och 4,8°C/tim i senare fallet.

Christensen /1965 / har studerat temperaturförändringar hos ytan av en tegelmur i Danmark vintern 1962/63. Den starkaste registrerade temperaturförändringshastigheten var 14°C/tim i ytan.

Plum & Jessing /1965/ visar kurvor över frekvensen av temperaturförändringshastigheter hos ytterluft i Danmark , fig 57.

Som synes är extremvärdet 6,5°C/tim under en 12-årsperiod. Extremvärdet under en ettårsperiod är 3,4°C/tim.

Uppenbarligen är uppgifter om verkliga temperatursänkningshastigheter hos ytterluften osäkra. De påverkas inte enbart av den geografiska belägenheten av konstruktionen. Hänsyn måste också tas till att "mikrotemperaturen" hos luften runt en konstruktion kan vara annorlunda än för den "fria luften", "makrotemperaturen". Framför allt påverkas skillnader mellan marko- och mikrotemperatur av luftkonvektion t ex blåst. Ju större vindhastighet ju mindre skillnad i temperatur mellan luften vid materialytan och den fria luften.

Någon tvekan om huruvida medel- eller maxtemperatursänkningshastigheter skall väljas för en fryscykel vid bestämning av kritiska vattenmättnadsgrader behöver inte uppstå. Frostskador vid $S_{AKT} > S_{KR}$ beror på ett rent brottfenomen av korttidskaraktär. Varje material kan därför frysa sönder

när följande kombination uppträder i materialet

$$\begin{cases} S_{AKT} > S_{KR} \\ \text{Temp} < \text{Frystemp} \end{cases}$$

S_{KR} kan tänkas bli delvis beroende av isbildningshastigheten, vilken i sin tur bör öka med ökande temperatursänkningshastighet hos ytterluften. Frågan gäller alltså vilket S_{KR} man vill bestämma i laboratoriet, "medel-S_{KR}" eller "minimi-S_{KR}". Medel-S_{KR} motsvarar därvid medeltemperatursänkningshastigheten hos ytterluften.

Eftersom ett material helst skall kunna användas åtminstone 30 à 50 år är sannolikheten stor att en extremt stor temperatursänkningshastighet med minustemperaturer inträder åtminstone en gång i samband med att materialet har en hög fuktkvot. Härvid är det alltså minimi-S_{KR} som avgör om materialet är beständigt eller ej vid denna frysning.

Därför eftersträvades maximala i naturen förekommande temperatursänkningshastigheter i laboratorieförsöket.

Eftersom, enligt vad som visas på sid 58 , det är temperaturdifferensen mellan lufttemperatur och yttemperatur på provkroppen som avgör isbildningshastigheten , kommer temperatursänkningshastigheten hos luften att påverka isbildningshastigheten via den temperaturskillnad som finns när isen bildas i provkroppen. Principen för detta visas i fig 58 a. En större temperatursänkningshastighet hos ytterluften ger en större temperaturdifferens vid isbildningen. På samma sätt kommer en större provkropp att ge större temperaturdifferens, d v s större isbildningshastighet, vid konstant temperatursänkningshastighet. Fig 58 b .

När man övergår från normalstora byggnadsdelar, t ex en fasad till en liten provkropp bör man alltså i princip öka temperatursänkningshastigheten hos luften. På samma sätt bör den bromsas upp när en liten provkropp byts mot en stor.

Problemet ligger tydligen i att definiera vilken temperaturdifferens materialyta-luft som kan tänkas uppnås i praktiken när isen bildas. Principiellt sett är det dessutom temperaturdifferensen vid den "farligaste isbildningen" som är avgörande. Mätningar av isbildning och provkroppsdilatationer har nämligen visat att det ofta är den sist bildade isen som ger upphov till de största svällningarna. Fagerlund/1973V/. Den sist bildade isen kan ibland bildas omkring 0°C (tegel) men ibland vid lägre temperaturer (betong).

I brist på exakt information om i praktiken uppträdande temperaturdifferenser löstes problemet med temperatursänkningshastighet på följande sätt.

För normala provkroppsstorlekar och vid vattenmättnadsgrader omkring den kritiska, valdes en temperatursänkningshastighet hos provkroppen av 5 à 6°C/tim från +5°C till ≈0°C (jfr Butterworth /1964C/ovan).

För att uppnå detta måste lufttemperaturen sänkas ≈10 à 11°C/tim. Provkropparna fryser sedan vid 0°C under en tid som beror på mängden frysbart vatten vid 0°C. Under denna frystid bromsas temperatursänkningshastigheten hos frysboxluften ner, så att en medeltemperaturdifferens provkroppsyta-luft är ungefär 7,5 à 8,5°C. När provkropparna lämnade 0°C-området hade därvid normalt 3 à 3,7 tim förflutit från början av cykeln för en provkropp med $S=S_{KR}$. Temperaturdifferensen vid detta viktiga skede av frysprocessen var normalt -10 à -12°C. Det innebär att nedfrysningshastigheten för frysboxluft i medeltal från +5°C till -10°C à -12°C utgjorde 15/3 = 5°C/tim à 17/3,7 = 4,6°C/tim. Dessa värden är något lägre än uppmätta maximedelvärden (se t ex fig 61a), men dock rimliga med tanke på den relativt långa tiden. Tiden från start av cykeln till dess ungefär

hälften av isbildningen vid 0°C skett var ungefär 2 à 2,5 tim.

Medeltemperatursänkningshastigheten hos frysboxluften till denna punkt blir därför 12,5/2 = 6,25°C/tim à 13,5/2,5 = 5,4°C/tim.

När väl isbildningen omkring 0°C skett sänks temperaturen raskt ner till -18°C. Hela nedfrysningen +5°C till -18°C går på 5 à 7 tim, vilket ger en medeltemperatursänkningshastighet av 4,6 à 3,3°C/tim.

Den valda cykeln måste därför anses vara relativt representativ för vad som kan tänkas inträffa under de värsta tänkbara naturliga förhållanden.

Tidigare nämndes, sid 58 , att cykeln teoretiskt sett borde ändras när provkroppsstorleken ändras. En beräkning av lämplig ändring kan lämpligen ske över yt-volymförhållandet hos provkroppen. Några sådana variationer i fryscykeln har vi dock inte gjort. De använda provkroppsstorlekarna har för övrigt gett ungefär samma yt-volymförhållande.

Högsta och lägsta temperatur

Som högsta provkroppstemperatur valdes +5°C. Lufttemperaturen i boxen tilläts däremot blir högre under upptiningsperioden.

När ett frysförsök påbörjades sänktes först luft- och provkroppstemperaturen till +5°C. Denna temperatur bibehölls åtminstone 3 timmar för att porvattnet skulle komma till jämvikt i görligaste mån.
Valet av 5°C motiveras av att man ville undvika alltför kraftiga temperatursvängningar med ofruset vatten i porsystemet. Varje temperaturgradient medför nämligen transporter av vatten. Se även sid 54.

Som lägsta temperatur bör lämpligen väljas den lägsta temperatur som kan uppnås i den situation där materialet används. Enligt definitionen av vattenmättnadsgrad, ekv (3) uppnås nämligen det högsta värdet när den frysbara vattenmängden är maximal. Den icke frysbara vattenmängden minskas med sänkt temperatur. Se fig 59-60.

Effekten av lägsta frystemperatur på S_{KR} blir större ju mera vatten som fryser vid låga temperaturer. För material av typ keramik sker så gott som all isbildning i området 0°C → -5°C varför en lägsta temperatur av -10°C kan vara tillräcklig.

För en betong eller ett cementbruk är inverkan av lägsta frystemperatur avsevärd. Powers & Brownyard /1948/ visade att den icke frysbara vattenmängden kan uttryckas som en multipel av cementgelens yta

$$w_{if} = k \cdot V_m \qquad (103)$$

där k = 4,0 vid -12°C, 3,7 vid -20°C och 3,2 vid -30°C.

För en betong med cementhalt 400 kg/m^3 ett vct = 0,50, en lufthalt av 4 % en hydratationsgrad av 70 % blir enligt ekv (78) den fria vattenmängden när alla porer är fyllda utom luftporerna

$$Q_w = 400\ (0{,}50-0{,}19\cdot 0{,}70) = 147\ 1/m^3.$$

Men gelytan V_m är en funktion av hydratationsgraden α enligt ekv(104)

$$\frac{V_m}{C} = 0{,}065 \cdot \alpha \qquad (104)$$

Där konstanten framför α delvis beror på cementsammansättningen.

Icke frysbara vattenmängder fås därefter genom insättning av ekv(104) i(103)

$$w_{if} = C\cdot k\cdot 0{,}065\cdot \alpha \qquad (105)$$

D v s vid α = 0,70 fås följande frysbara vattenmängder för den nämnda betongen

$-12^{o}C$ w_{if} = 73 l/m^3

$-20^{o}C$ w_{if} = 67 l/m^3

$-30^{o}C$ w_{if} = 58 l/m^3

Vattenmättnadsgraderna enligt ekv (3) blir då

$-12^{o}C$ S_f = 0,649

$-20^{o}C$ S_f = 0,667

$-30^{o}C$ S_f = 0,690

Frysbara vattenmängder enligt ovan är bestämda med upptiningsexperiment på provkroppar frysta till $-78^{o}C$. Man kan som tidigare nämnts förvänta sig andra värden vid nedfrysningsförsök. I Fagerlund/1973A/ redovisas nedfrysningsförsök med samma cementpasta men vid två olika åldrar. Pastan har vct = 0,83 och lufthalt 6 %. Hydratationsgraderna är α=0,80 och α=0,88.

Icke frysbara vattenmängden uttryckt som andel av total porvolym, K, enligt ekv (7), blir enligt experimentet

	α=0,80	α=0,88
$-12^{o}C$	K=0,617	K=0,719
$-18^{o}C$	0,567	0,660
$-24^{o}C$	0,533	0,592
$-27^{o}C$		0,538

Om alla porer utom luftinblandningsporerna är vattenfyllda blir vattenmättnadsgraderna vid de olika temperaturerna

	α=0,80	α=0,88
$-12^{o}C$	S_f=0,793	S_f=0,722
$-18^{o}C$	0,812	0,769
$-24^{o}C$	0,825	0,800
$-27^{o}C$		0,818

Värden för alla tre materialen har ritats ut i fig 59.
Ökningen i S_f från värdet vid $-12^{o}C$ till $-30^{o}C$ är alltså 4,8 % i fallet betong med vct = 0,50; 6,3 % i fallet cementpasta med α=0,80 och så mycket som 15,8 % i fallet cementpasta med α=0,88.

Om kritiska vattenmättnadsgraden vid $-30^{o}C$ är 0,68 för betongen, kommer därför en lägsta frystemperatur av $-12^{o}C$ eller $-20^{o}C$, att innebära att betongen vid en aktuell vattenmättnadsgrad av 0,685 (definierad vid $-30^{o}C$) bedömas vara frostbeständig under förutsättning av att det är den sist bildade isen som ger de allvarligaste skadorna. Det sista antagandet behöver dock inte vara sant även om det finns försök som tyder på att svällning av provkroppar av cementpasta äger rum så länge någon is bildas, Fagerlund/1973A/. Jfr dock fig 192-200 som visar att farligaste expansioner kommer vid -5 à $-15^{o}C$.

Ytterligare synpunkter på lägsta temperaturens inverkan på vattenmättnadsgraden ges i Fagerlund/1972C/. Från denna rapport hämtas fig 60, som visar vattenmättnadsgraden, S_f, som funktion av temperaturen för tre olika betongblandningar vid vardera tre olika lufthalter. Förut-

sättningen för figuren är att enbart"luftporerna"är luftfyllda, att hydratationsgraden är 70 % och att värden på icke frysbara vattenmängder enligt Powers & Brownyard /1948/ gäller. Av figuren framgår att skillnaden i S_f, beräknad vid olika temperaturer, blir större ju större lufthalten är och ju fetare blandningen är. Figuren visar dock klart att S_f bör bestämmas åtminstone vid -20°C.

Vissa författare, t ex Vinberg /1956/ förestår att lägsta frystemperatur bör vara -5°C vid cyklisk frysprovning av betong, ett värde som skulle motsvara i praktiken förekommande fryscykler. Detta är uppenbarligen helt orealistiskt. Den verkliga vattenmättnasgraden blir då inte på långa vägar när representativ för vad som kan inträffa. Dessutom är underkylningarna av porvattnet ofta av denna storleksordning, se fig 61.

Frystemperaturen skall i stället motsvara den lägsta temperatur som kan tänkas i den situation i vilken materialet används. Motiveringen är även här "frysbrottets" korttidskaraktär.

Anderssson /1970/ har sammanställt svenska klimatdata för tiden 1861-1968. Minimitemperaturen varierar naturligtvis med den geografiska belägenheten.

Exempel på minimala månadsmedeltemperaturer är

Lund	-7,6°C	som inträffat 4 gånger på 109 år
Växjö	-11,5°C	som inträffat 2 gånger på 109 år
Göteborg	-9,6°C	som inträffat 1 gång på 108 år
Stockholm	-14,3°C	som inträffat 1 gång på 204 år
Jokkmokk	-25,1°C	som inträffat 1 gång på 107 år

Extremvärdena inom månaden är naturligtvis högre och mera utjämnade mellan olika orter. Enligt Statistisk Årsbok för Sverige /1966/ är minimitemperaturerna i samma orter som ovan under tiden 1931/1960

Lund	-26,3°C
Växjö	-34,0°C
Göteborg	-26,0°C
Stockholm	-28,2°C
Jokkmokk	-46,0°C

En minimitemperatur av -25 à -30°C torde därför vara rimlig framförallt med tanke på att orter med hög vintertemperatur normalt har det fuktigaste klimatet och därför större risk för en farliga kombination av högfuktkvot i materialet och låg frystemperatur.

I våra frysförsök valdes dock frystemperaturen till -18°C. detta är något olyckligt men förklaras av att den använda frysboxens kapacitet visserligen är ungefär -25°C men att det tar mycket lång til att nå denna låga temperatur när mängden material i boxen är stort. Nu gjord undersökning är dessutom bara ett försök att bevisa existensen av kritiska vattenmättnadsgrader. Vid en praktisk frysmetod bör dock en lägre minimitemperatur väljas.

Den slutligt valda cykeln för nedfrysningsdelen hos frysboxens lufttemperatur visas i fig 61.
Cykeln varierar litet av orsaker som diskuteras nedan, punkt 4.5.5. Variationens storleksordning framgår av jämförelse mellan figurer 61a)-d).

Cykeln har sedermera förändrats såtillvida som lufttemperaturen bibehållits

vid -18°C under 1,5 à 3 timmar. Orsaken till detta är att ge möjlighet för alla provkroppar att nå denna låga temperatur. Se t ex fig 61c varav framgår att provkropparna uppnått enbart -15,5°C.

4.5.4 Antal fryscykler

Som nämnts ovan är antalet fryscykler av mycket stor betydelse vid en normal frystest. Det visar sig nämligen ofta att inga skador inträffar förrän ett visst antal cykler genomförts, vilket bl a gett upphov till tanken att frostbeständighetsproblemet skulle vara ett utmattningsproblem (se t ex Plum & al /1966/). Så är emellertid inte fallet. Antalet nollpunktspassager är enligt Plum & Jessing /1965/ i medeltal 15 st i februari månad i Danmark, vilket extrapolerat i 50 år under förutsättning av att februari är representativt för 3 månader på året ger totalt 2250 fryspunktspassager. Düttmann /1964/, som anser att nuvarande frysprovningar inte är nog utmattande, påstår på grundval av klimatstatistik att ett material genomgår ungefär 100 fryspunktspassager per år, vilket ger 5000 på 50 år. Vinberg /1956/ anger värdet 60 cykler per år i Stockholm, vilket ger 3000 cykler på 50 år.

Alla dessa värden är alldeles för små för att ge upphov till några allvarliga utmattningsfenomen, eftersom blott ett fåtal frysningar bör ske med så stora vattenhalter att några nämnvärda påfrestningar uppstår i materialet. Se även punkt 2.4.

Murdock & Kesler /1958/ har t ex visat att utmattningsbrott vid 5000 cykler sker först när maxspänningen vid den cykliska lastcykeln är ≈90 % av korttidsbrottlasten i alla cykler.

Att skador vid ett normalt frysförsök uppstår först efter ett antal cykler förklaras i stället av att det kanske tar just detta antal cykler att fylla upp porsystemet i ytskiktet till en sådan nivå att dess $S>S_{KR}$. Schneider /1962/ m fl (se fig i Fagerlund/1971A/) har visat att vattenhalten ökas med ökande antal cykler. Warris /1964/ har teoretiskt behandlat den successiva uppfyllningen av ytporerna i frysprovkroppar av betong.

Om frysning däremot sker med en förseglad provkropp, så uppstår allvarliga skador redan efter en enda fryscykel om $S>S_{KR}$ i någon punkt av provkroppen. Genom dessa skador, som oftast även yttrar sig i en ökad volym, sjunker den aktuella vattenmättnadsgraden något i provkroppen. Detta medför att skador vid nästa cykel teoretiskt sett blir mindre.

Vattenmättnadsgraden efter svällningen blir

$$S = \frac{W_f}{W_f + \ell + 3 \cdot \varepsilon_p (1-2\nu)} \qquad (106)$$

Vid $W_f = 0{,}30$, $S_o = 0{,}850$ (före 1:a frysning), $\nu = 0{,}1$ och $\varepsilon_p = 1$ °/oo blir $S = 0{,}844$. Effekten är alltså minimal. Däremot kommer naturligtvis ytterligare skador vid den andra frysningen att bli mindre än vid den första, helt enkelt därför att materialstrukturen redan har "öppnats", påfrestningarna vid andra frysningen är inte större än vid den första. Vuorinen /1970/ har dock pekat på att för ett material som betong kan en ökad sprickbildning medföra att mera vatten blir frysbart. Mekanismen i detta diskuteras i Fagerlund/1973C/. I så fall kan naturligtvis även andra frysningen ge lika stora ytterligare skador, men ej den tredje eller fjärde.

Man kan emellertid inte helt utesluta att även frysningar efter den första ger vissa ytterligare skador, t ex sprickutbredningar, men i stället för att få en lika stor nedbrytning för varje cykel, vilket ofta har varit fallet vid normala frysningar med ytavskalning, kommer nedbrytningen att retardera. Se fig 116.

De enda försök där någon märkbar effekt av antal fryscykler på värdet S_{KR} har noterats i våra experiment gäller gasbetonger. Då är att notera att dessa material är de enda,för vilka ytskador påminnande om dem,som man får vid vanliga frysprovningar,noterats. Detta tyder på att materialytorna har ackumulerat fukt vid varje fryscykel. Detta vatten har sedan inte sugits tillbaka (jfr punkt 4.5.3).

Såväl teori som experiment tyder alltså på att den kritiska vattenmättnadsgraden skall betämmas med få fryscykler. Detta har även fastslagits av bl a Powers/1955 / trots att denne egentligen är stark motståndare till idén "kritisk vattenmättnadsgrad".

Konstaterandet att en cykel skulle kunna räcka har f ö lett till konstruerandet av en speciell apparatur och frysmetodik. Se nedan punkt 5.

Vid de första frysförsöken användes ett mycket stort antal cykler, 150 à 200. Då detta visade sig vara onödigt har sedermera antalet cykler reducerats högst betydligt till 10 à 20. Det kan emellertid vara praktiskt att använda något fler än 1 cykel eftersom otvivelaktigt skadorna förvärras för varje cykel och det därmed kan bli lättare att indikera dem. För övrigt har just det förhållandet att skadegraden ökar med ökande antal cykler, ansetts vara ett kriterium på att S_{KR} är överskriden. Se punkt 7.1.

4.5.5 Frysapparatur

Frysapparaturen har byggts vid institutionen. En principuppställning visas i fig 62-64.Den består av två huvuddelar:

- Fryskammare med provkroppsställ
- Temperaturregleringssystem

Fryskammaren är en vanlig frysbox med 400 l volym. Det behövs nämligen inga speciella arrangemang för tillförsel och borttransport av vatten för upptining etc.

På frysboxlocket har monterats två stycken fläktar. För att undvika onödig värmeutveckling inne i frysboxen,är fläktmotorerna av en typ som inte kräver kylning med sitt eget fläkthjul.

På locket har också monterats en kontrollcell för kontroll av temperaturcykeln och en motståndstermometer (känselkropp) för temperaturregleringen.

Kontrollcellen visas i fig 65 . Idén är hämtad från Baur /1960/. "Frostbelastningen" i frysutrymmet är konstant så länge det tar lika lång tid att frysa de 25 grammen vatten i behållaren. Detta gäller oavsett vilken materialtyp som för ögonblicket frystestas och oavsett vilka vattenmättnadsgrader olika provkroppar har. Kontrollcellen ger därför mycket goda möjligheter att indirekt studera frysregleringens noggrannhet.

I fig 66 visas typiska värden på isbildningstidens längd som funktion av temperaturdifferens mellan cell och luft.

Som synes ligger de allra flesta värdena omkring 2 tim. Av orsaker som skall nämnas nedan,har det i sämsta fall tagit ända upp till 2,9 tim att frysa vattnet. Detta är emellertid undantagsfall och beror på att fryscykeln i realiteten varit oreglerad.

Provkroppsstället har visat sig vara en mycket lyckad konstruktion. 4 stycken mopedhjul (utan däck) har monterats på en gemensam axel. Denna bärs upp av två kullagrade bockar. Via en elastisk koppling är axeln direkt förbunden med en synkronmotor typ Berger. Motorn är fäst på ena lagerbocken. För att undvika att alltför mycket värme från provkropparna skulle ledas bort vid fälgarna, har dessa försetts med en självhäftande skumplastlist runt om. Provkropparna monteras lätt på hjulen med gummiband.

För att möjliggöra temperaturmätningar hos provkropparna har motorn gjorts reverserande. Efter varje fullbordat varv slår en pigg som är fastsatt på ena hjulet till en mikroswitch så att motorn ändrar riktning. Hjulen ger plats till ungefär 120 provkroppar med storlek 30 x 30x120 mm.

Genom valet av detta provkroppsställ har två väsentliga problem lösts:

- Fuktgradienter p g a gravitation försvinner helt. Provkropparna kan befinna sig i boxen i månader utan att de behöver röras.
- Eventuella temperaturgradienter i boxen har mindre betydelse eftersom alla provkroppar kommer att befinna sig "överallt".

Dessutom är montering och borttagande av provkroppar mycket bekväm.

Även temperaturregleringssystemet är uppbyggt vid institutionen.

Ett principschema visas i fig 67.
Hjärtat är en tyristorstyrd temperaturregulator av samma typ som användes i den adiabatiska kalorimetern. Regulatorn får information om aktuell temperatur i frysboxen (är-värdet) från känselkroppen, som utgörs av en motståndstermometer.

Den önskade temperaturen i frysboxen (bör-värdet) fås från ett elektro-mekaniskt system. En synkronmotor med en utväxling som ger 1 varv/6 tim driver en kamskiva. Längs kamskivans periferi löper ett litet kullagrat hjul fastsatt i änden på en kuggstång, som trycks mot kamskivan genom en spiralfjäder. Kuggstången är glidlagrad så att den kan röra sig fram och tillbaka längs samma linje.

På axeln av en precisionspotentiometer (10 Ω) har ett kugghjul satts fast. Genom att skjuta kuggstången ändras därför motståndet i potentiometern. Potentiometern ligger i serie med ett fast, stabilt motstånd på 90 Ω.

Eftersom man vet sambandet mellan temperatur och motstånd hos känselkroppen kan man utforma kamskivans geometri på ett sådant sätt att man vid ett visst läge på skivan erhåller önskat bör-värde d v s önskad temperatur i frysboxen. Varje differens mellan är-värde och bör-värde innebär nämligen att temperaturregulatorn ökar resp drar ner den utreglerade spänningen.

Under själva nedfrysningsskedet och delvis under upptiningsskedet går frysboxen med full effekt. Regleringen innebär därför att värme tillförs frysboxen. Av denna orsak har två rörformade värmeelement på vardera 100 Ω monterats nederst på provkroppsstället. Detta för att jämn temperatur skall erhållas i boxen. Elementen är av typ Backer standardrör. De är 2 m långa och har därför böjts till en U-form.

Regleringen är proportionell, vilket innebär att en viss differens mellan är-värde och bör-värde måste finnas för att en reglering skall komma till stånd. Detta diskuteras utförlig på sid 71ff . Se även fig 41 .

När vatten fryser utvecklas värme. Detta innebär följatkligen att om man vid en viss tidpunkt önskar en viss temperatur i frysboxen skall den till värmeslingorna tillförda effekten minskas ju mera vatten som för närvarande är under frysning i boxen.

Maximal vattenmängd i boxen fås när denna är fullbelastad med provkroppar med hög porositet, t ex gasbetong. Vattenmängden som fryser vid 0°C är då ungefär 4 liter. Så stora mängder har dock aldrig använts i våra experiment men däremot upp till 2,7 l vatten i ett fall.

Om man t ex har enbart 10 st provkroppar i boxen kan vattenhalten vara bara ≈0,3 liter.

Fryscykelns utseende kommer därför att bli i viss mån beroende av mängden

material i boxen. Detta kan till största delen kompenseras genom att de båda värmeelementen kan kopplas om till att antingen ligga i serie, vilket ger 200 Ω motstånd eller parallellt (50 Ω) eller det ena kopplas ur helt (100 Ω). En och samma tillförd spänning från regulatorn ger då olika utvecklade effekter. Förhållandet i effekt blir i de tre fallen 1:4:2. Vid "normal" mängd provkroppar väljs alternativet 100 Ω och vid mycket provkroppar alternativet 200 Ω.

Trots att man delvis kan justera fryscykeln vid varierande mängd provkroppar fås vissa variationer i fryscykelns utseende.

Man kan med ledning av temperaturregulatorns karakteristika (utspänning som funktion av temperaturdifferens enligt fig 41) beräkna att vid motståndet 100 Ω på värmeslingan innebär en differens mellan är-värde och bör-värde på 0,1°C, en effektförändring av 9w. Detta motsvarar vid 2 1/2 tim frystid en vattenmängd av 243 g. Förändras alltså vattenmängden med 1 kg vid byte av provkroppar, ett helt rimligt värde, fås alltså en felreglering som innebär ≈0,4°C för hög frysboxtemperatur. Bättre förhållanden hade naturligtvis fåtts med en PID (proportionell, deriverande, integrerande) regulator .

Storleksordningen av de variationer av cykeln som förekommit vid frysförsöken visas i figurer 61 och 66 .

Fig 61c (och även 66) visar ett helt oreglerat försök. Mängden vatten var här stor, varför enbart dess utvecklade värme vid frysningen var tillräcklig för att ge en utreglerad spänning av noll. Frysboxen har litet för liten kylkapacitet för att ta hand om stora mängder material.

Den reglerade spänningen kan avläsas på en voltmeter, dessutom transformeras den ned, likriktas och skrivs på den 24-punktsskrivare som också mäter temperaturerna.

Regleringen är utformad att arbeta i området ≈+5 → -20°C. Genom att en extra potentiometer läggs i serie med den styrda kan man emellertid även erhålla vilken temperatur i frysboxen som helst upp till ≈+25°C. Detta har utnyttjats för att anpassa de frysta provkropparna till rumstemperatur före test av bl a E-modul. Fördelen är härvid att man även under denna tid, som varar åtminstone 4 tim kan undvika fuktgradienter p g a gravitation.

För att undvika haveri om en potentiometer skulle gå sönder (frysboxtemperaturen skulle då stiga mycket högt) har en termostat som bryter all strömtillförsel vid +30°C lagts in i frysboxen.

I regulatorn ingår en del ytterligare komponenter, se fig 67.
Under kamskivan sitter en cirkulär skiva som styr två st mikrobrytare. Den ena brytaren stannar frysboxen när upptiningen skall börja och startar den på nytt när nedfrysningen skall starta. Brytaren styrs av en kam på extraskivans undersida.

Den andra brytaren stoppar den motor som driver kamskivan och kopplar in ett tidur. Efter en förinställd tid startar klockan motorn på nytt och en ny cykel startas. Skivan stoppas framförallt under själva upptiningen när temperaturen nått +5°C. Tiden väljs så lång att alla provkroppar skall hinna tinas upp. Dessutom kan man stoppa skivan vid lägsta temperaturen för att ge tillfälle för alla provkroppar att "frysa färdigt".

Antalet cykler räknas genom ett vanligt räkneverk vars arm får en puff av kuggstången vid varje fullbordad cykel.

Hela regleringssystemet är inbyggt i en liten låda.

Samma principer för reglering kan användas även för andra ändamål. Dess styrka är att man kan åstadkomma stabila temperaturer inom ett mycket stort temperaturområde, man kan få kontinuerlig reglering av en viss förutbestämd cykel, cykelns utseende ändras mycket lätt genom att en ny kurva

skärs ut på kamskivan, man kan stanna upp cykeln vid godtycklig temperatur under önskad tid, antalet cykler räknas automatiskt, kostnaden är låg (bortsett från arbetskostnad).

4.6 Mätning av skador

4.6.1 Principiellt

Skador förorsakade av frysning kan mätas på flera sätt, t ex:

1) okulär besiktning
2) E-modul; statisk eller dynamisk
3) hållfasthet; böj, tryck, drag
4) viktförändring; torrvikt eller våt vikt
5) dimensionsändring; volym, längd, tjocklek, densitet
6) inre friktion eller dämpning

Vid normala frysprovningar där provkroppen någon gång under varje cykel befinner sig i vatten uppstår ofta ytskador som då yttrar sig okulärt och i en förändrad torrvikt (normalt även i förändrad våt vikt).

Vid frysning med förseglade provkroppar uppstår bara i undantagsfall ytskador. I de fall dessa uppstår, har troligen icke önskade fuktgradienter förelegat, jfr punkt 4.5.3.
Trots detta kan emellertid ofta okulär besiktning vara av stort värde eftersom skador inte sällan består i att provkroppar brutits sönder i större eller mindre delar, se fig 109.

Normalt erfordras emellertid även mätningar och de som då kommit ifråga är dynamisk E-modul, dimensionsförändring och inre friktion.

Genom mätning av E-modul mäts också indirekt även hållfastheten. Se nedan.

4.6.2 Dynamisk E-modul och inre friktion

Flera författare bl a Warris /1964/ har visat att av alla indirekta metoder att mäta skador p g a frysning är mätning av dynamisk E-modul med transversell böjsvängning överlägset bäst. Ljudhastighetsmätningar eller mätning av dynamisk E-modul med longitudinell svängning indikerar inte skador på samma goda sätt.

Om ett materialprisma sätts i transversell svängning med successivt ökande frekvens uppnås så småningom egenfrekvensen. Denna är enbart beroende av tvärsnittskonstanter, provkroppsvikt och E-modul enligt ekv (107). Vinkeloe /1962/.

$$f_e = C\sqrt{\frac{E \cdot I}{m \cdot L^4}} \cdot \frac{1}{T} \qquad (107)$$

Där konstanten C har ett värde som beror på sättet för svängning. Vid grundtonen är C=3,56 och vid 1:a övertonen 9,82. T är en korrektionsfaktor som tas hänsyn till provkroppens "knubbighet". Dess värde är beroende av Poisson's tal. Värden på T tabelleras av Pickett /1945/.
För de i denna undersökning använda provkropparna får T följande värden vid Poisson's tal = 0,17;

Provkroppsstorlek	30 x 30 x 120	T = 1,38
" "	40 x 40 x 120	T = 1,68
Asbestcement	8 x 30 x 100	T = 1,00

Att den transversella svängningen ger så stort utslag beror naturligtvis på att alla sprickor i provkroppen oavsett deras riktning och läge (bortsett från sprickor parallellt med och liggande i neutrallagret) medför en reduktion i provkroppens styvhet uttryckt i EI.

Warris /1964/ har teoretiskt och experimentellt visat att alla skador, såväl ytavskalningar som expansion (inre förstörelse) yttrar sig i en minskning av den transversella dynamiska E-modulen. Därför ger denna ensam all information som erfordras.

Warris ekvation för detta kan för ett material med en enda fas som dessutom är frostkänslig skrivas

$$\frac{\Delta E}{E_o} = \frac{1}{K_1}(\varepsilon_p - K_2) + K_3 \frac{\Delta Q}{Q_o} \qquad (108)$$

Där första termen på höger sida uttrycker provkroppsexpansion medan den andra termen uttrycker förlust i vikt (ytavskalning). Warris /1964/ ger konstantvärden för betong.

Som tidigare nämnts innebär frysningar med konstant vattenhalt normalt att vikten är oförändrad och att ytavskalningar inte förekommer. Därför är det onödigt att utvärdera E-modulerna ,utan förhållande i E-modul efter och före frysning uttrycks med förhållandet i egenfrekvensernas kvadrat

$$\frac{E_n}{E_o} = \left(\frac{(f_e)_n}{(f_e)_o}\right)^2 \qquad (109)$$

I de fall ytavskalningar har skett undervärderas därmed E-modulförändringen. Hänsyn kan dock tas till viktförlusten genom att använda ekv (110)

$$\frac{E_n}{E_o} = \left(\frac{(f_e)_n}{(f_e)_o}\right)^2 \cdot \frac{Q_o}{Q_n} \qquad (110)$$

Denna ekvation kan lätt härledas genom att man antar att ytavskalningen sker jämnt ,runt om provkroppens periferi. Därvid minskas tröghetsmomentet och således även f_e (enligt ekv (107). Se Warris /1964/.

Normalt har det varit enkelt att indikera egenfrekvensen vid grundtonen eftersom provkropparna haft en mycket lämplig form härför.

För skivformiga material av typ asbestcement har det varit besvärligt att få fram grundtonen med någon skärpa. Däremot har 1:a övertonen varit mycket klar. Där denna använts har också E-modulförändringar enligt ekv (109)blivit stora vid höga vattenhalter. I vissa fall användes emellertid grundtonen även för denna typ av material. E-modulförändringen enligt ekv (109) blev då mycket obetydlig även när provkropparna var starkt delaminerade och svällda.

Detta fenomen kan möjligen tolkas på följande sätt:

Före frysning bestäms grundtonen. Efter frysning är provkroppen delaminerad. Provkroppens E-modul är då starkt sänkt. De enskilda lamellernas E-modul är emellertid oförändrad eftersom deras tjocklek är mindre än den kritiska tjockleken. Möjligen fungerar varje tunn lamell som en enskild balk som svänger med någon överton.. Slutresultatet skulle kunna bli att den mätta egenfrekvensen är relativt oförändrad.

Om antalet lameller är N fås följande villkor på konstanten C i ekv (107) efter delaminering om den mätta "egenfrekvensen" skall vara oförändrad. E hos lamellen antas vara oförändrad. Dess vibration antas vara helt opåverkad av andra lameller, vilket naturligtvis är en stark förenkling.

$$1 = \frac{C}{3,56}\sqrt{\frac{b\cdot h^3\cdot E}{12\cdot N^3\cdot\frac{m}{N}\cdot L^4\cdot T}\quad\frac{12\cdot m\cdot L^4\cdot T}{b\cdot h^3\cdot E}} = \frac{C}{3,56}\cdot\frac{1}{N} \qquad (111)$$

C blir då vid olika antal lameller

N = 2 C = 7,1
N = 3 C = 10,7
N = 4 C = 14,3
N = 5 C = 17,8
N = 9 C = 32,0

Det rimliga antalet lameller 3 (tjocklek ≈1,7 à 2,7 mm) ger då ungefär första övertonen medan andra övertonen erhålls vid antal lameller 5 (tjocklek 1 à 1,6 mm) och tredje övertonen gerantal lameller 9 (tjocklek 0,5 à 0,9 mm).

E-modulen är naturligtvis en s k vikarierande egenskap. Väsentligare är förlust i hållfasthet. Det råder emellertid samband mellan hållfasthet och E-modul. Något olika samband gäller för olika typer av hållfasthet.

För böjdraghållfasthet gäller följande approximativa samband

$$\sigma_{BD} = k_1\cdot E^{k_2} \qquad (112)$$

Där k_1 är av storleksordningen 2 och konstanten k_1 beror på materialets porositet. Pauw /1960/.
Det innebär att även en liten förändring i egenfrekvens indikerar en stor förändring i böjdraghållfasthet.

$$\frac{(\sigma_{BD})_n}{(\sigma_{BD})_o} = \left(\frac{(fe)_n}{(fe)_o}\right)^4 \qquad (113)$$

För tryckhållfasthet gäller ungefär samma uttryck som(112) även om exponenten kan vara något annorlunda. Ekv(113) borde därför approximativt gälla även för tryckhållfasthet. Warris /1964/ refererar dock resultat enligt vilka 10 % E-modulförlust medför 20 % förlust i böjdraghållfasthet, vilket motsvarar ekv(113) men enbart 5 % i tryckhållfasthet. Materialet ifråga var emellertid betong. Den frostkänsliga fasen är här pastan. Man kan därför anta att en viss förlust i pastahållfasthet ger ett direkt utslag i betongens böjdraghållfasthet eftersom pastan och vidhäftningen pasta-ballast måste ta upp dragspänningarna direkt. Vid tryckbelastning däremot utnyttjas dragspänningarna indirekt. Viss last överförs även direkt genom ballasten. Se även Fagerlund/1972B/.

Den inre friktionen eller dämpningen i materialet är beroende av dess kohesion och inre struktur. Skadas materialet p g a frysning, bör därför den inre friktionen öka, Alviset /1957/.
Den inre friktionen kan definieras enligt ekv(114),Anonym /1963/.

$$Q^{-1} = \operatorname{tg}\theta \qquad (114)$$

där θ = fasvinkeln mellan spänning och töjning vid dynamisk svängning.

Den kan också bestämmas mycket lätt i samband med bestämning av egenfrekvens vid transversell svängning. Se fig 68.

$$Q^{-1} = \frac{f_2 - f_1}{fe} \qquad (115)$$

där f_2 och f_1 är provkroppens frekvenser, där dess amplitud är $1/\sqrt{2}$ x dess amplitud vid egenfrekvensen. Ju smalare frekvenstoppen är desto mindre är alltså den inre friktionen eller dämpningen.

En andra praktisk metod att bestämma Q^{-1} är via det s k logaritmiska dekrementet hos fritt svängande provkropp:

$$Q^{-1} = \frac{2,3}{N \cdot \pi} \cdot \log \frac{Ao}{An} \qquad (116)$$

där Ao är amplituden vid svängning nr 1, An amplituden vid svängning nr N. I detta fall mäts alltså hur fort en fritt svängande provkropp dämpar ut sin egen svängning.

I våra undersökningar användes metod nr 1 (ekv(115)).

Som tidigare nämnts kan man inte utesluta en viss hydratation hos material som under lång tid har vatten i sitt porsystem. Därvid stiger såväl hållfasthet som E-modul. De första materialen testades ända upp till 170 cykler d v s i mer än två månader. För att utreda hydratationens storlek lagrades därför förseglade provkroppar upp till 137 dygn vid rumstemperatur. Vattenmättnadsgraderna i provkropparna var 0,60, 0,80 och 1,00. Dynamisk E-modul och inre friktion testades regelbundet. Resultat av E-modulökningen visas i figurerna 69 a-k.

Uppenbarligen är hydratiseringen påtagligt stor. För ett material som internit har E-modulen stigit 24 % efter en månad. Även material som tegel hydratiseras. Detta har även påpekats av Sandford/1970 / och Ahlgren /1972/.

Det verkar som om E-modulökningen växer proportionellt mot logaritmen för tiden. Redan efter en relativt kort tids vattenlagring, t ex 5 dygn, vilket motsvarar en tid av ungefär 12 cykler, kan den vara 5 à 10 % för en asbestcement eller gasbetong. Den bör dock bli lägre vid motsvarande tids fryscykler eftersom dels en viss tid upptas av frystemperaturer dels den låga temperaturen minskar hydratiseringshastigheten.

Fuktnivåns betydelse för hydratiseringens storlek är dock oklar. Det är emellertid tydligt att även så låga vattenmättnadsgrader som 0,60 är tillräckliga för att ge hydratisering. Vid fullständig vattenmättnad, som åstadkommits med vattenlagring, kan man tänka sig att hydratiseringen överlagras av en urlakning så att hydratiseringseffekten motverkas.

Vissa förförsök tydde på ett fukthaltsberoende hos såväl egenfrekvens som inre friktion. Eftersom frysningarna kunde tänkas medföra vissa små vattenförluster skulle därvid de mätta värdena kunna feltolkas.

För att utreda storleksordningen på fukthaltsberoendet gjordes försök med 10 olika material.

Provkropparna torkades, fuktades upp till olika nivåer, lagrades förseglade under ett dygn, testades med avseende på dynamiska egenskaper. Sedan fullständig vattenmättnad nåtts, gjordes på samma sätt en uttorkning.

Resultat av egenfrekvensmätningar visas i figurer 70 a-k . Egenfrekvensen bör sjunka med ökad fukthalt eftersom tyngden ökar. Ur ekv (107) kan lätt härledas följande uttryck

$$\left(\frac{fe}{(f_e)_{torr}}\right)^2 = \frac{1}{1+S_e \cdot \frac{P \cdot 1000}{\gamma}} \qquad (117)$$

Denna kurva har ritats ut i figurerna. Som synes ger den ofta så gott som exakt överensstämmelse med mätta värden, t ex för gasbetong. Detta

är mycket intressant eftersom det innebär att man kan göra en direkt korrektion av uppmätt egenfrekvens vid en eventuell vattenförlust genom att använda ekv(117).

Undantag finns dock. Detta gäller asbestcement där man troligen haft en hydratisering som starkt påverkat värdena, se fig 70 a där tiden mellan S_e=0,9 och 1,0 utgör inte mindre än 40 dygn. Denna hydratisering förklarar även hysteresisen uppfuktning -uttorkning som finns just hos dessa produkter men i mycket liten utsträckning för andra material. Ett annat undantag från ekv(117) utgörs av tegel. Vid höga vattenmättnadsgrader sker en påtaglig uppgång av E-modulen. "Svansen" vid höga fukttillstånd har därför studerats speciellt för de båda teglen, se figurer 71 och 72. Ingen förklaring kan för närvarande ges till detta fenomen.

En vattenförlust motsvarande S_e = 0,02 kan maximalt tänkas inträffa under ett frysförsök vid normal teknik och normalstora provkroppar. Detta skulle enligt ekv(117) innebära en skenbar ökning i dynamisk E-modul av enbart =2 % för ett material av typ gasbetong (densitet 500 kg/m^3) vid S_e = 0,50, d v s ungefär vid S_{KR}. För andra material är förändringen ännu mindre.

Ur fig 71 framgår att en motsvarande vattenförlust för ett lösbränt tegel vid S_e = 0,90 ger en skenbar förlust i E-modul av enbart 1 %.

Någon korrektion i E-modul för vattenförluster under frysningarna behöver därför inte göras.

När det gäller inre friktion är däremot förhållandena annorlunda. Inre friktionen som funktion av vattenhalten visas i figurer 71, 72 och 73 a-d . Metodiken i bestämningarna är densamma som för E-modulen.

Som synes finns markanta mycket branta toppar i inre friktion vid vissa vattenhalter. Olyckligt nog ligger dessa toppar för vissa material t ex gasbetong och lösbränt tegel i samma område som de kritiska vattenmättnadsgraderna. En liten förändring i vattenhalt kan därför ge en mycket stor förändring i inre friktion, en förändring som inte motsvaras av någon inre förstörelse p g a frysning.

Detta gör att den inre friktionen troligen inte kan användas för indikering av frysskador för vissa material.

Av fig 71 framgår t ex att en provkropp med S_e = 0,86 har en inre friktion av 0,030. Under frysning torkar provkroppen till S_e = 0,84 varvid inre friktionen enbart som en följd härav minskar till 0,025 d v s med 17 %. Detta värde kan tänkas vara av samma storleksordning som en ökning av inre friktionen p g a frysskador varför nettoeffekten blir noll.

Resultat av inre friktionsmätningar före och efter frysning visar ofta en mycket stor oregelbundenhet, t ex för gasbetong, vilket eventuellt kan förklaras på ovanstående sätt.

Apparaturen för dynamisk mätning har byggts upp vid institutionen. Se fig 74 och 75.

Provkroppen sätts i transversell vibration genom direkt mekanisk kontakt med en vibrator typ PYE-LING V47. Denna erhåller sin frekvens från en lågfrekvensgenerator (10hz-100kHz, 5w) typ Advance Electronics försedd med möjlighet till fininställning av frekvensen. Frekvensen mäts med en digital frekvensräknare av typ Advance Electronics (område 10hz-1MHz. Känslighet<100mV). Provkroppsamplituden har fångats upp i dess "gavel" med en enkel grammofonpicup av kristalltyp. Pic-upen är fastsatt i ett magnetstativ. För indikering av amplituden har använts ett oscilloscope typ Solartron med känslighet 1mV/cm. För kontroll av att provkropp och vibrator svänger med samma frekvens kan tongeneratorns frekvens tas in på oscilloscopets X-plattor varvid en cirkel, ellips eller linje uppstår på bildskärmen vid samma frekvens på X- och Y-plattorna.

De små provkropparna har medfört vissa problem. En asbestcementbit väger t ex inte mer än ≈40 gram. Överföringen av vibrationer till provbiten liksom uppfångning av vibrationer har måst ske via direktkontakt med provkroppen. Alternativet hade t ex varit magnetisk överföring men detta hade medfört att små bleck hade måst limmas till provkroppen. Detta är dels ett komplicerat förfarande, dels kan blecken frysa loss.

Genom direktkontakten påläggs tvångskrafter på provkroppen. Dessa har dock kunnat elimineras på ett elegant sätt.

Normalt placeras provkroppen på två upplag vid noderna eller understödd av en skumgummikudde längs hela sin längd. Bägge dessa metoder gör det dock svårt att indikera jämförbara egenfrekvenser eftersom den pålagda tvångskraften är svår att reproducera. Problemet löstes på så sätt att de båda upplagen utformades som knivseggar. På dessa eggar placerades kuddar av mjukt skumgummi. Eggarna är förskjutbara i sidled så att en varierande provkroppslängd kan kompenseras. De är monterade på ett stativ som är höj- och sänkbart. Provkroppens överyta bringas i kontakt med vibratorns "pigg" genom att stativet höjs. Även en starkt varierande inställning av provkroppen påverkar inte tvångskraften från piggen nämnvärt eftersom denna bestäms av kraften från upplagen. Denna kraft blir mycket liten och framförallt ganska oberoende av skumgummits deformation eftersom knivseggen har "försumbar" yta.

4.6.3 Längd- och tjockleksändring

Trots att Warris /1964/ har visat att en dynamisk E-modulmätning även tar hänsyn till inre förstörelse som den yttrar sig i provkroppssvällning (ekv(108)) har längdmätningar utförts för vissa provkroppar.

Vid de senare utförda mera rutinmässiga frystesterna har dock enbart de dynamiska egenskaperna mätts. I normalfallet är detta alldeles tillräckligt.

Längdändringar har mätts med en mätklocka med 1/100 mm skalindelning. Mätklockan var fastsatt i ett kraftigt mätstativ. Mätdubbarna bestod av mässigsnitar med halvsfärisk skalle. Nitarnas skaft nöps av så att 2 à 3 mm återstod. Små urgröpningar gjordes i provkroppsändarna och nitarna limmades fast med araldit. Araldit sväller vid vattenlagring, vilket gjorde att provkroppen sprack när dubbarna borrades in för djupt.

Förslitningar hos de koniska mothållen av härdat stål på klockan och på stativet liksom temperaturskillnader hölls under kontroll genom regelbundna kontrollmätningar med en invarstav.

Skalindelningen 1/100 mm innebär att avläsningen kan ske på ≈2/1000 när. Detta innebär en relativ längdändring hos provkropparna av 0,02 °/oo vid en provkroppslängd av 100 mm. Brottöjningen för materialen är av storleksordningen 0,1 à 0,5 °/oo, varför upplösningen i längdmätningen är väl liten. Detta visar sig också t ex för gasbetongerna där troliga förskjutningar av dubbarna döljer inverkan av frysning.

Tidigare nämndes att det var svårt att indikera frostskador hos asbestcement med E-modul. Dessa produkter skadas företrädesvis genom delaminering d v s tjockleksökning. För att mäta tjockleken har en speciell apparat byggts. Fig 76. Idén är hämtad från Lundgren /1967/ som använt en liknande apparat för att mäta fuktrörelser hos träfiberskivor.

Svårigheten ligger i att få ett representativt mått. Man kan då mäta i ett stort antal punkter på provkroppsytan, men detta är arbetskrävande och komplicerat. I stället integreras tjockleksökningen över hela ytan genom att provkroppen placeras på en styv skumgummiskiva. Över provkroppen placeras en annan skumgummiskiva som belastas med en tyngd. Tjockleken mäts med en mätklocka. Som re-

ferensvärde används en plåtskiva med samma format som provkropparna.

Apparaten är utformad på ett sätt som gör den mycket enkel och smidig att använda. Provkroppen placeras på en utdragbar skumgummiklädd skiva som löper i en slits i en undre stålplatta. Skivan skjuts in i plattan varefter denna höjs upp med en hävarm så högt att den övre tyngden lyfts. Lyfthöjden begränsas av klackar på de tre spindlar som styr såväl den undre plattan som den övre tyngden. I normalläge vilar tyngden på samma klack. Mätklockan har skalindelningen 1/100 mm. Detta är fullt tillräckligt eftersom de uppstående svällningarna är påfallande stora. Ofta noteras svällningar på 0,1 à 0,2 mm, vilket ger relativa töjningar av 10 à 25 $^{o}/_{oo}$.

En apparatur av denna typ är absolut erforderlig om frysskador på asbestcementprodukter skall kunna indikeras ordentligt.

Samtidigt som fukthaltens inverkan på E-modul och inre friktion mättes, studerades även fuktrörelserna. Resultat visas i fig 77 a-k.

Hysteresisen uppfuktning-uttorkning av gasbetongerna är påfallande stora vilket tyder på att dessa provkroppar kanske inte varit riktigt i jämvikt. En viss hysteresis bör dock uppstå eftersom en sådan finns i jämviktsfuktkurvorna. Samband mellan fukthalt, porvattentryck och fuktrörelser diskuteras utförligt i Fagerlund/1972B/.

Asbestcementprodukternas fuktrörelser är påfallande stora i området $0,80 \leq S_e \leq 1,0$. I detta område ligger också S_{kr}. En uttorkning av en provkropp från $S_e = 0,90$ till 0,88 innebär enligt fig 77 a-c en krympning av $\approx 5\mu$, vilket dock är ett mycket litet värde jämfört med svällningar p g a frysskador.

4.6.4 Viktminskning

Gasbetongerna var som tidigare nämnts de enda material som ytskadades. De fick därför vissa minskningar i torrvikten.

Dessa bestämdes på så sätt att provkropparna efter frysningen borstades rena från alla lösa delar, varefter de torkades vid +105°C till jämvikt.

Vid bedömning av torrviktsminskningarna måste i princip hänsyn tas till eventuella torrviktsökningar p g a hydratisering. En uppfattning om hydratiseringens storlek fås genom studier av torrviktsförändringen hos icke avflagade provkroppar.

4.6.5 Densitetsökning

Även för material för vilka tjockleks- eller längdändringar inte mättes, kan man få en viss uppfattning om volymförändringar genom att jämföra densiteten före och efter frysning.

Sambandet mellan densitetsförändring och längdändring under förutsättning av att all volymökning sker likformigt i alla riktningar blir

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta\gamma}{\gamma_o} \cdot \frac{1}{3(1-2\nu)} \qquad (118)$$

Ett $\Delta\gamma = 5$ kg/m^3 kan lätt indikeras. Detta ger vid $\nu = 0,15$ och γ_o = 1800 kg/m^3 ett $\varepsilon = 1,3$ $^{o}/_{oo}$. Vid $\nu = 0,15$ och $\gamma_o = 500$ kg/m^3 blir motsvarande $\varepsilon = 4,8$ $^{o}/_{oo}$.

Dessa värden är emellertid betydligt över brottöjningarna för materialet, varför enbart mycket stora förstörelser kan studeras genom mätning av densiteter.

4.6.6 Förändring av vattenabsorptionsförmåga

En sönderfrysning bör påverka porsystemets utseende. Detta har visats experimentellt av Ohnemüller /1960/. Denne fann att porstorleksfördelningen påverkades av frysning.

Mellan porstorleksfördelning och vattenabsorptionsförmåga föreligger grundläggande samband, se t ex Fagerlund/1973C/. Genom att studera hur vattenabsorptionen påverkas av frysningarna, bör man därför kunna få en indikation på om något väsentligt hänt inne i materialet.

5 METODIK FÖR EMPIRISK BESTÄMNING AV KRITISKA VATTENMÄTTNADSGRADER MED ENCYKELFRYSNINGAR

5.1 Inledning

I föregående kapitel har upprepade gånger påpekats att vattenmättnadsgraden måste hållas konstant i provkroppen vid bestämning av den kritiska vattenmättnadsgraden.

Flera gånger har också påpekats att svårigheter föreligger att uppfylla detta krav. Så t ex hydratiserar provkroppar, vilket sänker värdet på den förångningsbara vattenmängden men framförallt höjer värdet på den icke frysbara vattenmängden. Bägge effekterna bidrar till att minska den effektiva vattenmättnadsgraden S_f. Man kan också få vissa små vattenförluster p g a avdunstning vid lång tids frystestning.

Allt tyder alltså på att man bör i möjligaste mån begränsa antalet frys-cykler. Detta har också gjorts i flercykelfrysningarna enligt kap 4 ovan. De sist utförda frysserierna gjordes med relativt få cykler.

Experimentella resultat har också visat att värdet på S_{KR} påverkas mycket litet av antalet cykler, se t ex fig 105.

Det allra mest drastiska vore att använda sig av enbart en enda frys-cykel för att bestämma S_{KR}. Encykelfrysningar har t ex föreslagits av Powers /1955/ för betong. Andra forskare som använt encykelfrysningar är t ex Thomas /1938/ för natursten, Lehmann & Rauschenfels /1969/ för tegel och kalksandsten, Valore /1950/, Warris /1964/, McInnis & Beaudoin /1968/, Vuorinen /1969/ för betong och cementbruk, Powers & Helmuth /1953/ liksom Helmuth /1960/ för cementpasta.

Samtliga dessa författare har mätt dilatationer hos provkropparna under en frysning. Med undantag av McInnis & Beaudoin /1968/ och Thomas /1938/ har ingen av författarna medvetet undersökt vattenmättnadsgradens inflytande på dilatationen utan man har lagrat sin provkropp på ett visst sätt varefter den frysts. Ibland har därvid stora expansioner uppmätts och ibland krympning, se t ex Powers & Helmuth /1953/.

Resultat av samtliga ovan nämnda författare visar att avsevärda dilatationer och därav följande skador kan uppstå vid den enda frysningen.

Försöken utförda av Thomas /1938/ och McInnis & Beaudoin /1968/ antyder dessutom existensen av kritiska vattenmättnadsgrader.

Eftersom en frysmetod för bestämning av kritiska vattenmättnadsgrader skulle accelereras avsevärt om endast en frysning erfordrades har därför utförts encykelfrysningar vid olika vattenhalter för 7 st av de material som tidigare testats med flercykelfrysningar enligt kap 4 ovan.

Frysningarna har utförts i en kalorimeter-extensometer som gett möjlighet till en samtidig bestämning av såväl längdändringar som isbildning. Försöken har därför även kunnat användas för studium av frysmekanismer i olika material.

Den senare aspekten på dessa undersökningar diskuteras närmare i Fagerlund /1972 C, 1973 A/.

5.2 Provkroppar

De undersökta materialen är

lösbränt tegel	(material nr 1)
hårdbränt "	(" " 2)
4 st olika gasbetonger	(" " 8-11)
kalksandsten	(" " 7)

Dessa material hade tidigare testats med flercykelfrysningar. Därför valdes nu samma provkroppsstorlek nämligen 30 x 30 x 120 mm^3.

Provkropparna försågs med tre st tunna termoelement (ϕ 0,1 mm) nedborrade till centrum. Se fig 78.

Provkropparna försågs med mässingsdubbar i ändarna. Dubbarna var av samma typ som omtalades under punkt 4.6.3.

5.3 Frysmetodik

5.3.1 Principiellt

Den använda metodiken är principiellt lik den som användes vid flercykelfrysningarna. Enda skillnaden är att en enda provkropp med successivt ökande vattanhalt används i stället för ett större antal med vardera sin vattenhalt.

Provkroppen anpassas till önskad vattenhalt genom torkning från ett våtare tillstånd.

Efter ett dygn bestäms dess egenfrekvens vid transversell svängning och dess inre friktion. Den packas in i en tunn plastfolie och monteras i frysapparaten, som beskrivs nedan i punkt 5.3.3.

Efter frysning och upptining bestäms egenfrekvens och inre friktion på nytt.

Proceduren upprepas med ökad vattenhalt tills dess skadorna är så stora att S_{KR} med säkerhet överskridits.

Skadorna mäts på två sätt, dels genom kontinuerlig mätning av dilatationer under frysning, dels genom mätning av E-modulförändring.

Man kan tänka sig en praktisk frystestningsmetod enligt samma princip. Se fig 79 . I detta fall skulle man använda en serie provkroppar, var och en med sin vattenhalt. Provkropparna skulle monteras i mätramar försedda med automatisk längdmätningsutrustning. Längdändringar under en frysning skulle indikeras på en skrivare. Efter en enda frysning skulle S_{KR} kunna ringas in.

Precisionen i längdmätning behöver inte vara större än ≈±5μ eftersom brottöjningar på en 10 cm lång provkropp är av storleksordningen 50μ.

5.3.2 Fryscykel

Fryscykeln blir enbart beroende av provkroppens värmekapacitet och frysbara vattenmängd. Detta framgår av det sätt på vilket frysningarna genomförs. Se nedan .

Isbildningshastigheterna blir genomgående något högre vid encykelfrysningarna än vid flercykelfrysningarna.

I fig 80 visas en nedfrysning av lösbränt tegel med S_e = 0,90. Tiden vid 0°C är här 1,9 tim medan den enligt fig 61b är 2,1 tim vid flercykelfrysningen. Förhållandet i isbildningshastighet är alltså ≈1,13 efter korrektion för något olika vattenhalt. -18°C nås ungefär vid samma tid i bägge frysmetoderna.

Lägsta temperatur vid encykelfrysningen är -28 à -29°C, vilket enligt punkt 4.5.4 är mera realistiskt än de -18°C som använts vid flercykelfrysningarna.

5.3.3 Frysapparatur

Apparaturen visas schematiskt i fig 81-82 Den kommer att beskrivas ännu utförligare i Fagerlund/1972C/. Här anges enbart principerna.

Provkroppshållaren består av en ram av invar. Provkroppen stöder med sina dubbar mot två upplag. Det ena är fastsatt i ramen, det andra är fritt rörligt i förhållande till ramen. Det fria upplaget är däremot fastsatt i ett tunt stålbleck, som i sin tur är fast inspänt i invarramen. Bägge upplagen kan justeras genom skruvning så att olikheter i provkroppslängd kompenseras.

Omedelbart vid infästningspunkterna i invarramen är stålblecket på båda sidor försett med påklistrade, fuktskyddade trådtöjningsgivare med

resistansen 1000 Ω. De 4 givarna är temperaturkompenserat kopplade till en fullbrygga. Den höga resistansen förklaras av att temperaturutvecklingen från givarna vill begränsas.

Givarna är kopplade till en mätbrygga typ Peekel.
Det rörliga upplaget justeras så att provkroppen belastas med en viss kraft från det fjädrande blecket. Förspänningskraften avläses på mätbryggan.

Känsligheten i mätsystemet är 4,7 μS utslag på mätbryggan vid 1μ rörelse hos provkroppen. Detta är fullt tillräckligt för goda mätningar.

Känsligheten har kalibrerats fram med hjälp av tre provstavar med känd längdutvidgningskoefficient, pyrexglas, koppar och ren aluminium. Tre stavar har använts eftersom trots att mätramen är av invar och givarna är kopplade temperaturkompenserat vissa tvångskrafter uppkommer i givarna, vilket ger upphov till en skenbar rörelse hos själva mätsystemet när temperaturen varieras.

Den skenbara rörelsen fås ur försök med två kalibreringsstavar. Den tredje staven tjänar som kontroll.

Provkroppens verkliga rörelse vid ett försök fås nu ur ekv (119);

$$\frac{\Delta \ell}{\Delta \theta}\ (\mu/^{o}C) = \frac{\text{mätt utslag } (\mu S/^{o}C) - \text{skenbar rörelse } (\mu S/^{o}C)}{\text{Känsligheten } (\mu S/\mu)} \qquad (119)$$

Den skenbara rörelsen är -1,38(μS/°C), vilket kan jämföras med en normal provkropps termiska rörelse av $10 \cdot 10^{-6}(1/^{o}C)$, vilket ger en rörelse av 1,2·4,7 = 5,64(μS/°C) vid en provkroppslängd av 120 mm.

Utslaget från mätbryggan tas ut på en 12-punkts skrivare. Det tas dessutom ut på y-axeln av en x-y-skrivare.

Temperaturerna från de två yttre termoelementen går också in på 12-punktsskrivaren.

Mittelementets spänning förstärks upp av en termoelementförstärkare typ Ohlin och tas in på x-axeln av x-y-skrivaren.

Invarramen är monterad på ytterperiferien av en låda av vävbakelit. Utrymmet mellan provkropp och burkens inneryta är ≈1 mm. Lådan är placerad centriskt i en större behållare av mässing. Utrymmet mellan innerlådan och ytterbehållaren är fyllt med en värmeisolering av polyuretanskum. Isoleringen är tunn, ≈20 mm, vinkelrätt mot provkroppens längdriktning och tjock i de andra riktningarna. Därmed leds värmetransporten från provkroppen huvudsakligen vinkelrätt mot provkroppens ländriktning.

Bakelitlådans innerytor är helt täckta med en motståndsslinga av tunn koppartråd (≈ 0.1 mm). Totalresistansen är 120 Ω. På samma sätt är mässingsbehållarens inneryta på en längd av 120 mm(motsvarande provkroppens längd) täckt med en likadan motståndsslinga. Dessa båda slingor mäter temperaturen hos respektive ytor. Temperaturdifferensen mäts av en motståndsbrygga typ Bofors BKI-1 och skrivs på 12-punktsskrivaren.

Varje temperaturdifferens mellan ytter- och inneryta resulterar i ett utslag på skrivaren. Man kan också säga att varje konstanta energi som tillförs innerbehållaren vid en konstant temperatur hos ytterburkens yta resulterar i en viss temperaturdifferens d v s i ett visst utslag på skrivaren.

Sambandet mellan tillförd effekt till innerburken och resulterande utslag har kalibrerats. En provkropp har tillverkats av en värmeslinga av konstantantråd. I slingan som har storleken 30 x 30 x 120 mm har bakats in en provkropp av cementpasta med samma storlek. Stabiliserade likspänningar tillförs värmeslingan, varvid spänning och strömstyrka mäts med

stor precision. Mässingsburken är neddoppad i sitt kylbad vid -30°C. När stationära förhållanden uppnåtts, mäts utslaget på skrivaren från motståndsslingorna.

Resultatet av kalibreringen är ett rätlinjigt samband effekt-utslag.

Kalorimeterkonstanten, d v s värmeflöde per grads temperaturdifferens, fås ur linjens lutning.

Vid isbildning i provkroppen frigörs värme, vilket kommer att påverka utslagets storlek. Genom att tidsindela ett nedfrysningsförsök i små intervall, kan den frysta vattenmängden utvärderas grafiskt efter plottning av Σ(utslag x Δtid) som funktion av utslaget (=konst x temperaturdifferens ytter-innerytor). Σ(utslag x Δtid) är nämligen ingenting annat än total energi som passerat de båda motståndsslingorna.

Denna kalorimetriska funktion hos frysapparaturen diskuteras närmare i Fagerlund /1972c/. Vissa resultat visas nedan i punkt 7.5.

För att komma åt provkroppen är mässingsbehållarens överyta utformad som ett lock som är tätat med en gummi packning och som skruvas fast till resten av burken. Den övre delen av isoleringen är löstagbar. Tätning mot resten av isoleringen sker med en mjuk skumplastpackning. Övre delen av bakelitlådan är också utformad som ett lock som skruvas fast vid resten av lådan.

Till apparaturen hör också ett kylbad. Badet består av en rostfri isolerad fotogenfylld tank med stor volym. I tanken finns en kylslinga av kopparrör, kopplad till en cryostat. Fotogenen hålls i rörelse med en omrörare.

Temperaturen i badet hålls vid -30°C med en mycket god precision.

När provkroppen monterats, hängs hela apparaten ner i fotogenbadet. Ytterkärlets yttemperatur antar därvid nästan momentant badets temperatur, som stiger ≈1°C vid nedsänkningen.

Provkroppens temperatur sjunker allt eftersom värme leds bort. Efter ungefär 15 timmar har provkroppen nått en sluttemperatur av ≈-28,5°C. Apparaten tas då upp i rumstemperatur, där den får stå tills provkroppen nått åtminstone +5°C.

En cykel är då fullbordad och byte av provkropp sker.

Hela försöket har registrerats på 12-punktsskrivaren och x-y-skrivaren.

6. METODIK FÖR BESTÄMNING AV VATTENMÄTTNADSGRADER UPPNÅDDA I PRAKTIKEN

6.1 Inledning

För att praktiskt kunna använda materialkonstanten "kritisk vattenmättnadsgrad" är det nödvändigt att veta vilken vattenmättnadsgrad som uppnås under praktiska förhållanden. Frostbeständigheten i den aktuella situationen bedöms ju genom en jämförelse av den kritiska med den aktuella vattenmättnadsgraden.

Detta har diskuterats mera utförligt ovan i punkt 2.2.

Den kritiska vattenmättnadsgradens storlek kan relativt lätt bestämmas i laboratoriet. Viss hänsyn måste därvid tas till att isbildningshastigheter kan vara annorlunda i naturen än hos laboratorieprovkroppar och till att man i naturen kan få frysning med vandrande isfront medan man har simultant frysande provkroppar i laboratoriet. Dessa effekter är dock möjliga att behandla rent beräkningsmässigt under förutsättning av att frostskademekanismen är känd. Mycket tyder på att mekanismen är "hydrauliskt tryck" för alla typer av material.

När det gäller att förutsäga vilka vattenmättnadsgrader som uppnås under praktiska förhållanden är svårigheterna oerhört mycket större. Här spelar nämligen den yttre miljön en mycket stor roll liksom hur materialet är kombinerat med andra material till konstruktionsdelar.

För att exakt kunna lösa detta problem krävs dels kunskaper om fuktkällor och temperaturförhållanden i anslutning till materialet dels mycket väl utvecklade fuktmekaniska beräkningsmetoder.

Så gott som all sådan kunskap saknas för närvarande. Framförallt befinner sig fuktmekaniken trots stora forskningsinsatser fortfarande på embryostadiet. Metoder att bestämma relevanta materialegenskaper saknas t ex så gott som helt.

Denna brist på möjligheter att exakt bestämma de s k aktuella vattenmättnadsgraderna har ibland framförts som argument mot den här presenterade metoden att bestämma frostbeständighet. En sådan kritik anser emellertid författaren av denna skrift vara något ogenomtänkt.

Det är nämligen så gott som uteslutande bristande överensstämmelse mellan de vattenmättnadsgrader som används vid frysförsöket och de som uppnås i praktiken, som medför den bristfälliga korrelation mellan frysförsök och praktik, som nästan utgör regel vid vanliga metoder att bestämma frostbeständighet.

Tvärtom kan man anse att här presenterad metod just har en styrka i att den pekar på väsentligheten av att kunna förhandsbedöma vattenmättnadsgrader. Man skulle rent generellt kunna säga att frostbeständighetsproblemet aldrig kan lösas oavsett vilken testmetod man tänker använda om inte den fuktmekaniska delen av problemet kan lösas.

Även om sålunda inte den exakta lösningen på frostbeständighetsproblemet kan nås på grund av brist på fuktmekaniska beräkningsmetoder kan man komma relativt långt med mycket enkla metoder.

De flesta konstruktioner för vilka frostbeständighetsproblemet är aktuellt, takmaterial, socklar, vägbanor, brodäck etc står under längre eller kortare perioder i direkt kontakt med fritt vatten. Dessa perioder sammanträffar troligen då och då med en efterföljande frysperiod.

Ett oavvisligt krav på ett frostbeständigt material bör därför vara att materialen inte fyller sig vid ren kapillärsugning till en sådan nivå att S_{KR} överskrids.

Man skulle därför kunna ersätta det komplicerade begreppet "aktuell vattenmättnadsgrad i den aktuella situationen" med det betydligt enklare

"vattenmättnadsgrad vid en viss tids kapillärupptagning från en fri vattenyta".

Det senare värdet är mycket enkelt att bestämma i laboratoriet.

Frostbeständighetsbedömningen skulle alltså approximativt baseras på en jämförelse mellan den kritiska vattenmättnadsgraden och vattenmättnadsgraden uppnådd vid enkel kapillärsugning.

Nyanseringar måste emellertid göras av denna grova frostbeständighetsbedömning. För det första har den s k kritiska skikttjockleken, d v s den tjockaste helt vattenmättade skiva av materialet som inte fryser sönder, stor betydelse. Skador sker inte vid en frysning om $S_{AKT} > S_{KR}$ på ett djup från ytan som är mindre än halva den kritiska skikttjockleken, D_{KR}.

Om två olika material A och B når exakt samma gap mellan kritisk och aktuell vattenmättnadsgrad efter en viss tids kapillärsugning men vattenfronten i material A har nått djupare än $D^A_{KR}/2$ från materialytan medan den i material B inte har nått djupet $D^B_{KR}/2$ måste material B bedömas vara frostbeständigare än material A. Principen för detta visas i fig 83. Detta gäller naturligtvis enbart för material som utsätts för kortvariga fuktbelastningar.

På samma sätt bör två material med samma D_{KR} och samma gap mellan S_{KR} och S_{AKT} efter en viss tids kapillärsugning anses ha olika frostbeständighet om sughastigheterna är olika. Se fig 84 . Material A har bättre beständighet än material B. Även detta resonemang förutsätter kortvarig tillgång till fritt vatten före en frysning.

En nyanserad bedömning av frostbeständigheten kräver också att uttorkningsförhållandena beaktas. De båda materialen A och B har måhända samma gap mellan S_{KR} och S_{AKT} efter en viss tids sugning och dessutom samma värde på D_{KR}. Trots detta måste material A anses vara beständigare än material B om det har en större uttorkningsförmåga.

Uppenbarligen föreligger det ett intrikat samspel med avseende på frostbeständighet mellan S_{KR}, S_{AKT}, D_{KR} och uppfuktnings- resp uttorkningshastighet.

Kapillärsugningsexperimenten i samband med frostbeständighetsundersökningarna har därför syftat till att bestämma följande väsentliga parametrar;

- Samband mellan medelvattenmättnadsgraden hos våta delen av provkroppen och fuktfrontens djup från materialytan vid kapillärsugning från fri vattenyta. Detta värde jämförs med materialets kritiska tjocklek som också bestämts.
- Vattenmättnadsgrader som funktion av tiden vid kapillärsugning från fri vattenyta.
- Vattenmättnadsgrader som funktion av tiden vid nedsänkning i vatten.
- Vattenupptagning vid frysning och upptining i vatten.
- Vissa ganska valhänta försök har även gjorts att mäta vattenmättnadsgrader uppnådda genom kondensation mot kall yta.

Vid kapillärsugning finns en temperatureffekt, som inte får försummas. Laboratorieexperimenten har skett vid rumstemperatur medan vattenupptagning under naturliga förhållanden ofta sker vid låg temperatur.

Maximala vattenupptagningen ökar med sänkt temperatur eftersom ytspänningen luft-vatten ökar. Förhållandet mellan vattenupptagning vid två temperaturer bör då kunna härledas ur förhållandena mellan kapillära stighöjder, d v s

$$\frac{(S_e)_{\theta_1}}{(S_e)_{\theta_2}} = \frac{Z_{\theta_1}}{Z_{\theta_2}} = \frac{\sigma_{\theta_1}}{\sigma_{\theta_2}} \cdot \frac{\rho_{\theta_2}}{\rho_{\theta_1}} \qquad (120)$$

Denna kevation är utritad i fig 85 med +25°C som utgångsvärde.

Kapillära sughastigheten bör däremot minska med sänkt temperatur eftersom viskositeten är starkt temperaturberoende. Ur Hagen-Poiseulles uttryck för sughastighet fås följande förhållande mellan vattenuppsugningshastighet vid två olika temperaturer

$$\frac{(\frac{dQ}{dt})_{\theta_1}}{(\frac{dQ}{dt})_{\theta_2}} = \frac{\sigma_{\theta_1}}{\sigma_{\theta_2}} \cdot \frac{\mu_{\theta_2}}{\mu_{\theta_1}} \qquad (121)$$

Detta samband är utritat i fig 86 med +25°C som utgångsvärde.

Alla genomförda bestämningar av aktuella vattenmättnadsgrader måste anses vara mycket approximativa. Avsikten med denna frostbeständighetsstudie har i första hand varit att påvisa existensen av kritiska vattenmättnadsgrader. Bestämning av aktuella vattenmättnadsgrader har varit ett sekundärt mål och har gjorts enbart för att ge en viss bild av olika materials potentiella frostbeständighet i en mycket våt miljö.

6.2 Bestämning av samband mellan vattenmättnadsgrad och fuktfrontens djup från materialytan

Vid en vanlig kapillärsugning från en fri vattenyta kommer fuktfronten att gradvis tränga in i provkroppen. Om man därför vid varje tidpunkt definierar medelvattenmättnadsgraden, S_e, i provkroppen som total uppsugen vattenmängd dividerad med total porvolym, ekv (2) begås ett stort fel så länge fuktfronten inte nått provkroppens överyta. I stället borde medelvattenmättnadsgraden beräknas med utgångspunkt från porvolymen i den del av provkroppen som har trängts igenom och är våt.

Enklaste sättet att göra en riktig beräkning vore att mäta fuktfrontens läge vid olika tidpunkter. Se fig 87.

Medelvattenmättnadsgraden skulle då bli

$$(S_e)_m = \frac{Q_w}{A \cdot Z \cdot P \cdot 10^3} \tag{122}$$

Ekv (122) kan också erhållas om det s k motståndstalet, m, för kapillärsugning och kapillaritetstalet, k, är kända. m definieras

$$m = \frac{t}{Z^a} \tag{123}$$

där a = 2 för ett kapillärrör. k definieras

$$k = \frac{Q_w}{t^b} \tag{124}$$

där b = 1/2 för ett kapillärrör.

Genom att kombinera ekvationerna (123) och (124) kan följande generella uttryck för medelvattenmättnadsgrad hos våta delen av provkroppen härledas. (Obs denna ekvation är exakt densamma som ekv (122)).

$$(S_e)_m = \frac{k\, m^{1/a}}{A \cdot P \cdot 10^3} \cdot \frac{t^b}{t^{1/a}} \tag{125}$$

För ett kapillärrör blir alltså med insättning av a = 2 och b = 1/2

$$(S_e)_m = \frac{k\, m^{1/2}}{A \cdot P \cdot 10^3} \tag{126}$$

Ekv (125) visar att enbart sådana värden på a och b som ger b = 1/a medför att medelvattenmättnadsgraden är oberoende av tiden d v s av stighöjden. För ett kapillärrör gäller just detta förhållande, vilket också framgår av ekv (126) där tiden är bortelemінerad.

I ett normalt material har man emellertid en varierande porstorleksfördelning med olika kapillära stighastighet i olika kapillärer .

Om man antar att alla kapillärer är raka och parallella och indelar dem i storleksklasser, r_i; P_i, kan man lätt visa att medelvattenmättnadsgraden på djupet Z vid tiden t kommer att bli

$$(S_e)_m = \frac{1}{P \cdot Z} \sum_i P_i \sqrt{\frac{t \cdot r_i \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{2 \cdot \eta}} \tag{127}$$

Formeln baseras på det kända uttrycket för stighöjd i en rak kapillär

$$Z = \sqrt{\frac{t \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{2 \cdot \mu}} \qquad (128)$$

Tiden t kan nu antas motsvara att vattenfronten i de grövsta kapillärerna har nått djupet Z, vilket innebär att finare kapillärer är enbart delvis fyllda till detta djup. Är alla porer av den grövsta storken,blir $(S_e)_m = 1{,}0$, oberoende av djupet Z. Ju bredare porstorleksfördelningen är, desto mera beroende av Z blir $(S_e)_m$. Teoretiskt minskar medelvattenmättnadsgraden med ökande djup Z. Detta kommer yttra sig i att konstantvärdena b och a i ekv (125) inte uppfyller villkoret $b-1/a=0$ utan att $b<1/a$.

Antar man därför att medelvattenmättnadsgraden för ett tunt, vått ytparti av ett material efter en kort kapillärsugning är densamma,som medelvattenmättnadsgraden för en större våt volym av materialet efter längre tids sugning,begås ett principiellt fel. Vattenmättnadsgraden i ytan underskattas, vilket är olyckligt.

I verkliga material har man inte raka parallella kapillärer utan slingriga kapillärer med en radie som varierar efter sin längd och inbördes förbundna. Därför behöver inte inverkan av stighöjd på medelvattenmättnadsgraden vara så stor som i det teoretiska fallet.

Det föreligger emellertid ur frostbeständighetssynpunkt ett önskemål att kunna bestämma vattenmättnadsgraden vid en kapillärsugning på olika nivåer från sugytan. Framförallt är då det djup,som motsvarar halva kritiska skikttjockleken, speciellt intressant.

Vattenfrontens läge Z måste därför kunna bestämmas noggrannt. Det mest praktiska sättet vore okulär besiktning av provkroppen. Emellertid föreligger därvid stora svårigheter att exakt avgöra frontens läge. Ett annat sätt är att använda sig av elektroder insatta på olika djup från sugytan. Vattenfronten kan då indikeras genom en påtaglig minskning i resistansen.

Vi har valt en helt annan, indirekt metod.

Vid ett kapillärsugförsök med en någorlunda tunn provkropp kan man urskilja två stadier:

Stadium 1: Vattenfronten tränger genom provkroppen. Samband av typ (123) och (124) gäller därvid.

Stadium 2: Vattenfronten har nått överytan och sughastigheten retarderas mycket kraftigt. Under detta stadium fyller sig dels mycket små porer dels pressas instängd luft ut ur vissa typer av porer,varpå dessa fylls. Även andra mekanismer kan tänkas.

Övergången från stadium 1 till stadium 2 är mycket lätt att se. Lämpligen ritar man upp vattenupptagningen som funktion av roten ur tiden (eller logaritmen för tiden). Man får då ofta två räta linjer,vars skärningspunkt utgör den punkt,där övergången mellan de båda stadierna sker. Se fig 88 .

Denna s k knickpunkt anger alltså approximativt fuktfrontens läge,som i detta fall motsvarar provkroppens tjocklek.

Man kan därför nu beräkna medelvattenmättnadsgraden genom att använda ekv (122), där man byter ut Z mot provkroppstjockleken l och Q_w motsvarar vattenupptagningen vid knickpunkten.

Genom att variera provkroppstjockleken l och mäta knickpunktsabsorptionen kan man tydligen få en information om hur medelvattenmättnadsgraden varierar med djupet från sugytan. Därvid antas att övriga tänkbara effek-

ter av ökad provkroppsstorlek såsom försvårad luftutträngning etc kan försummas.

För vissa material, två tegelsorter, 4 sorter gasbetong och en kalksandsten, har sådana mätningar genomförts.

Provkropparna hade basyta 30 x 30 mm^2 och varierande tjocklek mellan ≈1 mm upp till 30 mm. Provkroppsytorna parallellt med sugningen tätades med lufthärdande silikongummi, dels för att ge en endimensionell lufttransport genom provkroppen och dels för att undvika att alltför stor menisk mellan provkropp och vattenyta skulle utbildas.

Sugytan slipades med slippapper för att alla eventuella spår av silikon skulle försvinna. Ytan blåstes därefter ren med tryckluft.

För att utföra mätningarna, har en speciell apparatur byggts upp. Principuppställningen visas i fig 89 och utseendet i fig 90.

Provkroppen fästs på en 15 mm tjock aluminiumskiva 50 x 50 mm^2 med hjälp av bilkitt. Fig 91 . Ett litet hål finns i kittet så att luften kan komma ut. Al-skivan hängs horisontellt i änden på en klämma, som är förskjutbar i höjdled. Klämman justeras in så att provkroppens underyta kommer på en viss nivå. Klämman är fäst i en kraftig konsolarm 15 x 22 mm^2 av aluminium. Denna i sin tur är via ett tunt stålbleck 1,5 x 22 mm förbundet med ett magnetstativ. På blecket är 4 st 120 Ω trådtöjningsgivare klistrade i temperaturkompenserad fullbrygga. Avståndet mellan provkroppscentrum och givarnas centrum är 210 mm. Givarna är fuktskyddade med silikonsalva. De är kopplade till en trådtöjningsbrygga typ Peekel.

Dennas output är förbunden med en 1linjeskrivare typ Goertz, som skriver givarutslag som funktion av tiden.

Under provkroppen finns en glasskål med diametern 250 mm. Skålen är horisonterat upplagd på en trefot av metall, som står i ett plastkar. Vatten kan ledas från en glasflaska ner i glasskålen. Denna kan tömmas ner i plastkaret, varefter vatten pumpas tillbaka upp i flaskan.

Hela utrustningen förutom trådtöjningsbryggan och skrivaren är omgiven av ett värmeisolerat hölje med plexiglasfront och monterad på ett vibrationsdämpande betongbord.

Provkroppens underyta är parallell med glasskålen och belägen något under dennas övre rand.

Ett försök tillgår så att skrivaren startar med stor hastighet. Vatten leds ner i glasskålen. Så fort vattenytan "huggit tag" i provkroppsytan avbryts vattentillförseln och plexiglasdörren stängs. Försöket sköter nu sig själv. Viktökningen hos provkroppen kommer att registreras automatiskt.

Försöket pågår tills man är säkert övertygad om att fuktfronten trängt igenom hela provkroppen, vilket kan ske på tider varierande mellan 5 min och 3 tim beroende på tjocklek och porstruktur.

Apparaturens känslighet kan varieras inom vida gränser genom användning av varierande mätområden på brygga och skrivare. Vid maximal känslighet kommer 100 % skrivarutslag att enbart motsvara 3,6 g, vilket ger 0,036 g per skaldel skrivarutslag. Känsligheten har kalibrerats fram med hjälp av kända vikter.

Tänkbara felkällor är:

Krypning i blecket p g a belastning från provkroppen. Försök med en icke porös provkropp med tyngd som motsvarar de tyngsta provkropparna ≈50 g visar att skrivarutslaget är så gott som konstant med tiden.

Temperaturvariationer. Dessa begränsas genom att försökstiderna är korta,

apparaturen är värmeisolerad från omgivningen och givarna är temperaturkompenserade.

Avdunstning från skålen. Försök med icke porösa provkroppar i kontakt med vattenytor, visar att denna är försumbar. Relativa fuktigheten är hög inne i försöksutrymmet och försökstiderna måttliga. Vid mycket långa försök finns möjligheter att låta vatten strömma över glasskålens kant så att vattennivån är konstant. Vatten sugs i detta fall tillbaka till flaskan genom pumpen.

Nedsjunkning av provkroppen i vattnet. När tyngden ökar sjunker provkroppen nedåt genom deformation i blecket, varvid tyngden skenbart minskar. Denna effekt kan beräknas eftersom konsolens styvhet är känd.

Under förutsättning av att stativet antas vara fullständigt styvt kommer 1 g verklig viktökning att innebära 4,4µ nedböjning, vilket lätt fås genom en vanlig hållfasthetsteoretisk beräkning. Vid 9 cm^2 basyta hos provkroppen blir då den skenbara viktökningen 0,00044 x 9 x 1 = 0,00395 g. Felet är alltså 0,40 %.

Excentricitet i upphängning av provkroppen. Excentriciteten beror på att provkroppscentrum inte kommer i klämmans centrum, vilket kan ge upphov till fel i böjmoment eller i uppkomst av vridmoment.

Även dessa fel går enkelt att beräkna. 1 mm fel ger ett fel i böjmoment d v s i skrivarutslag av 0,48 %. Samma fel i form av vridmoment ger inget utslag alls p g a det sätt på vilket givarna är kopplade.

Excentrisk vattenuppsugning i provkroppen. Man kan tänka sig att materialegenskaperna är sådana att sughastigheten är olika i olika delar av provkroppen. Om man antar att stighöjden i ena kanten är 2 när den är 1 i andra kanten (rätlinjigt sned fördelning av vatten)fås ett fel av 0,80 %.

Maximalt fel av alla excentriciteter är därför 1,7 %.

Svårigheter att indikera startvärdet. I och med att provkroppsytan nås av vattenytan i någon punkt, fås ett skrivarutslag momentant. Samtidigt börjar sugningen. Det kan ibland vara svårt att indikera vilken punkt på remsan som motsvarar sugtiden noll. Därför vägs provkroppen före och efter testen. Startvärdet kan sedan lätt ritas in på skrivarremsan efter division av viktökningen med känsligheten.

Resultat av vattenmättnadsgrader vid knickpunktsabsorptionen beräknade ur ekv (122) visas i fig 92a-g . För alla material utom två, finns en klar tendens till att vattenmättnadsgraden är högre vid ytan än längre in. Detta är alltså också logiskt enligt ekv (127). Effekten bör teoretiskt bli större ju bredare porstorleksfördelning materialet har.

Om man antar att samma absorptioner uppstår när en skiva utgör ytparti av en större materialvolym som när den är ensam,skulle alltså resultaten i fig 92 visa att en knickpunktsabsorption bestämd på en provkropp med tjocklek $\gtrsim$10 mm skulle kunna ge alltför låga värden på ytskiktens vattenmättnadsgrad efter kort tids sugning.

Tidigare har dock påpekats att ytor på ett sätt är skyddade eftersom de på ett djup som är mindre än halva kritiska skikttjockleken inte kan frysa sönder. I fig 92, har empiriskt bestämda $D_{KR}/2$ (Fagerlund /1973A/) lagts in . Det visar sig då tydligt att dessa värden alltid är betydligt mindre än det djup från materialytan som har ökade knickpunktsabsorptioner. Av denna orsak måste ytornas vattenabsorption studeras mycket noggrannt om man någonsin skall kunna få en korrekt uppfattning om materials frostbeständighet. En tänkbar metod är att mäta vattenabsorption hos tunna skivor enligt den teknik som redovisas här.

Ur de absorptions-tidskurvor,som erhölls vid försöken, kan också en del information utvinnas. Ett fåtal av alla de kurvor som bestämdes visas i fig 93 . Man kan av dessa kurvor dra följande slutsatser:

- Ofta erhålls räta samband absorption-$\sqrt{\text{tid}}$. Linjerna går dock inte alltid genom origo.

- Inverkan av provkroppstjocklek på vattenabsorptionen är i alla fall, utom ett, (gasbetong typ 3) mycket liten så länge knickpunkten inte uppnåtts. I de flesta fall där en viss skillnad finns medför den tunnare provkroppen en större absorptionshastighet, vilket är rimligt med tanke på underlättad lufttransport från porerna. Provkroppstjocklekarna varieras dock enbart mellan 6,4 mm - 27,6 mm. Man kan förvänta sig en större reducerande effekt på vattenabsorptionshastighet vid ännu större provkroppsstorlek eftersom då undanpressad luft får längre transportväg.

- Knickpunkterna är lättare att urskilja ju tunnare provkroppen är. Detta är logiskt eftersom fuktfronten blir diffusare ju högre stighöjden är. Jfr ekv (127). Ofta blir knickpunkterna för tjockare provkroppar tydligare om absorptionen utritas som funktion av logaritmen av tiden. För samtliga de provkroppar, som redovisas i fig 93 har dock knickpunkten uppnåtts, vilket även bekräftas av att alla överytor varit våta vid avslutning av försöken.

- Tunna provkroppar fyller sig mycket fort. Knickpunkten hos en 13 mm tjock provkropp av lösbränt tegel uppnås efter enbart 2 minuter. Denna tjocklek motsvarar ungefär kritiska skikttjockleken. Det lösbrända teglet får alltså en hög fuktkvot på farligt djup efter mycket kort tid.

  Det hårdbrända teglet uppnår knickpunkten först efter =25 minuter hos en 6,5 mm tjock provkropp. Detta djup motsvarar ungefär halv kritisk tjocklek hos detta tegel. P g a den betydligt långsammare absorptionen, blir alltså det hårdbrända teglet avsevärt mycket mera beständigt i ytan än det lösbrända. Till detta bidrar dessutom i hög grad att gapet mellan knickpunktsabsorptionen och denkritiska vattenmättnadsgraden är avsevärt mycket större hos det hårdbrända teglet. Detta framgår av fig 92 där även empiriskt bestämda S_{KR} lagts in.

  Gasbetongerna har kritiska tjocklekar understigande 1,7 mm (Fagerlund /1973A/.De tunnaste skivorna som användes för absortionsstudierna var 1,9 mm för gasbetong typ 1. Denna skiva uppnådde knickpunkten efter 1,3 minuter.

  Dessa korta sugtider tillsammans med en starkt stegrad vattenabsorption i ytan gör att gasbetonger blir speciellt känsliga för frostangrepp i ytan. Detsamma gäller den testade kalksandstenen som har en mycket liten D_{KR}. Detta material fryser därför närmast sönder till ett mjöl.

Ett slutomdöme om här redovisade experiment, som de visas i figurerna 92 och 93 , är att absorptionsexperiment utförda på skivor av varierande tjocklek tillsammans med experimentella bestämningar av kritiska skikttjocklekar och kritiska vattenmättnadsgrader, torde kunna ge en ganska god bild av ett materials frostkänslighet vid god fukttillgång vid materialytan. Figurer av typen 92 visar samspelet mellan alla väsentliga parametrar som bestämmer frostbeständighet. Enbart tidsaspekten är försummad. Denna återfinns dock i figurer av typ 93 varifrån värden på tider vid knickpunktsabsorptionen kan hämtas och indikeras i figurer av typ 92.

Fig 94 visar hypotetiska kurvor över knickpunktsabsorption, S_{KR}, D_{KR} hos två olika material, A och B.

För bägge materialen stiger knickpunktsabsorptionen, S_{KN}, vid materialytan så starkt att $S_{KN}>S_{KR}$. För material B gör detta emellertid ingenting eftersom dess D_{KR} är stort. Material A däremot frostskadas i ytan eftersom dess D_{KR} är litet.

Generellt gäller att material B är mera frostbeständigt än A, eftersom gapet S_{KR}-S_{KN} är större.

Den experimentella metoden enligt ovan gäller dock bara under förutsättning av att ett materialskikt i ytan har samma vattenabsorptionskarakteristika som motsvarande utskurna tunna skiva.

I figurer av typ 92 kan dessutom enbart knickpunktsugningen beaktats. Skivorna fortsätter emellertid att absorbera vatten efter det att vattenfronten nått överytan även om denna process är långsammare. För att även få en uppfattning om en längre tids sugning har mycket omfattande experiment utförts. Metodiken för dessa redovisas i nästa avsnitt (punkt 6.3). Därvid använda provkroppar har bara haft en tjocklek som varit lika med den som använts vid frysförsöken.

6.3 Vattenupptagning vid sugning från en fri vattenyta

För alla material som frystestats har även vattenabsorptionen vid kapillärsugning bestämts.

Metodiken har varit enkel. De helt torra eller "lufttorkade" provkropparna har tätats på något sätt på sina sidoytor och på överytan så att avdunstning förhindrats. De har placerats med sin underyta några mm under en vattenyta. Vid olika tidpunkter har provkroppen tagits upp ur badet, underytan har torkats av mot en fuktig svamp och vikten bestämts.

Försöken har pågått under ibland mycket lång tid, ∿1/2 år och ibland under kort tid, ∿5 dygn.

Avslutningsvis har provkropparna vägts torkade vid +105°C, vilket har gjort det möjligt att beräkna hur mycket vatten som fanns i dem vid försöksstarten. Även detta vatten måste inkluderas i vattenmättnadsgraden efter sugning.

Försöksdata har överförts till hålremsor och bearbetats i dator, vilket förenklat beräkningarna av det mycket stora försöksmaterialet.

Vid beräkningen av vattenmättnadsgrader och fuktkvoter, har ingen hänsyn tagits till att provkroppen kanske inte varit helt genomträngd av fuktfronten. I dessa fall är alltså i kap 9 angivna vattenmättnadsgrader alldeles för små för den våta delen av provkroppen.

Även i dessa försök får man emellertid en god uppfattning av vad som är stadium 1 och stadium 2 genom att studera vattenmättnadsgraden i ett diagram av typ 88.

De tidseffekter som diskuterades ovan i punkt 6.2 och som bör beaktas vid en nyanserad frostbeständighetsbedömning, framgår genom jämförelse av absorptionskurvornas lutning. Se fig 95. Material 1 kan antas motsvara material A och material 2 motsvara material B i fig 84. Vid kort tids vattensugning, upp till tiden t_2, är material 1 beständigare än material 2, även om dess S_{KR} och D_{KR}^2 är lika. Vid sugtid längre än t_1 är material 2 beständigare.

Figur 95 visar alltså att inte enbart vattenmättnadsgrader uppnådda på måttliga djup från ytan vid korttidssugning måste beaktas utan i de fall ett material har ständig god tillgång på fritt vatten även vattenmättnadsgrader uppnådda vid lång tids sugning. Såväl sugning i stadium 1 som 2 är därför i högsta grad intressanta.

Lutningarna i stadium 2 kan vara helt olika för olika material, vilket måste hänga samman med helt olika porsystem eller olika vattenfyllningsmekanismer.

Som nämndes ovan är det egentligen endast vattenmättnadsgrader efter knickpunkten, som utgör "riktiga" värden.

Korttidssugningen kan emellertid användas för att bedöma ett materials porstruktur. Ju större vattenupptagningen är efter kort tid desto grövre är porsystemet. Med kort tid menas ≈5 min.

Detta har utnyttjats för att försöka klassificera olika provkroppar ur samma materialfamilj. Provkroppar av lösbränt och hårdbränt tegel klassindelades i två grupper, en med stor och en med liten korttidssugning. För varje klass bestämdes sedan den kritiska vattenmättnadsgraden. Orsaken till detta förfarande var, att när det användes hade inga kritiska vattenmättnadsgrader bestämts för något enda material. Vi visste inte ens om de existerade och gjorde därför allt för att få ett så homogent försöksmaterial som möjligt. Försöken visade sedan att detta sätt för klassindelning var onödigt. Bägge klasserna fick i bägge fallen samma kritiska vattenmättnadsgrad.

Man kunde inte utesluta en inverkan på vattenabsorptionen av sugriktningen. Detta gällde då speciellt material där parallellstruktur kunde förväntas, såsom hos takpannor av tegel eller betong och asbestcement.

Dessa produkter har därför fått suga vatten i olika riktningar. Fig 96. Dessutom kan man ha olika ytegenskaper t ex brännhud hos tegel, ytbehandlingar hos asbestcementprodukter och takpannor, separationsskikt hos cementbruk. Där sådant har befarats,har sugning fått ske från olika riktningar.

Man torde också kunna förvänta sig en viss effekt på vattenabsorptionen av fukttillståndet före testen. Framförallt bör absorptionen påverkas av hur begynnelsefukttillståndet uppnåtts. Fig 51 visar exempel på hysteresis uppfuktning uttorkning. I fig 52-53 ges en förklaring till detta fenomen. Det är alldeles uppenbart att porvattnet befinner sig i helt olika porer i de båda olika fallen. Undersöker man nu vattenabsorptionen hos två olika provkroppar med samma begynnelsefukttillstånd men den enas porvatten befinner sig i jämvikt enligt desorptionskurvan och den andra enligt absorptionskurvan,är det troligt att de kommer att få ganska olika vattenupptagningar.

Man kan inte heller förvänta sig samma vattenabsorption hos två provkroppar av samma material med olika begynnelsefukttillstånd.

De kanske absorberar lika snabbt till en början men efter en tid stannar absorptionen av hos den våtare provkroppen.

Hysteresisfenomenet har undvikits vid laboratorieförsöken genom att alla provkroppar torkats ur före testen. De "befinner sig" alltså på uttorkningskurvan eller på någon scanningkurva. Se fig 54 . För jämförelse mellan laboratorieförsök och praktiken har fenomenet dock betydelse.

Inverkan av olika fukttillstånd före testen är stor så länge man enbart betraktar absorptionens storlek. Studerar man i stället total vattenhalt i materialet, d v s inklusive fukt före testen, tycks vattenhalts- tidskurvorna snart sammanfalla och man får så småningom ungefär samma kurva . Olikheter i begynnelsefukthalt har ofta förekommit vid experimenten.

Skyddet mot avdunstning från provkroppen har skett på olika sätt vid olika tillfällen. Se fig 97. Vanligast har varit att förse provkroppen med en plasthuva , fig 97 a . En andra metod har varit att använda silikongummi på sidorna och en plastfolie på överytan, fig 97 b . Asbestcementprodukter har testats på ett eget sätt. Alla ytor utom överytan står i kontakt med vatten. Tätt över alla provkroppar placeras en plexiglasskiva och över hela sugskålen en polyetenfolie, fig 97 c.

I inget av fallen har någon minskning av provkroppsvikten med tiden kunnat noteras. Tvärtom har vikterna ökat kontinuerligt under ibland så lång tid som 1/2 år.

Felkällor i metoden är:

Olika doppningsdjup. Detta har betydelse enbart vid korttidssugning men inte alls vid sugtider över knickpunkten. Doppningsdjupet är normalt 3 à 5 mm. Verkliga djupet blir emellertid större eftersom menisker utbildas mellan provkropp och vattenyta. Fig 97 . En stor del av variationerna vid kort sugtid torde hänföra sig till variationer i doppningsdjup. Detta bekräftas av att absorptionerna på lång sikt ofta har betydligt mindre spridning. Se bilagan.

Svårigheter att torka sugytan. Detta föreligger speciellt vid grovporösa material av typ gasbetong och lecablock. Jfr punkt 4.3.2 ovan. Spridningarna har försökts minskas genom att torksättet standardiserats. (Samma torksvamp har använts hela tiden och dess våta vikt har hållits konstant). I normalfallet är denna typ av fel försumbart.

Hydratationer under sugtiden. Provkroppar hydratiserar under sugningen, vilket ger upphov till en extra viktökning p g a att kemiskt bundet vatten har mindre volym än kemiskt bundet. Nettoeffekten av hydratisering blir trots detta en minskning av den verkliga vattenmättnadsgraden. Jfr punkt 4.5.2 , där även storleksordningen av hydratisering framgår.

Avdunstning. Denna har diskuterats ovan. Den verkar vara mycket liten, ty relativa fuktigheten över provkropparna har varit mycket hög, vilket framgår av kondensbildning på plasthuvorna på provkropparna.

Resultat av absorptionsmätningarna visas i punkt 9 .

6.4 Vattenupptagning vid doppning under vattenyta

För vissa material har vattenupptagning vid neddoppning i vatten bestämts. Ofta har dessutom försök,där sugning skett från fri vatttenyta,avslutats med en neddoppning under längre eller kortare tid.

Fördelen med denna typ av sugförsök är att man inte behöver vidta några åtgärder för att förhindra avdunstning från provkroppar. Provkroppsupplag är inte erforderliga. Inverkan av parallellstruktur hos provkroppen behöver inte beaktas.

Även i dessa försök fås uppsugningstidskurvor av den typ som visas i fig88 Skillnaden är att knickpunkten denna gång motsvaras av den punkt där de fyra olika vattenfronterna i en stavformad provkropp möts någonstans i centrum.

Man kan emellertid inte förvänta sig att knickpunktsabsorptionen blir densamma i denna typ av försök som i fallet uppsugning från fri vattenyta. Inneslutningen av luft måste bli större vid doppning varvid vattenmättnadsgraden minskar. Man bör därför även få en viss effekt av provkroppsvolym på vattenmättnadsgradens storlek.

För material till konstruktioner som helt är omgivna av vatten, bör däremot vattenupptagning vid doppning vara intressant.

Resultat av mätningarna visas i punkt 9.

6.5 Upptagning av vatten vid frysning och upptining i vatten

Den ovan föreslagna frysmetoden förutsätter konstant vattenhalt under hela tiden. I verkliga konstruktioner kan man emellertid tänka sig att frysning och/eller upptining sker i närvaro av vatten.

Detta innebär emellertid inte att inte en frysmetod med konstant vattenhalt kan användas även för material till en sådan konstruktion.

De ökade vattenhalter, som kan förväntas av vatteninsugning p g a det vacuum som måste uppstå när isen smälter och krymper 9 vol-%, kan nämligen anses tillhöra "delen S_{AKT}" av frostbeständighetsbegreppet, se ekv (11).

Även för sådana konstruktioner skulle alltså S_{KR} bestämmas på vanligt sätt d v s enligt kapitel 4 ovan, medan S_{AKT} skulle bestämmas på provkroppar som frystes och/eller tinades i vatten. Den senare delen skulle alltså inte betraktas som ett frysexperiment utan som ett kapillärsugningsexperiment.

Man finner oftast vid normala frystestningar, där i någon del av cykeln provkroppen är i kontakt med fritt vatten, att skadorna sker som ytavflagningar. Det förefaller därför rimligt att anta att ytpartierna fylls till skadliga vattenmättnadsrader, varefter de faller av vid nästföljande frysning. Warris /1969/ har behandlat denna mekanism teoretiskt.

För att studera vattenupptagning i samband med frysning och upptining i vatten, utformades ett speciellt experiment.

Skivor med olika tjocklek sågades av de sju olika material för vilka även vattenabsorptionen testats. Se avsnitt 6.2.

Skivorna lagrades i vatten under tre dygn. De hade därefter uppnått "viktskonstans", d v s maximal frivillig vattenupptagning. Skivorna vägdes och förseglades med plastfolie. De frystes två gånger på vanligt sätt d v s i luft med mellanliggande upptiningar i vatten. De provkroppar, som fortfarande var intakta frystes därefter 3 gånger i vatten och tinades i vatten.

Redan efter de två första frysningarna i luft, var alla gasbetongprovkroppar starkt avflagade. Kalksandstenen var mjölig på ytan medan tegelprovkropparna var intakta.

Efter de tre frysningarna i vatten var gasbetongerna och kalksandstenen helt demolerade medan tegelbitarna fortfarande var intakta.

Mellan varje frysning vägdes tegelprovkropparna. I fig 98 har vattenmättnadsgraden som funktion av skivans tjocklek och sätt för frysning åtritats.

Mekanismen i förstörelsen framgår nu klart av figuren. Efter tre dygns vattenlagring absorberar inte provkropparna mera vatten. Enbart några få timmars vattenlagring med is i porsystemet ger emellertid en avsevärd ökning i vattenmättnadsgrad. Om även frysning sker i vatten blir höjningen i vattenmättnadsgrad förödande. Att tegelsorterna ändå klarar sig beror på att deras kritiska tjocklekar är större än här använda skivors tjocklek. Gasbetongerna och kalksandstenen har däremot små kritiska tjocklekar. Redan en upptining i vatten höjer vattenmättnadsgraden i ytan så högt att brottet kommer vid andra frysningen. Vid därefter följande upptiningar och frysningar äter sig avflagningarna allt längre in i provkroppen.

Mekanismen är med all säkerhet vatteninsugning när isfronten drar sig tillbaka i samband med issmältningen. Maximal insugning skulle därvid vara 9 % x frysbara vattenmängden. Vatteninsugningen skulle framförallt ge ytpartierna ökade vattenhalter. Att så är fallet framgår också av fig 98 a , som visar att medelvattenmättnadsgradens höjning är betydligt större hos tunna provkroppar än hos tjockare. Det framgår också av gasbetongerna och kalksandstenen där de tunnaste provkropparna totaldemolerades först.

Det här utförda experimentet visar klart att i de fall där frysning och issmältning sker i närvaro av vatten, uppnås speciellt höga aktuella fukttillstånd. I sådana fall räcker inte vanliga kapillärsugningsexperiment för bedömning av S_{AKT}, eftersom man får en tvångsfyllning av porerna.

Experimentet visar också att man även i detta fall kan utnyttja begreppet kritisk vattenmättnadsgrad, om man bara utformar en vettig metod att bestämma S_{AKT}. Man behöver alltså inte ens i detta fall använda konventionella frystester.

Experimentet bidrar dessutom till att förklara varför olika frystestmetoder t ex enligt ASTM ger så helt olika frostbeständighet för samma material. Orsaken torde vara att de ger olika S_{AKT} i ytan. Se även Fagerlund /1972 D/.

6.6 Hygroskopisk fuktupptagning

Hittills har förutsatts att det finns tillgång till fritt vatten, varvid provkroppen fyller sig till en viss vattenmättnadsgrad.

Finporösa material kan emellertid även binda fukt hygroskopiskt. En por med radien ≈0,1μ fyller sig vid ≈100 % relativ fuktighet.

Samband mellan fuktabsorption och relativ fuktighet d v s sorptionsisotermer, har bestämts för ett flertal byggnadsmaterial av Ahlgren /1972/.

Ett material som är mycket finporöst kan fylla sig fullständigt enbart genom absorption ur luftens fuktiget. Har sedan materialet någorlunda stor porositet skulle det kunna tänkas frysa sönder. Förutsättningen är emellertid att temperaturen är nog låg. Av ekv (85) framgår nämligen att hygroskopiskt bundet vatten har avsevärda fryspunktsnedsättningar.

Ett sådant materials kritiska skikttjocklek torde vara mycket liten p g a materialets stora täthet. Även tunna skikt skulle därför kunna tänkas förstöras vid frysning.

Sönderfrysning av täta tunnputsskikt eller färgskikt på tegel eller andra porösa stenmaterial beror möjligen på att skikten, som ofta är mycket finporösa, fylls helt med vatten, t ex hygroskopiskt. Vid en frysning till nog låg temperatur, fryser en del av detta porvatten, varvid skiktet eventuellt förstörs.

För tjockare konstruktionsdelar torde emellertid inte hygroskopicitet spela någon nämnvärd roll ens om alla porer är mycket små i materialet. Relativa fuktigheten varierar nämligen med tiden, varför konstruktionen p g a sin "tröghet" kommer att ställa in sig på någon medelnivå, som motsvarar relativa fuktighetens medelvärde. Detta är normalt så lågt att fryspunktsnedsättningarna i porvattnet är större än de i naturen vanliga frystemperaturerna.

Uppenbart är emellertid att hygroskopisk fuktupptagning inte får negligeras alldeles när det gäller risk för frostangrepp. Några undersökningar av dess betydelse har dock inte utförts i detta arbete.

6.7 Mätning av fukt in-situ

Det allra mest logiska sättet att bestämma S_{AKT} är naturligtvis att undersöka den verkliga fuktupptagningen hos materialen i exakt de miljöer i vilka de skall användas.

Tyvärr är detta inte en praktiskt framkomlig väg när det gäller att exakt förhandsbedöma ett materials frostbeständighet. Man kan inte rimligen avvakta resultat under så lång tid som det måste bli fråga om. Det farliga fukttillståndet kan ju komma när som helst under ett materials livstid.

Däremot är metoden fullt användbar när det t ex gäller att undersöka tänkbara skademekanismer vid ett skadefall. Ett uttaget fuktprov kan då ge information om skademekanismen kan tänkas vara frostangrepp eller om detta är uteslutet.

In situ mätningar av fukt kan också användas för att återkoppla erfarenheter av olika materials i praktiken uppvisade frostbeständighet till i laboratoriet uppmätta värde på S_{KR} och S_{AKT}. Material som visar stora vattenabsorptioner vid laboratorieförsök bör även uppvisa stora fukthalter i praktiken om den använda laboratoriemetodiken att karakterisera S_{AKT} skall vara realistisk.

In situ mätningar har använts i två skadeutredningsfall för att undersöka skademekanismen. I bägge fallen befanns frostskada vara i högsta grad tänkbar. Bedömningen gjordes efter jämförelse mellan uppmätta fukthalter och bedömda kritiska fukthalter.

Mätningar av i praktiken uppnådda vattenhalter har också gjorts i samband med en undersökning av byggnadsminnesmärket Månstorps Gavlar. Härvid jämfördes de i praktiken uppmätta S_{AKT} med laboratorievärden på S_{AKT} och S_{KR}. Resultaten visas nedan i punkt 10 . Undersökningen har utförts som examensarbete av Mattsson & Mazlumolhosseini /1970/.

Mätmetoderna för fukt kan vara av två typer:

destruktiva
icke destruktiva

Enklast är de destruktiva vid vilka ett prov huggs ut och torkning sker vid +105°C.

De icke destruktiva metoderna är avsevärt mycket mera komplicerade. Fördelen med dem är dock att man kan mäta fuktvariationer under längre tid. Adamson & al /1970/ har publicerat en sammanställning av mätmetoder.

In situ mätningar av fukt i olika konstruktionsdelar har utförts i en hel del länder. Exempel på sådana mätningar är:

Ritchie & Davisson /1968/ som i provväggar murade utomhus i Kanada av olika murverksmaterial funnit fukthalter som motsvarade mer än 24 timmars vattenabsorption vid neddoppning. Dessa stora fukthalter fanns i tre olika tegelsorter av fyra testade och i ett murbruk av tre testade. Fuktkvoter mellan 90 och 99 % av 24 timmars absorptioner fanns i de båda andra murbruken och i den enda sandstenen. Det sista teglet och det enda betongblocket hade absorptioner mindre än 80 % av 24-timmarsvärdet. De angivna fukthalterna uppmättes under vintersäsongen 1963-64.

Künzel /1964/ har mätt fuktfördelningen i väggar av månghålstegel och pimpstensbetong två år efter uppförandet. Väggarna ingår i två försökshus i Tyskland. Nordväggarna hade maximala fuktkvoter av 3,5 % i teglet och 11 % i pimpstensbetongen. Västväggen var betydligt fuktigare, 9,5 % resp 22 %. De senare värdena är mycket höga.

Hanson /1962/ har studerat fuktinnehåll i tak av gasbetong. Fukthalter ända upp till 15 à 20 volym-% har uppmätts vid densitet 500 kg/m^3

hos materialet. Det motsvarar en porfyllnadsgrad av 0,18 à 0,25.

Holmgren & Isaksen /1959/ har studerat fukttillståndet i ett stort antal yttertak. Fuktinnehållet i gasbetongtak varierade mellan 1,7 och 26,7 volym-%. Den högsta siffran uppmättes över en fuktig lokal. Den motsvarar en porfyllnadsgrad av 0,33. Normalvärden var 10-15 volym-%.

I Anonym /1967/ redovisas mätningar i 17 olika gasbetongtak med densiteter 550-750 kg/m^3 utan ångspärr på undersidan. Resultatet av 102 mätningar visar att i 90 % av fallen överskrids inte 3,2 volym-% i fukthalt. Fukten var dessutom i samtliga fall jämnt fördelad i materialet. Dessa data strider alltså mot dem redovisade ovan, vilket kan bero på att tak över lokaler av helt olika typ undersökts i de olika undersökningarna.

Ytterligare information om fukthalter i väggar och tak återfinns i Frank & al /1966/ och Caemmerer & al /1968/.

Fukttillstånd i tegeltakpannor är mycket studerade, vilket troligen beror på de mycket stora skadefrekvenserna.

Schellbach /1964/ har studerat vattenhalter i tegeltakpannor som funktion av taklutningen. De uppmätta värdena motsvarade som mest en porfyllnadsgrad av 70 à 77 % vid taklutningar av 15^o-35^o. Dessa porfyllnadsgrader var mer än de som erhölls vid 3 dygns vattenlagring.

Liger /1957/ refererar försök med tegeltakpannor, upplagda på ett försökstak i Frankrike. Maximala vattenhalter är 13,9 à 14,6 vikt-%, vilket motsvarar porfyllnadsgrader av 80 à 85 %.

Även Schneider /1962/ har mätt vattenhalter hos taktegel. Vid snösmältning uppnåddes på två tak fuktkvoter i pannorna av 11 % och 13,6 %. Detta motsvarar vattensugning vid doppning under 2 till 8 dygn d v s mycket stor fuktbelastning. Efter ett regn uppnåddes ännu högre vattenhalter. De motsvarade i detta fall 4 till 18 dygns vattenlagring.

Amrein & Gloor /1963 A, B/ har studerat vattenhalter i taktegel i Schweiz dels i praktiken, dels vid regnförsök i laboratoriet. På grundval av mätningarna föreslår man att följande metodik skall användas vid vattenlagring av provkroppar före frysförsök:

Stark fuktbelastning (Alpklimat) tvångsvis fyllning av uttorkade provkroppar med undertryck. Resttryck 200 à 300 Torr.

Normal frostbelastning. Kapillär vattenuppsugning + 5 dagars vattenlagring.

Bägge dessa metoder ger mycket höga fukthalter hos vissa material. Författarna visar dock med resultat att de är erforderliga. För fyra undersökta fabrikat av takpannor var de uppmätta fukthalterna på taket uttryckta som porfyllnadsgrad 4,7 %, 4,2 %, 4,5 % och 4,8 % större än 5-dygnsabsorptionen men 8 %, 8,7 %, 6,9 % och 1,5 % mindre än absorptionen efter vacuumbehandling till 200 torr resttryck. Värdena har uppmätts på 16 st olika ställen för varje tegeltyp och är därför väl dokumenterade.

Bergmann /1955/ har även studerat fuktfördelningen i bl a takpannor av tegel utlagda på provtak. Medelvärdena av fuktinnehåll efter en kort regnskur uppgick ungefär till hälften av de vattenmängder, som absorberades av pannorna under tre dygn, medan vid snösmältning de kunde bli betydligt större. Variationen längs en och samma takpanna var dock utomordentligt stor. Förhållandet mellan max- och min-värdet på fuktkvot inom samma panna var maximalt 2,57 och minimalt 1,23 med ett medelvärde av 1,48. Antalet pannor var 9.

Vid kapillärsugning i tre dygn hos samma pannor uppnåddes nästan lika stora variationer i fukthalter längs pannorna. Medelvärdet mellan max- och min-värdesförhållandena blev då 1,33.

Sådana faktorer som ojämn materialkvalitet måste alltså beaktas när en in situ mätning av fukt för bedömning av frostbeständighet görs.

Enckell /1970/ har studerat fuktinnehållet hos betongelement försedda med täta ytor av glaserade keramiska plattor. Författaren refererar en undersökning i Finland enligt vilken "konstaterades ett betydligt högre fuktinnehåll bakom keramiska plattor än vid övriga betongytor". Vid keramiska plattor var medelfuktkvoterna i elementet 6,9 % i yttre halvan och 6,8 i inre halvan d v s fuktprofilen var jämn. Vid borstade och målade betongelement var medelvärdena 4,1 % resp 6,0. Yttre hälften var alltså här torrare, vilket naturligtvis har en stark frostbeständighetshöjande effekt. Värdena är höga. De ligger klart inom risken för frostskador hos denna betong, som hade viktproportionerna 1:6,5:0,56 utan luftinblandning. 6,9 vikt-% fukt motsvarar nämligen för denna betong en porfyllnadsgrad av 0,98 under förutsättning av en hydratationsgrad av 60 % och en mängd bearbetningsporer av 3 %.

Detta har också visats vid en test där tre provkroppar frusits ner till -20°C tre gånger under en 2 veckors period. Vidhäftningen betong-platta minskade därvid markant för alla tre plattorna jämfört med ofrusna provkroppar.

Förbluffande nog har inte några väsentliga undersökningar där naturliga fukttillstånd hos betong mätts kunnat uppbringas. Kanske är denna brist en yttring av den ofta förekommande negativa inställningen till vattenhaltens fundamentala betydelse vid uppkomsten av frostskador, som man ofta finner bland betongforskare.

Vad som förvånar vid en litteraturgenomgång enligt ovan är de mycket höga vattenhalter som uppnås i naturen. De är ofta i närheten av sådana kritiska vattenmättnadsgrader, som uppmäts vid laboratorieförsök, vilket dels stöder användbarheten av ett uttryck av typ (11) för bedömning av frostbeständighet, dels stöder de vattenuppsugningsexperiment som föreslås ovan i punkter 6.2-6.5 för bedömning av aktuella vattenmättnadsgrader.

7 EXPERIMENTELLA RESULTAT AV FLERCYKELFRYSNINGAR

7.1 Inledning

Förekomsten av väldefinierade kritiska vattenmättnadsgrader betraktades, när denna undersökning påbörjades, som en hypotes. Många författare förnekade kategoriskt att de överhuvudtaget skulle kunna existera, se Fagerlund/1973A/.

Ett kraftigt stöd för deras möjliga existens fanns dock i ett arbete av Warris/1964/.

Arbetet påbörjades dock i ett slags negativ grundstämning. Det verkade orimligt vid ett hastigt påseende att en provkropp med en porvolym av 8 cm^3 för en asbestcementprodukt eller 30 cm^3 för ett tegel skulle vara frostbeständig vid en viss vattenhalt medan 0,24 cm^3 resp 0,9 cm^3 extra vatten, vilket motsvarar en ökning i S_e av 0,03, skulle vara förödande med avseende på frostbeständigheten. En precision av ±0,03 i absolut vattenmättnadsgrad ansågs nämligen erfordras om de kritiska vattenmättnadsgraderna skulle kunna vara praktiskt användbara.

Redan de första frysningarna som utfördes med ett hårdbränt tegel som testmaterial gav emellertid mycket uppmuntrande resultat. Det kritiska värdet var knivskarpt definierat. Undersökningen fortsattes därför med några andra material med lika lyckat resultat.

Sedermera har ett stort antal olika byggnadsmaterial testats. I samtliga fall har kritiska vattenmättnadsgrader kunnat bestämmas. Värdet är oftast mycket väldefinierat. För vissa material är det mera osäkert och kan endast anges inom vissa gränser.

De kritiska vattenmättnadsgraderna kan anta helt skilda värden. Det lägst uppmätta, S_e=0,22, gäller för en hålrumsbetong av expanderad lera medan det högsta, S_e=0,92, gäller för en tegeltakpanna.

Undersökningsmaterialet är mycket stort. Antalet frystestade provkroppar är i dagens läge mer än 1000. Undersökningarna fortsätter dock kontinuerligt mer eller mindre som rutintester.

För närvarande styrs dock undersökningarna in mot problemet frysning i kombination med saltning. Hypotesen är att på samma sätt som det existerar kritiska vattenmättnadsgrader borde det existera "kritiska saltvattenmättnadsgrader". Dessa borde kunna vara mindre än de vanligt värdena, eftersom krafter av osmotisk natur bör överlagra de vanliga spänningarna som förorsakas av hydrauliskt tryck. Man bör även få en inverkan av salthalten. Några resultat av dessa studier, som utförs på betongmaterial, redovisas inte i denna rapport.

Försöksmetodiken bakom de resultat som redovisas nedan är den som angivits ovan i kapitel 4. Där flera metodiker är tänkbara anges i så fall vilken som använts i tabell 2.

7.2 Testade material

Kritiska fukthalter har bestämts för följande materialtyper och materialkvaliteter. Materialegenskaperna redovisas under punkter 7.4-7.5.

7.2.1 Tegelsten

Material nr 1; Lösbränt gult tegel. Teglet har tagits ur det understa lagret vid en bränning i tunnelugn.

Materialet är underindelat i två grupper, a och b, efter vattenabsorptionsförmågan vid sugning från vattenyta:
1 a: Vattenupptagning 0,3 à 0,45 g/cm^2 under första 5 min.

1 b: Samma vattenupptagning 0,45 à 0,64 g/cm^2.

Material nr 2; Hårdbränt gult tegel. Teglet har tagits ur det näst övesta lagret vid samma bränning som för material 1.

Materialet är underindelat i två grupper, a och b, efter vattenabsorptionsförmågan vid sugning från vattenyta:
2 a: Vattenupptagning 0,04 à 0,08 g/cm^2 under första 5 min.

2 b: Samma vattenupptagning 0,08 à 0,11 g/cm^2.

Material nr 3; Rött håltegel typ gittertegel. Materialet är underindelat i två grupper:
3 a: Provkroppar uttagna vid stenens löpyta.

3 b: Provkroppar uttagna inne i stenen.

Material nr 4-6; Tre tegelsorter som använts vid byggnadsminnesmärket Månstorps gavlar:
4: Ursprungligt tegel från 1500-talet.

5: Tegel från 1930-talet som använts för restaurering.

6: Tegel från 1960-talet som använts för restaurering.

7.2.2 Kalksandsten

Material nr 7; Materialet innehåller korn av kvarts inbakade i grundmassan.

7.2.3 Högtrycksånghärdad gasbetong

Material nr 8; Gasbetong typ 1: Nominell densitet 500 kg/m^3. Råmaterial cement + sand.

Material nr 9; Gasbetong typ 2: Nominell densitet 500 kg/m^3. Råmaterial kalk + sand.

Material nr 10; Gasbetong typ 3: Nominell densitet 500 kg/m^3. Råmaterial kalk + sandsten.

Material nr 11; Gasbetong typ 4: Nominell densitet 500 kg/m^3. Råmaterial kalk + kvartsit.

7.2.4 Cementbruk

Material nr 12; Vattencementtal 0,54. Ballast:cement = 4:1. "Färsk lufthalt" = 7,4 %. Härdningsgrad före test = 0,60.

Material nr 13; Vattencementtal 0,64. Ballast:cement = 4:1. "Färsk lufthalt" = 6,0 %. Härdningsgrad före test = 0,72.

Material nr 14; Bruk typ Sarabond. Vattencementtal 0,535. Ballast:cement = 3,33:1 Mängd Sarabond:cement = 1:2,8 (Sarabond är en vatten-plast emulsion som ger förbättrad vidhäftning tegelsten-murbruk). Beräknad lufthalt = 6,2 %. Ålder vid test = 1 månad.

Material nr 15; Bruk typ Sarabond. Vattencementtal 0,488. Ballast:cement = 3,33:1. Mängd Sarabond:cement = 1:2,8. Beräknad lufthalt = 8,4 %.
Ålder vid test = 1 månad.

7.2.5 Kalkcementbruk

Material nr 16; KC-bruk typ 35/65/550; Vattencementtal = 1,283. Vatten-bindemedelstal = 0,833. "Färsk lufthalt" = 13,5 %. Provkropparna lagrade i plastpåsar under 2 år före test.

7.2.6 Asbestcementprodukter

Material nr 17; Internit. Innehåller cellulosafibrer.
Materialet är underindelat i två grupper a och b:
17_a: Provkropparnas kanter är oförseglade.
17_b: Provkropparnas kanter är förseglade med vax.

Material nr 18; Löspressad plan platta av asbestcement.
Materialet är underindelat i två gruppet enligt samma principer som material 17.

Material nr 19; Hårdpressad plan platta av asbestcement.
Materialet är underindelat i två grupper enligt samma principer som material 17.

Material nr 20; Vanlig sinuskorrugerad asbestcement, pigmenterad svart.
Materialet är underindelat i tre grupper:
20_a: Utsågade ur vågtopp.
20_b: Utsågade mellan vågtopp och vågdal.
20_c: Utsågade ur vågdal.

Material nr 21; Grå plan asbestcement pressad med 120 kp/cm^2 utan ytbehandling, 5 mm tjock.

Material nr 22; Grå plan asbestcement opressad utan ytbehandling, 8 mm tjock.

Material nr 23; Grå plan asbestcement pressad med 120 kp/cm^2 utan ytbehandling, 8 mm tjock.

Material nr 24; Plan pigmenterad asbestcement, torrformad.

Material nr 25; Sinuskorrugerad asbestcement med påsprutad svart akrylfärg. Utsågad ur vågtopp.

Material nr 26; Plan asbestcement med påsprutad gul silikatfärg. Pressad med 120 kp/cm^2.

Material nr 27; Plan asbestcement med påsprutad svart akrylfärg, torrformad.

7.2.7 Betonger med ballast av expanderad lera

Material nr 28; Hålrumsbetong typ "Svenska Lecablock". Nominell densitet 650 kg/m^3. Materialet innehåller ingen natursand.

Material nr 29; Hålrumsbetong typ "Svenskt Lecablock". Nominell densitet 1300 kg/m^3. Materialet innehåller natursand.

Material nr 30; Hålrumsbetong typ "Norskt Lecablock". Bindemedel av portlandcement. Materialet innehåller ingen natursand.

Material nr 31; Hålrumsbetong typ "Norskt Lecablock". Bindemedel av 67 % portlandcement + 33 % stenmjöl. Materialet innehåller ingen natursand.

7.2.8 Betonger med grov ballast av pimpsten

Sex olika betongsatser göts. I samtliga eftersträvades en naturgrusmängd av 18 vol-%, en cementhalt av 380 kg/m^3, en lufthalt av 4,5 % i cementpastan, en vattenmängd som gav trögflytande konsistens, en torr pimpstensmängd av 400 kg/m^3 vid en torr densitet av ungefär 645 kg/m^3.

En av avsikterna med dessa betonger var att studera inverkan av vattenmättnadsgraden i ballasten på betongens frostbeständighet vid färsk ålder. Därför varierades graden av vattenlagring av pimpstenen före gjutning. Dels hölls stenen "naturfuktig", dels besprutades den med vatten omedelbart före testen, dels dränktes den helt under vatten ett halvt dygn före gjutningen. Eftersträvade fuktkvoter i ballasten var 20 %, 50 % och 80 %. Dessutom varierades sättet för blandning. Vid blandningsordning 1 hälldes först pimpsten + blandningsvatten i blandaren. Efter 1/2 min hälldes resten av satsen ner i blandaren och blandades i 2 1/2 min. Detta är det rekommenderade sättet att blanda en lättballastbetong för att undvika ett alltför snabbt tillstyvnande av satsen. I blandningsordning 2 tillverkades först en seg cementpasta vari pimpstenen blandades ner under 1/2 min. Därefter hälldes resten av satsen ner och blandades 2 min. Tanken är här att undvika alltför stor vatteninsugning i pimpstenen genom att täta dennas ytliga porer med cementpasta.

Genom de helt okontrollerade vatteninsugningarna i ballasten tillsammans med obekanta fuktkvoter i ballasten vid blandningstillfället och osäkerheter vid bedömning av konsistensnivån kom de sex blandningarna att få helt olika karakteristika. Framförallt är tätheten hos cementpastan starkt varierande. Materialen betraktas därför fortsättningsvis som sex olika material. Volymsammansättningen hos betongerna är osäker:

Material nr 32; Blandningsordning 1. Fuktkvot i ballast = 40 %. Mätt lufthalt 9,0 % (inkl vissa porer i pimpsten). Troligt vct = 0,44.

Material nr 33; Blandningsordning 1. Fuktkvot i ballast = 70 %. Mätt lufthalt = 9,6 %. Troligt vct = 0,36.

Material nr 34; Blandningsordning 1. Fuktkvot i ballast = 80 %.
Mätt lufthalt = 7,1 %. Troligt vct = 0,36.

Material nr 35; Blandningsordning 2. Fuktkvot i ballast = 40 %.
Mätt lufthalt = 11,0 %. Troligt vct = 0,43.

Material nr 36; Blandningsordning 2. Fuktkvot i ballast = 70 %.
Mätt lufthalt = 10,2 %. Troligt vct = 0,37.

Material nr 37; Blandningsordning 2. Fuktkvot i ballast = 80 %.
Mätt lufthalt = 10,8 %. Troligt vct = 0,40.

7.2.9 Betong med och utan fiber

I samarbete med civ ing Lars-Göran Mattisson vid avd Byggnadsmaterial-lära har inverkan av en fiberarmerng på frostbeständighet studerats.

De två använda betongerna har ungefär samma sammansättning förutom fibererna. De har samma härdningsgrad.

Material nr 38; Utan fibrer: Ballast:cement = 4,1:1, vct = 0,52.
"Färsk lufthalt" = 2,0 %.

Material nr 39; Med fibrer: Ballast:cement = 4,0:1,vct = 0,51.
"Färsk lufthalt" = 1,2 %. Fibervolym = 1,5 vol-%.
Fiberstorlek ϕ 0,3 mm, längd 25 mm. Fibertyp stål.

7.2.10 Takpannor av betong

Material nr 40; Takpannan är tvåkupig,svartpigmenterad.
Materialet är underindelat i två material, a och b:
40 a: Vågtopp
40 b: Vågdal

7.2.11 Takpanna av tegel

Material nr 41; Takpannan är tvåkupig, röd.
Materialet har underindelats i två material, a och b:
41 a: Vågtopp
41 b: Vågdal

7.3 Provkroppsstorlekar, form, antal och urval

Tänkbara effekter av provkroppsstorlekar på den kritiska vattenmättnadsgradens storlek har diskuterats under punkt 4.2.1 . Där framförda synpunkter har beaktats vid valet av provkroppsstorlekar.

Provkropparnas form har bestämts av att tillförlitliga bestämningar av dynamiska E-moduler vid böjsvängning skall kunna utföras. Se punkt 4.2.1.

Provkroppsstorlekarna för de olika materialtyperna har införts i tabell 2.

De kan indelas i tre huvudtyper:

1. 30 x 30 x 120 mm^3
2. 40 x 40 x 120 à 160 mm^3
3. Ytmått 30 x 100 à 120 mm^2. Tjockleken begränsas av materialets tjocklek. (Takpannor, asbestcement).

Antalet provkroppar har varit starkt varierande för olika material. Största antalet är 106 för hårdbränt tegel och minsta antalet är 5 st för en betong med ballast av pimpsten. Ett normalt antal provkroppar av samma material är 25 à 30 st.

I tabell 2 tabelleras antalet provkroppar av olika material.

Beträffande urval av provkroppar hänvisas till avsnitten 4.2.2 och 7.2.

7.4 Porositeter och densiteter före frysning

Metodiken för porositets- och densitetsbestämningar har genomgåtts i avsnitt 4.3.2.

För vissa material har skrymdensitet och porositet bestämts för alla provkroppar, som frystestats. För andra material har motsvarande karakterisering endast gjorts för ett par provkroppar, som ansetts få representera alla provkroppar.

Det antal provkroppar varpå densitets- och porositetsuppgifterna baseras, tabelleras tillsammans med mätta värden i tabell 3.

Data beträffande de fyra materialen med expanderad lera som ballast (mat. 27-30) är mycket osäkra , jfr punkt 4.3.2 ovan. I tabell 3 har därför porositeterna beräknats ur ekv (65) med en antagen kompakt densitet av 2650 kg/m^3. I dessa porositetsvärden ingår också porer mellan de grova lättballastkornen eftersom dessa inberäknats i skrymdensitetsvärdet. För dessa material spelar emellertid inte porvolymen så stor roll eftersom de kritiska fukthalterna lämpligen uttrycks med fuktkvoter.

I tabellen ges totalporositeter eftersom det är dessa som bestäms vid den normala metoden. Vissa material har emellertid en speciell porstruktur som är intressant ur frostbeständighetssynpunkt.

Strukturen kan karakteriseras av att en viss andel av porerna, som kan betraktas som makroskopiska, är kringströdda i en grundmassa som är betydligt mera finporös. Typexempel på sådana material är gasbetong med sina grova sfäriska bubblor och luftinblandad betong,där luftinblandningsporerna är grövre än de övriga porerna. Även tegel har ofta en liknande struktur. Se t ex Amrein /1964/, Amrein & al /1963/, Amrein & Gloor /1968/, Fagerlund/1972A/.

Man kan teoretiskt visa att sådana porer inte fyller sig vid en vattenlagring av provkroppen, Fagerlund/1972C/. Deras volymandel är därför ytterst intressant, eftersom de således bidrar till värdet ℓ i uttrycket (3) för vattenmättnadsgrad.

Man kan bestämma deras volym med s k stereometriska metoder. Detta har gjorts för två tegelsorter (mat. nr 1 och 2) och två gasbetonger (mat. nr 8 och 10). Arbetet gjordes som examensarbete av Sahlström & Thörner /1971/. Provkroppar med ytan 30 x 30 cm^2 slipades ner så att en relativt plan yta erhölls. Provkropparna monterades på ett mikroskophord och belystes med släpljus så att porerna framträdde tydligt. Hela ytan fotograferades i mikroskopet så att bilder med förstoringsgraden 30 för teglen och 20 för gasbetongerna erhölls.

Bilderna monterades ihop till en stor bild av materialet. Räta linjer lades ut godtyckligt över den stora bilden, varefter avskurna "porkordors" längd mättes. Volymandelen av de grova porerna fås ur följande ekvation. Se t ex Warris /1963/

$$\ell_\ell = \frac{\Sigma x_k}{TOT} \qquad (129)$$

Värden från mätningarna är angivna i tabell 3.

För cementbruk och betong med icke porös ballast kan motsvarande mängd grova porer beräknas ur följande ekvation

$$P = \frac{C}{1000}(vct - 0{,}19\alpha) + \ell_B \qquad (78)$$

I denna ekvation utgör ℓ_B de grova bearbetningsporerna eller luftporerna. För att kunna använda ekvationen krävs att totala porositeten bestäms på

sedvanligt sätt och att materialets sammansättning är känd. Ekv(78) har använts för de båda Sarabondbruken (mat. nr 14 och 15). Tillsatsmedlet har här haft en luftporbildande effekt vars storlek dock varit obekant.

För cementbruk och betong kan de grova, vid gjutningen luftfyllda porerna, bestämmas direkt vid tillverkningen. Detta har gjorts för två cementbruk, ett KC-bruk, 6 pimpstensbetonger (och två betonger (mat nr. 12, 13, 16, 31-37, 38, 39). Dessa värden är införda i tabell 3.

Alla dessa data är dock behäftade med vissa fel. De grova porernas mängd minskar nämligen under härdningen, Warris /1969/ och beträffande pimpstensbetongerna ingår även en del av porerna inne i pimpstenskornen i det mätta värdet.

Man kan även få fram porstorleksfördelningar för de mindre porerna, <0,1µ, genom att analysera data över icke frysbara vattenmängder. En ekvation för detta är(83). Fagerlund/1972C/ diskuterar den teoretiska bakgrunden till denna ekvation och anger även en metodik för själva beräkningen. Ett stort antal porstorleksfördelningar, bl a för här använda material, tillsammans med icke frysbara vattenmängder som funktion av temperaturen och adsorptionsisoterm beräknad enligt ekv (85) kommer att publiceras i ett senare arbete, Fagerlund/1973B/. Rådata, som framtagits i den adiabatiska kalorimetern enligt punkt 4.3.3 , är för närvarande under bearbetning.

Några försök är dock redan beräknade. Tre av de framräknade porstorleksfördelningarna visas i fig 99 .

Ur tabell 3 kan bl a följande slutsatser dras:

- Spridningarna i såväl skrymdensiteter som öppna porositeter är relativt små. Medelvärdet av variationskoefficienterna för samtliga 41 material är

  1,25 % beträffande skrymdensitet
  2,20 % beträffande öppen porositet

Enskilda värden kan dock uppgå till 5 % resp 7 %. Det är intressant att notera att sådana material som tillverkats i vårt eget laboratorium d v s nr 12, 13, 16 (bruk), nr 32-37 (pimpstensbetonger) och nr 38,39 (betonger) har spridningar som är större än många material,som inlevererats av utomstående tillverkare.

- Variationer av densitet och porositet inom samma materialenhet kan vara stor. Detta framgår av material 20. Delarna a), b) och c) är utsågade ur samma asbestcementskiva men på olika ställen. Porositetsvariationen är påfallande stor, vilket motiverar idén att dela upp ett sådant material. Detsamma gäller gitterteglet (nr 3) men inte i lika hög grad betongtakpannan (nr 40) eller tegeltakpannan (nr 41).
- De slutna porositeterna blir ibland negativa, vilket naturligtvis ligger i oprecision i bestämningarna. Värdena är genomgående så låga för alla undersökta material, att den slutna porositeten kan anses vara noll.
- De låga värdena på sluten porositet tyder på att den metod som använts för bestämning av öppen porositet varit tillfredsställande, vilket ibland ifrågasatts av vissa forskare vid samtal med författaren.

7.5 Icke frysbara vattenmängder

Experimentella icke frysbara vattenmängder har bestämts för ett stort antal material. För en del av dessa har även kritiska fukttillstånd bestämts.

De experimentella metoderna är de två som beskrivits ovan under punkt 4.3.3 och 5.3.3 nämligen:

- huvudmetoden; adiabatisk kalorimeter 4.3.3
- bimetoden; differenskalorimeter 5.3.3

Det finns emellertid vissa möjligheter att bedöma icke frysbara vattenmängden även på andra sätt.

I ekv (85) visas ett tänkbart samband mellan relativt ångtryck över vattenmenisken i en kapillär och fryspunktsnedsättningen hos kapillärvatten. Vet man därför hur sorptionsisotermen för vattenånga vid t ex +20°C ser ut, kan man beräkna hur mycket vatten som är icke frysbart vid olika minustemperaturer.

Här föreligger dock framförallt problemet hysteresis mellan absorptions- och desorptionsisotermer. Den förra ger ibland avsevärt mycket större värden på icke frysbara vattenmängdern än den senare. Powers & Brownyard /1948/ visar emellertid att issmältning närmast är en absorptionsprocess medan isbildning är en desorptionsprocess. I så fall skulle experimenten i adiabatiska kalorimetern, som är upptiningsexperiment, närmast motsvara absorptionskurvan medan experimenten i differenskalorimetern, som är frysexperiment, skulle motsvara desorptionskurvan. Storleken av hysteresis mellan issmältning och isbildning som ofta finns vid samma temperatur skulle alltså kunna bedömas med ledning av hysteresisen i sorptionsisotermerna.

Ur ekv (85) kan beräknas följande samband mellan frystemperatur och relativt ångtryck:

Fryspunkt -5°C motsvarar relativt ångtryck 95,5 %
- " - -10°C - " - - " - - " - 91,0 %
- " - -20°C - " - - " - - " - 82,0 %

Ahlgren /1972/ har bestämt såväl desorptions- som absorptionsisotermer för ett antal av de provkroppar som använts vid frysexperimenten. Dessa isotermer har därför kunnat användas för bedömning av icke frysbara vattenmängder. Genom jämförelse av icke frysbara vattenmängder, bestämda från isotermen med experimentellt bestämda, kan dessutom giltigheten av ekv (85) bedömas d v s indirekt även giltigheten av ekv (83) som utgör basen för den nya metod för beräkning av porstorleksfördelning, som framförs i Fagerlund/1973C/.

För material med cementpasta som bindemedel kan icke frysbara vattenmängder beräknas ur ett uttryck av följande typ under förutsättning av att allt vatten i ballasten är frysbart

$$\frac{w_{if}}{C} = k \cdot \frac{w_n}{C} = k \cdot 0{,}25 \cdot \alpha \qquad (130)$$

Värden på k har bestämts av Powers & Brownyard, se sid 84 . Warris /1964/ anger det generella värdet k = 1,5.

Porositeten för ett sådant material fås ur ekv (131) i vilken även införts en term för ballastens porositet.

$$P = \frac{C}{1000}(w_o/C - 0{,}19\alpha) + \ell_B + P_B \qquad (131)$$

Därför kan konstanten K (ekv (7)) uttryckas

$$K = \frac{w_{if}}{P} = \frac{k \cdot 0{,}25 \cdot \alpha \cdot C \cdot 10^{-3}}{\frac{C}{1000}(w_o/C - 0{,}19) + \ell_B + P_B} \qquad (132)$$

Känner man sammansättningen och härdningsgraden hos materialet kan nu värdet K beräknas ur ekv (132).

Datorbehandling av icke frysbara vattenmängder bestämda i adiabatisk kalorimeter pågår. Vissa resultat är framräknade och införda i tabell 4. Övriga värden liksom teoretiska beräkningar av porstorleksfördelningen och sorptionsisotermens utseende i området RH = 80 % - 100 % kommer att publiceras i ett annat arbete. Fagerlund/1973B/.

Värden från differenskalorimetern är också införda i tabell 4. Endast ett fåtal material har testats i denna apparatur. Värdena är enbart approximativa.

Värden beräknade ur Ahlgrens /1972/ sorptionsisotermer och ur ekv (132) har också lagts in i tabell 4.

I tabellen anges endast tre temperaturområden, -5^oC à -7^oC, -10^oC à -12^oC, -20^oC.

Följande slutsatser kan dras;

- De icke frysbara vattenmängderna är normalt små, <10 % av porvolymerna vid -20^oC. För material med cementpasta som bindemedel kan de däremot uppgå till >50 % av porvolymerna.

  Trots att de icke frysbara vattenmängderna är små t ex för gasbetong blir effekten på effektiv vattenmättnadsgrad, ekv (3), betydelsefull eftersom även de kritiska vattenhalterna är små och den icke frysbara vattenmängden är relativt opåverkad av total vattenhalt. Fagerlund /1973C/.

- Nedfrysningsexperimenten ger genomgående något högre värden på icke frysbara vattenmängder än upptiningsexperimenten, vilket är logiskt. Skillnaderna är emellertid små i de allra flesta fall.

- Överensstämmelsen mellan experimentellt bestämda icke frysbara vattenmängder och sådana beräknade ur absorptionsisotermen är oftast mycket god, t ex för material nr 1, 2, 7, 20 och 28. I två fall är överensstämmelsen bristfällig, nr 17 och 18. I bägge dessa fall har hydratationsgraderna varit olika vid de båda testerna. Bestämningen av isotermerna gjordes något år före bestämningen av icke frysbar vattenmängd. Denna föregicks av lång tids vattenlagring. I fig 69 visas att hydratationerna hos dessa båda produkter är avsevärd vid vattenlagring. Med användning av ekv (132) kan man visa att vid en cementhalt av 800 kg/m^3 och ett vattencementtal av 0,40 innebär en hydratationsgradsökning från 60 % till 80 % en ökning i värdet K av (0,385-0,290) = 0,095, vilket kan jämföras med diskrepensen i tabellen som utgör 0,147 och 0,092. Att effekten av lagringstid blir så stor för just dessa två material kan eventuellt bero på att materialen är mycket porösa, vilket skapar utrymme för en fortsatt hydratation. Experimentella resultat tyder nämligen entydigt på att hydratationsgraderna vid en viss tid ökar kraftigt med ökande totalporositet. Fagerlund/1972F/.

  För den hårdpressade asbestcementen (material nr 20) gäller samma lagringsförhållanden som för de båda andra materialen utan att för den skull någon diskrepens mellan de båda bestämda värdena på icke frysbar vattenmängd föreligger. Detta skulle i så fall förklaras av att hydra-

tationen går långsammare för det tätare materialet. Se även fig 69 f.

- Överensstämmelsen mellan beräkning från desorptionsisotermen och experimentella värden i kolumn 1 är betydligt mera bristfällig. Powers & Brownyards /1948/ resonemang om att issmältning är en absorptionsprocess styrks alltså av försöksresultaten.
- En ekv av typ(132) för beräkning av icke frysbara vattenmättnadsgrader för material med bindemedel av cementpasta ger någorlunda god överensstämmelse med försöksdata om Powers & Brownyards /1948/ värden på koefficienten k används. Warris /1964/ värden ger genomgående för stora icke frysbara vattenmängder.

Den goda överensstämmelsen mellan experimentella värden och värden beräknade ur absorptionsisotermen är mycket intressant eftersom det skulle innebära att några speciella experiment för bestämning av icke frysbara vattenmängder inte skulle behöva göra om absorptionsisotermerna är kända. Det är heller inte nödvändigt att känna hela isotermens förlopp utan endast den punkt som motsvarar lägsta frystemperatur, vilket i fallet $-30^{o}C$ innebär ett relativt ångtryck av ≈75 %. Denna punkt är avsevärt mycket lättare att bestämma experimentellt än punkten vid högre ångtryck. Känner man dessutom motsvarande punkt på desorptionskurvan ringas maximala och minimala icke frysbara vattenmängder in.

För närvarande pågår bestämningar av sorptionsisotermer för ett större antal av de material för vilka icke frysbara vattenmängder bestämts. Därmed kommer att erhållas ännu mer information om sambanden mellan sorptionskurvor och fryspunktsnedsättningar. Eventuellt styrks därvid giltigheten av ekv (85) ytterligare. Dessa forskningsresultat kommer att publiceras senare.

7.6 Kritiska fukttillstånd

7.6.1 Inledning

Nedan redovisas resultaten av flercykelfrysningarna för de olika materialen.

P g a det stora försöksmaterialet kan dock inte varenda enskilt mätresultat anges. Tanken har emellertid varit att dels i figurform ange väsentliga resultat för varje enskilt material och dels i tabellform komplettera figurerna med en del ytterligare information.

I figurer och tabeller har angetts värden på kritiska fukttillstånd. De kriterier som bör användas för att få fram dessa värden är i huvudsak följande, Fagerlund/1971A/:

1. Skador uttryckta med E-modulförlust eller på annat sätt får inte överstiga ett visst värde oavsett antalet cykler.
2. Eventuella skador får inte öka med ökande antal fryscykler vid konstant vattenmättnadsgrad.

Kriterium 1 kan vara svårt att tillämpa eftersom ganska stora skador vid första fryscykeln kan uppstå trots att vattenhalten är låg. Om dessa skador inte fortsätter att öka vid ökande antal cykler kan den första skadan normalt accepteras. På samma sätt kan relativt små skador uppstå vid t ex första fryscykeln vid vattenhalter som är mycket höga och som vid ett ökande antal cykler ger ökande skador. I detta fall kan den första skadan inte accepteras.

Principiellt sett är dock kriterium 1 vettigt. Storleken av den acceptabla skadan blir beroende av i vilken utsträckning materialets hållfasthet är utnyttjad av andra belastningar. För bedömning av hållfasthetsreduktioner kan ekv(113) användas.

Kriterium 2 kan i normalfallet anses innefatta även kriterium 1 och är därför det mest användbara. Även här förekommer dock fall där relativt små vattenhalter medför skador vid 1:a frysningen och där ett ökande antal cykler ger något ökande skador. Normalt är emellertid dessa ökningar försumbara och medför frostbeständighet enligt kriterium 1.

Kriterium 2 är vettigt därför att det är härlett från det faktum att frostskador är en följd av engångsbelastningar och inte av utmattning.

Alla material har vissa spridningar i materialegenskaper. Därför kan man inte förvänta sig att få fram en knivskarp kritisk vattenmättnadsgrad. Det visar sig emellertid mycket ofta i ett diagram över frostskador som funktion av vattenhalt att två separata områden kan urskiljas. Det ena området gäller för provkroppar med måttlig ökning av skador med ökande vattenhalt. Det andra området gäller för provkroppar med högre vattenhalter. Här sker normalt en mycket stor ökning av skador med ökande vattenhalt.

Om därför två linjära samband frostskador som funktion av vattenhalt läggs in i diagrammet fås ofta en knickpunkt där de båda linjerna skär varandra. Se t ex fig 116. Denna knickpunkt har i fortsättningen ofta använts som definition på den kritiska vattenhalten.

Förekomsten av en knickpunkt är egentligen ingenting annat än en konsekvens av kriterium 2 d v s av frostskadans korttidskaraktär.

Vill man undvika att testa skador mer än en enda gång är knickpunktsmetoden den enda tänkbara metoden för indikering av värdet S_{KR}. Kriterium 2 är då oanvändbart.

Knickpunktsvärdet bör principiellt sett kompletteras med en information om vad ett överskridande innebär. En jämförelse av teglet, material nr 2 i figur 105 och kalksandstenen, material nr 7, i figur 115 visar t ex att

enbart ett mycket litet överskridande av den kritiska fukthalten är katastrofal för teglet men kan accepteras för kalksandstenen. Detta är naturligtvis en effekt av de båda materialens olika sprödhet. Ett material som asbestcement får tämligen tydliga knickpunkter, se figur 159, men okulärt iakttas inga allvarliga skador trots ett tämligen stort överskridande av knickpunktsvärdet.

Teoretiskt sett kan hänsyn tas till materialets känslighet i detta avseende genom att lutningen på den räta linje som anpassas till punkter med $S>S_{KR}$ anges tillsammans med knickpunktsvärdet. Detta kommer dock inte att göras nedan.

P g a variationen i materialegenskaper kommer värdet på S_{KR} att bli mer eller mindre väl definierat. Detta kommer då att påverka värdet på frostbeständigheten enligt ekv (11) som kommer att bli definierat med en viss spridning. Till detta bidrar dessutom att inte heller värdet på den aktuella vattenmättnadsgraden, S_{AKT}, är speciellt väldefinierat i det generella fallet.

Fortsättningsvis görs en genomgång av resultaten av frysningarna av de olika materialen.

I samtliga figurer markerar varje enskilt värde en enskild provkropp. I figurerna har dessutom markerats det antal fryscykler som provkroppen genomgått före mätningen av de eventuella skadorna.

Generellt anges endast porfyllnadsgrader enligt ekv (2) i figurerna. Däremot har effektiva kritiska vattenmättnadsgrader ibland beräknats ur ekv (3) och förts in i resultattabellen S . För sådana material där värden på icke frysbara vattenmängder saknas har antingen utnyttjats värden för likartade material (detta gäller t ex tegel) eller också har ingen beräkning av effektiva vattenmättnadsgrader gjorts (detta gäller t ex pimpstensbetongerna, vilkas sammansättning är osäker).

I tabell 5 har också kritiska fuktkvoter införts.

Alla de olika metoder som enligt punkt 4.6 finns att indikera skador har inte använts för alla material. Även i de fall där flera metoder använts för ett visst material (t ex dynamisk E-modul+inre friktion) har inte alla metoder utnyttjats för bestämning av kritiska fukttillstånd om dynamiska E-modulen visat sig vara tillräcklig för att få ett väldefinierat värde.

7.6.2 Tegelsten

Det har visat sig vara lätt att indikera kritiska vattenmättnadsgrader för alla undersökta tegeltyper. Dynamiska E-modulmätningen har varit lyckosam för såväl homogent tegel som för ett så pass komplicerat material som gittertegel.

Eftersom keramiska material är starkt spröda, sker en mycket drastisk förlust i hållfasthetsegenskaper vid ett litet överskridande av det kritiska fukttillståndet. Ofta bryts materialen i två eller flera bitar. Detta har då definierats som om E-modulen vore noll, vilket den naturligtvis inte är för de uppstående fragmenten.

Material nr 1; Lösbränt tegel.

Materialet underindelades i två grupper a) och b) på basis av dess sugförmåga, se punkt 7.2.

Två olika provkroppsstorlekar undersöktes, 30 x 30 x 120 mm^3 och 40 x 40 x 120 mm^3.

Resultat visas i figurerna 100 och 101.

De olika cyklerna i figur 100 avser antalet cykler när frysningarna avbröts för den aktuella provkroppen. Varje provkropp redovisas alltså bara en enda gång.

De olika cyklerna i figur 101 gäller däremot för samma provkropp. Varje provkropp redovisas alltså två gånger i denna figur.

Mycket väl definierade kritiska vattenmättnadsgrader kan bestämmas ur bägge figurerna. De är införda i tabell 5.

Den större provkroppen ger något högre kritisk vattenmättnadsgrad än den lilla.

I figur 102 har valts ut några provkroppar för vilka förändring av E-modul utritats som funktion av antalet cykler och vattenmättnadsgrad. Den kritiska vattenmättnadsgraden är lätt att urskilja i denna typ av diagram, eftersom den stora effekten av vattenmättnadsgrad på frostbetständigheten framgår på ett mycket drastiskt sätt. Det enda egentliga undantaget från ett vanligt mönster utgörs av provkroppen med porfyllnadsgraden 0,87. Upptill 54 cykler sjunker E-modulen men sedan stiger den igen. Enligt anteckning i försöksprotokollet är emellertid provkroppen sprucken. Stegringen i E-modul kan därför vara en följd av ihopläkning av sprickor. En sådan har ofta noterats för cementbundna material (Bergström /1955/, Lauer & Slate /1956/).

Uppdelningen i undergrupperna a) och b) visade sig vara irrelevant, eftersom inga skillnader i kritisk vattenmättnadsgrad mellan de båda grupperna kunde urskiljas. Provkroppar från bägge grupper har därför redovisats tillsammans i figurerna 101-102.

För provkroppar som befunnits vara frostbeständiga har vattenabsorptionen bestämts efter frysning och jämförts med absorptionen före frysning. Resultatet visas i fig 103. Som synes sker en markant ökning i sughastigheten under de första minuterna medan effekten av fryscykler på lång tids vattenupptagning är försumbar. Figuren visar dock att något hänt med materialets porstruktur trots att materialet till synes är oskadat. Värdena i fig 103 är medelvärden av 10 frysta provkroppar och 11 ofrysta.

I fig 104 visas fotografi över skadad och oskadad provkropp .

Material nr 2; Hårdbränt tegel.

Även detta material underindelades i två grupper a) och b) på basis av sugförmåga. Punkt 7.2.

Även här undersöktes två olika provkroppsstorlekar, 30 x 30 x 120 mm^3 och 40 x 40 x 120 mm^3.

Resultat visas i figurerna 105-106. I figur 105 visas varje provkropp bara en enda gång i analogi med figur 1, medan den visas två gånger i figur 106.

Även här är de kritiska vattenmättnadsgraderna mycket väldefinierade och även här ger den större provkroppen en något högre kritisk vattenmättnadsgrad. Indelningen i grupp a) och b) visade sig vara onödig.

I figur 107 visas förändringen i dynamisk E-modul som funktion av antal cykler och vattenmättnadsgrad. En enda provkroppsserie har valts för att göra figuren tydligare. Vid stort antal provkroppar blir en figur av typ 102 el 107 mycket oöverskådlig.

Figur 107 liksom figur 106 visar att en cykel kan vara för litet för att indikera frostskador med E-modul. Däremot har utom i ett fall 29 cykler visat sig vara tillräckligt för att förstöra provkroppar med för höga vattenmättnadsgrader. Undantaget, en provkropp med porfyllnadsgraden 0,78, förstörs först vid ett större antal cykler. Möjligen har E-modulbestämningen varit felaktig för denna provkropp eftersom längdmätningen visar att provkroppen efter 29 cykler har en permanent förlängning av

87µ d v s 0,73 °/oo, vilket är större än brottöjningen, jfr figur 193-194.

I figur 108 har samband mellan mätta permanenta längdändringar och E-modulförluster lagts in. I figuren har också lagts in ett beräknat värde på provkroppens brottförlängning. Detta motsvarar en ungefärlig E-modulförlust av 81 à 85 %. Alla provkroppar med E-modulförluster >81 % har nämligen för stora permanenta förlängningar.

I ekv(108) skisserades ett samband mellan E-modulförlust, svällning och viktförlust. Om viktförluster sätts till noll, vilket gäller för dessa provkroppar fås ett rätlinjigt samband. Detta bekräftas dock knappast av resultaten i figur 108, även om hänsyn tas till att det linjära sambandet bara kan göra anspråk på att gälla upp till brottöjningen.

Insätts dock beräknad brottöjning 0,30 °/oo vid $\frac{\Delta E}{E_0} = 19$ % fås följande värden på koefficienterna k_1 och k_2 i ekv(108)

$$\begin{cases} k_1 \approx 1{,}6 \cdot 10^{-3} \\ k_2 \approx 0 \end{cases}$$

Figur 108 visar att längdmätningar och E-modulmätningar ibland kan komplettera varandra. Några provkroppar har nämligen små E-modulförluster men att de är skadade framgår av att de är starkt svällda. Några provkroppar har relativt stora E-modulförluster men svällningarna är små.

Även för detta material har vattenabsorptionen efter frysning jämförts med densamma före frysning. 10 till synes oskadade provkroppar har studerats och jämförts med två serier med 16 resp 8 provkroppar som är ofrysta.

Resultatet av jämförelsen visas i figur 103. Inverkan av frysningarna på porsystemet är klart märkbar trots att inga skador kan iakttas på de frysta provkropparna. Effekten av ökad vattenabsorption står sig även vid lång tids sugning men är då liten.

Effekten av en ökad vattenupptagning hos frysta provkroppar bör beaktas när frostbeständigheten värderas.

I figur 109 visas fotografier på skadade och oskadade provkroppar.

Material nr 3; Gittertegel

Materialet är uppdelat i två material a) och b) som består av yttre resp inre del. Den yttre delen kan förväntas vara något bättre bränd än den inre. Detta bör då, om resultaten för materialen 1 och 2 är signifikanta för bränningsgradens inverkan, innebära att den yttre delen får en något lägre kritisk vattenmättnadsgrad än den inre delen.

Resultaten som visas i figurerna 110 och 111 bekräftar detta antagande.

Ett S_{eKR} baserat på knickpunkten enligt punkt 7.6.1 ovan ger ≈0,81 för den yttre delen och ≈0,87 för den inre delen.

Kriterium nr 2 ovan kan inte tillämpas eftersom testning av skador bara skett en enda gång nämligen efter 9 à 10 cykler.

Material nr 4; Månstorps gavlar 1500-talstegel.

Undersökningen av detta material liksom material nr 5 och 6 utfördes som ett examensarbete. Resultatet visas i figur 112.

Vid den första anpassningen av vattenhalt hamnade alla vattenmättnadsgrader över den kritiska varför alla provkroppar sprack efter få frys-cykler. Detta hände trots att den lägsta använda porfyllnadsgraden var så låg som 0,60.

Den låga kritiska vattenmättnadsgraden innebär att materialet har en mycket stor mängd grova porer. Se ekv (22). Detta i sin tur är mycket rimligt med tanke på att metodiken att bearbeta tegelleran inte kan ha varit så högt utvecklad på 1500-talet.

Material nr 5; Månstorps gavlar 1930-tals tegel.

Resultatet visas i figur 113. Den kritiska vattenmättnadsgraden är klart urskiljbar och låg för att vara tegel.

Material nr 6; Månstorps gavlar 1960-tals tegel.

Resultatet visas i figur 114. Även här är den kritiska vattenmättnadsgraden klart urskiljbar trots ett mycket litet antal provkroppar.

Slutsatser; Alla väsentliga resultat av frysningarna har införts i tabell 5.

Det mest intressanta resultatet av tegelfrysningarna erbjuder en jämförelse av det lösbrända och hårdbrända teglets kritiska vattenmättnadsgrader. De båda tegelsorterna är tillverkade av samma lera och vid samma bränning. Enda skillnaden dem emellan är placeringen i ugnen. Trots detta skiljer sig deras kritiska vattenmättnadsgrader avsevärt från varandra. Det hårdbrända teglet har det lägre värdet. Man får emellertid inte frestas att av detta dra den slutsatsen att det hårdbrända teglet har den sämre beständigheten. Det skall nämligen visa sig att det hårdbrända teglet har en ännu mycket lägre vattenabsorption än de lösbrända. Nettoeffekten blir därför att frostbeständigheten definierad enligt ekv (11) blir avsevärt mycket större för det hårdbrända teglet.

Genom jämförelse av de tre materialen 4, 5 och 6 kan man eventuellt dra den slutsatsen att bearbetningstekniken för tegellera förbättrats under årens lopp. De kritiska vattenmättnadsgraderna för de tre tegelsorterna blir nämligen större ju senare teglet är tillverkat. Det kan teoretiskt visas att vid i övrigt konstanta materialegenskaper sjunker S_{KR} med ökande mängd grova porer, ekvation (22) . Inte heller detta behöver emellertid innebära att frostbeständigheten har blivit bättre med åren.

För att man skall kunna uttala sig om detta erfordras nämligen också kunskap om materialens absorptionsförmåga. Se punkt 9.

7.6.3 Kalksandsten

Två olika provkroppsstorlekar har undersökts, 30 x 30 x 120 mm^3 och 40 x 40 x 120 mm^3.

Resultaten visas i figurerna 115-117.

I figur 115 redovisas varje provkropp endast en gång, i figur 116 tre gånger och i figur 117 två gånger.

Kalksandsten är ett relativt segt material vilket framgår av att till skillnad från tegel ingen provkropp brutits itu. Skador yttrar sig i stället i att ytorna blir "mjöliga".

Knickpunkterna är dock lätta att urskilja i alla tre figurerna. Dessutom är t ex figur 116 ett utomordentligt exempel på att den kritiska vattenmättnadsgraden kan bestämmas med mycket få cykler. Knickpunkten kommer nämligen på i stort sett samma ställe oavsett antalet cykler. Detsamma gäller figur 117 fast knickpunkterna här är något svåra att urskilja.

En ökning av provkroppsstorleken medför även för detta material en viss ökning av den kritiska vattenmättnadsgraden.

I figur 118 visas sambandet mellan frostbeständighet, antal cykler och vattenmättnadsgrad för en serie provkroppar. Figuren skall jämföras med figur 102 och 107 för tegel.

Något tydligare exempel på existensen av kritiska vattenmättnadsgrader än denna figur går knappast att finna. Ur figuren kan nämligen utläsas att E-modulen vid ett visst antal cykler är lägre ju högre vattenmättnadsgraden är och framförallt att så länge vattenmättnadsgraden är

större än ett kritiskt värde (S_{eKR}≈0,800 à 0,825) sjunker E-modulen hela tiden med ökande antal cykler. Under detta värde är E-modulen ungefär konstant. Kriterium 2 under punkt 7.6.1 ovan är alltså lätt att tillämpa.

I figur 119 har samband mellan uppmätta permanenta längdändringar och resterande E-moduler utritats.

Sambandet är rätlinjigt, vilket förutsägs av ekv (108). Konstanterna i denna ekvation ger

$k_1 = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$
$k_2 \approx 0$

Konstanten k_1 är alltså något lägre än för det hårdbrända teglet. Se figur 108.

Figuren bekräftar Warris /1964/ teoretiska uttryck (108) på ett förträffligt sätt.

Vattenabsorptionen har bestämts för 10 st frysprovade provkroppar. Resultatet jämförs med vattenabsorptionen för 12 st ofrysta provkroppar i figur 103.

Som synes har vattenabsorptionen vid kort tid ökat markant men efter längre tids sugning är skillnaden obetydlig.

I figur 120 visas fotografi på skadade och oskadade provkroppar.

7.6.4 Gasbetong

Materialets speciella struktur medför vissa svårigheter att bestämma kritiska fukttillstånd.

- Den låga densiteten i föreningen med låg E-modul gör det svårt att bestämma egenfrekvens och inre friktion med erforderlig precision.
- Det är svårt att mäta längdändrigar eftersom mätdubbarna lätt förskjuts under en frysning även vid låga vattenmättnadsgrader.
- Det är svårt att bestämma förändringen i densitet med erforderlig precision eftersom denna starkt påverkas av sättet för volymbestämning. Se punkt 4.3.2.
- När vattenmättnadsgraden i materialet är så hög att en del luftporer är fyllda, sker vattenanrikningar i vissa partier, framförallt i ytorna. Detta beror troligen på materialets låga kapillaritet vid höga fuktkvoter. Följden blir att ytavflagningar sker vid frysningarna.
  Därför bör eventuellt vattenmättnadsgraden bestämmas med en enda frysning och inte med cykliska frysningar. Jfr punkt 8.
  Effekten av ytavflagningarna blir nämligen att den kritiska vattenmättnadsgraden får en tendens att minska med ökande antal cykler. Åtminstone verkar det vara så när E-modulmätningar används som skadekriterium.

Nedan diskuteras mätproblemen mera i detalj.

Egenfrekvens. Flera exempel i denna rapport visar att S_{KR} kan indikeras med hjälp av egenfrekvensbestämningar efter en enda frysycykel. För gasbetong är detta inte möjligt åtminstone inte med den apparatur som stått till förfogande i denna undersökning. Egenfrekvensen har varit ungefär oförändrad för vissa provkropar trots att dessa synbarligen har varit mycket skadade efter första frysningen och fallit sönder i någon av de närmast följande frysningarna.

Bestämningar av egenfrekvens har därför fått kompletteras med okulär besikting.

Inre friktion. Mätningarna visar att man får en topp i inre friktionen i närheten av de troliga värdet på S_{KR}. Denna topp uppkommer redan vid första frysningen. Vid värden på S något större än S_{KR} faller inre friktionen, varefter den sedan på nytt ökar vid ökande S. Se t ex figur 122 . Innebörden av detta är inte klar. Eventuellt är denna topp förorsakad av något annat fenomen än frostskador, t ex förflyttningar av vatten p g a frysning. Se även figur 73.

Längdändringar. Mätningarna uppvisar stora spridningar vilket kan förklaras av svårigheter att få mätdubbarna att sitta fast. Smulor från provkroppen fastnar dessutom lätt på dubbarna och är svåra att helt få bort.

Skärningspunkten mellan en medellinje lagd genom synbarligen oskadade provkroppar och en linje genom alla mätpunkter kanske kan användas för att indikera S_{KR}. Se figur 123.

Torrviktförlust. Denna är lätt att bestämma och ger ett gott värde på S_{KR} efter ett större antal cykler.

Den ger emellertid inte S_{KR} efter de första frysningarna, vilket torde vara ett sannare värde.

Densitetsförändring. Dessa är visserligen svåra att bestämma exakt men utgör dock ett känsligt mått på skador även i de partier av en provkropp, som återstår efter en avflagning. Mätningarna kompletterar därför bestämningen av torrviktförlust.

Försöksresultaten visar normalt att den punkt där densitetsminskningen sätter in, ungefär motsvarar den punkt där torrviktförlust uppkommer.

Som helhet ger alla använda metoder rimliga möjligheter att ange värdet på den kritiska vattenmättnadsgraden.

Material nr 8; Gasbetong typ 1.

Resultat av E-modulmätningarna visas i figur 121. $E_n/E_o = 0$ innebär att provkroppen är avbruten.

Värdena är okorrigerade med avseende på eventuella avflagningar. Korrektion kan göras enligt ekv (110).

I princip visas varje provkropp tre gånger i figuren. Undantag utgör provkroppar som totalförstörts innan alla cykler genomförts.

Som synes sjunker S_{KR} starkt med ökande antal cykler. Därvid definieras S_{KR} som det högsta värde på S som inte medför några ytskador. Därmed görs även en okulär bedömning av materialet.

I figur 122 visas inre friktionsmätningar. Toppen vid $S_e = 0,47$ är intressant. Den motsvarar nästan exakt S_{KR} definierad av villkoret ovan. Som nämnts ovan kan dock denna topp vara betingad av fuktförflyttningar i materialet. Figur 73 visar att ett samband inre friktion som funktion av porfyllnadsgraden är mycket brant i området $0,42 \leq S_e \leq 0,48$. Små fuktkvotsförändringar lokalt i provkroppen bör däför kunna medföra en stor effekt i observerad inre friktion.

Av denna orsak visas inga fler kurvor över effekten av frysning på inre friktion för någon av de övriga gasbetongerna.

Figur 123 visar permanenta deformationer efter 1 och 114 à 115 cykler. Efter 1 cykel fås ett tämligen väldefinierat värde på kritisk porfyllnadsgrad. Detta värde, $S_e = 0,62$, överensstämmer dessutom exakt med det värde som E-modulmätningen indikerade.

Liksom det var fallet med E-modulmätningen förskjuts dock S_{KR} mot lägre värde vid ökande antal cykler.

Värdet vid 115 cykler är mycket dåligt definierat, vilket troligen beror på att mätdubbarna förskjuts.

Figur 124 visar torrviktförlusten som i vissa fall varit betydande.

Figur 125 visar densitetsförändringar. Eftersom dessa är uppmätta på sådana partier av provkroppen där inga avflagningar förekommit är dessa värden mycket intressanta. Så t ex indikeras ett S_{eKR}≈0,46, vilket är detsamma som erhölls ur torrviktförlusten och okulär besiktning. Detta skulle kunna innebära att det är den kritiska fukthalten vid stort antal cykler som är den verkliga kritiska fukthalten och att en cykel är för litet för att indikera ett riktigt värde.

Utseendet av skadade och oskadade provkroppar visas i figur 126.

Material nr 9; Gasbetong typ 2.

Resultaten visas i figurer 127-130. Även här visar E-modulmätningarna att S_{KR} sjunker med ökat antal cykler.

Torrviktförlusten och densitetsminskningen antyder dock båda samma kritiska fukthalt, vilken ungefär motsvarar den som fås ur E-modulmätningarna vid många cykler.

Fotografier av provkroppar visas i figur 131.

Material nr 10; Gasbetong typ 3.

Resultaten visas i figurer 132-135.

Längdmätningen visar här ett lägre S_{KR} än E-modulmätningen efter en cykel. Längdmätningen är dock som alltid osäker.

Detta material skiljer sig från de tre andra gasbetongerna såtillvida som ytskadorna är mycket ringa. Istället bryts provkropparna i stycken vid frysningarna.

Detta gör att torrviktförlusten inte kan användas som kriterium på kritisk vattenmättnadsgrad. Däremot är densitetsminskningen användbar även om den i detta fall ger osäkra värden.

Fotografier av provkropparna visas i figur 136.

Material nr 11; Gasbetong typ 4

Resultaten visas i figurer 137-140. Mätningar gjordes inte vid 1 cykel för detta material.

Efter 26 à 31 cykler sjunker värdet på S_{KR} mycket litet när det definieras med ledning av okulär besiktning av provkroppsytor. Se figur 137.

Längdmätningarna misslyckades i det närmaste totalt för detta material. Orsaken torde vara svårigheter att fästa mätdubbarna i den mycket grovporösa ytan.

Torrviktförlusten och densitetsminskningen visar samma värde på S_{KR}.

Fotografier av provkroppar visas i figur 141.

Resultat

Väsentliga resultat av frysningarna av de olika gasbetongerna har förts in i tabell 5.

Beträffande de angivna värdena på S_{eKR} baserade på längdmätningar gäller följande: Medelvärdet av längdändringen för icke synbart skadade provkroppar förskjuts mot högre värden hela tiden. Se figur 123 och 128. Eftersom inga skador i övrigt kunnat iakttas efter mer än 100 fryscykler beaktas inte denna förskjutning vid bedömningen av S_{eKR}.

Det slutliga valet av kritiska fukttillstånd, "troligt värde", baseras på okulär besiktning och densitetsminskningen i första hand. Det gäller

alltså för maximala antalet cykler.

Som synes av tabellen blir det slutliga värdet på kritiskt fukttillstånd ganska entydigt bestämt. Medelvärdet av kritiskt värde bestämt på 6 olika sätt blir mycket lika det slutligt valda värdet.

Däremot kvarstår problemet huruvida det är S_{KR} efter 1 cykel eller efter mer än 100 cykler som är det riktiga. Delvis ligger väl svaret på denna fråga i hur många fryscykler med höga fukttillstånd materialet kommer att genomgå i praktiken.

7.6.5 Cementbruk

För cementbruk utan luftinblandningsporer föreligger vissa möjligheter att beräkna den kritiska vattenmättnadsgraden.

Förutsättningen för beräkningen är att de grövre porer som ändå bildas vid tillverkningen är belägna på stora avstånd från varandra. Avstånden är t o m större än kritiska avstånd mellan luftblåsor, se ekv (24). Denna förutsättning har också bekräftats av Warris /1963/ som för en icke luftinblandad betong finner medelavstånd mellan luftporer av 0,78 mm. Vid luftinblandning sjunker avstånden till 0,42 à 0,50 mm. Powers /1949/ har beräkningsmässigt visat att ett maxvärde av 0,50 mm får finnas mellan luftporer om en betong skall vara frostbeständig.

Ett grovt villkor för den kritiska vattenmättnadsgraden blir då att all is skall få plats inne i de finare kapillärporerna mellan luftporerna. På grundval av detta villkor kan ett analytiskt uttryck ställas upp där den kritiska effektiva vattenmättnadsgraden beräknas med hänsyn till materialets sammansättning och härdningsgrad. Se Fagerlund /1973A/.

Sådana analytiska beräkningar har utförts för de båda icke luftinblandade cementbruken material nr 12 och 13. Resultaten redovisas i Fagerlund /1971A/. Överensstämmelsen med uppmätta kritiska vattenmättnadsgrader är god.

Material nr 14 och 15 har vissa luftporer eftersom tillsatsmedlet Sarabond har en viss luftinblandande effekt. Eftersom dessutom dessa prover inte tillverkats i vårt laboratorium har någon analytisk beräkning av kritisk vattenmättnadsgrad inte utförts för dessa båda material.

Material nr 12; Cementbruk 4:1 vct=0,54.

Resultat visas i figur 142. Spridningen i resultatet kan delvis förklaras av att provkropparna tillverkades i två olika serier, varför naturligtvis något olika materialegenskaper, t ex luftporsystem, kunnat utbildas i olika serier. Frysningarna har dessutom utförts under relativt lång tid. Provkroppar markerade "80 cykler" är desamma som "62 cykler" men den förra frysserien påbörjades 38 dagar efter den första. Hydratationsgraden bör därför vara större. Fotografi av provkroppar visas i fig 143.

Material nr 13; Cementbruk 4:1 vct=0,64.

Resultat visas i figur 144. Beträffande tillverkning av provkroppar och utförande av frysningar gäller samma förhållande som för material 12.

Resultatet tyder på att den andra serien, "80 cykler", har något lägre S_{KR} än den första. Detta kan bero på den ökade hydratationen.

Vissa provkroppar bryts mitt av på samma sätt som tegel. Se fig 145.

Material nr 14; Bruk typ Sarabond vct=0,535.

Resultaten visas i figurer 146-148.

E-modulkurvan visar två stycken knickpunkter. Den högra punkten väljs som mått på S_{KR} eftersom det enbart är vattenmättnadsgrader över denna som uppfyller kriterium 2 på sid 135 ovan.

I figur 147 har förändringen i inre friktion utritats varav framgår att eventuellt två områden kan urskiljas. Ett med förändringar ≤100 % och ett med förändringar mellan 0-100 %. Det tillåtna värdet är svårt att definiera. Gränsen mellan de båda områdena överensstämmer dock bra med knickpunktsvärdet i figur 146.

I figur 148 har densitetsförändringar efter avslutade frysningar utritats. På y-axeln har också lagts in motsvarande volymförändringar.

För betong brukar en längdändring av 0,25 °/oo anges som brottvärde. Detta motsvarar en volymökning < 1 °/oo, vilket värde lagts in i figuren. Möjligen är brottöjningen större hos detta bruk p g a plastinblandningen.

Material nr 15; Bruk typ Sarabond vct=0,488.

Resultaten visas i figurer 149-151.

Endast en knickpunkt finns i E-moduldiagrammet, fig 149.

Inre friktionsmätningarna och densitetsmätningarna visar principiellt samma utseende som för material nr 14. De indikerar dessutom ungefär samma värde på S_{KR} som E-modulmätningarna.

Diskussion. Resultaten är införda i tabell 5. Generellt gäller att ju tätare ett material av en viss typ är desto lägre blir den kritiska vattenmättnadsgraden. Detta framgår även av de teoretiska uttryck för S_{KR}, vars bakgrund beskrivs ovan (2.5.2).

7.6.6 Kalkcementbruk

Endast ett enda material är testat. Provkroppstillverkning och försöksutförande har skett på samma sätt som för material 12 och 13. Se dessa.

Resultatet visas i figur 152. Värdet på S_{KR} är mycket väl definierat. Fotografi av provkroppar visas i fig 153.

7.6.7 Asbestcementprodukter

En stor del av de i handeln förekommande asbestcementprodukterna är provade.

Största arbetet har lagts ned på de tre materialen nr 17, 18 och 19. För dessa material har t ex även studerats inverkan av täta provkroppskanter på S_{KR}.

Skador har mätts huvudsakligen i form av E-modul och svällning. E-modulmätningarna har visat sig vara mycket okänsliga när deras värden baserats på egenfrekvensen vid böjsvängning, men relativt känsliga när istället 1:a övertonen använts. Detta fenomen behandlas teoretiskt på sid 94.

Svällningsmätningarna har genomgående visat sig vara mest känsliga för denna typ av material.

De totala svällningarna är nämligen påfallande stora. Teoretiskt bestäms de för ett isotropt material av följande uttryck (härvid antas att inget vatten pressas undan vid isbildningen);

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} = \frac{1}{3(1 - 2\upsilon)} \cdot 0{,}09 \cdot S_e \cdot P(1 - K) \qquad (133)$$

Vid ett P = 0,40; S_e =1,00; K = 0,40 och υ = 0,17 blir $\varepsilon = 11 \cdot 10^{-3}$.

Vid en 8 mm tjock skiva blir $\Delta t = 8 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 88\ \mu$

De permanenta svällningarna är naturligtvis mindre. Brottöjningen för en asbestcement är dock troligen inte mer än 3 ‰.

För de kupiga provkropparna föreligger vissa svårigheter att mäta.

Ett något förbluffande resultat är att okulärt iakttagna skador är mycket små trots att de permenenta svällningarna och E-modulförlusterna kan vara avsevärda.

I figurerna 154-173 redovisas resultat av frysningarna av de olika asbestcementprodukterna. Den skadeindikeringsmetod, som har gett bäst resultat har använts vid redovisningen. I tabell 5 har dock alla använda metoder införts, varav framgår att de olika metodernas resultat inte skiljer sig så mycket åt.

Figurerna 154-163 visar att de vaxade kanterna inte på något sätt påverkar värdet på S_{KR}.

Alla asbestcementprodukters kritiska porfyllnadsgrader är påfallande lika, $0{,}80 \leq S_{eKR} \leq 0{,}90$. Detta framgår också av figur 174, där S_{eKR} ritats som funktion av porositeten, vilken i sin tur är en funktion av det använda presstrycket vid tillverkningen. Som synes finns inget entydigt samband.

Används emellertid den effektiva vattenmättnadsgraden, S_{fKR}, sjunker dels det kritiska värdet och dels blir det kritiska värdets porositetsberoende påtagligt. Tendensen är densamma som gällde för cementbruk - S_{fKR} minskar med ökande täthet hos materialet. Se fig 175.

7.6.8 Betonger med ballast av expanderad lera

Den porösa ballasten i materialen är av två typer:

- Svensk Leca
- Norsk Leca

De båda svenska materialen har vanlig portlandcementpasta som bindemedel, däremot varierar densiteten. Material nr 28 är en hålrumsbetong som saknar sandfraktion medan material nr 23 har en viss mängd sand, som gör det mindre poröst.

De båda norska materialen är hålrumsbetonger som saknar sandfraktion och därför har ungefär samma densitet. Bindemedlet är dock olika. I material nr 30 finns endast portlandcement men i material nr 31 är en viss mängd portlandcement utbytt mot stenmjöl.

P g a de mycket stora svårigheterna att bestämma porvolymer har enbart kritiska fuktkvoter bestämts. Därefter har kritiska vattenmättnadsgraden beräknats ur ekvation (6) med kännedom om densitet och en därur beräknad porositet. Se tabell 3.

I figurerna 178 och 179 visas resterande E-moduler efter 6 à 12 frysningar för norska lecablock.

Som synes är det kritiska värdet på fuktkvoten mycket väl dokumenterat med ett stort antal provkroppar, 49 à 52 st.

Värdet på den kritiska fuktkvoten är mycket väl definierat för bägge materialen.

Provkroppsförstöringen yttrar sig i att de enskilda lecakornen lossnar från varandra. Kornen i sig själv fryser uppenbarligen inte alltid sönder. Vid stora fuktkvoter är sönderfallet totalt, provkroppen har övergått till en mängd lösa lecakorn.

Resultat av frysningar av svenska lecablock visas i figurer 176 och 177. Antalet testade provkroppar är mindre för detta material, 22 à 24 st. Trots detta kan man dock ange säkra värden på kritiska fuktkvoter.

De inre friktionerna redovisas inte här. De har dock gett utomordenligt goda resultat för dessa fyra material och indikerar exakt samma kritiska fuktkvot som E-modulmätningen.

Frysresultaten är införda i tabell 5.

P g a att materialen har olika densitet ger de kritiska vattenmättnadsgraderna trots de osäkra värdena bättre möjligheter till jämförelse mellan de olika materialen än de kritiska fuktkvoterna.

De svenska lecablockens S_{KR} är förbluffande låga.

Det är också uppenbart att utbytet av 33 % cement mot motsvarande mängd stenmjöl sänker de kritiska vattenmättnadsgraderna avsevärt hos norsk leca.

Som tidigare nämnts måste emellertid storleken på det kritiska fukttillståndet jämföras med i praktiken uppnådda fukttillstånd innan några definitiva slutsatser kan dras om materialens frostbeständighet. Se punkt 10.

7.6.9 Betong med grov ballast av pimpsten

Sammansättningen av pimpstensbetongerna är osäkra, varför någon analytisk beräkning av kritiska vattenmättnadsgrader efter den princip, som anges i punkt 7.6.5 inte kan göras.

Antalet provkroppar har varit mycket litet, 5 à 6, varför frysningar har utförts i två omgångar med samma provkroppar men med i genomsnitt högre vattenmättnadsgrader vid den andra frysserien (1:a serien markeras med "12 cykler" i figurerna).

Mellan påbörjan av första och andra frysserierna dröjde 72 dygn. Under den större delen av denna tid lagrades provkropparna i vatten. Hydratationsgraderna är därför genomgående högre i den andra serien, vilket teoretiskt sett bör sänka värdet på S_{KR}.

Resultat av E-modulmätningarna visas i figurerna 180-185. Såväl figur 180 som 184 tyder på att hydratationerna har sänkt värdet på S_{KR}.

Antalet provkroppar är väl litet för att några säkra slutsatser skall kunna dras om de kritiska vattenhalterna. Alla värden ligger dock i samma storleksordning, $0{,}60 \leq S_{eKR} \leq 0{,}69$. Detta är rimligt eftersom värdet bör i stor utsträckning domineras av den stora porositeten som finns i pimpstenen. Dennas volymandel är troligen av samma storleksordning i alla de sex materialen. S_{KR} hos ett tvåfassystem av typ porös ballast i en cementpasta behandlas teoretiskt i Fagerlund /1971A/.

En intressant effekt har noterats för samtliga pimpstensbetonger. Porositeten bestämdes för samtliga material ungefär en månad efter tillverkningen. Därvid användes vanlig teknik med vacuumsugning, vattensugning och vägning i luft och vatten. Se punkt 4.3.2.
Jämförelse med teoretiskt beräknade porositeter visade att så gott som alla porer fylldes med vatten.

Provkropparna lagrades därefter först i vatten och sedan i luft under totalt 1 1/2 års tid tills frystesten skulle påbörjas. Det visade sig då att efter vacuumbehandling gick det inte att fylla porerna totalt. Provkropparna torkades därför vid +50°C under någon vecka varefter vacuumbehandlingen upprepades. Inte heller nu gick det att fylla alla porer. Se figur 182, som visar att t o m vid lång tids vattenlagring efter vacuumbehandling, kan man bara fylla porerna till 62 %.

Tydligen måste pimpstensporerna ha förseglats på något sätt. En tänkbar mekanism är fortgående hydratation, en annan mekanism är att en kemisk reaktion skett t ex mellan pimpstenens kiselsyra och alkalier i cement-

pastan. Svepelektronmikroskopstudier av dessa material tyder på detta senare fenomen, Fagerlund/1972A/. De porer som uppstått i fasgränsen är då så små att de är vattenfyllda t o m vid så låga relativa fuktigheter som 10 à 15 %, vilket motsvarar 50°C. Luften i pimpstensporerna kan då inte evakueras vid vacuumbehandlingen.

Denna företeelse är utomordentligt gynnsam ur frostbeständighetssynpunkt eftersom den innebär att en ballast,som har dålig frostbeständighet,i sig själv inte behöver innebära att frostbeständigheten blir dålig hos den betong vari den blandas. Förutsättningen är dock att ballasten har en fukthalt vid inblandningen som inte är riskabel ur frostbeständighetssynpunkt och att en mycket tät cementpasta får tillfälle att utbildas runt ballastkornen.

Praktiska resultat på t ex pimpstensbetong tyder också på att ett frostbeständigt material kan tillverkas om bara cementpastan skyddas med luftinblandning på vanligt sätt.

7.6.10 Betong med och utan fiber

Vissa amerikanska resultat tyder på att frostbeständigheten ökar vid fiberinblandning i betong. För att studera om denna effekt möjligen berodde på en ökning av S_{KR} utfördes ett försök i samarbete med civ ing L-G Mattisson vid vår avdelning.

Samma betongmassa tillverkades med och utan stålfiber. Ur de båda satserna göts ett antal provkroppar.

De kritiska fukthalterna bestämdes på vanligt sätt.

Resultatet visas i figurerna 186 och 187.

Som synes är knickpunkterna mycket väl definierade. De kommer dessutom på ungefär exakt samma nivå för bägge materialen.

Detta är mycket intressant och dessutom logiskt eftersom fibrerna rimligtvis inte kan påverka de lokala små brott,som sker inne i materialet. Som nämndes ovan punkt 7.6.5 är kritiska avstånd inne i cementpasta ≈0,5 mm, vilket är mycket mindre än avstånd mellan enskilda fibrer.

Däremot framgår klart att fibermaterialet är segare. Detta är också logiskt eftersom sprickutbredningar ,som hos det oarmerade materialet leder till kollaps för en provkropp, förhindras effektivt av fibrerna.

Det skall senare visas att vattenabsorptionen för de bägge materialen är ungefär lika. Följden blir alltså att det fiberarmerade materialet i realiteten får något bättre frostbeständighet.

Kritiska vattenmättnadsgrader har även beräknats analytiskt för de bägge betongerna. Överensstämmelsen med försöksresultat är förträfflig. Se Fagerlund /1973 A/.

7.6.11 Betongtakpanna

Materialet är uppdelat i vågtopp och vågdal eftersom materialegenskaperna kunde förväntas vara något olika i olika delar. Jfr resultatet av frysningar av asbestcement, material nr 20.

Resultat visas i figurerna 188 och 189. De kritiska fuktkvoterna är något osäkra. I huvudsak ligger de dock på samma nivå för bägge materialdelarna.

7.6.12 Tegeltakpanna

Även detta material är uppdelat i två delar, vågtopp och vågdal.

Resultatet visas i fig 190 och 191. Även för dessa material är det kritiska värdet ungefär lika. Det är dessutom i närheten av det teoretiskt högsta värdet, $S_{f\,KR} = 0{,}917$. Då bör observeras att de frysta skivorna är tämligen tunna, =12 mm. Detta är av samma storleksordning som tegelmaterials kritiska tjocklekar. Man kan därför förvänta sig att en tjockare provkropp av samma material skulle ha en lägre kritisk vattenmättnadsgrad. Se fig 20.

8 EXPERIMENTELLA RESULTAT AV ENCYKELFRYSNINGAR

Metodik och apparatur beskrivs under punkt 5.

Antalet testade material som redovisas här är 7 st, nämligen material nr 1; lösbränt tegel, nr 2; hårdbränt tegel, nr 7; kalksandsten och nr 8-11; 4 gasbetongtyper.

För materialen 2 och 10 har två provkroppar testats men för övriga material endast en. Trots detta blir antalet försök relativt stort då varje provkropp testats flera gånger med successivt ökande vattenhalt. Nedan redovisas 51 frysförsök.

Beträffande materialegenskaper hänvisas till punkter 7.2, 7.4, 7.5 samt tabeller 3 och 4.

Resultat av frysningarna visas i figurerna 192-200

Av samtliga figurer framgår vattenmättnadsgradens fundamentala betydelse för frostbeständigheten. Vid vattenhalter som är mindre än de kritiska, krymper provkropparna mera än den termiska krympningen om man bortser från en viss momentan svällning när underkylningen av porvattnet upphävs och en större ismängd bildas snabbt, Fagerlund/1973A/.

Vid successiv ökning av vattenhalterna fås så småningom en svällning av provkroppen. Gränsen mellan den vattenhalt som ger krympning och den som ger svällning är ofta mycket skarp. Skärpan framgår naturligtvis bättre vid flercykelfrysningarna eftersom man där har mindre differenser mellan vattenhalterna i olika provkroppar än vad man har haft vid encykelfrysningarna.

Kontraktionen vid små vattenhalter kan ges en rent mekanisk förklaring. Is har större längdutvidgningskoefficient än övrig fast fas i materialet. Enligt en teoretisk formel för längdutvidgningskoefficienten för ett flerfassystem (ekv (73)) fås då fram krympningar av samma storleksordning som de som framgår experimentellt, Fagerlund/1973A/. Denna förklaring styrks dessutom av att ökande vattenhalter (så länge de är mindre än S_{KR}) ger ökande krympningar (se t ex fig 196) vilket de bör göra eftersom volymandelen is ökar medan andelen fast fas är konstant.

Svällningarna vid höga vattenhalter ökar med ökande vattenhalt. Detta gäller åtminstone upp till så höga vattenhalter att provkroppen erhållit betydande skador.

För att förtydliga figurerna kan maximalsvällningen, $\Delta\varepsilon_{MAX}$, räknad från normal termisk kontraktion (utan isbildning) ritas upp som funktion av vattenmättnadsgraden S_e. Sådana diagram visas i figur 201. Där inga som helst svällningar förekommer har plottats det värde som gäller vid den temperatur vid vilken den största svällningen brukar uppträda. En analys av fig 192-200 visar nämligen att maximalsvällningen även vid olika vattenhalter inträffar vid ungefär samma temperatur som utgör ett karakteristikum för varje material.

Temperaturer vid maximalsvällning är:

- Lösbränt tegel; ≈ -7°C
- Hårdbränt tegel; ≈ -5°C
- Kalksandsten; ≈ -10°C
- Gasbetong typ 1; ≈ -6°C
- " typ 2 ≈ -7°C (ev -14°C)
- " typ 3; ≈ -12 à -14°C
- " typ 4; ≈ -9°C

En tänkbar förklaring till detta fenomen erbjuder den sk hydrauliska tryckteorien, utvecklad med hänsyn till att permeabiliteten minskar drastiskt p g a isbildningen i porsystemet, se Fagerlund /1972C,1973A/.

Kurvorna i fig 201 uppvisar ett typiskt utseende. När vattenhalten ökar sker först en krympning utöver termisk krympning. Denna krympning ökar något med ökande vattenhalt, vilket kan förklaras mekaniskt enligt ovan. Mer eller mindre plötsligt sker sedan en kraftig expansion vid ytterligare ökad vattenhalt. Kurvorna påminner därför om de E-modulkurvor och dimensionsförändringskurvor som uppmätts vid flercykelfrysningarna.

Med ledning av fig 201 kan man göra en bedömning av materialens kritiska vattenhalter.

Ett kriterium för värdet på kritiskt fukttillstånd kan nämligen formuleras på tre sätt:

- 1; Det kritiska fukttillståndet motsvarar "knickpunkten" i ett diagram "maximalsvällning, $\Delta\varepsilon_{MAX}$, som funktion av fukttillståndet". Knickpunkten kan därvid vara mer eller mindre vädefinierad.
- 2; Det kritiska fukttillståndet karakteriseras av att svällningar utöver den termiska rörelsen förekommer. Denna punkt erhålls således som skärningspunkten $(\Delta\varepsilon)_{MAX} = 0$ och kurvan $(\Delta\varepsilon)_{MAX} = f($fukttillståndet$)$.
- 3; Det kritiska fukttillståndet utgör den punkt i ett diagram "maximalsvällning som funktion av fukttillståndet" som motsvarar materialets brottöjning vid dragning.

  Brottöjningen kan antingen bestämmas teoretiskt enligt nedan eller experimentellt. Man kan emellertid även få en uppfattning om dess värde genom att studera permanenta deformationer efter en genomgången cykel eller genom att mäta E-modulen före och efter varje fryscykel. Normalt sett har kompletta cykler mätts i här redovisade försök men undantag finns,där bara frysförloppet redovisas. I de flesta fall har även E-modulen mätts före och efter cykeln. Värdena på E-modul finns inskrivna i respektive figur 192-200.

Ett materials brottöjning kan erhållas ur följande ekvation

$$\varepsilon_{BR} = \frac{\sigma_B}{E_B} \tag{134}$$

där E_B är sekantmodulen till den punkt på arbetskurvan som motsvarar dragbrott. Dragbrotten är ofta spröda för porösa material, varför E_B blir ungefär densamma som tangentmodulen i origo.

Man har experimentellt visat att för många material gäller följande samband för hållfasthet och E-modul, Fagerlund/1972B/

$$\sigma_B = \sigma_o(1-P)^{k_1} \tag{135}$$

$$E_B = E_o(1-P)^{k_2} \tag{136}$$

där $\sigma_o \approx 3500$ à 5000 kp/cm^2 vid tryck; $\sigma_{o_m} = 4250$ kp/cm^2

$E_o = 650.000$ à 850.000 kp/cm^2; $E_{o_m} = 750.000$ kp/cm^2

Draghållfastheten är mellan 8 och 20 % av tryckhållfastheten. För tegel och kalksandsten kan värdet 10 % bedömas vara sannolikt medan värdet är ungefär 20 % för gasbetonger.

Värdet k_1 är starkt beroende av porstrukturen. Anpassning till försöksdata kan ge värden mellan 3 och 6. De höga värdena verkar gälla bra vid porositeter i närheten av den kritiska porositeten (=den högsta porositet som ger hållfasthet. Se Fagerlund/1972B/). Krokosky /1970/ anger värdet k_1 = 5,6 à 6 för ett flertal material vid porositetsområdet 30 à 40 %.

Popovics /1969/ anger värdet $k_1 \approx 5,2$ för inverkan av luftporer i betonger och gasbetonger vid luftporvolymer av ≈60 %.

Används de generella värdena $k_1=5,5$ och $k_2=4,0$ fås följande approximativa uttryck för brottöjningarna:

Tegel och kalksandsten:

$$\varepsilon_{BR} = \varepsilon_o (1-P)^{k_1-k_2} = 0,57(1-P)^{1,5} \text{ ‰} \qquad (137)$$

Gasbetong:

$$\varepsilon_{BR} = 1,14(1-P)^{1,5} \text{ ‰} \qquad (138)$$

Värden beräknade ur dessa båda ekvationer är inritade i figur 201

En jämförelse med uppmätta E-modulförluster och reversibla töjningar tyder på att de beräknade töjbarheterna för gasbetongerna är för små. Beräknas i stället ε_B efter kända erfarenhetsvärden över draghållfasthet och E-moduler fås nästan tre gånger så höga värden som de teoretiska. Dessa nya värden är för höga. Felet ligger troligen i att data över E-moduler gäller för trycksidan men inte för dragsidan där brotten är spröda.

Kritiska vattenmättnadsgrader bestämda vid flercykelförsök motsvarar närmast det sista kriteriet d v s brottkriteriet. Töjningar som är mindre än brottöjningen är troligen reversibla och ger heller inte upphov till E-modulförluster.

I tabell 6 anges kritiska fukthalter bestämda ur encykelfrysningarna och baserade på de tre kriterierna ovan. Vid beräkning av S_f används de data över icke frysbara vattenmängder vid -10 eller -20°C, som redovisas i kolumn nr 1 i tabell 4.

Bästa möjligheten att bedöma det kritiska fukttillståndet erbjuder kriterium 2 d v s inga svällningar får förekomma. Detta är för övrigt inget orimligt kriterium med tanke på att varje svällning utöver den termiska kontraktionen innebär att en del av materialets hållfasthet tas i anspråk för att motstå frostpåverkan. Så länge inga svällningar äger rum, har tvärsnittet kvar sin beräknade bärförmåga. Frostpåverkan är då försumbar. Kriteriet blir dessutom rimligare ju brantare $\Delta\varepsilon_{MAX}$-kurvan enligt fig 201 är.

Generellt sett verkar de kritiska fukttillstånden nu vara lägre än de som uppmätts vid flercykelfrysningarna. Möjligen beror detta på att frysningarna skett något snabbare denna gång. Se punkt 5.3.2.

Resultaten är emellertid alldeles för få för att några säkra värden på kritiska fukttillstånd skall kunna bestämmas. Så till exempel är avståndet mellan olika testade fukttillstånd =0,05 uttryckta som porfyllnadsgrader.

Större precision än 0,05 i porfyllnadsgrad kan man därför inte få fram ur här redovisade resultat.

Tanken med encykelförsöken har emellertid aldrig varit att indikera exakta kritiska fukttillstånd utan enbart att studera frysmekanismer. Därvid föll det sig naturligt att göra en systematisk variation av vattenmättnadsgraden i provkropparna. Resultaten är ju också ett förträffligt bevis på vattenhaltens helt dominerande betydelse för materials frostbeständighet. I Fagerlund/1972C,1973A/görs dessutom en koppling av här redovisade resultat till isbildningshastigheten och materialens poregenskaper.

9 RESULTAT AV VATTENUPPSUGNINGSFÖRSÖK

9.1 Inledning

Under punkt 6 diskuterades tänkbara metoder att bestämma hur mycket vatten som olika material absorberar i praktiken.

Bortsett från vissa smärre studier av mera principiell art (punkter 6.2 och 6.5) har de enda metoder som använts i denna undersökning bestått av att mäta kapillär uppsugning vid sugning från fri vattenyta och vid doppning under vattenyta.

Sugförsöken kan delas upp i fem olika typer:

Typ 1; ∿5 à 8 dygns sugning från fri vattenyta åtföljd av ∿5 à 8 dygns doppning.

Typ 2; Upp till 10 dygns sugning från fri vattenyta.

Typ 3; Lång tids (upp till 1/2 år) sugning från fri vattenyta.

Typ 4; Enbart vattenlagring under fri vattenyta.

Typ 5; Kapillärsugning efter frysning av provkroppar.

Dessutom tillkommer in situ mätningar av fukt för materialen 4, 5 och 6. Mätningarna gjordes för dessa material vid två tillfällen våren 1969 en kort tid efter regnperioder. Proven togs på ställen där väggarna verkade vara fuktigast.

Olika försökstyper har använts för olika material.

För vissa material har ett mycket stort antal provkroppar testats. Dessa har då av praktiska skäl delats upp i olika serier.

Det praktiska genomförandet av försöken redovisas under punkter 6.3 och 6.4.

I tabell 7 görs en sammanställning av sugförsöken. Här anges för varje material antalet provkroppar och total sugtid för varje materialtyp. Dessutom anges hur provkropparnas sidoytor tätats.

Som synes är antalet provkroppar starkt varierande. Maximalvärdet är 131 st för det hårdbrända teglet och minimivärdet är 2 för norska Lecablock.

9.2 Resultat av sugförsöken

Antal undersökta provkroppar är 790 fördelade på 132 sugserier.

Det är orimligt att redovisa alla dessa sugförsök med diagram. Däremot anges väsentliga data i tabellform, tabell 8. Detta förfaringssätt är desto rimligare som det primära ändamålet med denna undersökning varit att studera kritiska vattenmättnadsgrader och inte fuktmekaniska egenskaper hos materialen.

Författaren har emellertid ansett att just det förhållandet att ett stort antal provkroppar ur samma materialtyp testats har ett egenvärde av följande skäl:

- Av frysförsöken (se punkt 7) framgår att den kritiska vattenmättnadsgraden ofta är mycket väldefinierad. Detta gäller även när ett mycket stort antal provkrppar har frystestats, se fig 105och 115. Enligt ekv (11) bestäms emellertid frostbeständigheten även av vattenabsorptionen. Ett väldefinierat värde på frostbeständigheten kräver därför även ett väldefinierat värde på vattenabsorptionen. Det stora undersökningsmaterialet ger nu stora möjligheter att bedöma med vilken precision en frostbeständighet definierad enligt ekv (11) överhuvud taget kan bestämmas för ett visst material.
- Försöksmaterialet bör ha ett visst intresse av rent fuktmekanisk art. Så t ex fås vissa jämförelser mellan kapillär uppsugning och doppning liksom mellan olika materialtyper inom samma materialfamilj eller rent av mellan olika partier inom en och samma materialenhet. Försöken är ibland mycket långvariga. I två fall har provkroppen fått suga vatten under 204 dygn. Så långa försöksserier är sällsynta i litteraturen.

Vissa försöksserier har därför valts ut för en noggrannare redovisning. Denna görs dock på ett mindre ambitiöst sätt än övrig resultatredovisning, vilket bl a innebär en annorlunda lay-out. Intressanta resultat har därför samlats i en speciell bilaga i slutet av rapporten.

Så gott som samtliga vattenabsorptionsdata har överförts till hålremsor. Data har sedan bearbetats med en bordsdator. Resultatet av beräkningen är medelvärden och standardavvikelser av vattenmättnadsgrad och fuktkvot vid olika tidpunkter. Varje sugserie bearbetades för sig. Resultatet åskådliggörs först och främst i en tabell där sugtiden uttrycks i minuter, fuktkvoten i % och vattenmättnadsgrad som porfyllnadsgrad enligt ekv (2).

I tabellen anges dessutom standardavvikelser för fuktkvot och porfyllnadsgrad vid olika tider.

Resultatet av varje serie har dessutom grovplottats med printern. Fuktillståndet blir därvid plottat med en precision av ±0,125 mm på papperet, vilket översatt betyder en precision i vattenmättnadsgrad av ±0,01.

Plottningen sker med tidsaxeln i rotskala. Tidsaxeln blir plottad med en precision av ±0,225 mm.

I bilagan redovisas sålunda tabeller och plottning av tabeller för ett antal material. Seriebeteckning är densamma som den som användes i tabell 7. Beteckningen "1.2.10" innebär således "serie nr 1; Två testade provkroppar; försöket varade 10 dygn". Typ av test framgår av tabell 7.

Omedelbart till höger om resp kolumn "Fuktkvot" och "vattenmättnadsgrad" i tabellerna skrivs standardavvikelserna ut. Beteckningen 3.70000E-02 i kolumnen som gäller vattenmättnadsgrader betecknar därvid värdet 0,037 (dvs "E-02" innebär "$\cdot 10^{-2}$").

Resultat ur bilagan liksom resultat för de material, vilkas absorption ej redovisas i bilagan,har införts i tabell 8.

Speciell vikt har lagts vid den s k knickpunktsabsorptionen eftersom den motsvarar en vattenabsorption som kan tänkas uppstå på ett farligt djup från materialytan efter en mycket kort tids kapillärsugning.

Detta diskuteras utförligt under punkt 6.2 . Knickpunkter visar sig ofta vara lätt att urskilja i diagrammen i bilagan, vilka är plottade med tidsaxeln i rotskala. Exempel på mycket tydliga knickpunkter erbjuder material nr 1, 2, 3 och 4, vilka alla är tegelmaterial. Även material nr 7,som är en kalksandsten har en tydlig knickpunkt. För andra material är knickpunkten svårare att exakt definiera.

Variationskoefficienterna för vattenabsorption är starkt varierande för olika material. Vid 1 timmes sugtid är variationskoefficienten enbart 2,1 % för lösbränt tegel (material nr 1) men hela 19 % för det hårdbrända av samma lera (material nr 2). För ett gittertegel är variationskoefficienten 31 % för den yttre delen (material nr 3a) men enbart 7,3 % för den inre delen (material nr 3b) vid 30 minuters sugning. Detta tyder på att den yttre delen har större variation i poregenskaper än den inre delen.

För de fyra gasbetongerna med ungefär samma densitet,är variationskoefficienterna vid 60 minuters sugning 15,4 % för typ 1 (material nr8), 17,6 % för typ 2 (material nr 9), 17,5 % för typ 3 och 4 (material nr 10 och 11). Värdena är således mycket lika.

Ett genomgående intryck är emellertid att spridningarna i vattenabsorption är något större än spridningen i kritiska fukttillstånd.

De utförda absorptionsförsöken bekräftar därför intrycket att det besvärligaste problemet i samband med bedömning av ett materials frostbeständighet ligger i att bedöma dess vattenupptagning under praktiska förhållanden.

10 BERÄKNING AV FROSTBETÄNDIGHETER

10.1 Inledning

I avsnitt 2.2 diskuterades tänkbara definitioner på ett materials frostbeständighet. Lämpligast befanns ekv (11) vara

$$F = S_{f\ KR} - S_{f\ AKT} \tag{11}$$

Denna ekvation kan även uttryckas enligt ekv (12) eller (13).

Definition (11) förutsätter att den icke frysbara vattenmängden är känd.

Är detta inte fallet kan i stället följande uttryck för frostbeständighet användas

$$F = S_{e\ KR} - S_{e\ AKT} \tag{139}$$

Därmed undervärderas visserligen frostbeständigheten, framförallt för material som har en stor andel icke frysbart vatten (jfr ekv(139)) med den riktigare ekv (12)), men detta har mindre betydelse i den mån jämförelse av frostbeständigheten sker mellan material som har ungefär samma andel icke frysbart vatten.

Enligt bägge definitionerna ovan kommer frostbeständigheten att minska med ökande mängd vatten i materialet, eftersom de kritiska vattenmättnadsgraderna antas vara konstanta.

Denna sista förutsättning är inte riktigt uppfyld i ekv(139) eftersom teoretiskt sett den icke frysbara vattenmängden beror på hur stor vattenhalt materialet har, se sid 74 och fig 49 . Effekten torde emellertid vara mycket liten.

I här redovisad undersökning har aktuella fukttillstånd bestämts, med kapillärsugningsförsök för alla de material för vilka kritiska fukttillstånd bestämts. Detta gör det möjligt att beräkna frostbeständigheten enligt ovan.

Eftersom vattenupptagningen generellt ökar med ökande uppsugningstid, kommer frostbeständigheten att avta med ökande sugtid. Detta kan åskådliggöras i diagramform genom plottning av F som funktion av tiden. Ur sådana diagram ges en möjlighet till en värdering av olika materials frostbeständighet.

Figurer 202-208 visar att sambandet ofta blir rätlinjigt i ett enkellogaritmiskt diagram. Följande ekvation skulle därför approximativt kunna gälla för frostbeständigheten hos ett material som står i långvarig kontakt med fritt vatten.

$$F = k \cdot \log t + F_1 \tag{140}$$

där F_1 är frostbeständigheten vid tiden t = 1 tim och k är linjens lutning. Ju mindre k är och ju större F_1 är desto högre blir materialets frostbeständighet.

Vid studier av sådana diagram får dock inte bortses från det faktum att sugprovkropparna är relativt stora medan i verkligheten det är fuktinnehåll på mycket små avstånd från provkroppsytan, som är avgörande för frostbeständigheten. Detta gör att de frostbeständighets-tidsdiagram som fås enligt ovan kan vara mycket olika de samband som gäller på det s k kritiska avståndet från ytan. Innebörden av detta har diskuterats utförligt under punkt 6.2. Där redovisas även vissa experimentella resultat med vars hjälp frostbeständighets-tidssamband kan beräknas.

I verkligheten måste också beaktas att även uttorkningsegenskaperna hos materialen har betydelse för deras reella frostbeständighet.

10.2 Resultat

I tabell 5 redovisas experimentella resultat av bestämningar av kritiska fukttillstånd för de 41 olika materialen. För vissa anges enbart den kritiska porfyllnadsgraden $S_{e\ KR}$ och motsvarande kritiska fuktkvot u_{KR}. För ungefär hälften anges dessutom effektiva kritiska vattenmättnadsgraden $S_{f\ KR}$.

I tabell 8 redovisas porfyllnadsgrader uppnådda vid olika lång tids kapillärsugning.

Med ledning av dessa tabellvärden kan nu frostbeständigheten beräknas.

I tabell 9 redovisas frostbeständigheter beräknade på det fysikaliskt riktiga sättet d v s enligt ekv (11). Detta har enbart kunnat göras för de 24 material för vilka icke frysbara vattenmängder bestämts experimentellt eller beräknats.

För vissa mycket täta material t ex nr 14, 15, 18, 19, är vattenupptagningen vid korta tider så liten att i princip inget vatten är frysbart. Därför blir i dessa fall frostbeständigheten oändligt stor. Materialen motsvarar i dessa fall icke porösa material.

I tabell 10 redovisas frostbeständigheten beräknad enligt ekv(139) för alla de 41 materialen.

I figur 202-205 är frostbeständigheten enligt ekv (11) för några material utritad som funktion av vattenuppsugningstiden.

I figur 206-208 är frostbeständigheten enligt ekv(139) utritad på samma sätt för några material.

Av alla figurerna framgår att frostbeständigheten minskar med ökande sugtid. För vissa material uppnås därvid så småningom en negativ beständighet medan andra material är beständiga även efter en mycket lång vattenabsorption.

Av tabellerna 9 och 10 och figurerna 202-208 kan en del intressanta slutsatser dras;

- Det hårdbrända teglet (material nr 2) har en bättre beständighet än det lösbrända (material nr 1) trots att det senare materialet har en högre kritisk vattenmättnadsgrad, fig 202 . Detta bekräftas av praktisk erfarenhet och av otaliga frysexperiment redovisade i litteraturen. Fördelen med den här använda metodiken är att skillnaden i frostbeständighet är kvantifierad.
- Hos gitterteglet (material nr 3) har den yttre delen synbarligen sämre frostbeständighet än den inre. Detta beror dels på att dess kritiska vattenmättnadsgrad är lägre, vilket är väntat på grund av dess högre bränningsgrad och dels på att vattenabsorptionen är större. Det senare kan eventuellt bero på att materialet i ytpartiet har en paralellstruktur med en stor mängd sprickor parallella med pressriktningen. Sådana sprickor fylls lätt vid ett vattenabsorptionsförsök sådant som det utförts här men de fylls kanske inte alls vid normal materialanvändning. I så fall underskattas ytterdelens frostbeständighet.
- Av de tre tegelsorter som använts ursprungligen och för restaureringen av Månstorps gavlar, material nr 4-6, är 1930-tals teglet något bättre än 1960-tals teglet. 1500-tals teglet är som väntat av undermålig kvalitet. Uppenbarligen är det inte alls så hårt bränt som moderna tegelsorter utan har närmast karaktären av soltorkat tegel. Att det trots allt finns kvar rester av 1500-tals tegel beror troligen på att dessa rester befinner sig på sådana platser där fuktbelastningen är för liten för att ge avsevärda frostskador.
- Den testade kalksandstenen (material nr 7) har synbarligen en sämre frostbeständighet än t o m det lösbrända teglet. Därvid måste emellertid

två ytterligare faktorer beaktas. Skador hos kalksandstenen sker enbart som en smulning av ytan medan teglet fryser sönder i tjocka skivor. Kalksandstenen är segare än teglet, vilket gör att ett överskridande av värdet på S_{KR} har en mindre effekt. Sådana faktorer beaktas inte i diagram av typen 202-208.

- De fyra gasbetongerna (material nr 8-11) har helt olika frostbeständighet trots att deras nominella densiteter är desamma, 500 kg/m^3. Utan tvekan bäst är gasbetongen av typ 1 som är baserad på cement och sand. Den tål upp till 10 dygns vattenlagring utan att frostskador sker vid en efterföljande frysning.

  De båda materialen 3 och 4 skadas däremot redan efter 1 dygns vattenlagring. Dessa båda material är kalkbaserade.

  Orsaken till skillnaderna i beständighet ligger med säkerhet i olikheter i de fyra materialens luftporsystem. För det första är typ 1 mest finporöst, vilket teoretiskt sett höjer dess S_{KR}. För det andra innebär ofta användning av kalk som bindemedel att ett "öppet" porsystem skapas d v s de sfäriska luftporerna förbinds med varandra med grova öppna kapillärer. Ett sådant porsystem innebär att även de sfäriska luftporerna lätt fylls med vatten vid en vattenuppsugning.

  Det är därför väsentligt för gasbetongtillverkarna att dels skapa små luftporer dels se till att dessa är helt omgivna av porväggar med fina porer.

  Genom dessa åtgärder höjs S_{KR} och sänks S_{AKT} d v s frostbeständigheten ökas.

- Fig 204 visar att cementbruk eller betong som saknar luftinblandning blir obeständiga redan efter en mycket mild vattenlagring. Så t ex är de båda cementbruken (nr 12 och 13) obeständiga redan efter mindre än ett dygns vattenlagring. Betongerna (nr 38 och 39) blir obeständiga efter ungefär 2 dygns vattenlagring. Sarabond-bruken däremot (nr 14 och 15) har en viss luftinblandning om än liten. Detta yttrar sig i att frostbeständigheten blir dålig först efter 20 à 50 dygns vattenlagring.

  Även i detta fall överensstämmer alltså resultat av den nya testmetoden med resultat som är kända från praktiken.

  Det testade KC-bruket visade sig ha god beständighet åtminstone upp till 5 dygns vattenlagring. Detta är troligen en effekt av att den relativt stora mängden bearbetningsporer är gynnsamt fördelad i materialet.

- Bland asbestcementprodukterna visade sig samtliga utan tre (material nr 22, 24 och 27) ha god beständighet vid vattenlagring upp till 10 dygn. Det hårdpressade materialet (nr 19) visade sig ha klart bättre beständighet än det opressade (nr 18). Även detta överensstämmer med kända praktiska förhållanden.

  För den korrugerade skivan (material nr 20) visade sig frostbeständigheten vara något olika i olika delar av plattan. Vågtoppen var beständigast och vågdalen obeständigast. Torrformade material (nr 24 och 27) visar sig ha sämst beständighet. Här måste emellertid beaktas att inget av dessa material varit påfallande svårt skadat vid en okulär besiktning. Det är fullt troligt att de skulle ha bedömts vara fullkomligt frostbeständiga vid en praktisk användning.

- De norska Lecablocken har avsevärt mycket högre beständighet än de båda svenska. Det norska blocket nr 30 baserat på cement som bindemedel är utomordentligt beständigt enligt denna test. Ännu efter 75 dygns vattenuppsugning är materialet fullständigt frostsäkert. De båda svenska blocken (nr 28 och 29) är då båda lika obeständiga.

Skillnaden i beständighet måste troligen ligga i olika porstruktur hos lecakornen. Förmodligen absorberar de svenska lecakornen mera vatten än de norska, varvid beständigheten försämras.

Det är intressant att notera den klara försämring som man får genom att byta ut cement mot en blandning av cement och stenmjöl som bindemedel i norska Lecablock. Denna försämring har man enligt uppgift tyckt sig förmärka vid en vanlig frosttest av de båda materialen, men här kan dess storlek mätas.

- Samtliga pimpstensbetonger (material nr 32-37) har god beständighet även vid 60 dygns vattenlagring. Detta beror naturligtvis på dels att cementpastan är skyddad med luftinblandning dels att pimpstenskornen inte kan fyllas med vatten eftersom de är omgivna av en mycket tät cementpasta. Se sid 42.

  Skillnaden i beständighet är relativt liten och bör så vara eftersom alla betonger blandats med ungefär samma förutsättningar.

- Skillnaden i frostbeständighet för de båda takpannorna (material nr 40 och 41) är obetydlig. Möjligen är betongtakpannan något bättre. Bägge materialen har tillfredsställande säkerhet mot frostskador, vilket överensstämmer med praktiska förhållanden för de båda materialen.

  För bägge pannorna är skillnaden i beständighet mellan vågtopp och vågdal obetydlig, vilket tyder på att materialegenskaperna är ungefär likartade genom hela materialvolymen. I verkligheten är det naturligtvis vågdalen som får den hårdaste frostbelastningen.

För samtliga testade material har alltså mer eller mindre väldefinierade frostbeständigheter kunnat beräknas. I flera fall överensstämmer de beräknade beständigheterna kvalitativt med kända förhållanden beträffande materialens beständighet i praktiken. För att få en verklig bekräftelse på den nya metodens användbarhet, skulle man emellertid önska att laboratorieförsöken kompletterades med en verklig test där samma material placerades utomhus under exakt samma betingelser. Om metoden är riktig, skulle därvid den rangordning mellan materialen som bestäms i laboratoriet överensstämma med uppmätt rangordning i den verkliga miljön.

Något experiment av denna typ har inte genomförts ännu, men är en tänkbar fortsättning på här redovisade studier.

En annan tänkbar fortsättning är att teoretiskt och experimentellt försöka överföra resultat från frysförsök på små simultanfrysande provkroppar, som de redovisas här, till det mera realistiska fallet där frysning sker med en vandrande isfront.

11 SAMMANFATTNING

Detta arbete behandlar problemet frostbeständighet på ett generellt sätt för alla typer av spröda,porösa material. Bakgrunden till undersökningen var en hypotes att kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning borde existera. Här redovisade resultat styrker denna hypotes entydigt.

I och med att kritiska vattenmättnadsgraden existerar, förenklas frostbeständighetsproblemet avsevärt. Så t ex klargörs vad som är inverkan av klimategenskaper och vad som är inverkan av materialegenskaper i samband med frostangrepp. Därmed klargörs också hur materialegenskaper bör förändras för att ett materials frostbeständighet skall förbättras.

I punkt 2.2 ges en grundläggande definition av ett godtyckligt materials frostbeständighet (ekv (11)).

I punkt 2.3 diskuteras materialval med avseende på frostbeständighet, där det visar sig att den nya definitionen av frostbeständighet är mycket användbar.

I punkt 2.4 diskuteras hur den nya frostbeständighetsdefinitionen underlättar framtagandet av en generell frostprovningsmetod.

I punkt 2.5 anges mycket kortfattat hur kännedom om frysmekanismen ger möjlighet till förståelse av sambanden mellan frostbeständighet och materialegenskaper.

Under punkt 3 refereras mycket kortfattat tidigare teoretiska och experimentella studier varur slutsatser om existensen av kritiska vattenmättnadsgrader kan dras.

I punkt 4 ges en omfattande genomgång av en experimentell metod för bestämning av kritiska vattenmättnadsgrader. Olika aspekter på metoden diskuteras. Apparatur för frysprovning och för bestämning av icke frysbara vattenmängder beskrivs.

I punkt 5 beskrivs en experimentell metod med vilken kritiska vattenmättnadsgrader kan bestämmas med en enda fryscykel.

I punkt 6 diskuteras olika metoder för bedömning av vattenupptagning i praktiken. Litteraturuppgifter visar att material i utsatta positioner ofta har fukttillstånd som överstiger dem som uppnås efter mycket lång tids kapillärsugning. Denna senare metod anvisas därför som lämplig för bedömning av vattenupptagning i praktiken.

I punkter 7 och 8 redovisas resultat av frysprovningar. För samtliga 41 testade material har kritiska vattenmättnadsgraden kunnat bestämmas med mer eller mindre god precision.

I punkt 9 (och bilagan) redovisas resultat av vattenabsorptionsbestämningar.

I punkt 10 redovisas beräkning av frostbeständighet för de 41 materialen. I flera fall visar beräknade frostbeständigheter kvalitativ överensstämmelse med frostbeständigheter kända från praktiska förhållanden.

12 SUMMARY

This report treats the problem "Frost Resistance" in a general way for all types of porous and brittle materials. The background of the investigation was a hypothesis that critical degrees of saturation at freezing ought to exist. The results accounted of in this report confirm the hypothesis.

As a consequence of the existence of critical degrees of saturation the problem of frost resistance is considerably simplified. So for instance is made clear which part of a certain frost damage depends on climate conditions and which part depends on materials properties. By that is also made clear in which way the materials properties ought to be changed in order to increase the frost resistance of a certain material.

In section 2.2 a basic definition of the frost resistance of an arbitrary material is stated (eq (11)).

In section 2.3 is discussed choice of material as regards frost resistance. The new definition of frost resistance is shown to be useful.

In section 2.4 is shown in which way the new definition of frost resistance simplify the developement of a new general freeze-test method.

In section 2.5 is discussed very briefly in which way the knowledge of freezing-mechanism clarify the connections between frost resistance and materials properties.

In section 3 is made a short literature survey of articles from which conclusions on the existence of critical degrees of saturation can be drawn.

In section 4 is made a comprehensive account of an experimental method for determination of critical degrees of saturation. Different aspects of the method are discussed, apparati for freeze-testing and for determination of non-freezable water contents are described.

In section 5 is described an experimental method by which critical degrees of saturation can be determined by one-cycle freezings.

In section 6 are discussed different methods for determination of water absorption in practise. Literature-data show that materials, that are highly exposed to frost, often have moisture contents that exceed those reached after capillary water uptake for a long time. The latter type of test-method is therefore considered suitable for determination of water absorption in practise.

In sections 7 and 8 results of freeze-tests are accounted of. Critical degrees of saturation have been determined with more or less good precision for all 41 tested materials.

In section 9 results of water absorption tests are accounted of.

In section 10 is calculated the frost resistance for all 41 materials by means of eq (11). In many cases the calculated frost resistance show a qualitative agreement with frost resistances in practise known by experience.

LITTERATUR

Författare i bokstavsordning. Varje författare i kronologisk ordning.

B Adamsson /1970/
L Ahlgren
S G Bergström
L E Nevander
"Fukt. Byggnadstekniska fuktproblem." Programskrift 12. Statens Råd för Byggnadsforskning. Stockholm 1970.

L Ahlgren /1972/
"Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial" Rapport 36. Inst för Byggn teknik, LTH. Lund 1972.

Alviset /1957/
"Relations entre la résistance au gel des products de terre cuite el leurs propriétes physiques" RILEM Bulletin No 36/37 (1957).

E Amrein /1963/
H R Gloor
A Amrein
"Porenaufbau und Frostwiderstandsfähigkeit grobkeramischer Produkte" Schweiz. Tonwarenind. No 5 (1963)

E Amrein /1963 A/
H R Gloor
"Beitrag zur Bestimmung der Froswiderstandsfähigkeit Grobkeramischer Produkte" Schweiz. Tonwarenind. Nr 4 (1963)

E Amrein /1963 B/
H R Gloor
"Vergleich der Wasseraufnahme von Dachziegeln in der Natur und im Labor-Versuch" Schweiz . Tonwarenind. Nr 6 (1963)

E Amrein /1964/
"Die Bestimmung der Frostwiderstandsfähigheit Grobkeramischer Produkte" Proc 9th Int Ceram Congr. Bruxelles 1964

E Amrein /1968/
H R Gloor
"Erhöhung der Frostwiderstandsfähigkeit grobkeramisher Produkte durch den zusats ausbrennbarer oder vergasbarer Stoffe" Schweiz. Tonwarenind. Nr 9 (1968)

T Andersson /1970/
"Swedish temperature and precipitation records since the middle of the 19th century" Nat Swedish Build Res. Document D:4 1970

Anonym /1963/
"Critical Survey of Mechanical Property Test - Methods for Brittle Materials" Technical Documentary Report No ASD-TDR-63-491 Defence Document Center. Cameron Station Alexandria Virginia 1963

Anonym /1967/
"Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in Gasbetondächern" Betonstein Ztg. H11 (1967)

ASTM /1964/
"1964 Book of ASTM standards. Part 10" Amer Soc for Test and Mat. Philadelphia 1964

R Baur /1960/ "Anforderungen, die an Frostprüfverfahren von Baustoffen zu stellen sind" Die Ziegelind H 15 (1960)

J J Beaudoin /1972/ C Mac Innis "Dimensional Changes of hydrated Portland Cement Paste during slow Cooling and Warming" Cem and Concr Res. Vol 2 (1972)

K Bergmann /1955/ "Uber die Prüfung der Frostbeständigkeit von Ziegeleierzeugnissen" Die Ziegelind H 12 (1955)

K Bergmann /1950/ "Der Einfluss der Hohlraumverteilung in keramischen Erzeugnissen auf deren Frostbeständigkeit" Die Ziegelind H 8 (1950)

K Bergmann /1957/ "Mögligkeiten zur Erhöhung der Frostbeständigkeit" Die Ziegelind H 5 (1957)

S G Bergström /1955/ "Frysförsök med cementbruk" Cement- och Betonginstitutet Medd. Nr 32 Stockholm 1955

S G Bergström /1967/ "Kompendium i Byggnadsmateriallära FK I" TLTH/VBV. Lund 1967

S G Bergström /1969/ L Ahlgren "Beräkning av absorptionsisotermer för betong" Nordisk Betong nr 2 (1969)

G Beskow /1935/ "Tjälbildningen och tjällyftningen med särskild hänsyn till vägar och järnvägar" Sv Geol Undersökn Årsbok 26 (1932) No 3. Stockholm 1935

E K Bigg /1953/ "The supercooling of water" Proc Phys Soc. London B66 (1953)

O W Blümel /1968/ H Frey "Sättigungsbeiwert und Frostwiderstand von Zementmörtel" Betonstein Ztg H 12 (1968)

J H Boer /1958/ "The Shape of Capillaries" ur "The Structure and Properties of porous Materials" Butterworth. London 1958

M Bomberg /1972/ "Reseberättelse - Fuktsymposium och Fuktforskning, Canada aug 1972" Manus: Inst för Byggn teknik, LTH. Lund 1972

H Breyer /1955/ "Der S-wert, des einzige, verlässliche Kriterium für die Beurteilung des Frostbeständigkeit Keramischer Erzeugnisse". Die Ziegelind H 11 (1955)

H Breyer /1970/ "Des Wassersättigungsverfahren nach DIN 52113 zur Messung des Frostbeständigkeitsgrades von Gesteinen" Die Natursteinind. 5 (1970)

E Buth /1968/ W B Ledbetter	"The Importance of Moisture Absorption Characteristics of Lightweight Coarse Aggregate" Higw Res Record No 226 (1968)
B Butterworth /1948/	"Frost Resistance" ur "Bricks and Modern Research" Crosby Lockwood. London 1948
B Butterworth /1961/	"The work of the TBE Frost Committee" Claycraft Aug 1961
B Butterworth /1964 A/	"The Indirect Appraisal of Durability" Trans Brit Ceram Soc. Vol 63 (1964)
B Butterworth /1964 B/	"Testing the Frost Resistance of Bricks" Proc 9th Int Ceram Congr. Bruxelles 1964
B Butterworth /1964 C/	"The Frost Resistance of Bricks and Tiles" Trans Brit Ceram Soc. Vol 1 No 2 (1964)
P D Cady /1969/	"Mechanisms of Frost Action in Concrete Aggregates" J of Materials. Vol 4 No 2, June 1969
W Caemmerer & al /1968/	"Wasserdampfdurchlässigkeit und Feuchtigkeits-verteilung bei Baustoffen und Bauteilen" Berichte aus der Bauforschung. Wilh. Ernst & Sohn. Berlin 1968
Camerman /1958/	"Liability to Frost Damage and Coefficient of Saturation of Limestones" Bull RILEM No 43/44 (1958)
O Carlsson /1954/	"Porstorlek och frostbeständighet hos tegel-material" CTH Handlingar Nr 148. Göteborg 1954
G Christensen /1965/	"Et forsögsapparatur til bedömmelse af yder-vägges frostbestandighed" SBI-Rapport 53. Köpenhamn 1965
Coble /1956/ W D Kingery	"Effect of Porosity on Physical Properties of sintered Alumina" J Amer Ceram Soc. V 39 No 11 (1956)
A R Collins/1944/45/	"The Destruction of Concrete by Frost" J Inst of Civ Eng 23 (1944/45) London
W A Cordon /1963/ D Merrill	"Requirements for Freezing - and - Thawing Durability for Concrete" Proc ASTM. Vol 63 (1963)
U Danielsson /1958/ A Wastesson	"The Frost Resistance of Cement Paste as Influenced by Surface Active Agents" Swed Cem & Concr Res Inst. Proc Nr 30. Stockholm 1958

U Danielsson /1966/ "Conduction Calorimeter Studies of the Heat of Hydration of a Portland Cement" Swed Cem & Concr Res Inst. Proc Nr 38. Stockholm 1966

A Dietzel /1953/ M Weisner-Kieffer "Uber die Frostbeständigkeit keramischer Erzeugnisse" Ber Deut Keram Ges 30 (1953)

J R Dunn /1965/ P P Hudec "The Influence of Clay on Water and Ice in Rock Pores" Physical Res Rep RR 65-5. New York State Dept of Public Works 1965

Düttmann /1964/ Die Ziegelind H 5 (1964)

P Enckell /1970/ "Keramiska mosaikplattor på fasadelement" Nordisk Betong nr 2 (1970)

D H Everett /1961/ "The Thermodynamics of Frost Damage to Porous Solids" Trans Farad Soc 57 (1961)

D H Everett /1965/ J M Haynes "Capillary Properties of some Model Pore Systems with Special Reference to Frost Damage" Bulletin RILEM. No 27 (1965)

G Fagerlund /1971 A/ "Degré critique de saturation - un outil pour l´estimation de la résistance au gel des matériaux de construction" Matériaux et Constructions. No 23 Vol 4 1971

G Fagerlund /1971 B/ "Byggnadsmaterials Beständighet" ur "Beständighet, Reologi, Fukt" Rapport 22. Inst för Byggnadsteknik, LTH, Lund 1971

G Fagerlund /1971 C/ "Viewpoints of a General Method of Testing Frost - Resistance based upon the Concept Critical Degree of Saturation. Contribution to Groupe de Travail RILEM PAN meeting in Luxemburg april 29th - 30th 1971" Manuskript avd Byggnadsmat lära, LTH. Lund 1971

G Fagerlund /1972 A/ "Materialstruktur och frostbeständighet" ur "Samband mellan struktur och egenskaper hos byggnadsmaterial" Rapport 29. Inst för Byggnadsteknik, LTH. Lund 1972

G Fagerlund /1972 B/ "Samband mellan porositet och materials mekaniska egenskaper" Rapport 26. Inst för Byggnadsteknik, LTH. Lund 1972

G Fagerlund /1972 C/ "Frostbeständighet hos porösa och spröda material i relation till deras struktur - Teori och Experiment" Rapport 30. Inst för Byggnadsteknik, LTH. Lund 1972

G Fagerlund /1972 D/ "Kritisk vattenmättnadsgrad och betongprodukters frostbeständighet"
Meddelande från Kontrollrådet för Betongvaror. 1972

G Fagerlund /1972 E/ "Synpunkter på materialval med hänsyn till beständighet", Föredrag vid doktorkursen "Byggnadsmaterials Beständighet".
Manuskript. Byggnadsmat lära, LTH. Lund 1972

G Fagerlund /1972 F/ "Betongs hydratationsgrad - inverkan av ålder, vattencementtal och porositet"
Manuskript avd Byggnadsmat lära, LTH. Lund 1972

G Fagerlund /1973 A/ "Significance of Critical Degrees of Saturation at Freezing of Porous and Brittle Materials"
Contribution to ACI - Symposium "Durability of Concrete" Ottowa oct 1973
Även Report 40. Div of Build Technol. The Lund Inst of Technol. Lund 1973

G Fagerlund /1973 B/ "Non freezable Water Contents of porous Building Materials"
Report 42. Div of Build Technol. The Lund Inst of Technol. Sweden. Lund 1973

G Fagerlund /1973 C/ "Methods of Characterization of Pore Structure - - Three contributions to RILEM's Committee Pore Structure and Properites of Materials"
To be published in "Matériaux et Constructions" during 1973
Även: Report 41. Div of Build Technol. The Lund Inst of Technol. Sweden. Lund 1973

H L Flack /1959/ "Freezing - and - Thawing Resistance of Concrete as affected by the Method of Test"
Proc ASTM Proc vol 57 (1959)

W Frank /1966/
H Künzel
W Schüle "Wärme und Feuchtigkeitsschutz"
Berichte aus der Bauforschung. Wilh Ernst & Sohn Berlin 1966

R D Gaynor /1967/
R C Meininger "Investigation of Aggregate Durability in Concrete"
Highw Res Record nr 196 (1967)

R Gérard /1964/ "L'unité mobile de porométrie à mercure et son application à l'étude de la résistance au gel des matériaux de constructions"
Proc 9th Int Ceram Congr. Bruxelles 1964

R Gérard /1969/ "Determination de la résistance au gel des matériaux de construction par la porométrie au mercure"
CSTC Revue No 7 jan - févr 1969

O Gjörv /1969/
E Bratteland "Måling av temperaturer i og omkring en åpen kaikonstruksjon av armert betong"
Nordisk Betong Nr 4 (1969)

L W Gold /1957/ "A Possible Force Mechanism Associated with the Freezing of Water in Porous Materials" Highw Res Board Bull 168 (1957)

D Grosch /1970/ "Untersuchungen zum Frostverhalten von Gipsbaukörpern" Baustoffind 7 (1970)

R Hanson /1962/ "Takterrasser och plana industritak - tre artiklar" Byggforskningen Särtryck 10:1962. Stockholm 1962

H Harkort /1960/ "Frostbeständigheten sedd mot bakgrunden av porstorlek, porfördelning och porform" Tegelnyheter (1960)

J W Harman /1970/
P D Cady
N B Bolling "Slow-Cooling Tests for Frost Susceptibility of Pennsylvania Aggregates" Higw Res Record 328 (1970)

J M Haynes /1964/ "Frost Action as a capillary Effect" Trans Brit Ceram Soc. Vol 63 No 11 (1964)

R A Helmuth /1960/ "Capillary Size Restrictions on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes" Proc 4th Int Symp on the Chemistry of Cement. Part II. Wash DC (1960)

K Hirschwald /1912/ "Handbuch der Bautechnishen gesteinprüfung" Gebr Borntraeger, Berlin 1912.

P Hoekstra /1969/ "Water Movement and Freezing Process" Proc Soil Sci Soc Amer. Vol 33 (1969)

J Holmgren /1959/
T Isaksen "Ventilated and Unventilated flat, compact Roofs" Norges Byggeforskningsinstitutt. Rapport nr 27. Oslo 1959

D B Honeyborne/1958/
P B Harris "The Structure of Porous Building Stone and its relation to weathering behaviour" Proc tenth Symp of the Colston Res Soc held in the Univ of Bristol 1958. Butterworth's. London 1958

J Hult /1966/ "Hållfasthetslära" Almquist & Wixells förlag. Stockholm 1966

D L Ivey /1970/
P H Torrans "Air Void Systems in Ready - Mixed Concrete" J of Materials. Vol 5 No 2 (1970)

L-E Jansson /1964/ "Frost Penetration in Sandy Soil" KTH Handl Nr 231 (1964)

A R Jumikis /1957/ "Soil Moisture Transfer in the Vapor Phase upon Freezing" High Res Board Bull 168 (1957)

E H Kerner /1956/ "The Elastic and Thermo - Elastic Properties of Composite Materials" Proc Phys Soc . London B 69 (1956)

P Klieger /1952/	"Effect of entrained Air on Strength and Durability of Concrete made with various Maximum Sizes of Aggregates" Proc Higw Res Board. Vol 31 (1952)
P Klieger /1961/ J A Hanson	"Freezing and Thawing Tests of Lightweight Aggregate Concrete" J Amer Concr Inst. V 57 (1961)
H Kreüger /1923/	"Utredning rörande klimatisk inverkan på byggnadsfasader" Ingeniörsvetenskapsakademiens Handl. Nr 24 (1923)
H Künzel /1964/	"Feuchtigkeitstechnische Eigenschaften von Ziegelbaustoffen" Die Ziegelind. H 7 (1964)
R Landgren /1952/ H S Sweet	"Investigation of Durability of Wyoming aggregates" Proc Higw Res Board. Vol 31 (1952)
T D Larson /1967/ P D Cady J J Malloy	"The Protected Paste - Volume - concept using New Air - Void Measurements and Distribution Techniques" J of Materials. Vol 2 No 1 March 1967
K R Lauer /1956/ F O Slate	"Autogeneous Healing of Cement Paste" J Amer Concr Inst. June 1956
W B Ledbetter /1970/ E Buth	"TTI Study Explores Durability of Structural Lightweight concrete for Highway Building" Higw Res News nr 41 (1970)
H Lehmann /1959/	"Die Frostprüfung mit Hilfe physikalisher Messgrössen" Die Ziegelind. Heft 24 (1959)
H Lehmann /1969/ E Rauschenfels	"Ein neues Frostdilatometer für Proben im Format von Normenprismen" Tonind Ztg 93 (1969)
C Liger /1957/	"Mesures faites sur produits mis en oeuvre" RILEM Bull No 36/37 1957
G G Litvan /1972/	Phase Transitions of Adsorbates: IV, Mechanism of Frost Action in Hardened Cement Paste" J Amer Ceram Soc. Vol 55 (1972)
S Å Lundgren /1967/	"Träskivor som byggnadsmaterial Del I" S Å Lundgrens Ingeniörsbyrå. Nyköping 1967
A W Lykow /1958/	"Transporterscheinungen in Kapillarporösen Körpern" Akademie-Verlag. Berlin 1958
C Mac Innis /1968/ J J Beaudoin	"Effect of Degree of Saturation on the Frost Resistance of Mortar Mixes" J Amer Concr Inst. Proc V 65 (1968)

C Mac Innis /1971/
E Lau
"Maximum Aggregate Size Effect on Frost Resistance of Concrete"
J Amer Concr Inst. Febr 1971

M Mamillan /1958/
"Frost Vulnerability Tests on Limestones"
Bull RILEM. No 43/44 (1958)

M Mamillan /1967/
"La gélivité des materiaux"
Annales de l´Institute Techninque du Batiment et des Travaux Publiques. Juillet-aout 1967 No 235-236

A Markestad /odat/
Kompendium i Byggnadsmateriallära, Tapirs Förlag NTH, Trondheim

J C Maso /1969/
"La nature mineralogique des agrégats facteurs essentiel de la résistance des bétons à la rupture et à l´action du gel"
Revue des Matériaux de Construction No 647/648 o 649 (1969)

P O Mattsson /1970/
M Mazlumolhosseini
"Restaureringsteknisk undersökning av byggnadsminnet Månstorps Gavlar"
Examensarbete avd Byggnadsmateriallära, LTH. Lund 1970

J W Mc Burney /1933/
C E Lovewell
"Strength, Water Absorption and Weather Resistance of Building Bricks produced in the United States"
Proc ASTM 33 (part II) (1933)

J W Mc Burney /1935/
Proc ASTM 35 (part I) (1935)

J W Mc Burney /1939/
A R Eberle
"Freezing - and - Thawing Tests for Building Brick"
Proc ASTM. Vol 38 (part II) (1939)

R D Miller /1960/
J H Baker
J H Kolaian
"Particle size, Overburden pressure, Pore Water Pressure and Freezing Temperature of Ice Lenses in soil"
Proc 7th Int Conf of Soil Sci. Madison. Wisc. USA 1960

Motteu /1968/
"A study of the Frost - Resistance of Building Materials"
Build Int.Nov 1968

M Muresan /1969/
"Recherches dilatometriques effectuées sur certains matériaux de construction poreux soumis a des éssais accelerés de gel-dégel"
Manuskript. Cluj Rumänien 1969

M Muresan /1970/
"Recherches sur la corrélation entre la distribution intégrale et différentiale de la grandeur des pores - résistance au gel-dégél des tuiles en céramiques, détermination par la méthode tensométrique électro-resistive"
Manuskript. Bukarest 1970

J W Murdock /1958/
C E Kesler
"Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams"
J Amer Concr Inst. Aug 1958

W Ohnenmüller /1960/
"Die Bestimmung der Frostempfindlichkeit Poröser Keramischer Werkstoffe mit Hilfe Physikalischer Messgrössen"
Diss Bergakademie Clausthal Fakultät für Bergbau und Hüttenwesen. 1960

A Pauw /1960/
"Static Modulus of Elasticity of Concrete as affected by Density"
J Amer Concr Inst. Proc V 57 (1960)

E Penner /1957/
"Soil Moisture Tension and Ice Segregation"
Higw Res Board Bull 168 (L957)

E Penner /1958/
"Pressures Developed in a Porous granular System as a Result of Ice Segregation"
Higw Res Board Spec Report Nr 40 (1958)

E Penner /1965/
"Suction and its use as Measure of Moisture Contents ans Potentials in Porous Materials"
Humidity & Moisture Vol 4. Reinhold Publ Comp NY 1965

G Pickett /1945/
"Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders"
Proc ASTM Vol 45 (1945)

G Pickett /1953/
"Flow of Moisture in Hardened Portland Cement During Freezing"
Higw Res Board Vol 32 (1953)

G Pilz /1970/
"Porengrössenvertilung im ziegelscherben und ihre Bedeutung für die Frostfestigkeit"
Die Ziegelind H 15/16 (1970)

N M Plum /1965/
J Jessing
"Behov for en debat om statistisk forsögsplan-lägning og verdering"
Ingeniörens Ugeblad nr 42 (1965)

N M Plum /1966/
J Jessing
P Bredsdorff
H Spaehr
"A new approach to testing of building mateials"
Bulletin RILEM No 30. March 1966

L A Poggi /1954/
"Sättigungskoeffizient und Frostfestigkeit"
Sammanfattning av artikel i "Ind ital dei laterizi, No 6 (1953)"
Die Ziegelind H 18 (1954)

S Popovics /1969/
"Effect of Porosity on the Strength of Concrete"
J of Materials. Vol 4 No 2 (1969)

T C Powers /1945/ — "A working Hypothesis for further Studies of Frost Resistance of Concrete" J Am Concr Inst. Vol 16 No 4. Febr 1945

T C Powers /1948/ T L Brownyard — "Studies of Physical Properties of Hardened Portland-Cement-Paste" Bull 22. Res Labs of the Portl Cem Ass. Chicago 1948

T C Powers /1949/ — "The Air-Requirement of Frost-Resistant Concrete" Higw Res Board. Proc V 29 (1949)

T C Powers /1953/ R A Helmuth — "Theory of Volume changes in Hardened Portland-Cement-Paste during Freezing" Higw Res Board. Proc V 32 (1953)

T C Powers /1955/ — "Basic Considerations Pertaining to Freezing-and-Thawing Tests" Proc ASTM 55 (1955)

T C Powers /1956/ — "Resistance of Concrete to Frost at early Ages" Proc RILEM Symp "Winter Concreting". Köpenhamn 1956

T C Powers /1960/ — "Physical Properties of Cement Paste" Proc of the 4th Int Symp on the Chemistry of Cement. Wash DC (1960)

E Purins /1967/ G Linden — "Undersökning av lättbetongens frostbeständighet och poruppbyggnad i materialet" Raport Nr 62 Inst för Byggnadsteknik, CTH. Göteborg 1967

E Purins /1968/ — "Investigation of the Frost-Resistance of Light-weight Concrete and of the Pore-Structure in the Material" CTH. Inst för Byggn teknik. Göteborg 1968

E Rauschenfels /1970/ — "Untersuchungen über die Frostwiderstandsfähigkeit von Kalksandsteinen" Diss Technischen Univ Clausthal 1970

RILEM /1972/ — "RILEM Tentative Recommendations: Testing Methods for Natural and Artificial Stones" Materiaux et Constructions. Vol N° 28 (1972)

T Ritchie /1968/ J I Davisson — "Moisture Content and Freeze-Thaw Cycles of Masonry Materials" J of Materials. Vol 3 No 3. Sept 1968

A Ruettgers /1935/ E N Vidal S P Wing — "An Investigation of the Permeability of Mass concrete with particular Reference to Boulder Dam" J Amer Concr Inst. Proc V 31 (1935)

Saarima /1971/ — "Inverkan av porfördelningen på frostbeständigheten hos tegelstenar" Föredrag vid "Symposium om fuktforskning vid LTH 20-21 jan 1971. Se även sammanfattningen av nämnda symposium. Inst för Byggnadsteknik. LTH. Lund 1971

F Sandford /1970/ "Super-Cooling of Water in the Pore System of Bricks"
CTH. Handl Nr 330 (1970)

A Schack /1957/ "Der Industrielle Wärmeübergang"
Düsseldorf 1957

G Schellbach /1964/ "Wasserhaushalt und Frostbeanspruchung von Dachziegeln in Abhängigheit von der Dachneigung"
Die Ziegelind, H 11. (1964)

H Schneider /1962/ "Uber den Frostwiderstand von Dachziegeln und seine Prüfung"
Otto Graf-Institut. Techn Hochschule Stuttgart.
Sonderdruck aus die Ziegelind Vol 15, H 8 - H13.
(1962)

H Schneider /1963/ "Zu Bestimmung der Frostwiderstandsfähigkeit keramischer Baustoffe"
Zement-Kalk-Gips Nr 8 (1963) (med diskussion av Breyer)

A Schäfer /1964/ "Frostwiderstand und Porengefüge des Betons-Beziehungen und Prüfverfahren"
Deut Ausschuss f Stahlbeton. Heft 167. Wilh Ernst & Sohn. Berlin 1964

H Sirhal /1968/ "Die Bedeutung der Kenntnis des Porengrössen-verteilungs im Keramischen Scherben"
Die Ziegelind, H 24 (1968)

Statistisk Årsbok för Sverige /1966/ Statistiska Centralbyrån Stockholm 1966

E G Swenson /1956/ "Weather in Relation to Winter Concreting"
Proc RILEM Symp "Winter Concreting". Köpenhamn 1956

S Taber /1929/ "Frost Heaving"
J of Geology 37 (1929)

S Taber /1930/ "Freezing and Thawing of Soils as Factors in the Destruction of Road Pavements"
Public Roads. Vol 11 No 6 (1930)

R Terzaghi /1945/ "Discussion of a Paper by T C Powers: `A Working hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete`"
J Amer Concr Inst. V 41 (1945)

W N Thomas /1938/ "Experiments on the Freezing of certain Building Materials"
Dept of Scientific and Industrial Res.
Build Res Techn Paper No 17. His Majesty´s Stationery Office. London 1938

C Tourenq /1970/ "La gélivité des roches-applications aux granulats"
Rapport de Recherche No6 Labor Centr des Ponts et Chaussées. Paris 1970

B Tremper /1961/
D L Spellman
"Tests for Freeze-Thaw Durability of Concrete Aggregates"
Ur Highw Res Board Bull nr 305. Wash DC 1961

R D Walker /1968/
T-C Hsieh
"Relationship between Aggregate Pore Characteristics and Durability of Concrete Exposed to Freezing and Thawing"
Highw Res Record No 226 (1968)

R C Valore /1949/50/
"Volume Changes in small Concrete Cylinders during Freezing and Thawing"
J Amer Concr Inst 21 (1949/50)

K Walz /1965/
A Schäfer
"Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Gehwegplatten aus Beton"
Betontechn. Ber 1965

K Walz /1966/
H Helms-Derfert
"Luftporen-Kennwerte von Beton-fahrbahndecken-Einfluss auf das Abwittern durch Tausalze"
Betontechniche Berichte (1966)

B Warris /1963/
"The Influence of Air-Entrainment on the Frost-Resistance of Concrete.
Part A:Void Distribution"
Swed Cem & Concr Res Inst. Proc Nr 35. Stockholm 1963

B Warris /1964/
"The Influence of Air-entrainment on the Frost-Resistance of Concrete.
Part B: Hypothesis and Freezing Experiments"
Swed Cem & Concr Res Inst. Proc Nr 35.
Stockholm 1964

B Warris /1965/
"Undersökning av Eternits Frostbeständighet"
Privat meddelande

B Warris /1969/
"Model describing the Process of Frost Deterioration"
Proc RILEM Symp "Durability of Concrete".
Prag 1969

W Weibull /1939 A/
"Statistical Theory of Strength of Materials"
Ingeniörsvetenskapsakademiens Handl Nr 151 (1939)

W Weibull /1939 B/
"Phenomenon of Rupture in Solids"
Ingeniörsvetenskapsakademiens Handl Nr 153 (1939)

G Verbeck /1960/
Landgren
"Influence of Physical Characteristics of Aggregate on Frost-Resistance of Concrete"
ASTM Proc V 60 (1960)

Whiteside /1950/
Sweet
"Effect of Mortar Saturation in Concrete Freezing and Thawing Tests"
Higw Res Board. Proc 30 (1950)

- P J Williams /1967/
"Properties and Behaviour of Freezing Soils"
Publikasjon Nr 72. Norges Geotekniske Institutt.
Oslo 1967

H Vinberg /1956/ "Temperature-Variations in Sweden of Importance for Tests of Freezing Resistance"
Proc RILEM Symp "Winter Concreting". Köpenhamn 1956

R Vinkeloe /1962/ "Prüfverfahren zur Ermittlung des dynamishen Elastizitätsmoduls von Betonprismen"
Tonind Ztg. 86 (1962) H 10

H G F Winkler /1958/ "Uber die Frostbeständigkeit von Dachziegeln"
Proc 6th Int Ceram Congr. Wiesbaden 1958

H G F Winkler /1959/ "Des Problem der Frostbeständigkeit von Dachziegeln"
Ber Deut Keram Ges. H 10 (1959)

H Winterkorn /1955/ "Discussion of 'Suction Force in Soils upon Freezing' by A R Jumikis"
Amer Soc Civ Eng. 1955 separate No 656

B H Vos /1967/ "Condensation in Structures"
TNO Report B1 - 67 - 33. Delft 1967

J Vuorinen /1969/ "On the Behaviour of Hardened Concrete during Freezing"
The State Inst for Technical Res. Helsingfors 1969

J Vuorinen /1970/ "On Use of Dilation Factor and Degree of Saturation in Testing Concrete for Frost Resistance"
Nordisk Betong Nr 1 (1970)

J Vuorinen /1971/ "Användning av termoskalorimeter för undersökning av värmeutveckling hos hårdnande betong"
Nordisk Betong Nr 2 (1971)

TABELLER

TABELL 1 Ökning i öppen porvolym vid nerkylning från +22,5°C till +1,5°C

TABLE 1 Increase in open pore-volume at cooling the specimen from +22,5°C to +1,5°C

Material		$\Delta V_{pö}$ (%) Ekv (72) Medelvärden av två provkroppar
Nr	Typ	
1	Lösbränt tegel	+0,19
2	Hårdbränt "	+0,23
7	Kalksandsten	-0,03
8	Gasbetong typ 1	+0,15
9	" " 2	+0,12
10	" " 3	+0,31
11	" " 4	+0,26
17	Internit	+0,95
18	Löspressad eternit	+1,16
19	Hårdpressad "	+1,13

TABELL 2 Data över frysningar
TABLE 2 Data of freezing experiments

Material		Storlek (mm)	Antal frys-Provkr.	Sätt för anpassning [1]	Antal frys-serier	Ev frysning av samma provkropar med högre S [2]
Nr	Typ					
1	Lösbränt tegel	30x30x120 40x40x120	37 10	T T	2 1	
2	Hårdbränt tegel	30x30x120 40x40x120	84 22	T T	3 2	
3	Gittertegel a) Yttre del b) Inre del	30x30x120 "	21 21	T T	2 2	
4	Månstorps gavlar 1500-tal	30x30x120	6	T	1	
5	Månstorps gavlar 1930-tal	30x30x120	10	T	1	
6	Månstorps gavlar 1960-tal	30x30x120	10	T	1	
7	Kalksandsten	30x30x120 40x40x120	60 22	T T	2 2	
8	Gasbetong typ 1	30x30x120	40	T	3	
9	Gasbetong typ 2	30x30x120	40	T	3	
10	Gasbetong typ 3	30x30x120	40	T	3	
11	Gasbetong typ 4	30x30x120	40	T	3	
12	Cement-bruk 4:1	30x30x120	16	T	2	ja
13	" 4:1	30x30x120	13	T	2	ja
14	Bruk Sara-bond	40x40x160	22	T	2	
15	" "	40x40x160	22	T	2	
16	KC-bruk	30x30x120	15	T	2	ja
17	Inter-nit otätade tätade	tx30x100 "	16 16	T T	2 1	ja

TABELL 2 Data över frysningar (Forts)
TABLE 2 Data of freezing experiments (Contnd)

Material Nr	Material Typ	Storlek (mm)	Antal frys-provkr	Sätt för anpassning [1]	Antal frys-serier	Ev frysning av samma provkropar med högre S [2]
18	Löspressad asbestcement otätade	tx30x100	16	T	2	ja
	tätade	"	16	T	1	
19	Hårdpressad asbestcement otätade	tx30x100	16	T	2	ja
	tätade	"	16	T	1	
20	Sinuskorr. asbestcement					
	a) vågtopp	tx30x100	20	T	1	
	b) mellandel	tx30x100	20	T	1	
	c) vågdal	tx30x100	20	T	1	
21	Pressad asbestcement	tx30x100	20	T	1	
22	Opressad asbestcement	tx30x100	20	T	1	
23	Pressad grå asbestcement	tx30x100	20	T	1	
24	Torrformad asbestcement	tx30x100	20	T	1	
25	Sinuskorr. asbestcement	tx30x100	20	T	1	
26	Pressad asbestcement	tx30x100	20	T	1	
27	Torrformad asbestcement	tx30x100	20	T	1	
28	Svenskt Lecablock γ=650	30x30x120	22	U	2	
29	Svenskt Lecablock γ=1300	30x30x120	22	U	2	
30	Norskt Lecablock	30x30x120	48	U	2	
31	" "	30x30x120	52	U	2	
32	Pimpstensbetong	40x40x160	6	U	2	ja

TABELL 2 Data över frysningar (Forts)
TABLE 2 Data of freezing experiments (Contnd)

Material		Storlek (mm)	Antal frys-provkr	Sätt för anpassning[1]	Antal frys-serier	Ev frysningar av samma provkrop-par med högre S[2]
Nr	Typ					
33	Pimpstens-betong	40x40x160	6	U	2	ja
34	"	40x40x160	6	U	2	ja
35	"	40x40x60	6	U	2	ja
36	"	40x40x160	6	U	2	ja
37	"	30x50x120	5	U	2	ja
38	Betong utan fiber	40x40x160	7	T	2	ja
39	Betong med fiber	40x40x160	7	T	2	ja
40	Betongtak-panna					
	a) vågtopp	tx30x120	24	U	2	
	b) vågdal	tx30x120	24	U	2	
41	Tegeltak-panna					
	a) vågtopp	tx30x120	22	U	2	
	b) vågdal	tx30x120	22	U	2	

Totalt antal provkroppar är 1.132 st.
1) T = anpassning genom torkning
U = " " uppfuktning
2) Vid litet antal provkroppar har frysningar ibland upprepats med samma provkroppar men med ökade vattenhalter.

TABELL 3 Densiteter och porositeter
TABLE 3 Densities and porosities

Material		Densiteter kg/m^3						Porositeter %						Anm
		Kompakt-			Skrym-			Öppen			Sluten	Grova "luftporer		
Nr	Typ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Medelv.	Värde	Metodik	
1	Lösbränt tegel	11	2760	50	54	1690	11	54	39,5	0,2	-0,7	10,0	Ekv (129)	
2	Hårdbränt tegel	8	2740	30	100	1860	6	100	31,1	0,1	1,0	9,2	- " -	
3	Gittertegel a) Yttre del b) Inre del				34 34	1990 2000	20 22	34 34	24,8 24,5	1,3 0,9				
4	Månstorps Gavlar 1500-tals tegel				6	1810		6	32,7					Mattsson & Mazlumol-hosseini /1970/
5	- " - 1930-tals tegel				6	2080		6	20,9					- " -
6	- " - 1960-tals tegel				6	1880		6	27,3					- " -
7	Kalksandsten	10	2650	18	83	1840	23	83	30,9	1,1	-0,3			
8	Gasbetong Typ 1	7	2620	60	32	502	2	32	81,2	0,2	-0,4	46,7	Ekv (129)	
9	- " - " 2	8	2670	20	33	572	14	33	78,0	0,5	0,6			
10	- " - " 3	8	2610	30	35	516	4	35	80,7	0,2	-0,5	53,8	Ekv (129)	
11	- " - " 4	9	2620	40	30	532	4	30	79,3	0,2	0,4			
12	Cementbruk 4:1 vct=0,54				9	1970	22	9	25,9	0,7		7,4	Färsk lufthalt	Alla bestämningar gjorda efter frysningar

TABELL 3 Densiteter och porositeter (Forts)
TABLE 3 Densities and porosities (Contnd)

Material		Densiteter kg/m^3						Porositeter %						Anm
		Kompakt-			Skrym-			Öppen			Sluten	Grova "luftporer		
Nr	Typ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Medelv.	Värde	Metodik	
13	Cementbruk 4:1 vct=0,64				9	1970	18	16	25,9	0,6		6,0	Färsk lufthalt	Alla bestämningar gjorda efter frysning
14	Bruk Sarabond vct=0,535				18	2070	5	23	21,3	0,6		6,2	Ekv (78)	
15	- " - " - vct=0,488				22	2080	11	26	20,9	0,6		8,4	- " -	
16	KC-Bruk 35/65/550				5	1770	19	5	33,4	0,9		13,5	Färsk lufthalt	Bestämningar gjorda efter frysning
17	Internit				5	1500	17	20	43,2	1,1				
18	Lösspressad asbestcement				15	1800	20	26	36,6	0,7				
19	Hårdpressad - " -				11	2010	23	21	28,8	1,5				
20	Sinuskorr.asbestcement													
	a) Vågtopp				2	1589	14	2	42,5	0,6				
	b) Mellandel				2	1646	22	2	40,8	0,7				
	c) Vågdal				2	1628	10	2	40,4	0,6				

TABELL 3 Densiteter och porositeter (Forts)
TABLE 3 Densities and porosities (Contnd)

Material		Densiteter kg/m^3					Porositeter %						Anm
		Kompakt-			Skrym-		Öppen			Sluten	Grova "luftporer		
Nr	Typ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Medelv.	Värde	Metodik	
21	Pressad grå asbest-cement				2	1950	22	2	29,4	1,1				
22	Opressad " "				2	1940	10	2	30,9	0,7				
23	Pressad " "				2	1600	0	2	40,8	0,1				
24	Torrformad pigment. asbestcement				2	1860	14	2	31,3	0,7				
25	Sinuskorr. asbest-cement akrylfärg vågtopp				2	1610	10	2	41,2	0,1				
26	Pressad asbest-cement silikat-färg				2	1950	0	2	29,7	0,2				
27	Torrformad as-bestcement med akrylfärg				2	1780	50	2	33,1	1,6				
28	Svenskt Leca-block 650 kg/m^3				7	630	23		76,2					Poros.beräk-ningar med ρ=2700 kg/m^3
29	Svenskt Leca-block 1300 kg/m^3				7	1240	38		53,2					Poros.beräk-ningar med ρ=2700 kg/m^3

TABELL 3 Densiteter och porositeter (Forts)
TABLE 3 Densities and porosities (Contnd)

Material		Densiteter kg/m^3					Porositeter %						Anm
		Kompakt-			Skrym-		Öppen			Sluten	Grova "luftporer		
Nr	Typ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Medelv.	Värde	Metodik	
30	Norskt Lecablock Bindemedel cement				7	860	19		67,5					Poros.beräkningar med ρ=2700 kg/m^3
31	Norskt Lecablock Bindemedel cement+stenmjöl				7	785	42		70,4					- " -
32	Pimpstensbetong				6	1450	9	6	42,0	0,4				Bestämningar gjorda =1/2 år före frysning
33	- " -				6	1330	29	6	46,1	1,0				- " -
34	- " -				6	1330	13	6	45,8	0,5				- " -
35	- " -				6	1475	18	6	40,8	0,7				- " -
36	- " -				6	1270	17	6	47,8	0,9				- " -
37	- " -				5	1260	49	5	49,6	1,4				- " -
38	Betong 4,1:1 utan fiber				7	2215	19	7	17,1	0,6		2,0	Färsk lufthalt	
39	Betong 4,0:1 med fiber				7	2295	10	7	16,6	1,2		1,2	- " -	

TABELL 3 Densiteter och porositeter (Forts)
TABLE 3 Densities and porosities (Contnd)

Material		Densiteter kg/m^3				Porositeter %						Anm
		Kompakt-		Skrym-			Öppen		Sluten	Grova "luftporer		
Nr	Typ	Antal värde σ	Antal	värde	σ	Antal	värde	σ	Medelv.	Värde	Metodik	
40	Betongtakpanna											
	a) Vågtopp		1	2040		1	24,4					
	b) Vågdal		1	2040		1	24,1					
41	Tegeltakpanna											
	a) Vågtopp		7	1860	11	7	30,9	0,5				
	b) Vågdal		7	1870	11	7	30,9	0,9				

TABELL 4 Icke frysbara vattenmängder bestämda på olika sätt
TABLE 4 Non-freezable water contents determined in different ways

Material		Temp (°C)	K = w_{if}/p enligt metod nr [1]						Jämförelse mellan olika metoder			
Nr	Typ		1	2 [2]	3	4	5	6	Δ(1-3)	Δ(1-4)	Δ(1-5)	Δ(1-6)
1	Lösbränt tegel	-5 à -7	-	0,062	0,018	0,036	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,008	0,051	0,016	0,027	-	-	-0,008	-0,019	-	-
		-20	-	0,032	0,015	0,023	-	-	-	-	-	-
2	Hårdbränt tegel	-5 à -7	0,017	-	0,024	0,041	-	-	-0,070	-0,024	-	-
		-10 à -12	0,017	-	0,020	0,034	-	-	-0,003	-0,017	-	-
		-20	-	-	0,019	0,028	-	-	-	-	-	-
7	Kalksandsten	-5 à -7	0,156	-	0,139	0,343	-	-	0,017	-0,187	-	-
		-10 à -12	0,100	-	0,080	0,162	-	-	-0,020	-0,062	-	-
		-20	-	-	0,067	0,130	-	-	-	-	-	-
8	Gasbetong typ 1	-5 à -7	0,091	0,092	-	-	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,049	0,067	-	-	-	-	-	-	-	-
		-20	-	0,050	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Gasbetong typ 2	-5 à -7	0,154	0,123	-	-	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,093	0,094	-	-	-	-	-	-	-	-
		-20	-	0,086	-	-	-	-	-	-	-	-
10	Gasbetong typ 3	-5 à -7	0,083	0,108	-	-	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,072	0,073	-	-	-	-	-	-	-	-
		-20	-	0,045	-	-	-	-	-	-	-	-
11	Gasbetong typ 4	-5 à -7	0,055	0,098	-	-	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,036	0,070	-	-	-	-	-	-	-	-
		-20	0,025	0,053	-	-	-	-	-	-	-	-

TABELL 4 Icke frysbara vattenmängder bestämda på olika sätt (Forts)
TABLE 4 Non-freezable water contents determined in different ways (Contnd)

Material		Temp (°C)	K = w_{if}/p enligt metod nr [1]						Jämförelse mellan olika metoder			
Nr	Typ		1	2[2]	3	4	5	6	Δ(1-3)	Δ(1-4)	Δ(1-5)	Δ(1-6)
12	Cementbruk 4:1 vct=0,54	-5 à -7	-	-	0,353	0,408	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	-	-	0,288	0,367	0,245	-	-	-	-	-
		-20	-	-	0,231	0,329	0,227	0,354	-	-	-	-
13	Cementbruk 4:1 vct=0,64	-5 à -7	-	-	0,377	0,446	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	-	-	0,272	0,377	0,275	-	-	-	-	-
		-20	-	-	0,212	0,272	0,254	0,397	-	-	-	-
14	Bruk Sarabond vct=0,525	-5 à -7	0,554	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,483	-	-	-	0,404	-	-	-	0,079	-
		-20	0,454	-	-	-	0,373	0,583	-	-	0,081	-0,129
15	Sarabond vct=0,488	-5 à -7	0,461	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,382	-	-	-	0,412	-	-	-	-0,030	-
		-20	0,371	-	-	-	0,380	0,594	-	-	-0,009	-0,223
16	KC-bruk 35/65/550	-5 à -7	-	-	0,146	0,205	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	-	-	0,095	0,157	-	-	-	-	-	-
		-20	-	-	0,064	0,125	-	-	-	-	-	-
17	Internit	-5 à -7	-	-	0,332	0,426	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,405	-	0,258	0,369	-	-	0,147	0,064	-	-
		-20	-	-	0,221	0,337	-	-	-	-	-	-
18	Löspressad asbestcement	-5 à -7	-	-	0,467	0,587	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,475		0,383	0,516	-	-	0,092	-0,041	-	-
		-20	-	-	0,337	0,471	-	-	-	-	-	-
19	Hårdpressad asbestcement	-5 à -7	-	-	0,633	0,922	-	-	-	-	-	-
		-10 à -12	0,569	-	0,563	0,738	-	-	0,006	-0,169	-	-
		-20	-	-	0,514	0,673	-	-	-	-	-	-

TABELL 4 Icke frysbara vattenmängder bestämda på olika sätt
TABLE 4 Non-freezable water contents determined in different ways

Material		Temp (°C)	$K = w_{if}/p$ enligt metod nr [1]						Jämförelse mellan olika metoder			
Nr	Typ		1	2[2]	3	4	5	6	Δ(1-3)	Δ(1-4)	Δ(1-5)	Δ(1-6)
28	Svenskt Leca-block γ=650	-5 à -7	-	-	0,064	0,084	-	-	-	-	-	-
		-10 à-12	0,056	-	0,047	0,070	-	-	0,009	-0,014	-	-
		-20	-	-	0,039	0,061	-	-	-	-	-	-
29	- " - γ=1300	-5 à -7	-	-	0,149	0,105	-	-	-	-	-	-
		-10 à-12	0,157	-	0,117	0,150	-	-	0,040	0,007	-	-
		-20	-	-	0,105	0,140	-	-	-	-	-	-
38	Betong 4,1:1 utan fiber	-10 à-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-20	-	-	-	-	0,467	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	0,431	0,674	-	-	-	-
39	Betong 4,0:1 med fiber		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		-10 à-12	-	-	-	-	0,495	-	-	-	-	-
		-20	-	-	-	-	0,457	0,714	-	-	-	-
Medelvärde av jämförelser mellan olika metoder									0,021	-0,046	0,030	-0,176

1) Metod 1: Adiabatisk kalorimeter. Upptiningsexperiment
" 2: Differenskalorimeter. Nedfrysningsexperiment
" 3: Beräknat ur ekv (85). Absorptionsisoterm enligt Ahlgren /1972/
" 4: " " " (85). Desorptionsisoterm " " "
" 5: Ekv (103);konstant k enligt Powers & Brownyard /1948/
" 6: Ekv (103); " k enligt Warris /1964/

2) Approximativ beräkning

TABELL 5 Kritiska fukttillstånd
TABLE 5 Critical moisture conditions.

Material		Antal cykler	S_{eKR}									u_{KR} (%)		S_{fKR} (-10 à -12°C)
Nr	Typ		Ur E	Ur $\Delta\ell$	Ur Q^{-1}	Ur ΔQf	Ur $\Delta\gamma$	Okulärt	Ur u_{KR}	Medel-värde	Troligt värde	Experim.	Ur S_{eKR}	
1	Lösbränt tegel: storlek 30x30x120	104-159	0,84-0,85	0,87-0,88 [1]	0,85-0,87 [1]	-	-	0,84-0,85	-	0,86	0,84	-	19,6	0,84
	40x40x120	99	0,87	-	-	-	-	0,87	-	0,87	0,87	-	20,3	0,87
2	Hårdbränt tegel: storlek 30x30x120	160-165	0,75-0,76	~0,79 [1]	~0,79 [1]	-	-	0,75-0,76	-	0,77	0,75	-	12,5	0,75
	40x40x120	99-108	0,80	-	-	-	-	0,80	-	0,80	0,80	-	13,4	0,80
3	Gittertegel: a) yttre del	9-10	0,81	-	-	-	-	-	-	-	0,81	-	10,1	0,81 [3]
	b) inre del	9-10	0,87	-	-	-	-	0,88	-	0,88	0,87	-	10,7	0,87 [3]
4	Månstorps gavlar 1500-tals tegel	?	<0,60	-	-	-	-	<0,60	-	<0,60	<0,60	-	<10,8	<0,60 [3]
5	Månstorps gavlar 1930-tals tegel	?	0,67	-	-	-	-	-	-	-	0,67	-	6,7	0,67 [3]

TABELL 5 Kritiska fukttillstånd (Forts)
TABLE 5 Critical moisture conditions (Contnd)

Material		Antal cykler	S_{eKR}									u_{KR} (%)		S_{fKR} (-10 à -12°C)
Nr	Typ		Ur E	Ur $\Delta\ell$	Ur Q^{-1}	Ur ΔQf	Ur $\Delta\gamma$	Okulärt	Ur u_{KR}	Medel-värde	Troligt värde	Experim.	Ur S_{eKR}	
6	Månstorps gavlar 1960-tals tegel	?	0,74	-	-	-	-	0,74	-	0,74	0,74	-	10,7	0,74[3]
7	Kalksandsten: storlek 30x30x120	131	0,79	≈0,84[1]	-	-	-	-	-	0,81	0,79	-	13,3	0,77
	40x40x120	90-108	0,80	-	-	-	-	-	-	0,80	0,80	-	13,4	0,78
8	Gasbetong typ 1	1	0,62	0,62	0,47	-	-	-	-	0,57	-	-	-	-
		26-33	0,57	0,47	0,46	-	-	0,46	-	0,49	-	-	-	-
		114-115	0,50	0,44	0,44	0,46	0,46	0,46	-	0,46	0,46	-	74,4	0,43
9	Gasbetong typ 2	1	0,50-0,60	0,52-0,60	0,46	-	-	-	-	≈0,52	-	-	-	-
		16-37	0,50	0,49	0,46	-	-	0,46	-	0,48	-	-	-	-
		114-115	0,50	0,47	0,46	0,47	0,46	0,46	-	0,47	0,46	-	62,7	0,40
10	Gasbetong typ 3	1	0,51	0,44	0,43	-	-	-	-	0,46	-	-	-	-
		16-37	0,40	0,40	0,40	-	-	-	-	0,40	-	-	-	-
		114-115	0,40	0,37	0,40	≈0,53	≈0,38	0,40	-	0,41	0,40	-	62,6	0,35

TABELL 5 Kritiska fukttillstånd (Forts)
TABLE 5 Critical moisture conditions (Contnd)

Material		Antal cykler	S_{eKR}									u_{KR} (%)		S_{fKR} (-10 à -12°C)
Nr	Typ		Ur E	Ur $\Delta\ell$	Ur Q^{-1}	Ur ΔQf	Ur $\Delta\gamma$	Okulärt	Ur u_{KR}	Medel-värde	Troligt värde	Experim.	Ur S_{eKR}	
11	Gasbetong typ 4	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		26-31	~0,45	0,44	-	-	-	0,44	-	0,44	-	-	-	-
		104-148	0,44	0,43	0,42	0,42	0,42	0,42	-	0,43	0,42	-	62,6	0,40
12	Cement-bruk 4:1 vct=0,54	62-80	0,60	-	-	-	-	-	-	-	0,60	-	7,9	≈0,44
13	Cement-bruk 4:1 vct=0,64	62-80	0,68	-	-	-	-	-	-	-	0,68	-	8,9	≈0,56
14	Bruk typ Sarabond vct=0,535	16-30	0,75	-	0,75	-	0,75-0,80	-	-	0,76	0,75	-	7,7	0,52
15	Bruk typ Sarabond vct=0,488	16-30	0,72	-	0,68-0,72	-	0,67-0,68	-	-	0,70	0,72	-	7,2	0,55
16	KC-bruk 35/65/550	62-80	0,70	-	-	-	-	-	-	-	0,70	-	13,2	≈0,67
17	Internit a) ovaxade kanter	86-146	0,90	0,90	-	-	-	-	-	0,90	0,90	-	25,9	0,83
	b) vaxade kanter	102-145	0,91	0,89	-	-	-	-	-	0,90	0,90	-	25,9	0,83

TABELL 5 Kritiska fukttillstånd (Forts)
TABLE 5 Critical moisture conditions (Contnd)

Material		Antal cykler	S_{eKR}								u_{KR} (%)		S_{fKR} (-10 à -12°C)
Nr	Typ		Ur E	Ur $\Delta\ell$	Ur Q^{-1}	Ur ΔQf	Ur $\Delta\gamma$	Okulärt	Ur u_{KR}	Medel-värde	Troligt värde	Experim.	Ur S_{eKR}	
18	Opressad asbestcement													
	a) ovaxade kanter	42-148	0,90	0,85	-	-	-	-	-	0,87	0,85	-	17,3	0,71
	b) vaxade kanter	23-102	0,90	0,85	-	-	-	-	-	0,87	0,85	-	17,3	0,71
19	Hårdpressad asbestcement													
	a) ovaxade kanter	25-148	0,91	0,86	-	-	-	-	-	0,88	0,86	-	12,3	0,68
	b) vaxade kanter	23-102	0,95	0,85	-	-	-	-	-	0,90	0,85	-	12,2	0,65
20	Korrugerad asbestcem.													
	a) vågtopp	31	0,85	-	(0,80)	-	-	(1)	0,86	0,85	0,85	23	22,7	-
	b)"mellandel"	38	0,88-0,92	0,86-0,88	-	-	-	(1)	0,91	0,90	0,87	22-23	21,6	-
	c) vågdal	39	0,85	0,80-0,84	-	-	-	(1)	0,85	0,84	0,82	21	20,3	-
21	Pressad grå asbestcem. 5 mm	33	1,00	0,86-0,90	-	-	-	(1)	1,01	0,96	0,88	15,3	13,3	-

TABELL 5 Kritiska fukttillstånd (Forts)
TABLE 5 Critical moisture conditions (Contnd)

Material		Antal cykler	S_{eKR}									u_{KR} (%)		S_{fKR} (-10 à -12°C)
Nr	Typ		Ur E	Ur $\Delta\ell$	Ur Q^{-1}	Ur ΔQf	Ur $\Delta\gamma$	Okulärt	Ur u_{KR}	Medel-värde	Troligt värde	Experim.	Ur S_{eKR}	
22	Opressad grå asbestcem.	42	0,75?	0,80	-	-	-	(0,99)	0,72?	0,76	0,80	11,5?	12,7	-
23	Pressad grå asbestcem. 8 mm	17	0,90	0,90	0,87-0,90	-	-	(0,80)	0,90	0,90	0,90	23	23,0	-
24	Torrformad pigmenterad asbestcem.	54	0,88	0,90	0,90	-	-	(0,90)	0,89	0,89	0,90	15	15,1	-
25	Korrugerad asbestcem. med akrylfärg	51	0,82-0,85	0,82-0,85	0,83-0,85	-	-	(1)	0,83	0,83	0,83	21	21,2	-
26	Pressad asbestcem. med silikatfärg	49	0,86	0,85	-	-	-	(0,93)	0,85	0,85	0,85	13	12,9	-
27	Torrformad asbestcem. med akrylfärg	30	1,0	0,84-0,85	-	-	-	(0,99)	1,02	0,95	0,84	19	15,6	-

TABELL 5 Kritiska fukttillstånd (Forts)
TABLE 5 Critical moisture conditions (Contnd)

Material		Antal cykler	S_{eKR}									u_{KR} (%)		S_{fKR} (-10 à -12°C)
Nr	Typ		Ur E	Ur $\Delta\ell$	Ur Q^{-1}	Ur ΔQf	Ur $\Delta\gamma$	Okulärt	Ur u_{KR}	Medel-värde	Troligt värde	Experim.	Ur S_{eKR}	
28	Svenskt Lecablock nom.dens. =650	11-13	≈0,22 [2]	-	≈0,22 [2]	-	-	-	≈0,22	-	≈0,22	26,4-26,9	-	≈0,17
29	Svenskt Lecablock nom.dens. =1300	11-13	≈0,27-0,28 [2]	-	≈0,27-0,28 [2]	-	-	-	≈0,27-0,28	-	≈0,27-0,28	11,6-11,8	-	≈0,14
30	Norskt Lecablock Bindelmedel cement	6-12	≈0,46-0,48 [2]	-	≈0,46-0,48 [2]	-	-	-	≈0,46-0,48	-	≈0,46-0,48	36,1-37,3	-	-
31	Norskt Lecablock Bindelmedel cem+ stenmjöl	6-12	≈0,33-0,34 [2]	-	≈0,33-0,34 [2]	-	-	-	≈0,33-0,34	-	≈0,33-0,34	29,3-30,6	-	-
32	Pimpstens-betong	12-19	0,60	-	-	-	-	-	-	-	0,60	-	17,4	-
33	"	12-18	0,60	-	-	-	-	-	-	-	0,60	-	20,8	-
34	"	12-19	>0,62	-	-	-	-	-	-	-	>0,62	-	>21,3	-

TABELL 5 Kritiska fukttillstånd (Forts)
TABLE 5 Critical moisture conditions (Contnd)

Material		Antal cykler	S_{eKR}									u_{KR} (%)		S_{fKR} (-10 à -12°C)
Nr	Typ		Ur E	Ur $\Delta\ell$	Ur Q^{-1}	Ur ΔQf	Ur $\Delta\gamma$	Okulärt	Ur u_{KR}	Medel-värde	Troligt värde	Experim.	Ur S_{eKR}	
35	Pimpstens-betong	12-18	0,60	-	-	-	-	-	-	-	0,60	-	16,6	-
36	"	12-19	0,63	-	-	-	-	-	-	-	0,63	-	23,7	-
37	"	12-18	0,69	-	-	-	-	-	-	-	0,69	-	27,2	-
38	Betong 4.1:1 utan fiber	10-13	0,85-0,86	-	-	-	-	-	-	-	0,85	-	6,6	≈0,72
39	Betong 4:1 med fiber	10-13	0,86-0,87	-	-	-	-	-	-	-	0,86	-	6,2	≈0,72
40	Betongtak-pannor													
	a) vågtopp	12-15	0,63	-	-	-	-	-	-	-	0,63	-	7,5	-
	b) vågdal	12-15	0,61	-	-	-	-	-	-	-	0,61	-	7,2	-
41	Tegeltak-panna													
	a) vågtopp	11-12	0,90	-	-	-	-	-	-	-	0,90	-	15,0	0,90 [3]
	b) vågdal	11-12	0,92	-	-	-	-	-	-	-	0,92	-	15,2	0,92 [3]

1) Värdet baseras på en fryscykel
2) Värdet beräknat ur u_{KR}
3) Värdet beräknat med [illegible]ledning av icke frysbara vattenmängder för material 1 och 2

TABELL 6 Kritiska fukttillstånd vid encykelfrysningar
TABLE 6 Critical moisture conditions at one-cycle-freezing

Material		Kritiska fukttillstånd											
		Krit 1 Knickpunkt			Krit 2 Ingen svälln			Krit 3 Töjbarhet					
								Beräknad töjbarhet			Mätta skador		
Nr	Typ	$(S_e)_{KR}$	$(S_f)_{KR}$	U_{KR}	$(S_e)_{KR}$	$(S_f)_{KR}$	U_{KR}	$(S_e)_{KR}$	$(S_f)_{KR}$	U_{KR}	$(S_e)_{KR}$	$(S_f)_{KR}$	U_{KR}
1	Lösbränt tegel	0,80	0,80	18,7	0,80	0,80	18,7	0,82	0,82	19,2	0,80 à 0,86	0,80 à 0,86	18,7 à 20,10
2	Hårdbränt tegel	0,66 à 0,72	0,65 à 0,72	11,0 à 12,0	0,66 à 0,72	0,65 à 0,72	11,0 à 12,0	0,69 à 0,75	0,68 à 0,75	11,5 à 12,5	0,68 à 0,72	0,67 à 0,72	11,4 à 12,0
7	Kalksandsten	0,72	0,69	12,1	0,80	0,78	13,4	0,87	0,86	14,6	0,87 à 0,91	0,86 à 0,90	14,6 à 15,3
8	Gasbetong typ 1	0,40	0,37	64,7	0,47	0,44	76,0	0,52	0,50	84,1	INGA ENTYDIGA RESULTAT		
9	" " 2	0,35	0,28	47,7	0,37	0,31	50,5	0,39	0,33	53,2			
10	" " 3	0,35 à 0,37	0,30 à 0,32	54,7 à 57,9	0,36 à 0,38	0,31 à 0,33	56,3 à 59,4	0,30 à 0,40	0,25 à 0,35	46,9 à 62,6			
11	" " 4	0,33	0,30	49,2	0,45	0,43	67,1	0,52	0,51	77,5			

TABELL 7 Data över vattenupptagningsförsök
TABLE 7 Data of water absorption tests

Material		Serie nr, antal provkr, sugtid (dygn) (t ex: 1.2.10≡Serie nr 1;2 provkr;sugtid 10 dygn)					Tätning av sidor (se fig 97)
Nr	Typ	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	
1	Lösbränt tegel 30x30x120	1.2.10 2.8.9 3.6.14 4.19.14 5.14.13 6.11.14 60 st				7.15.12	(a)
	40x40x120	1.11.14				2.10.76	(a)
2	Hårdbränt tegel 30x30x120	1.40.13 2.3.12 3.2.11 4.3.11 5.10.14 6.20.11 7.5.10 8.5.11 9.7.10 10.5.9 11.4.9 104 st	12.10.6 13.2.2 12 st			14.15.13	(a)
	40x40x120	1.8.14 2.16.13 3.8.16 32 st				4.10.76	(a)
3	Gitter-tegel a) yttre del b) inre del			1.6.34 2.3.34 9 st			(b)
4	Månstorps[x] gavlar 1500-tals tegel	1.6.10					(a)
5	Månstorps[x] gavlar 1930-tals tegel	1,10.10					(a)

TABELL 7 Data över vattenupptagningsförsök (Forts)
TABLE 7 Data of water absorption tests (Contnd)

Material		Serie nr, antal provkr, sugtid (dygn) (t ex: 1.2.10≡Serie nr 1;2 provkr;sugtid 10 dygn)					Tätning av sidor (se fig 97)
Nr	Typ	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	
6	Månstorps[x)] gavlar 1960-tals tegel	1.10.10					(a)
7	Kalksandsten 30x30x120	1.5.17 2.10.10 3.10.14 4.10.11 5.4.10 6.6.8 7.4.7 49 st	8.3.9 9.3.8 10.3.7 11.4.8 13.10.8 23 st	12.10.14 14.10.24 20 st		15.15.13	(a)
	40x40x120	1.0.0 2.10.15 3.12.14 22 st				4.10.76	(a)
8	Gasbetong typ 1	1.10.11		3.5.169	2.5.176		(a)
9	Gasbetong typ 2	1.10.11		3.5.169	2.5.176		(a)
10	Gasbetong typ 3	1.10.11		3.5.169	2.5.176		(a)
11	Gasbetong typ 4			1.10.81 3.5.151 15 st	2.5.151		(a)
12	Cementbruk 4:1 vct=0,54			1.2.52			(b)
13	Cementbruk 4:1 vct=0,64			1.2.52			(b)
14	Bruk typ Sarabond vct=0,535			1.5.13 2.5.15 3.5.204 15 st			(b)

TABELL 7 Data över vattenupptagningsförsök (Forts)
TABLE 7 Data of water absorption tests (Contnd)

Material		Serie nr, antal provkr, sugtid (dygn) (t ex: 1.2.10=Serie nr 1;2 provkr;sugtid 10 dygn)					Tätning av sidor (se fig 97)
Nr	Typ	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	
15	Bruk typ Sarabond vct=0,488			1.4.13 2.4.15 3.4.204 12 st			(b)
16	KC-bruk 35/65/550			1.2.52			
17	Internit a)ovaxade	1.0.0 2.4.10 3.0.0 4.10.9 14 st					(c)
	b)vaxade kanter	1.16.17					(b)
18	Lösspressad asbestcement a)ovaxade kanter	1.10.11					(c)
	b)vaxade kanter	1.0.0 2.16.12					(b)
19	Hårdpressad asbestcement a)ovaxade kanter	1.11.11					(c)
	b)vaxade kanter	1.0.0 2.0.0 3.13.12					(b)
20	Korrugerad asbestcement a)vågtopp		1.4.7				(c)
	b)mellandel		1.4.7				(c)
	c)vågdal		1.4.7				(c)
21	Pressad grå asbestcement 5 mm		1.4.7				(c)

TABELL 7 Data över vattenupptagningsförsök (Forts)
TABLE 7 Data of water absorption tests (Contnd)

Material		Serie nr, antal provkr, sugtid (dygn) (t ex: 1.2.10≡Serie nr 1;2 provkr;sugtid 10 dygn)					Tätning av sidor (se fig 97)
Nr	Typ	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	
22	Opressad grå asbestcement		1.4.7				(c)
23	Pressad grå asbestcement 8 mm		1.4.7				(c)
24	Torrformad pigmenterad asbestcement		1.4.7				(c)
25	Korrugerad asbestcement med akrylfärg		1.4.7				(c)
26	Pressad asbestcement med silikatfärg		1.4.7				(c)
27	Torrformad asbestcement med silikatfärg		1.4.7				(c)
28	Svenskt Lecablock γ_{nom}=650			2.3.77 3.6.14 9 st	1.3.12		(b)
29	Svenskt Lecablock γ_{nom}=1300			2.3.77 3.6.14 9 st	1.3.12		(b)
30	Norskt Lecablock, bindemedel cement			1.2.73			(b)
31	Norskt Lecablock, bindemedel cement+ stenmjöl			1.2.73			(b)
32	Pimpstensbetong		1.3.7	3.3.77	2.3.7		(a)
33	- " -		1.3.7	3.3.77	2.3.7		(a)
34	- " -		1.3.7	3.3.77	2.3.7		(a)

TABELL 7 Data över vattenupptagningsförsök (Forts)
TABLE 7 *Data of water absorption tests* (Contnd)

Material		Serie nr, antal provkr, sugtid (dygn) (t ex: 1.2.10≡Serie nr 1;2 provkr;sugtid 10 dygn)					Tätning av sidor (se fig 97)
Nr	Typ	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5	
35	Pimpstens-betong		1.3.7	3.3.77	2.3.7		(a)
36	- " -		1.3.7	3.3.77	2.3.7		(a)
37	- " -		1.3.7	3.3.77	2.2.7		(a)
38	Betong 4,1:1 utan fiber			1.2.19 2.2.50 4 st			(b)
39	Betong 4:1 med fiber			1.2.19 2.2.50 4 st			(b)
40	Betongtak-panna a)vågtopp			1.3.36 2.3.36 6 st			(b)
	b)vågdal			1.3.36 2.3.36 6 st			(b)
41	Tegeltak-panna a)vågtopp			1.3.28 2.3.28 6 st			(b)
	b)vågdal			1.3.28 2.3.28 6 st			(b)

Totalt antal provkroppar är 790 st.
Antal serier är 132 st.

x) In situ mätningar av fukttillstånd har även gjorts.

TABELL 8 Resultat av vattenabsorptionsförsök
TABLE 8 Result of water absorption tests

Material		"Knickpunkt"			$S_{e\ AKT}$										
Nr	Typ	Tid (tim)	S_e	S_f	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d		In situ
1	Lösbränt tegel 30x30x120	<1	0,73[1)] 0,72[2)]	0,73[1)] 0,72[2)]	0,71	0,73	0,77	0,79	0,82	0,87	-	-	-	-	-
	40x40x120	≈1	0,73	0,73	0,71	-	0,75	0,76	0,79	0,80	0,87	-	0,91	-	-
2	Hårdbränt tegel 30x30x120	∿8	0,55[1)] 0,32[2)]	0,55[1)] 0,32[2)]	0,29	-	0,55	0,57	0,60	0,65	-	-	-	-	-
	40x40x120	∿24	0,52	0,52	0,17	-	0,50	0,54	0,56	0,59	0,68	0,71	0,74	-	-
3	Gittertegel a)yttre delen	<3	0,72	0,72	-	-	-	-	0,87	0,92	0,98	-	-	-	-
	b)inre delen	<3	0,67	0,67	-	-	-	-	0,82	0,88	0,94	-	-	-	-
4	Månstorps gavlar 1500-tals tegel	-	-	-	0,80	-	-	0,89	-	0,93	-	-	-	-	0,28 0,60
5	- " - 1930-tals tegel	-	-	-	0,54	-	-	0,67	-	0,73	-	-	-	-	0,60 0,63 0,74 0,78

TABELL 8 Resultat av vattenabsorptionsförsök (Forts)
TABLE 8 Result of water absorption tests (Contnd)

Material		"Knickpunkt"			$S_{e\ AKT}$										
Nr	Typ	Tid (tim)	S_e	S_f	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
6	Månstorps gavlar 1960-tals tegel	-	-	-	0,61	-	-	0,78	-	0,86	-	-	-	-	0,41 0,43 0,65
7	Kalksandsten 30x30x120	<24	0,81[1] 0,76[2]	0,79[1] 0,73[2]	0,62	-	0,81	0,81	0,85	0,87	-	-	-	-	-
	40x40x120	<24	0,78	0,75	0,41	-	0,79	0,80	0,81	0,83	0,89	0,92	-	-	-
8	Gasbetong typ 1	<24	0,37[2]	0,34[2]	0,26	-	0,38	0,39	0,40	0,44	0,51[3] 0,53[4]	0,51[3] 0,56[4]	0,57[3] 0,59[4]	0,61[3] 0,65[4]	-
9	- " - typ 2	<24	0,37[2]	0,31[2]	0,21	-	0,41	0,43	0,44	0,49	0,52[3] 0,54[4]	0,55[3] 0,57[4]	0,58[3] 0,61[4]	0,62[3] 0,68[4]	-
10	- " - typ 3	<24	0,41[2]	0,36[2]	0,23	-	0,45	0,47	0,49	0,53	0,60[3] 0,57[4]	0,64[3] 0,61[4]	0,67[3] 0,63[4]	0,63[3] 0,68[4]	-
11	- " - typ 4	<24	0,37[3]	0,35[3]	0,31	-	0,44	0,46	0,48	0,51	0,56[3] 0,54[4]	0,62[3] 0,59[4]	0,65[3] 0,62[4]	0,69[4]	-
12	Cementbruk 4:1 vct=0,54	≈8	0,68	0,58	-	-	0,68	-	0,71	-	-	-	-	-	-
13	- " - 4:1 vct=0,64	≈6	0,73	0,63	-	-	0,74	-	0,77	-	-	-	-	-	-
14	Bruk typ Sarabond vct=0,535	-	-	-	-	-	0,37	0,48	0,63	0,72	-	-	-	0,83[5]	-

TABELL 8 Resultat av vattenabsorptionsförsök (Forts)
TABLE 8 Result of water absorption tests (Contnd)

Material		"Knickpunkt"			$S_{e\ AKT}$										
Nr	Typ	Tid (tim)	S_e	S_f	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
15	Bruk typ Sarabond vct=0,488	-	-	-	-	-	0,26	0,32	0,46	0,58	-	-	-	0,84[5]	-
16	KC-bruk 35/65/550	-	-	-	-	-	0,51	0,52	0,54	-	-	-	-	-	-
17	Internit	<24	0,85[6] +0,02 -0,04	0,75[6]	0,22	0,30	-	0,81	0,84	0,86	-	-	-	-	-
18	Löspressad asbestcement	<24	0,79[6] ±0,02	0,60[6]	0,13	0,18	0,54	0,64	-	0,82	-	-	-	-	-
19	Hårdpressad asbestcement	<48	0,49 +0,10 -0,09	0	0,09 ±0,01	-	0,39 +0,07 -0,06	0,52 +0,09 -0,05	0,62 +0,07 -0,05	0,69 +0,10 -0,08	-	-	-	-	-
20	Korrugerad asbestcement a)vågtopp	≈1	0,63 ±0,03	-	-	0,63 ±0,03	0,65 ±0,03	-	-	0,70[7] ±0,03	-	-	-	-	-
	b)mittdel	1 à 2	0,70 +0,04 -0,06	-	-	0,63 +0,04 -0,06	0,72 +0,04 -0,06	-	-	0,76[7] +0,04 -0,07	-	-	-	-	-
	c)vågdal	1 à 2	0,69 +0,03 -0,04	-	-	0,69 +0,03 -0,04	0,71 ±0,04	-	-	0,74[7] +0,03 -0,02	-	-	-	-	-
21	Pressad grå asbestcement 5 mm	1 à 2	0,81 +0,08 -0,03	-	-	0,81 +0,08 -0,03	0,82 +0,07 -0,03	-	-	0,84[7] +0,07 -0,03	-	-	-	-	-

TABELL 8 Resultat av vattenabsorptionsförsök (Forts)
TABLE 8 Result of water absorption tests (Contnd)

Material		"Knickpunkt"			S_{e} AKT									
Nr	Typ	Tid (tim)	S_e	S_f	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
22	Opressad grå asbestcement	1 à 3	0,75 +0,13 -0,05	-	-	-	0,77 +0,12 -0,05	-	-	0,81[7] +0,13 -0,06	-	-	-	-	-
23	Pressad grå asbestcement 8 mm	1,5 à 2	0,75 +0,04 -0,06	-	-	0,75 +0,04 -0,06	0,77 +0,04 -0,06	-	-	0,79[7] +0,04 -0,07	-	-	-	-	-
24	Torrformad pigmenterad asbestcement	3 à 5	0,89 ±0,04	-	-	-	0,89 +0,02 -0,04	-	-	0,91[7] +0,03 -0,04	-	-	-	-	-
25	Korrugerad asbestcement med akrylfärg	1 à 3	0,63 +0,06 -0,04	-	-	-	0,65 +0,05 -0,04	-	-	0,68[7] ±0,04	-	-	-	-	-
26	Pressad asbestcement med silikatfärg	1,5 à 3,5	0,72 +0,03 -0,02	-	-	-	0,74 ±0,03	-	-	0,79[7] +0,02 -0,03	-	-	-	-	-
27	Torrformad asbestcement med silikatfärg	5 à 7	0,90 +0,05 -0,10	-	-	-	0,90 +0,06 -0,13	-	-	0,94[7] +0,06 -0,11	-	-	-	-	-
28	Svenskt Lecablock[8] γ_{nom}=650	1 à 1,5	18,9[3] 21,0–22,0[4]	-	-	-	20,8–22,0[3] 23,0–24,5[4]	-	-	27,2–27,7[3] 29,2–31,0[4]	30,7–31,2	31,4–33,6[9]	-	-	-
29	Svenskt Lecablock[8] γ_{nom}=1300	3 à 6	8,5–9,5[3] 9,5–11,0[4]	-	-	-	9,4–10,4[3] 10,2–11,8[4]	-	-	11,5–12,4[3] 12,2–14,10[4]	13,0–13,7	13,7–14,7[9]	-	-	-

TABELL 8 Resultat av vattenabsorptionsförsök (Forts)
TABLE 8 Result of water absorption tests (Contnd)

Material		"Knickpunkt"			$S_{e\ AKT}$										
Nr	Typ	Tid (tim)	S_e	S_f	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
30	Norskt Lecablock[8] bindemedel cement	3,5	17,0	-	-	-	18,0	-	-	20,8	23,0-23,6	25,6-27,5[9)]	-	-	-
31	Norskt Lecablock[8] bindemedel cement +stenmjöl	3 à 3,5	16,3-17,2	-	-	-	17,6-18,6	-	-	21,0-21,8	24,7-25,2	29,6-29,9[9)]	-	-	-
32	Pimpstensbetong[10]	-	-	-	-	-	-	0,45 ±0,02	0,47 ±0,02	0,48 ±0,01	0,51 ±0,01	0,51 ±0,01	-	-	-
33	- " - [10]	-	-	-	-	-	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51 ±0,01	0,51 ±0,01	-	-	-
34	- " - [10]	-	-	-	-	-	0,43	0,44	0,46	0,47	0,49	0,49	-	-	-
35	- " - [10]	-	-	-	-	-	0,38	0,39	0,42	0,43	0,46	0,46 ±0,01	-	-	-
36	- " - [10]	-	-	-	-	-	-	0,40 ±0,02	0,42 ±0,01	0,43 ±0,01	0,46	0,46	-	-	-
37	- " - [10]	-	-	-	-	-	0,38 ±0,01	0,40 ±0,01	0,43	0,44 ±0,01	0,46 ±0,01	0,47 ±0,01	-	-	-
38	Betong 4:1 utan fiber	-	-	-	-	-	0,81	-	0,90	-	-	0,94[11)]	-	-	-
39	Betong 4:1 med fiber	-	-	-	-	-	0,80	-	0,90	-	-	0,98[11)]	-	-	-

TABELL 8 Resultat av vattenabsorptionsförsök (Forts)
TABLE 8 Result of water absorption tests (Contnd)

Material		"Knickpunkt"			$S_{e\ AKT}$										
Nr	Typ	Tid (tim)	S_e	S_f	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
40	Betongtakpanna		0,51[12]												
	a)vågtopp	>24		-	0,31[12]	-	0,45[12]	-	0,54[12]	-	0,58[12]	-	-	-	-
	b)vågdal	>24	0,49[13]	-	0,29[13]	-	0,41[13]	-	0,51[13]	-	0,55[13]	-	-	-	-
41	Tegeltakpanna		0,72[12]												
	a)vågtopp	<1		0,72[12]	0,72[12]	-	0,76[12]	0,78[12]	0,82[12]	-	0,92[12]	-	-	-	-
	b)vågdal	≈1	0,72[13]	0,72[13]	0,72[13]	-	0,75[13]	0,77[13]	0,80[13]	-	0,89[13]	-	-	-	-

1) Ur resultat redovisade i bilagan
2) Ur figur 92
3) Sugning från fri vattenyta
4) Doppning under vattenyta
5) 204 dygns sugning. Dessutom är provkroppar i denna serie äldre än de provkroppar vars absorption upp till 10 dygn har redovisats i tabellen
6) Knickpunktsförsöken härrör sig från ett annat försökstillfälle än övriga redovisade resultat
7) 7 dygns sugning
8) Siffrorna i tablien anger fuktkvot
9) 75 dygns sugning
10) Provkroppparna har begynnelsefukthalter motsvarande S_e=0,32-0,42
11) 50 dygns sugning
12) Provkroppar suger liggande enligt figur 96
13) - " - - " - stående - " - - " - 96

TABELL 9 Frostbeständighet enligt ekvation (11)

TABLE 9 Frost resistance according to equation (11)

Material		Frostbeständigheten, F, enligt ekv (11) efter vattenupptagning under olika lång tid och på olika sätt											
Nr	Typ	Vid "knickpunkts-sugningen"	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
1	Lösbränt tegel storlek 30x30x120 40x40x120	0,11[1]; 0,12[2] 0,14	0,13 0,16	0,11 -	0,07 0,12	0,05 0,11	0,02 0,08	-0,03 0,07	- 0	- -	- -0,04	- -	- -
2	Hårdbränt tegel storlek 30x30x120 40x40x40x120	0,20[1]; 0,43[2] 0,28	0,46 0,63	- -	0,20 0,30	0,18 0,26	0,15 0,24	0,10 0,21	- 0,12	- 0,09	- 0,06	- -	- -
3	Gittertegel a) yttre del	0,09	-	-	-	-	-0,06	-0,11	-0,17	-	-	-	-
	b) inre del	0,20	-	-	-	-	0,05	-0,01	-0,07	-	-	-	-
4	Månstorps gavlar 1500-tals tegel	-	<0	-	-	<0	-	<0	-	-	-	-	<0
5	Månstorps gavlar 1930-tals tegel	-	0,13	-	-	0	-	-0,06	-	-	-	-	0,07 0,04 -0,07 -0,11
6	Månstorps gavlar 1960-tals tegel	-	0,13	-	-	-0,04	-	-0,12	-	-	-	-	0,33 0,31 0,09
7	Kalksandsten storlek 30x30x120 40x40x120	-0,02[1]; 0,04[2] 0,02	0,19 0,44	- -	-0,02 0,01	-0,02 0	-0,06 -0,01	-0,09 -0,03	- -0,10	- -0,13	- -	- -	- -
8	Gasbetong typ 1	0,09[2]	0,21	-	0,08	0,07	0,06	0,02	-0,05[3] -0,08[4]	-0,09[3] -0,11[4]	-0,12[3] -0,14[4]	-0,16[3] -0,20[4]	-

TABELL 9 Frostbeständighet enligt ekvation (11)

TABLE 9 Frost resistance according to equation (11)

Material		Frostbeständigheten, F, enligt ekv (11) efter vattenupptagning under olika lång tid och på olika sätt											
Nr	Typ	Vid "knickpunkts-sugningen"	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
9	Gasbetong typ 2	0,09[2]	0,27	-	0,05	0,03	0,02	-0,04	-0,07[3] -0,09[4]	-0,10[3] -0,13[4]	-0,14[3] -0,17[4]	-0,18[3] -0,25[4]	-
10	Gasbetong typ 3	-0,01[2]	0,18	-	-0,06	-0,08	-0,10	-0,14	-0,22[3] -0,19[4]	-0,26[3] -0,21[4]	-0,29[3] -0,25[4]	-0,36[3] -0,30[4]	-
11	Gasbetong typ 4	0,05[3]	0,12	-	-0,02	-0,04	-0,06	-0,09	-0,14[3] -0,12[4]	-0,21[3] -0,17[4]	-0,24[3] -0,21[4]	-0,28[4]	-
12	Cementbruk 4:1 vct=0,54	-0,11	-	-	-0,11	-	-0,15	-	-	-	-	-	-
13	Cementbruk 4:1 vct=0,64	-0,07	-	-	-0,08	-	-0,12	-	-	-	-	-	-
14	Bruk typ Sarabond vct=0,535	-	-	-	∞	∞	0,24	0,06	-	-	-	-0,15[5]	-
15	Bruk typ Sarabond vct=0,486	-	-	-	∞	∞	0,42	0,23	-	-	-	-0,19[5]	-
16	KC-bruk 35/65/550	-	-	-	0,21	0,20	0,18	-	-	-	-	-	-
17	Internit	0,08[6]	∞	∞	-	0,15	0,10	0,06	-	-	-	-	-
18	Opressad asbest-cement	0,11[6]	∞	∞	0,59	0,40	-	0,05	-	-	-	-	-
19	Hårdpressad asbestcement	∞	∞	-	∞	∞	0,54	0,38	-	-	-	-	-

TABELL 9 Frostbeständighet enligt ekvation (11)
TABLE 9 Frost resistance according to equation (11)

Material		Frostbeständigheten, F, enligt ekv (11) efter vattenupptagning under olika lång tid och på olika sätt											
Nr	Typ	Vid "knickpunkts-sugningen"	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
28	Svenskt Leca-block, nom-dens =650	0,06	-	-	0,04	-	-	-0,01	-0,04	-0,05	-	-	-
29	Svenskt Leca-block, nom-dens =1300	0,07	-	-	0,05	-	-	-0,01	-0,05	-0,07	-	-	-
38	Betong 4.1:1 utan fiber	-	-	-	0,08	-	-0,09	-	-	-0,17[7]	-	-	-
39	Betong 4:1 med fiber	-	-	-	0,12	-	-0,08	-	-	-0,26[7]	-	-	-
41	Tegeltakpanna a)vågtopp[8]	0,18	0,18	-	0,14	0,12	0,09	-	-0,01	-	-	-	-
	b)vågdal[8]	0,20	0,20	-	0,16	0,14	0,11	-	0,01	-	-	-	-

1) - 6) Se tabell 7
7) 50 dygns sugning
8) Medelvärde av stående och liggande sugprovkroppar

TABELL 10 Frostbeständighet enligt ekvation (139)

TABLE 10 Frost resistance according to equation (139)

Material		Frostbeständigheten, F, enligt ekv (139) efter vattenupptagning under olika lång tid och på olika sätt											
Nr	Typ	Vid "knickpunkts-sugningen"	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
1	Lösbränt tegel storlek 30x30x120 40x40x120	 0,11[1]; 0,12[2] 0,14	 0,13 0,16	 0,11 -	 0,07 0,12	 0,05 0,11	 0,02 0,08	 -0,03 0,07	 - 0	 - -	 - 0,04	 - -	 - -
2	Hårdbränt tegel storlek 30x30x120 40x40x120	 0,20[1]; 0,43[2] 0,28	 0,46 0,63	 - -	 0,20 0,30	 0,18 0,26	 0,15 0,24	 0,10 0,21	 - 0,12	 - 0,09	 - 0,06	 - -	 - -
3	Gittertegel a)yttre delen b)inre delen	 0,09 0,20	 - -	 - -	 - -	 - -	 -0,06 0,05	 -0,11 -0,01	 -0,17 -0,07	 - -	 - -	 - -	 - -
4	Månstorps gavlar 1500-tals tegel	-	<0	-	-	<0	-	<0	-	-	-	-	<0
5	Månstorps gavlar 1930-tals tegel	-	0,13	-	-	0	-	-0,06	-	-	-	-	0,07 0,04 -0,07 -0,11
6	Månstorps gavlar 1960-tals tegel	-	0,13	-	-	-0,04	-	-0,12	-	-	-	-	0,33 0,31 0,09
7	Kalksandsten storlek 30x30x120 40x40x120	 -0,02[1]; 0,03[2] 0,02	 0,17 0,39	 - -	 -0,02 0,01	 -0,02 0	 -0,06 -0,01	 -0,08 -0,03	 - -0,09	 - -0,12	 - -	 - -	 - -
8	Gasbetong typ 1	0,09[2]	0,20	-	0,08	0,07	0,06	0,02	-0,05[3] -0,07[4]	-0,08[3] -0,10[4]	-0,11[3] -0,13[4]	-0,15[3] -0,19[4]	-

TABELL 10 Frostbeständighet enligt ekvation (139)
TABLE 10 Frost resistance according to equation (139)

Material		Frostbeständigheten, F, enligt ekv (139) efter vattenupptagning under olika lång tid och på olika sätt											
Nr	Typ	Vid "knickpunkts-sugningen"	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
9	Gasbetong typ 2	0,09[2]	0,25	-	0,05	0,03	0,02	-0,03	-0,06[3] -0,08[4]	-0,09[3] -0,11[4]	-0,12[3] -0,15[4]	-0,16[3] -0,22[4]	-
10	Gasbetong typ 3	-0,01[2]	0,17	-	-0,05	-0,07	-0,09	-0,13	-0,20[3] -0,17[4]	-0,24[3] -0,21[4]	-0,27[3] -0,23[4]	-0,33[3] -0,28[4]	
11	Gasbetong typ 4	0,05[3]	0,11	-	-0,02	-0,04	-0,06	-0,09	-0,14[3] -0,12[4]	-0,20[3] -0,17[4]	-0,23[3] -0,20[4]	-0,27[4]	-
12	Cementbruk 4:1 vct=0,54	-0,08	-	-	-0,08	-	-0,11	-	-	-	-	-	-
13	Cementbruk 4:1 vct=0,64	-0,05	-	-	-0,06	-	-0,09	-	-	-	-	-	-
14	Bruk typ Sarabond vct=0,535	-	-	-	0,38	0,27	0,12	0,03	-	-	-	-0,08[5]	-
15	Bruk typ Sarabond vct=0,488	-	-	-	0,46	0,40	0,26	0,14	-	-	-	-0,12[5]	-
16	KC-bruk 35/65/550	-	-	-	0,19	0,18	0,16	-	-	-	-	-	-
17	Internit	0,05 +0,04 -0,02 [6]	0,68	0,60	-	0,09	0,06	0,04	-	-	-	-	-
18	Opressad asbest-cement	0,06 +0,01 -0,02 [6]	0,72	0,67	0,31	0,21	-	0,03	-	-	-	-	-
19	Hårdpressad asbestcement	0,36 +0,09 -0,10 [6]	0,76± 0,01	-	0,46 +0,06 -0,07	0,33 +0,05 -0,09	0,23 +0,05 -0,07	0,16 +0,08 -0,10	-	-	-	-	-

TABELL 10 Frostbeständighet enligt ekvation (139)

TABLE 10 Frost resistance according to equation (139)

Material		Frostbeständigheten, F, enligt ekv (139) efter vattenupptagning under olika lång tid och på olika sätt											
Nr	Typ	Vid "knickpunkts-sugningen"	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
20	Korrugerad asbestcement												
	a)vågtopp	0,22±0,03	-	0,22 ±0 03	0,20 ±0,03	-	-	0,15[7] ±0,03	-	-	-	-	-
	b)mellandel	0,17 +0,06 -0,04	-	0,24 +0,06 -0,04	0,15 +0,06 -0,04	-	-	0,11[7] +0,07 -0,04	-	-	-	-	-
	c)vågdal	0,13 +0,04 -0,04	-	0,13 +0,04 -0,03	0,11 ±0,04	-	-	0,08[7] +0,02 -0,03	-	-	-	-	-
21	Pressad grå asbestcement 5 mm	0,07 +0,03 -0,08	-	0,07 +0,03 -0,08	0,06 +0,03 -0,07	-	-	0,04[7] +0,03 -0,07	-	-	-	-	-
22	Opressad grå asbestcement	0,05 +0,05 -0,13	-	-	0,03 +0,05 -0,12	-	-	-0,01[7] +0,06 -0,13	-	-	-	-	-
23	Pressad grå asbestcement 8 mm	0,15 +0,06 -0,04	-	-	0,15 +0,06 -0,04	-	-	0,11[7] +0,07 -0,04	-	-	-	-	-
24	Torrformad pigmenterad asbestcement	0,01±0,04	-	-	0,01 +0,04 -0,02	-	-	-0,01[7] +0,04 -0,03	-	-	-	-	-
25	Korrugerad asbestcement med akrylfärg	0,02 +0,04 -0,06	-	-	0,18 +0,04 -0,05	-	-	0,15[7] ±0,04	-	-	-	-	-

TABELL 10 Frosbeständighet enligt ekvation (139)
TABLE 10 Frost resistance according to equation (139)

Material		Frostbeständigheten, F, enligt ekv (139) efter vattenupptagning under olika lång tid och på olika sätt											
Nr	Typ	Vid "knickpunkts-sugningen"	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
26	Pressad asbest-cement med sili-katfärg	$0{,}13\ ^{+0{,}02}_{-0{,}03}$	-	-	$0{,}11\ \pm0{,}03$	-	-	$0{,}06^{7)}\ ^{+0{,}03}_{-0{,}02}$	-	-	-	-	-
27	Torrformad as-bestcem med sili-katfärg	$-0{,}06\ ^{+0{,}10}_{-0{,}05}$	-	-	$^{+0{,}06}_{+0{,}13}$ $-0{,}06$	-	-	$-0{,}10^{7)}\ ^{+0{,}11}_{-0{,}06}$	-	-	-	-	-
28	Svenskt Lecablock nom dens=650	0,06	-	-	$0{,}04\ \pm0{,}01$	-	-	-0,01	-0,04	$-0{,}05^{9)}\ \pm0{,}01$	-	-	-
29	Svenskt Lecablock nom dens=1300	0,06±0,01	-	-	$0{,}04\ \pm0{,}01$	-	-	$-0{,}01\ \pm0{,}01$	$-0{,}04\ \pm0{,}01$	$-0{,}06^{9)}\ \pm0{,}01$	-	-	-
30	Norskt Lecablock bindemedel cement	0,25	-	-	0,24	-	-	0,20	0,17	$0{,}13^{9)}\ \pm0{,}01$	-	-	-
31	Norskt Lecablock bindemedel cement +stenmjöl	0,14±0,01	-	-	$0{,}13\ \pm0{,}01$	-	-	$0{,}09\ \pm0{,}01$	0,06	$0^{9)}$	-	-	-
32	Pimpstensbetong[10)]	-	-	-	-	$0{,}15\ \pm0{,}02$	$0{,}13\ \pm0{,}02$	$0{,}12\ \pm0{,}01$	$0{,}09\ \pm0{,}01$	$0{,}09\ \pm0{,}01$	-	-	-
33	Pimpstensbetong[10)]	-	-	-	0,15	0,14	0,12	0,11	$0{,}09\ \pm0{,}01$	$0{,}09\ \pm0{,}01$	-	-	-
34	- " - [10)]	-	-	-	>0,19	>0,18	>0,16	>0,15	>0,13	>0,13	-	-	-
35	- " - [10)]	-	-	-	0,22	0,21	0,18	0,17	0,14	$0{,}14\ \pm0{,}01$	-	-	-
36	- " - [10)]	-	-	-	-	$0{,}23\ \pm0{,}02$	$0{,}21\ \pm0{,}01$	$0{,}20\ \pm0{,}01$	0,17	0,17			

TABELL 10 Frostbeständighet enligt ekvation (139)
TABLE 10 Frost resistance according to equation (139)

Material		Frostbeständigheten, F, enligt ekv (139) efter vattenupptagning under olika lång tid och på olika sätt											
Nr	Typ	Vid "knickpunkts-sugningen"	1 h	2 h	1 d	2 d	5 d	10 d	30 d	60 d	90 d	180 d	In situ
37	Pimpstensbetong[10]	-	-	-	0,31 ±0,01	0,29 ±0,01	0,26	0,25 ±0,01	0,23 ±0,01	0,22 ±0,01	-	-	-
38	Betong 4,1:1 utan fiber	-	-	-	0,04	-	-0,05	-	-	-0,09[11]	-	-	-
39	Betong 4:1 med fiber	-	-	-	0,06	-	0,04	-	-	-0,13[11]	-	-	-
40	Betongtakpanna a)vågtopp	0,12[12] 0,14[13]	0,32[12] 0,34[13]	-	0,18[12] 0,22[13]	-	0,09[12] 0,12[13]	-	0,05[12] 0,08[13]	-	-	-	-
	b)vågdal	0,10[12] 0,12[13]	0,30[12] 0,32[13]	-	0,16[12] 0,20[13]	-	0,07[12] 0,10[13]	-	0,03[12] 0,06[13]	-	-	-	-
41	Tegeltakpanna a)vågtopp	0,18[12] 0,18[13]	0,18[12] 0,18[13]	-	0,14[12]	0,12[12] 0,13[13]	0,08[12] 0,10[13]	-	-0,02[12] 0,01[13]	-	-	-	-
	b)vågdal	0,20[12] 0,20[13]	0,20[12] 0,20[13]	-	0,16[12] 0,17[13]	0,14[12] 0,15[13]	0,10[12] 0,12[13]	-	0[12] 0,03[13]	-	-	-	-

1) - 13) Se tabell 7

F I G U R E R

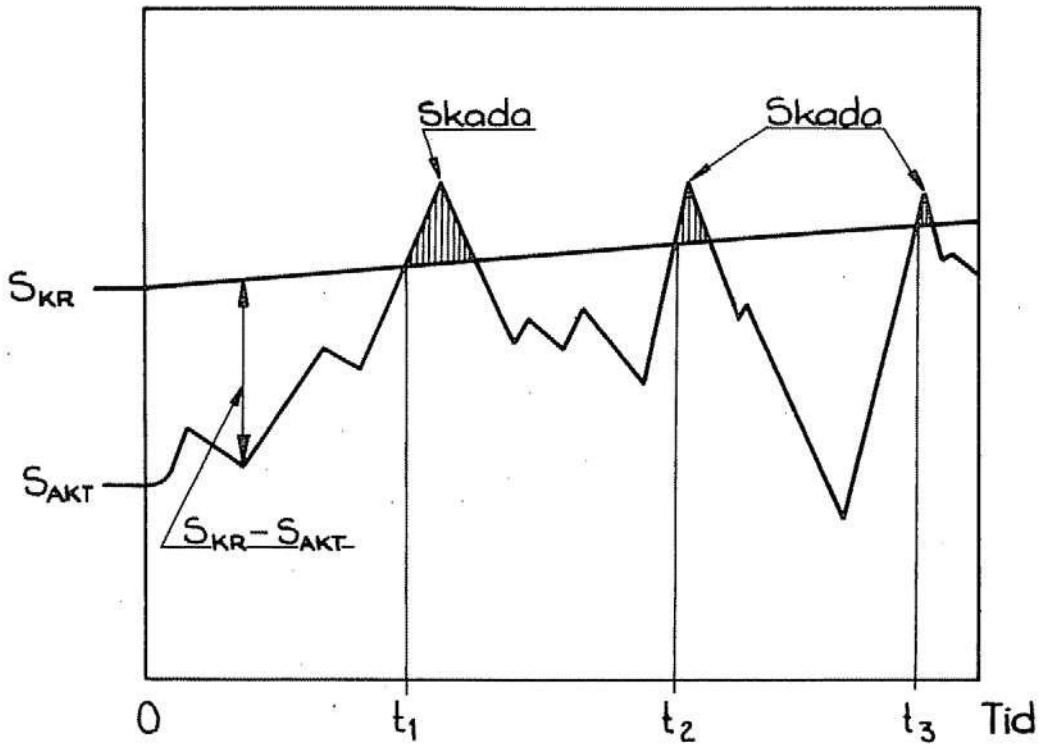


FIG 1 Utveckling av fukttillstånd med tiden. *Evolution of moisture conditions with time.*

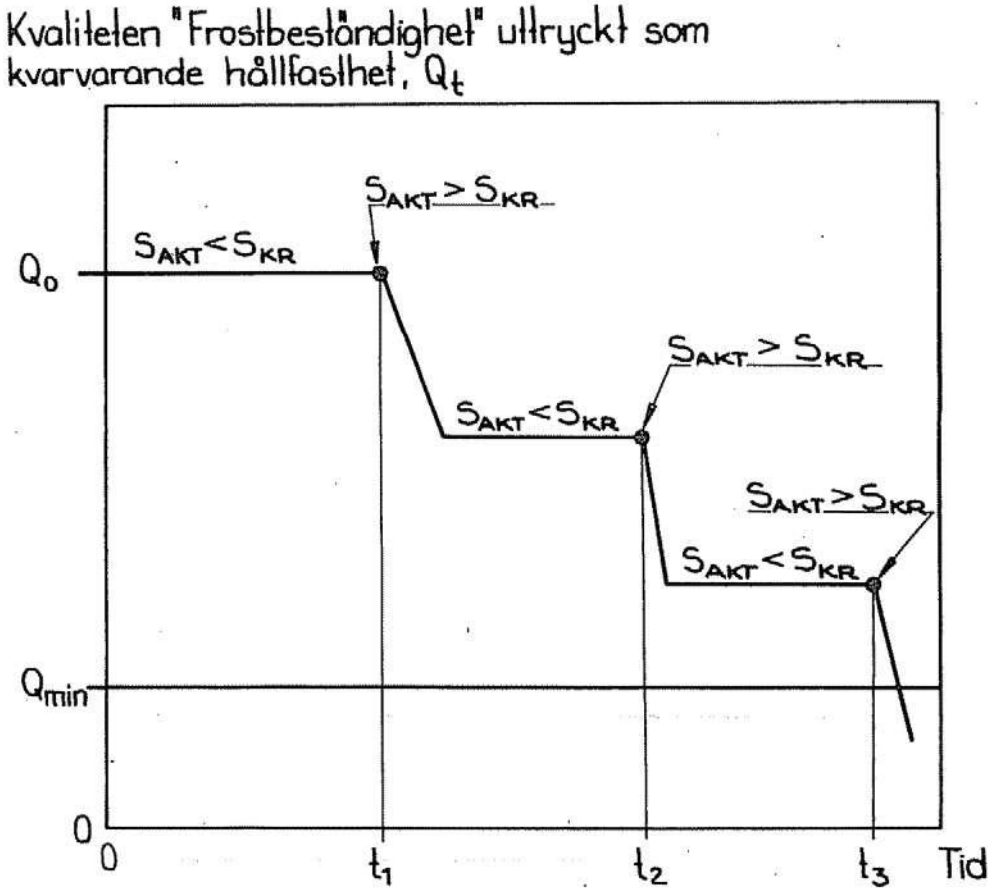


FIG 2 Nedbrytningskurvor vid frostangrepp. *Deterioration curves at frost attack.*

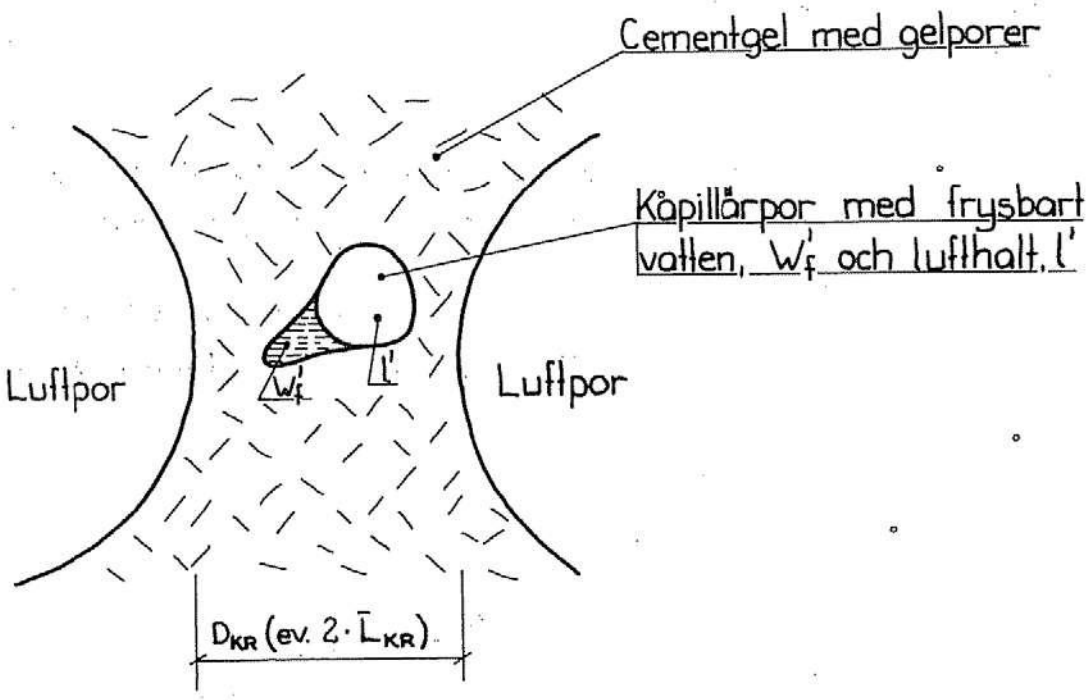


FIG 3 Modell av cementpastas porstruktur. *Model of pore structure of portland cement paste.*

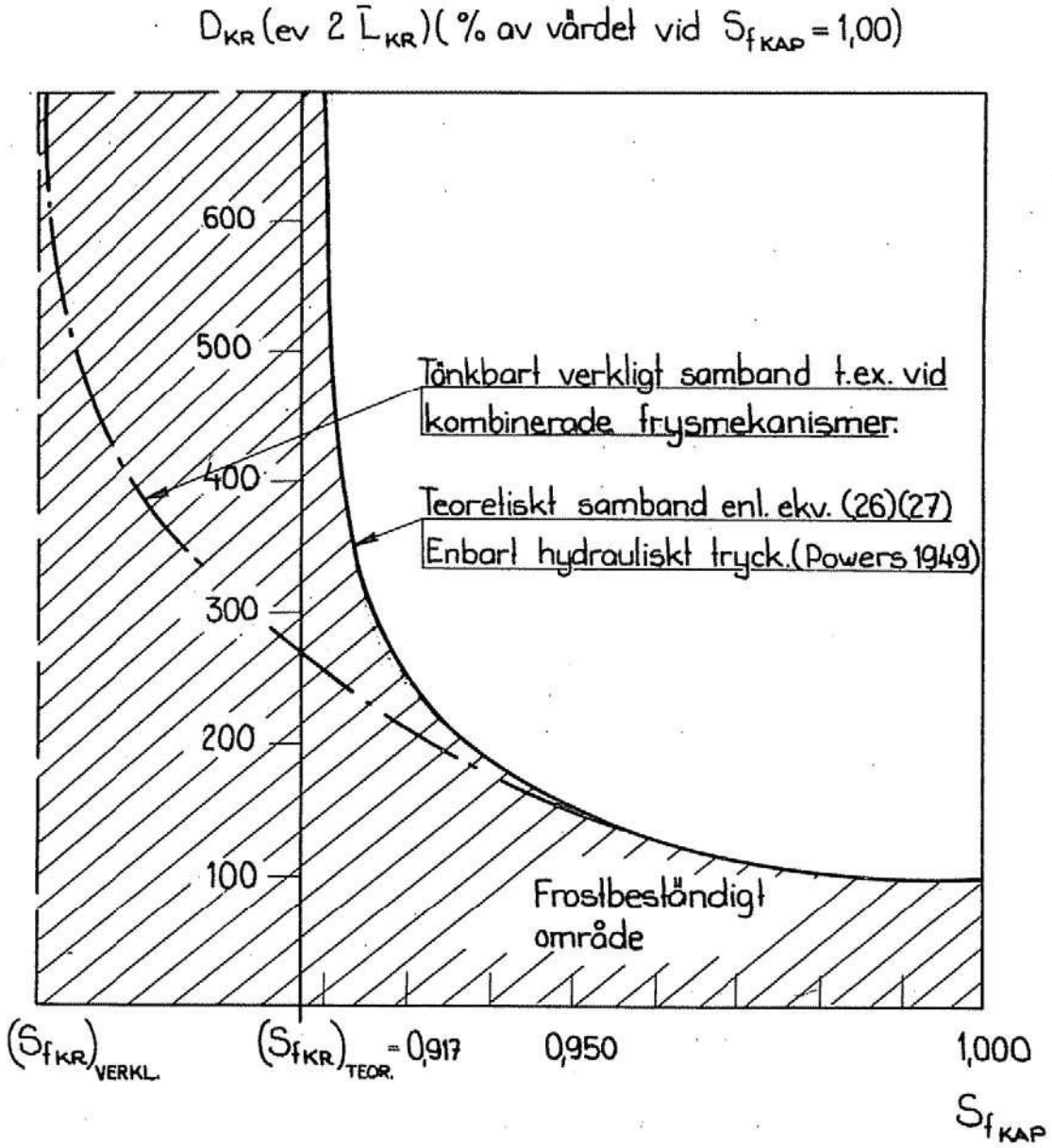


FIG 4 Samband mellan kapillär vattenmättnadsgrad och luftporavstånd. *Connection between capillary degree of saturation and air-pore spacing. Cement paste.*

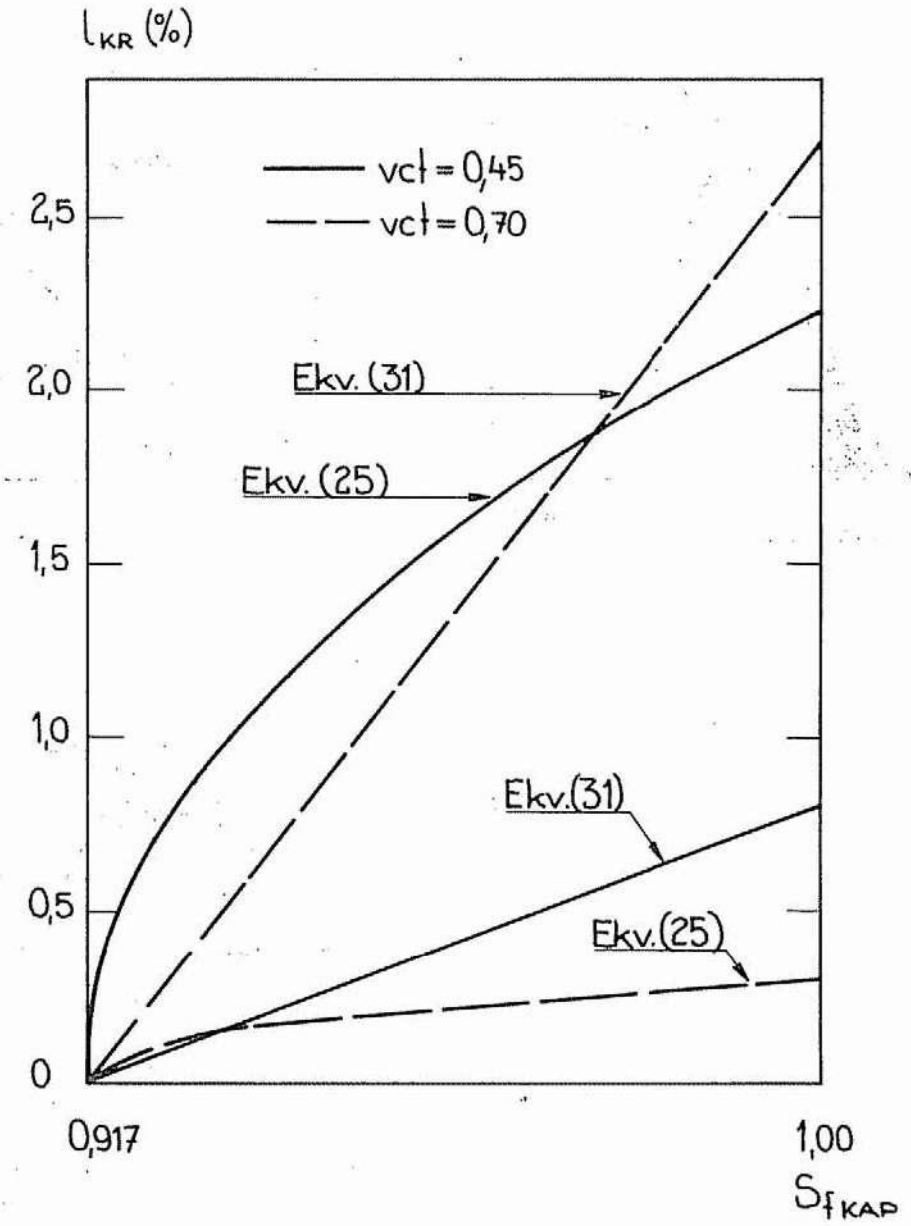


FIG 5 Exempel på kritisk kapillär vattenmättnadsgrad som funktion av luftporhalten. *Example of critical capillary degree of saturation as function of air-pore content. Cement paste.*

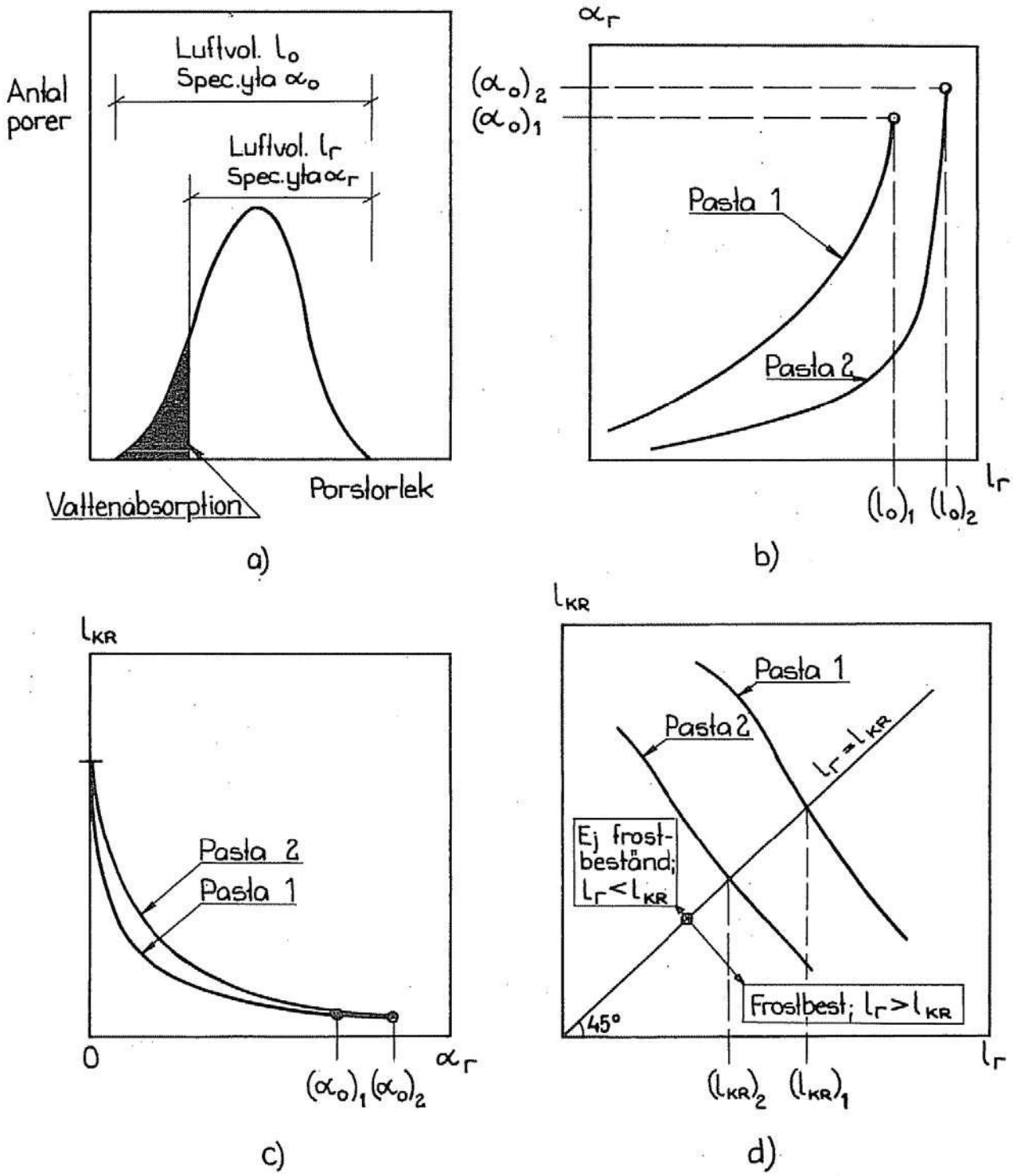


FIG 6 Warris' /1964/ teori för beräkning av kritisk vattenmättnadsgrad hos cementpasta. *Warris'/1964/ theory of calculation of critical degree of saturation of cement paste.*

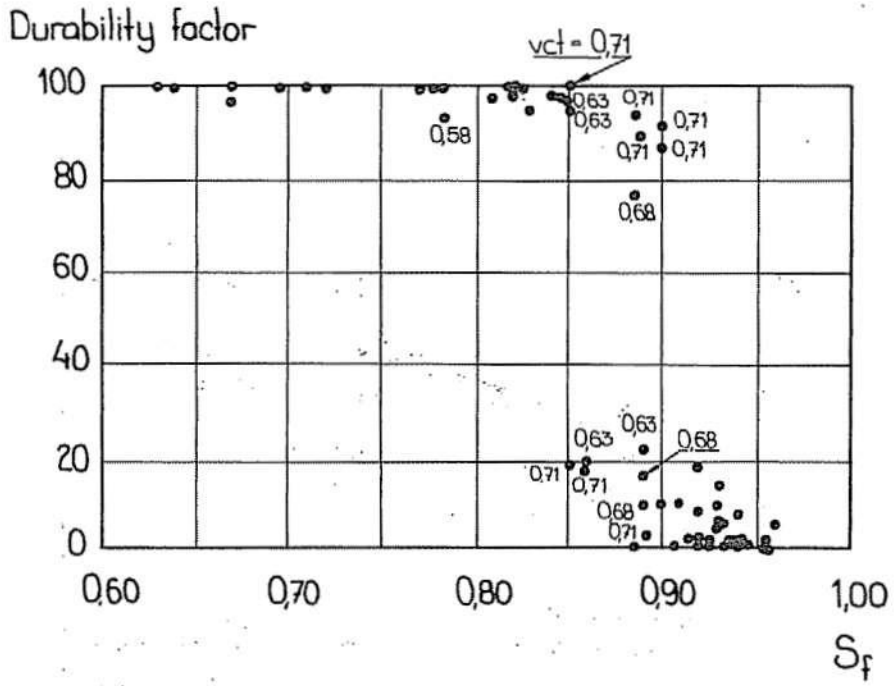


FIG 7 Effekt av vattenmättnadsgraden på betongs frostbeständighet. Whiteside & Sweet /1950/. *Effect of degree of saturation on frost resistance of concrete.*

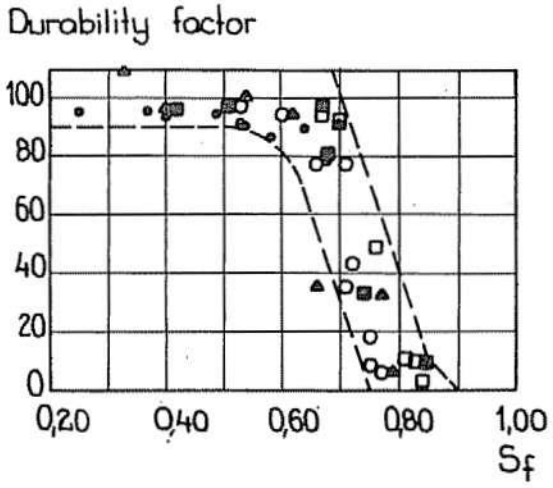


FIG 8 Samband mellan vattenmättnadsgrad och "durability factor" enligt Vuorinen /1970/. *Connection between degree of saturation and durability factor according to Vuorinen /1970/.*

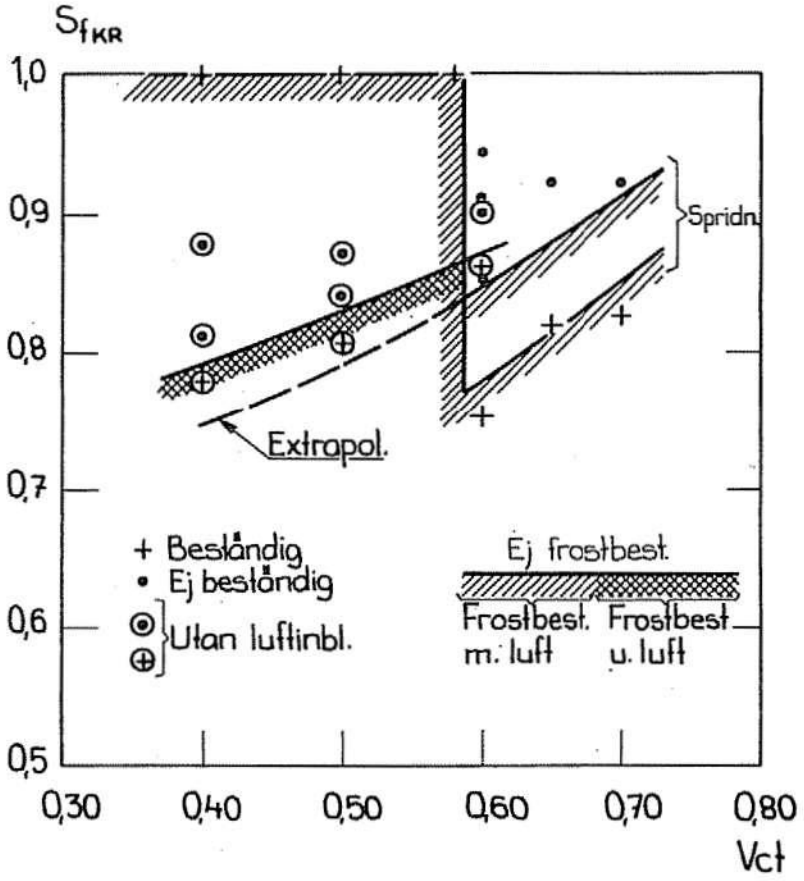


FIG 9 Kritisk vattenmättnadsgrad som funktion av vct och luftinblandning. Cementbruk. Mac Innis & Beaudoin /1968/. *Critical degree of saturation as function of water cement ratio and air-entrainment. Cement mortar.*

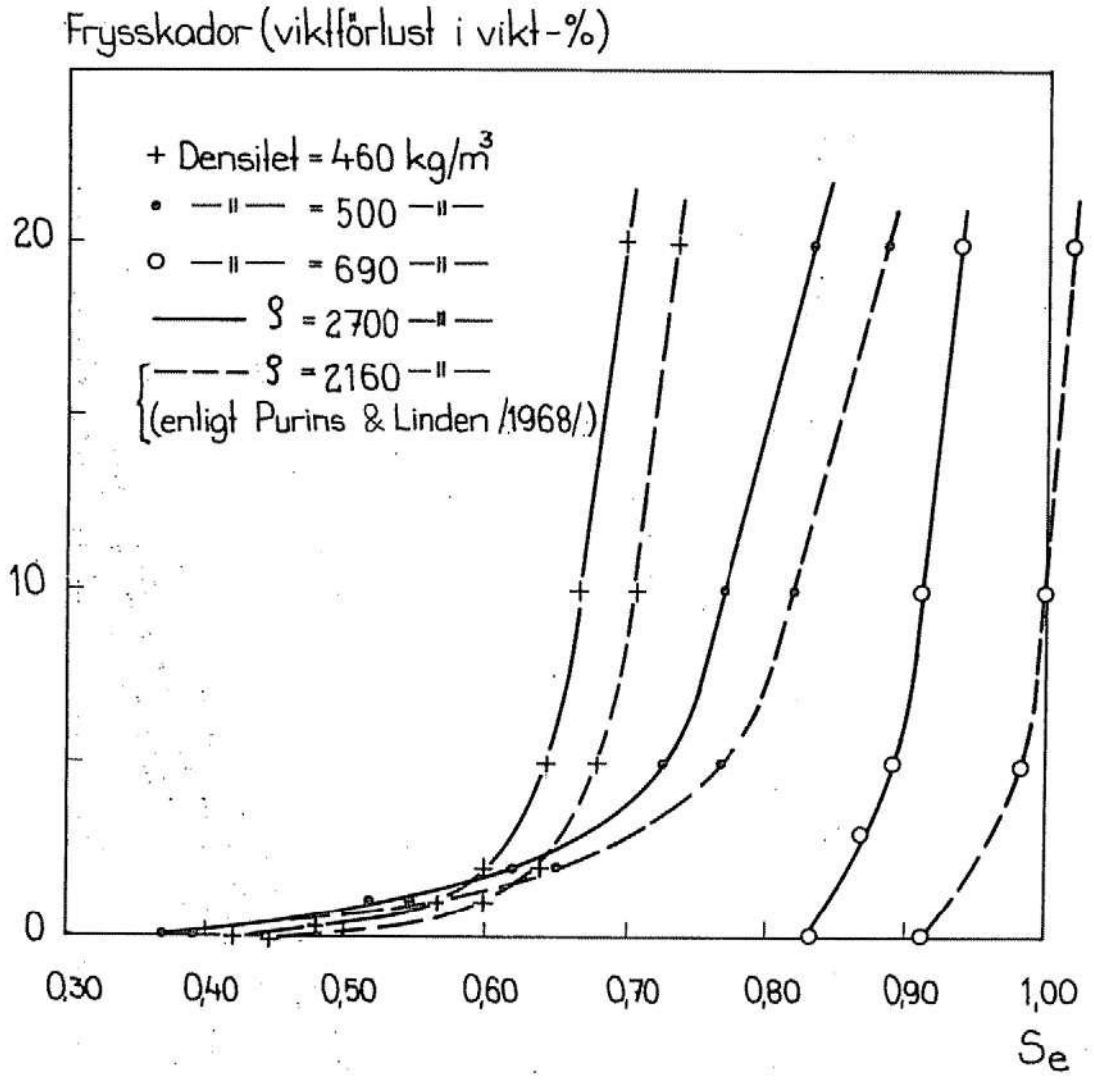


FIG 10 Frostbeständigheten som funktion av porfyllnadsgraden hos gasbetong av typ Siporex. Purins & Linden /1968/. *Frost resistance of cellular concrete as function of degree of saturation.*

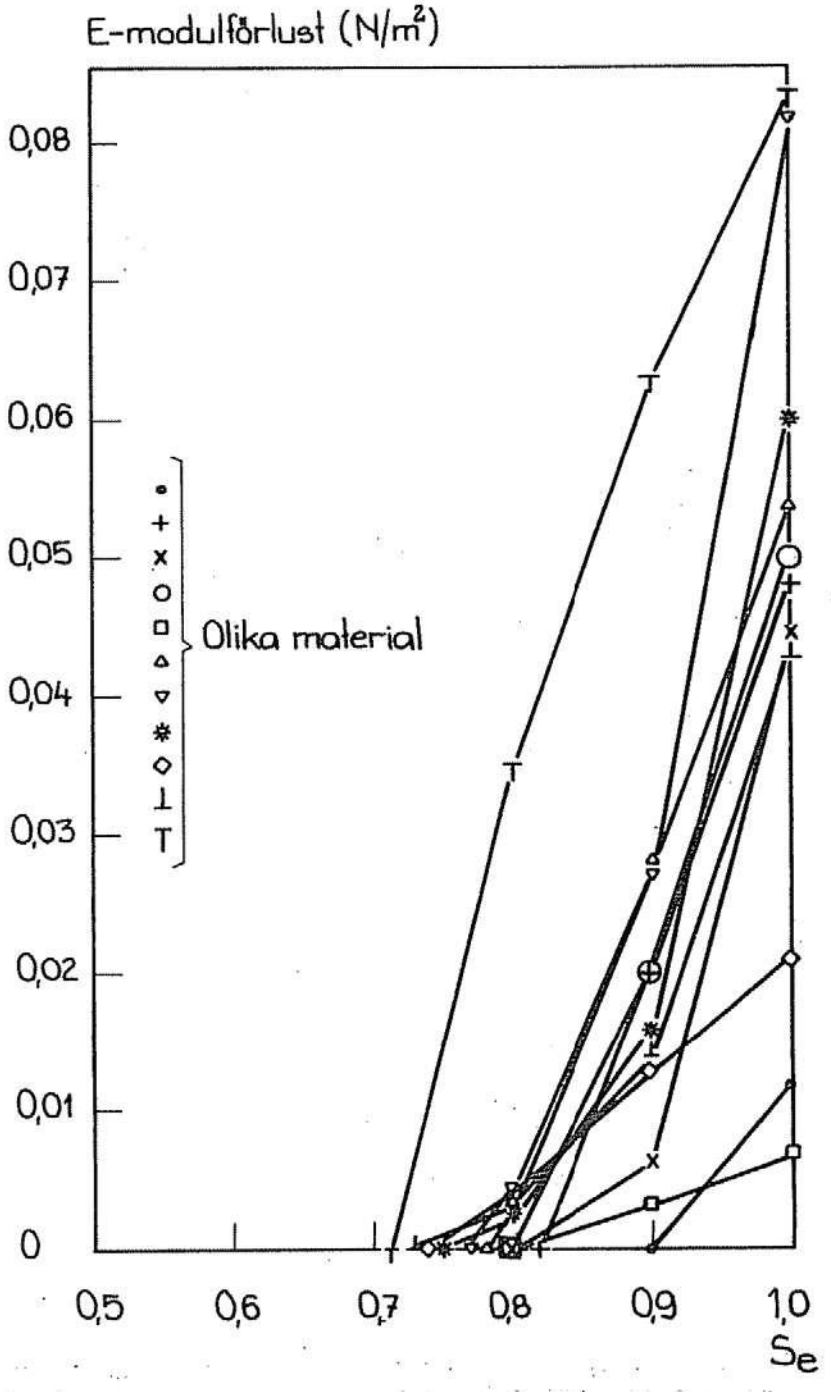


FIG 11 Samband mellan porfyllnadsgrad och förlust i E-modul efter frysning för olika naturstenar. Thomas /1938/. *Connections between degree of saturation of different natural stones and loss in E-modulus because of freezing.*

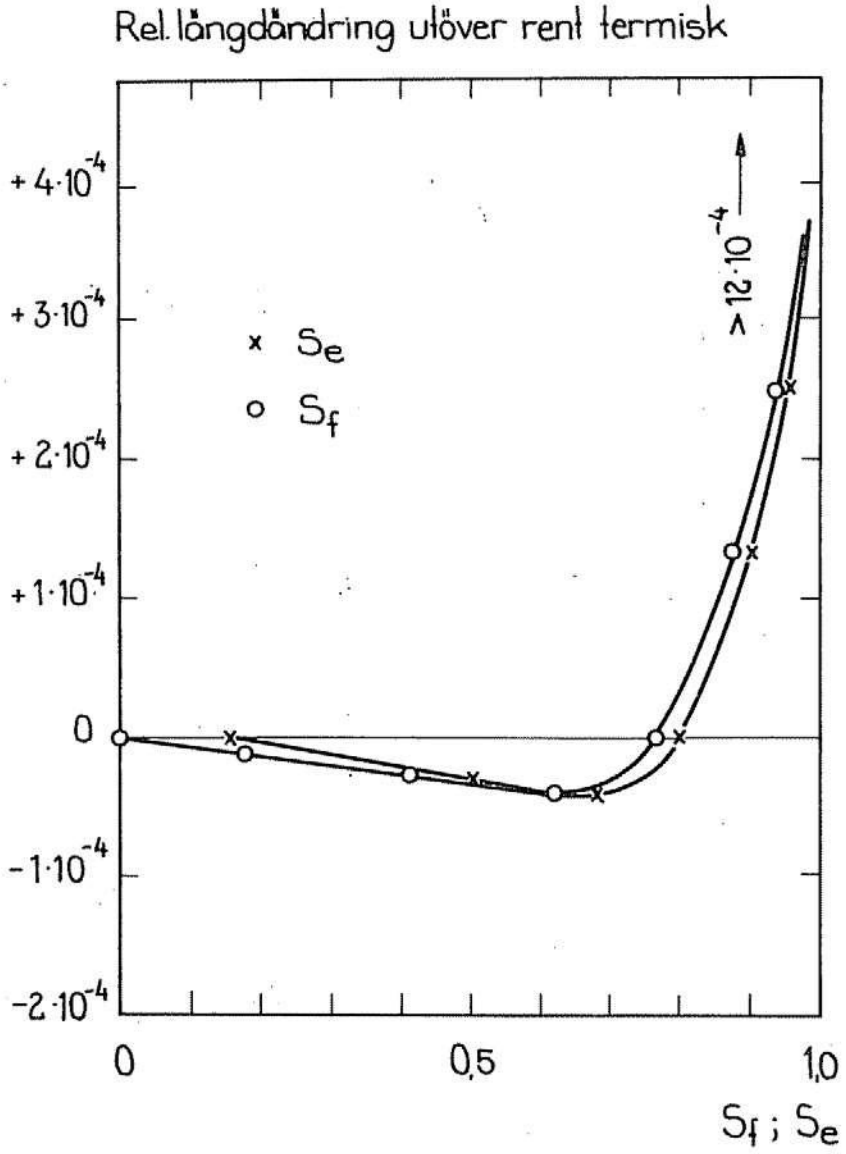


FIG 12 Samband mellan längdändringar och vattenmättnadsgrad hos kalksandsten. Thomas /1938/. *Connection between length-change and degree of saturation of sand lime brick.*

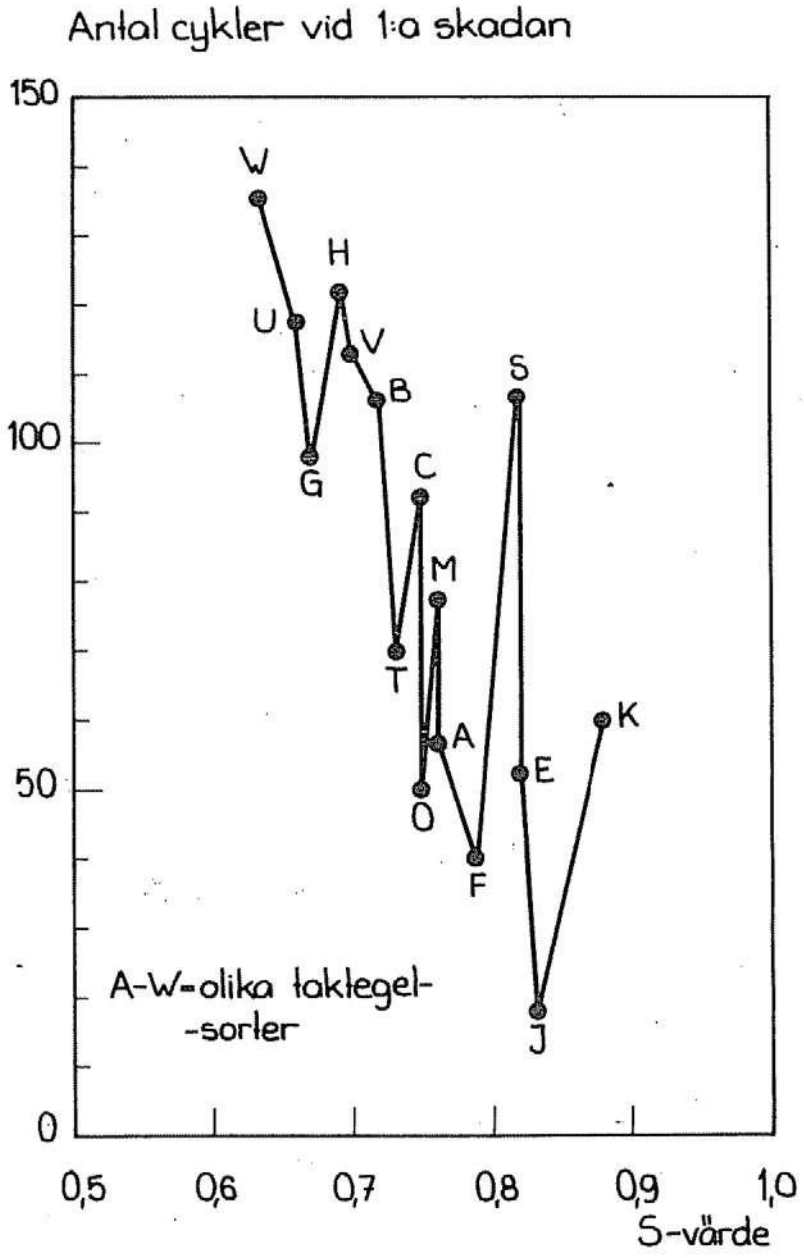


FIG 13 Frostbeständighet hos taktegel som funktion av S-värdet (före första frysning). Schneider /1962/. *Frost resistance of clay roofing tiles as function of "S-value".*

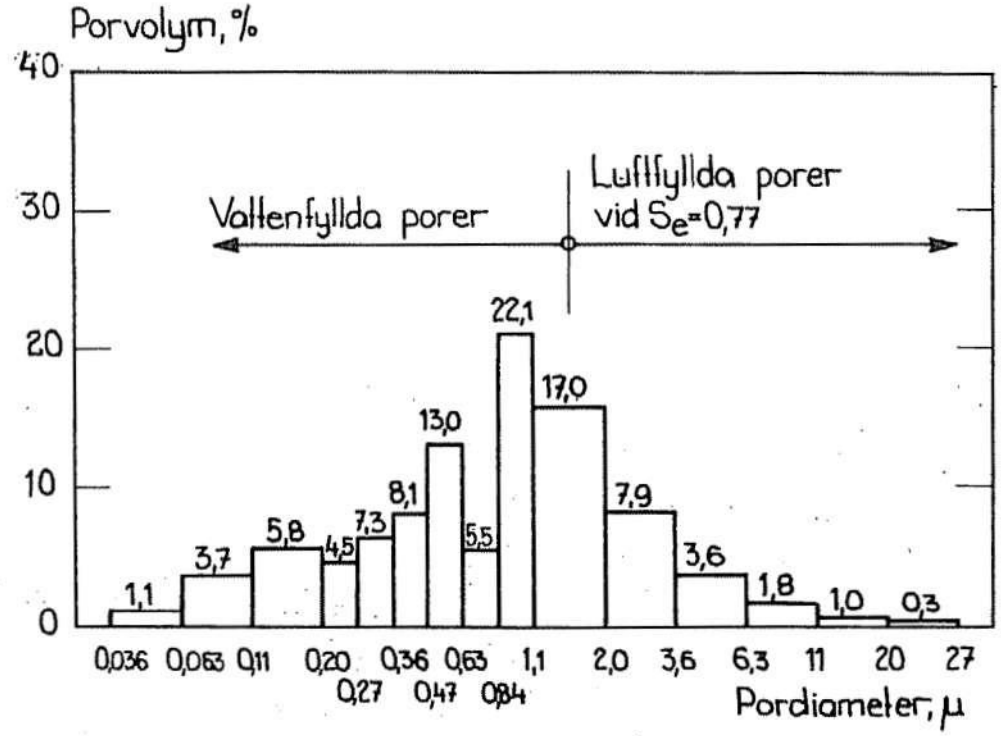


FIG 14 Porstorleksfördelning hos tegel med S-värde=0,77 och god beständighet. *Pore-size distribution of brick with good frost resistance and S-value= 0,77.*

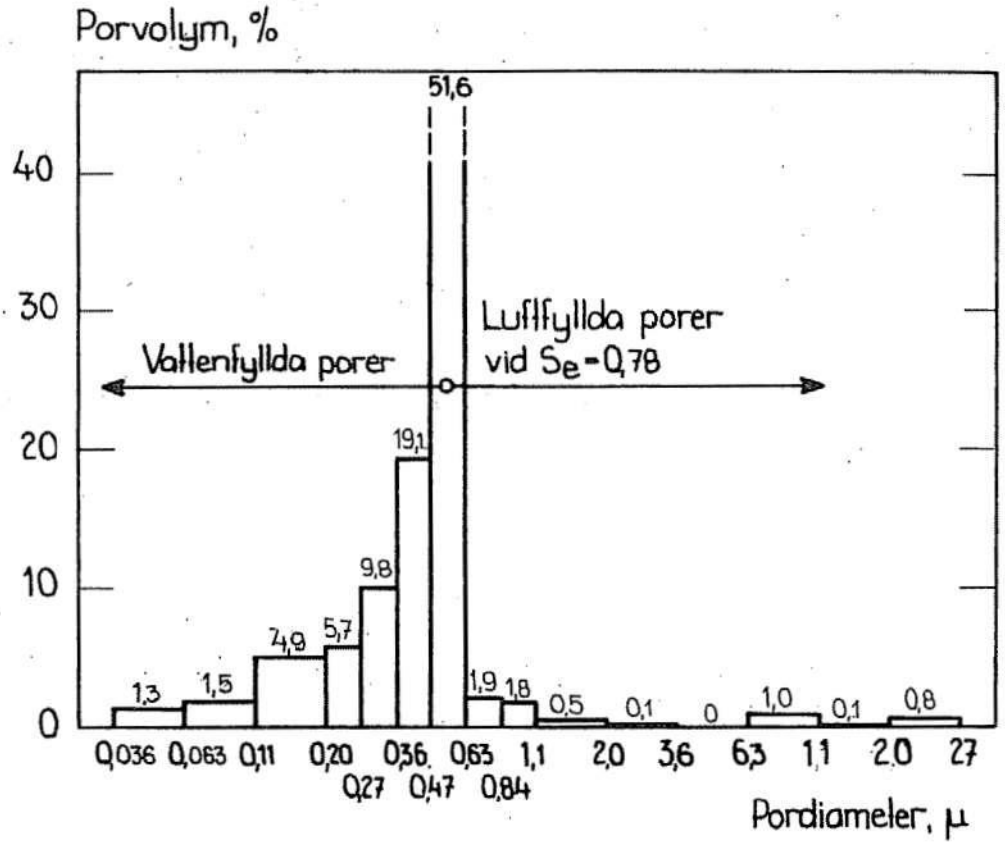


FIG 15 Porstorleksfördelning hos tegel med S-värde=0,78 och dålig beständighet. *Pore-size distribution of brick with bad frost resistance and S-value= 0,78.*

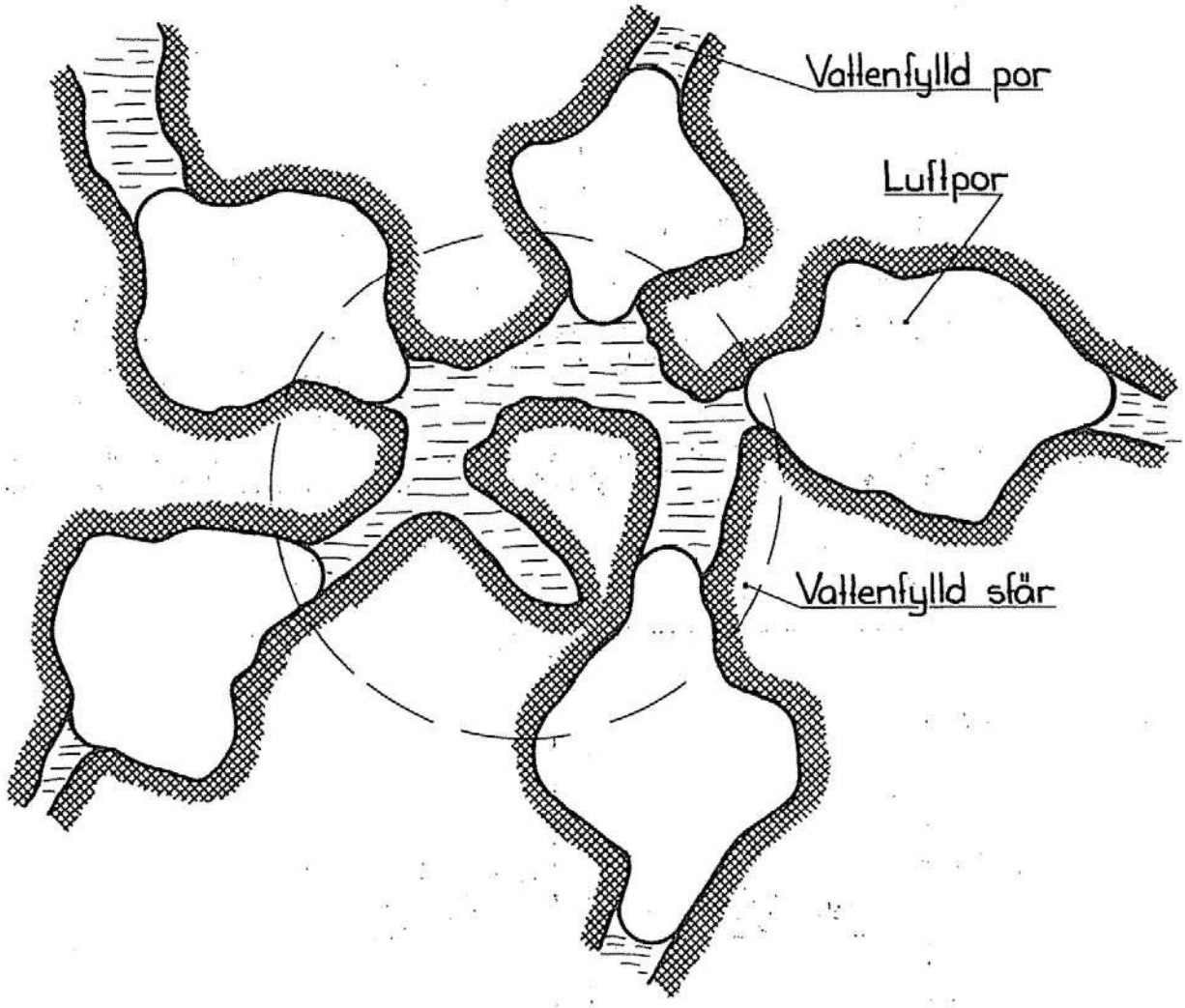
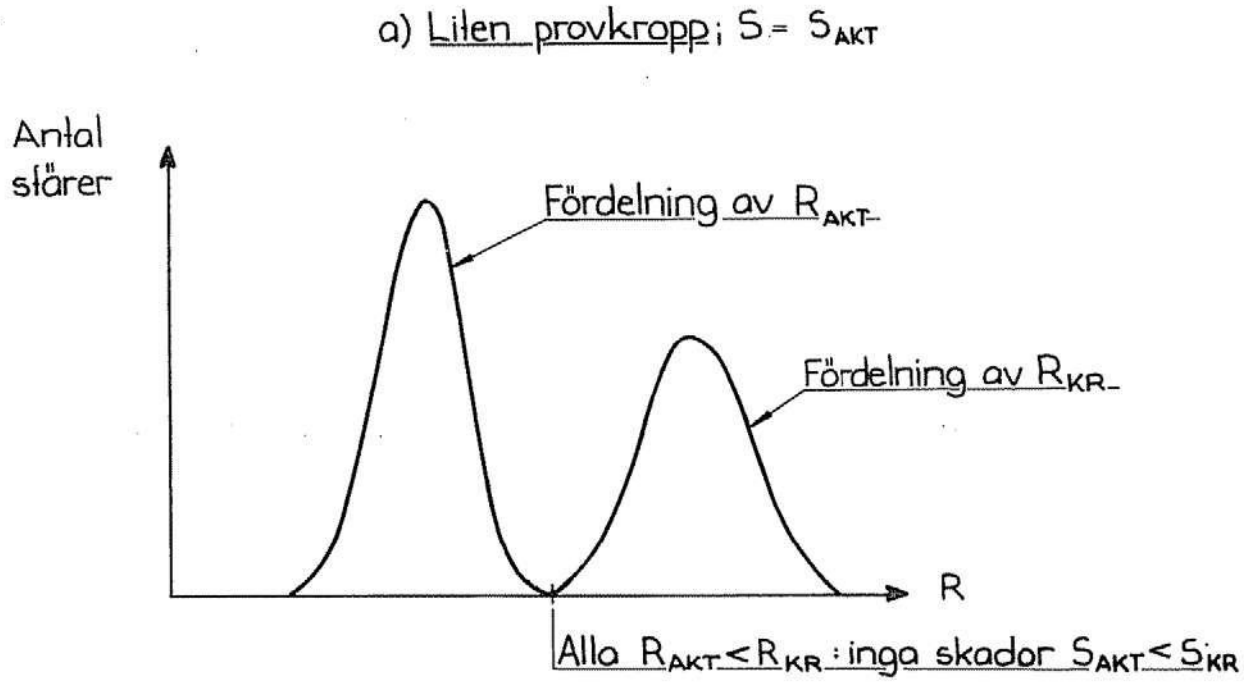


FIG 16 Vattenfylld sfär i ett poröst material. *Waterfilled sphere in a porous material.*



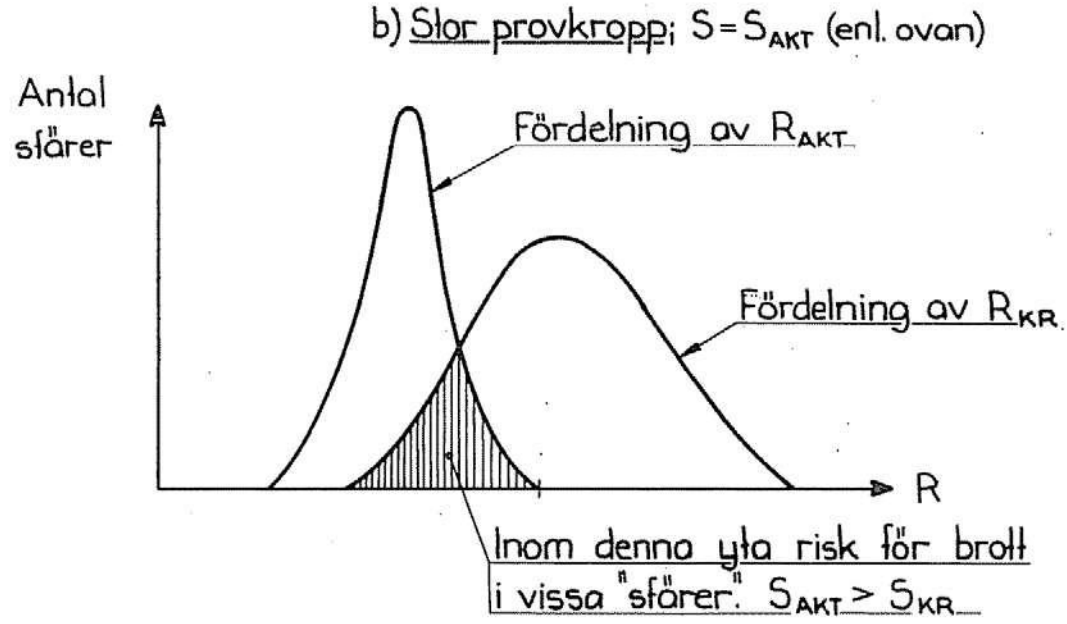


FIG 17 Tänkbar effekt av provkroppsstorlek på S_{KR}.
Imaginable effect of specimen size on S_{CR}.

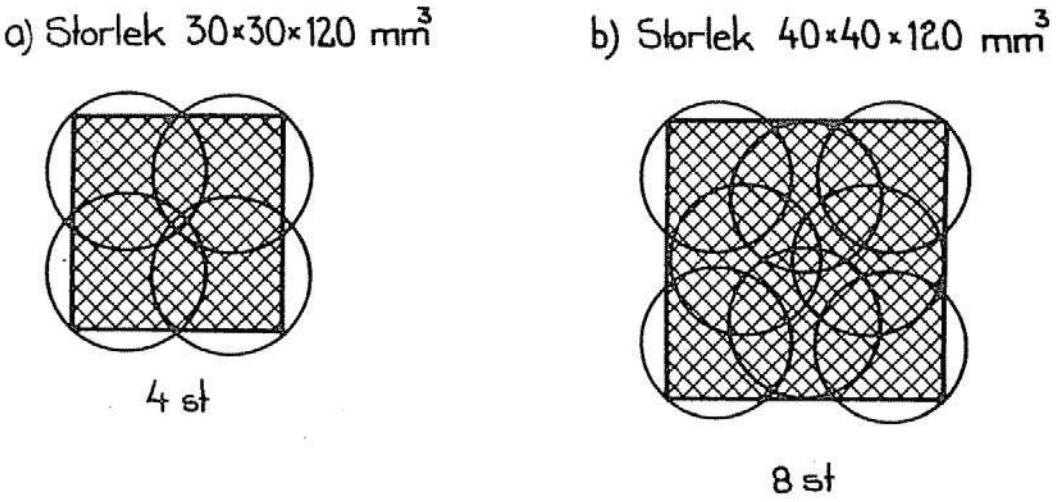


FIG 18 Antal kritiska sfärer som åtgår i planet för att helt täcka tegelprovkroppar av olika storlek. *Number of critical spheres to cover clay brick specimens of different sizes.*

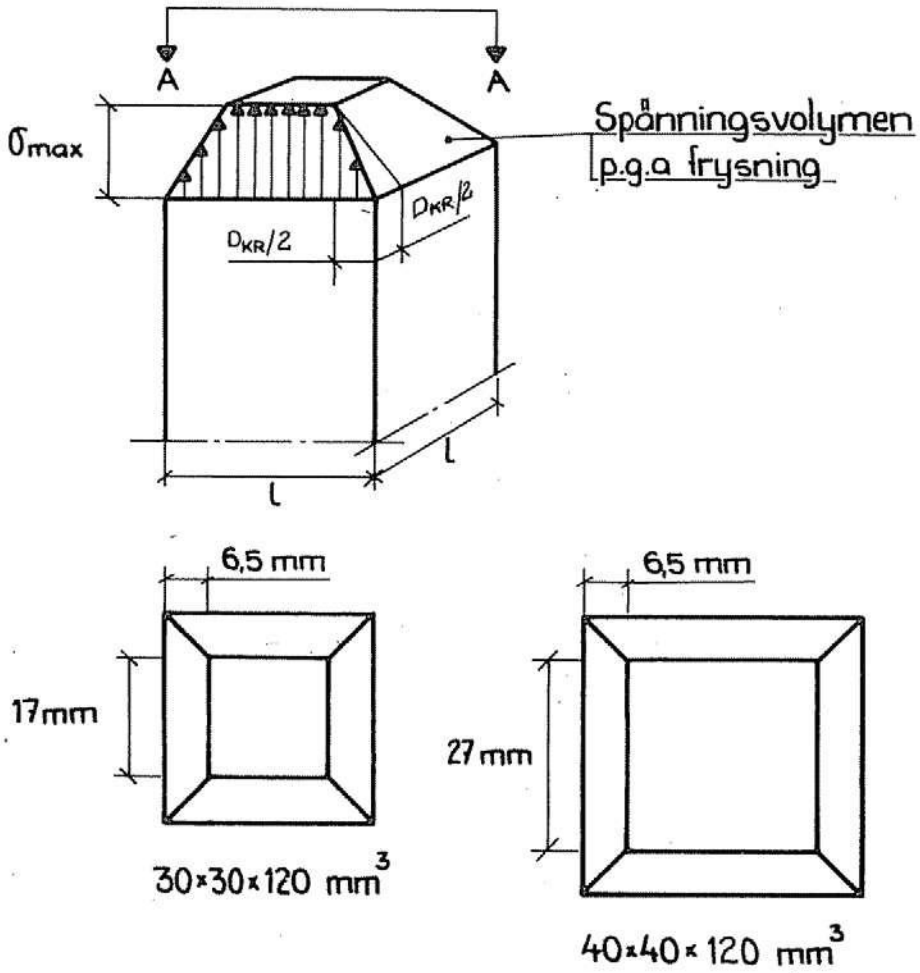


FIG 19 Spänningsfördelning vid frysning av tegelprovkroppar av två olika storlekar. *Stress distributions at freezing of clay brick specimens of two different sizes.*

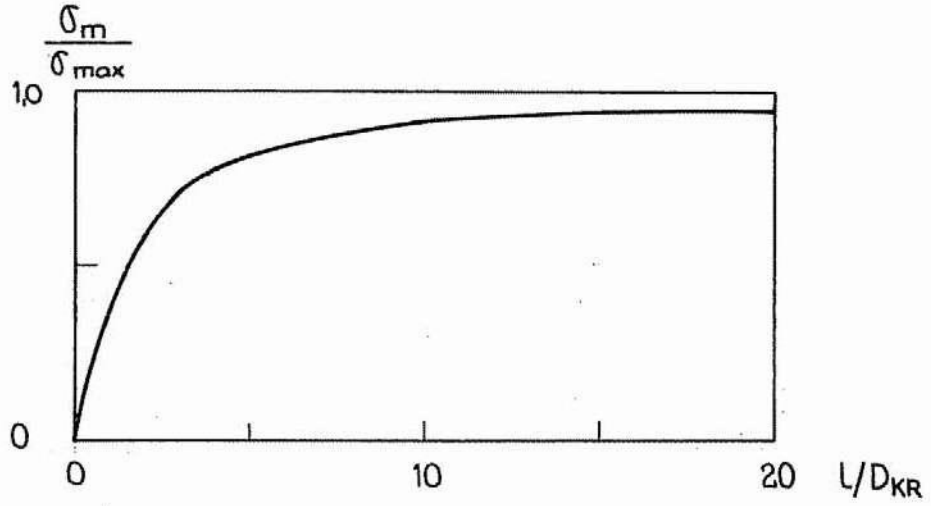


FIG 20 Inverkan av provkroppstorlek på medelspänningen i tvärsnittet. *Influence of specimen size on mean stress at freezing.*

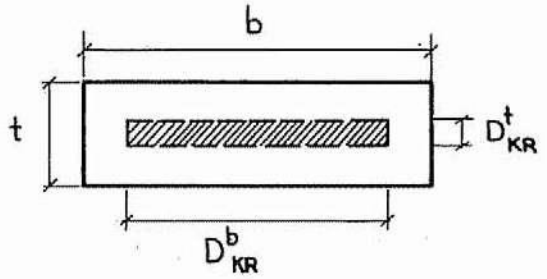


FIG 21 Kritiska tjocklekar hos anisotropt material.
Critical thicknesses of an anisotropic material.

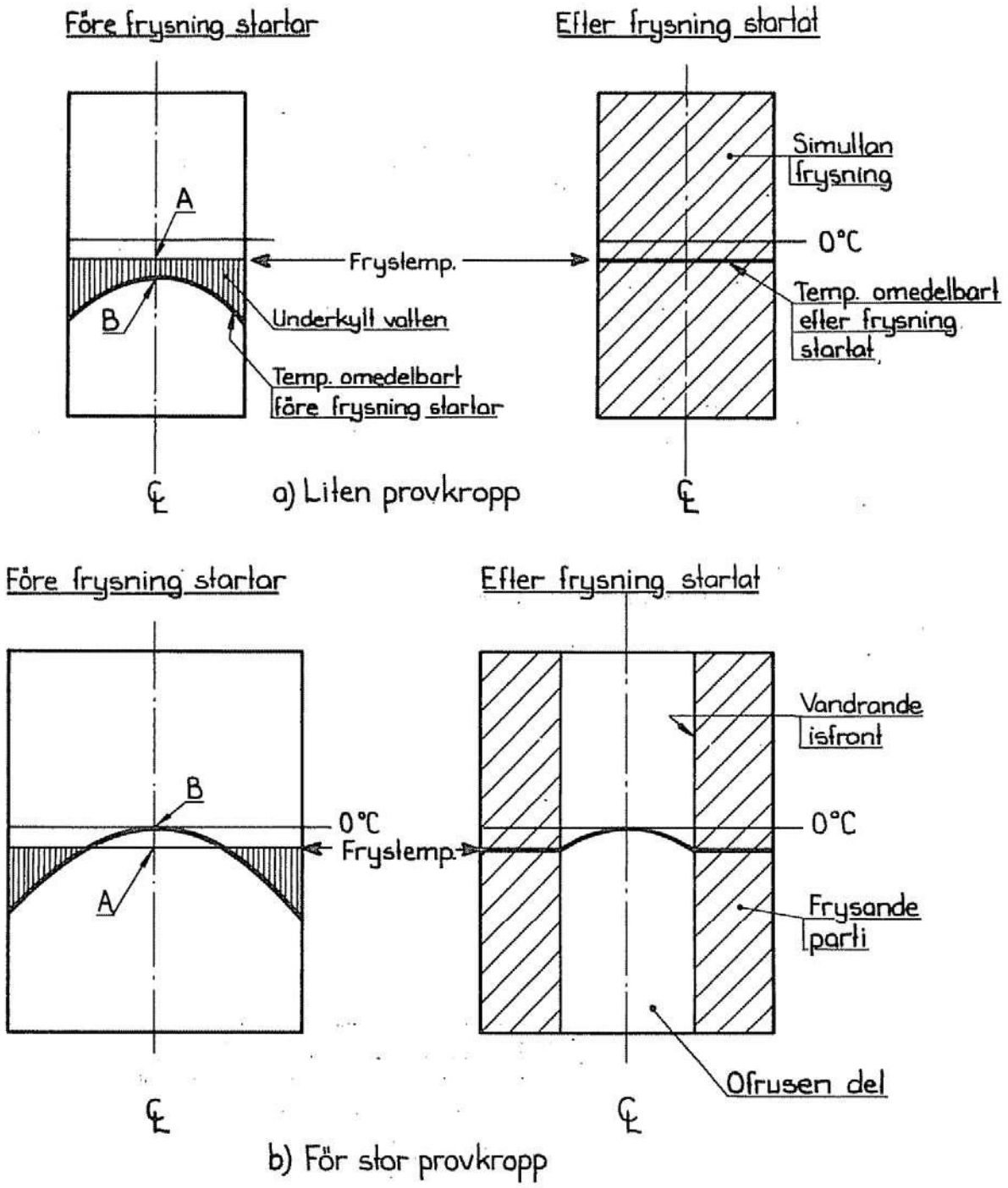


FIG 22 Inverkan av provkroppsstorlek på sätt för frysning. *Influence of specimen size on way of freezing.*

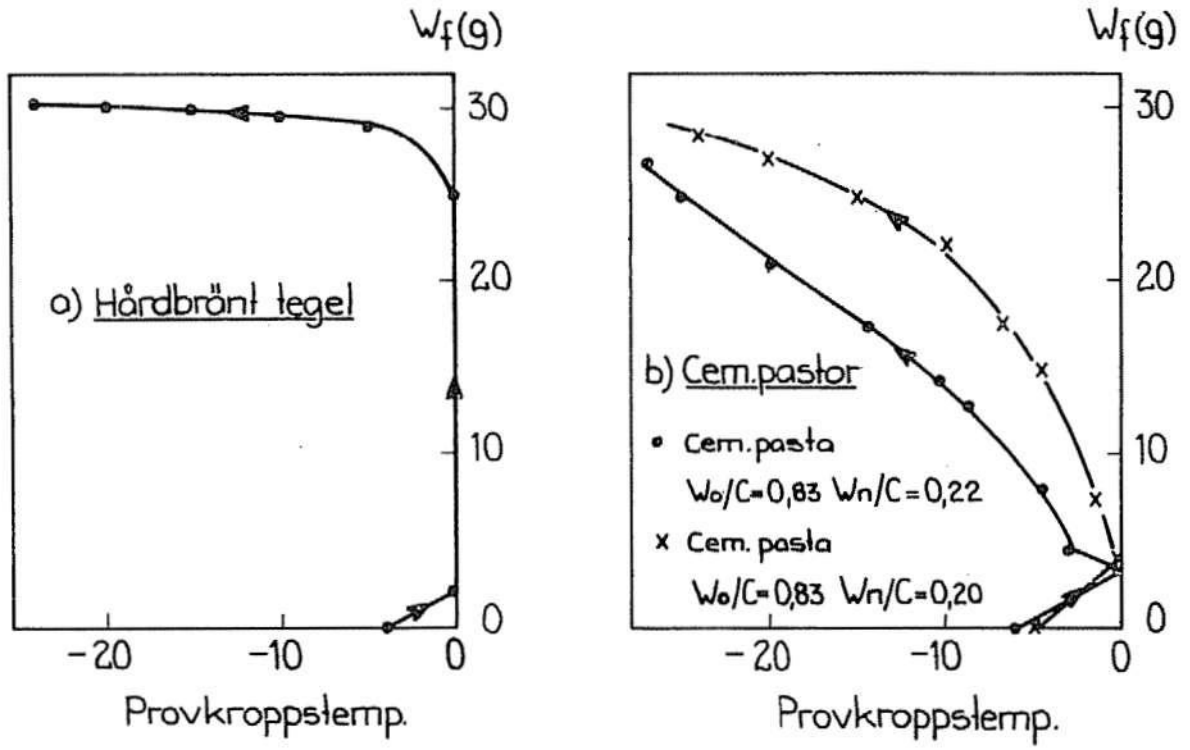


FIG 23 Isbildning som funktion av provkroppens medeltemperatur. Fagerlund /1973 A/.
Ice formation as function of specimen temperature.

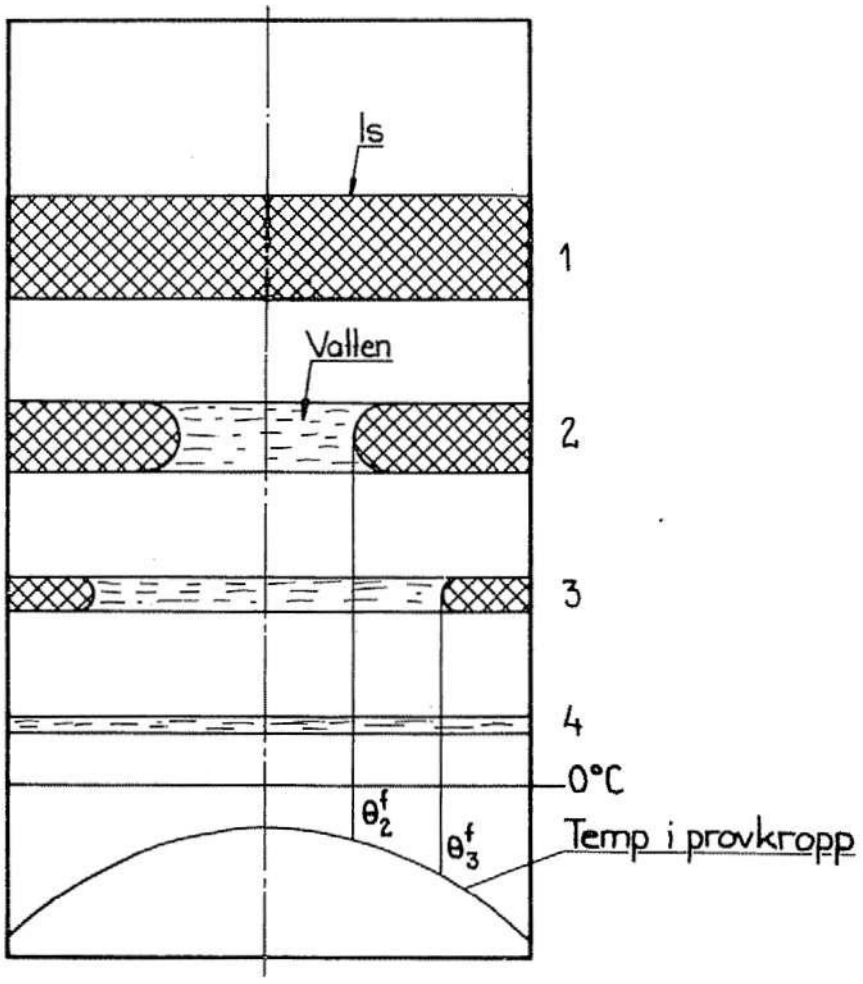


FIG 24 Uppkomst av lokala isfronter i ett material med temperaturgradient.
Occurence of local ice fronts in a material with temperature gradient.

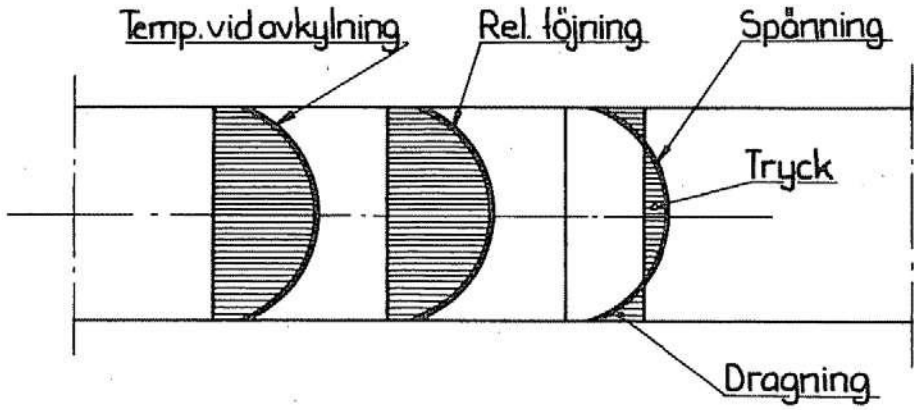


FIG 25 Spänningsgradienter på grund av temperaturgradienter. *Stress gradients caused by temperature gradients.*

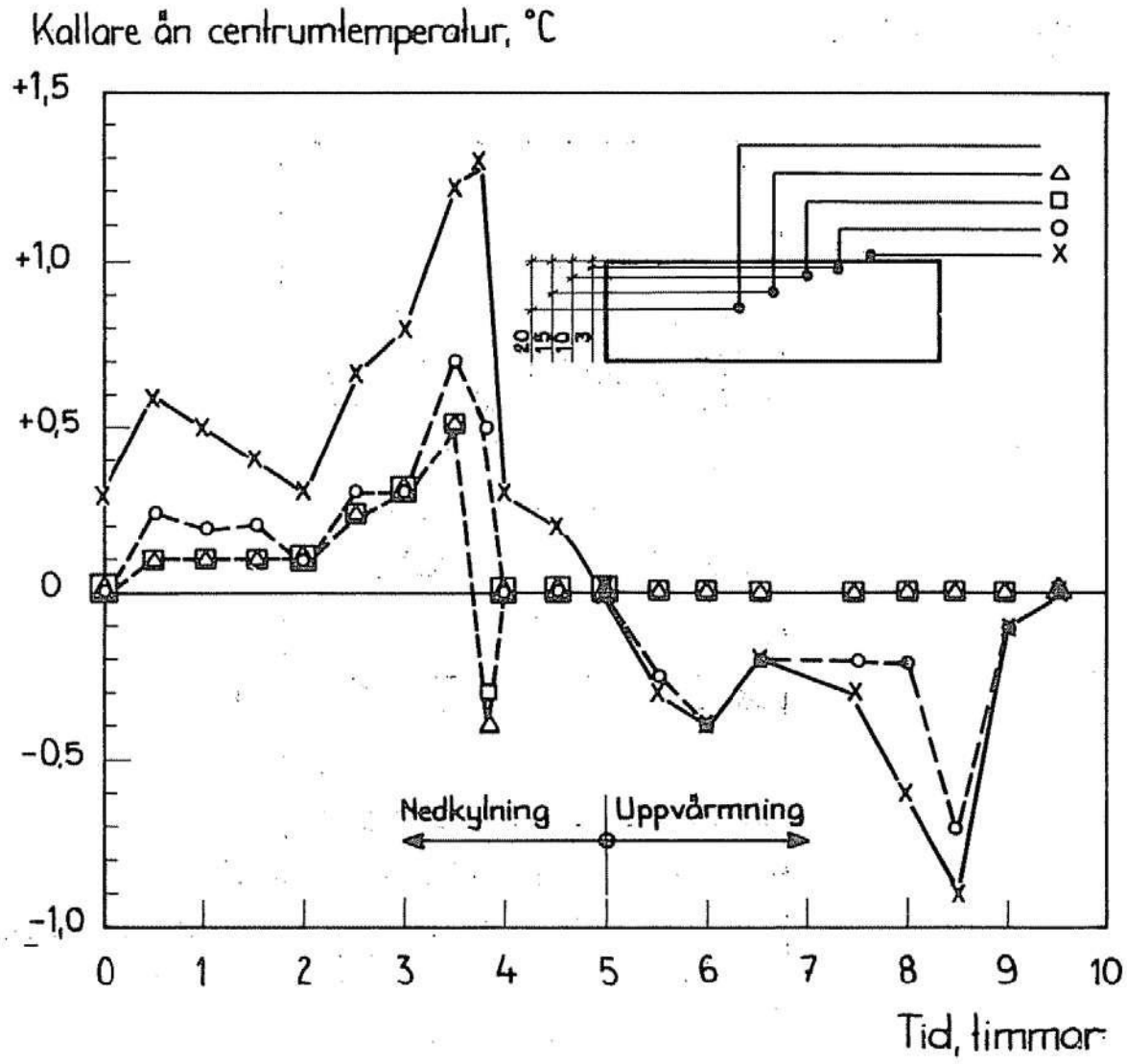


FIG 26 a Temperaturgradienter under en fryscykel. Gasbetong typ 1. Storlek 30x30x120, S_e=0,60. *Temperature gradients during a freezing cycle.*

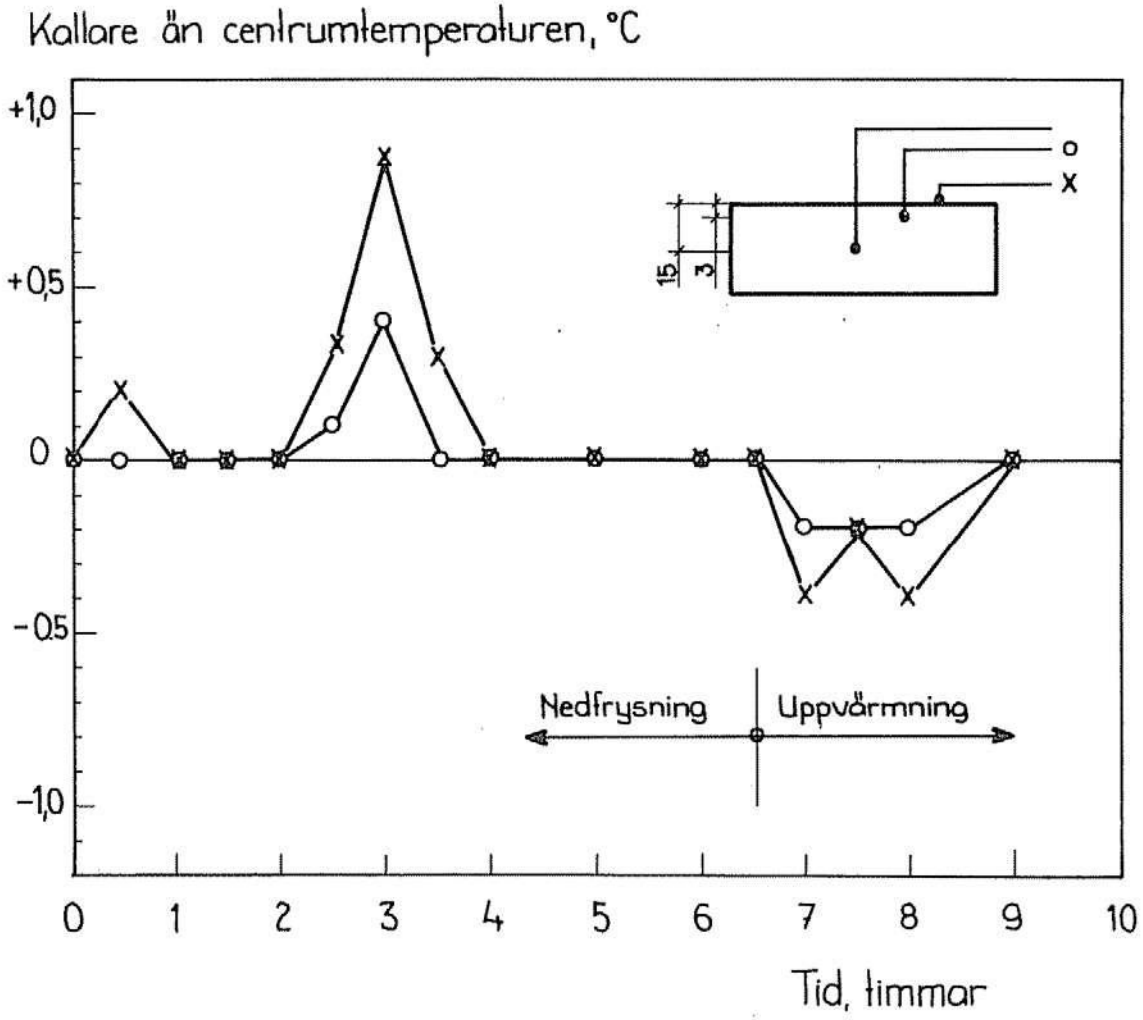


FIG 26 b Temperaturgradienter under en fryscykel. Gasbetong typ 1. Storlek 30x30x120, S_e=0,60. *Temperature gradients during a freezing cycle.*

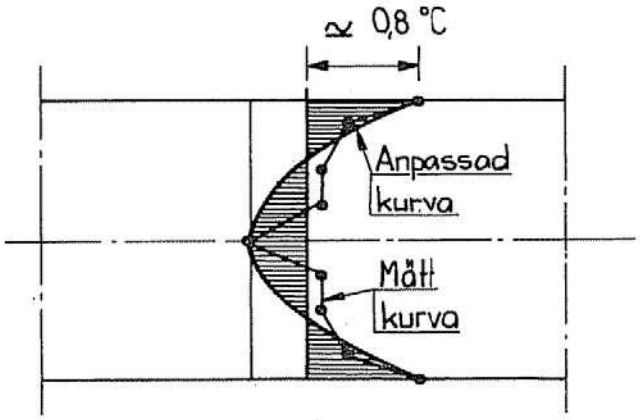


FIG 27 Maximalt uppmätta temperaturgradienter. Beräknade spänningar i tvärsnittet. *Maximum temperature gradients. Calculated stresses in the cross section.*

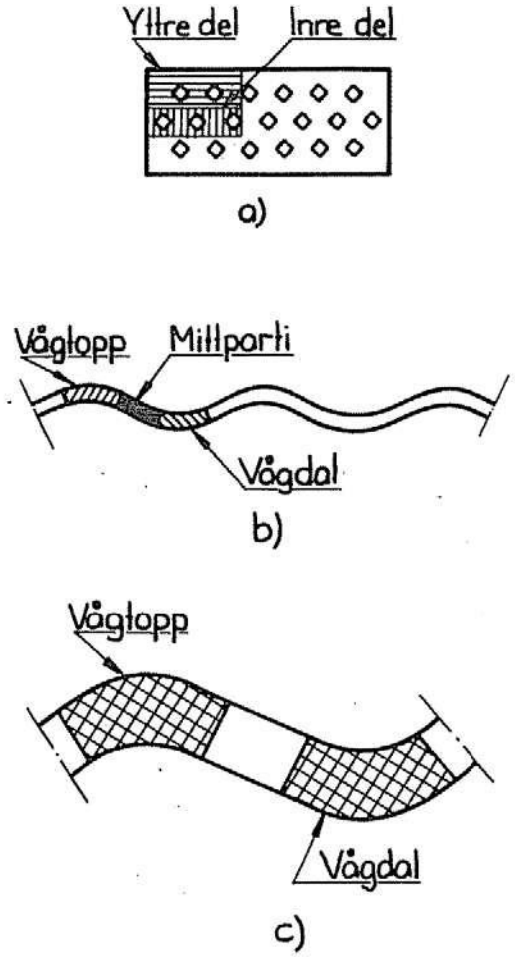


FIG 28 Uppdelning av en materialenhet i olika delar. *Division of a materials unit in different parts.*

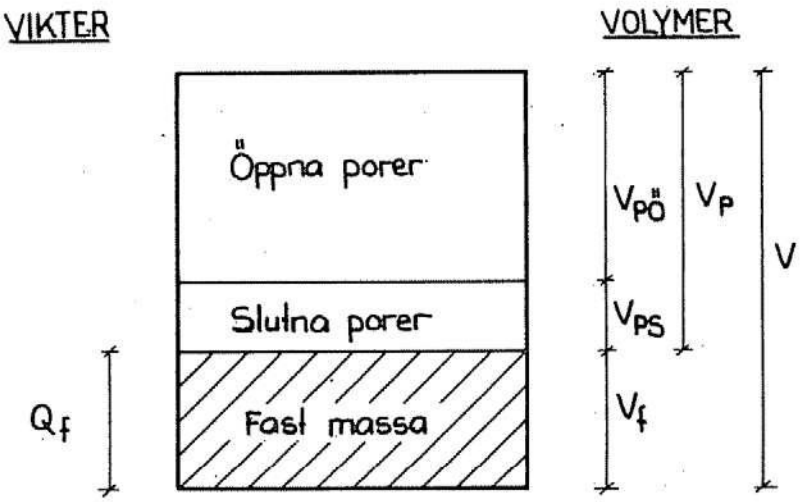


FIG 29 Enhetsvolym av uttorkat poröst material. *Unit volume of a dried porous material.*

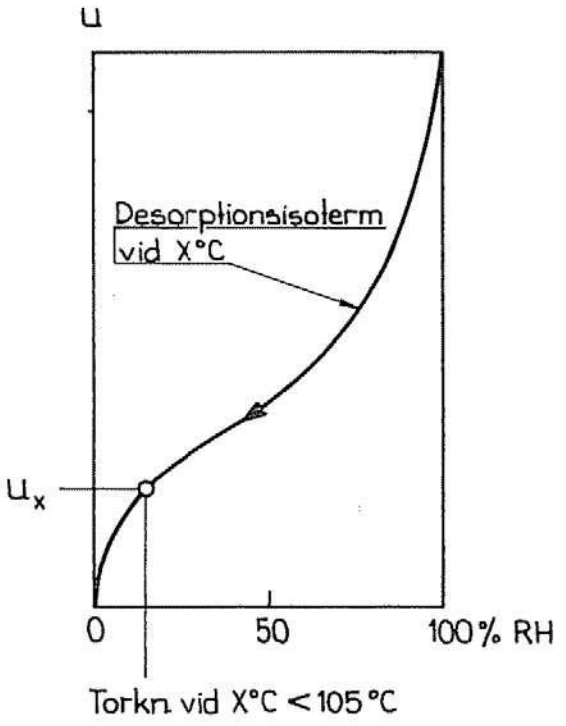


FIG 30 Bedömning av vattenhalt i material, som torkats vid x°C. *Estimation of water content in porous material dried at x°C.*

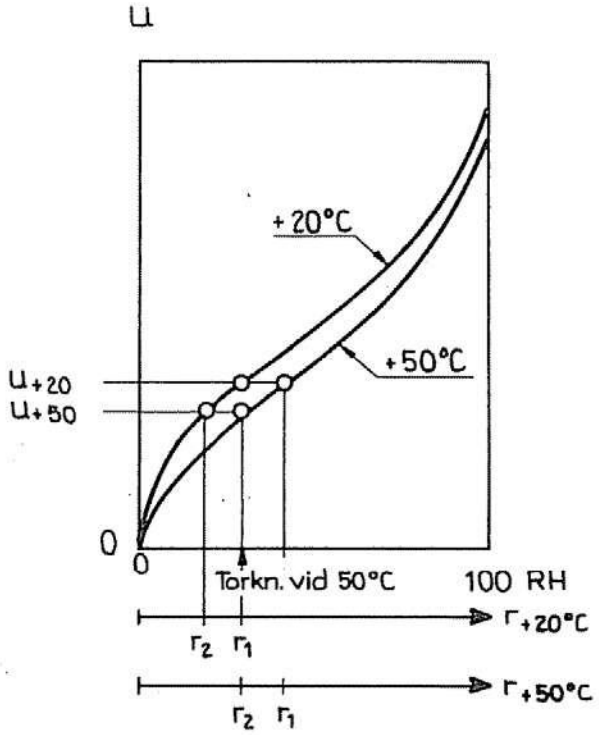


FIG 31 Beräkning av förändring av sorptionsisoterm vid förändring av temperatur. *Calculation of a change in sorption isotherm at change in temperature.*

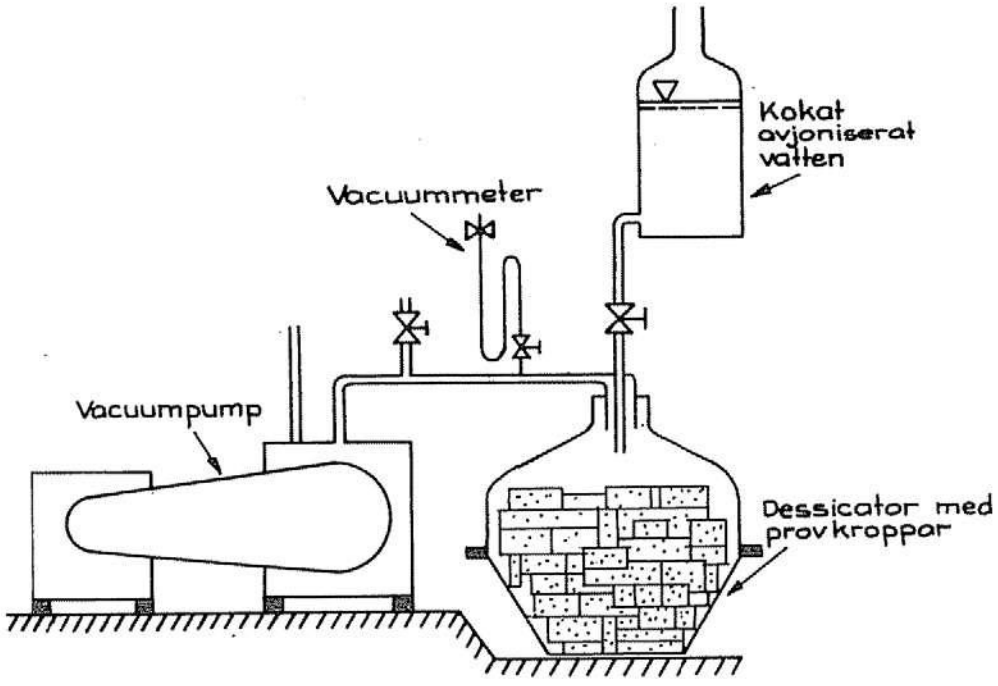


FIG 32 Apparatur för vattenmättning av provkroppar. *Apparatus for vacuum saturation.*

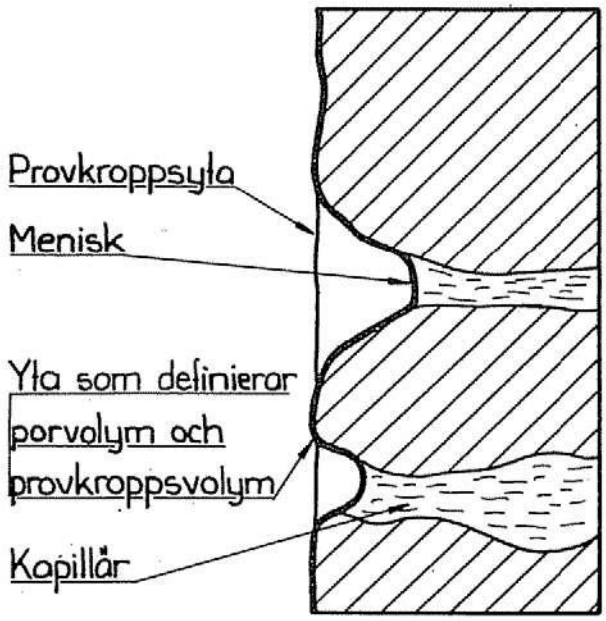


FIG 33 Definition av provkroppsvolym och porvolym baserad på vägning av vattenmättad provkropp i luft. *Definition of specimen volume and pore volume based on weighing a saturated specimen in air.*

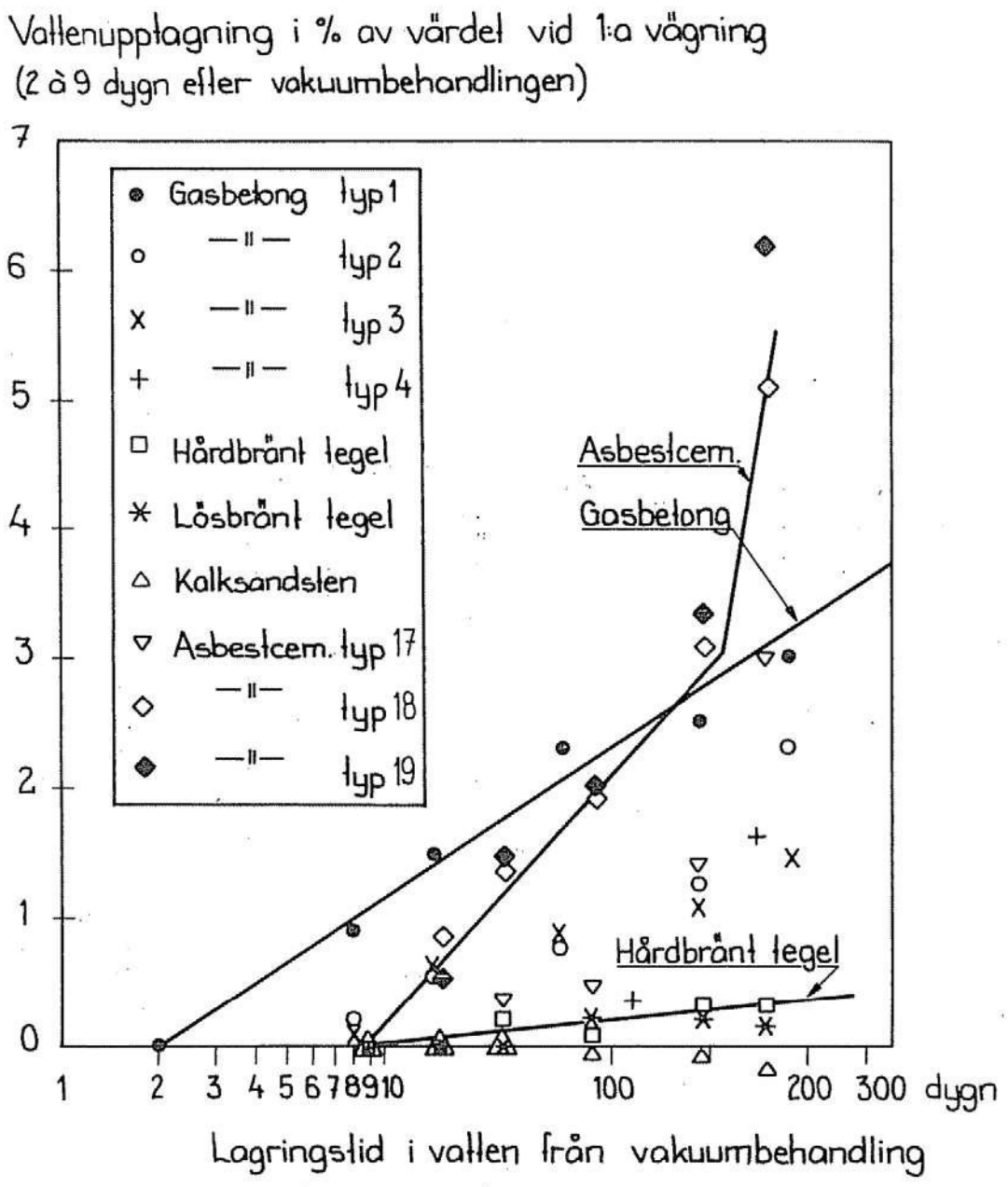


FIG 34 Vattenupptagning vid lång tids vattenlagring efter vacuumbehandling. Varje punkt utgör medelvärde av 4 provkroppar. *Water uptake at water storage for a long time after vacuum-treatment.*

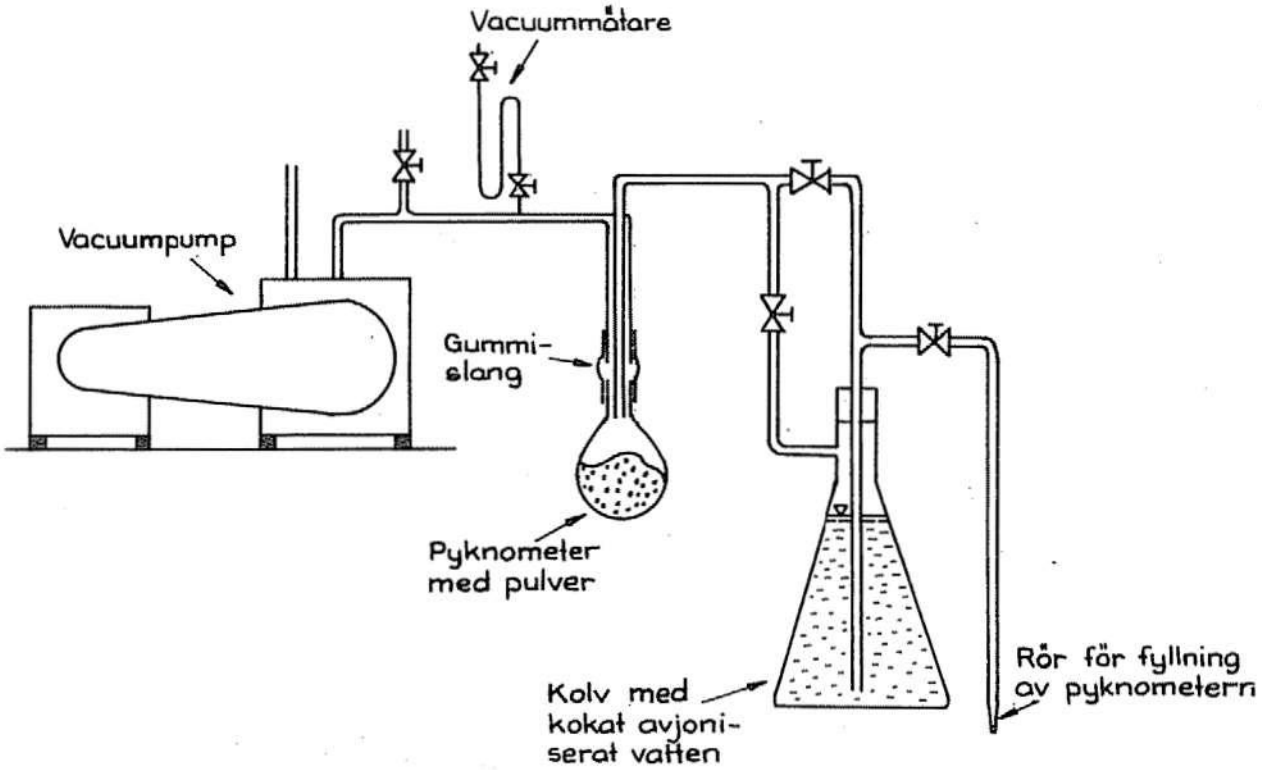


FIG 35 Apparatur för bestämning av kompakt densitet och sluten porvolym.
Apparatus for determination of true density and closed pore-volume.

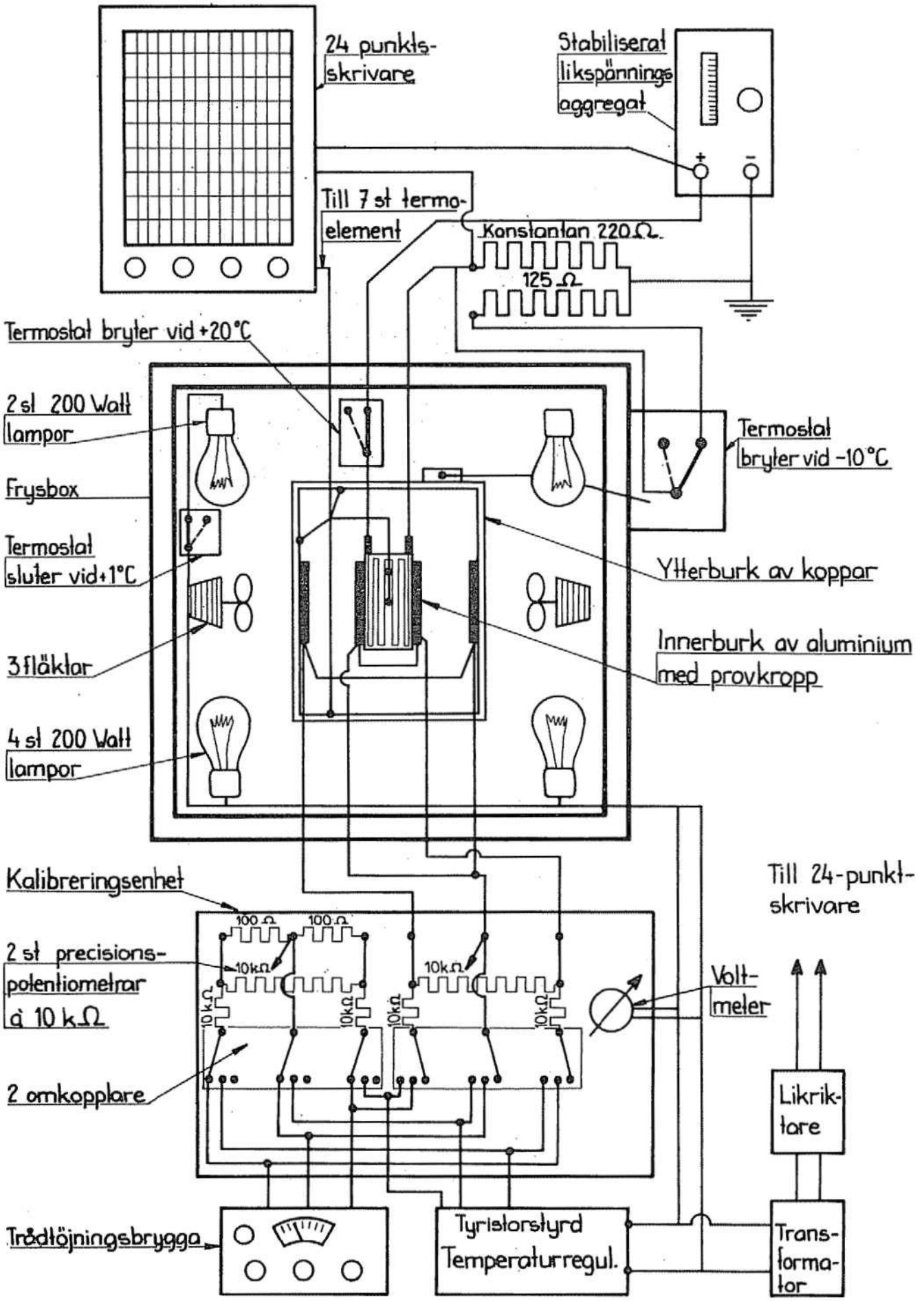


FIG 36 Adiabatisk kalorimeter för bestämning av frysbar vattenmängd.
Adiabatic calorimeter for determination of freezable water content.

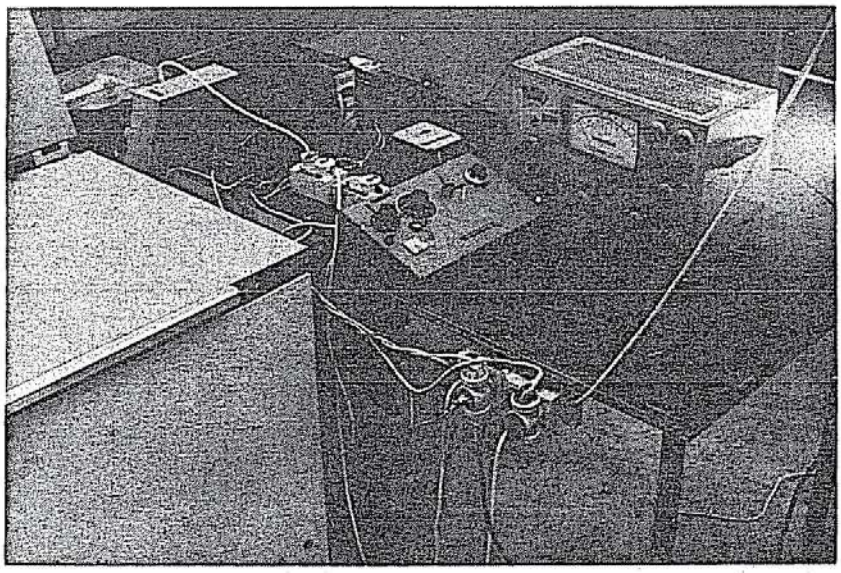


FIG 37 Adiabatisk kalorimeter. Reglerings- och kalibreringsutrustning. *Adiabatic calorimeter. Equipment for regulation and calibration.*

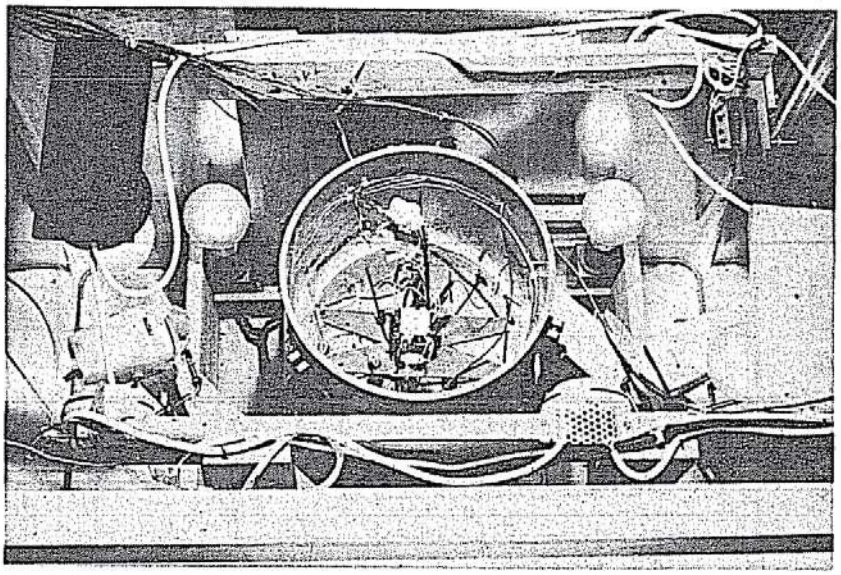


FIG 38 Adiabatisk kalorimeter. Frysutrymme med ytter- och innerkärl, lampor och fläktar. *Adiabatic calorimeter. Freezing chamber with outer- and inner vessels, lamps and fans.*

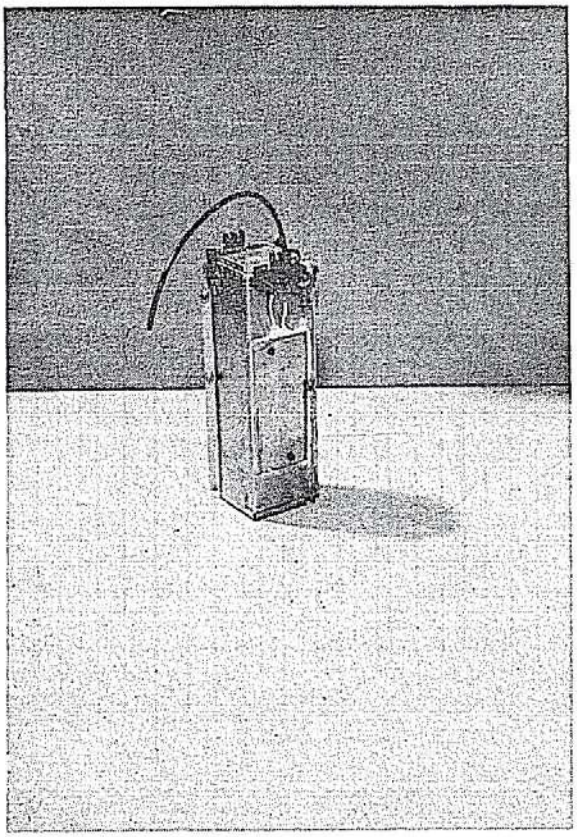


FIG 39 Adiabatisk kalorimeter. Innerkärl. *Adiabatic calorimeter. Inner vessel.*

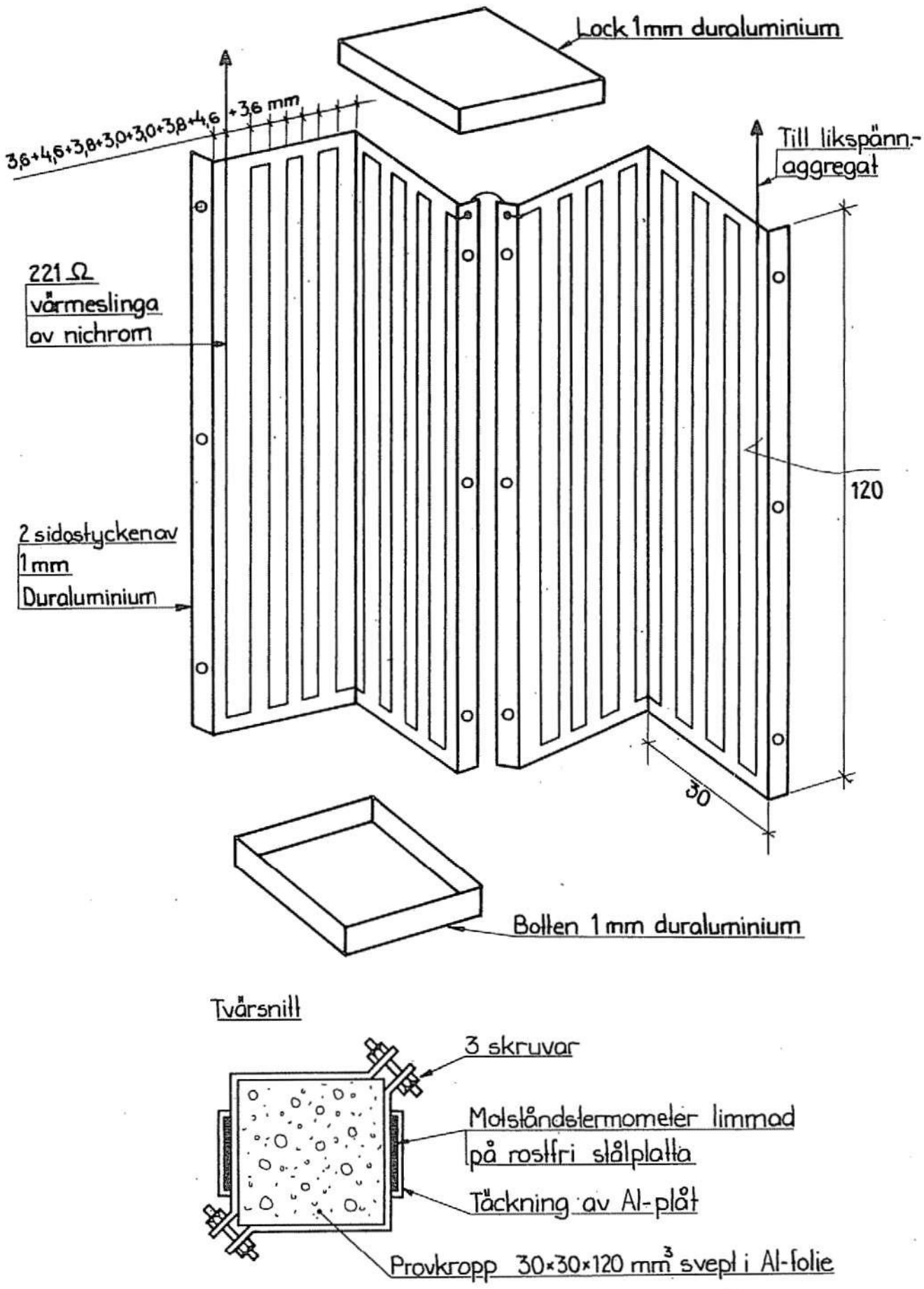


FIG 40 Adiabatisk kalorimeter. Innerkärlets uppbyggnad. *Adiabatic calorimeter. Inner vessel.*

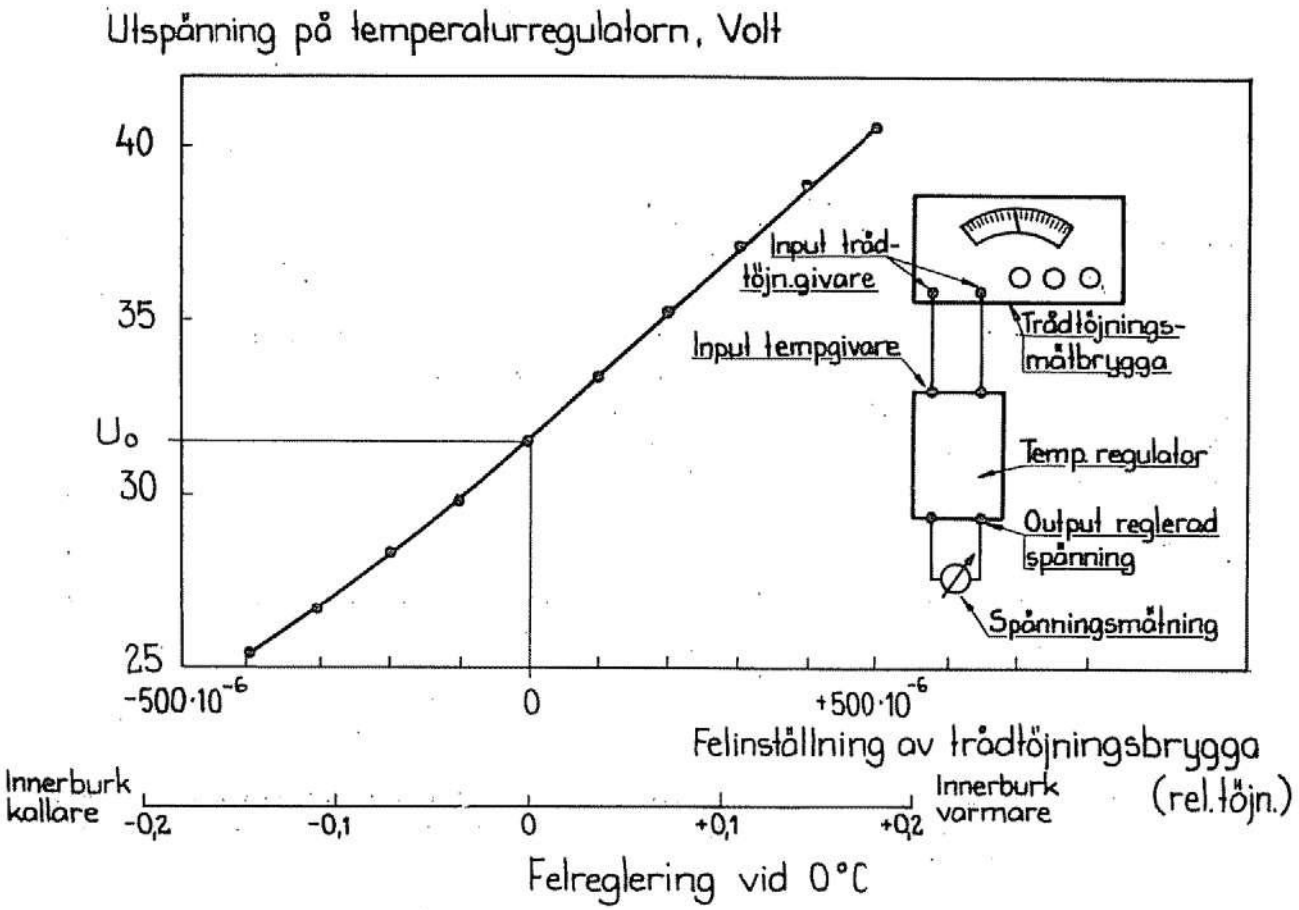


FIG 41 Kalibrering av temperaturregulatorns utspännings- felregleringskurva. *Calibration of the temperature regulator.*

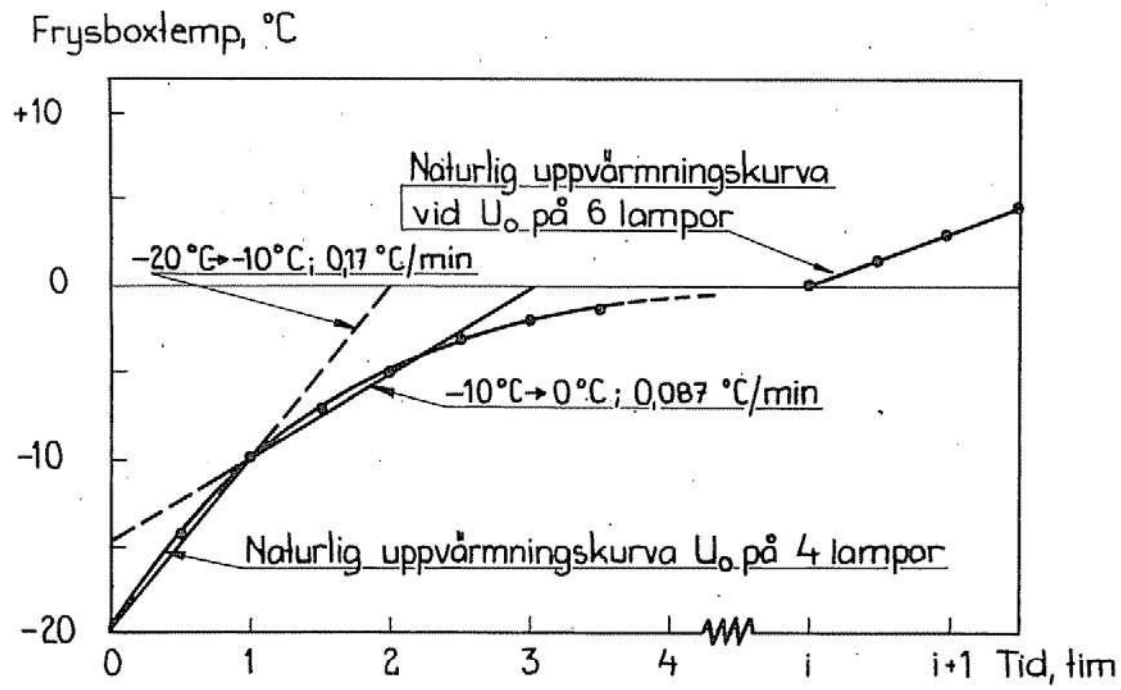


FIG 42 Uppvärmningskurvor hos kalorimeterfrysbox vid spänning U_o på 4 eller 6 lampor. *Natural heating curves of calorimeter freezing box at voltage U_o on 4 or 6 lamps.*

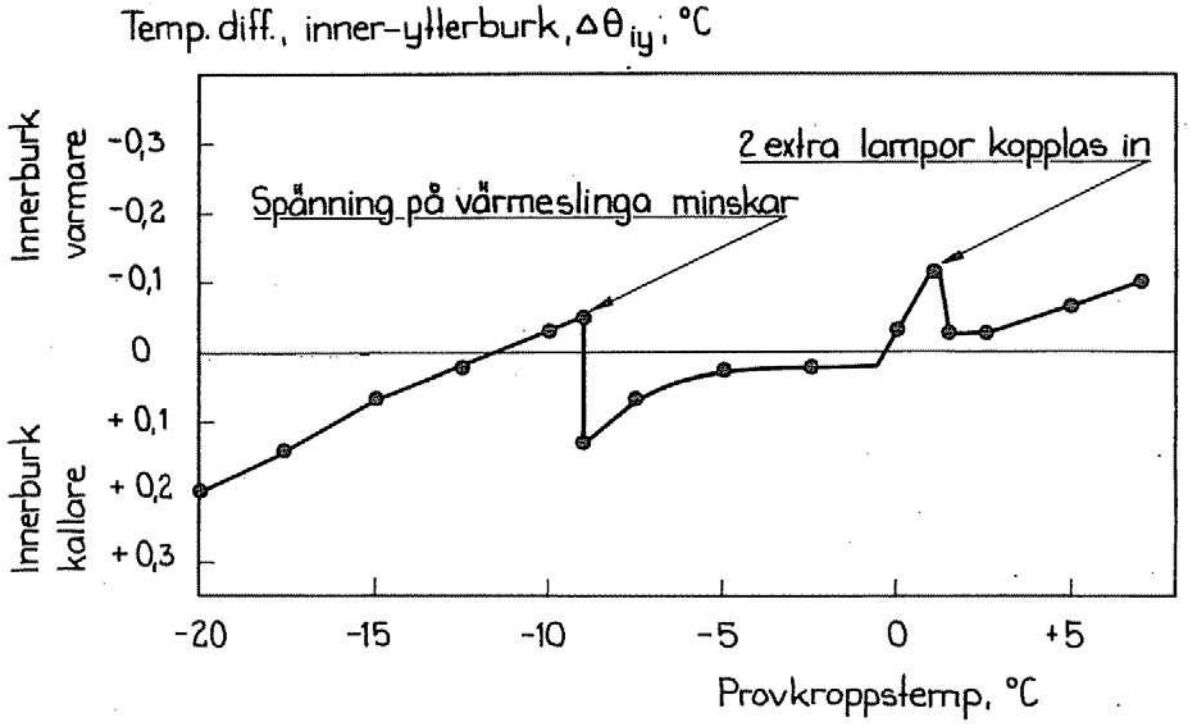


FIG 43 Exempel på felregleringskurva under ett kalorimeterförsök. *Example on deviations from adiabatic conditions during a calorimeter experiment.*

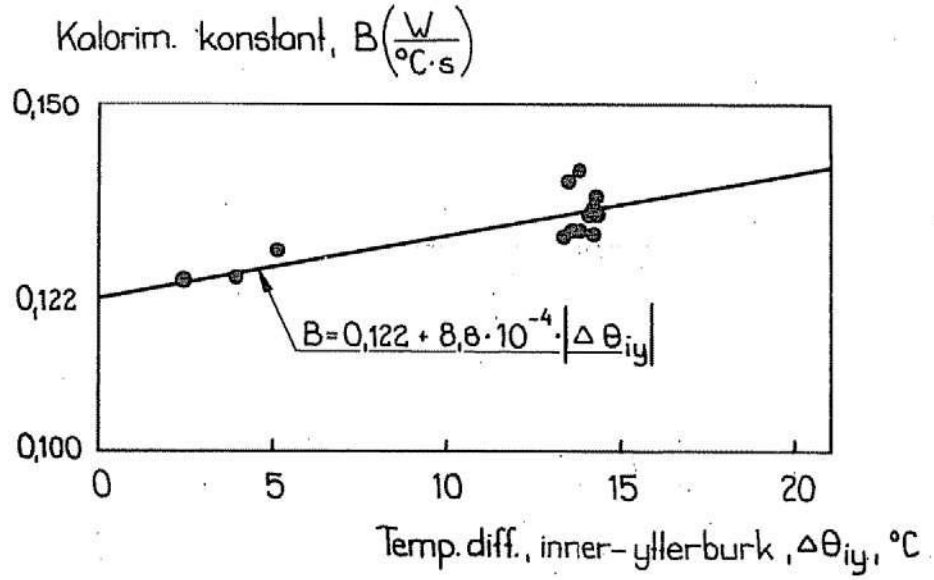


FIG 44 Bestämning av kalorimeterkonstanten. *Determination of calorimeter constant.*

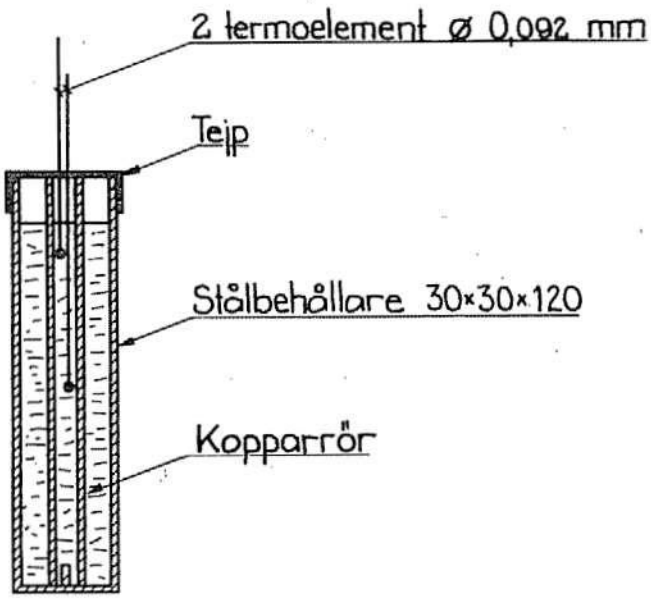


FIG 45 Behållare för kalibreringsförsök med rent vatten. *Container for calibration experiment with pure water.*

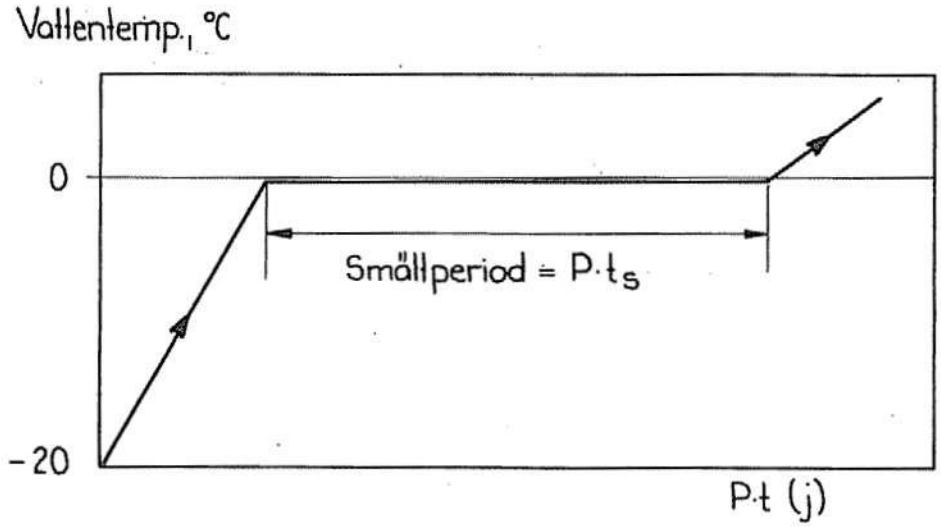
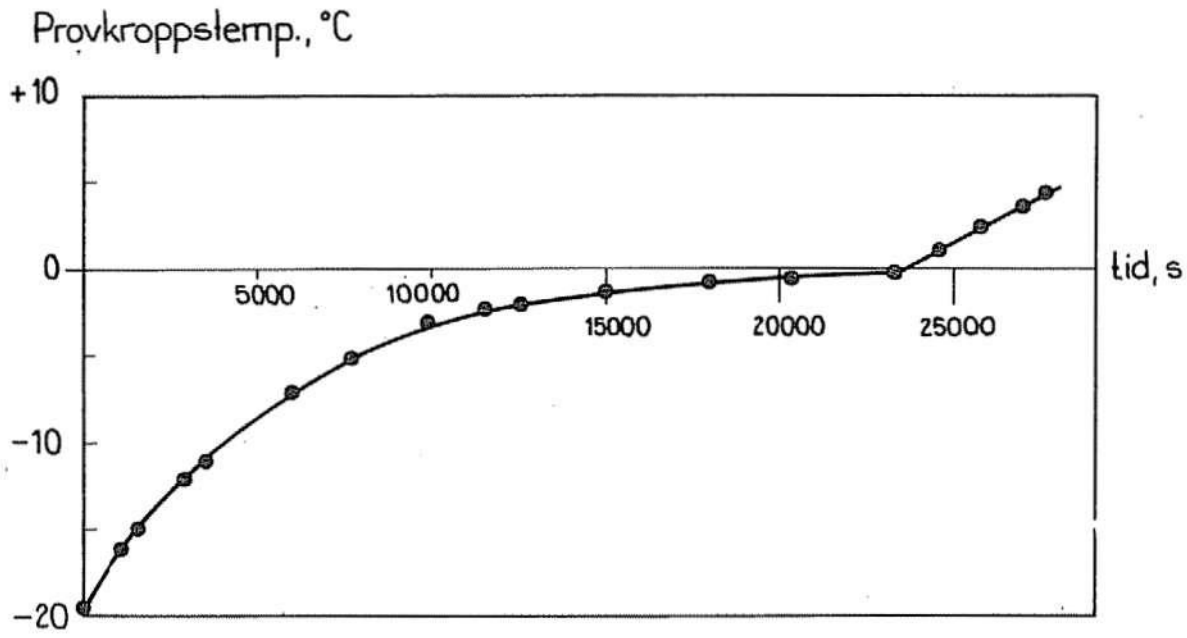
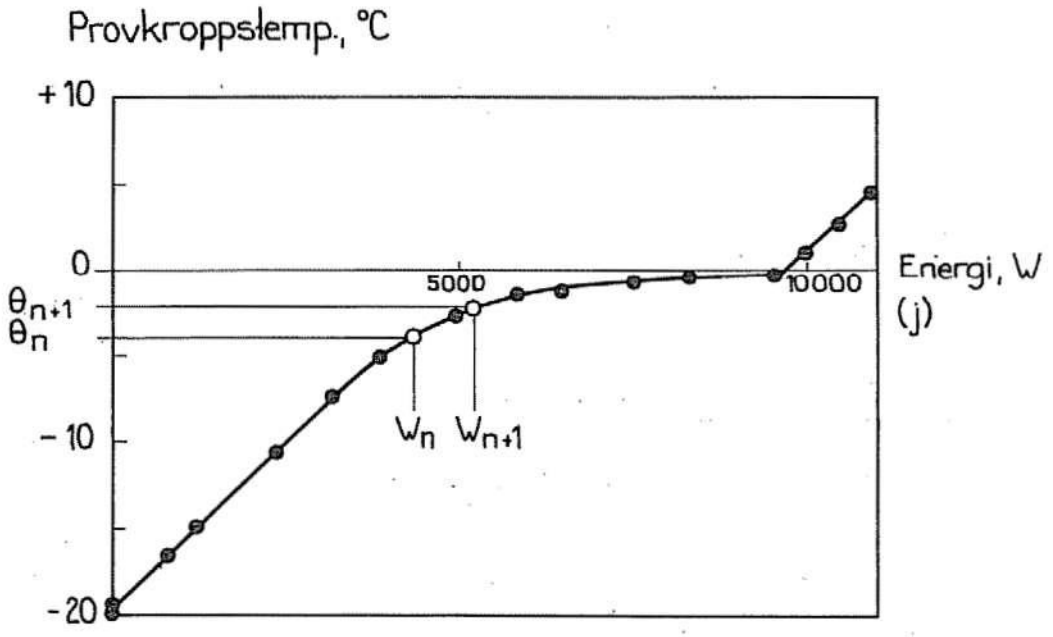


FIG 46 Uppvärmningskurva för rent vatten. *Heating curve for pure water.*



a) Temp – tidskurva



b) Temp.-energikurva

FIG 47 Exempel på kalorimeterförsök med kalksandsten. *Example of a calorimeter experiment with sand lime brick.*

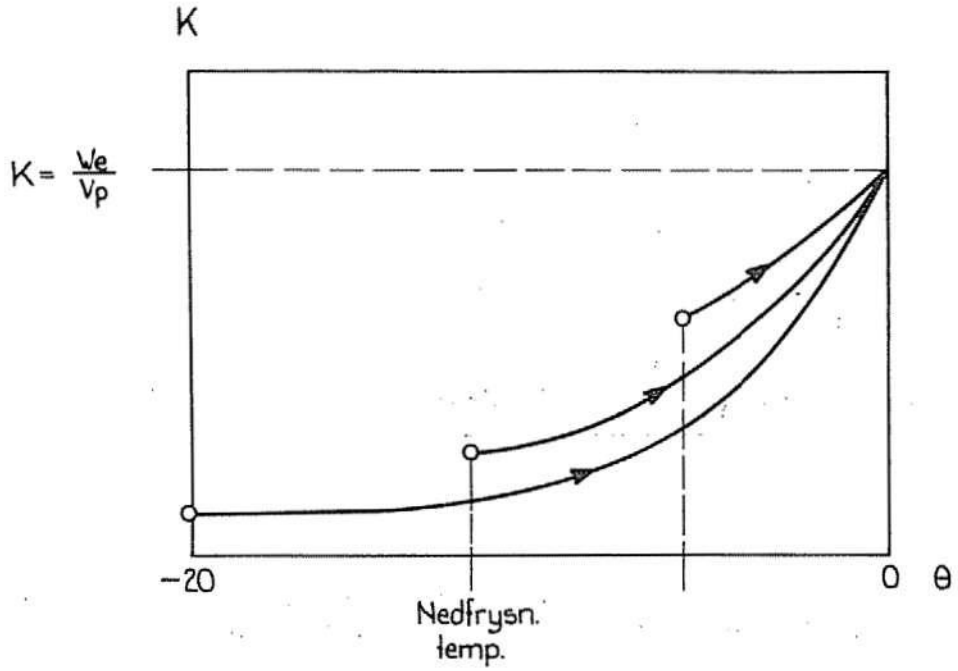


FIG 48 Principiell inverkan av nedfrysningstemperaturen på icke frysbar vattenmängd. *Influence of freezing-temperature on non-freezable water content.*

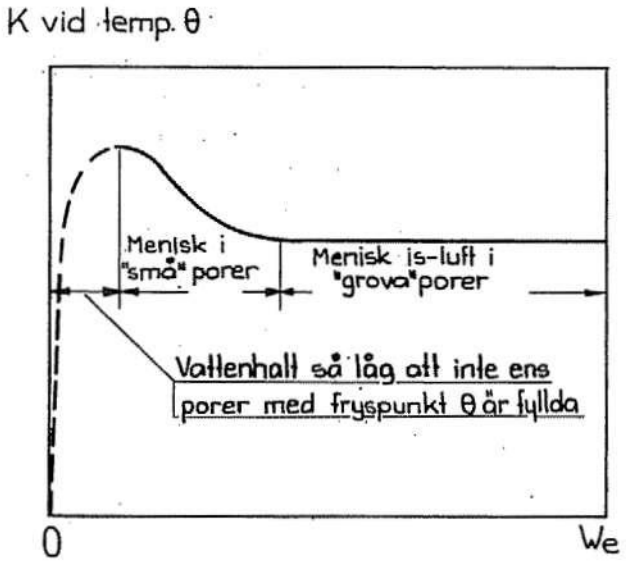


FIG 49 Principiell inverkan av vattenhalt på icke frysbar vattenmängd vid en viss temperatur. *Influence of water content on non-freezable water content.*

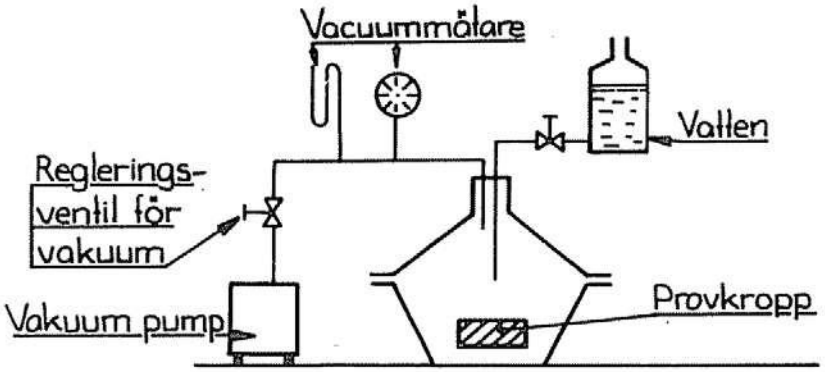


FIG 50 Apparatur för anpassning av provkroppar till rätt vattenhalt. *Apparatus for adaptation of specimens to proper water content.*

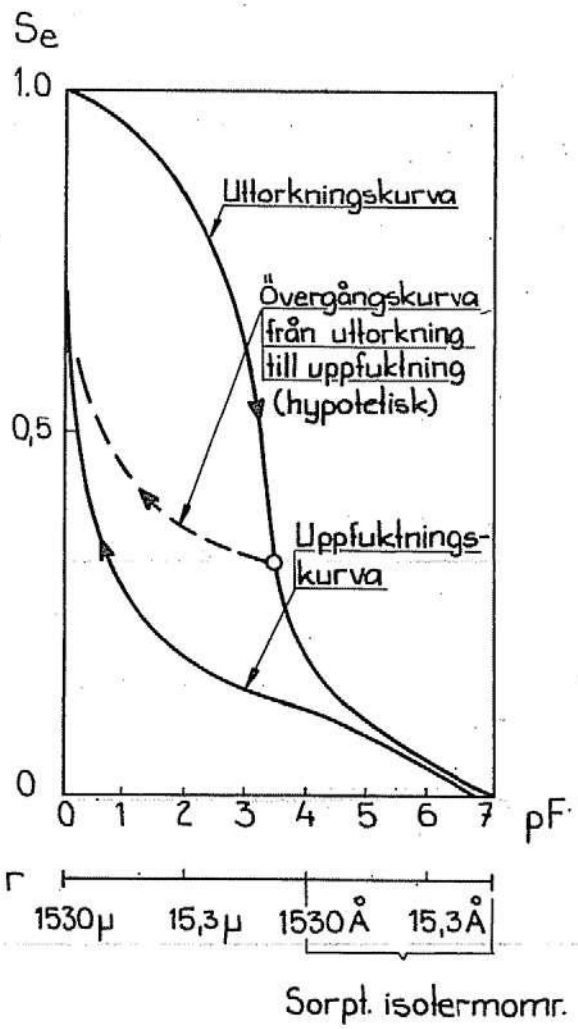


FIG 51 Jämviktsfuktkurvor för gran. Penner /1965/. *Suction curves for spruce.*

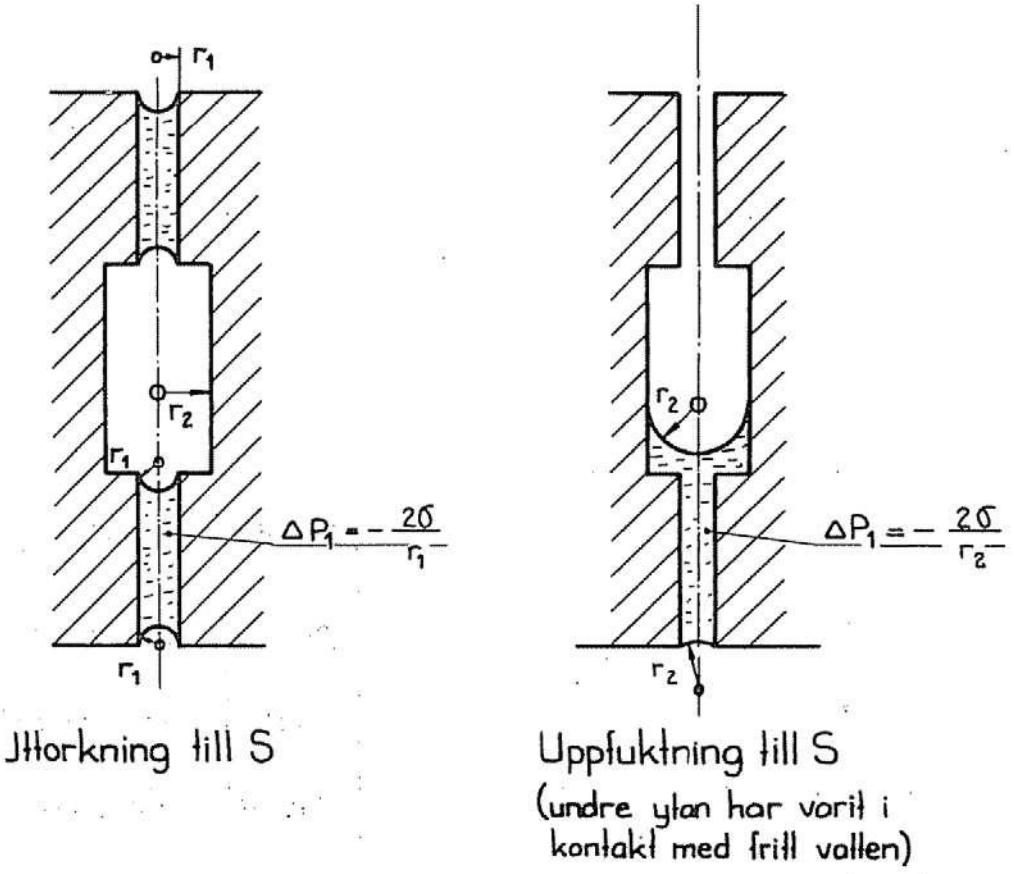


FIG 52 Modellpor. Olika porvattentryck vid samma vattenmättnadsgrad. *Model pore. Different pore-water pressures at same water content.*

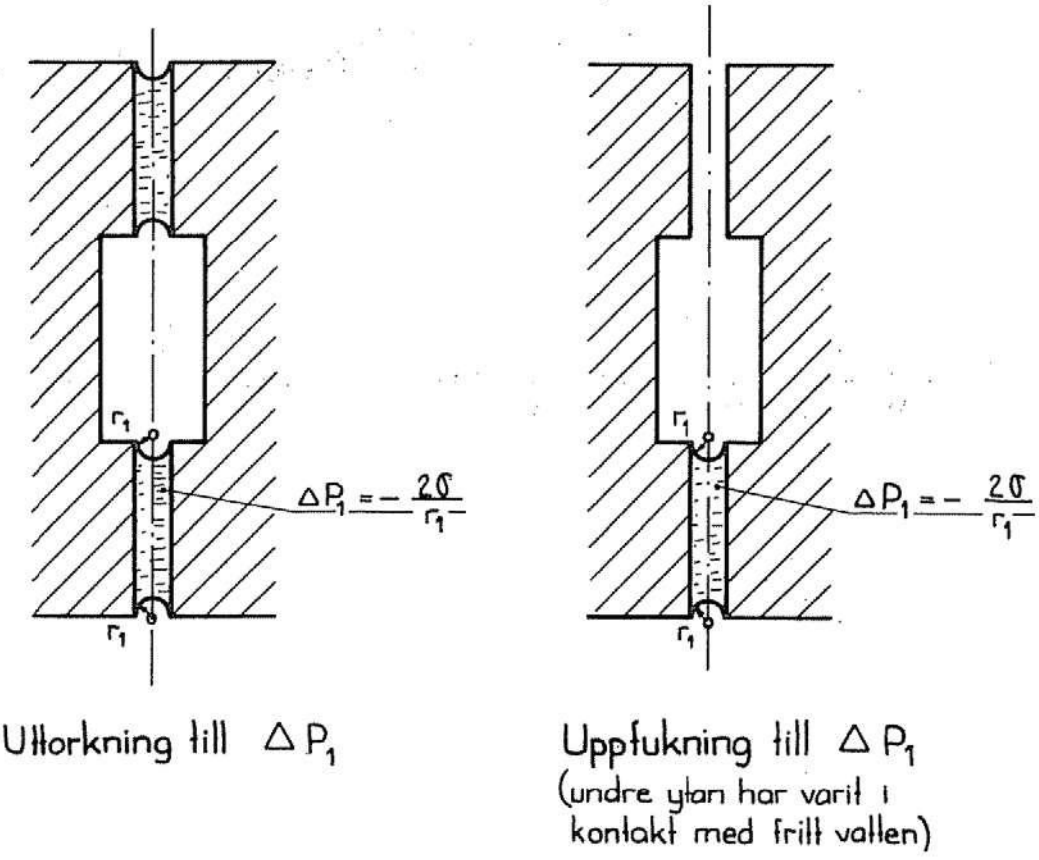


FIG 53 Modellpor. Olika vattenmättnadsgrad vid samma porvattentryck. *Model pore. Different water contents at same pore-water pressure.*

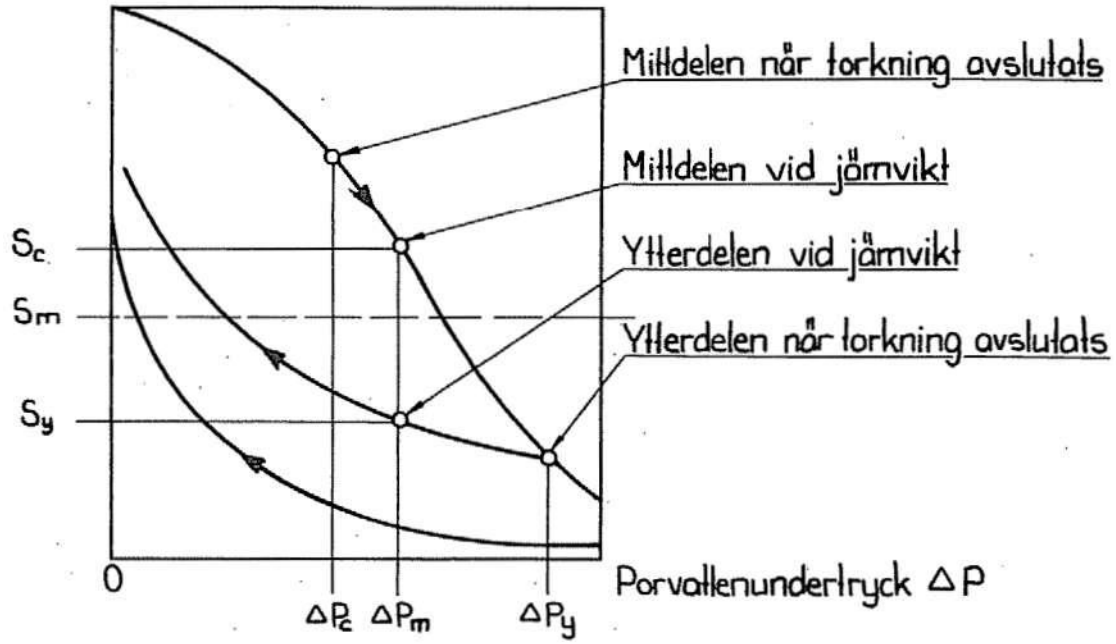


FIG 54 Uppkomst av fuktgradienter vid anpassning genom torkning. *Occurence of moisture gradients at adaptation by drying.*

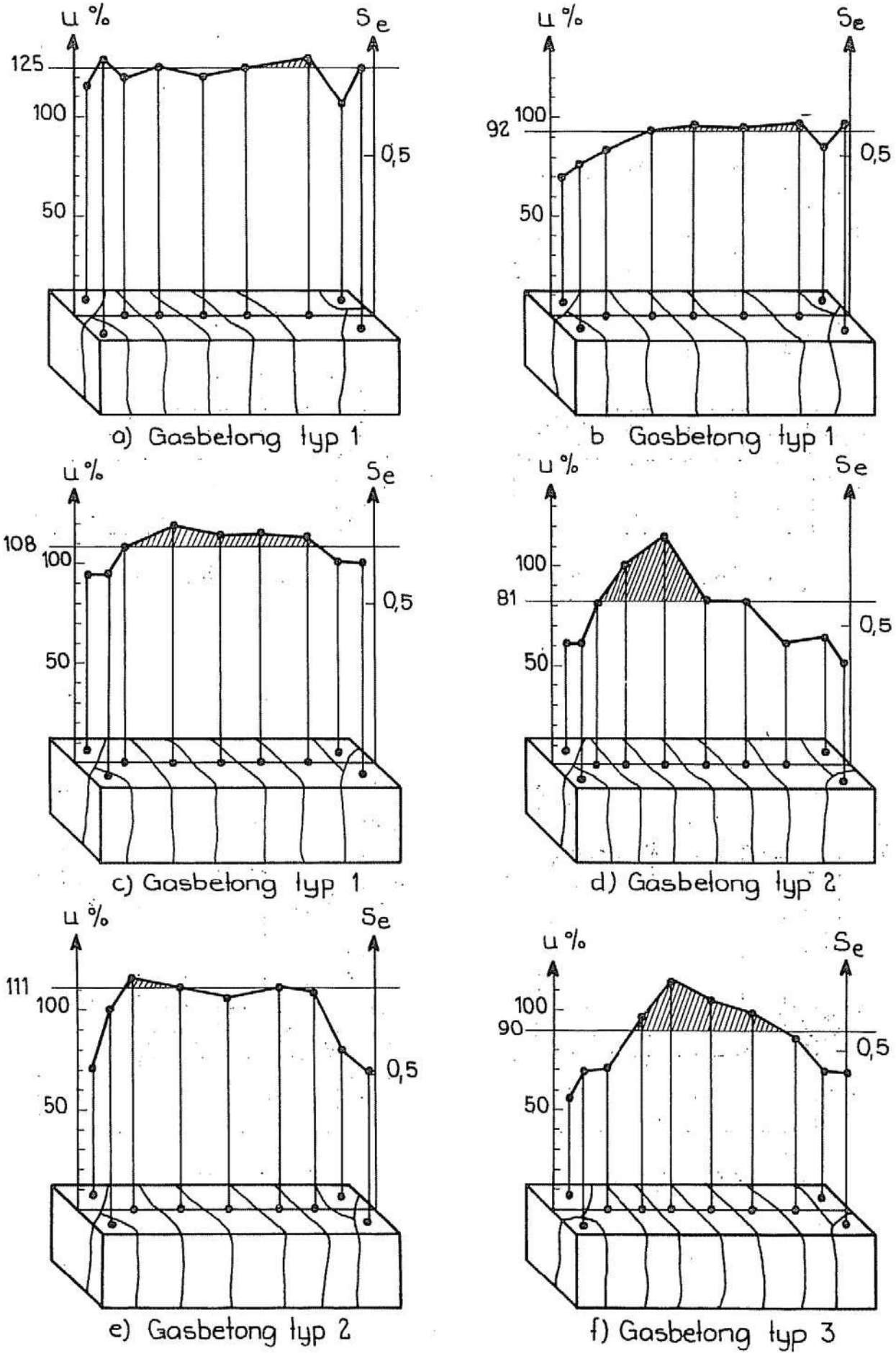
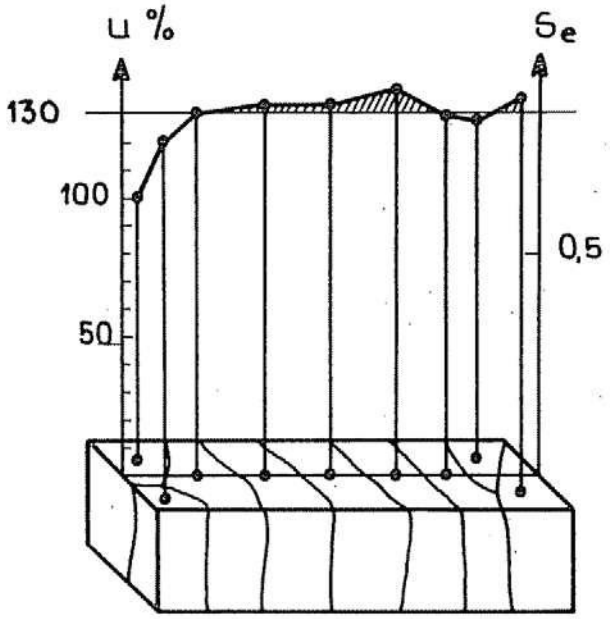
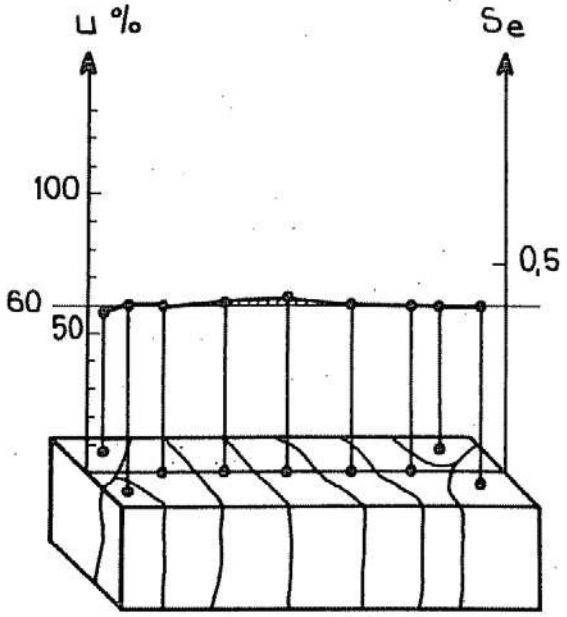


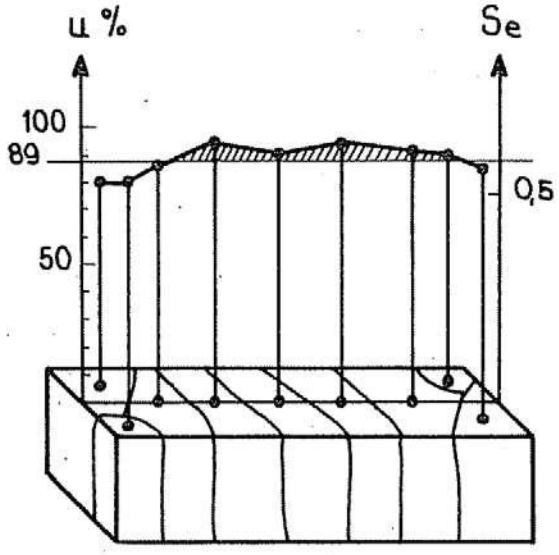
FIG 55 a-k Fuktgradienter före första fryscykeln. *Moisture gradients before first freezing cycle.*



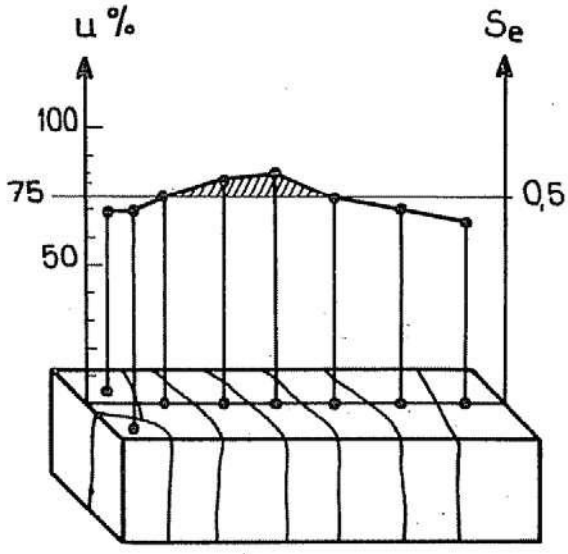
g) Gasbetong typ 3



h) Gasbetong typ 4



j) Gasbetong typ 4



k) Gasbetong typ 4

FIG 55 Forts. *Contnd.*

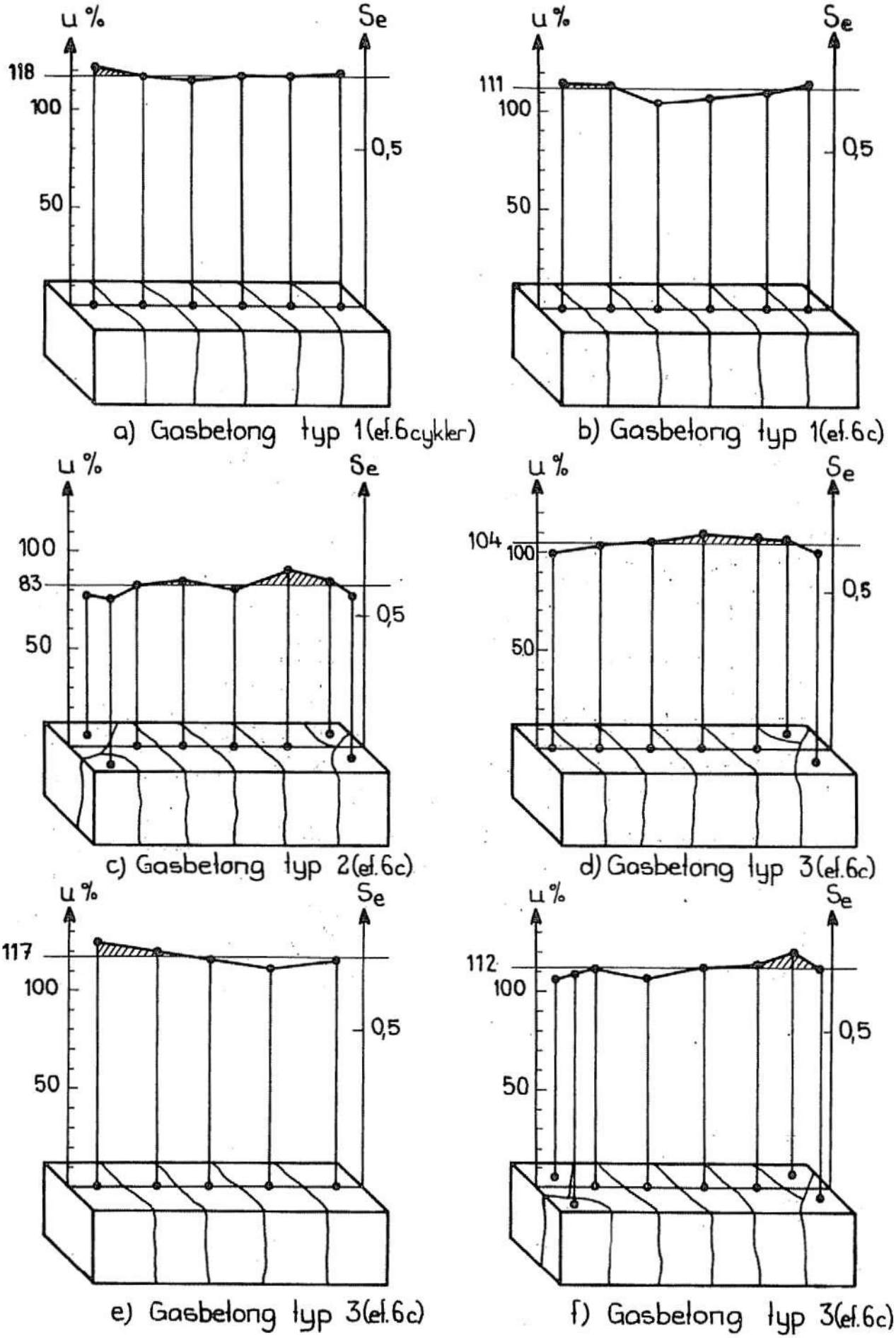
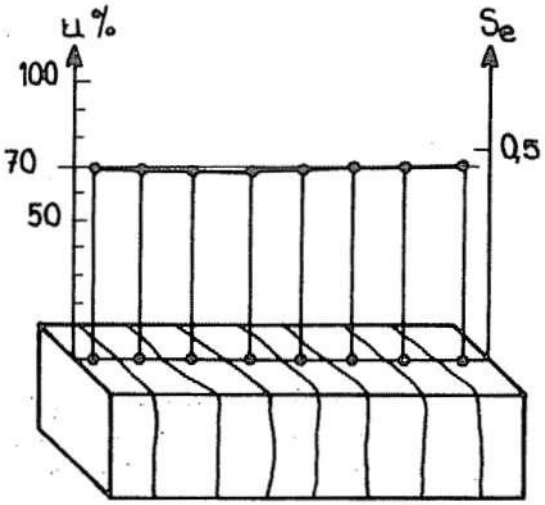
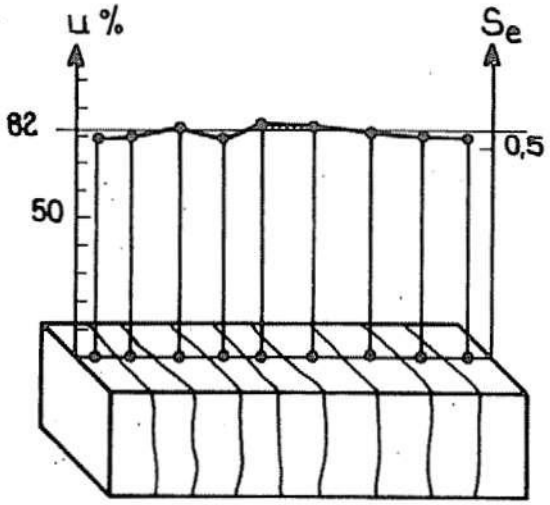


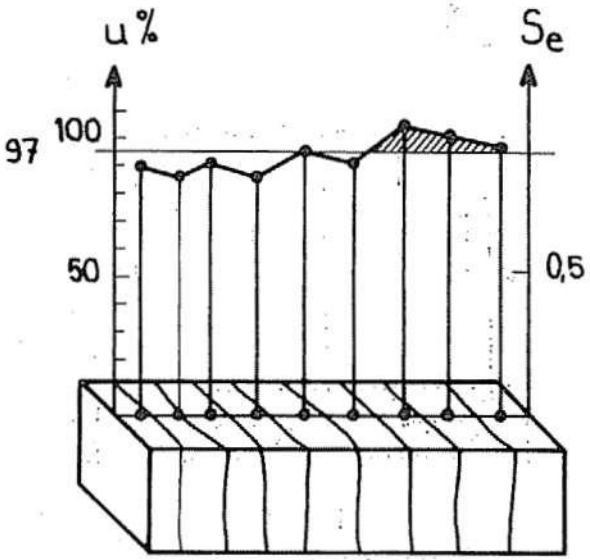
FIG 56 a-x Fuktgradienter efter ett antal fryscykler. *Moisture gradients after some freezing cycles.*



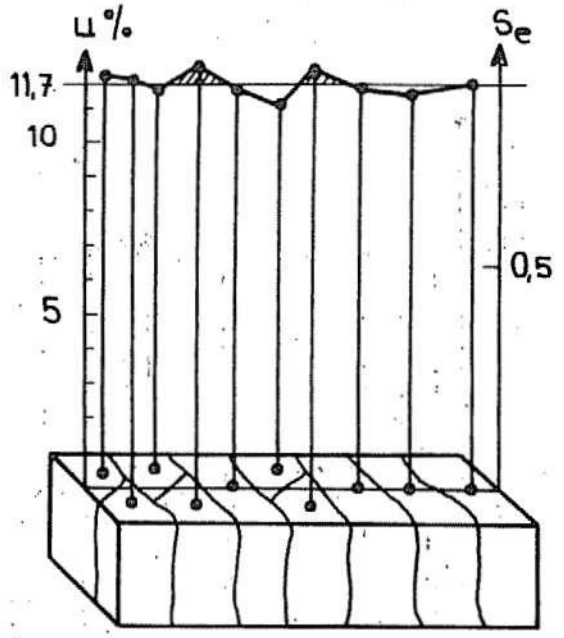
g) Gasbetong typ 4 (ef. 13 cykler)



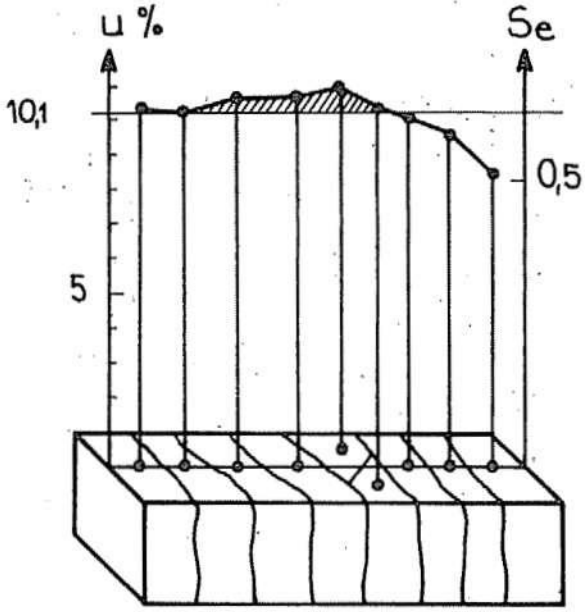
h) Gasbetong typ 4 (ef. 13 c.)



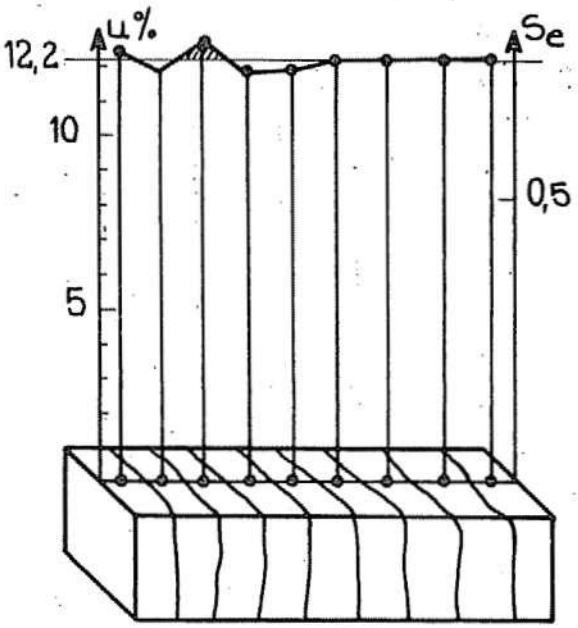
j) Gasbetong typ 4 (ef. 13 c.)



k) Hårdbränt tegel (ef. 42 c.)



l) Hårdbränt tegel (ef. 68 c.)



m) Hårdbränt tegel (ef. 68 c.)

FIG 56 Forts. *Contnd.*

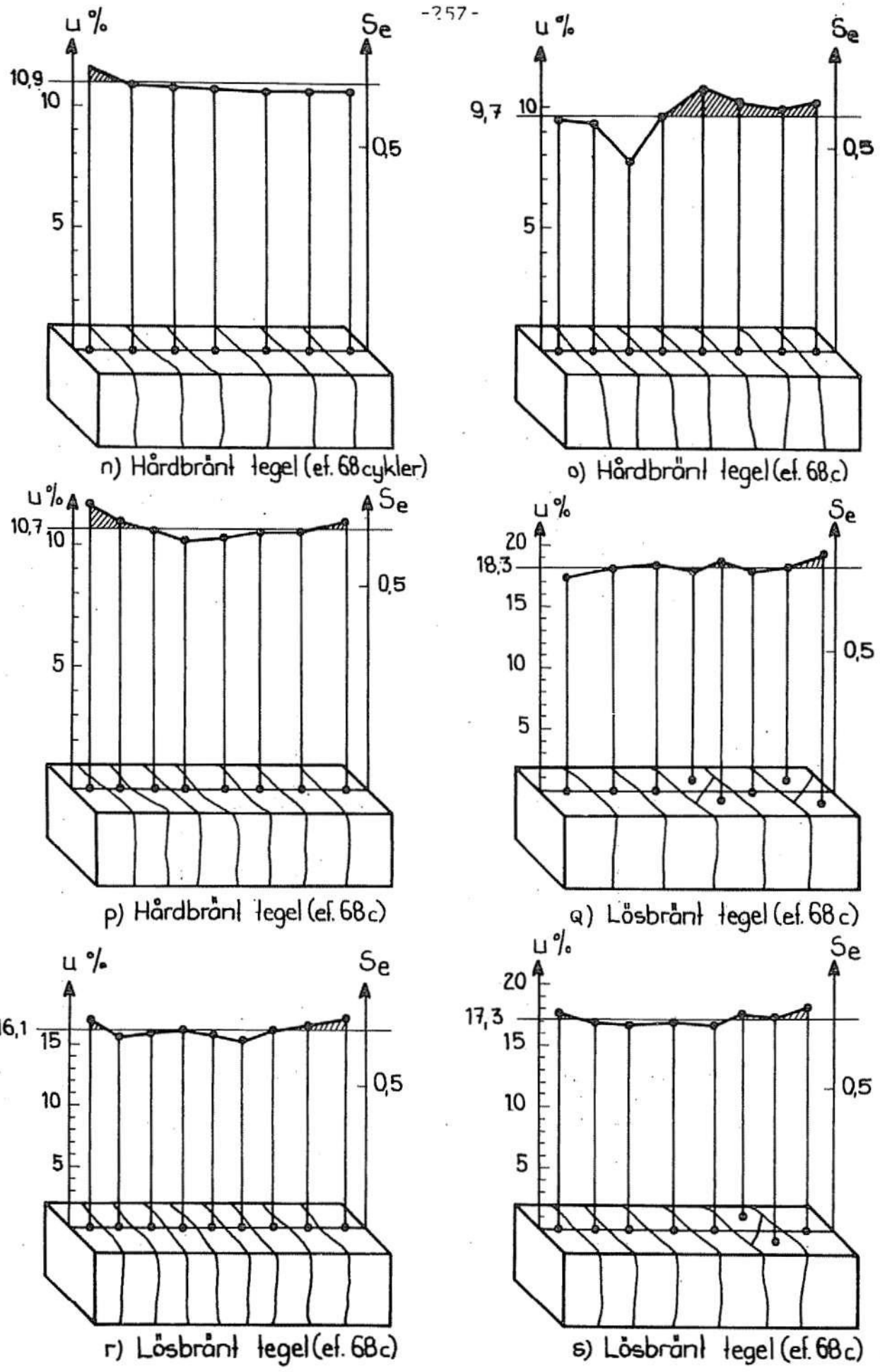
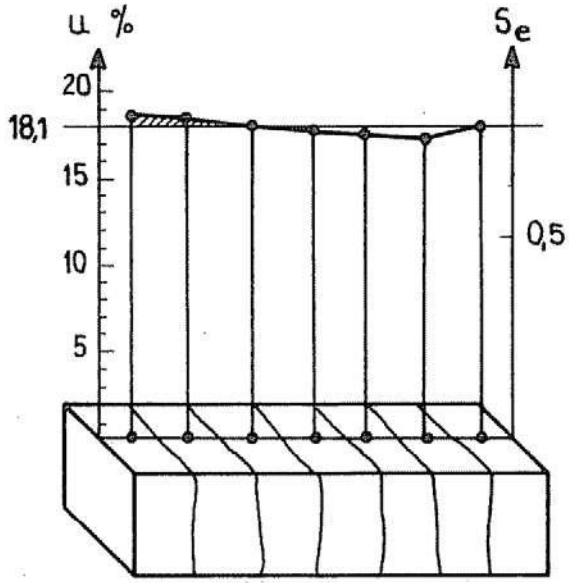
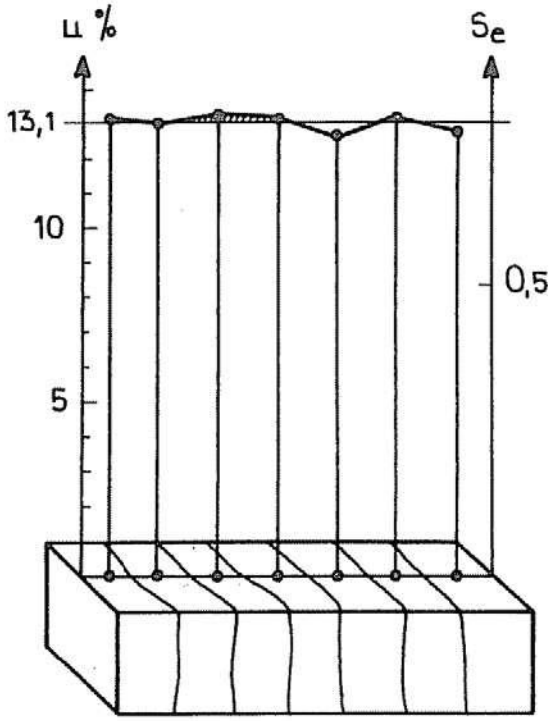


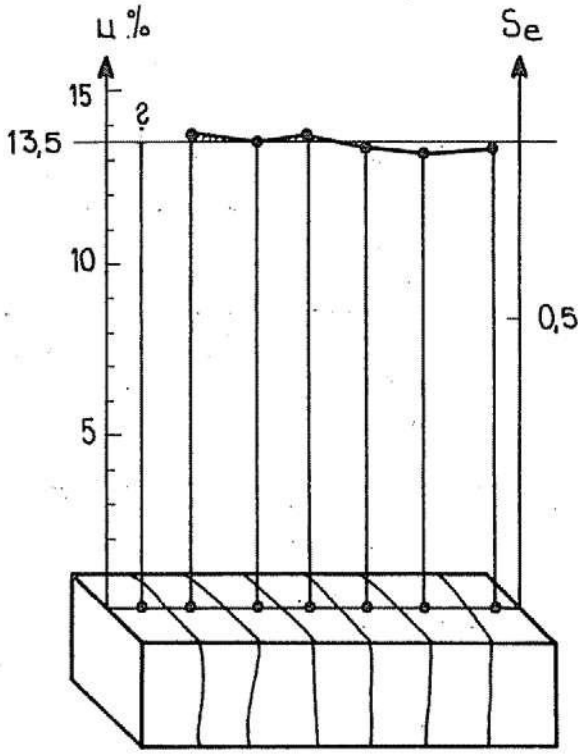
FIG 56 Forts. *Contnd.*



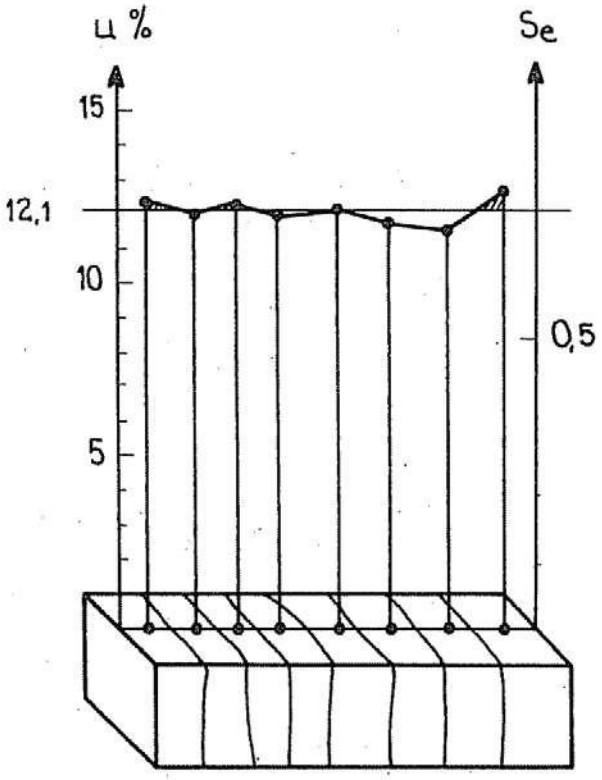
t) Lösbränt tegel (ef. 68 cykler)



u) Kalksandsten (ef. 68 c)



v) Kalksandsten (ef. 68 c)



x) Kalksandsten (ef. 68 c)

FIG 56 Forts. *Contnd.*

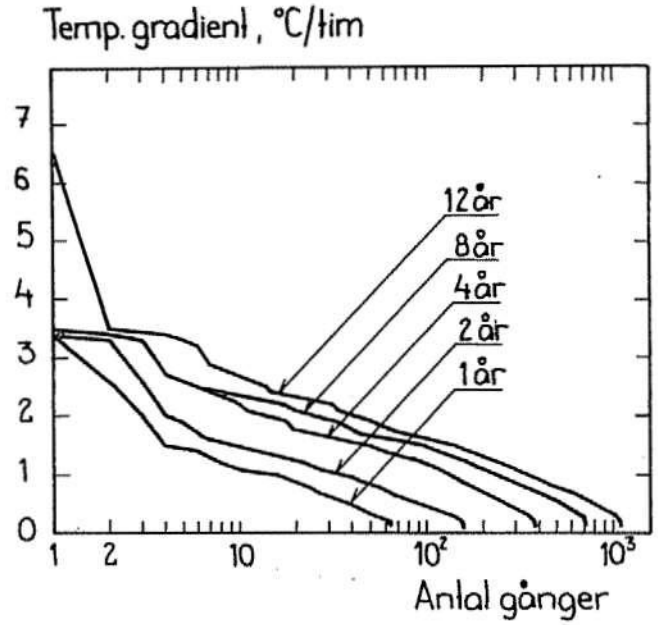
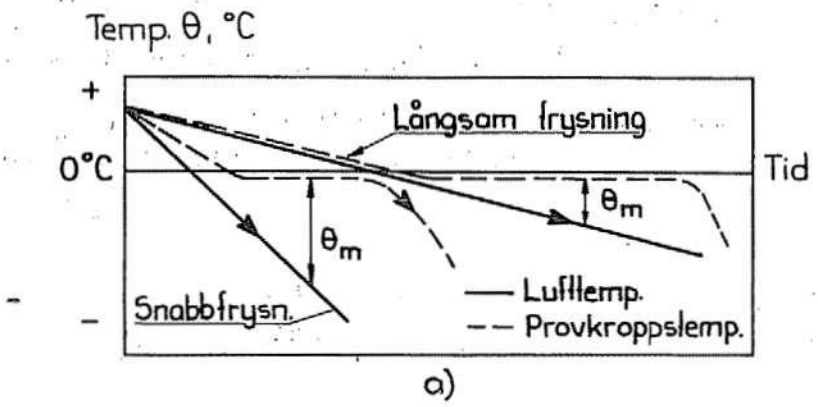


FIG 57 Temperatursänkningshastighet hos ytterluft i Danmark. Plum & Jessing /1965/. *Rate of temperature lowering of air in Denmark.*



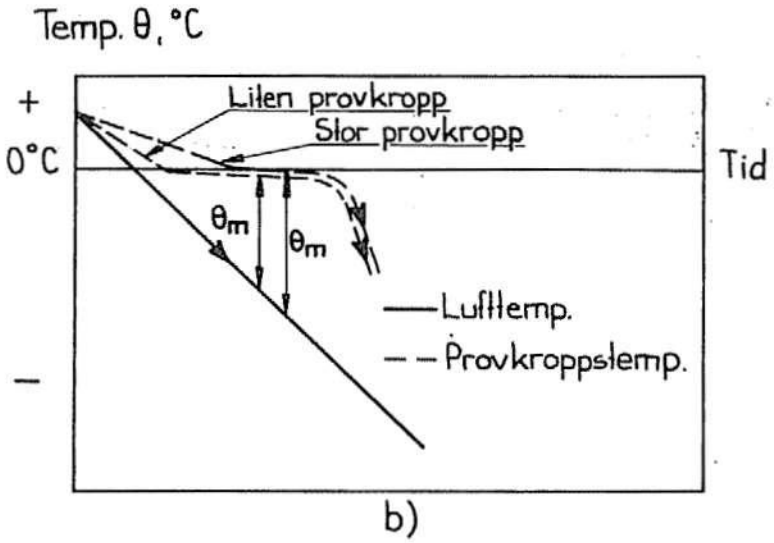


FIG 58 Principiell inverkan av provkroppsstorlek och temperatursänkningshastighet på temperaturdifferens luft-provkroppsyta. *Influence of specimen size and rate of temperature lowering on temperature difference air-specimen.*

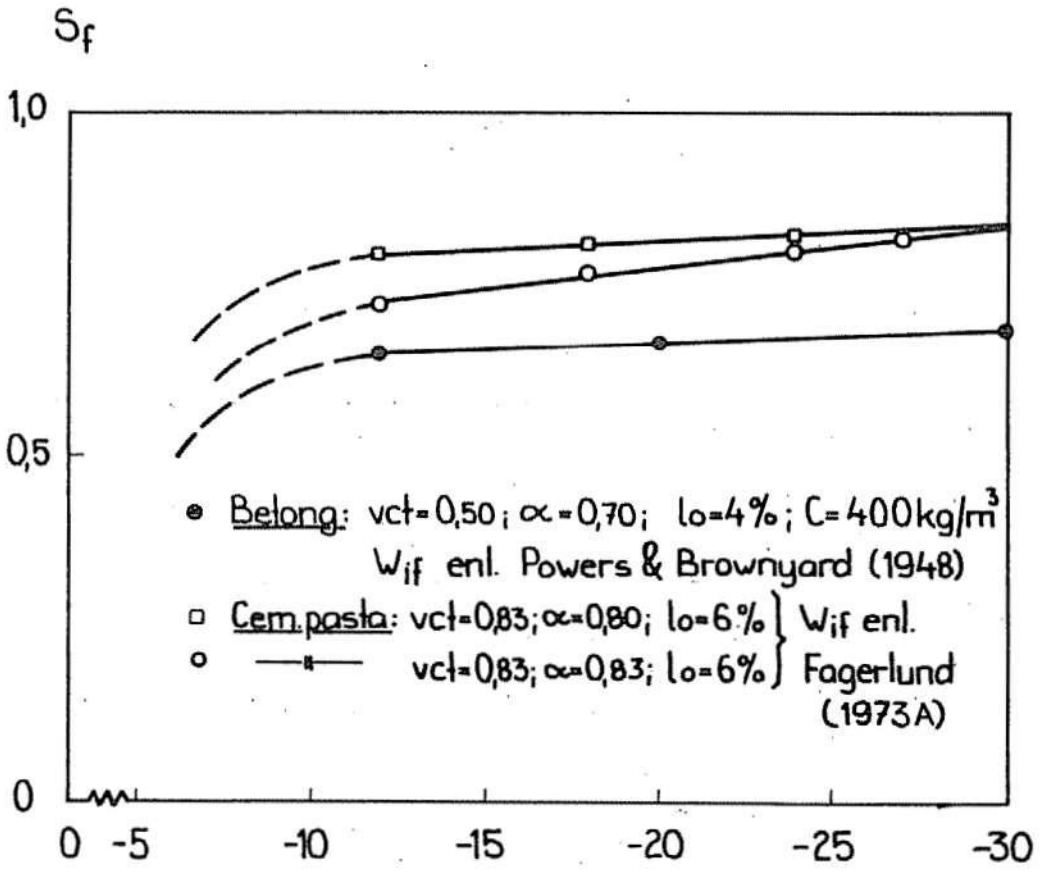


FIG 59 Exempel på inverkan av lägsta frystemperatur på effektiva vattenmättnadsgraden S_f. *Example of influence of lowest temperature on* S_f.

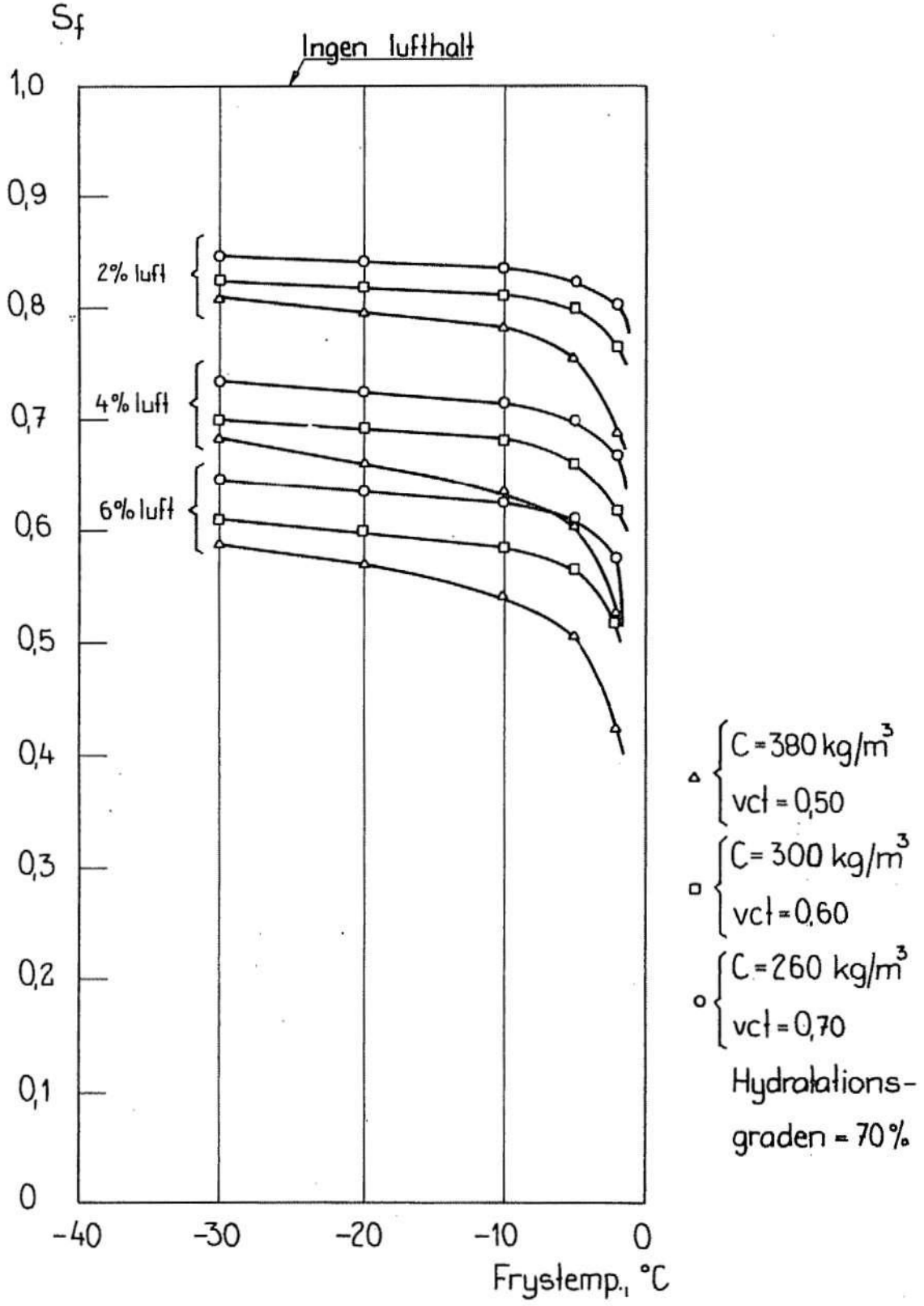
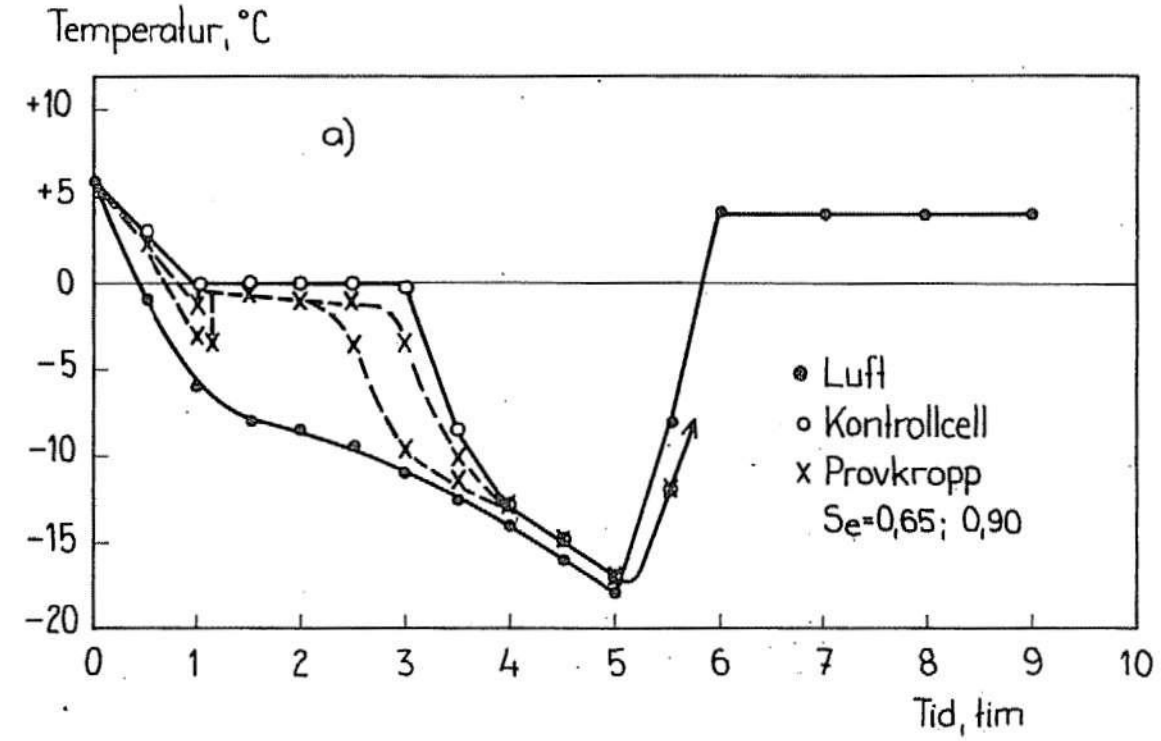


FIG 60 Samband mellan vattenmättnadsgrad och frystemperatur för tre typiska betongblandningar. Alla porer utom luftinblandningsporer antas vara vattenfyllda.
Connection between degree of saturation and freezing temperature for three concrete mixes.



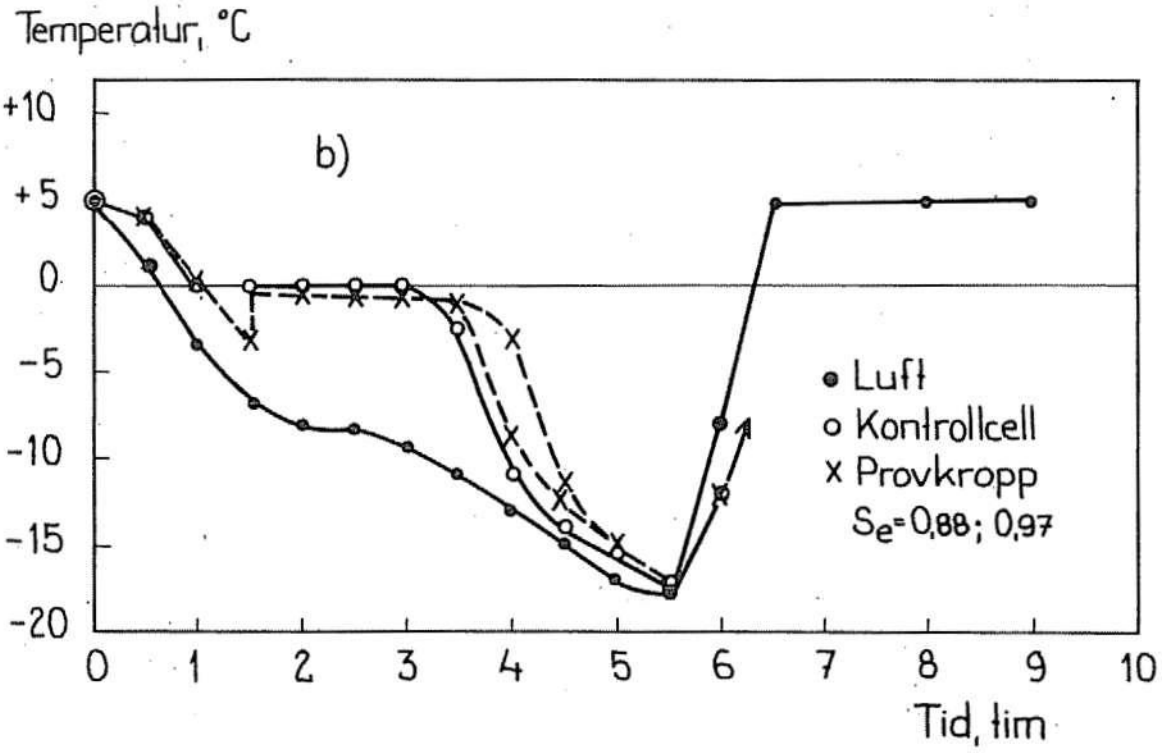
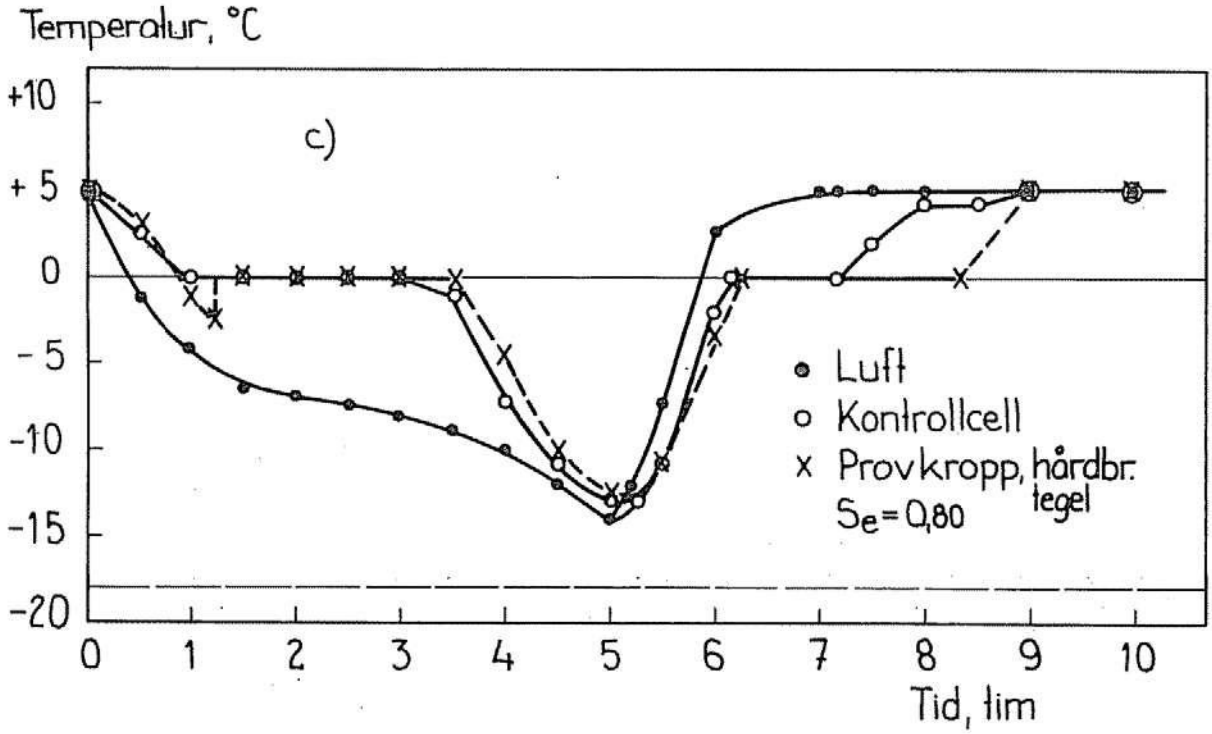


FIG 61 a-d Uppmätta fryscykler. *Measured freezing cycles.*

a Hårbränt tegel 30x30x120 mm (1,3 l frysbart vatten totalt).

b Lösbränt tegel 30x30x120 mm (1,7 l frysbart vatten totalt).



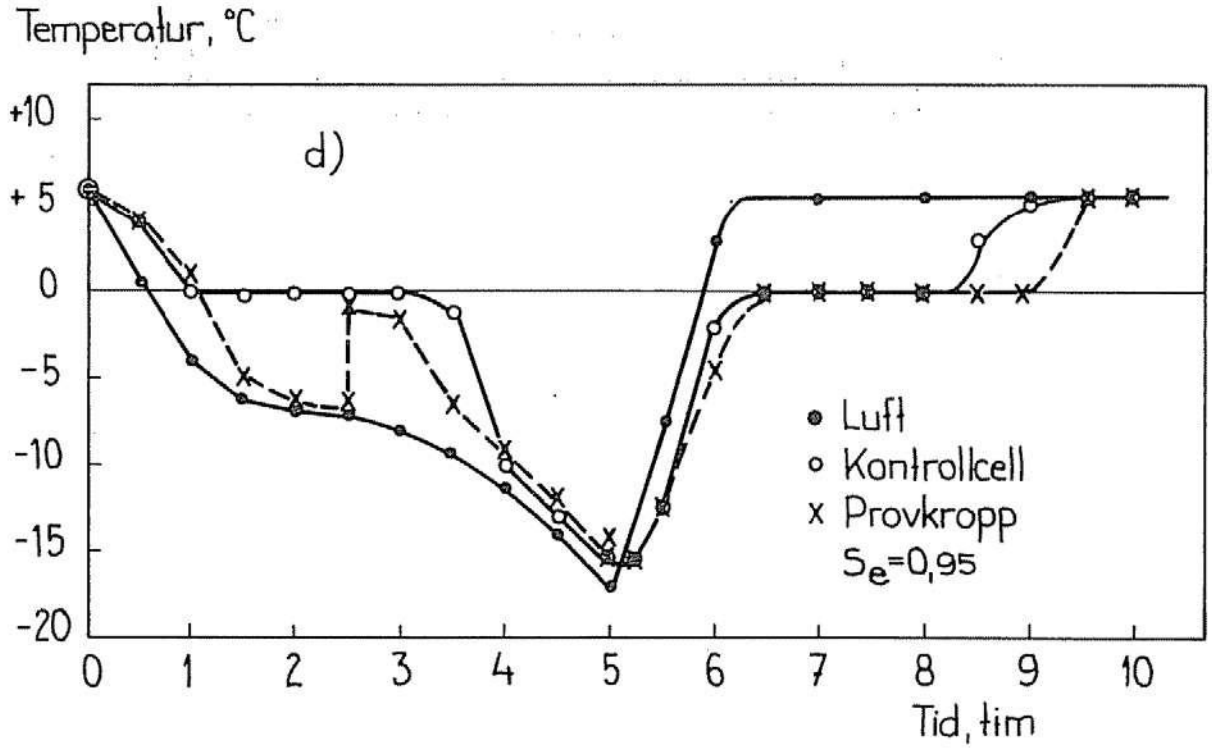


FIG 61 Forts. *Contnd.*

c Lägsta uppmätta fryshastighet. 54 st provkroppar av tegel och kalksandsten 40x40x120 mm (2,7 l frysbart vatten totalt).

d Asbestcement 8x30x100 mm (0,3 l frysbart vatten totalt).

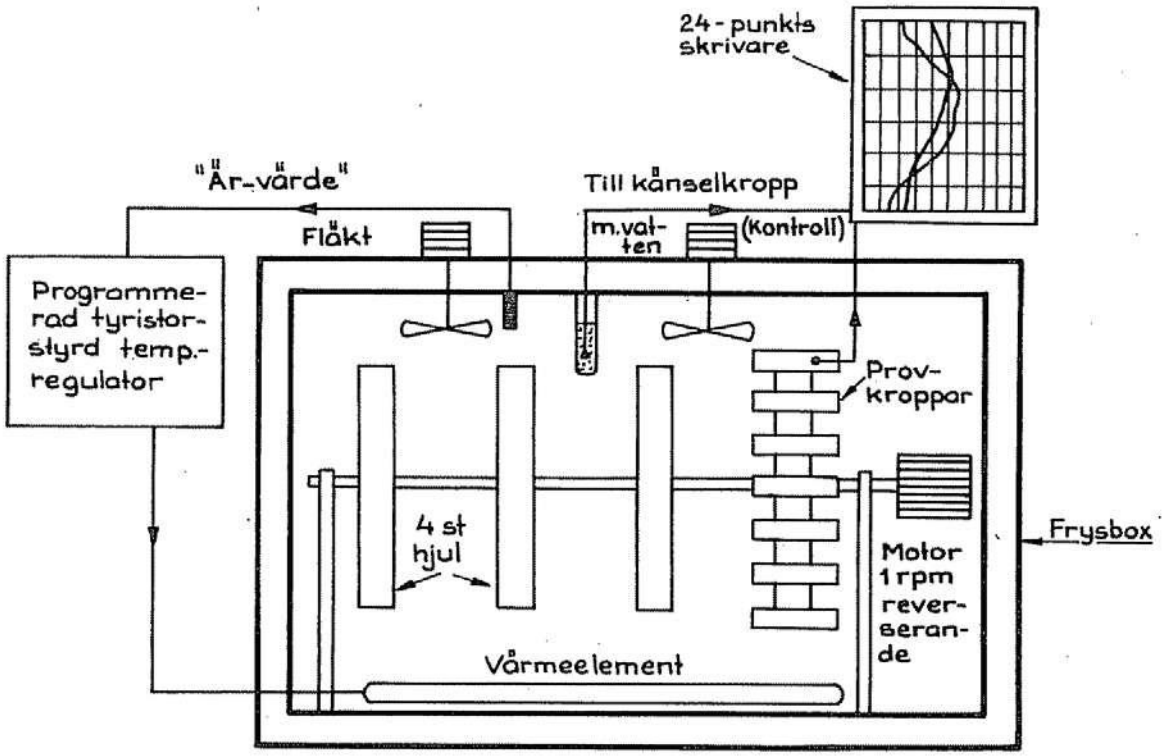


FIG 62 Apparatur för cykliska frysprovningar. Principuppställning. *Apparatus for cyclic freezing tests.*

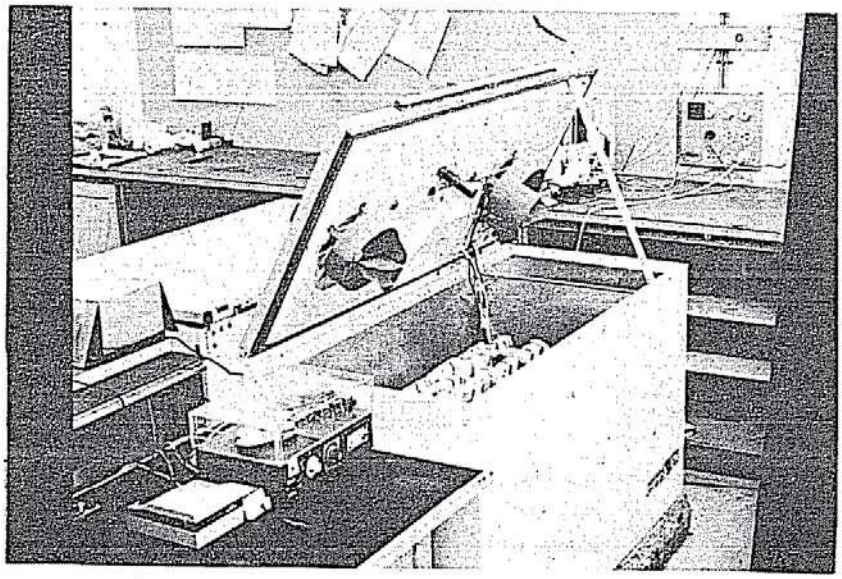


FIG 63 Apparatur för cykliska frysprovningar. *Apparatus for cyclic freezing tests.*

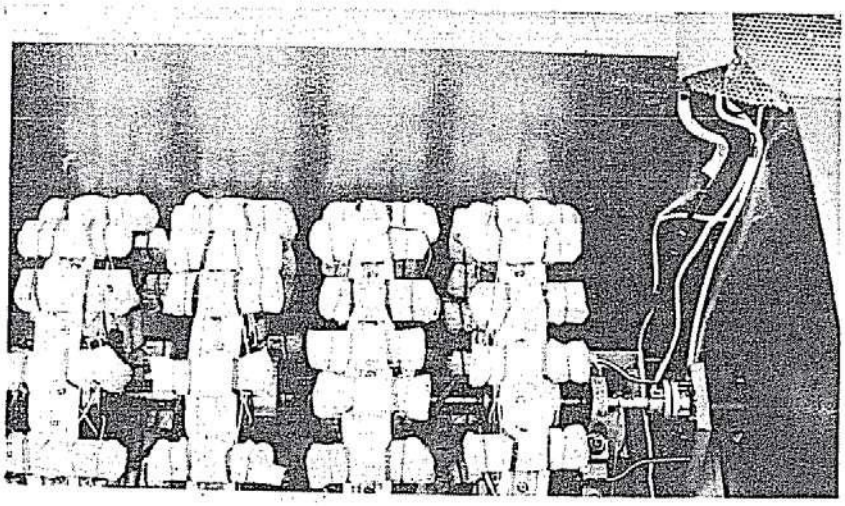


FIG 64 Provkroppsställ. *Mounting of specimens.*

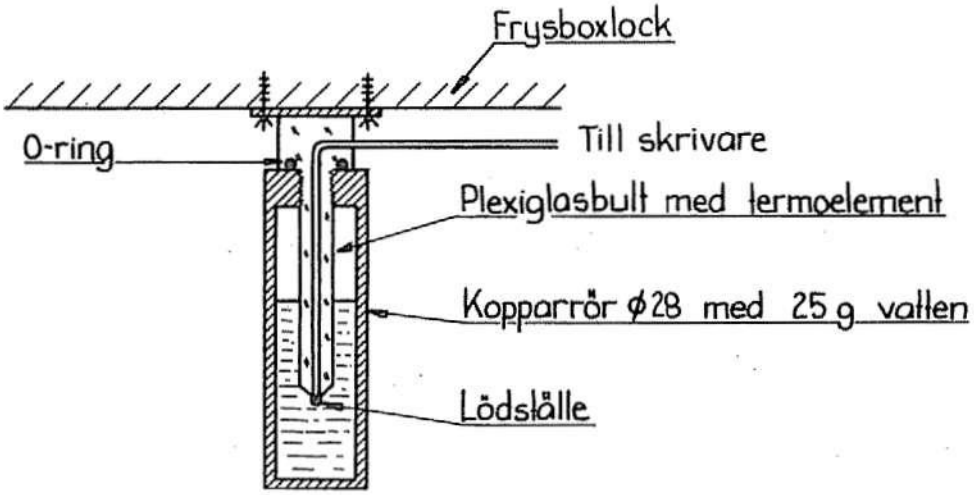


FIG 65 **Kontrollcell, 1:2.** *Controle Cell.*

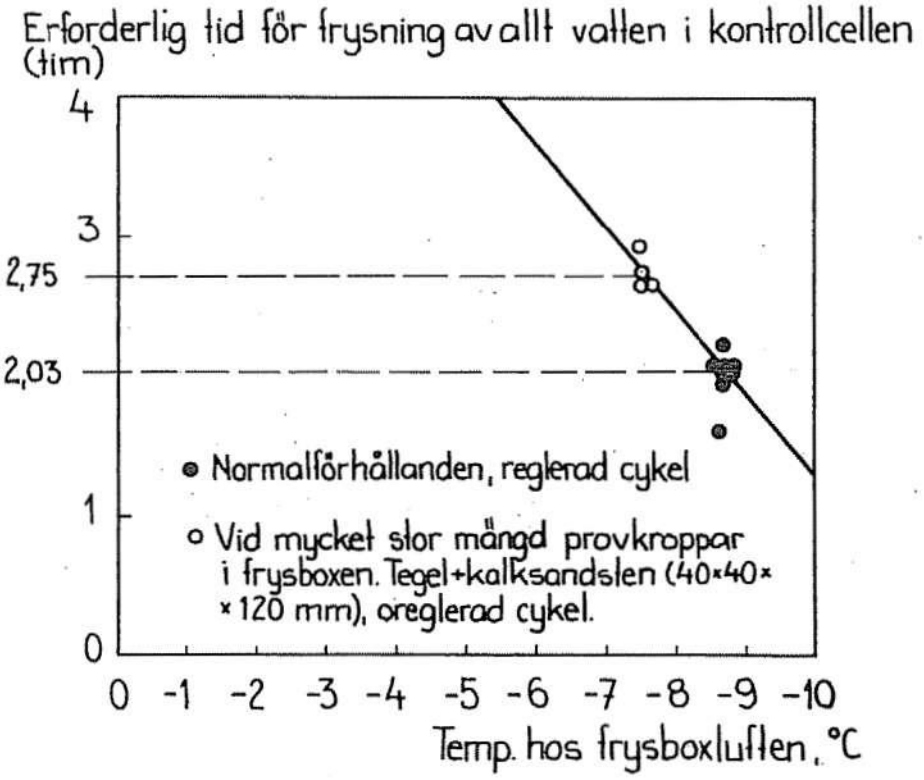


FIG 66 **Samband mellan frysboxtemperatur och tid för frysning av allt vatten i kontrollcellen.** *Connection between box temperature and time for freezing of all water in the cell.*

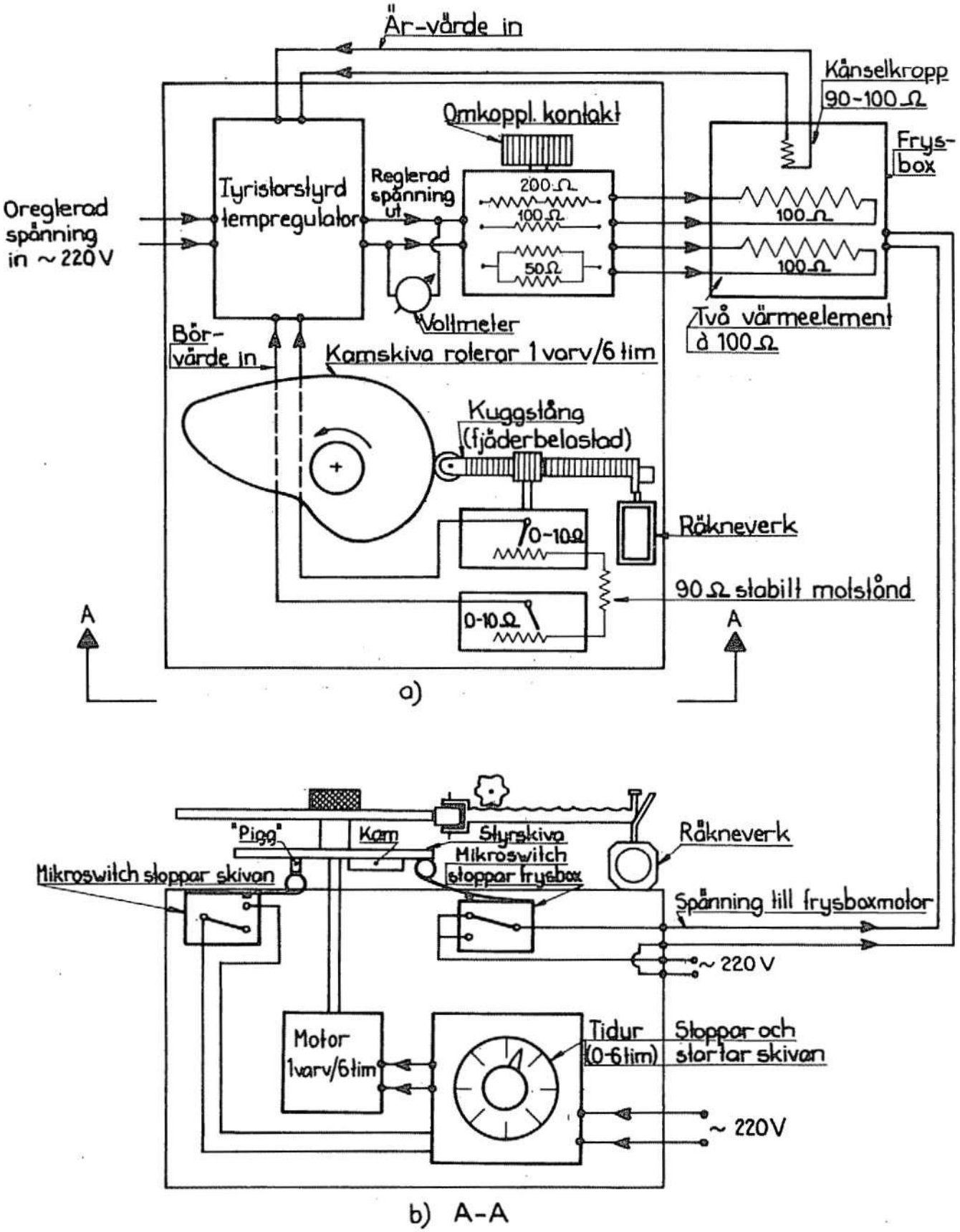


FIG 67 Apparatur för temperaturreglering. *Apparatus for temperature regulation.*

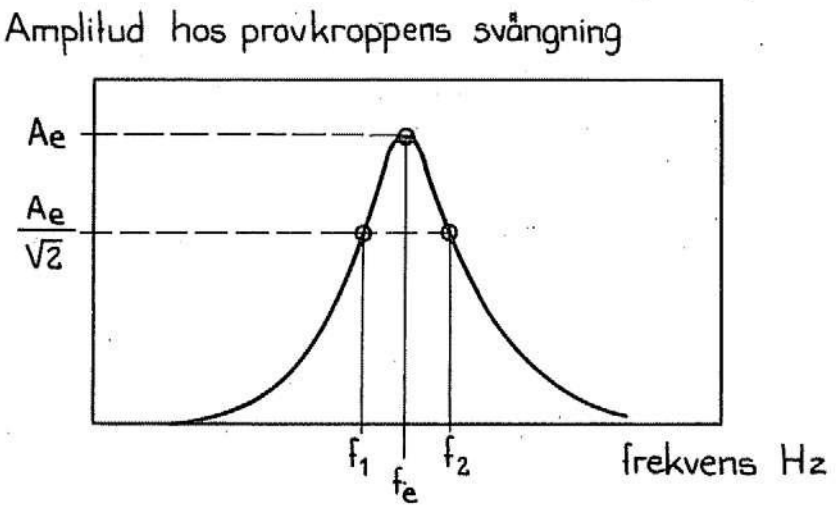


FIG 68 Bestämning av inre friktion. *Determination of internal friction.*

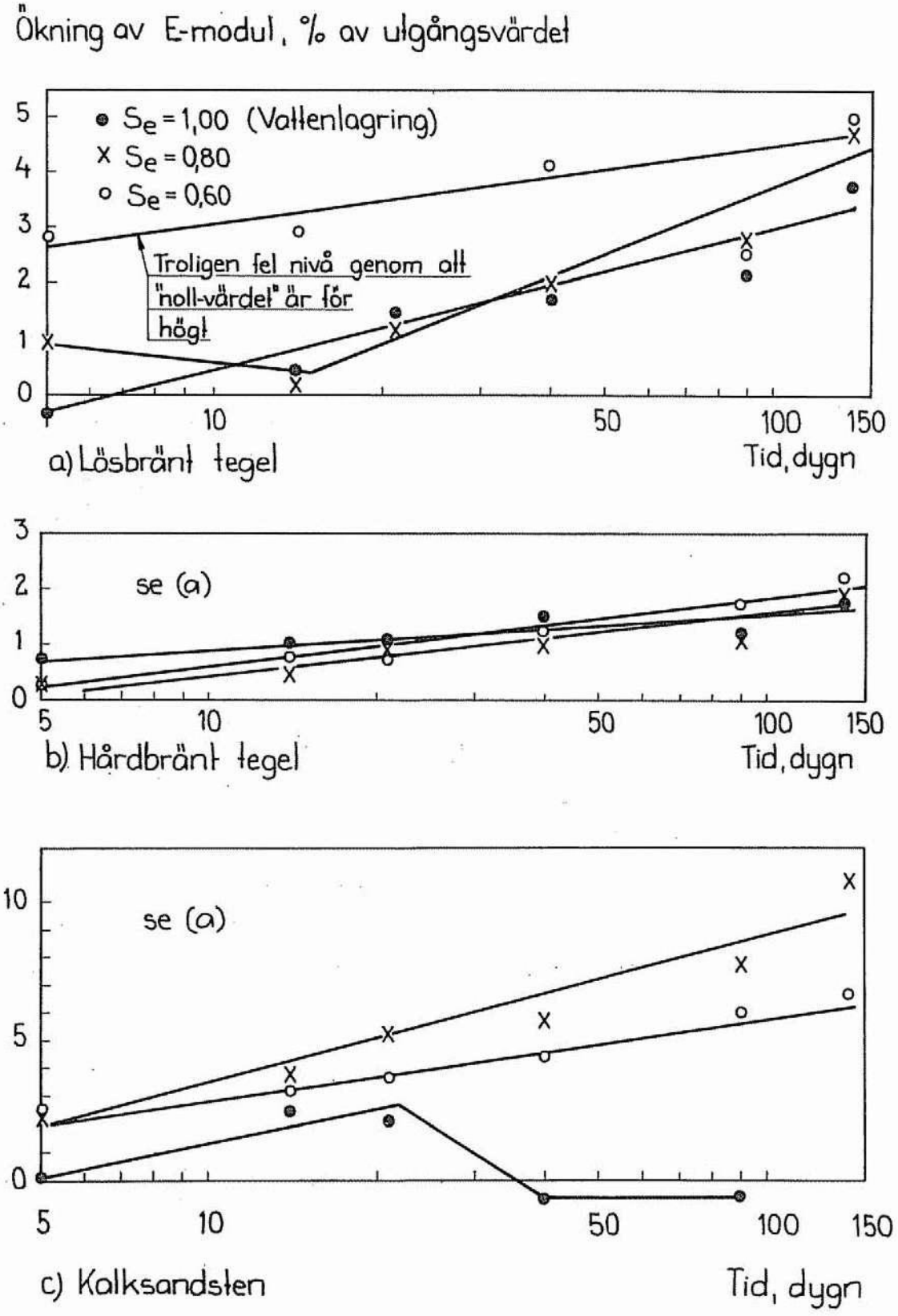


FIG 69 a-k Ökning av dynamisk E-modul vid lagring med vatten i porsystemet.
Increase in dynamic Young's modulus at storage with water in the pore system.

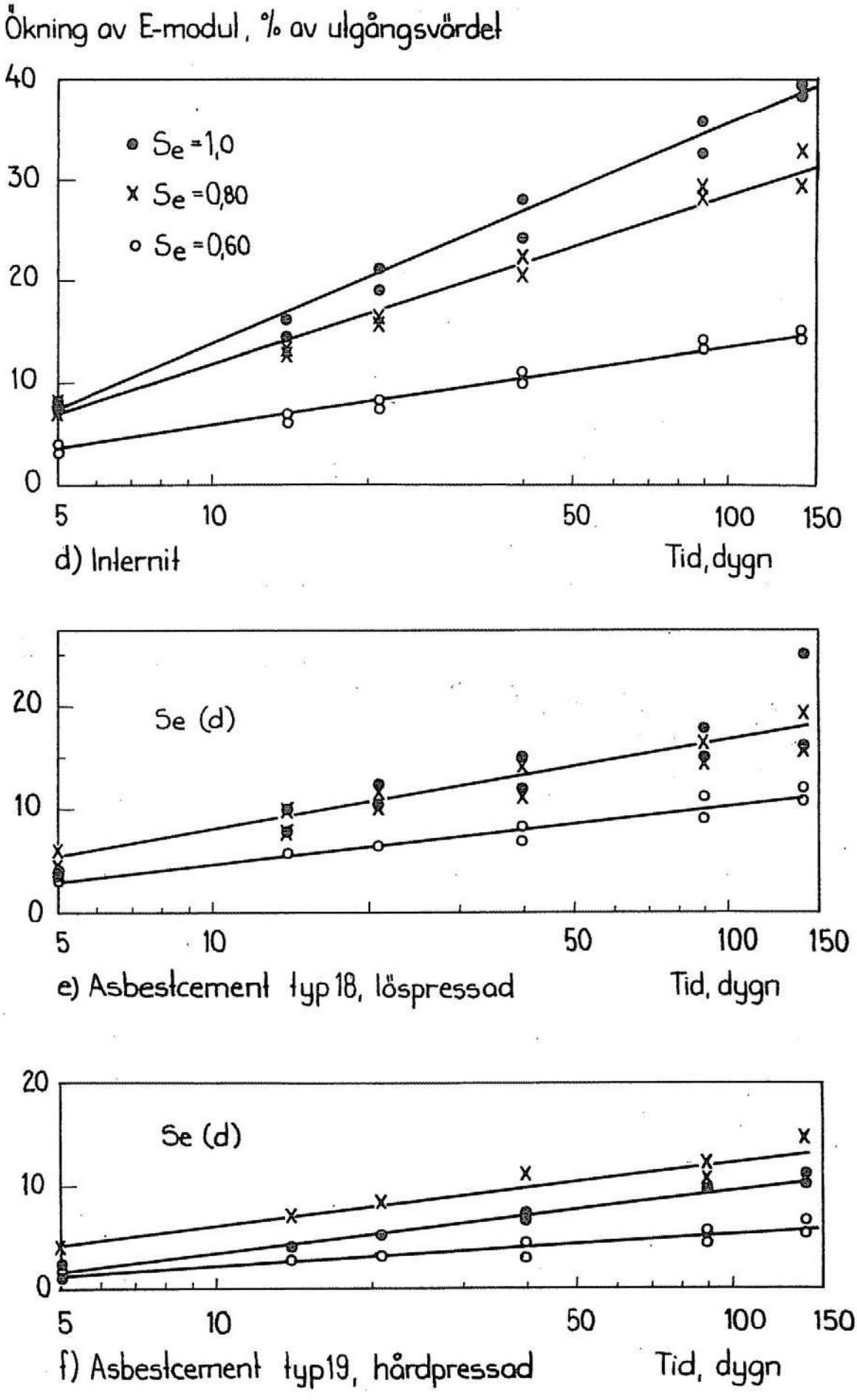
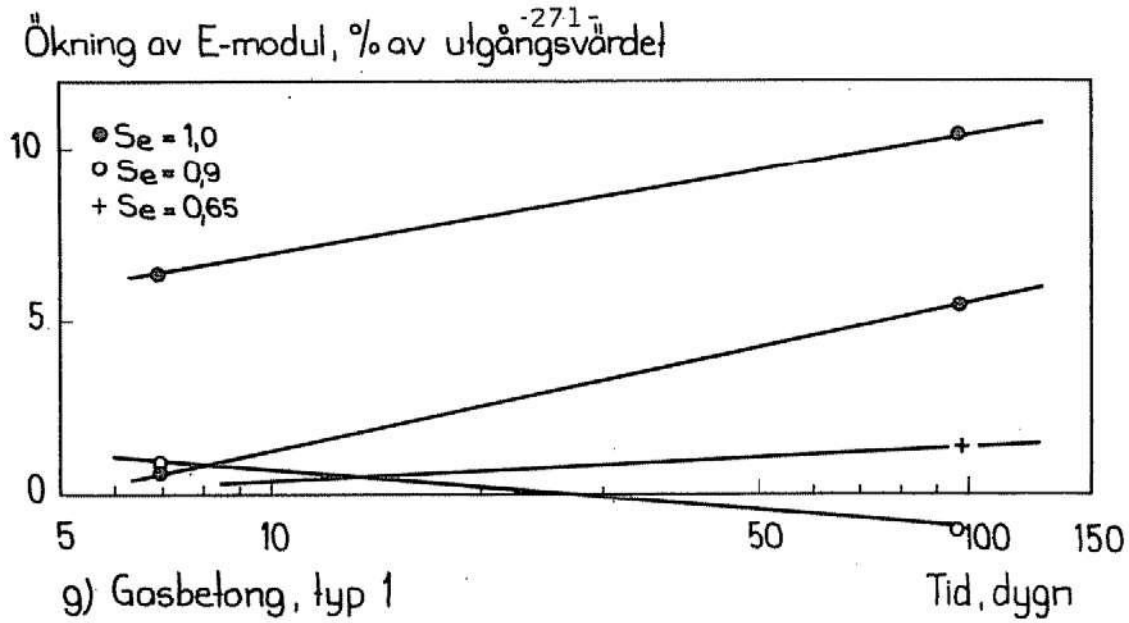
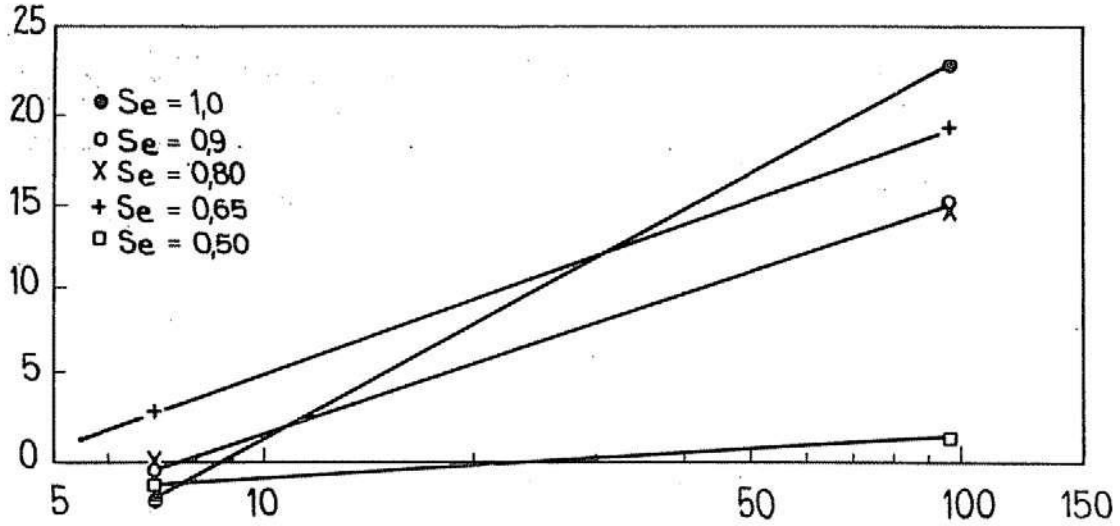


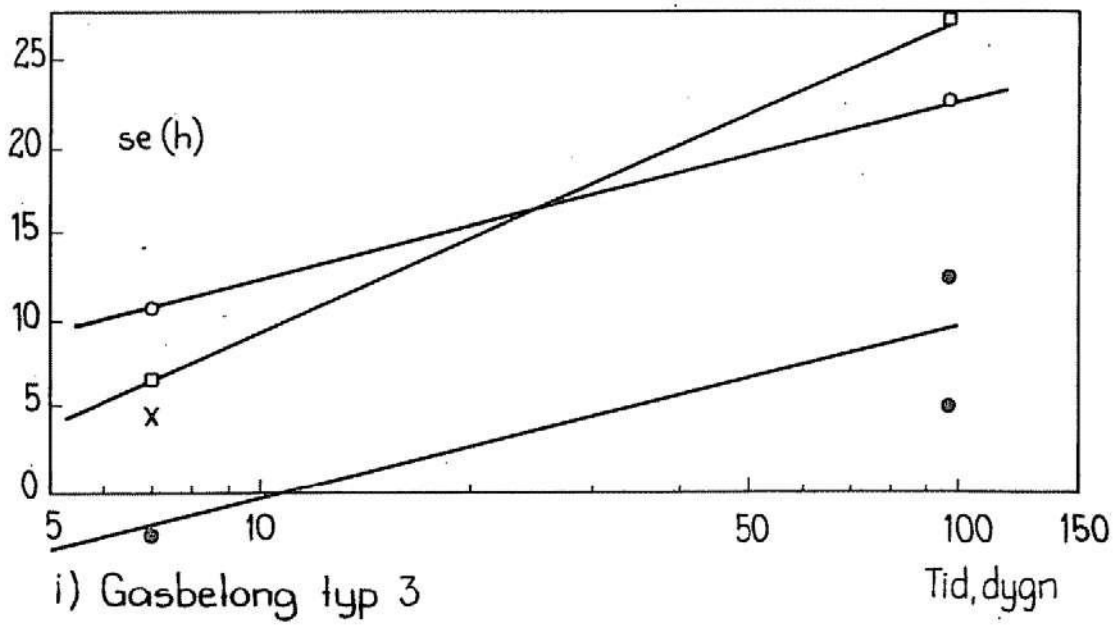
FIG 69 Forts. *Contnd.*



g) Gasbetong, typ 1



h) Gasbetong typ 2



i) Gasbetong typ 3

FIG 69 Forts. *Contnd.*

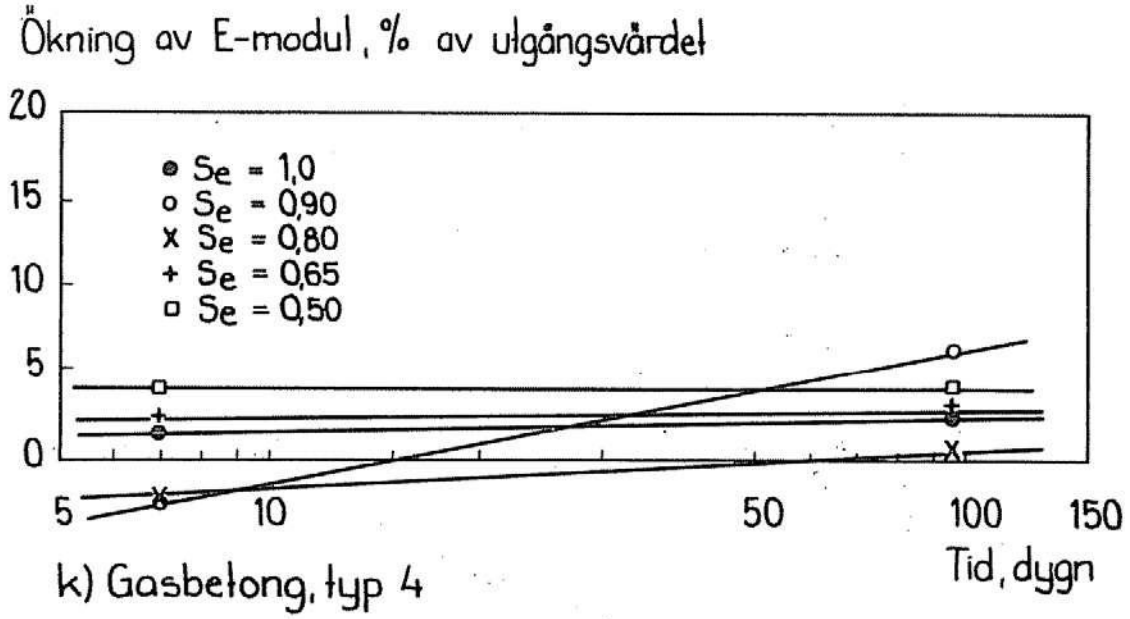


FIG 69 Forts. *Contnd.*

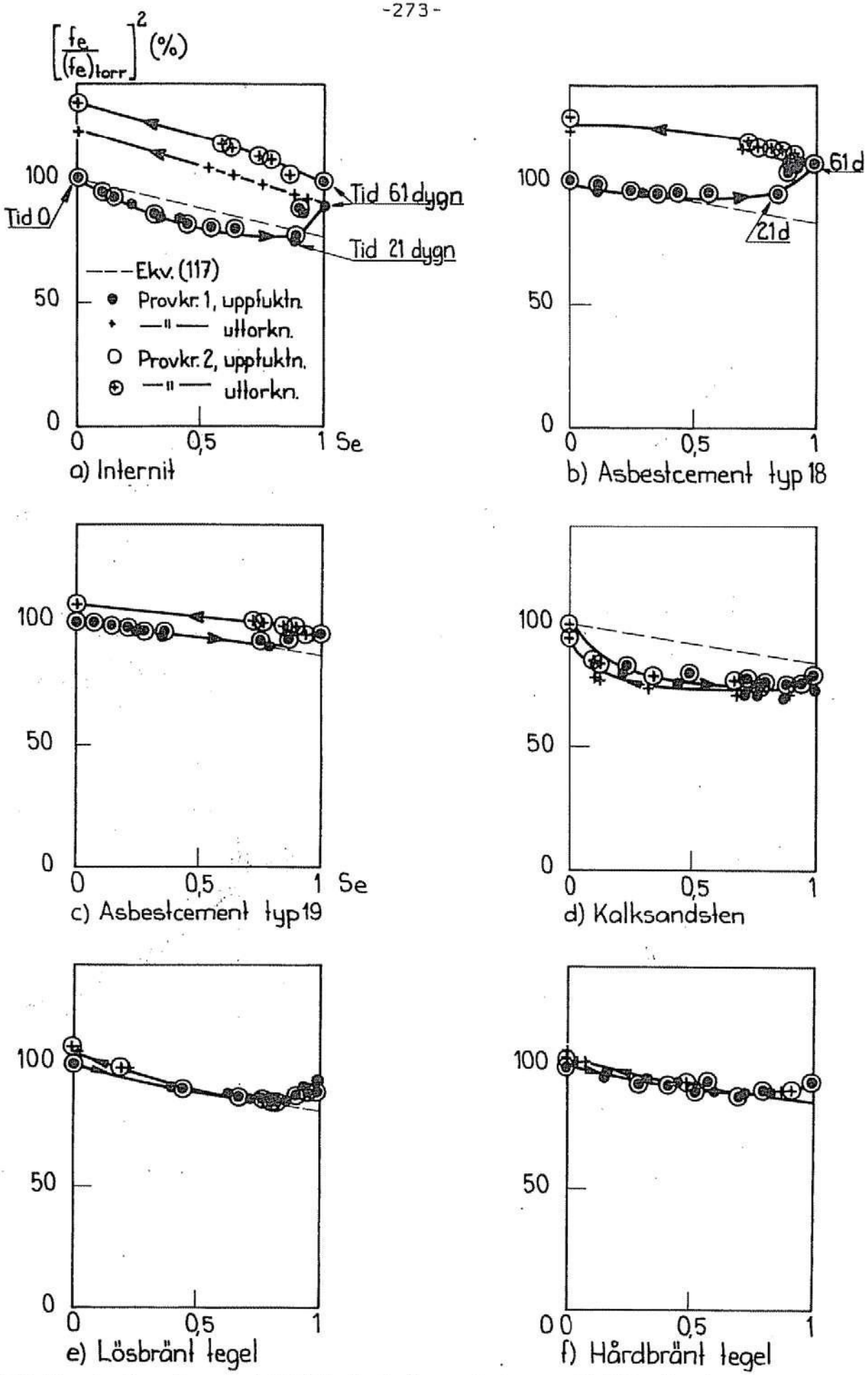
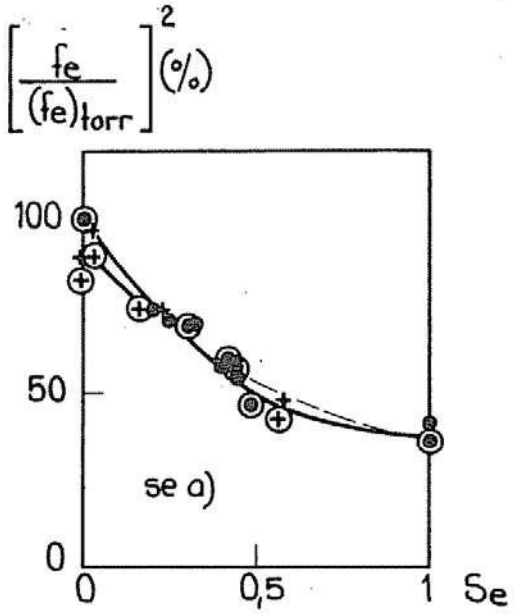
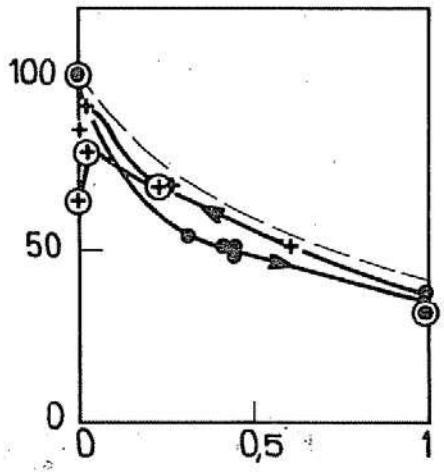


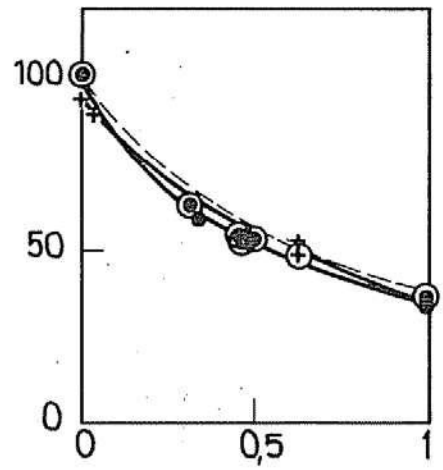
FIG 70 a-k Inverkan av fukttillstånd på egenfrekvens vid böjsvängning.
Influence of moisture condition on fundamental frequency at transverse vibration.



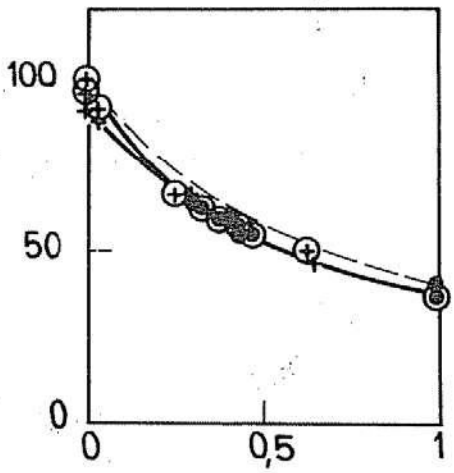
g) Gasbeton typ 1



h) Gasbeton typ 2



j) Gasbeton typ 3



k) Gasbeton typ 4

FIG 70 Forts. *Contnd.*

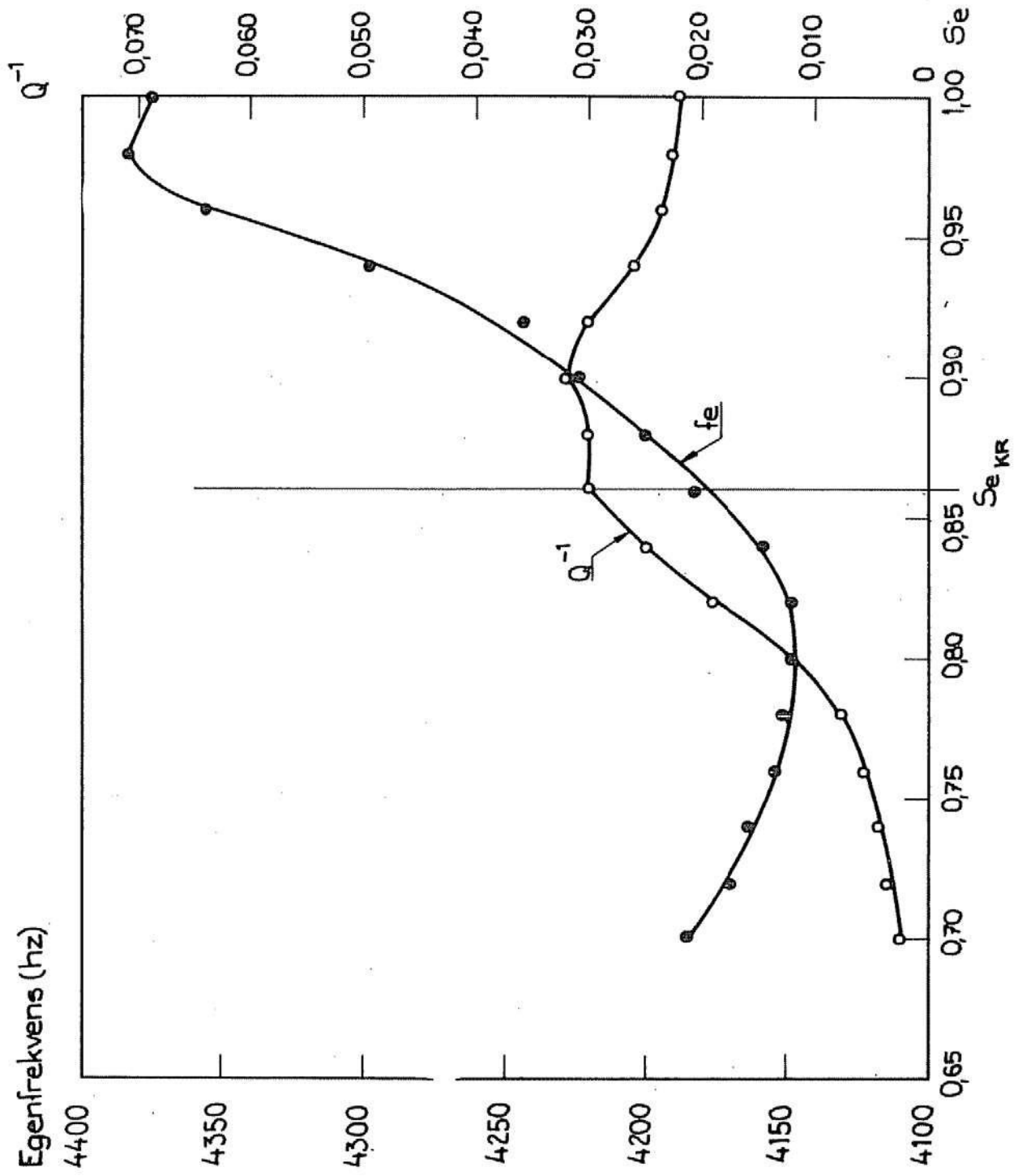


FIG 71 Inverkan av fukttillstånd på egenfrekvens och inre friktion hos lösbränt tegel. *Influence of moisture condition on fundamental frequency and internal friction. Underburnt clay brick.*

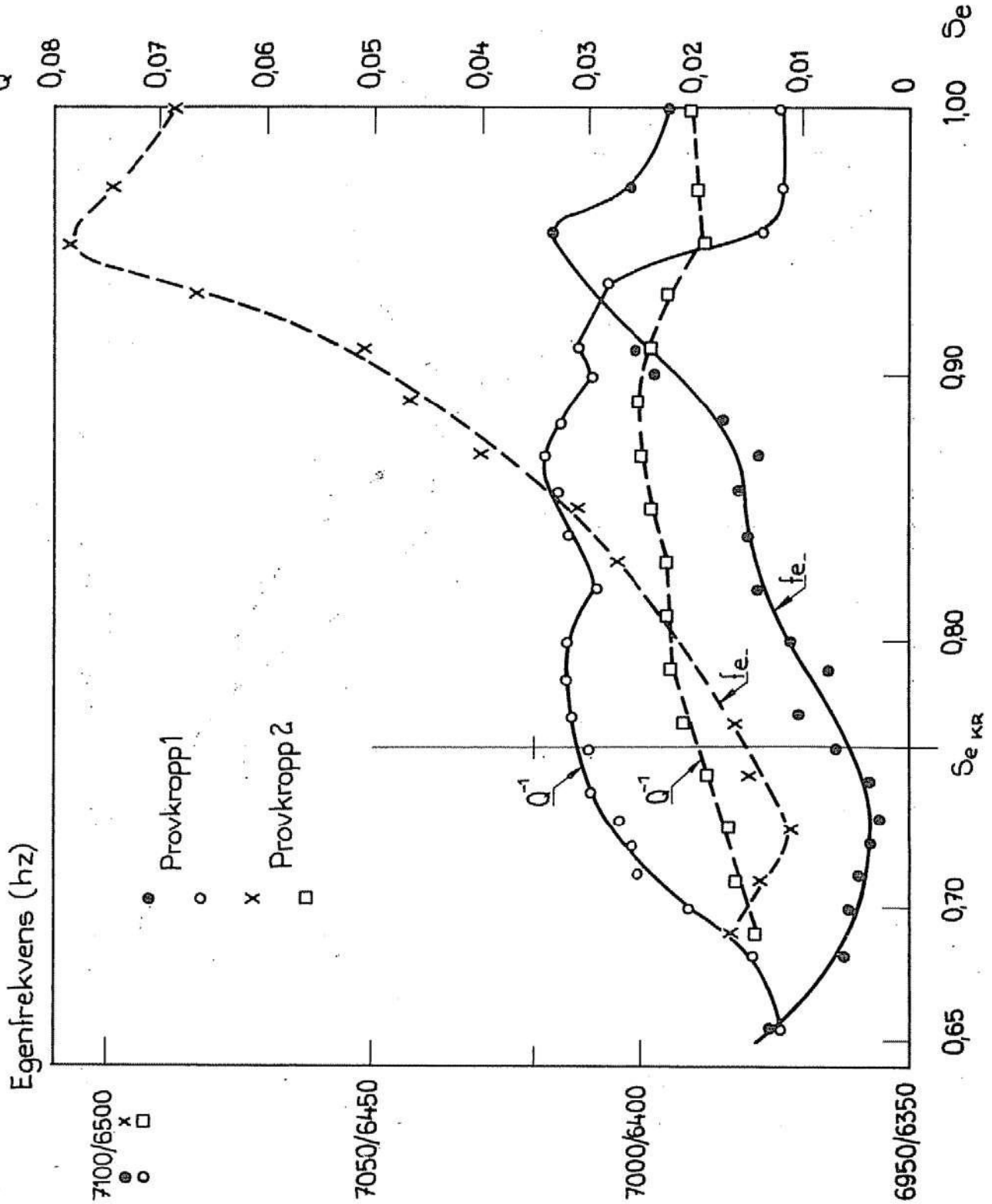


FIG 72 Inverkan av fukttillstånd på egenfrekvens och inre friktion hos hårdbränt tegel. *Influence of moisture condition on fundamental frequency and internal friction. Well burnt clay brick.*

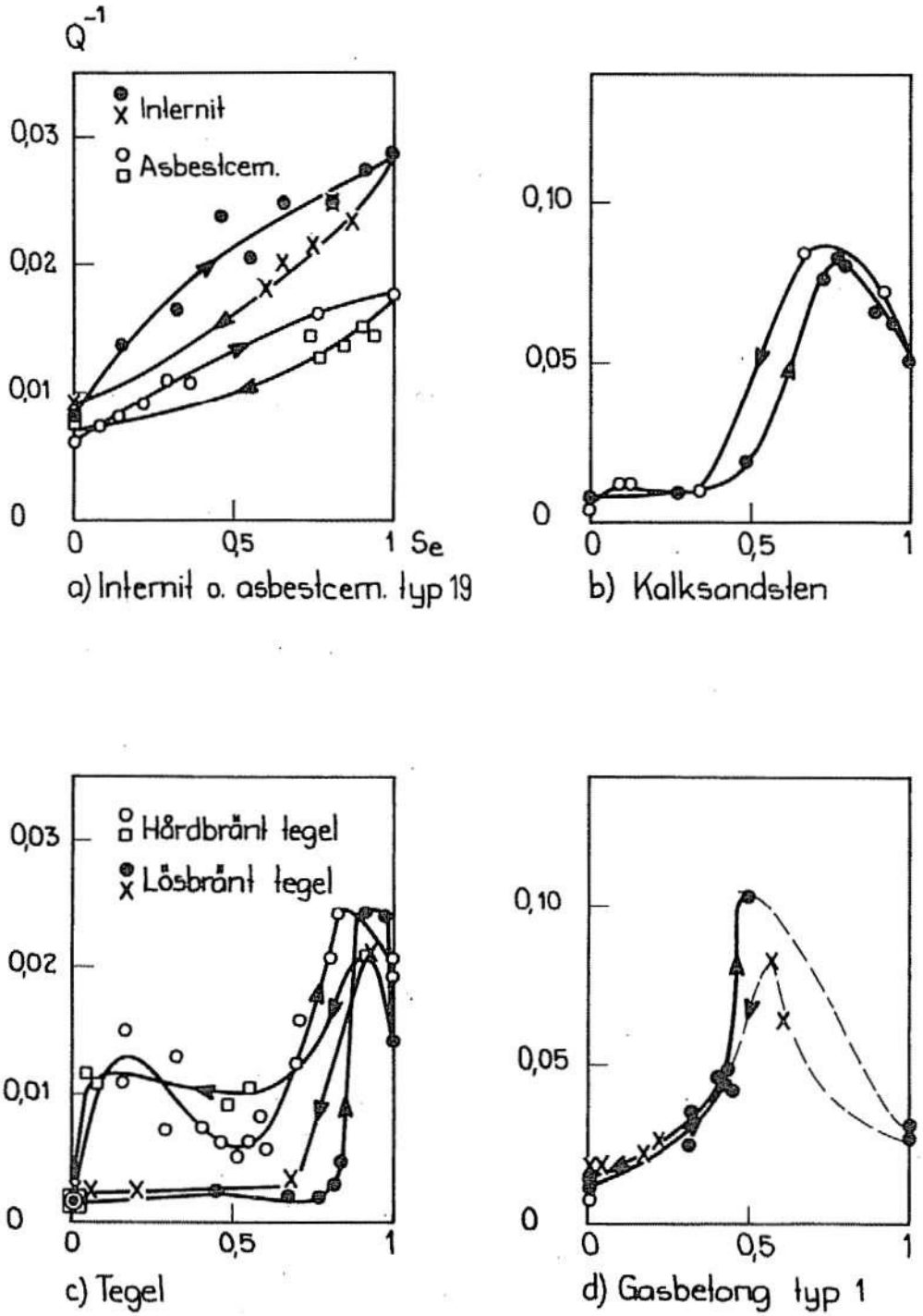


FIG 73 a-d · Inverkan av fukttillstånd på inre friktion. *Influence of moisture condition on internal friction.*

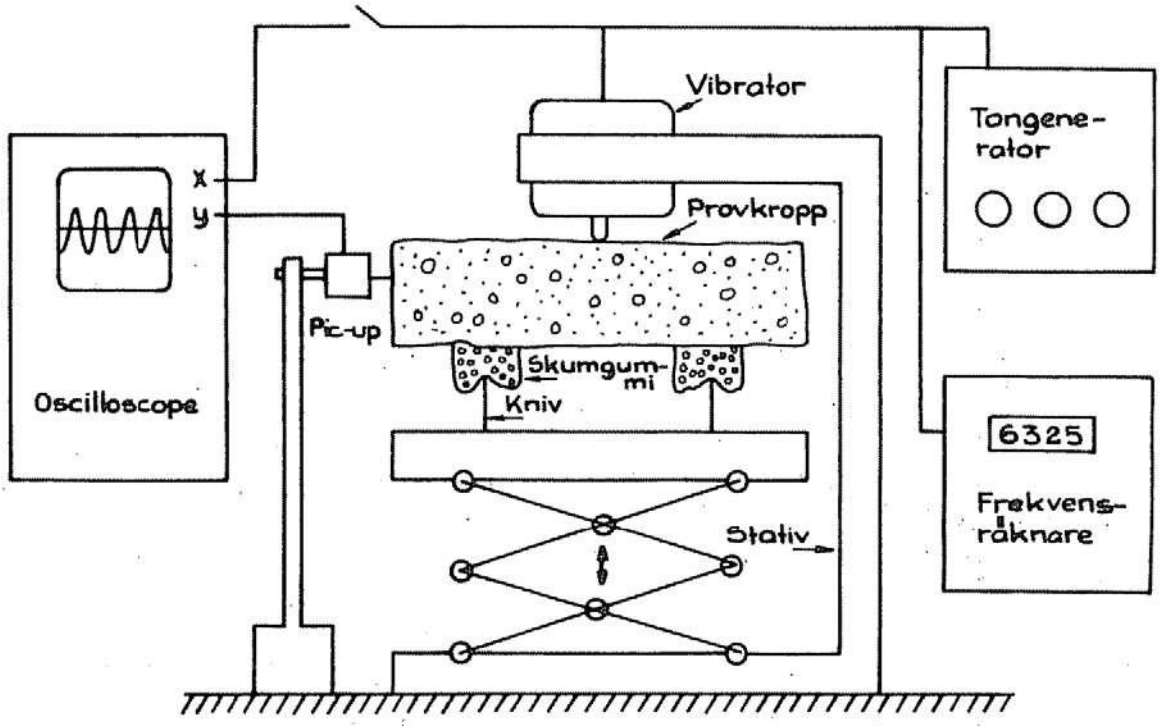


FIG 74 Apparatur för bestämning av dynamisk E-modul och inre friktion. *Apparatus for determination of dynamic Young's modulus and internal friction.*

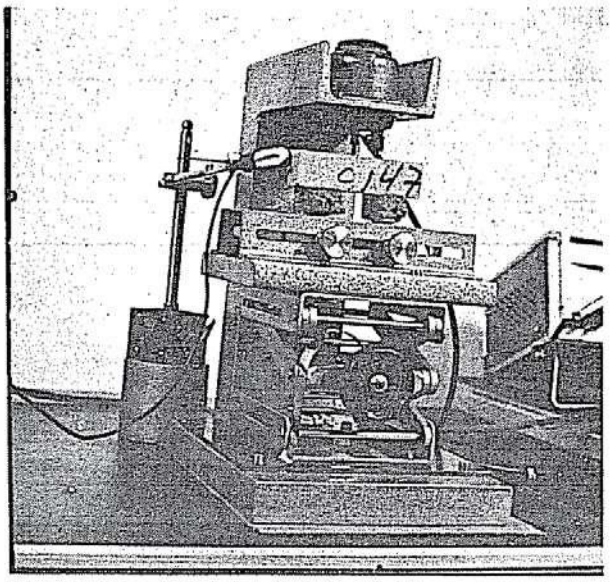


FIG 75 Apparatur för dynamisk E-modulmätning. *Apparatus for measurements of dynamic Young's modulus.*

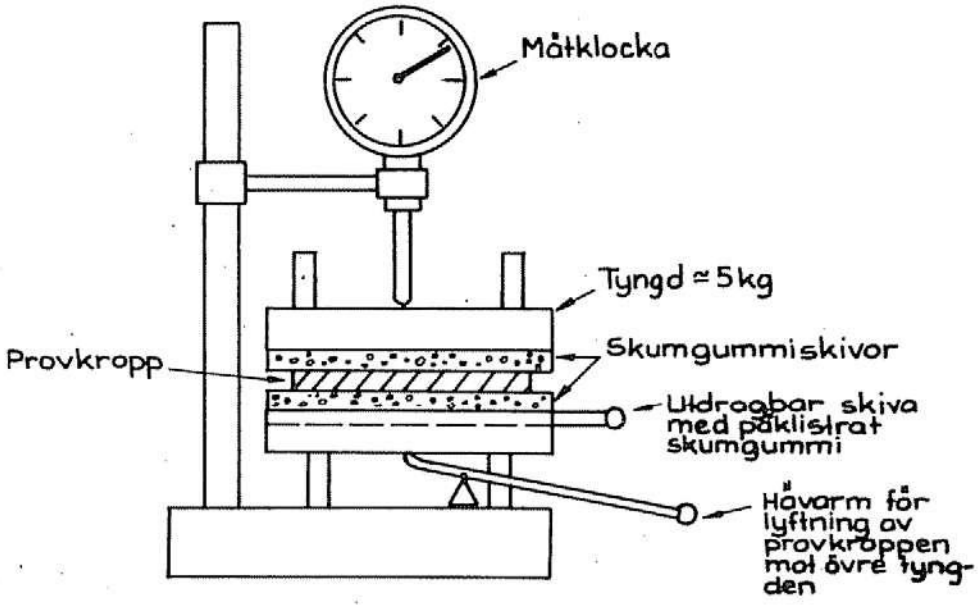


FIG 76 Apparatur för mätning av svällning hos asbestcementprodukter.
Apparatus for measurements of swelling of asbestos cement products.

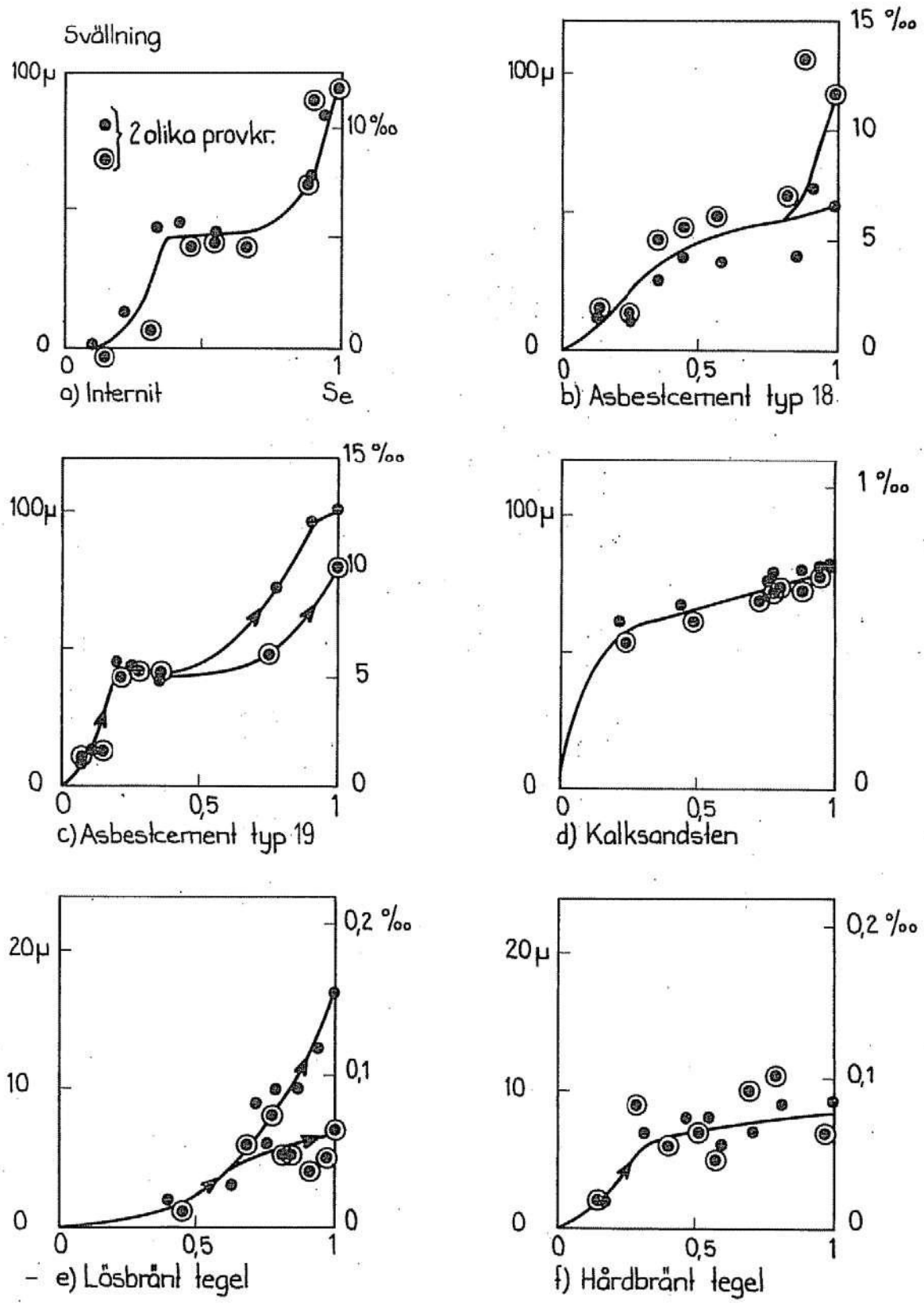


FIG 77 a-k Fuktrörelser hos material. *Moisture movements of materials.*

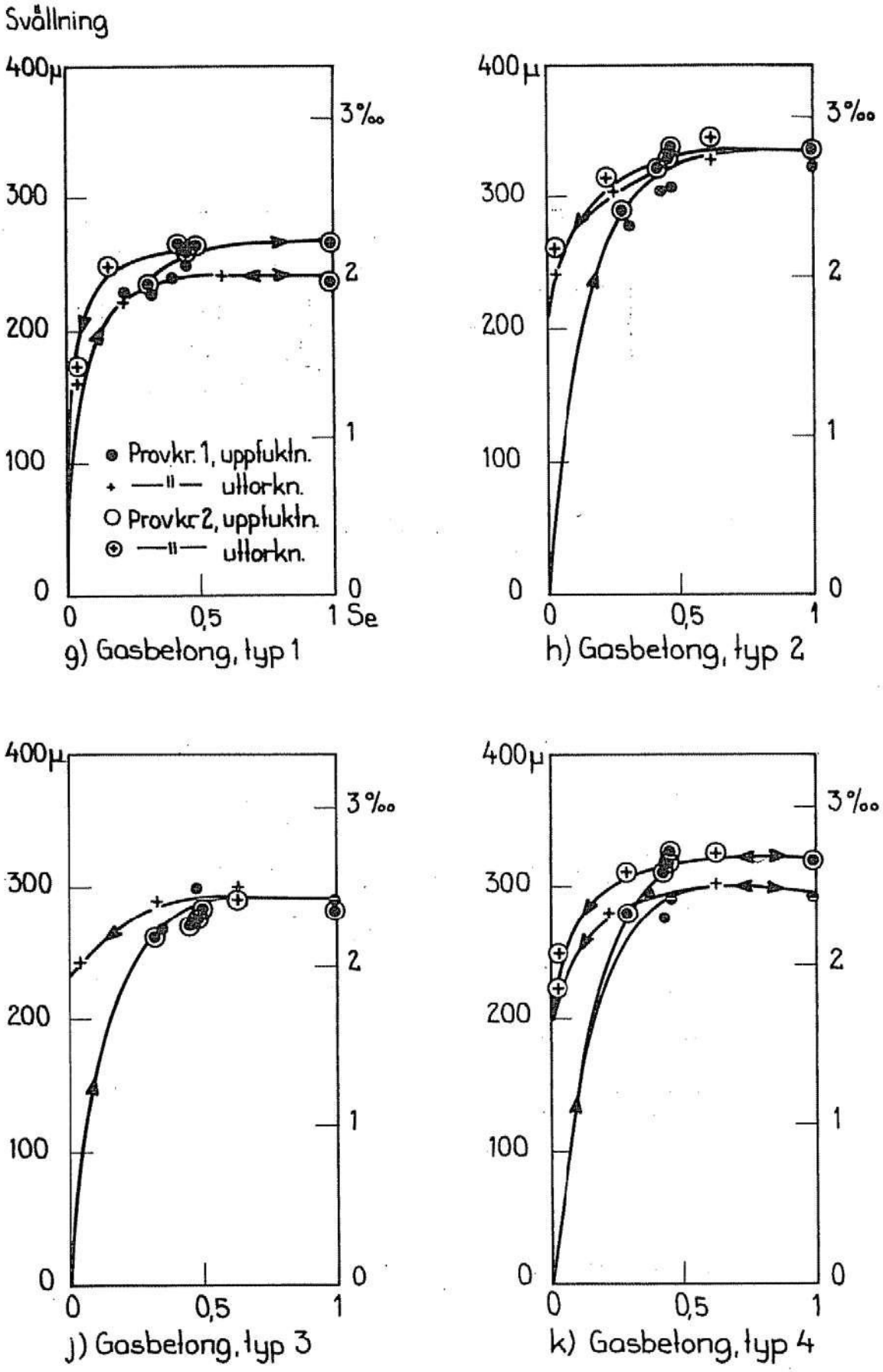


FIG 77 Forts. *Contnd.*

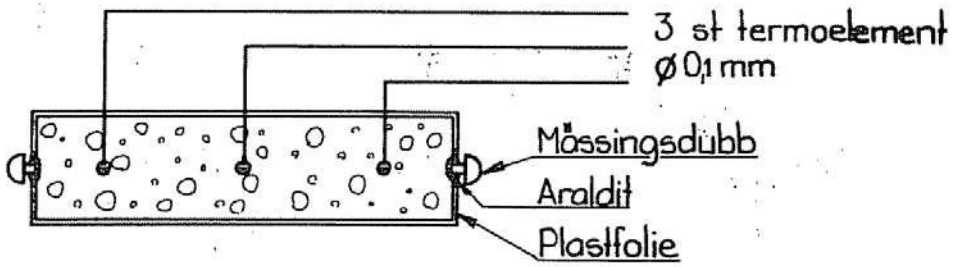


FIG 78 Provkropp för encykelfrysningar. Storlek 30x30x120 mm.
Specimen for one-cycle-freezings.

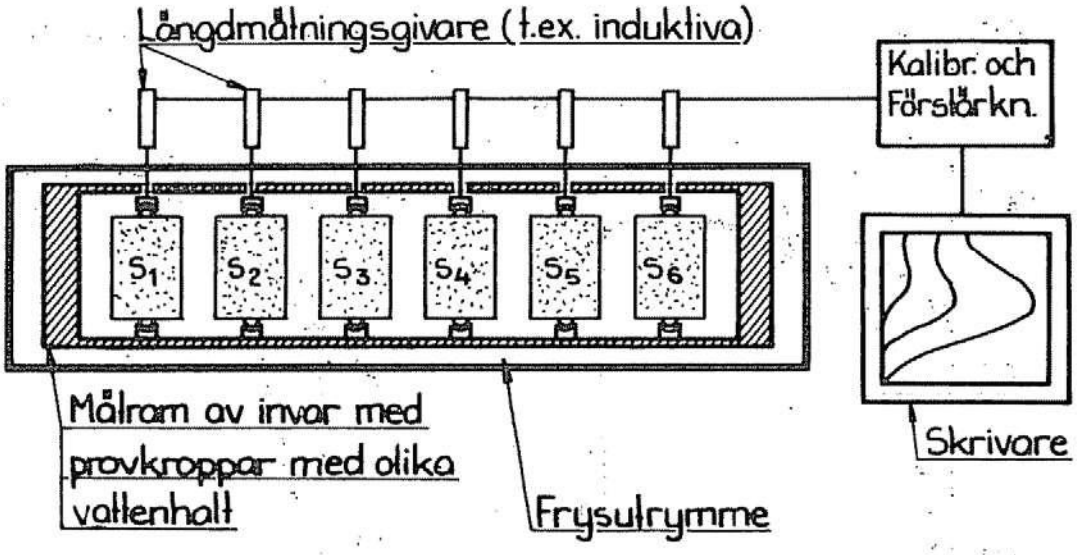


FIG 79 Tänkbar apparatur för bestämning av S_{KR} med encykelfrysning.
Imaginable apparatus for determination of S_{CR} by one-cycle-freezing.

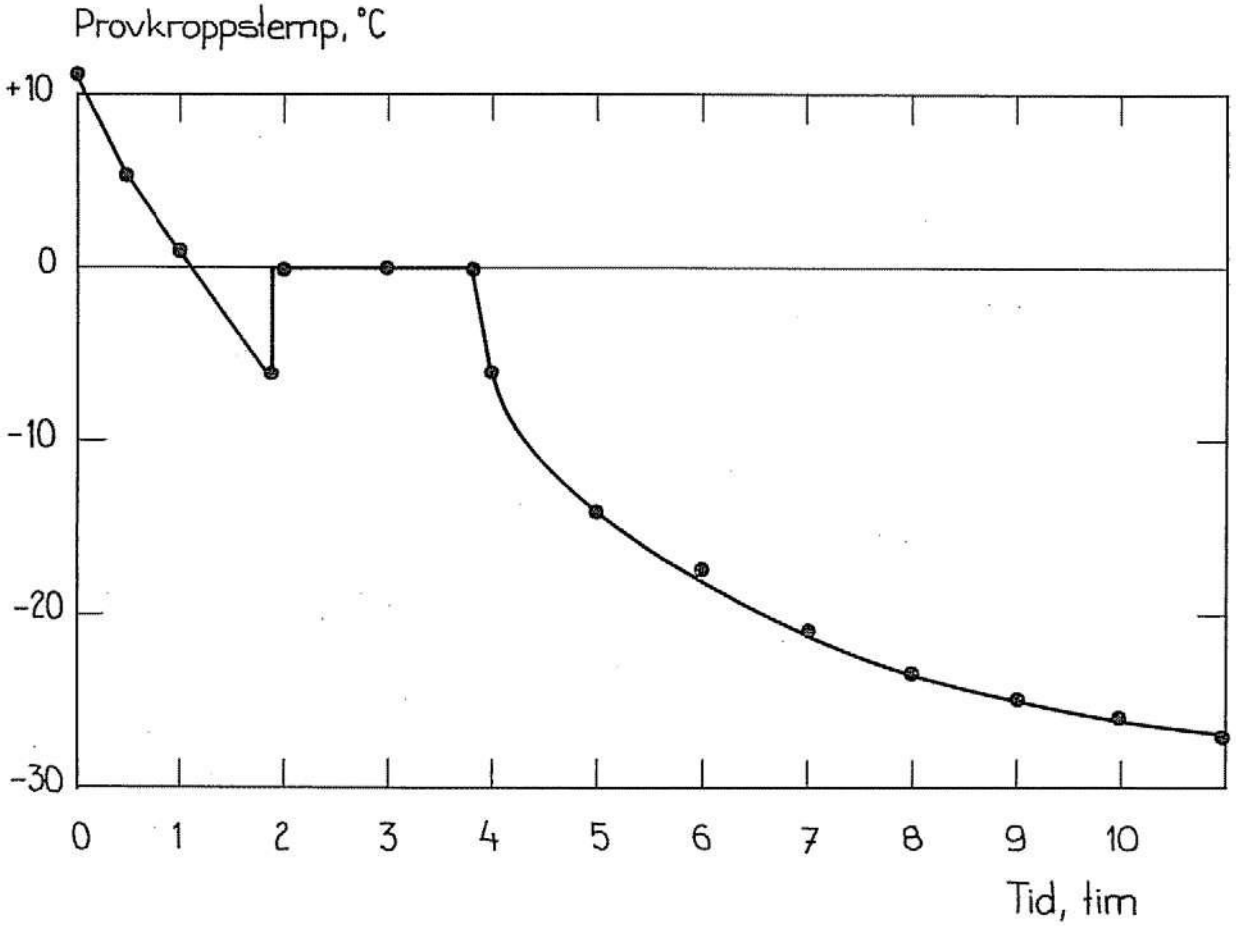
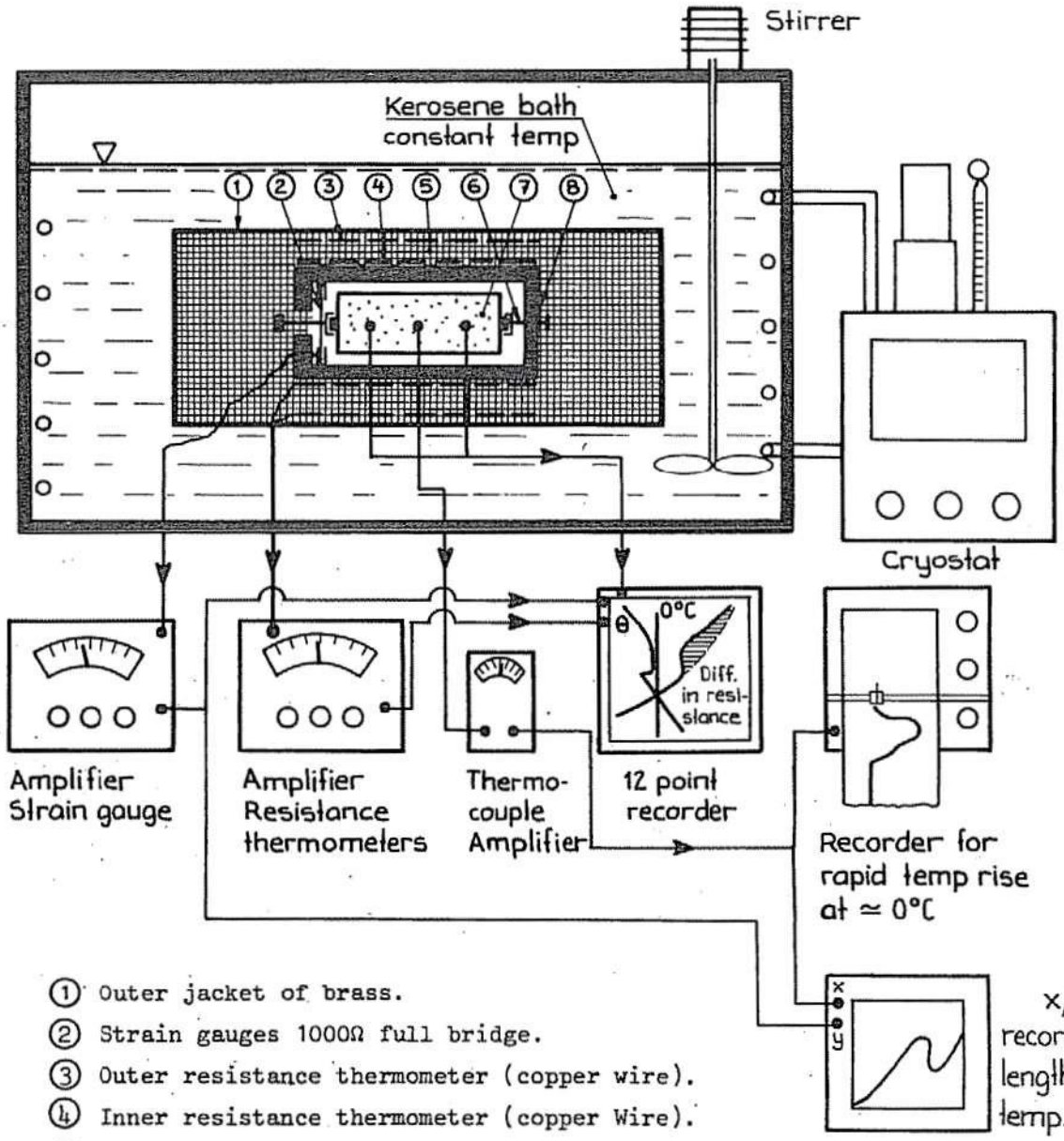


FIG 80 Nedfrysningskurva vid encykelfrysning. Lösbränt tegel S_e=0,90.
Freezing-curve at one-cycle-freezing.



① Outer jacket of brass.
② Strain gauges 1000Ω full bridge.
③ Outer resistance thermometer (copper wire).
④ Inner resistance thermometer (copper Wire).
⑤ Polyurethane foam cast in situ.
⑥ Screw (support).
⑦ Specimen 30x30x120 mm^3 wrapped in plastics foil with 3 thermocouples and with knobs in the ends.
⑧ Invar frame.

FIG 81 Schematisk uppställning av kombinerad dilatometer och kalorimeter. Fagerlund /1973 A/. *Combined dilatometer - calorimeter.*

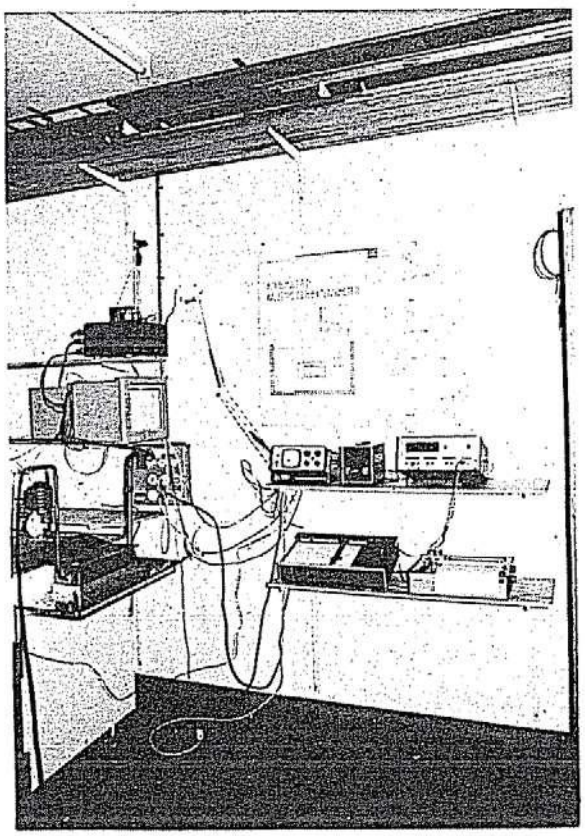


FIG 82 a Dilatometer-kalorimeter. *Dilatometer-calorimeter.*

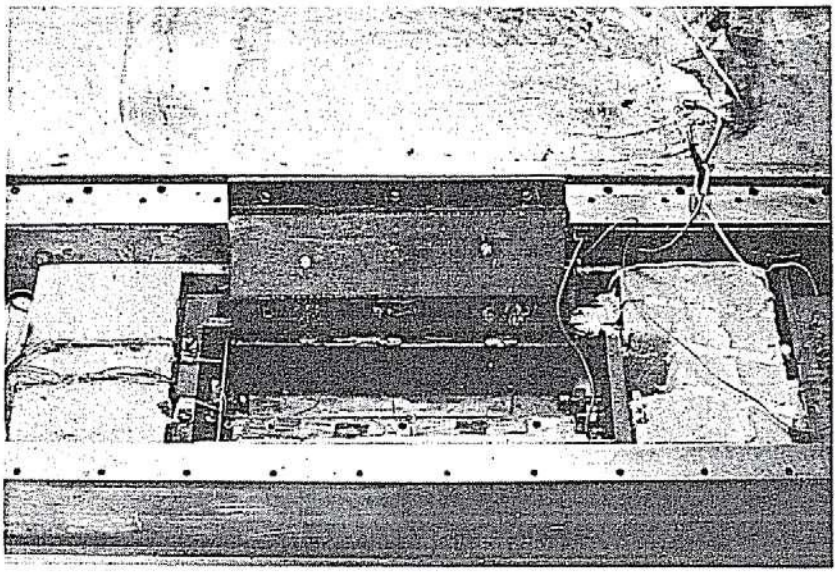


FIG 82 b Dilatometer-kalorimeter. Provkroppskärl. *Dilatometer-calorimeter. Specimen vessel.*

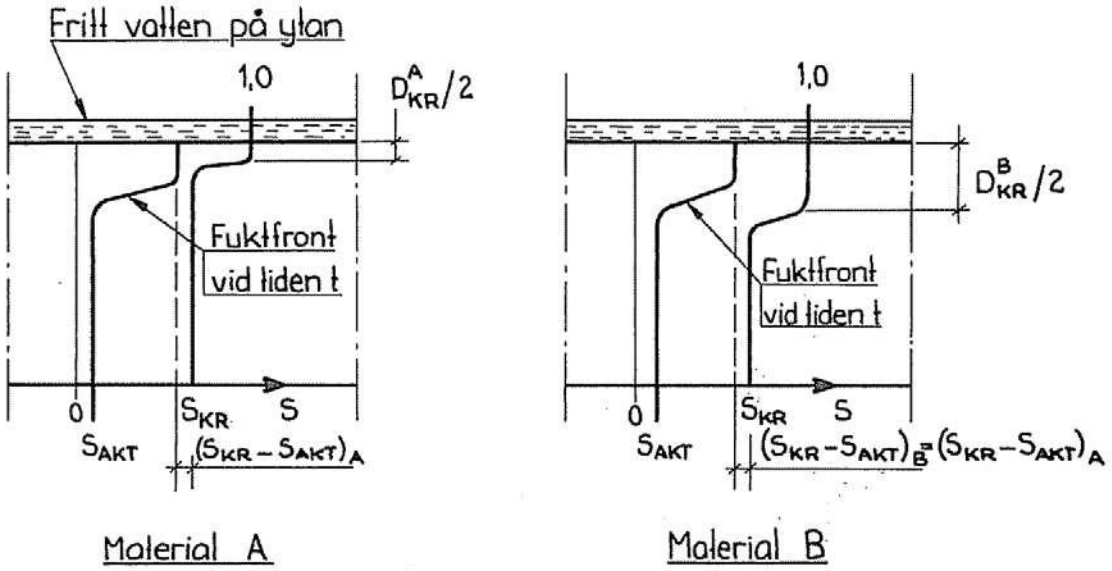


FIG 83 Principiell inverkan på frostbeständigheten av varierande kritiska skikttjocklekar. *Influence on frost-resistance of different critical thicknesses*

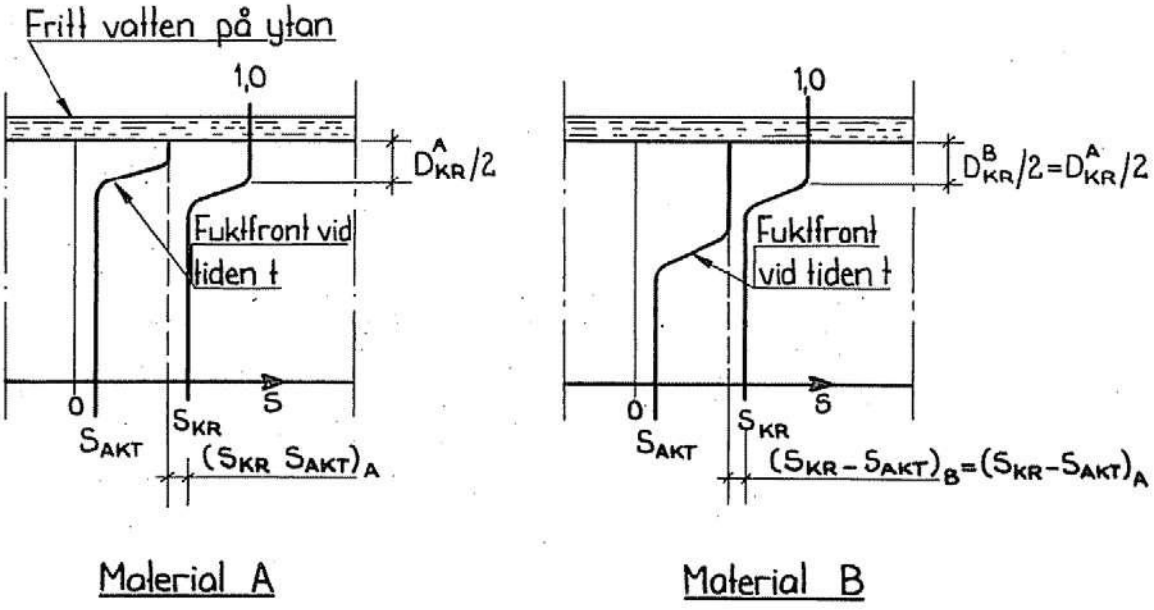


FIG 84 Principiell inverkan på frostbeständigheten av varierande sughastighet vid konstant kritisk skikttjocklek. *Influence on frost-resistance of different rates of water absorption.*

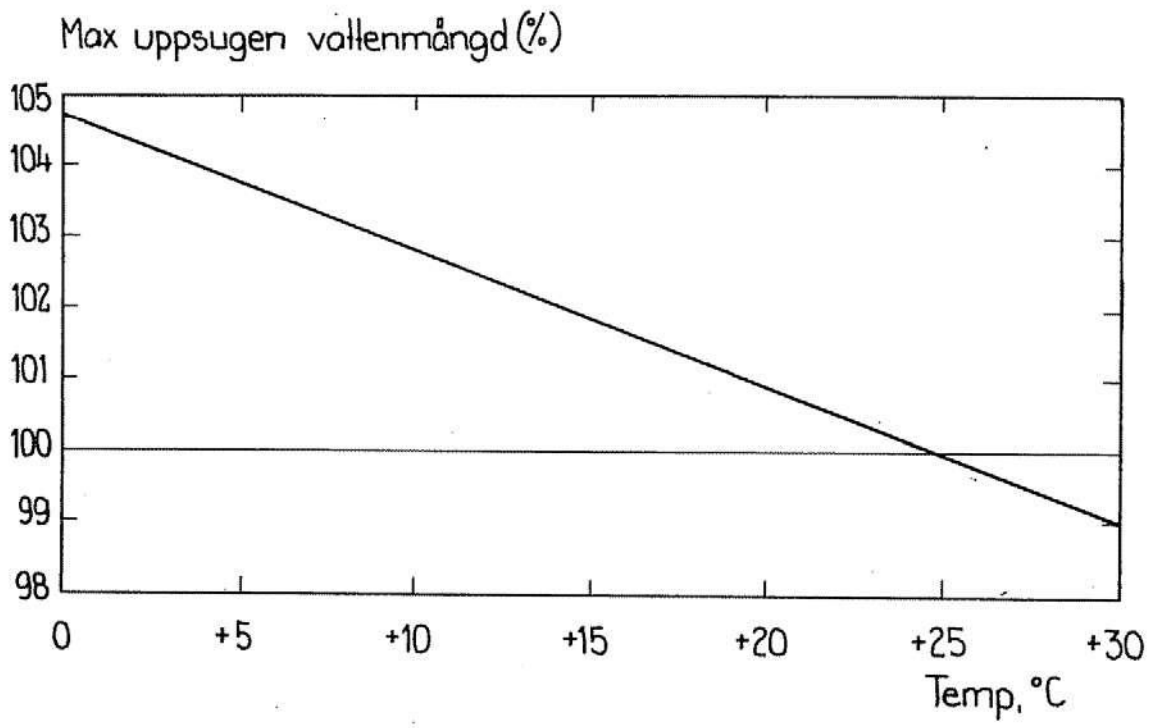


FIG 85 Vattenabsorption i relation till värdet vid +25°C. *Water absorption in relation to the value at +25°C.*

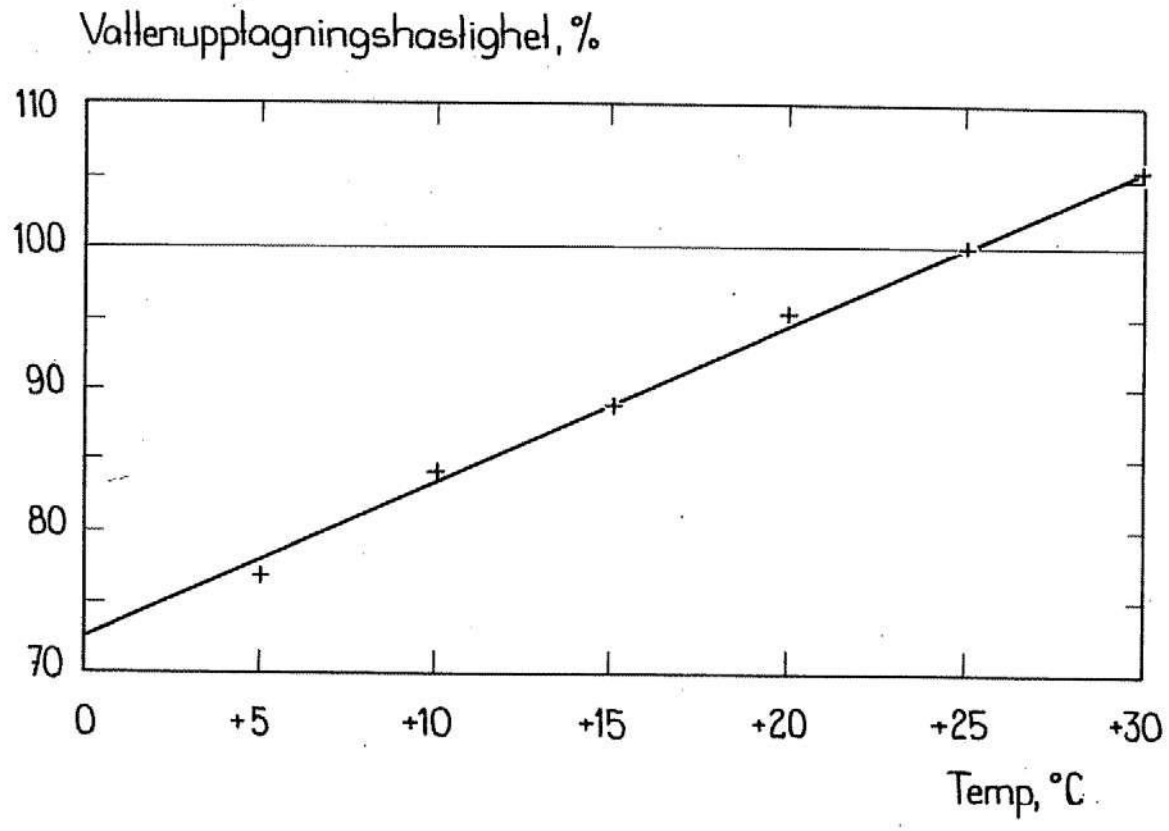


FIG 86 Vattenupptagningshastighet i relation till värdet vid +25°C. *Rate of water absorption in relation to the value at +25°C.*

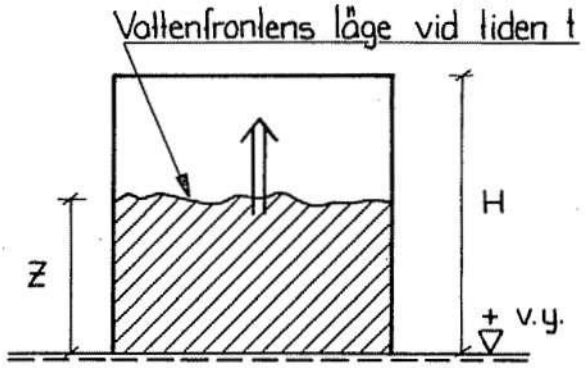


FIG 87 Kapillär vattenuppsugning. *Capillary water uptake.*

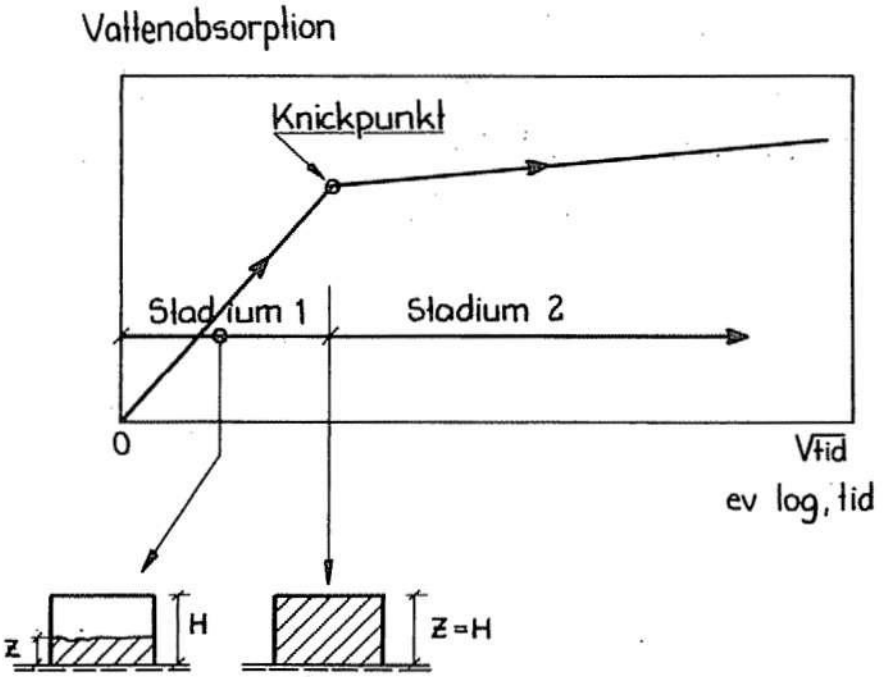


FIG 88 Typiska absorptions- tidskurvor. *Typical absorption-time-curves.*

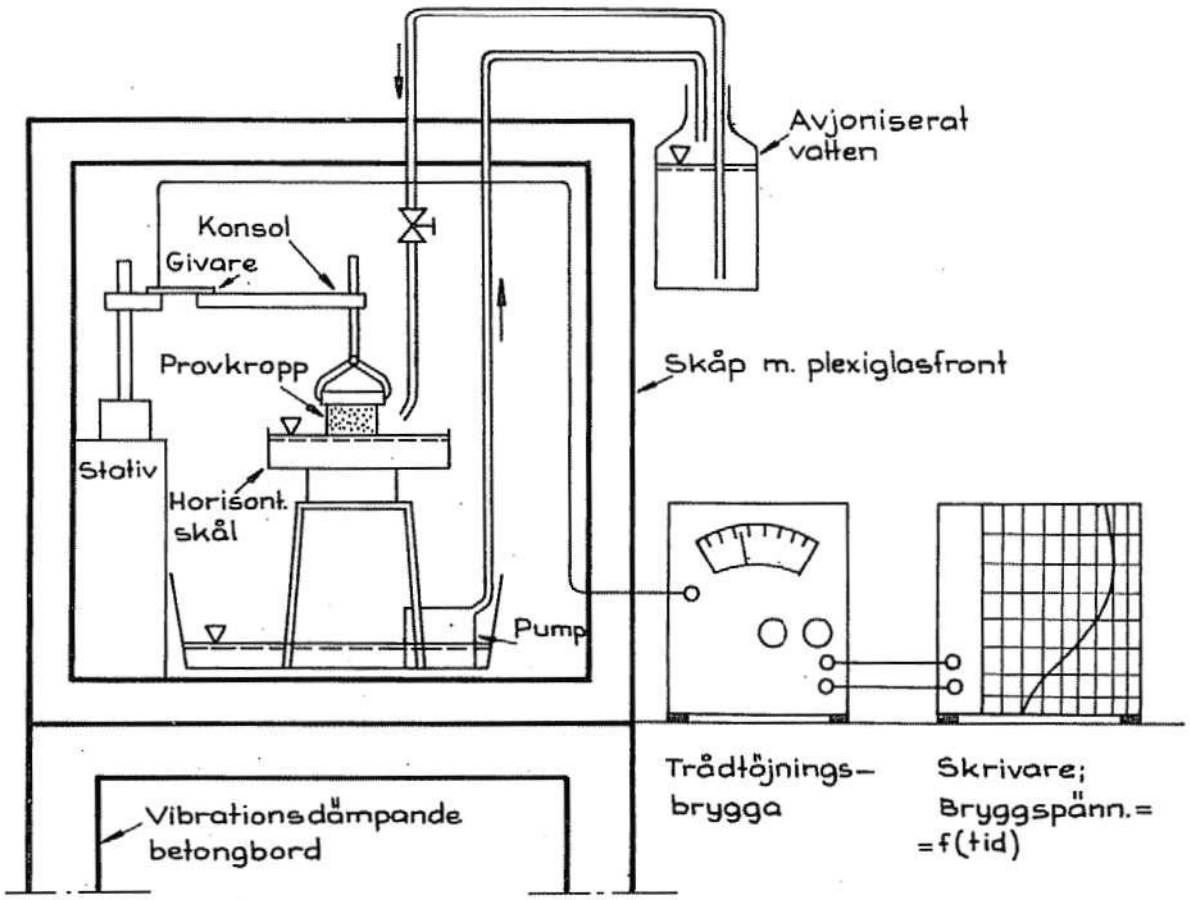


FIG 89 Apparatur för bestämning av kapillär sugförmåga. *Apparatus for determination of water absorption.*

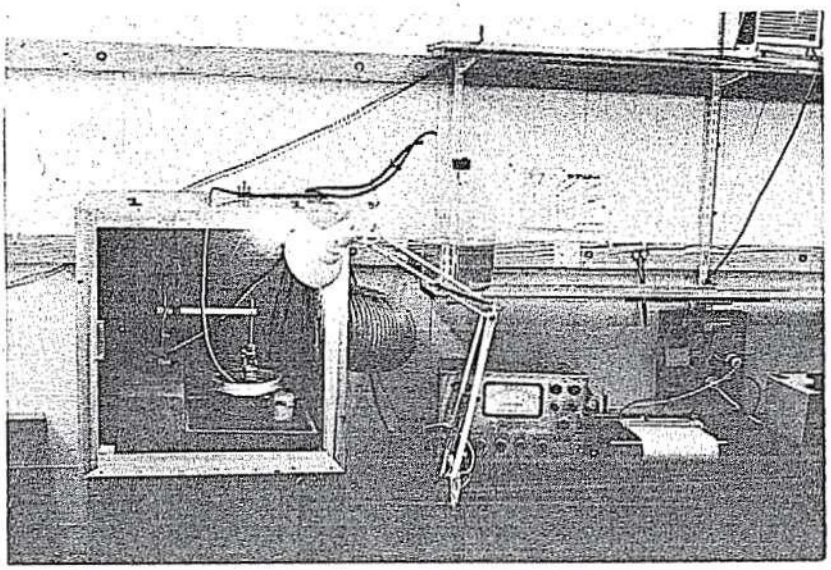


FIG 90 Apparatur för bestämning av kapillär sugförmåga. *Apparatus for determination of water absorption.*

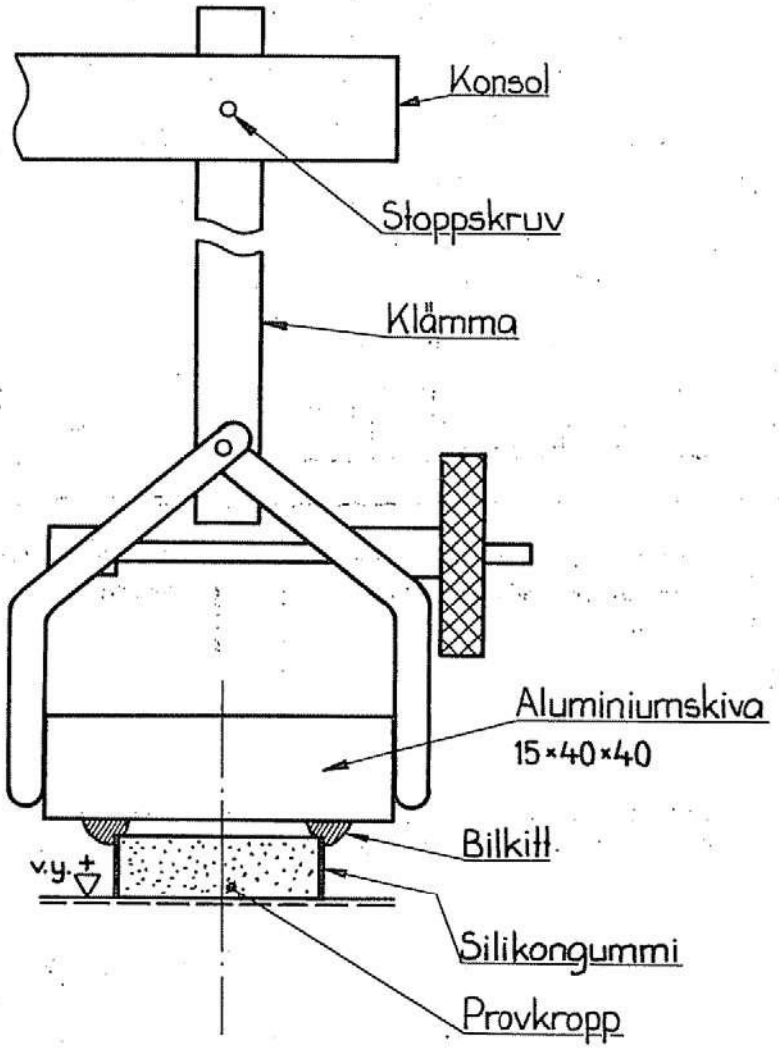


FIG 91 Provkroppshållare vid kapillärsugning. *Holder for specimen.*

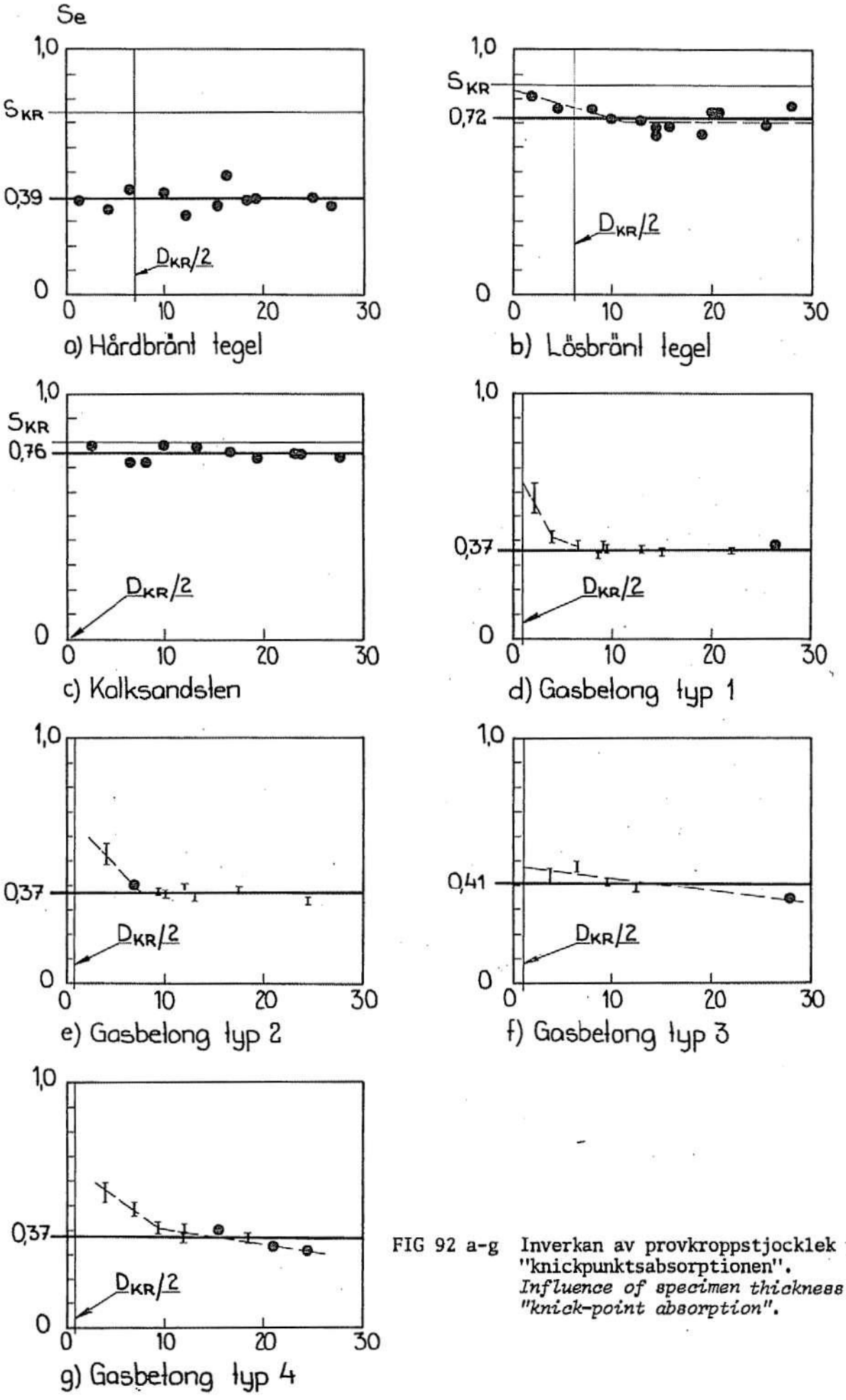


FIG 92 a-g Inverkan av provkroppstjocklek på "knickpunktsabsorptionen".
Influence of specimen thickness on "knick-point absorption".

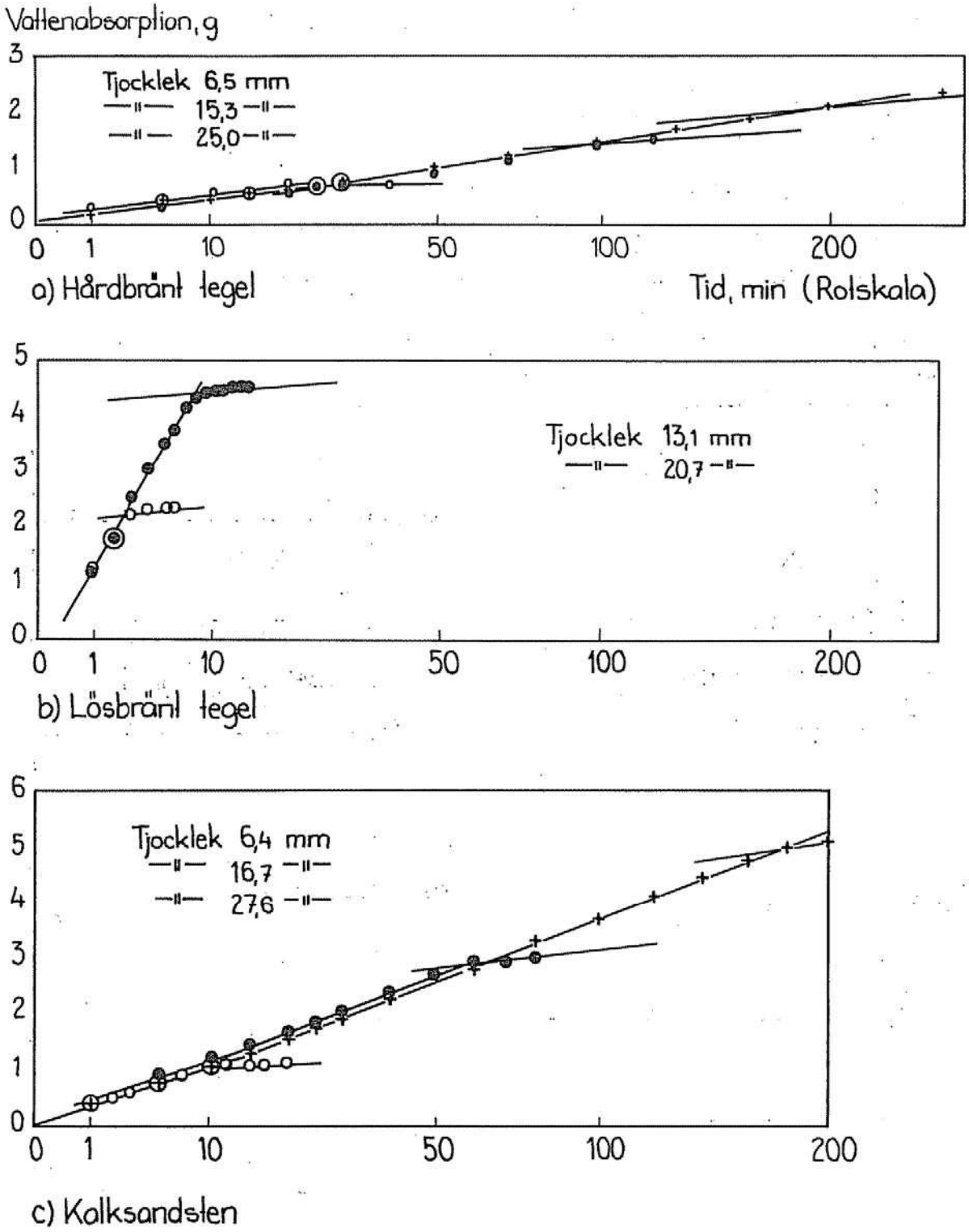
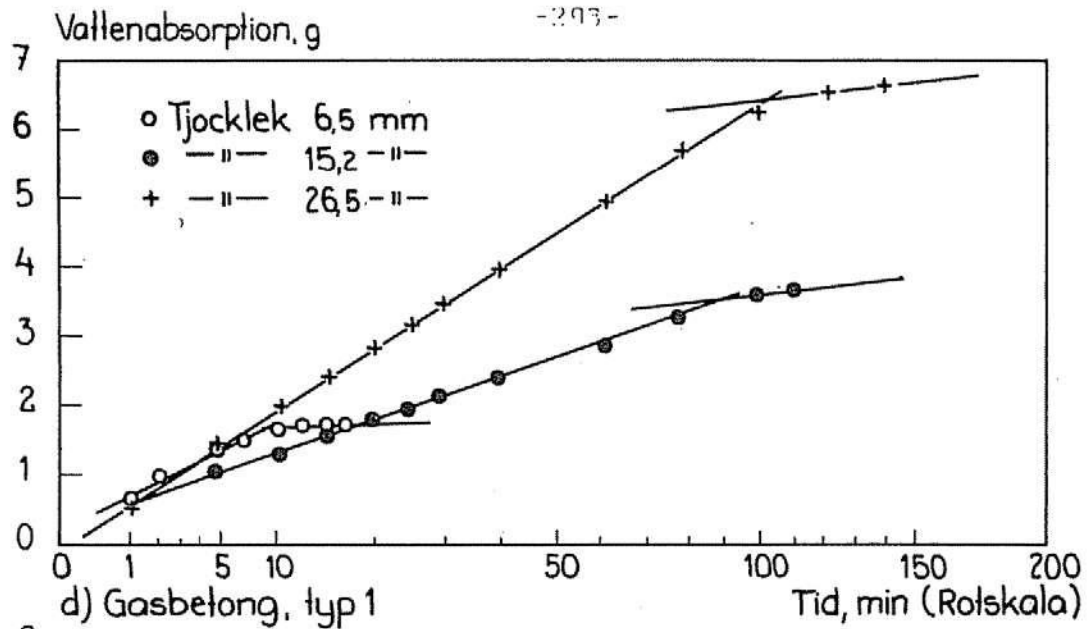
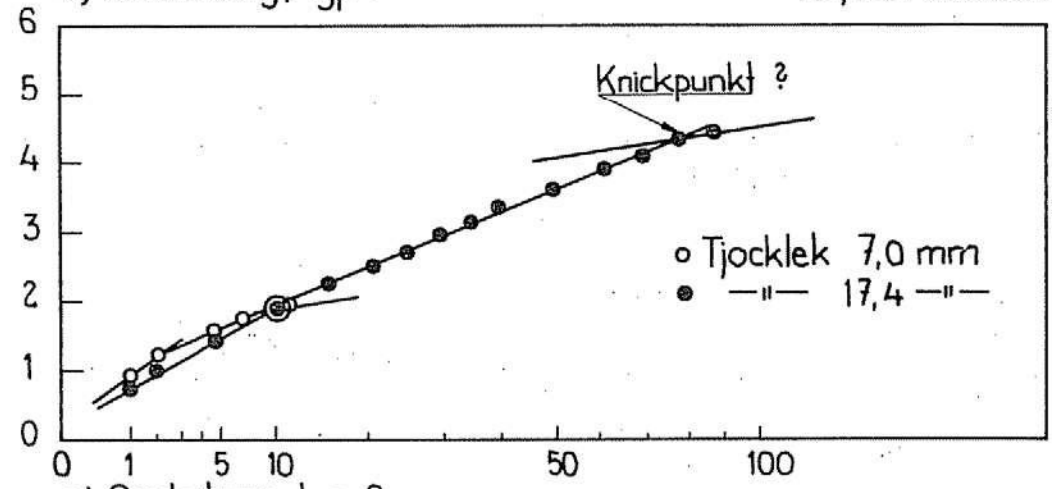


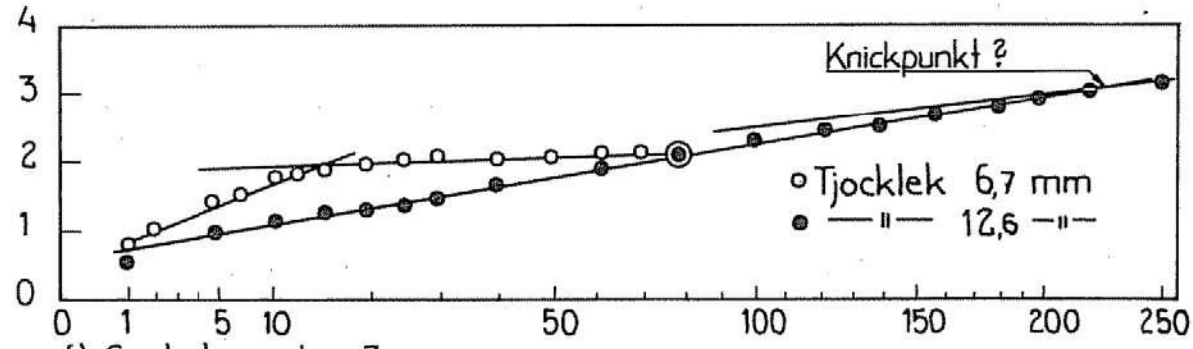
FIG 93 a-g Absorptions- tidskurvor. *Absorption- time curves.*



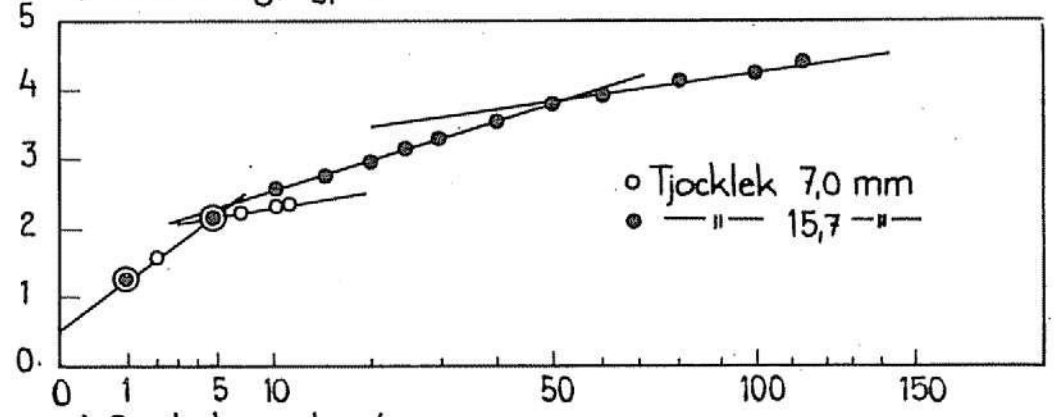
d) Gasbetong, typ 1



e) Gasbetong, typ 2



f) Gasbetong, typ 3



g) Gasbetong, typ 4

FIG 93 Forts. *Contnd.*

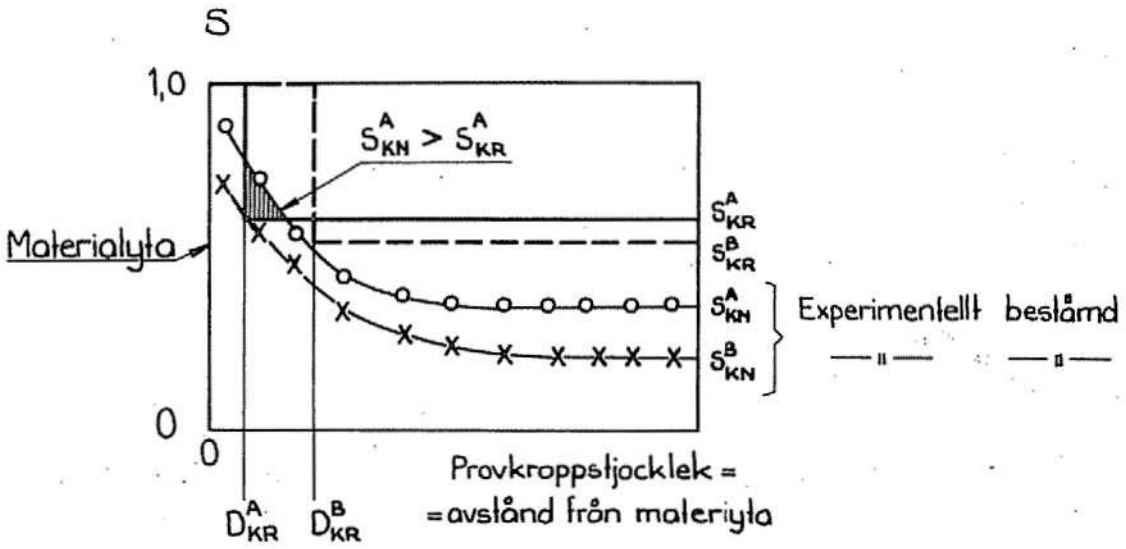


FIG 94 Samband S_{KR}-kritisk skikttjocklek-knickpunktsabsorption-frostbeständighet. *Connections S_{CR}-critical thickness-knick-point absorption-frost resistance.*

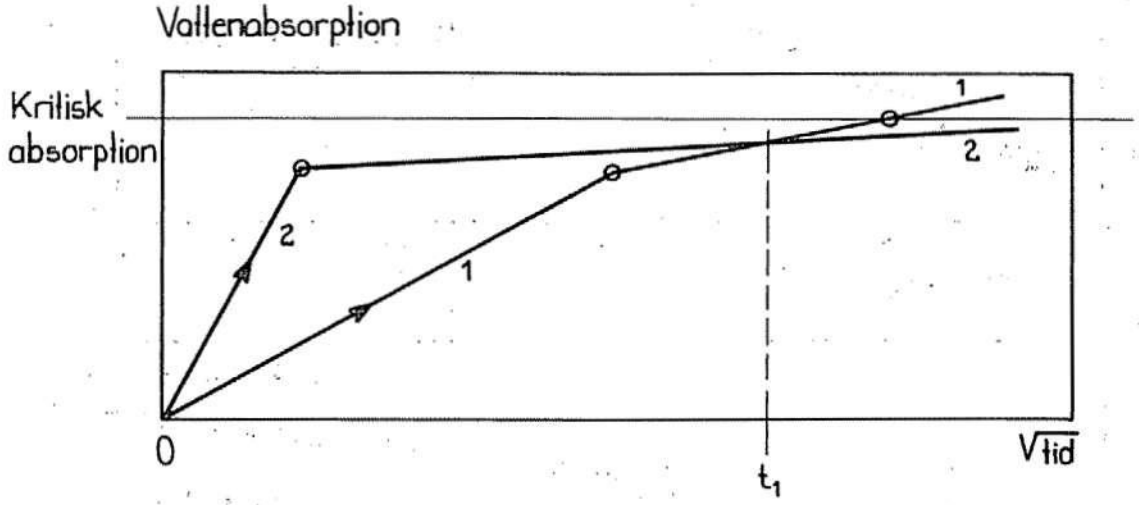


FIG 95 Exempel på frostbeständighetens tidsberoende. *Example on time dependence of frost-resistance.*

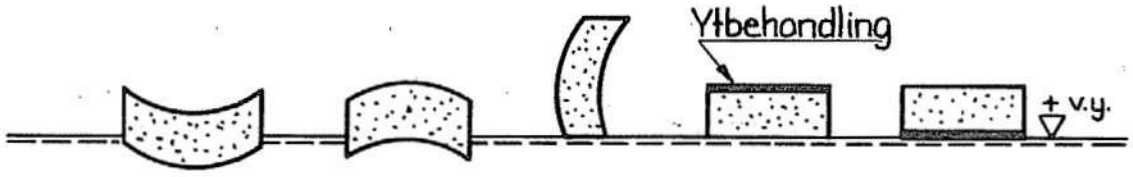


FIG 96 Olika orientering av provkroppar vid sugförsök. *Different orientations of specimens at water absorption tests.*

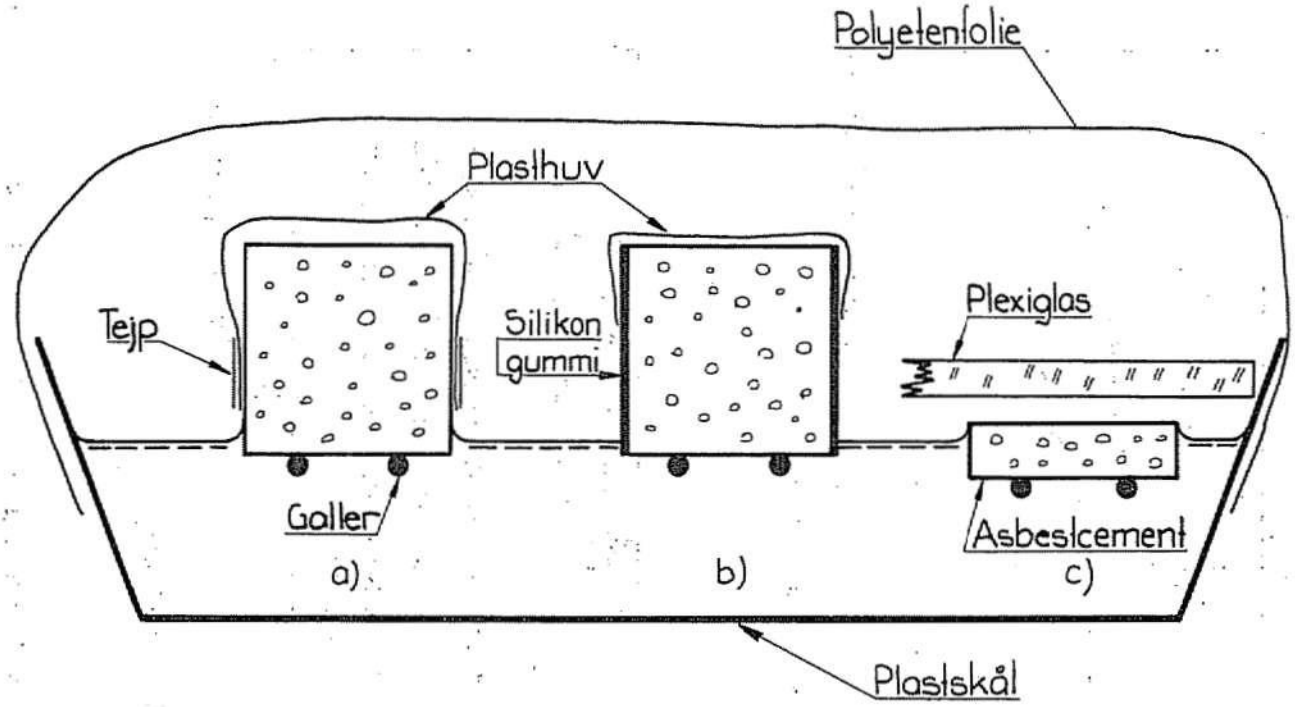
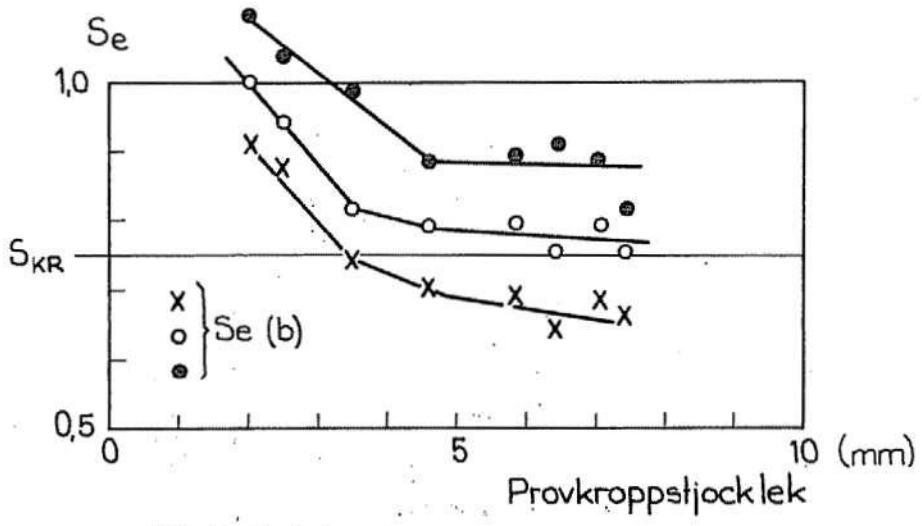
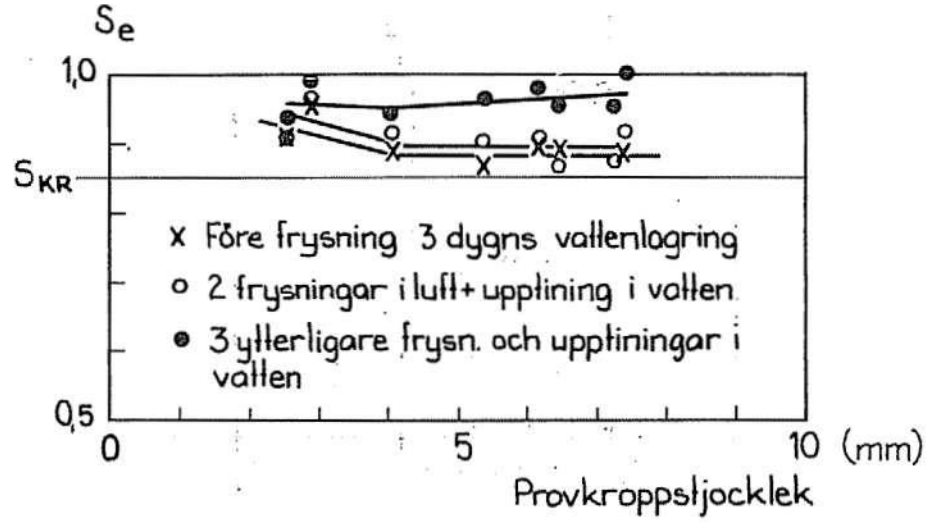


FIG 97 Metoder att förhindra avdunstning från provkropar. *Methods for avoiding evaporation from specimens.*



a) Hårdbränt tegel.



b) Lösbränt tegel

FIG 98 Vattenupptagning vid frysning och upptining i vatten. *Water absorption at freezing- and-thawing in water.*

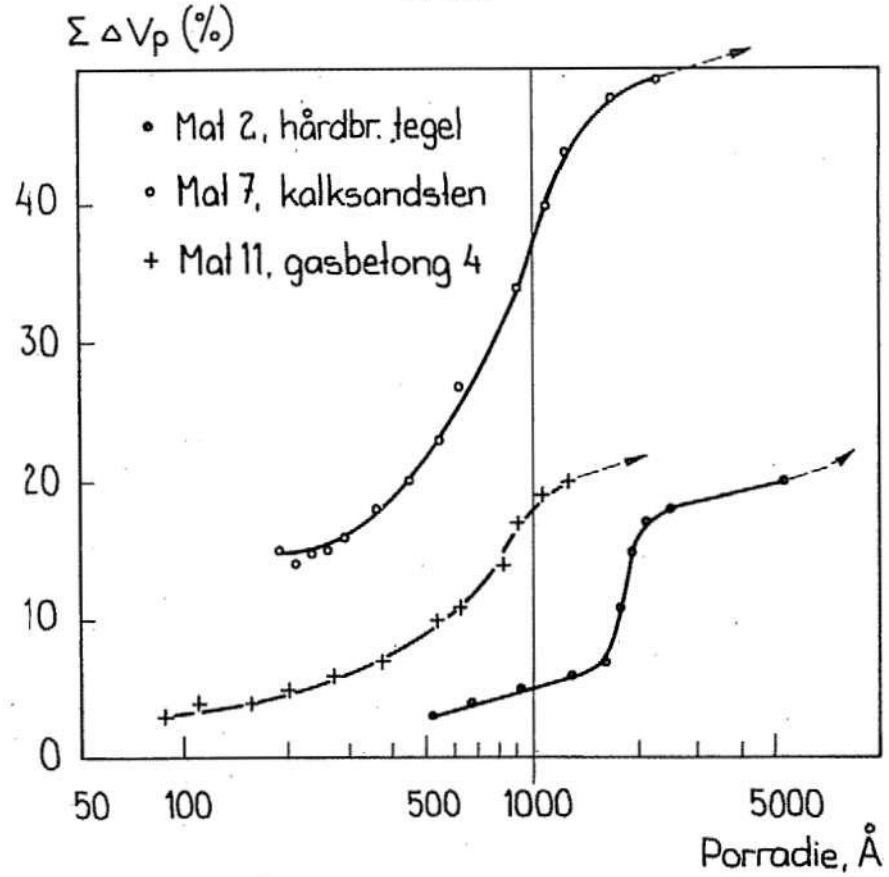


FIG 99 Exempel på bestämning av porstorleksfördelning i området 100 Å-5000 Å med utgångspunkt från icke frysbara vattenmängder. Ekv (83).
Pore-size distributions calculated from non-freezable water contents, eq (83).

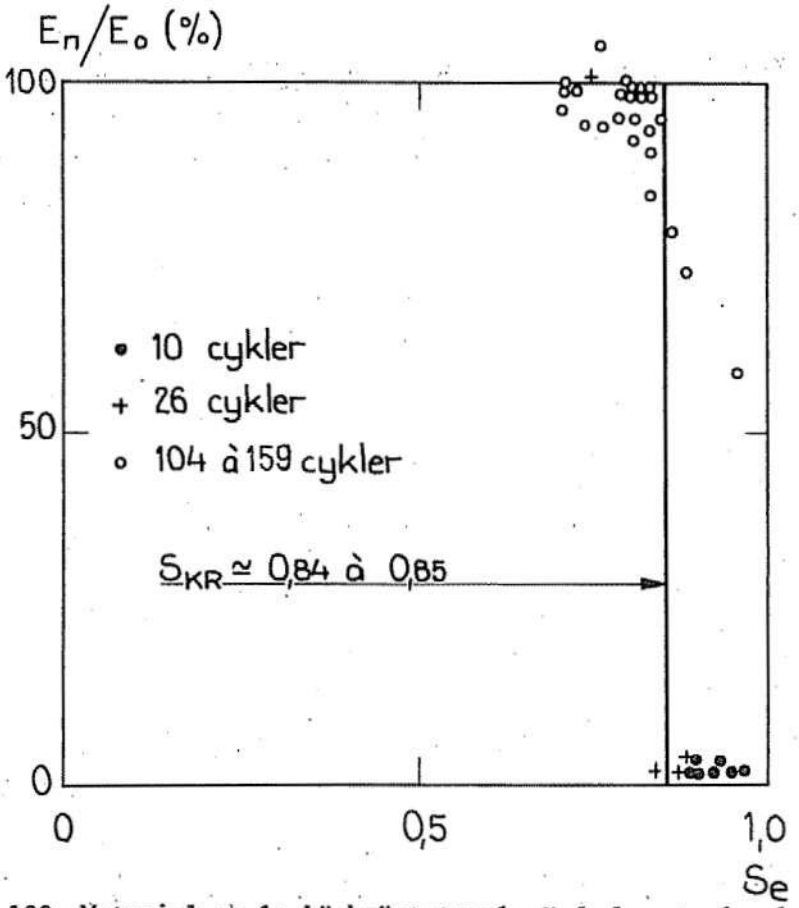


FIG 100 Material nr 1: Lösbränt tegel. *Underburnt clay brick.*

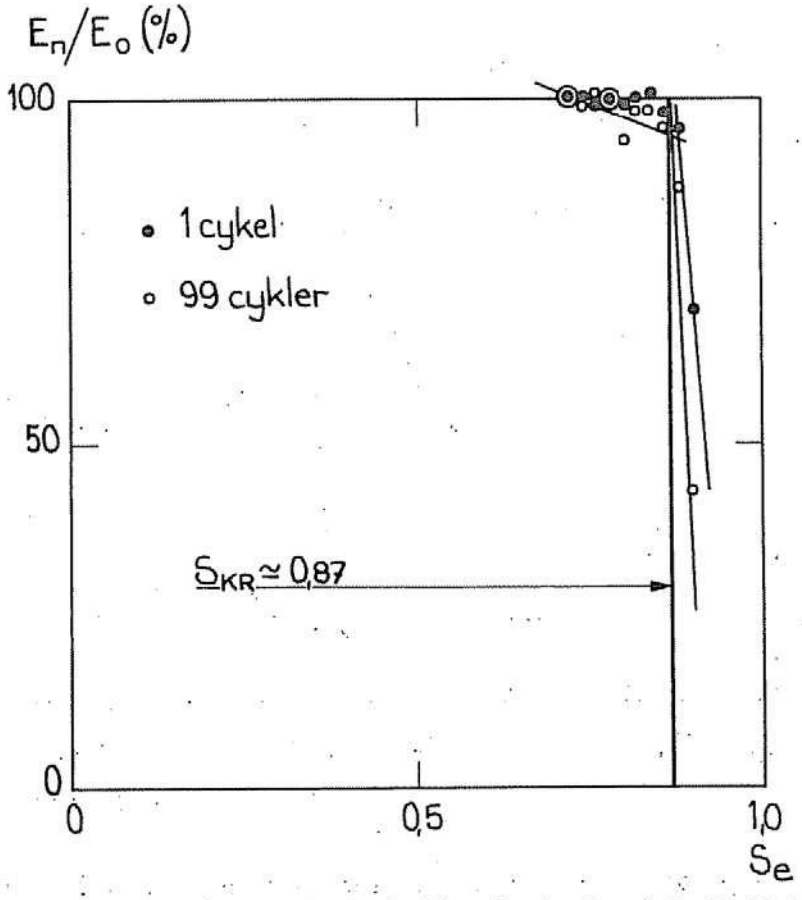


FIG 101 Material nr 1: Lösbränt tegel. Storlek 40x40x120. *Underburnt clay brick.*

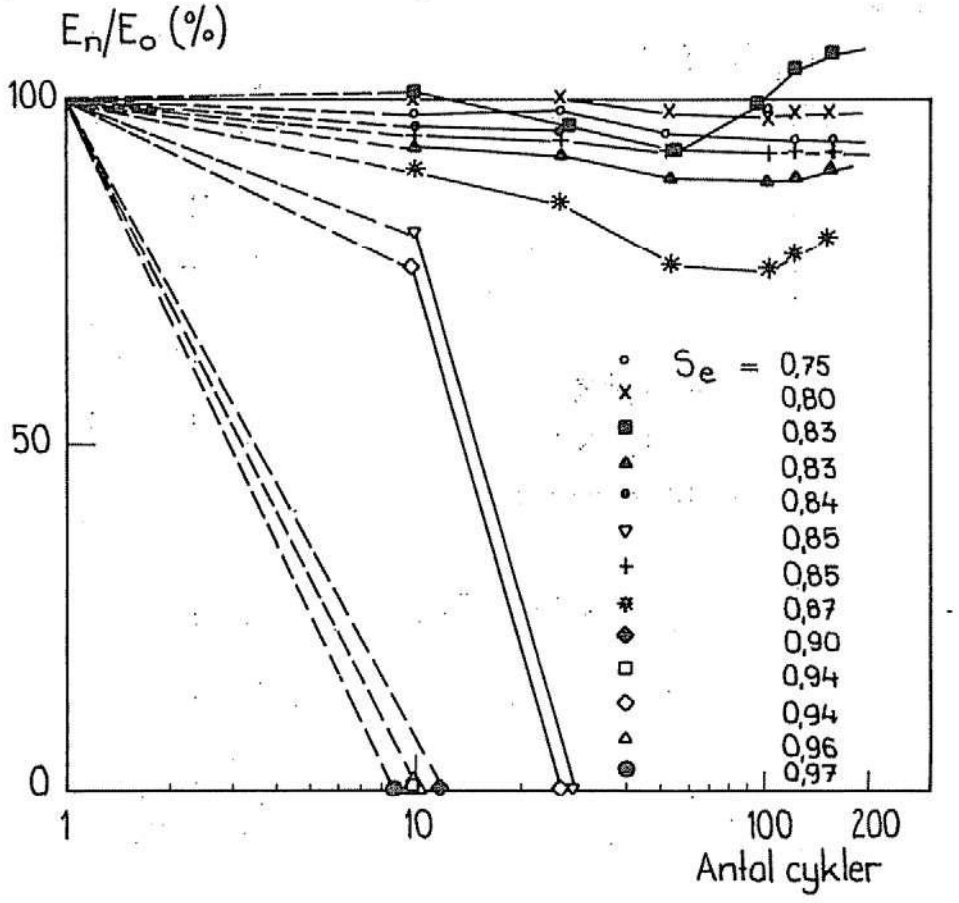


FIG 102 Material nr 1: Lösbränt tegel. *Underburnt clay brick.*

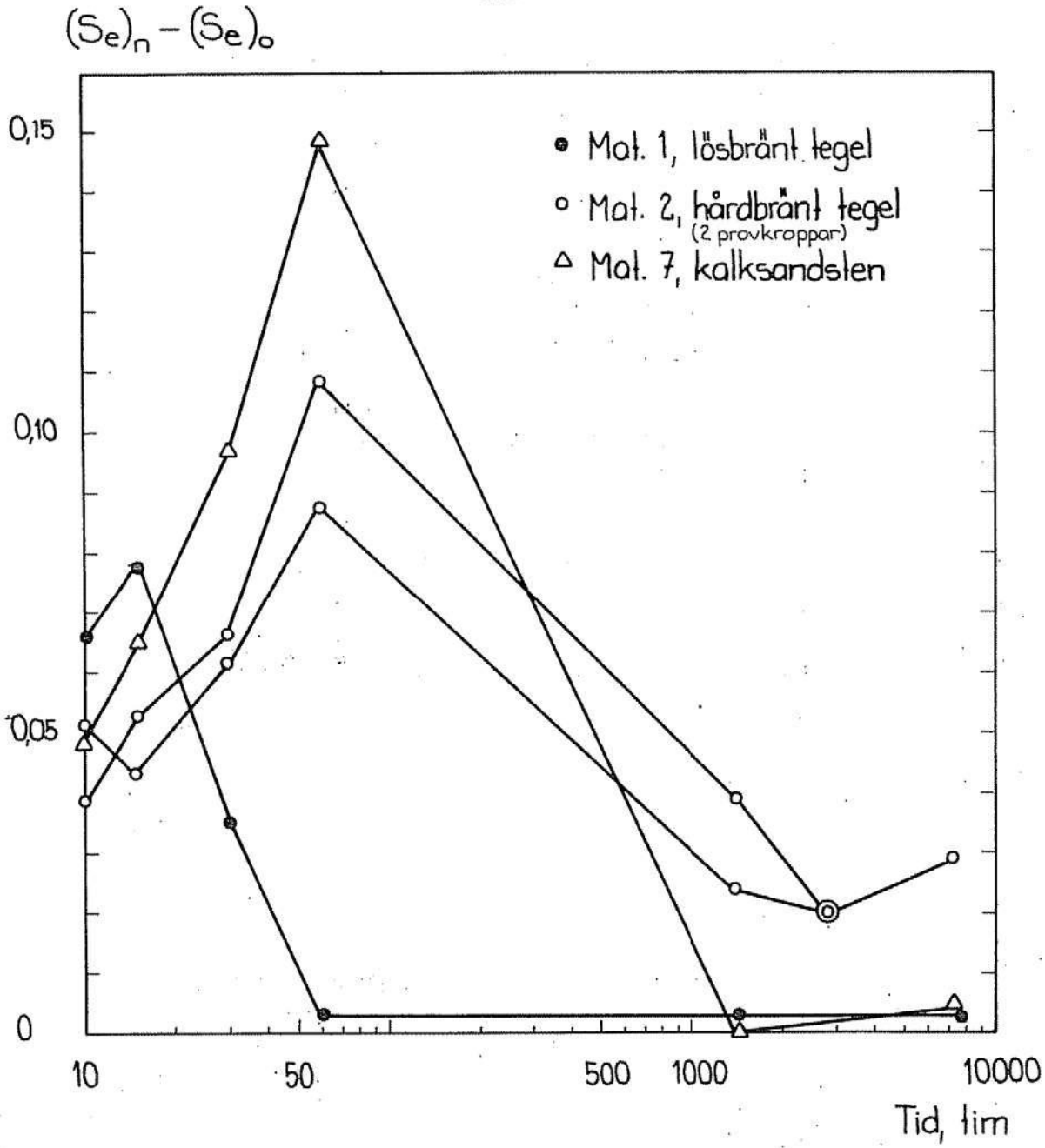


FIG 103 Material nr 1, 2, 7: Inverkan av 99 fryscykler på olika materials vattenupptagningsförmåga. *Influence of 99 freezing cycles on water absorption.*

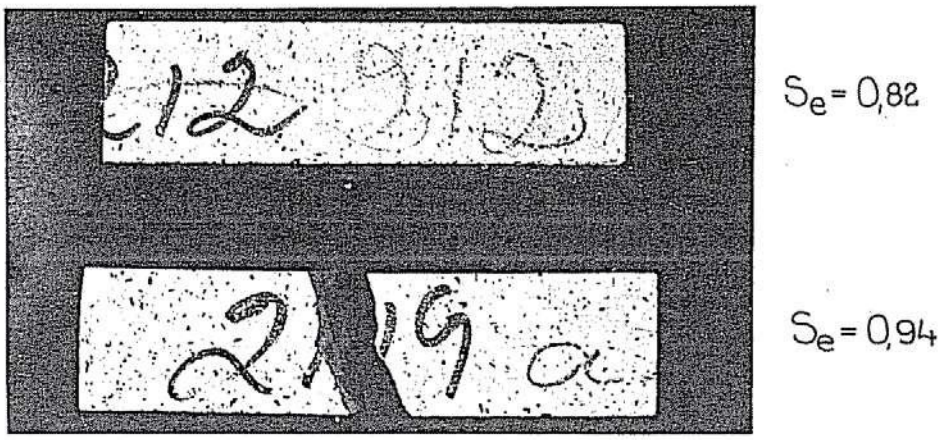


FIG 104 Material nr 1: Lösbränt tegel. Oskadad och skadad provkropp. *Underburnt clay brick. Intact and damaged specimen.*

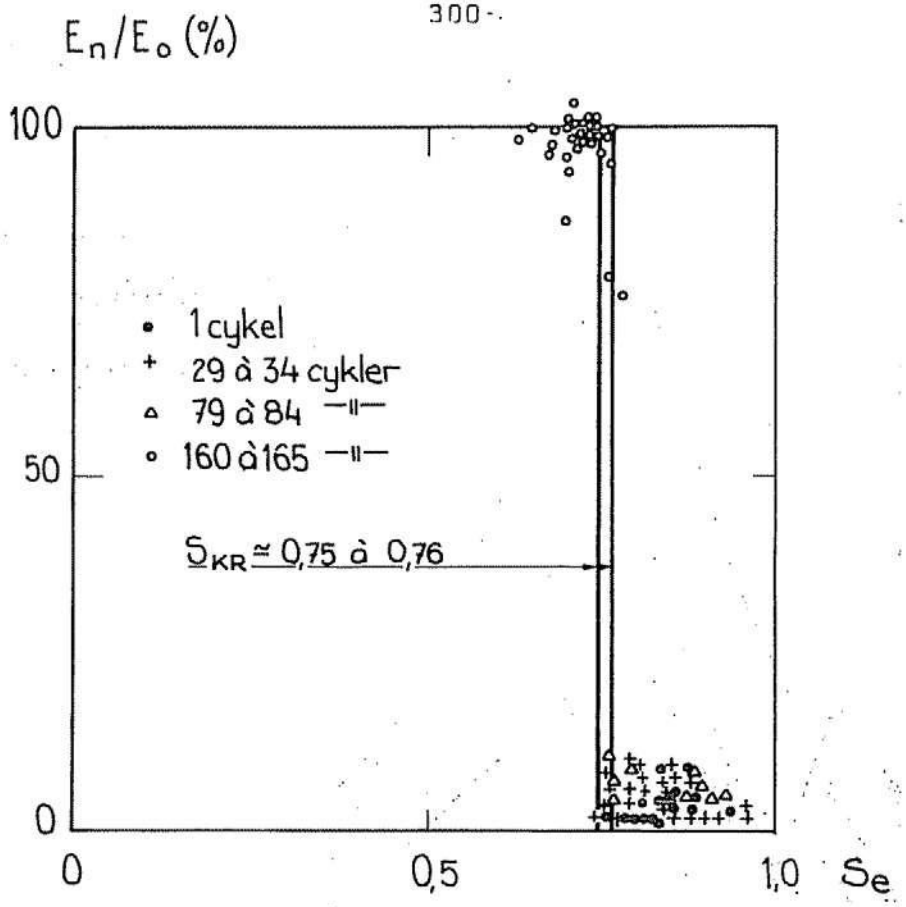


FIG 105 Material nr 2: Hårdbränt tegel. *Well burnt clay brick.*

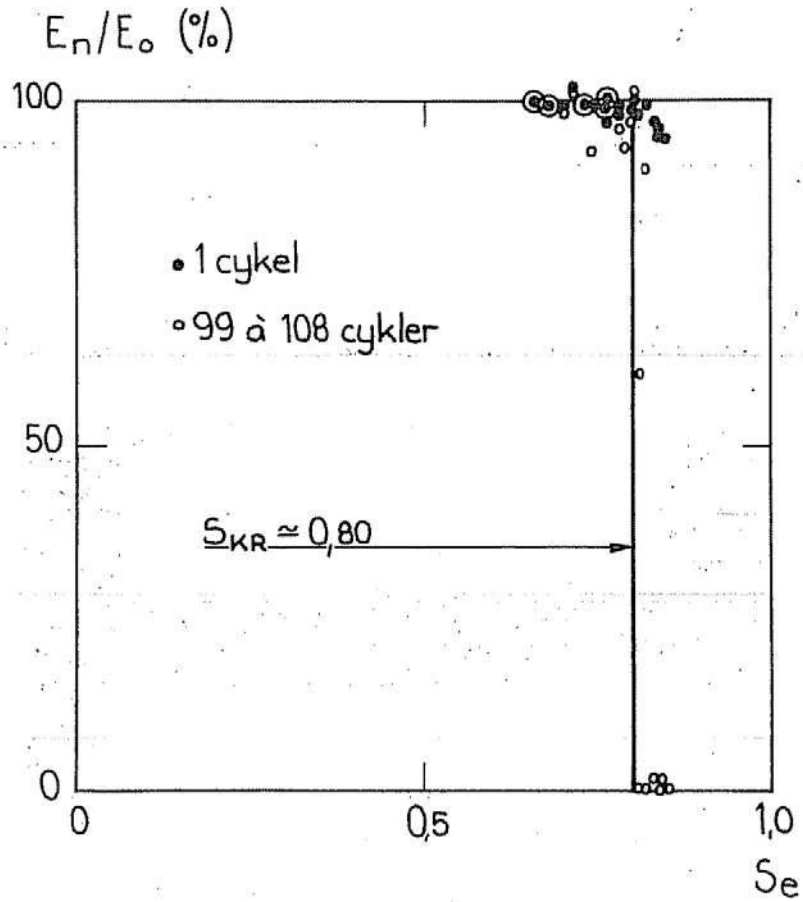


FIG 106 Material nr 2: Hårdbränt tegel. Storlek 40x40x120.
Well burnt clay brick.

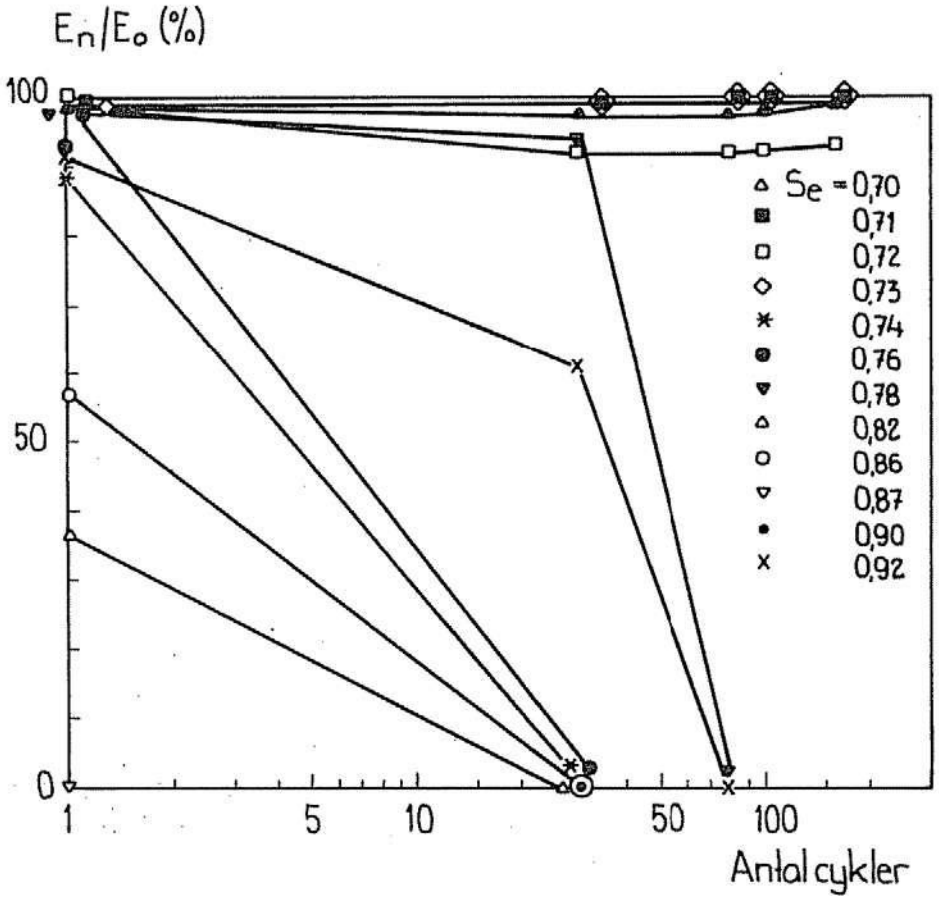


FIG 107 Material nr 2: Hårdbränt tegel. *Well burnt clay brick.*

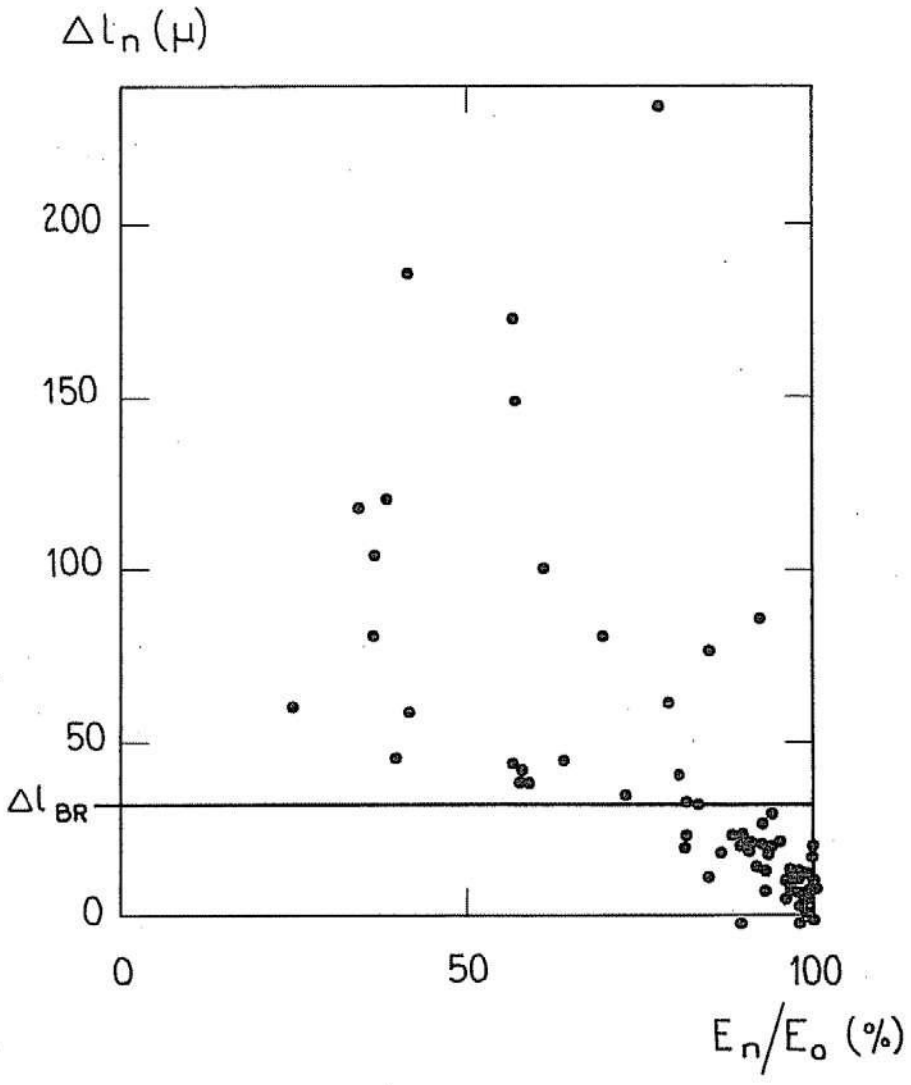


FIG 108 Material nr 2: Härdbränt tegel. Samband mellan svällning och E-modulförlust. *Well burnt clay brick. Connection between expansion and loss in Young's modulus.*

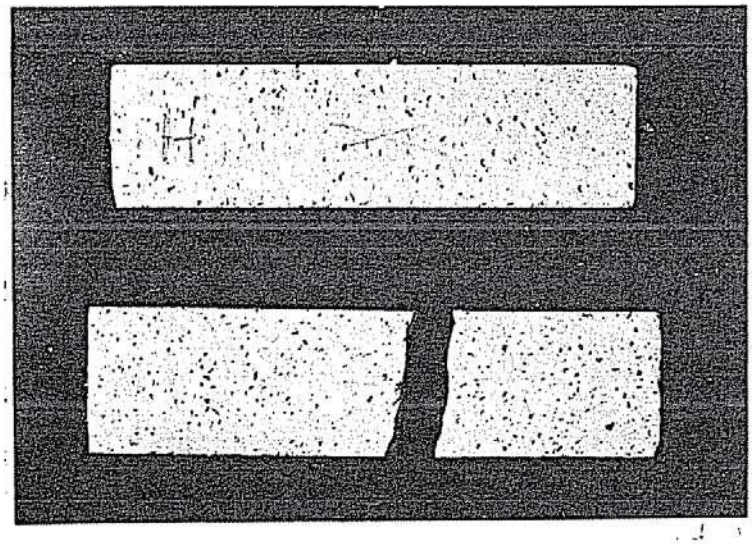


FIG 109 a Material nr 2: Hårdbränt tegel 30x30x120 mm. Oskadad och skadad provkropp. *Well burnt clay brick. Intact and damaged specimen.*

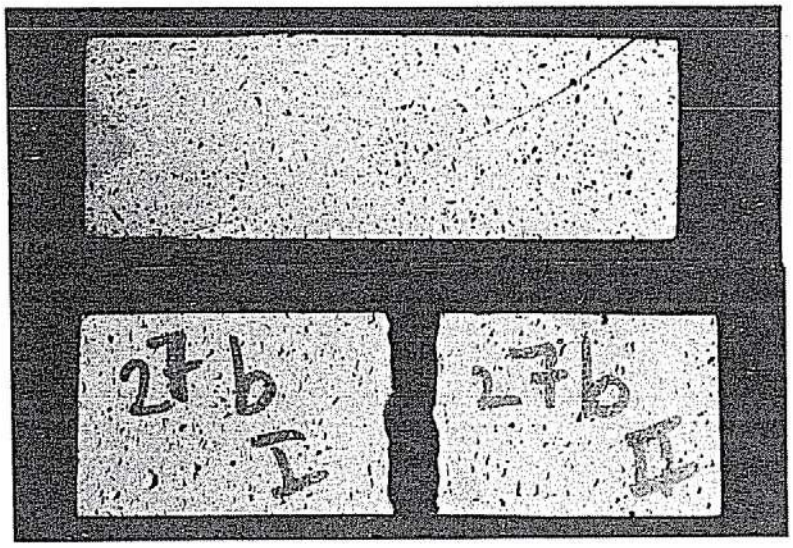


FIG 109 b Material nr 2: Hårdbränt tegel 40x40x120 mm. Oskadad och skadad provkropp. *Well burnt clay brick. Intact and damaged specimen.*

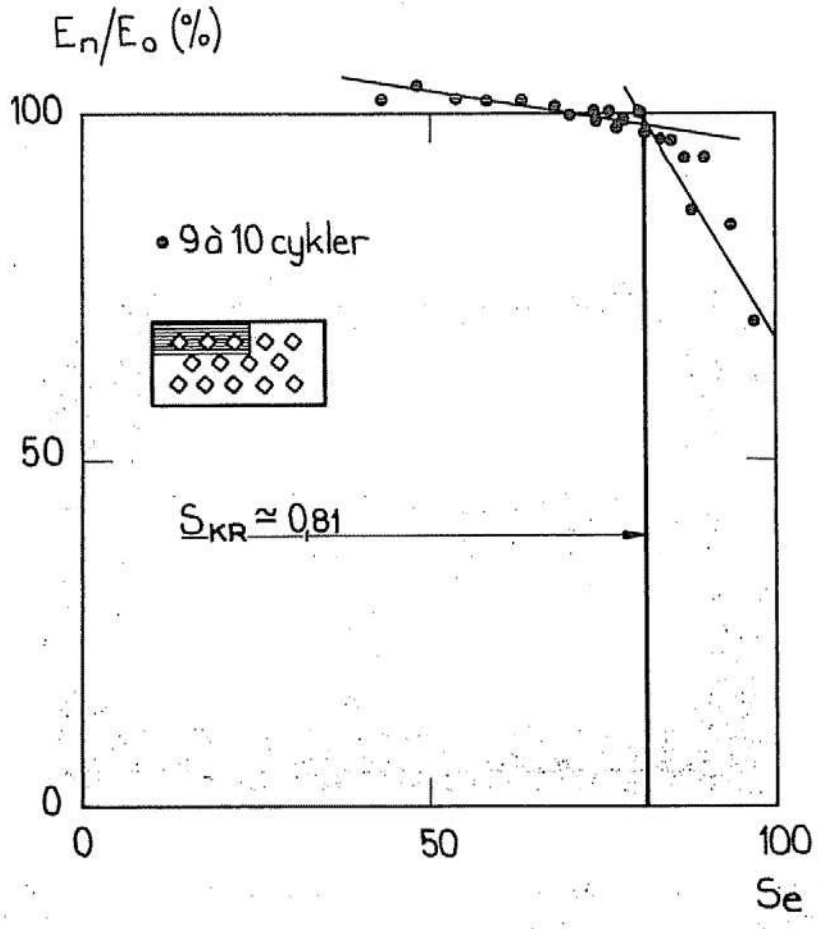


FIG 110 Material nr 3 a: Gittertegel, yttre del. *Perforated brick, outer part.*

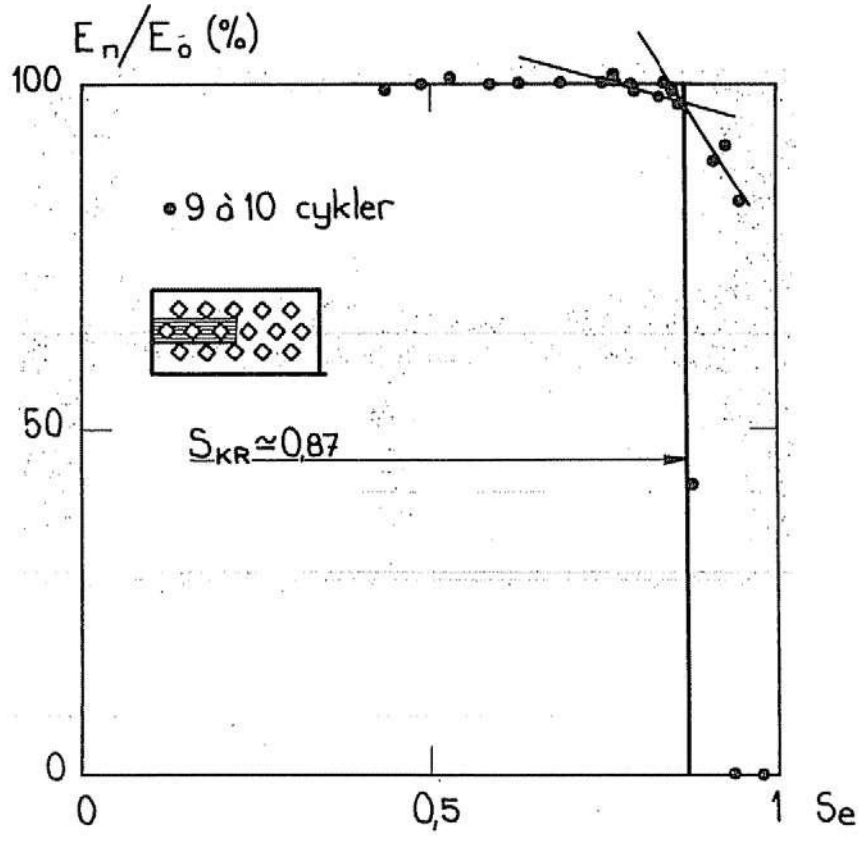


FIG 111 Material nr 3 b: Gittertegel, inre del. *Perforated brick, inner part.*

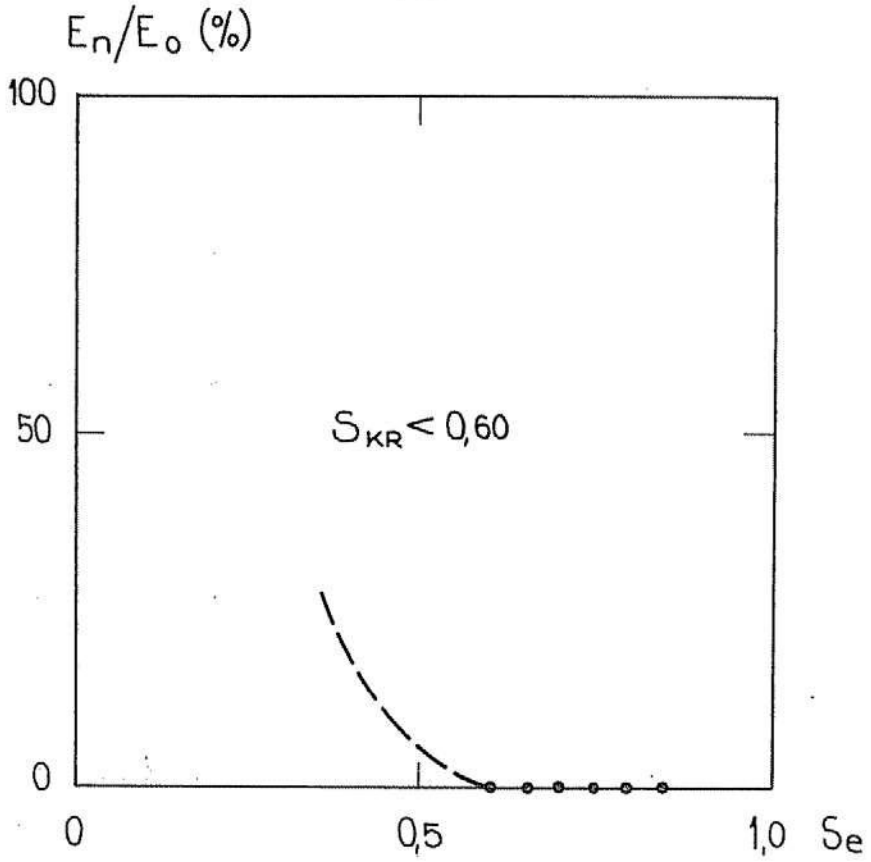


FIG 112 Material nr 4: Månstorps Gavlar 1500-tals tegel. *Clay brick from 16th century.*

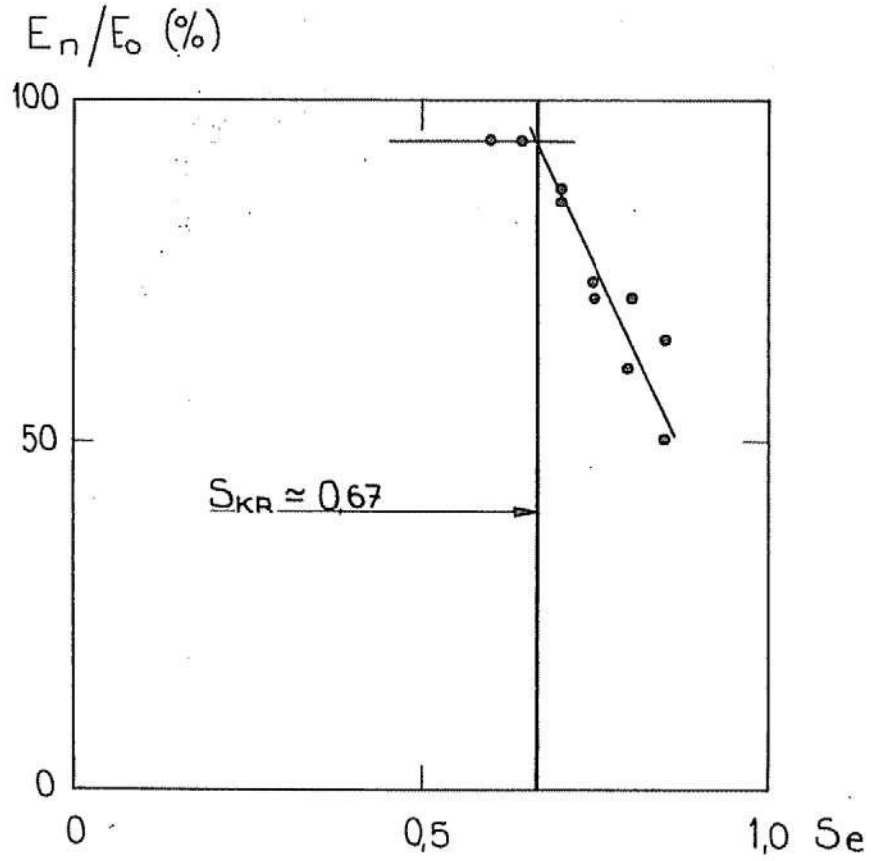


FIG 113 Material nr 5: Månstorps Gavlar.1930-tals tegel. *Clay brick.*

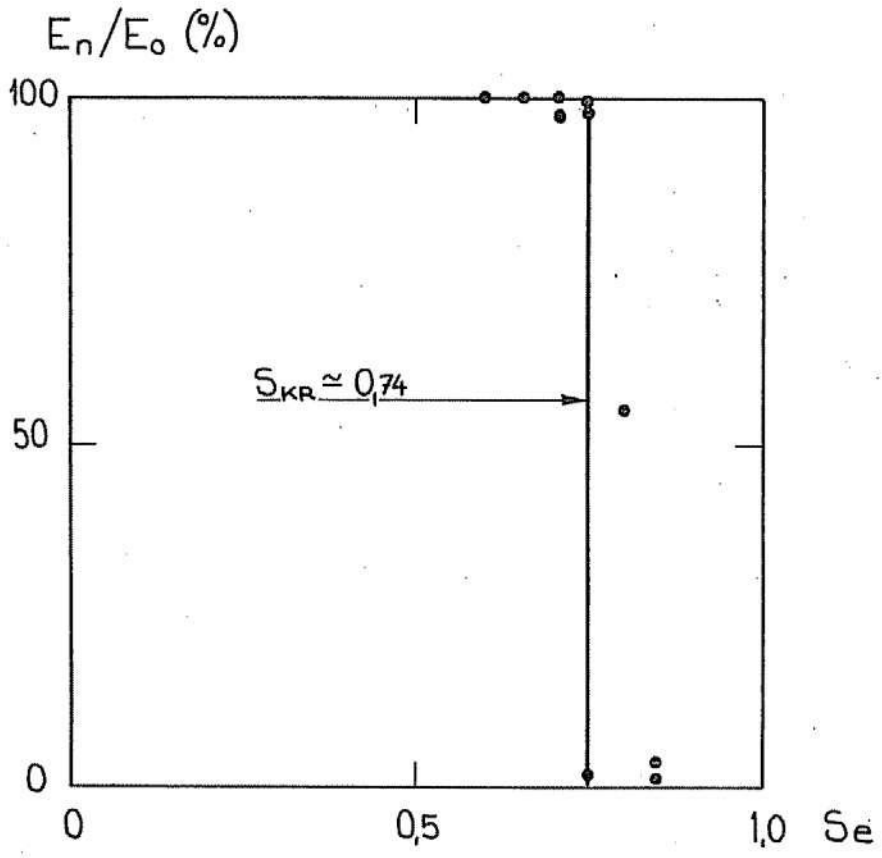


FIG 114 Material nr 6: Månstorps Gavlar. 1960-tals tegel. *Clay brick.*

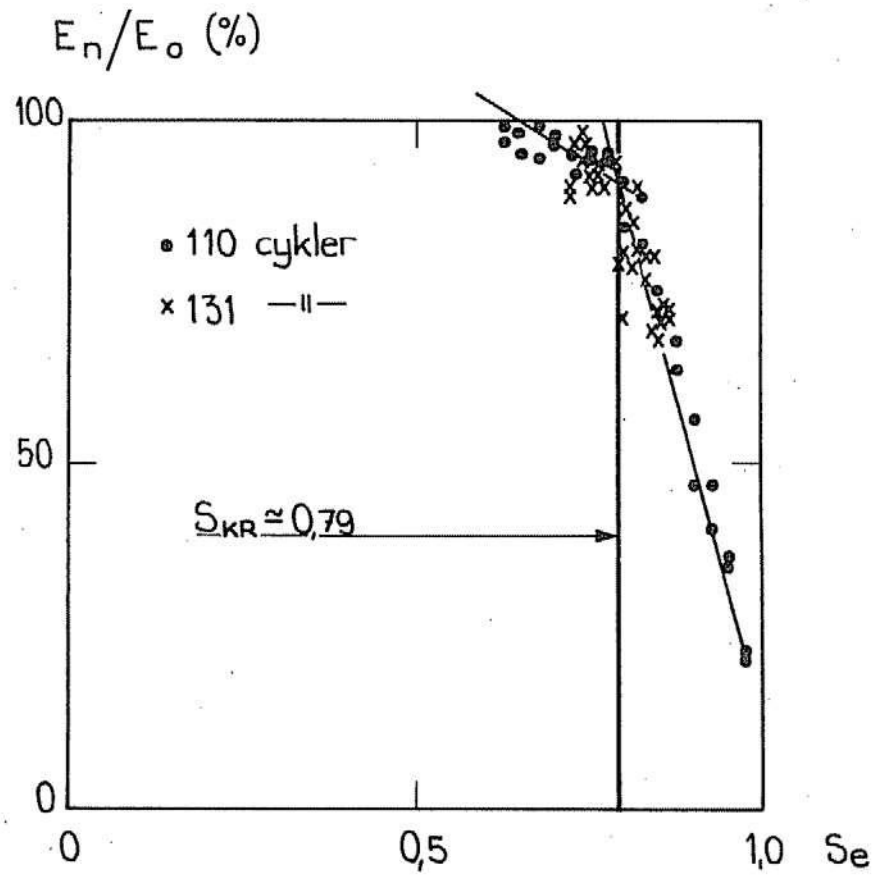


FIG 115 Material nr 7: Kalksandsten. *Sand lime brick.*

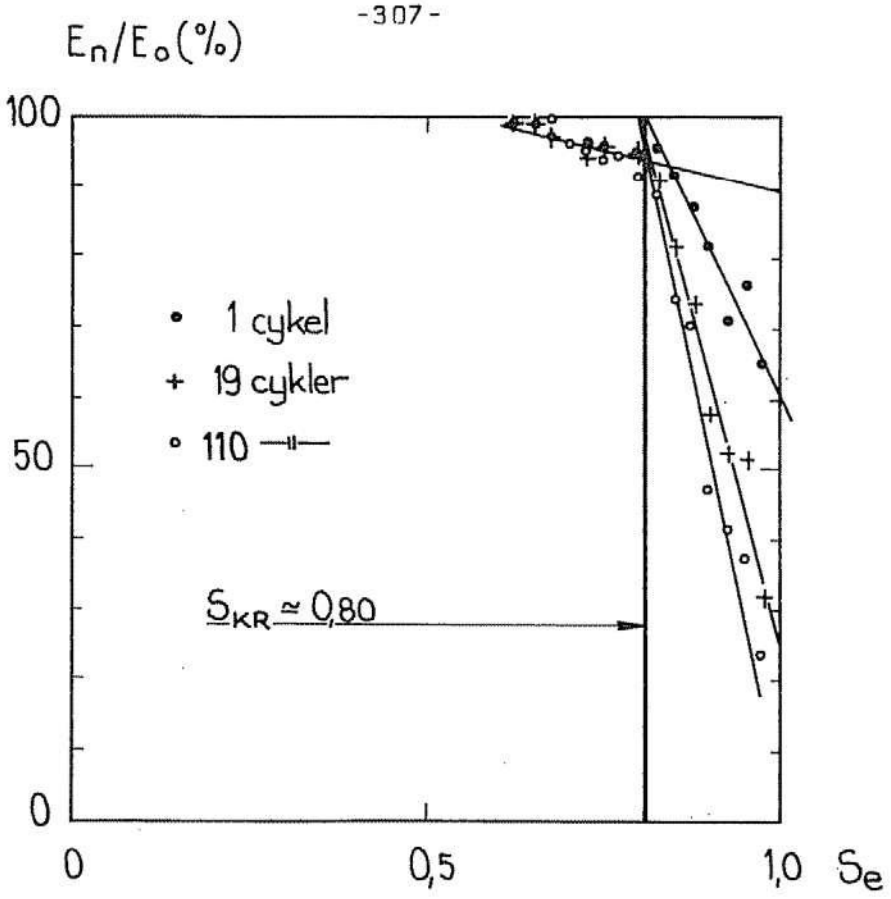


FIG 116 Material nr 7: Kalksandsten. Inverkan av antal cykler på kritiska vattenmättnadsgrader. *Sand lime brick. Influence on* S_{CR} *of number of cycles.*

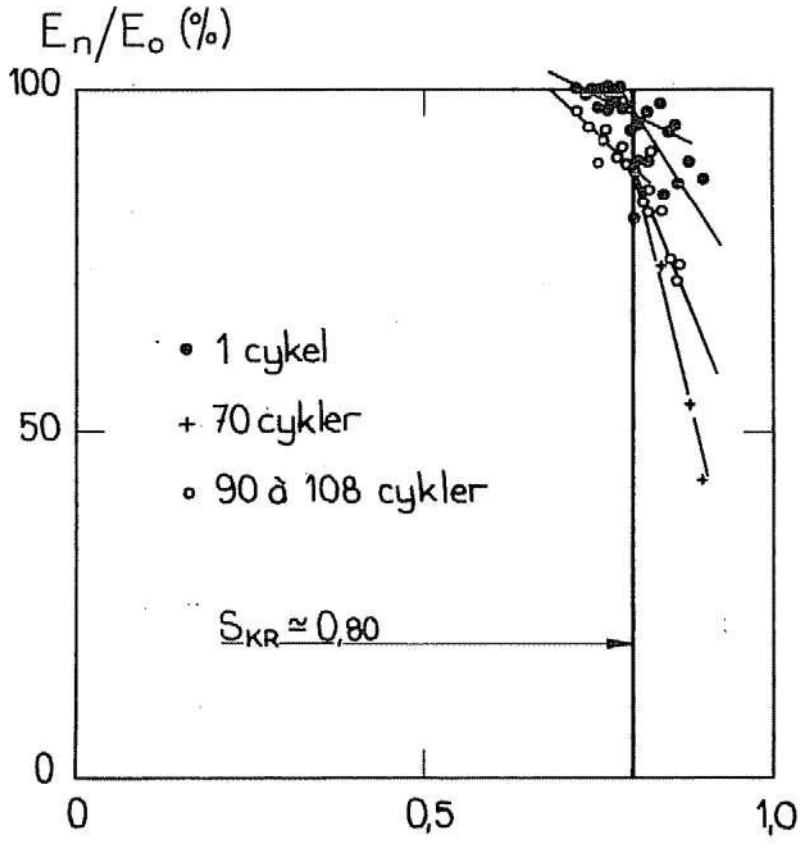


FIG 117 Material nr 7: Kalksandsten 40x40x120 mm. *Sand lime brick.*

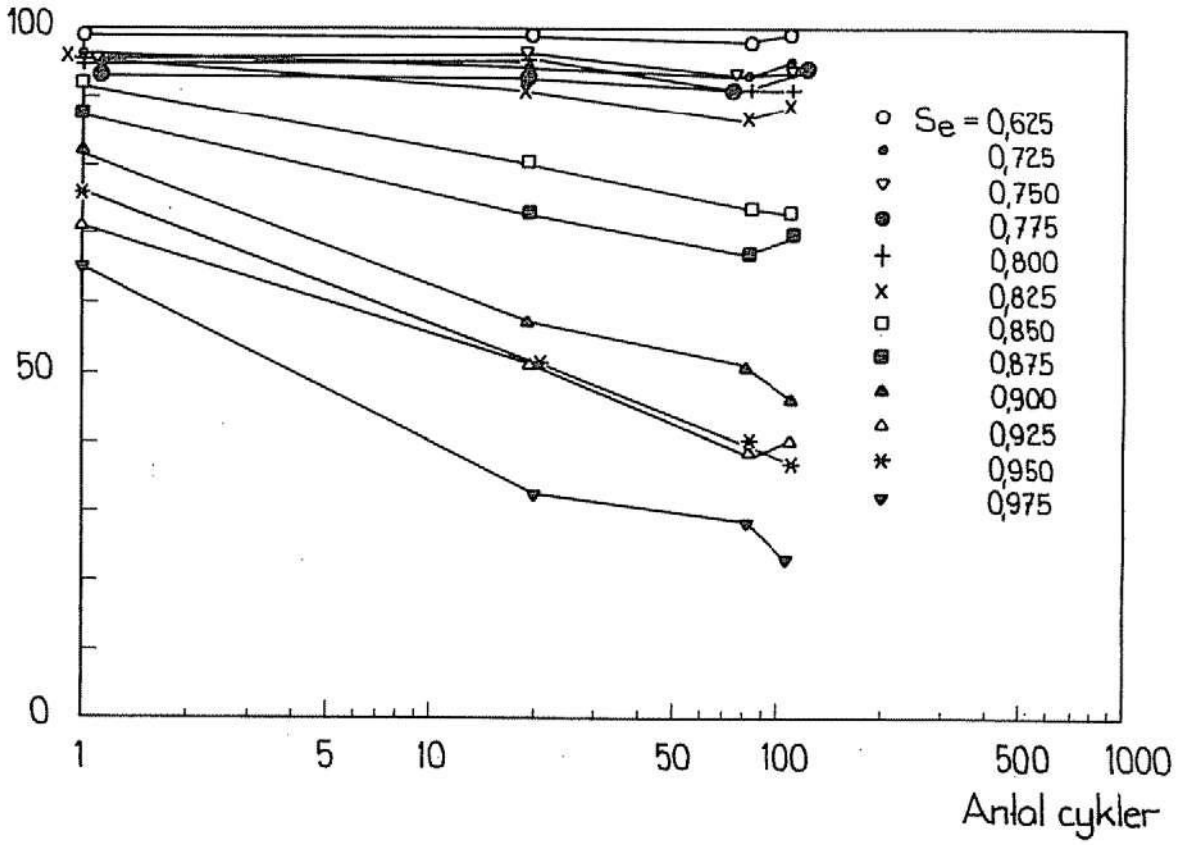


FIG 118 Material nr 7: Kalksandsten. *Sand lime brick.*

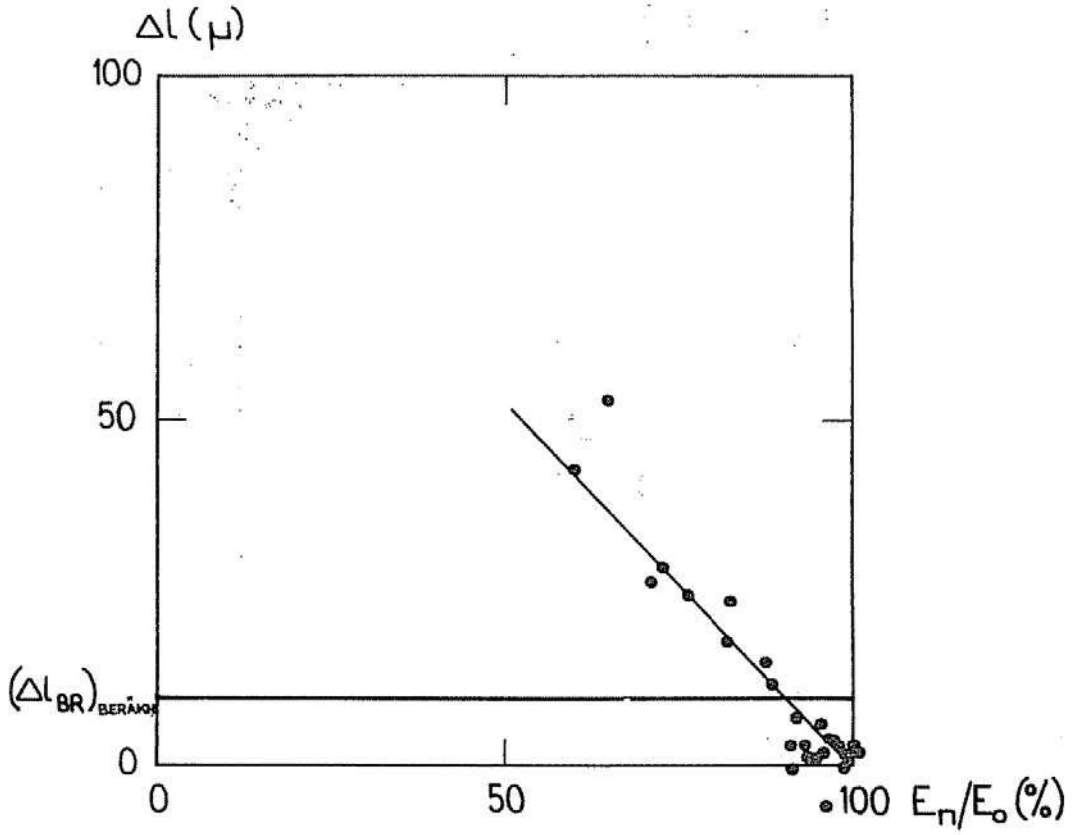


FIG 119 Material nr 7: Kalksandsten. Samband mellan svällning och E-modulförlust. *Sand lime brick. Connections between expansion and loss in Young's modulus.*

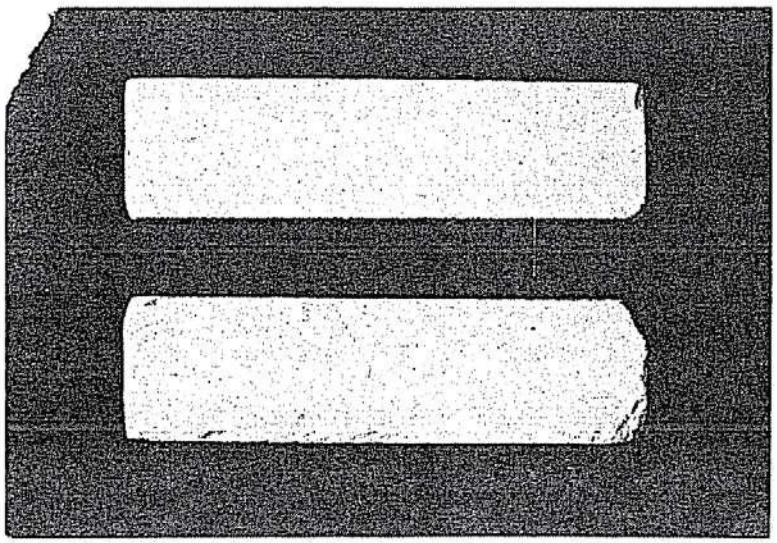


FIG 120. Material nr 7: Kalksandsten. Oskadad och skadad provkropp. *Sand lime brick. Intact and damaged specimen.*

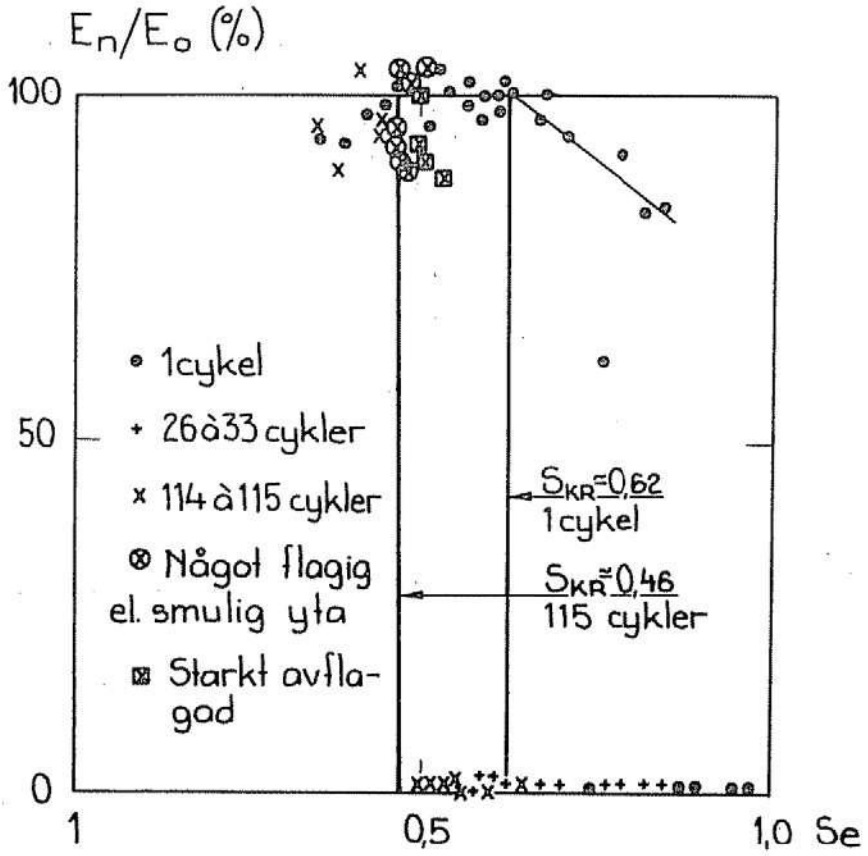


FIG 121 Material nr 8: Gasbetong typ 1. *Cellular concrete type1.*

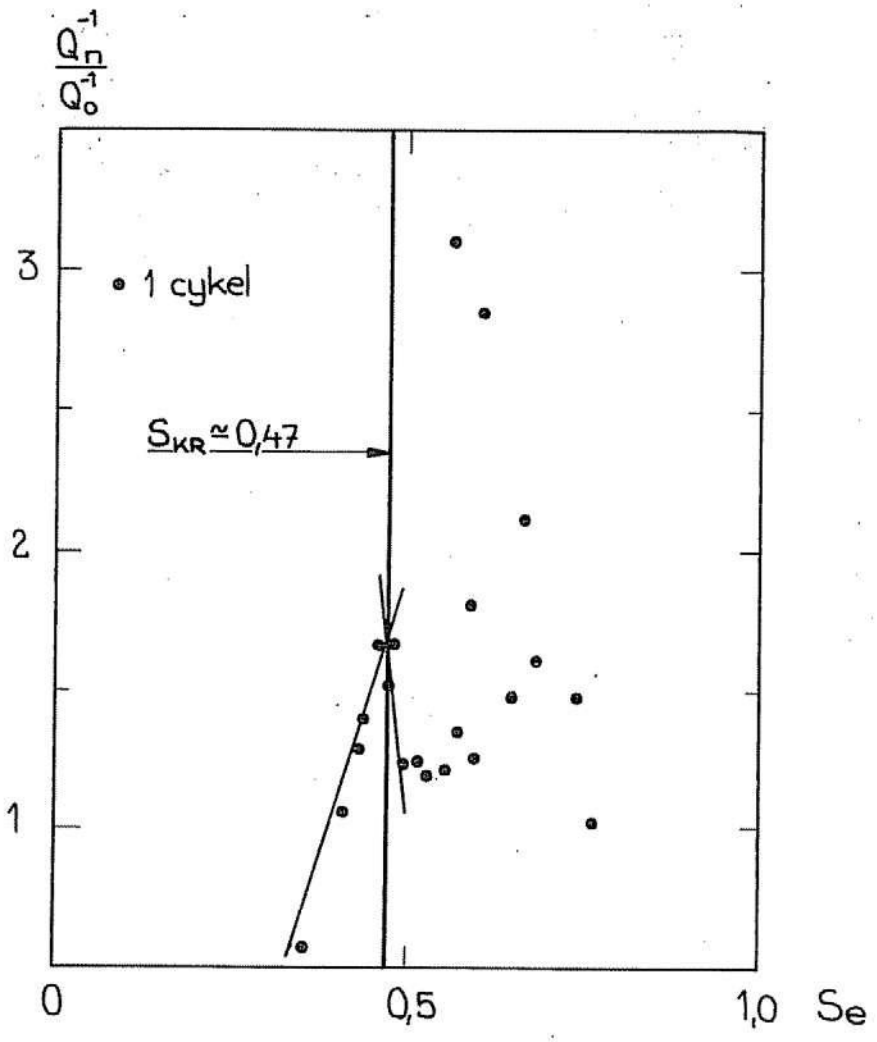


FIG 122 Material nr 8: Gasbetong typ 1. *Cellular concrete type 1.*

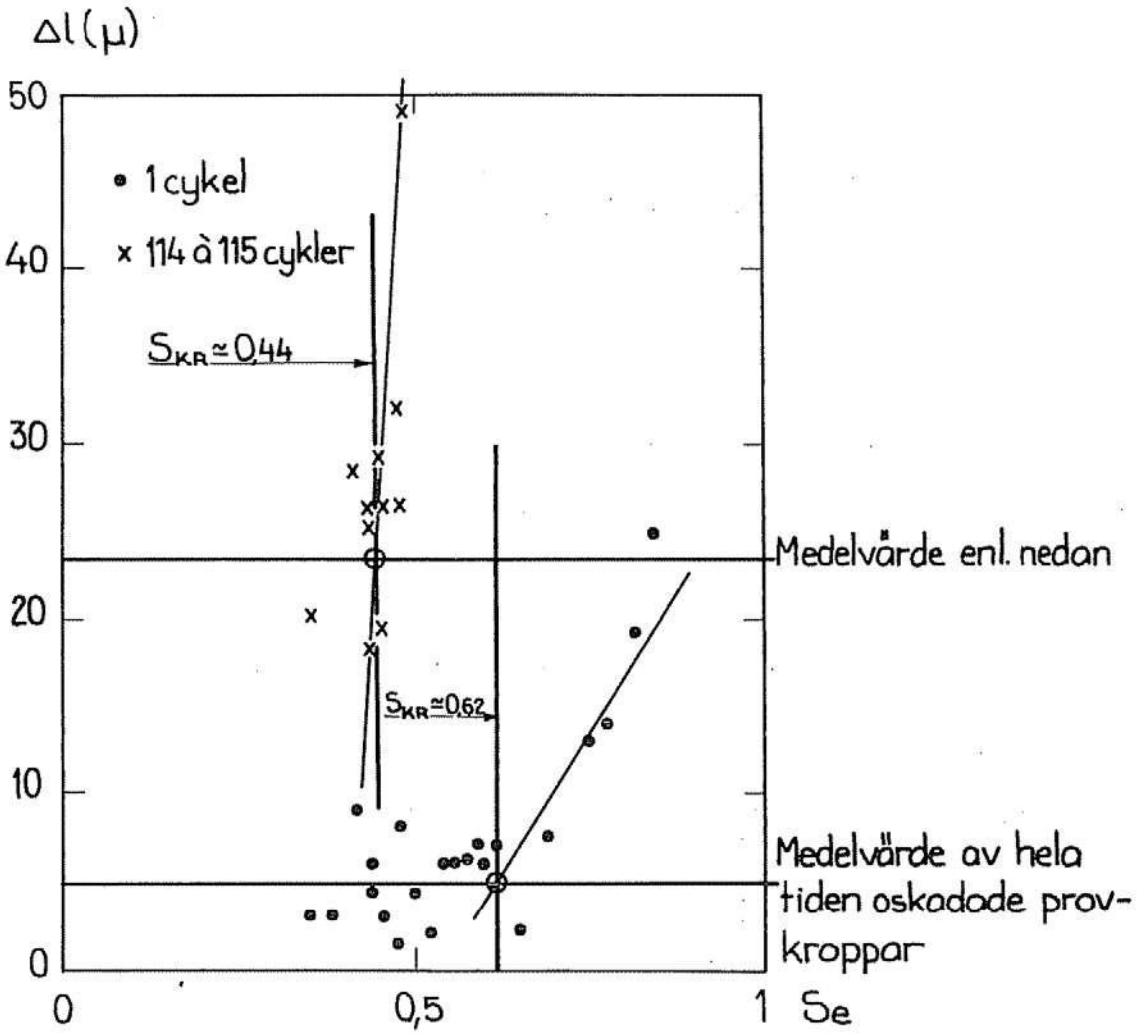


FIG 123 Material nr 8: Gasbetong typ 1. *Cellular concrete type 1.*

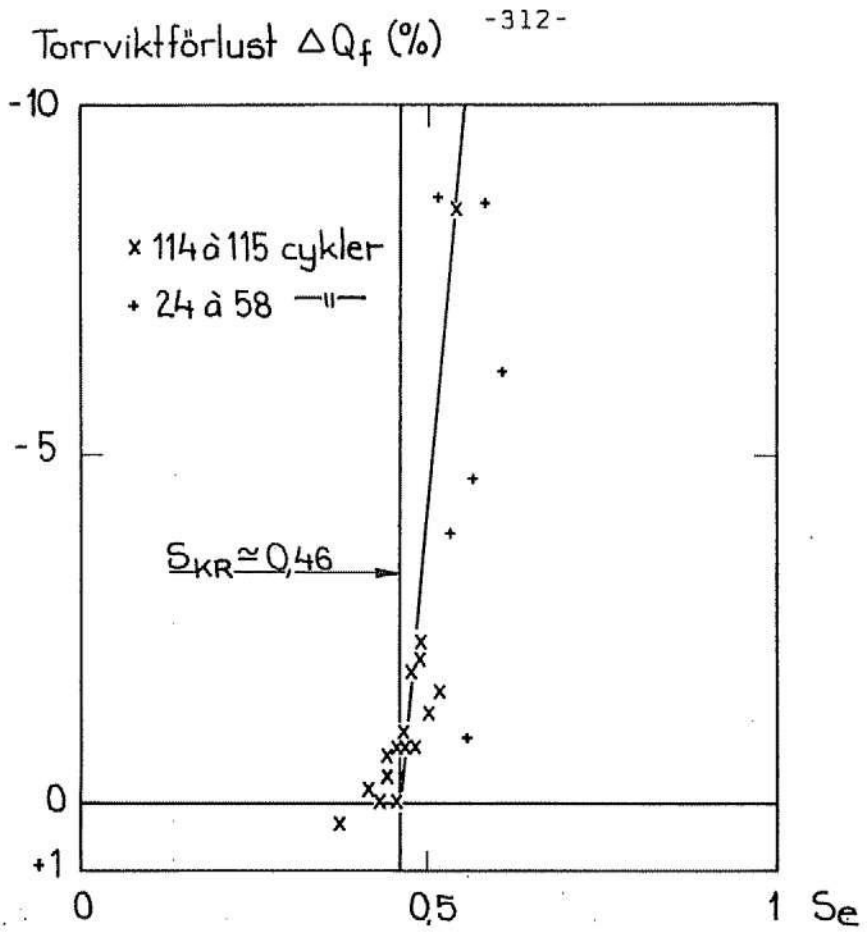


FIG 124 Material nr 8. Gasbetong typ 1. *Cellular concrete type 1.*

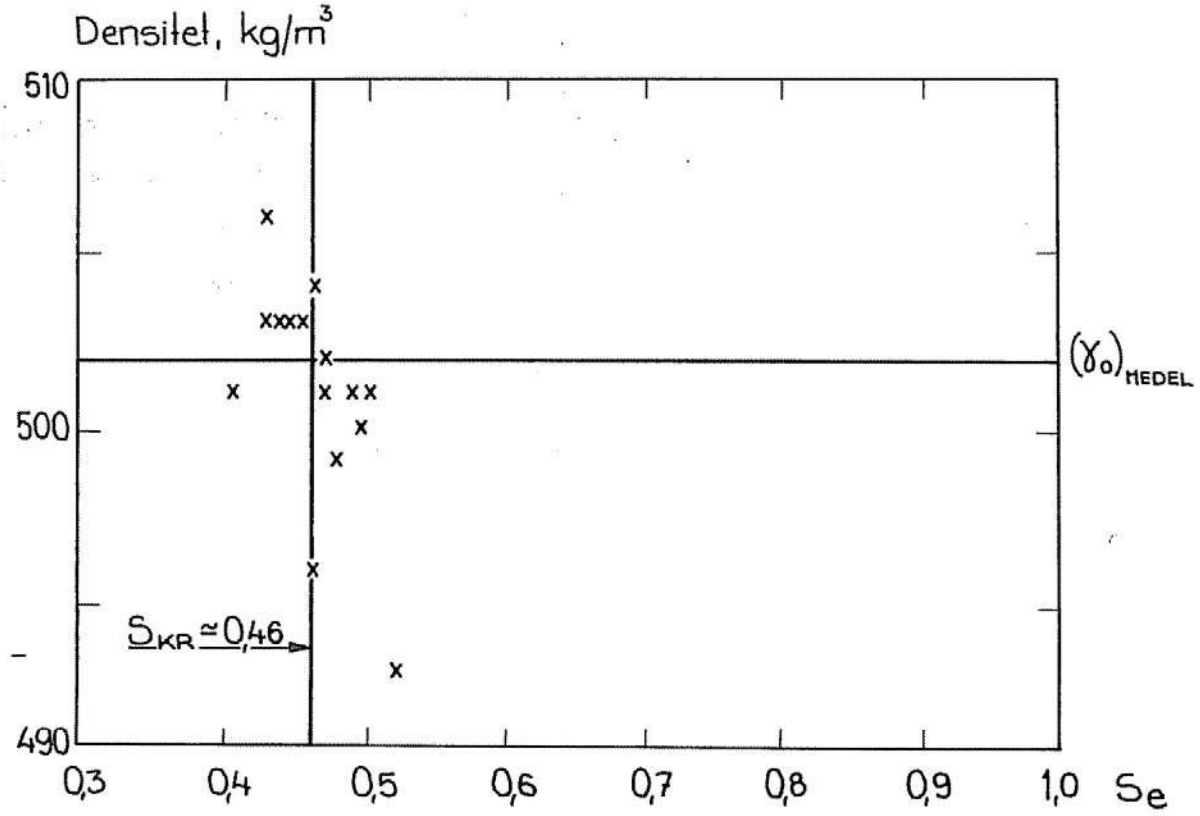


FIG 125 Material nr 8: Gasbetong typ 1. *Cellular concrete type 1.*

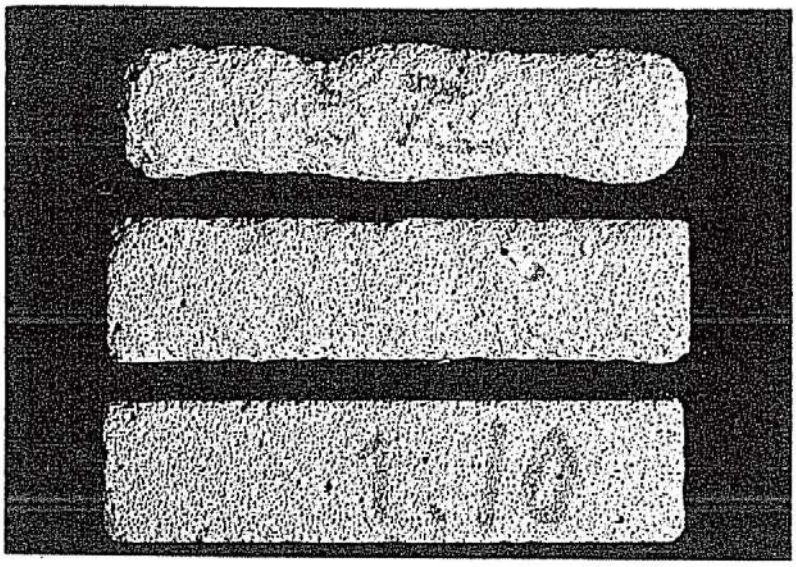


FIG 126 Material nr 8: Gasbetong typ 1. Oskadad och skadad provkropp.
Cellular concrete type 1. Intact and damaged specimen.

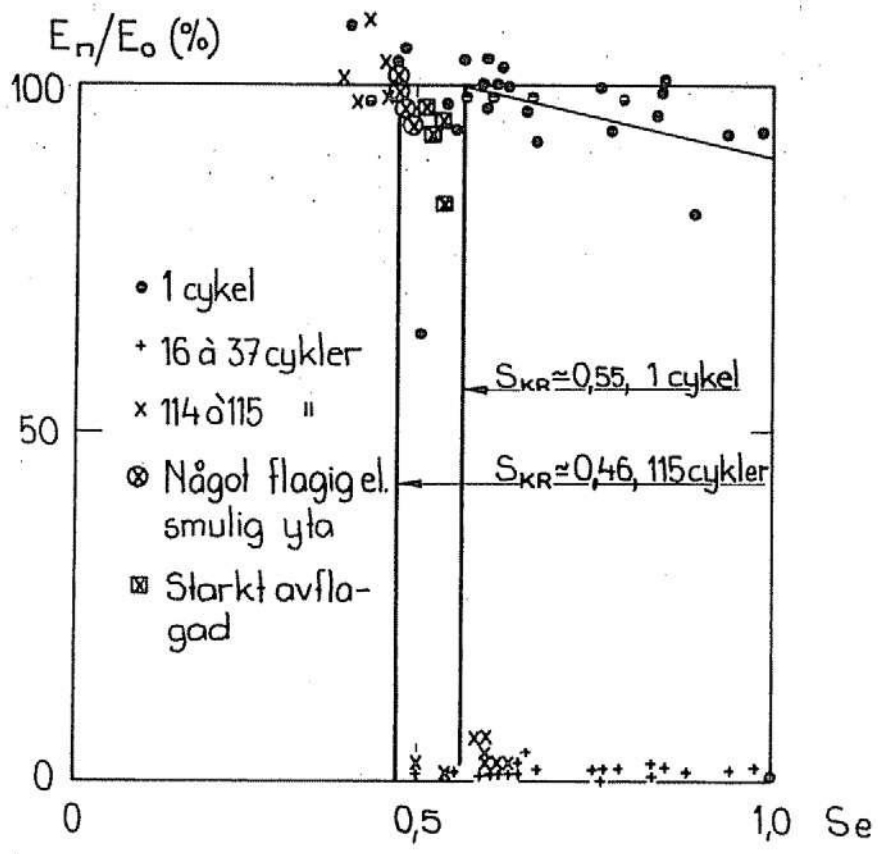


FIG 127 Material nr 9: Gasbetong typ 2. *Cellular concrete type 2.*

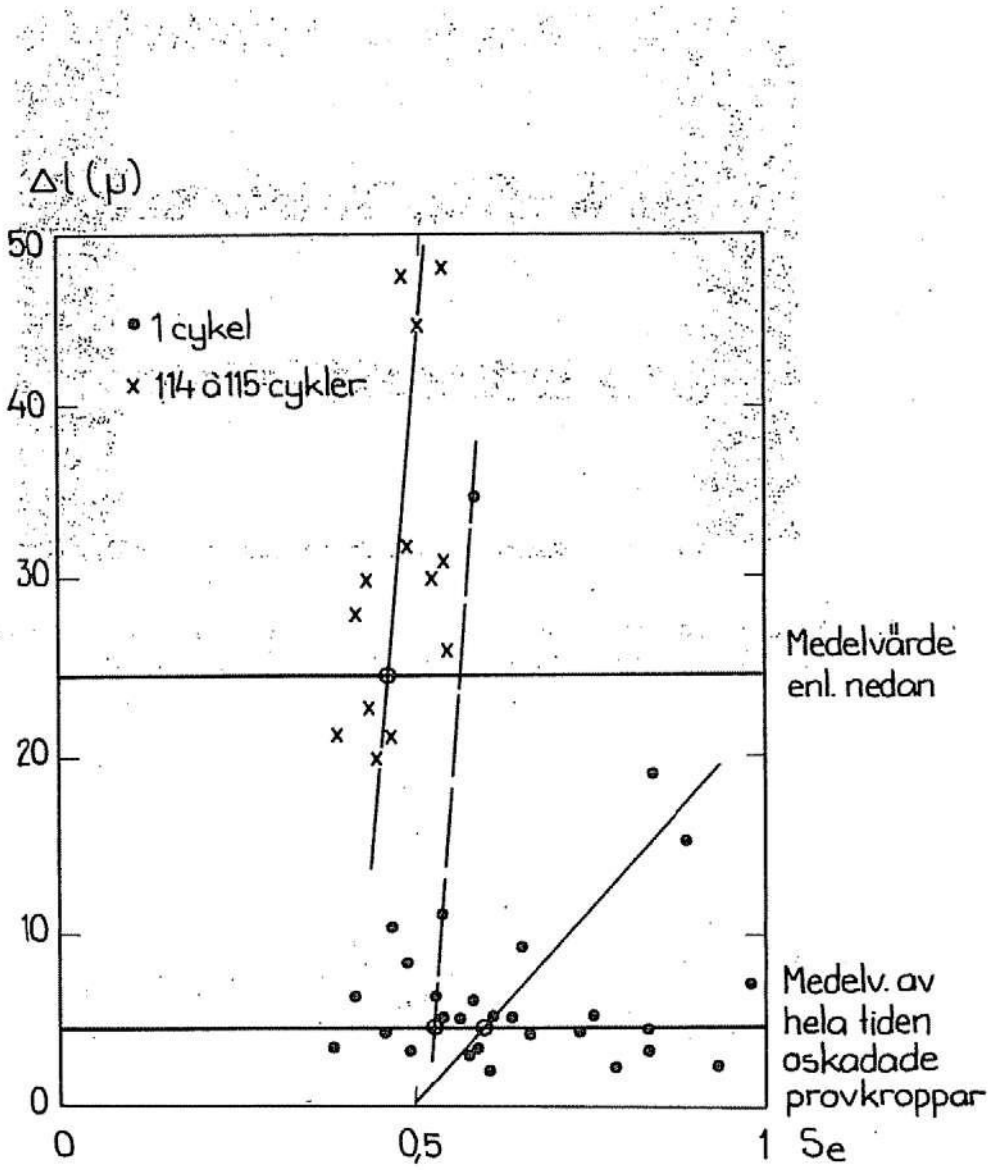


FIG 128 Material nr 9. Gasbetong typ 2. *Cellular concrete type 2.*

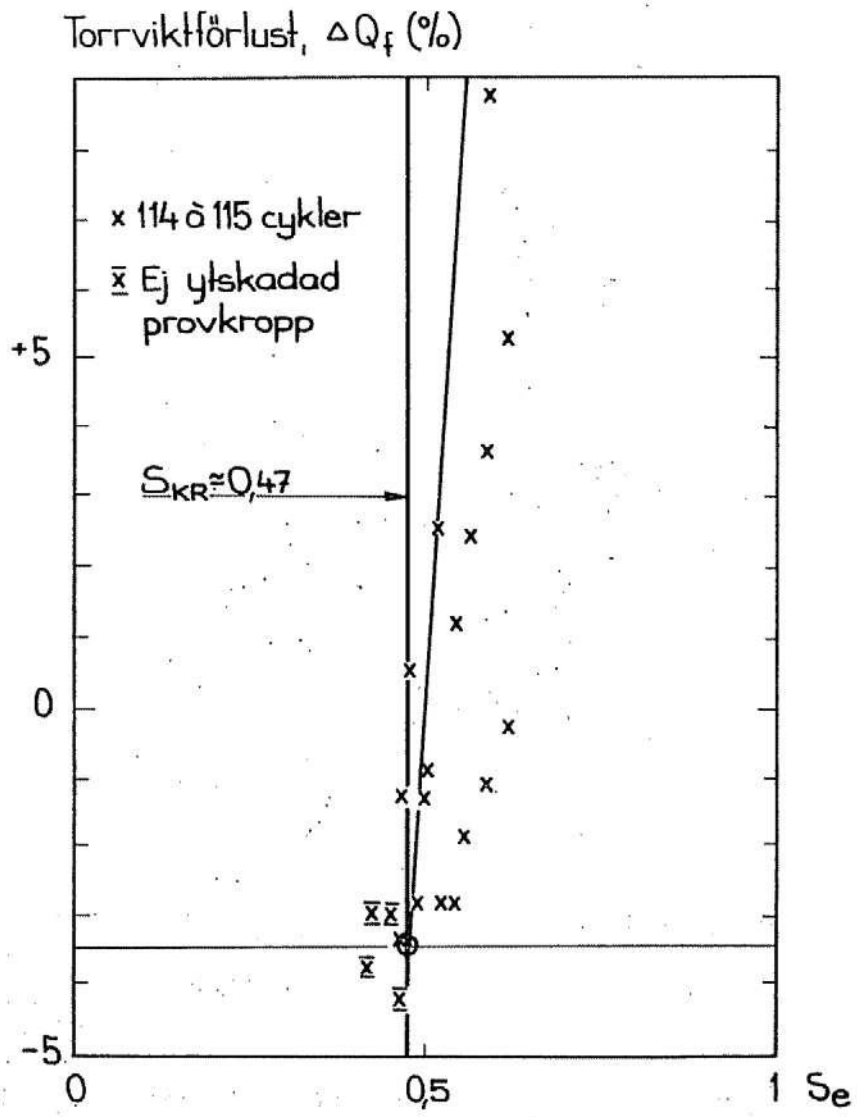


FIG 129 Material nr 9. Gasbetong typ 2. *Cellular concrete type 2.*

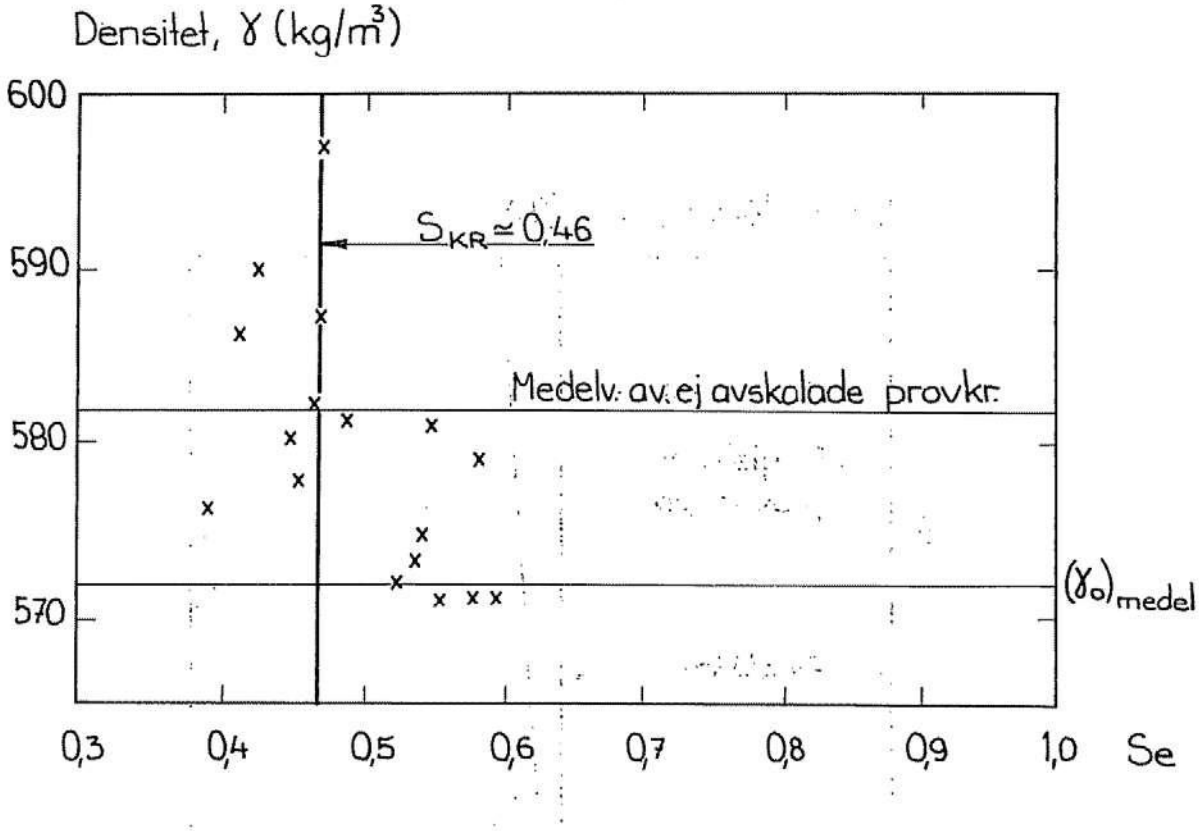


FIG 130 Material nr 9. Gasbetong typ 2. *Cellular concrete type 2.*

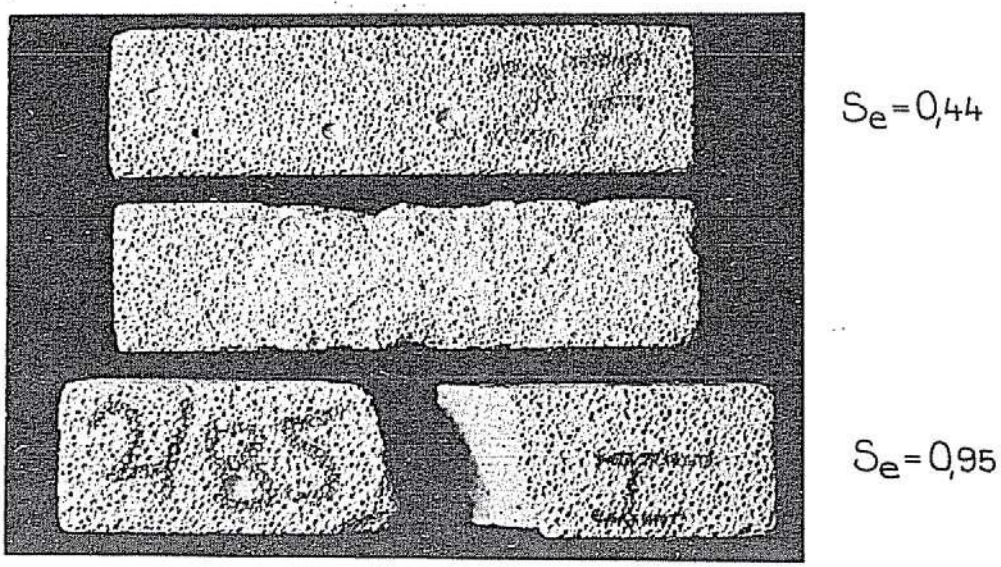


FIG 131 Material nr 9. Gasbetong typ 2. Oskadade och skadade provkroppar.
Cellular concrete type 2. Intact and damaged specimens.

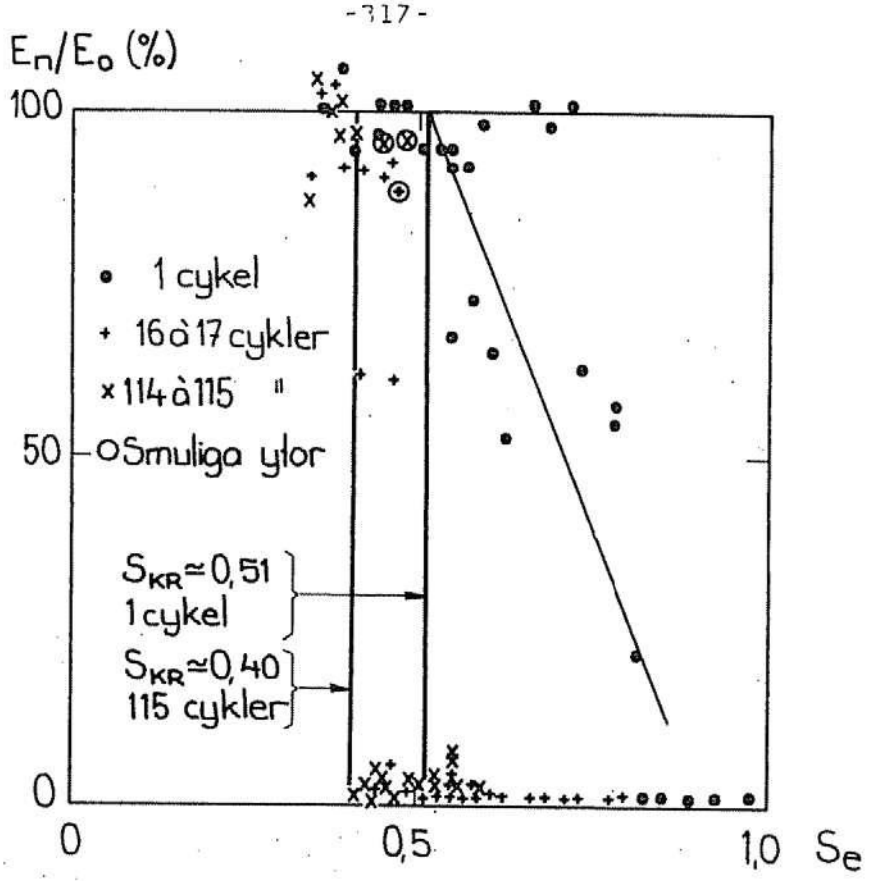


FIG 132 Material nr 10. Gasbetong typ 3. *Cellular concrete type 3.*

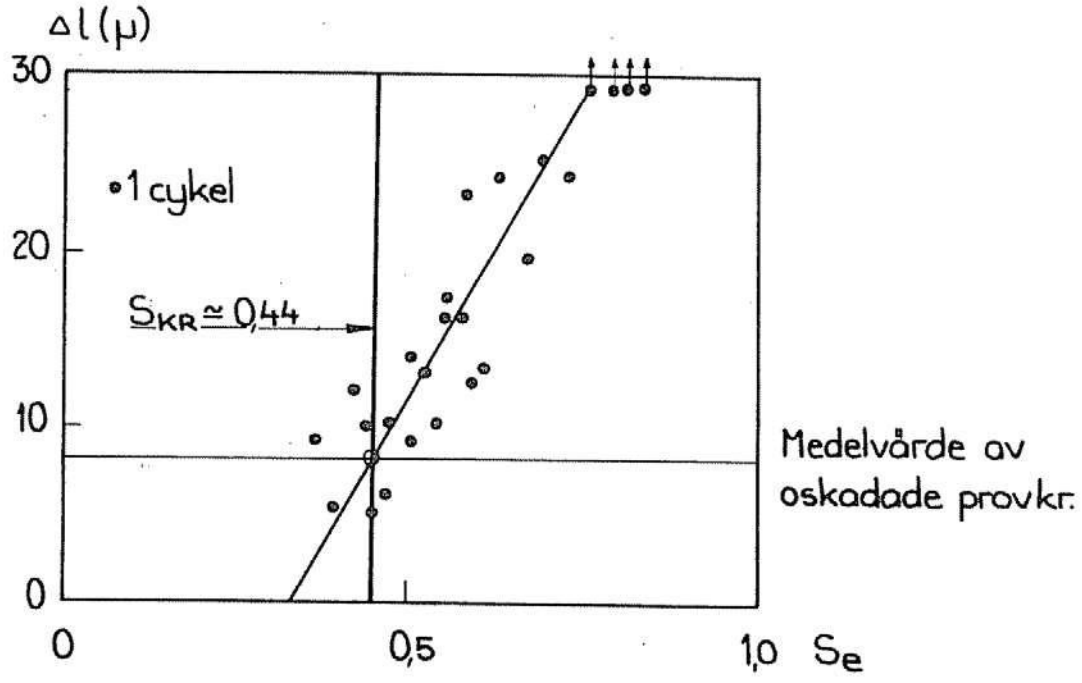


FIG 133 Material nr 10. Gasbetong typ 3. *Cellular concrete type 3.*

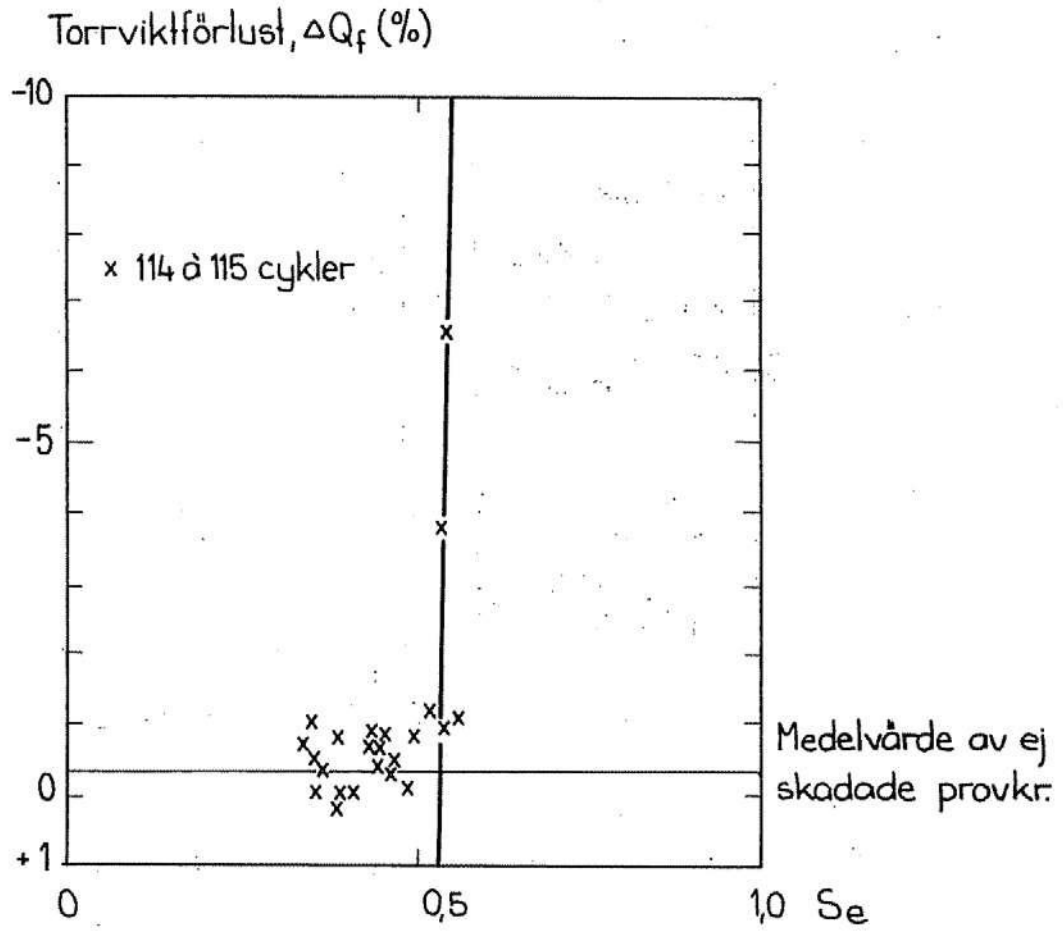


FIG 134 Material nr 10. Gasbetong typ 3. *Cellular concrete type 3.*

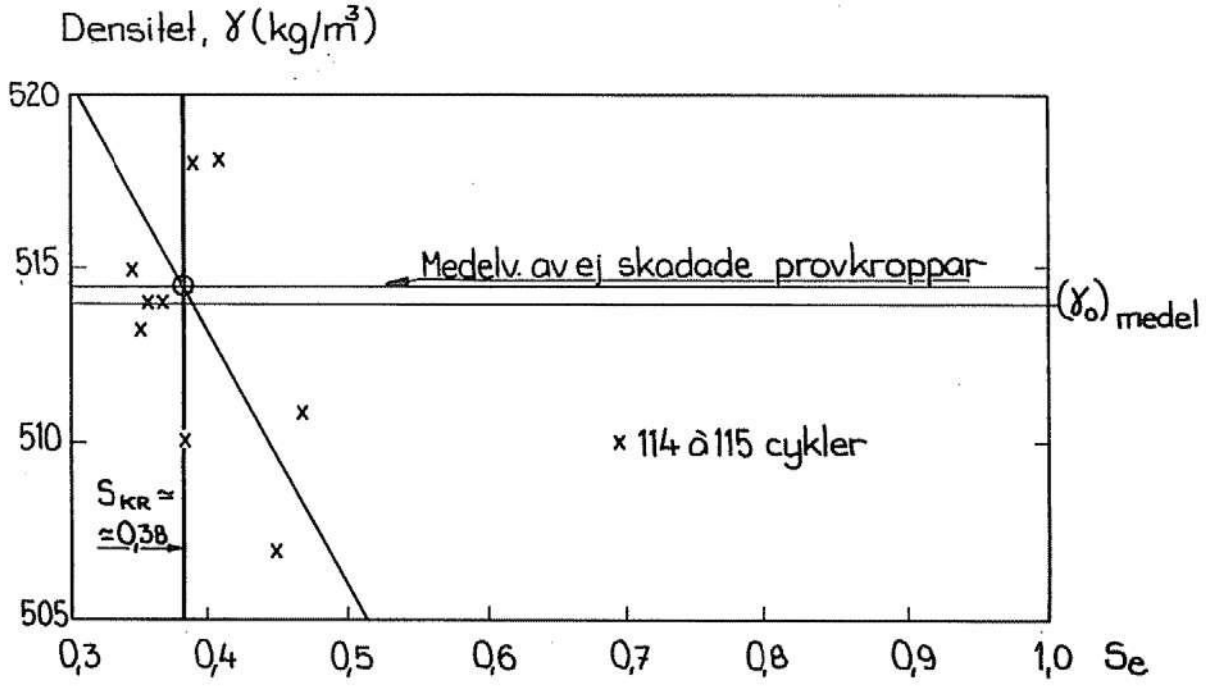


FIG 135 Material nr 10. Gasbetong typ 3. *Cellular concrete type 3.*

FIG 136 Material nr 10. Gasbetong typ 3. Oskadad och skadad provkropp.
Cellular concrete type 3. Intact and damaged specimen.

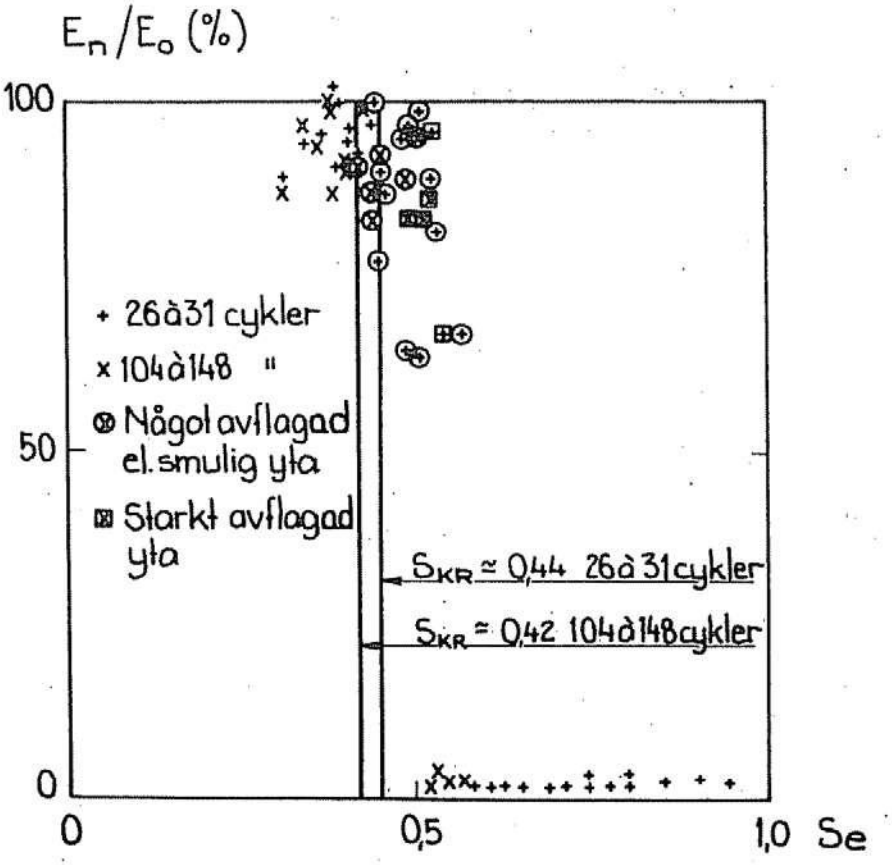


FIG 137 Material nr 11. Gasbetong typ 4. *Cellular concrete type 4.*

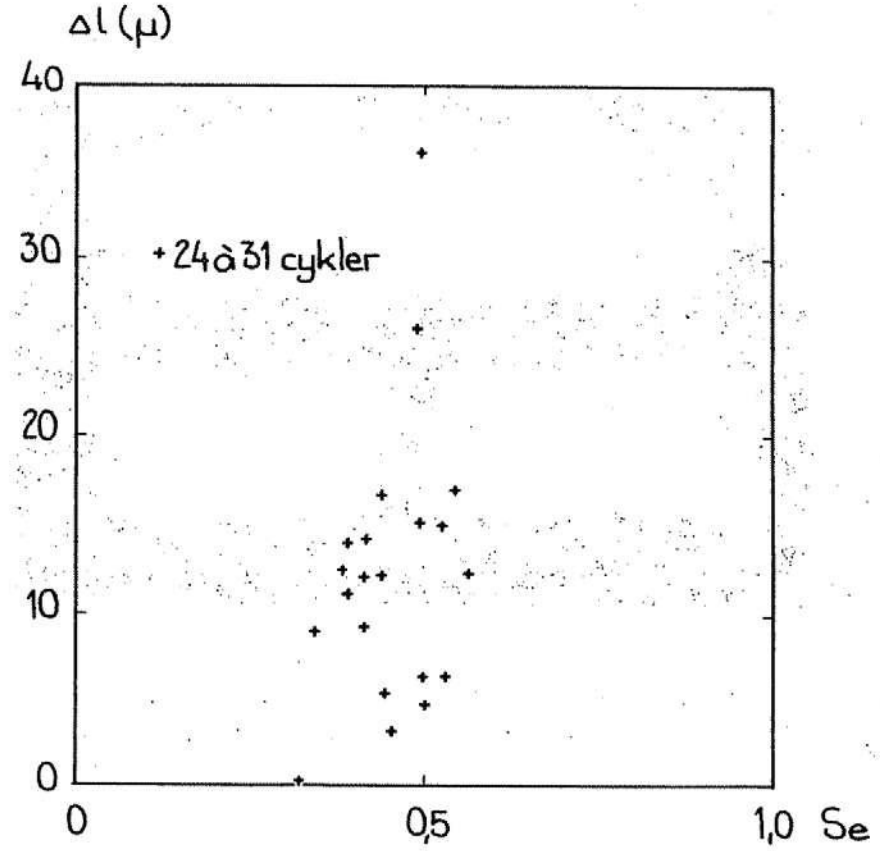


FIG 138 Material nr 11. Gasbetong typ 4. *Cellular concrete type 4.*

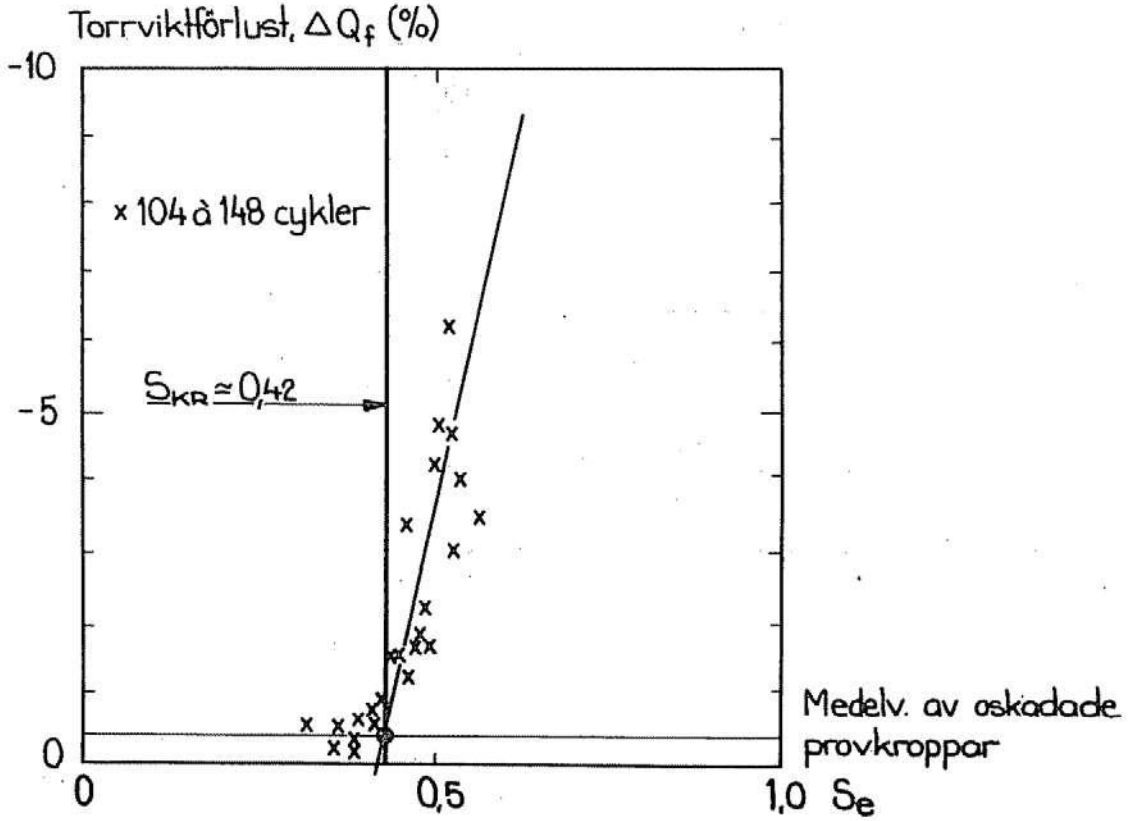


FIG 139 Material nr 11. Gasbetong typ 4. *Cellular concrete type 4.*

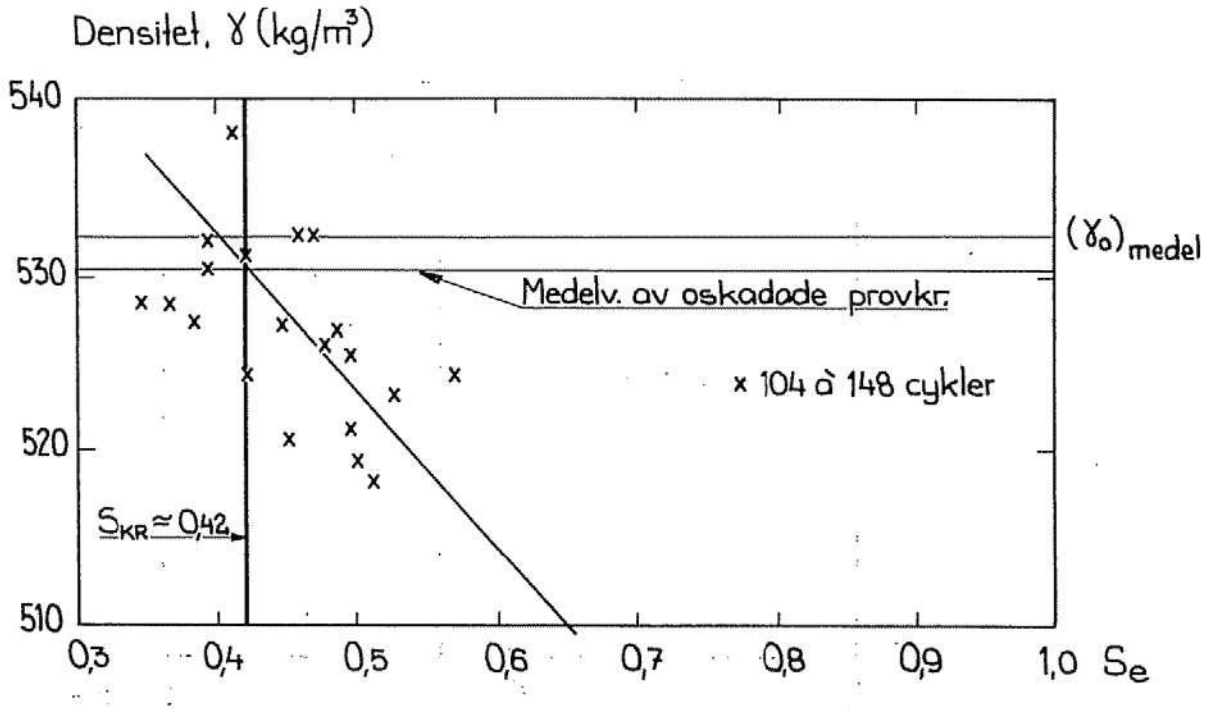


FIG 140 Material nr 11. Gasbetong typ 4. *Cellular concrete type 4.*

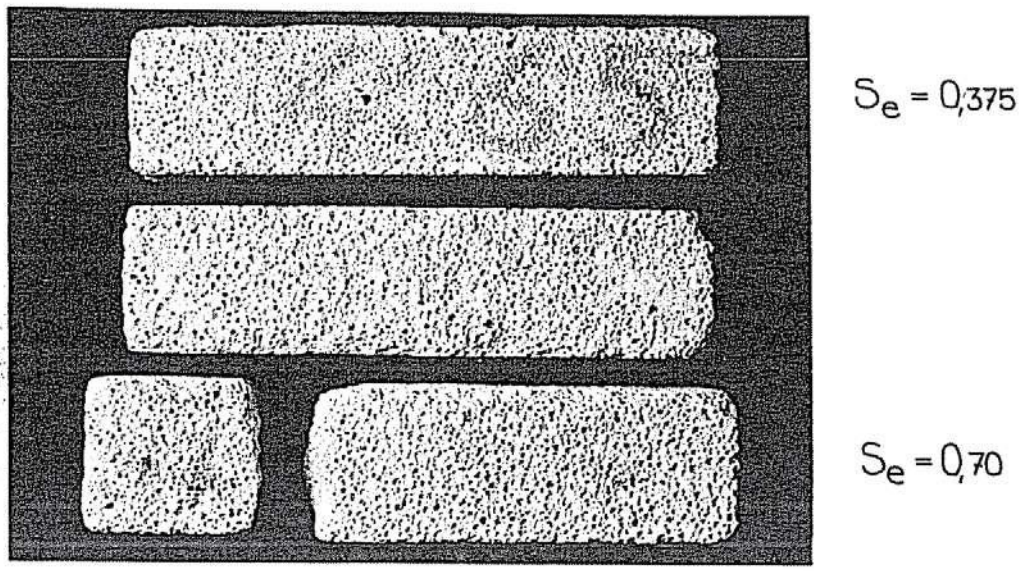


FIG 141 Material nr 11. Gasbetong typ 4. Oskadade och skadade provkroppar. *Cellular concrete type 4. Intact and damaged specimens.*

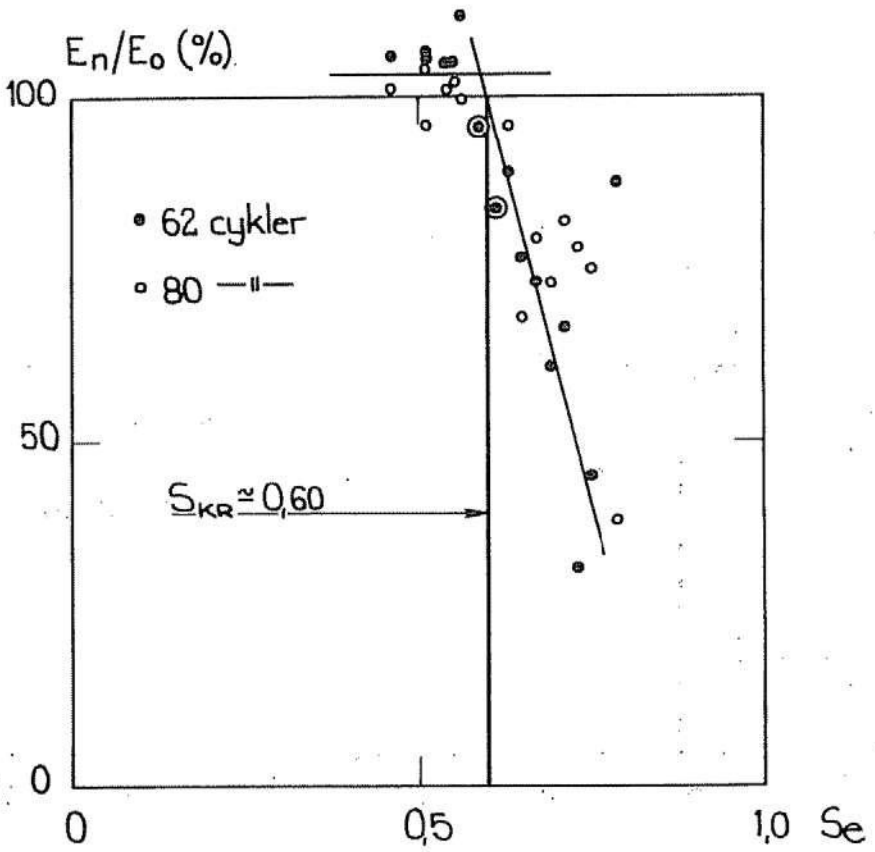


FIG 142 Material nr 12. Cementbruk vct=0,54. *Cement mortar w/c-ratio=0,54.*

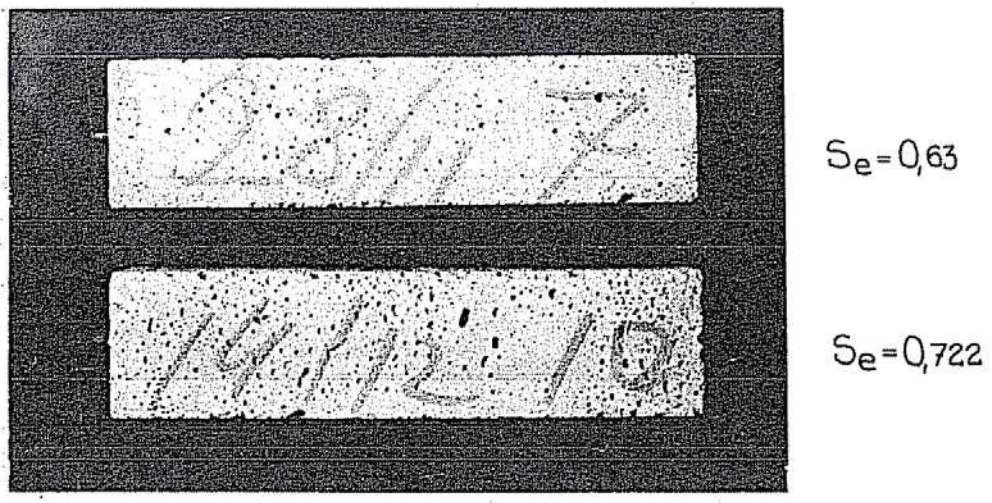


FIG 143 Material nr 12. Cementbruk vct=0,54. Oskadad (den övre) och skadad provkropp. *Cement mortar w/c-ratio=0,54. Intact (upper) and damaged specimen.*

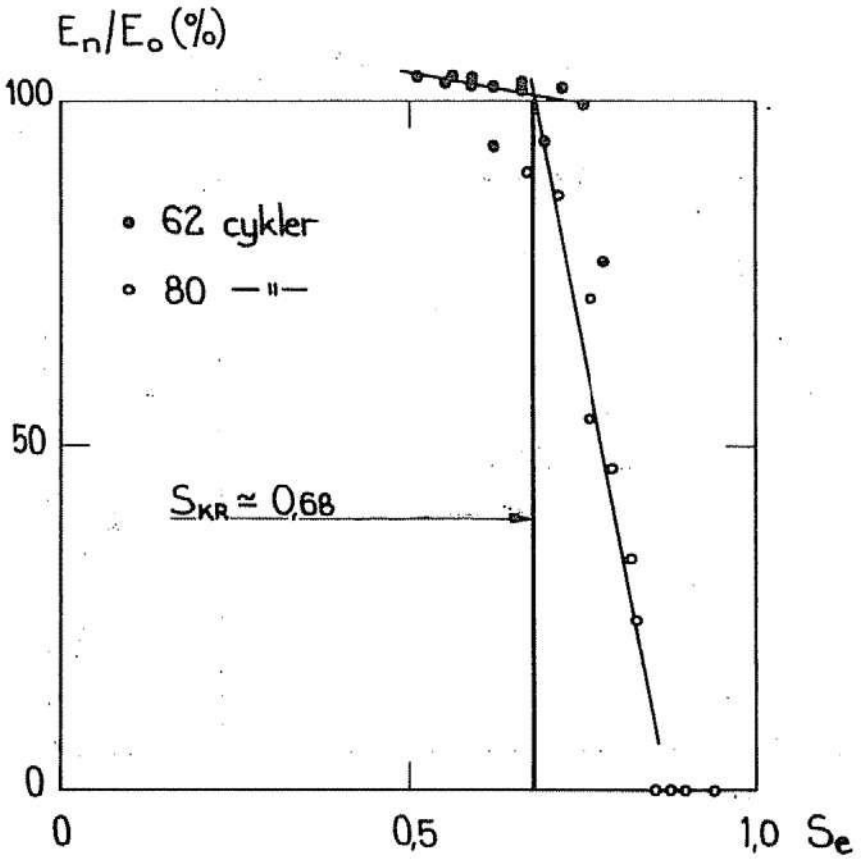


FIG 144 Material nr 13. Cementbruk vct=0,64. *Cementmortar w/c-ratio=0,64.*

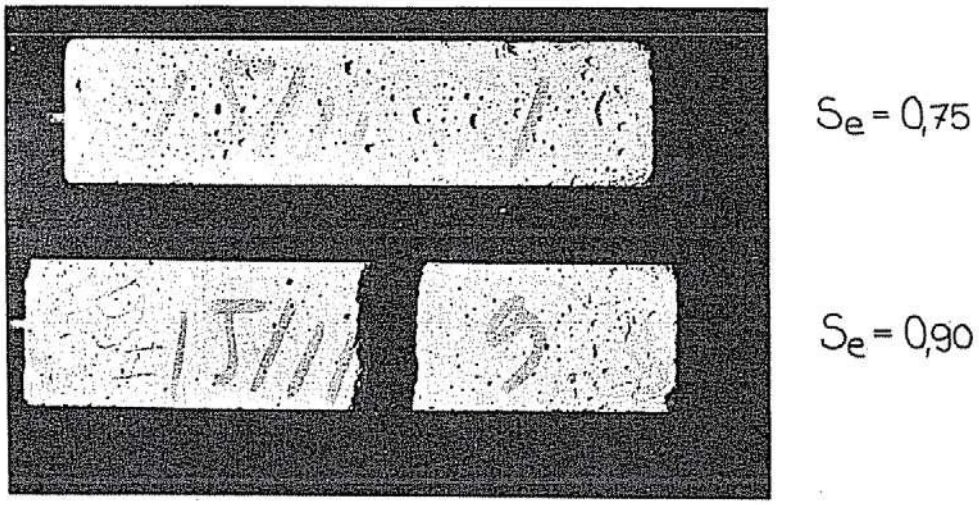


FIG 145 Material nr 13. Cementbruk vct=0,64. Oskadad och skadad provkropp.
Cement mortar w/c-ratio=0,64. Intact and damaged specimen.

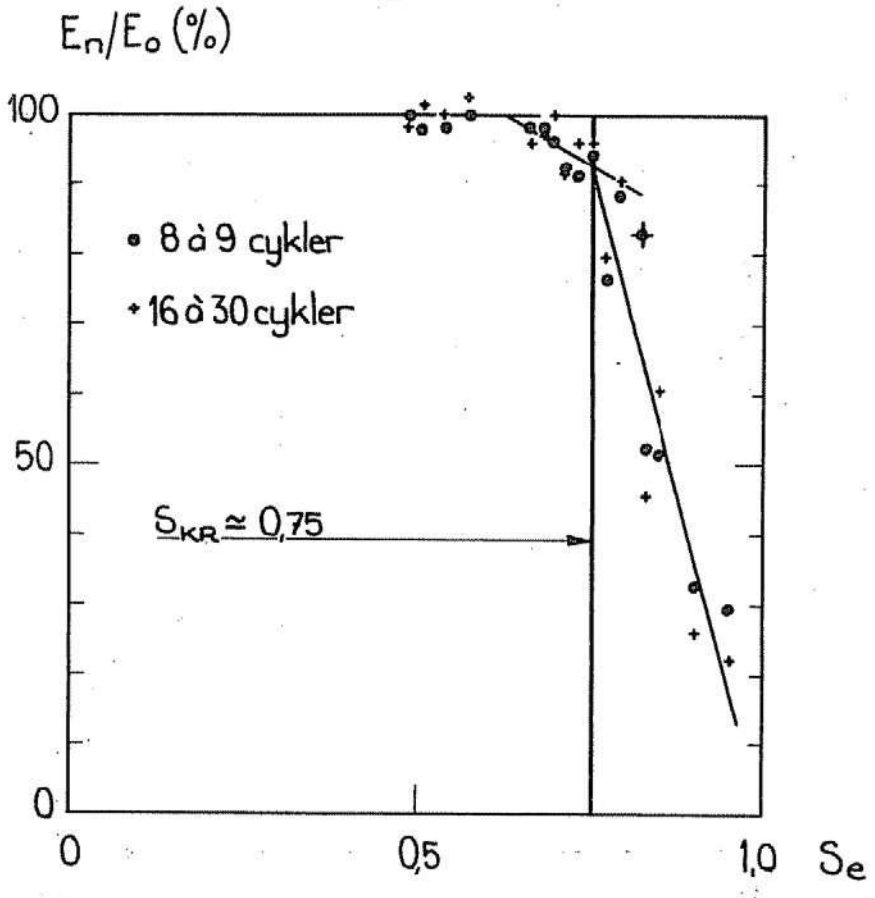


FIG 146 Material nr 14. Sarabondbruk vct=0,535. *Cement mortar w/c-ratio=0,535.*

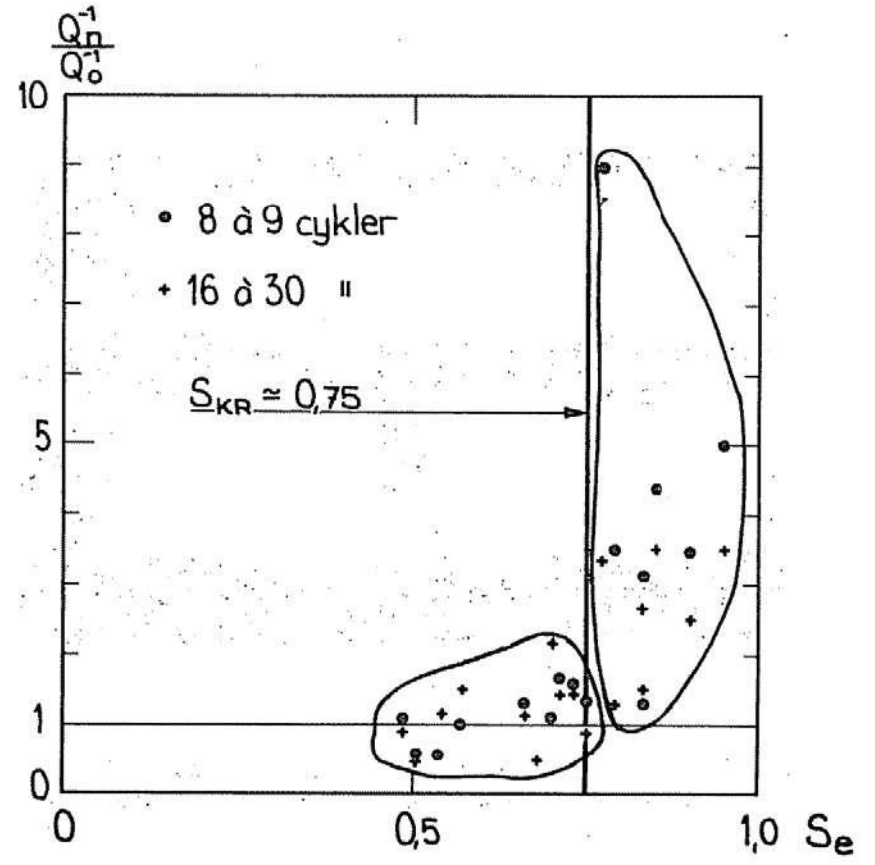


FIG 147 Material nr 14. Sarabondbruk vct=0,535. *Cement mortar w/c-ratio=0,535*

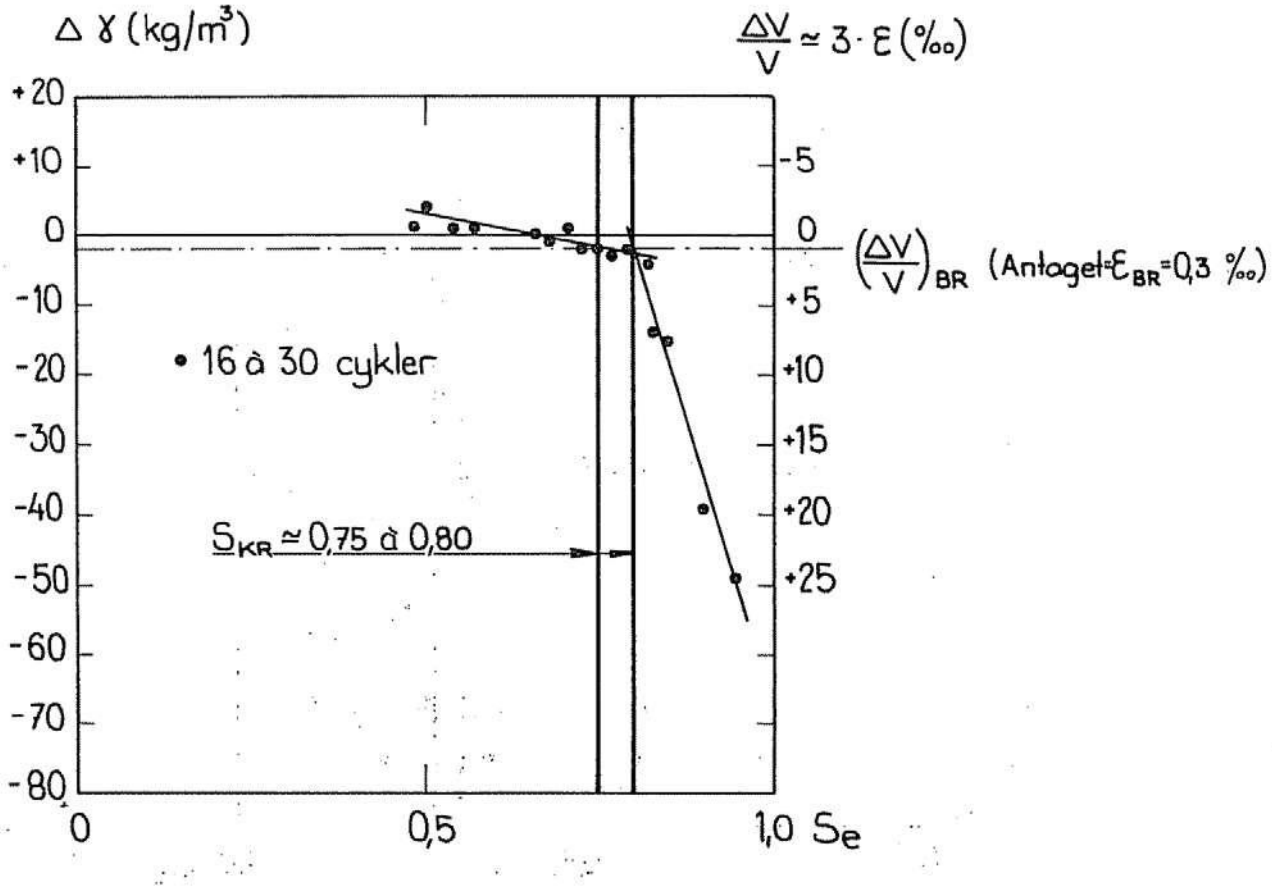


FIG 148 Material nr 14. Sarabondbruk vct=0,535. *Cement mortar w/c-ratio=0,535*

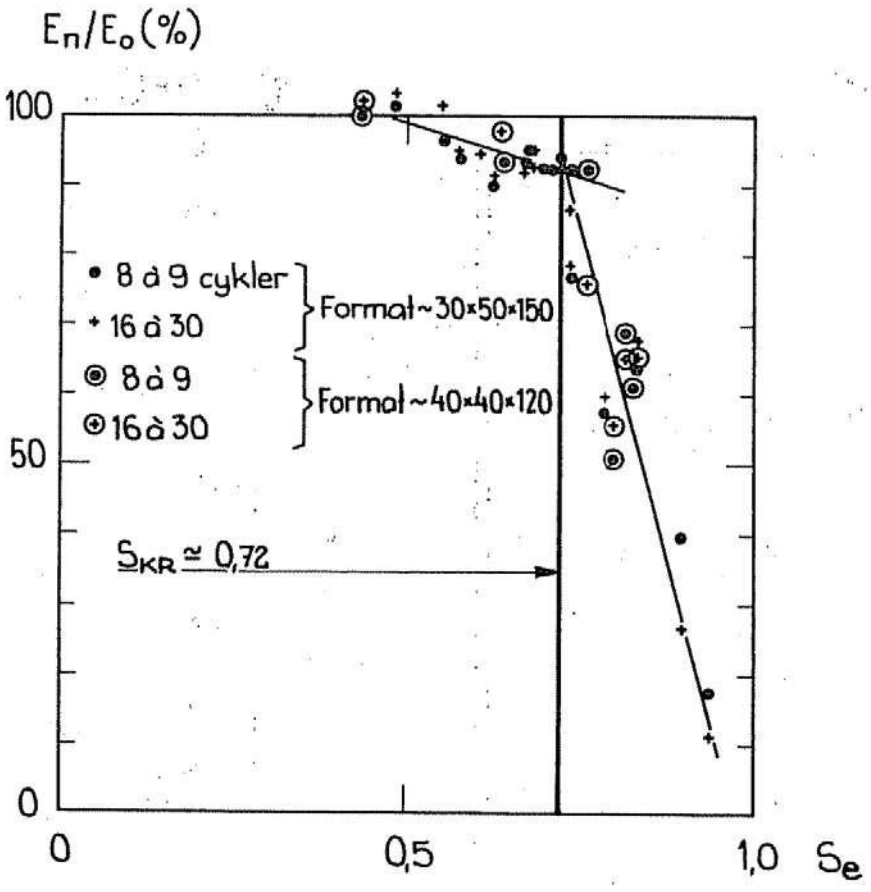


FIG 149 Material nr 15. Sarabondbruk vct=0,488. *Cement mortar w/c-ratio=0,488.*

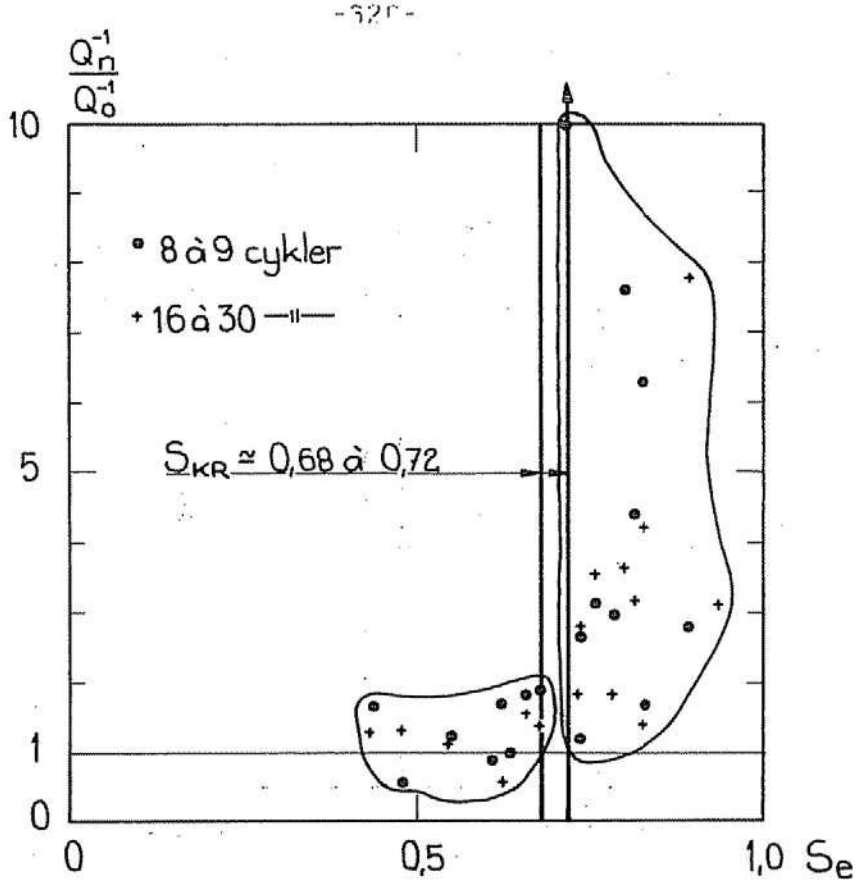


FIG 150 Material nr 15. Sarabondbruk vct=0,488. *Cement mortar w/c-ratio=0,488.*

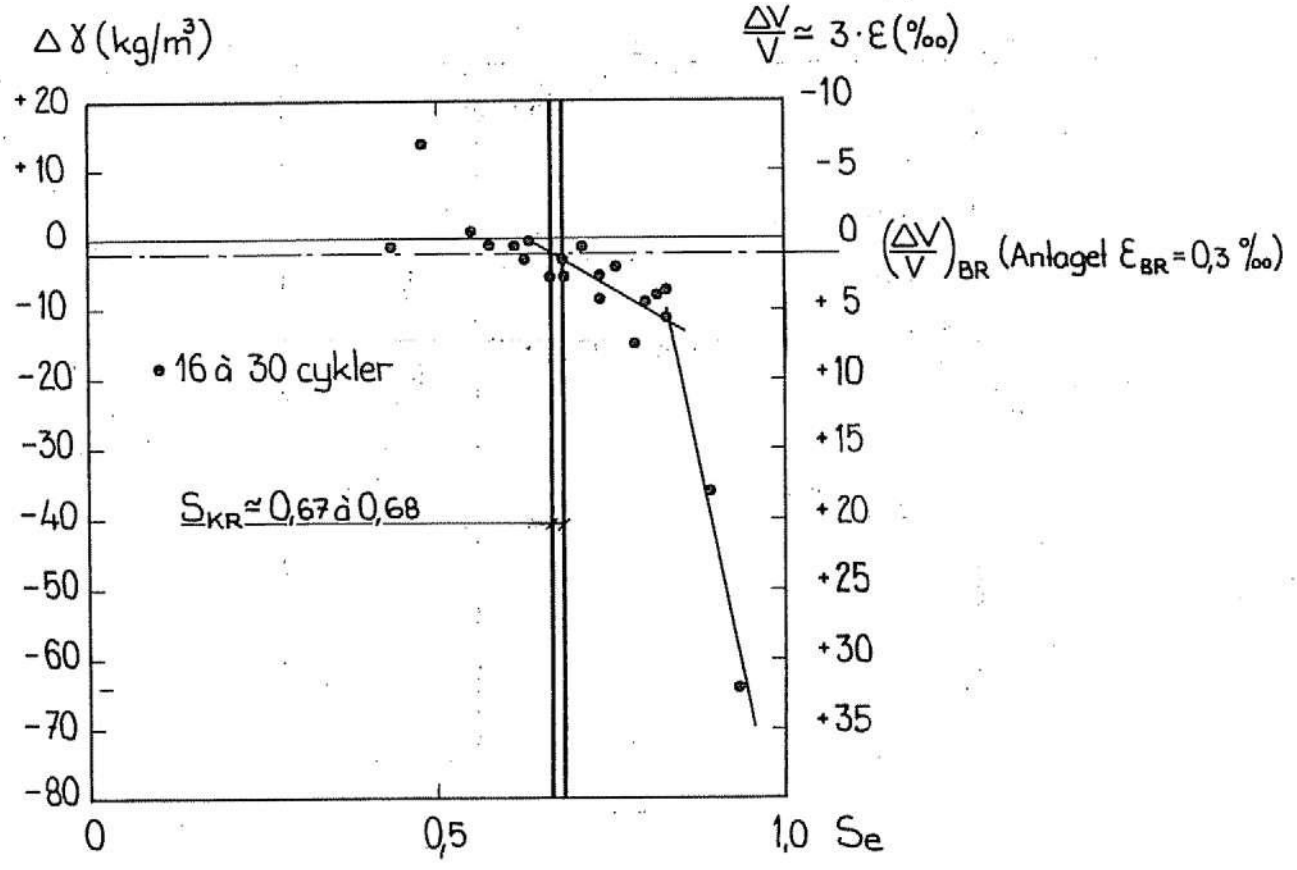


FIG 151 Material nr 15. Sarabondbruk vct=0,488. *Cement mortar w/c-ratio=0,488.*

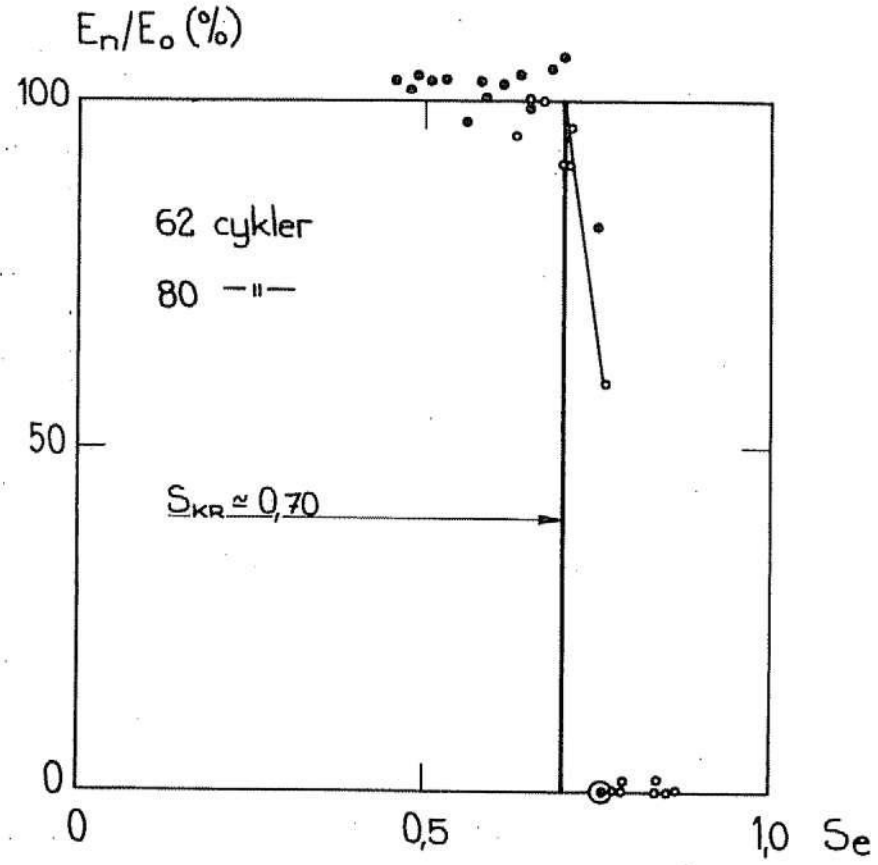


FIG 152 Material nr 16: KC-bruk 35/65/550. *Lime-cement mortar.*

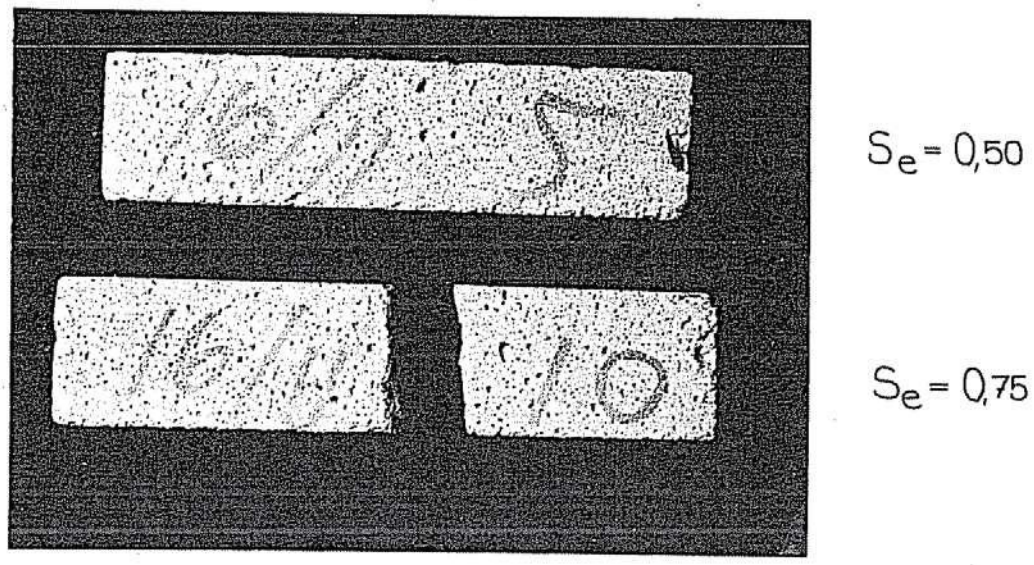


FIG 153 Material nr 16: KC-bruk 35/65/550. Oskadad och skadad provkropp. *Lime-cement mortar. Intact and damaged specimen.*

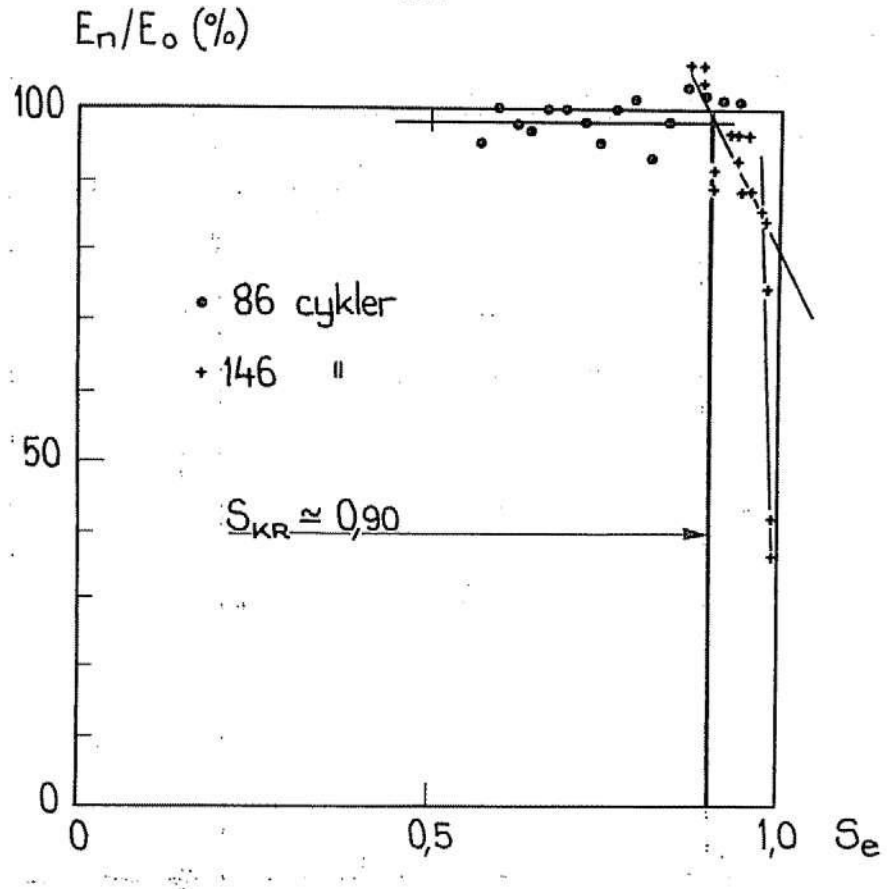


FIG 154 Material nr 17 a: Internit. *Internit (cellulose fiber reinforced cement paste).*

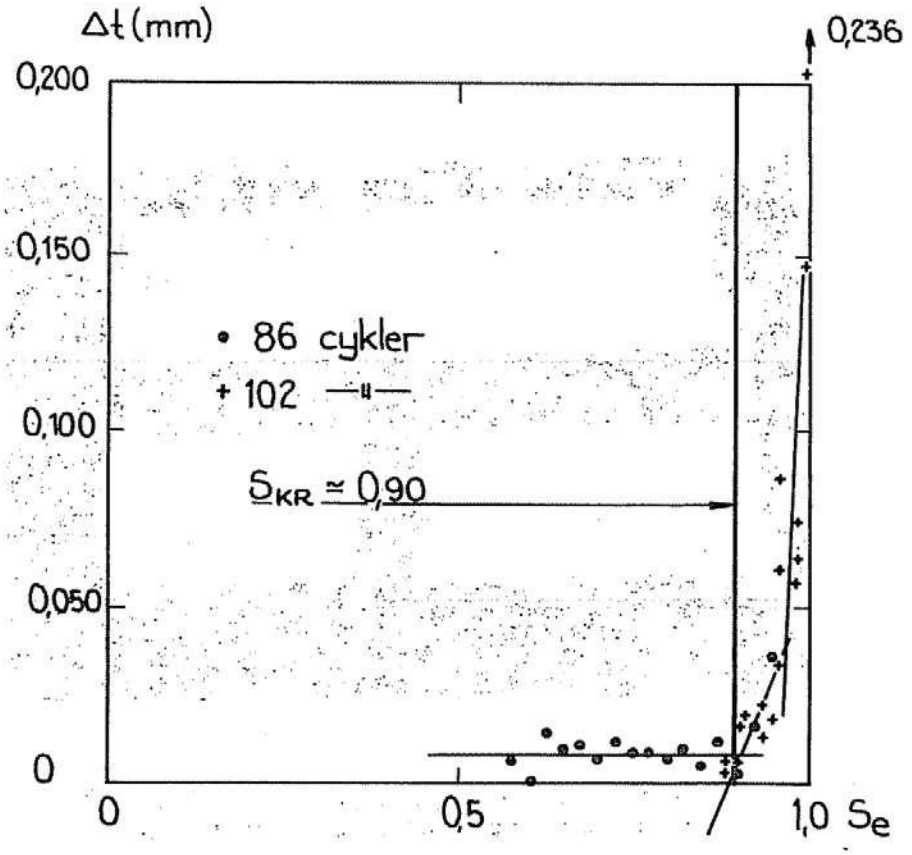


FIG 155 Material nr 17 a: Internit. *Internit (cellulose fiber reinforced cement paste).*

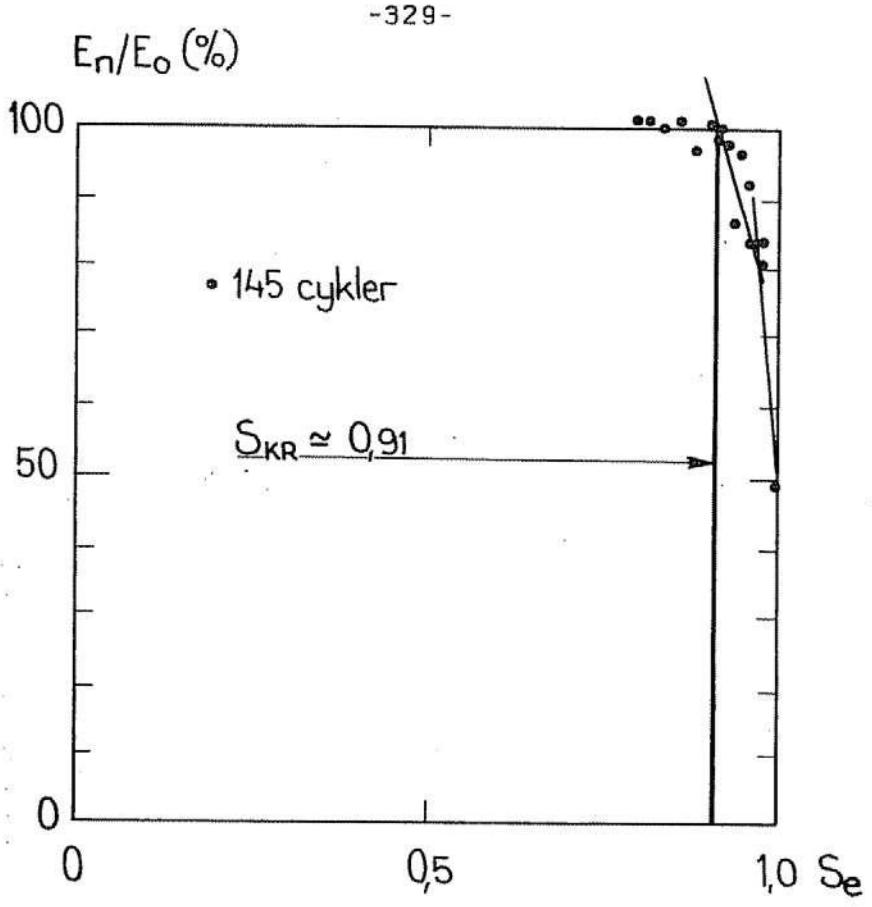


FIG 156 Material nr 17 b: Internit med vaxade kanter. *Internit with sealed edges.*

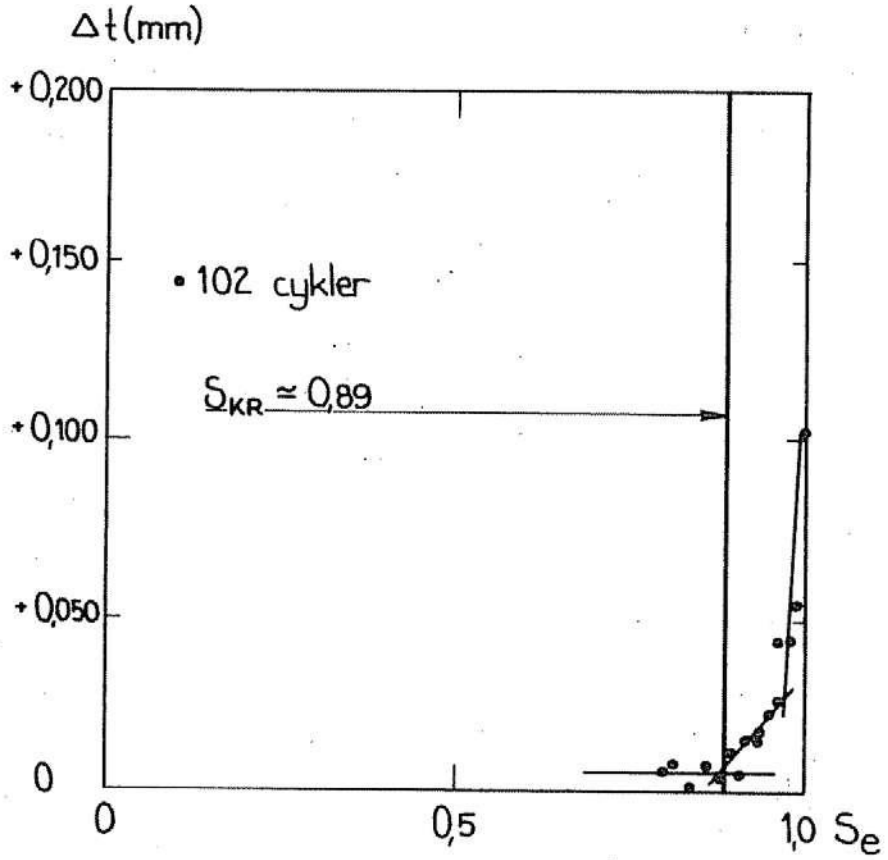


FIG 157 Material nr 17 b: Internit med vaxade kanter. *Internit with sealed edges.*

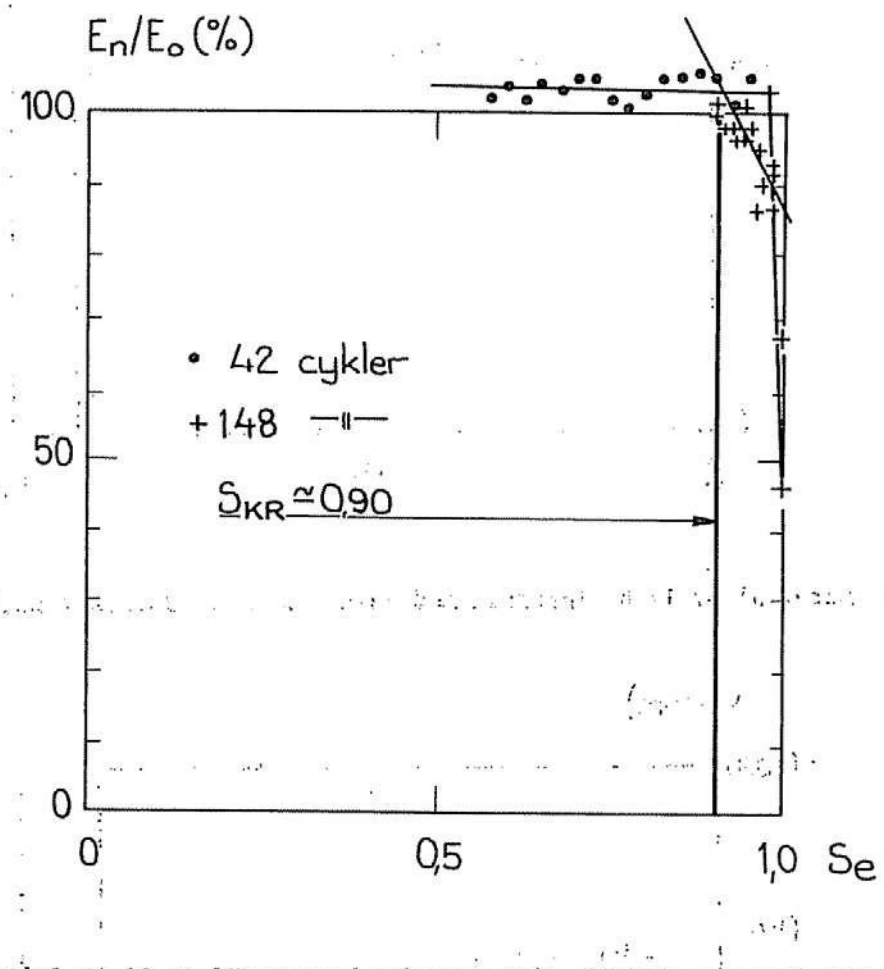


FIG 158 Material nr 18 a: Löspressad asbestcement. *Lightly pressed asbestos cement.*

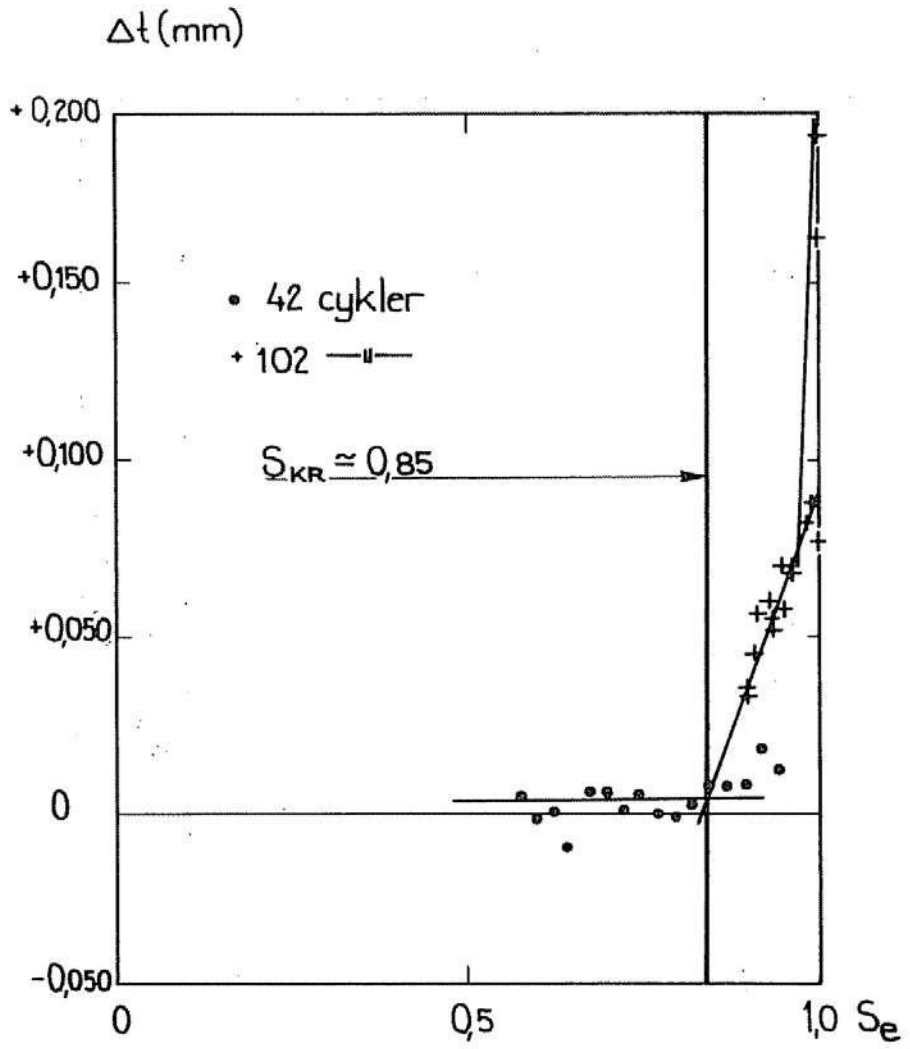


FIG 159 Material nr 18 a: Löspressad asbestcement. *Lightly pressed asbestos cement.*

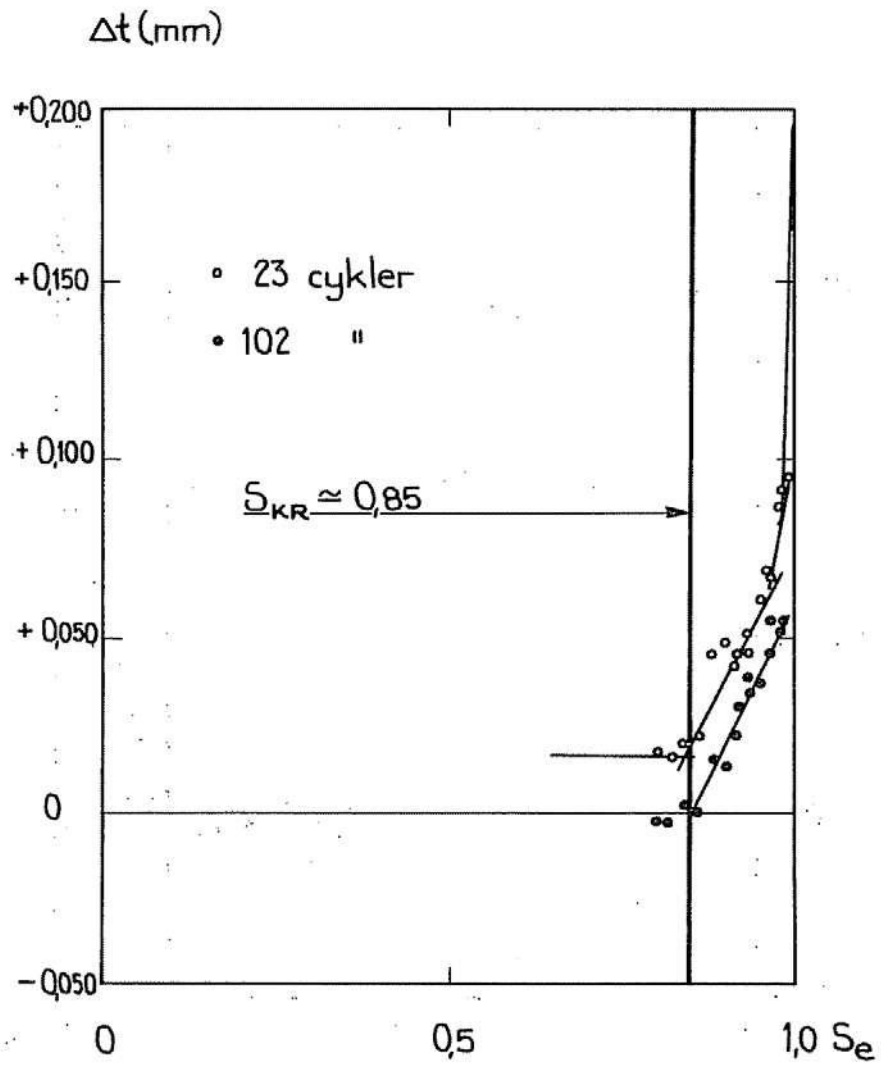


FIG 160 Material nr 18 b: Löspressad asbestcement med vaxade kanter. *Lightly pressed asbestos-cement with sealed edges.*

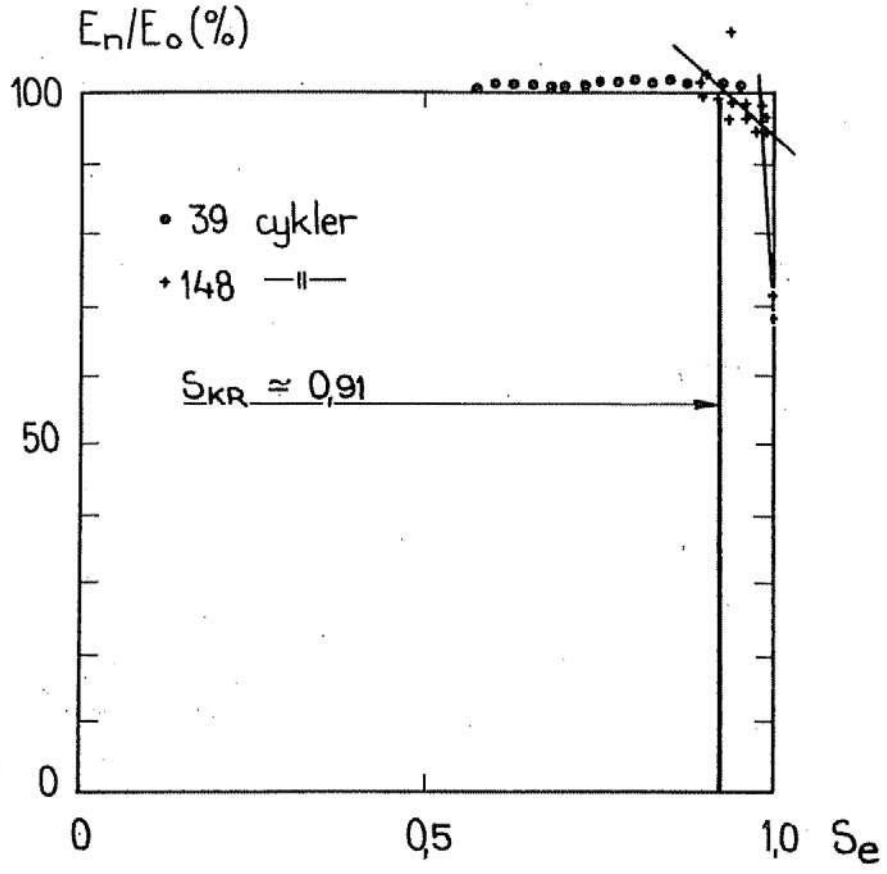


FIG 161 Material nr 19 a: Hårdpressad asbestcement. *Hard-pressed asbestos-cement.*

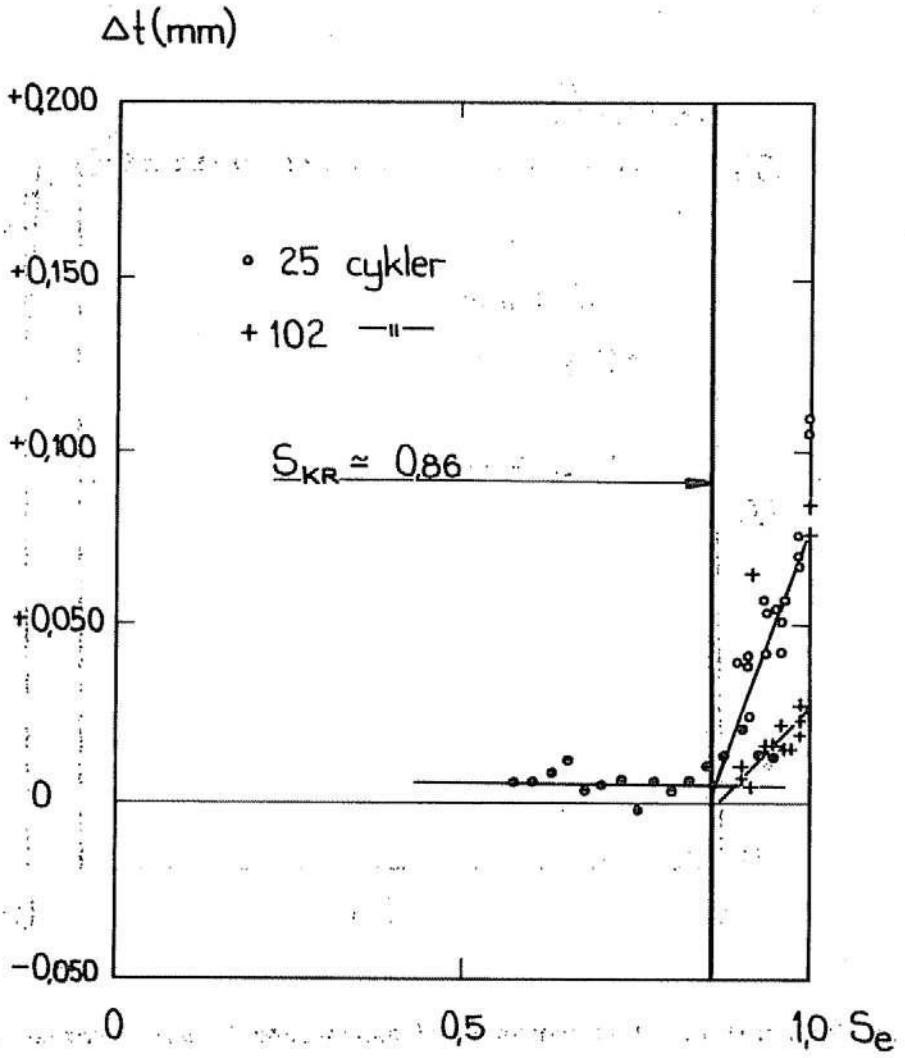


FIG 162 Material nr 19 a: Hårdpressad asbestcement. *Hard-pressed asbestos-cement.*

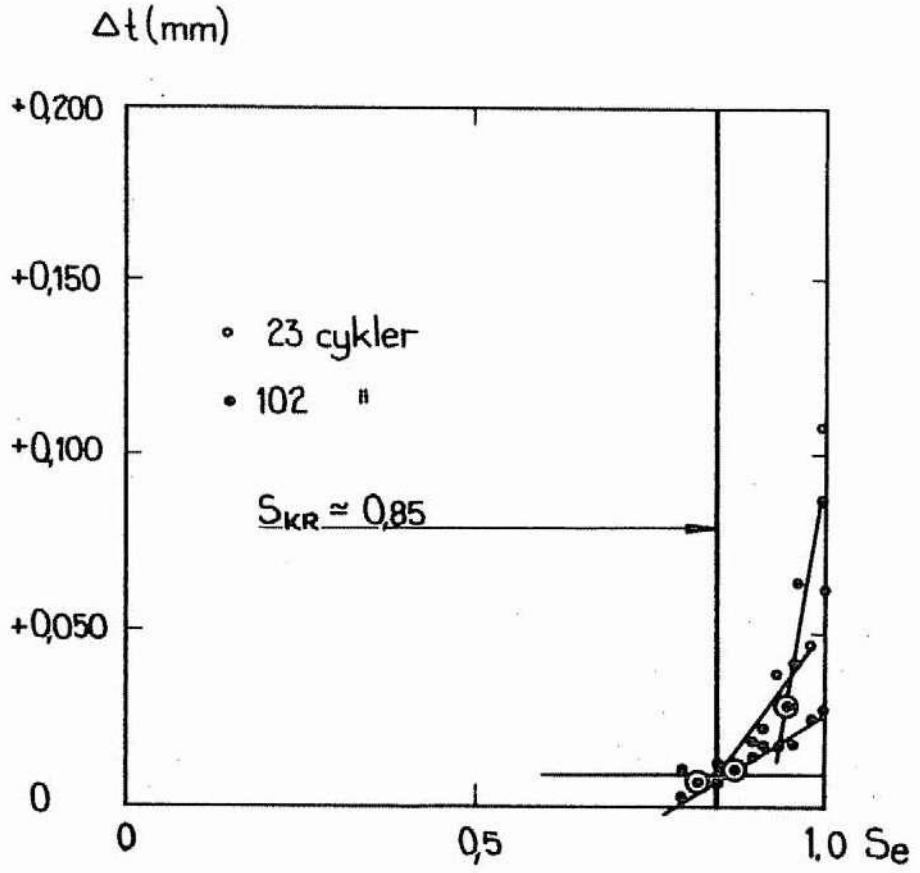


FIG 163 Material nr 19 b: Hårdpressad asbestcement med vaxade kanter. *Hard-pressed asbestos-cement with sealed edges.*

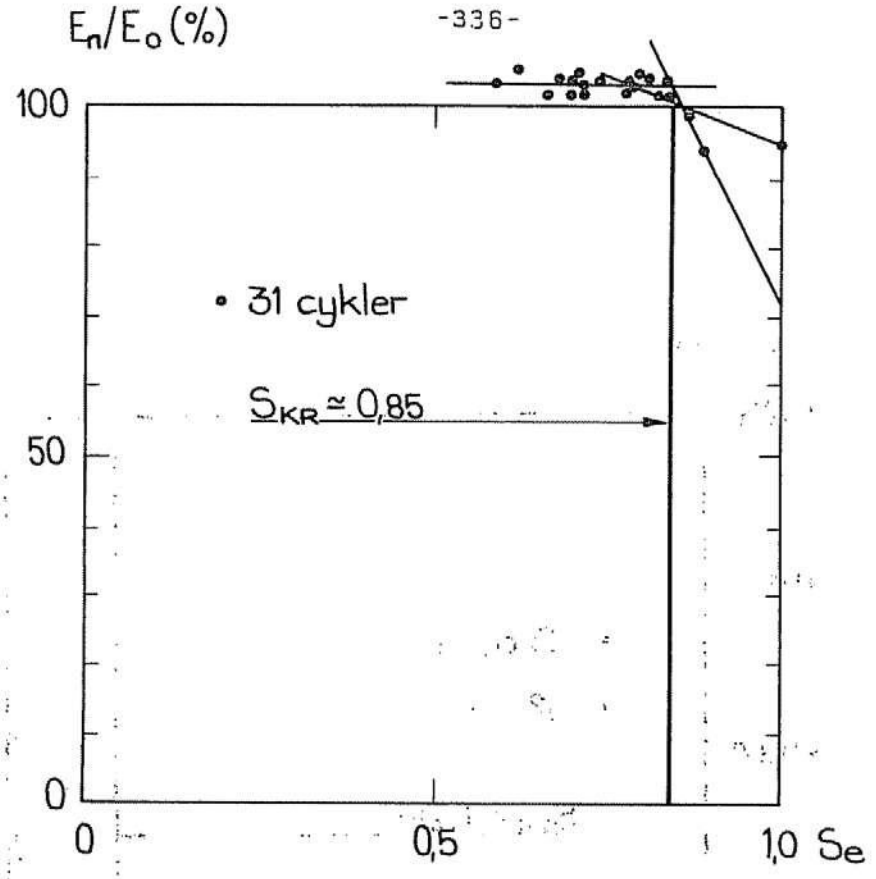


FIG 164 Material nr 20 a: Korrugerad asbestcement, vågtopp. *Corrugated asbestos-cement wave-top.*

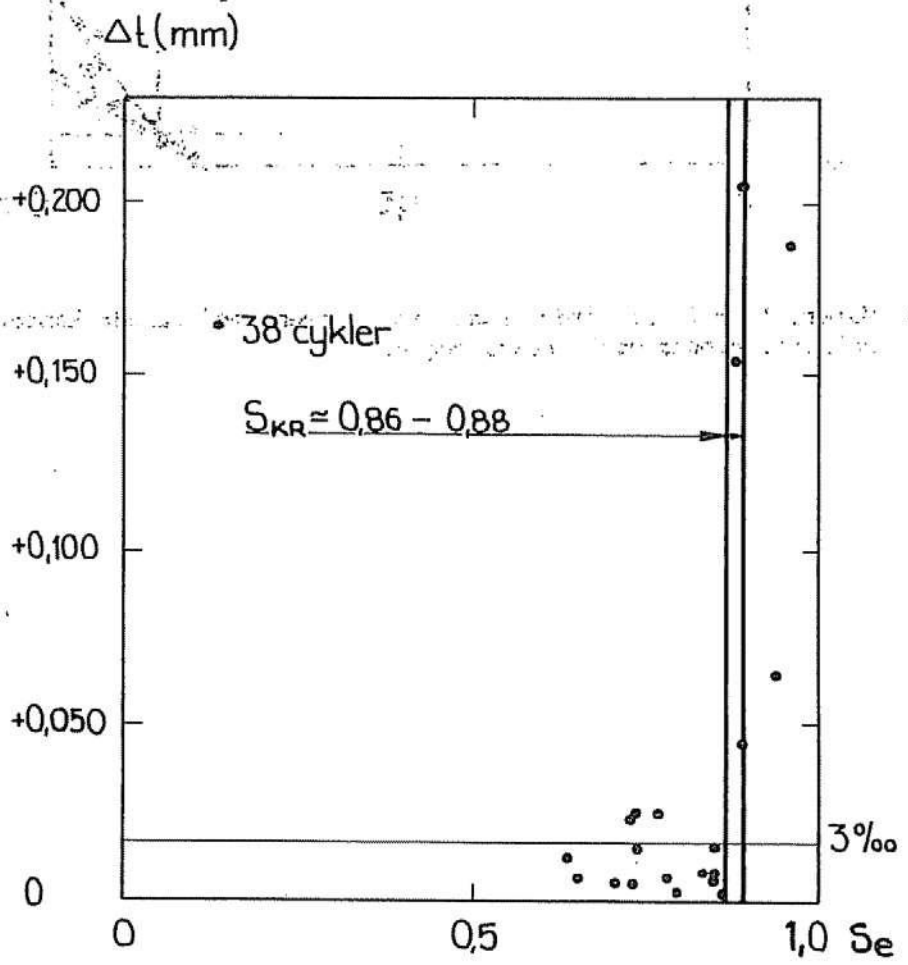


FIG 165 Material nr 20 b: Korrugerad asbestcement, mellandel. *Corrugated asbestos-cement, middle-part between top and trough.*

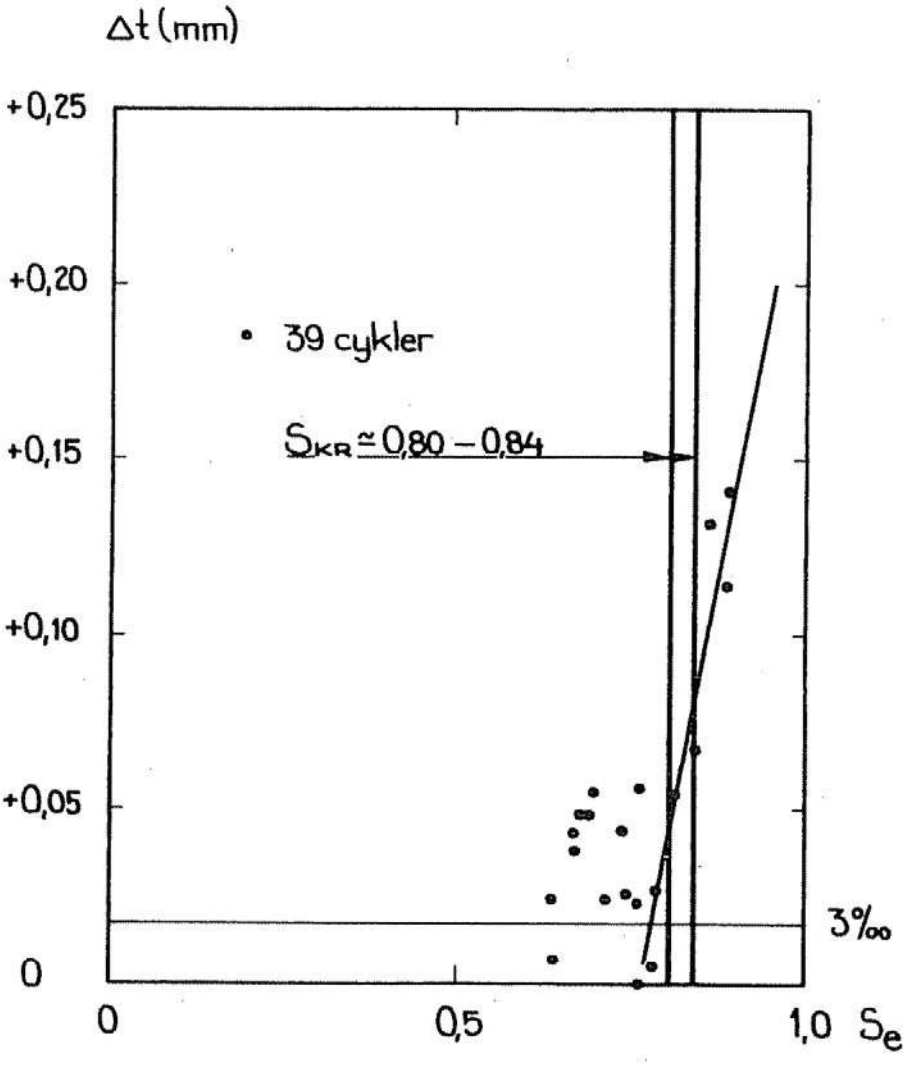


FIG 166. Material nr 20 c: Korrugerad asbestcement, vågdal. *Corrugated asbestos-cement, wave-trough.*

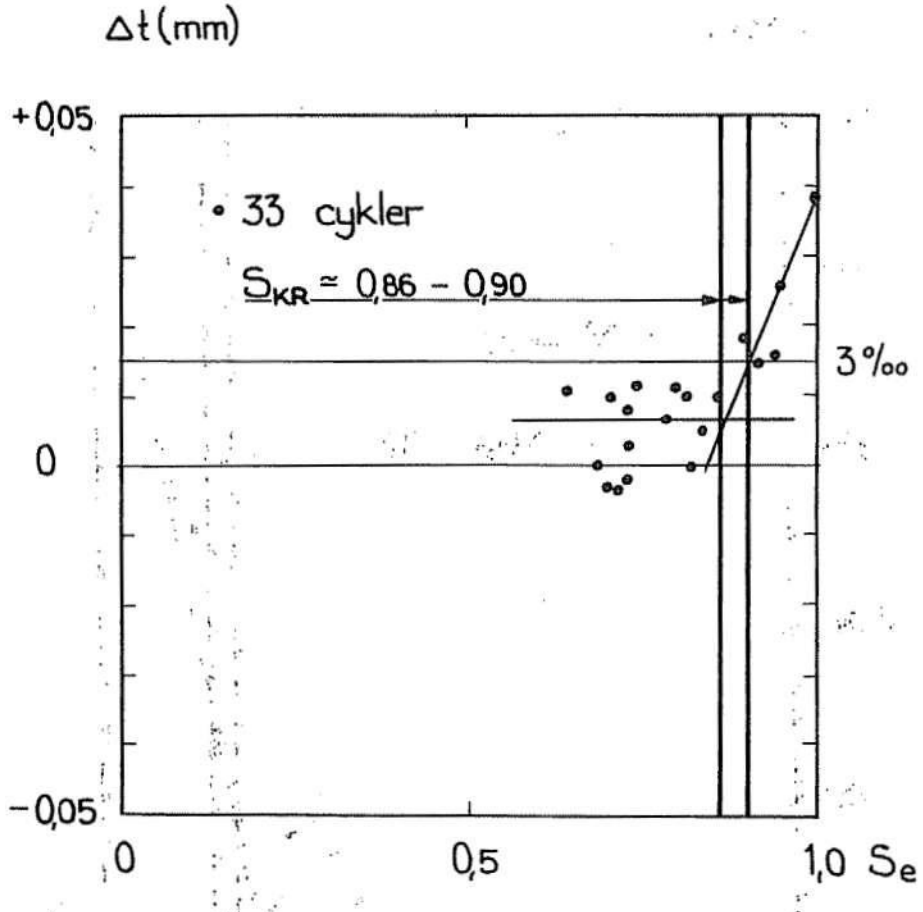


FIG 167 Material nr 21: Pressad asbestcement, 5 mm. *Pressed asbestos-cement, 5 mm thick.*

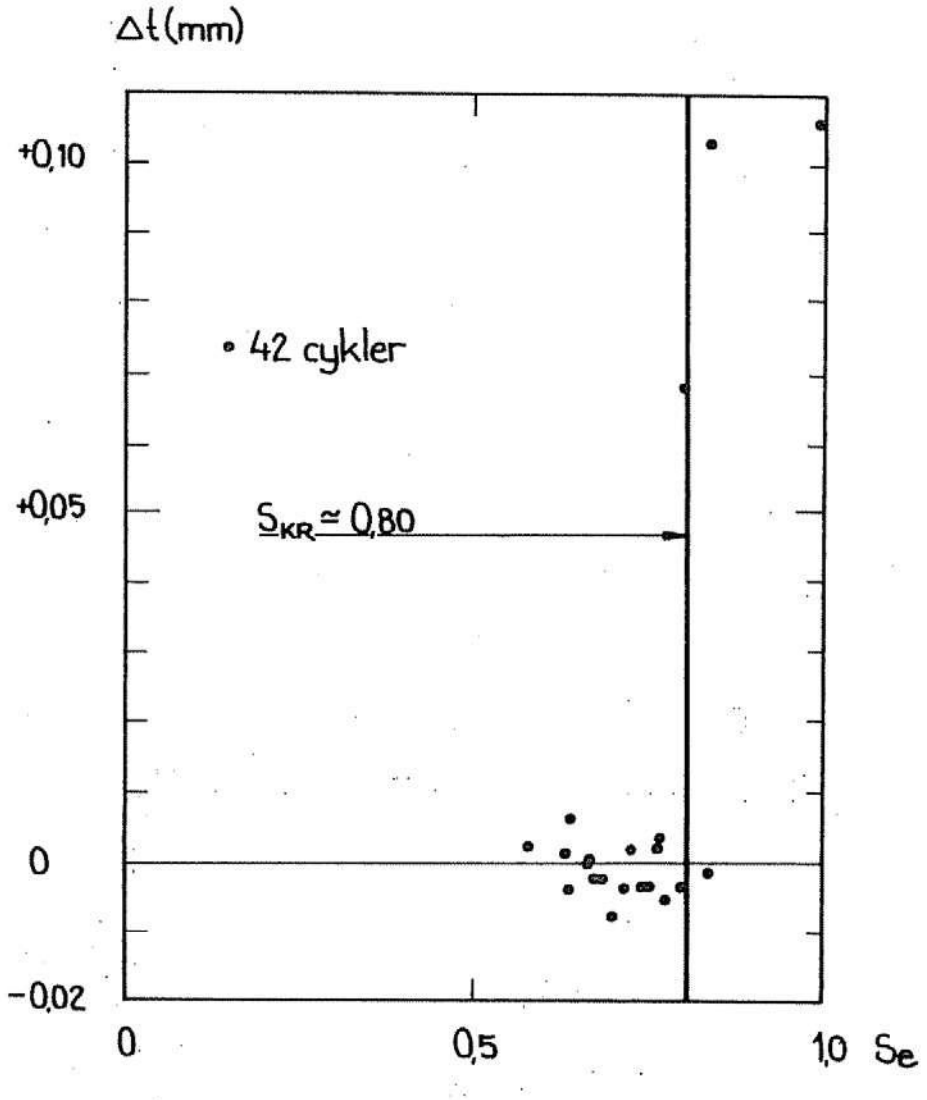


FIG 168 Material nr 22: Opressad asbestcement. *Unpressed asbestos-cement.*

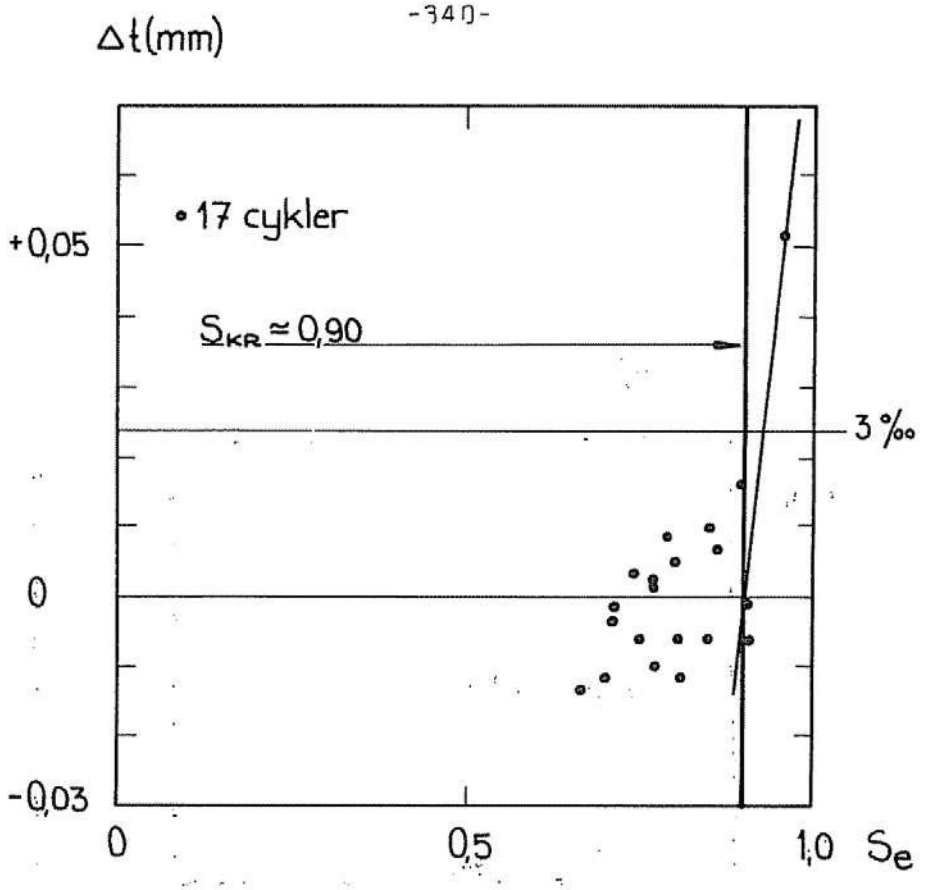


FIG 169 Material nr 23: Pressad asbestcement, 8 mm. *Pressed asbestos-cement, 8 mm thick.*

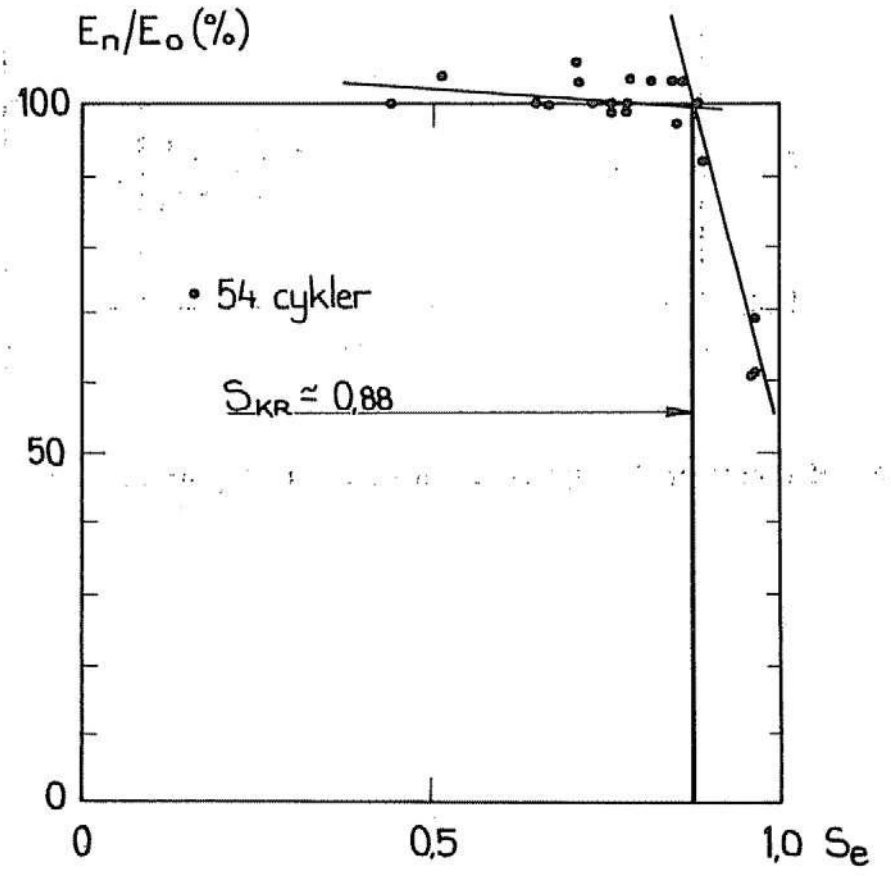


FIG 170 Material nr 24: Torrformad pigmenterad asbestcement. *Dry-formed pigmented asbestos-cement.*

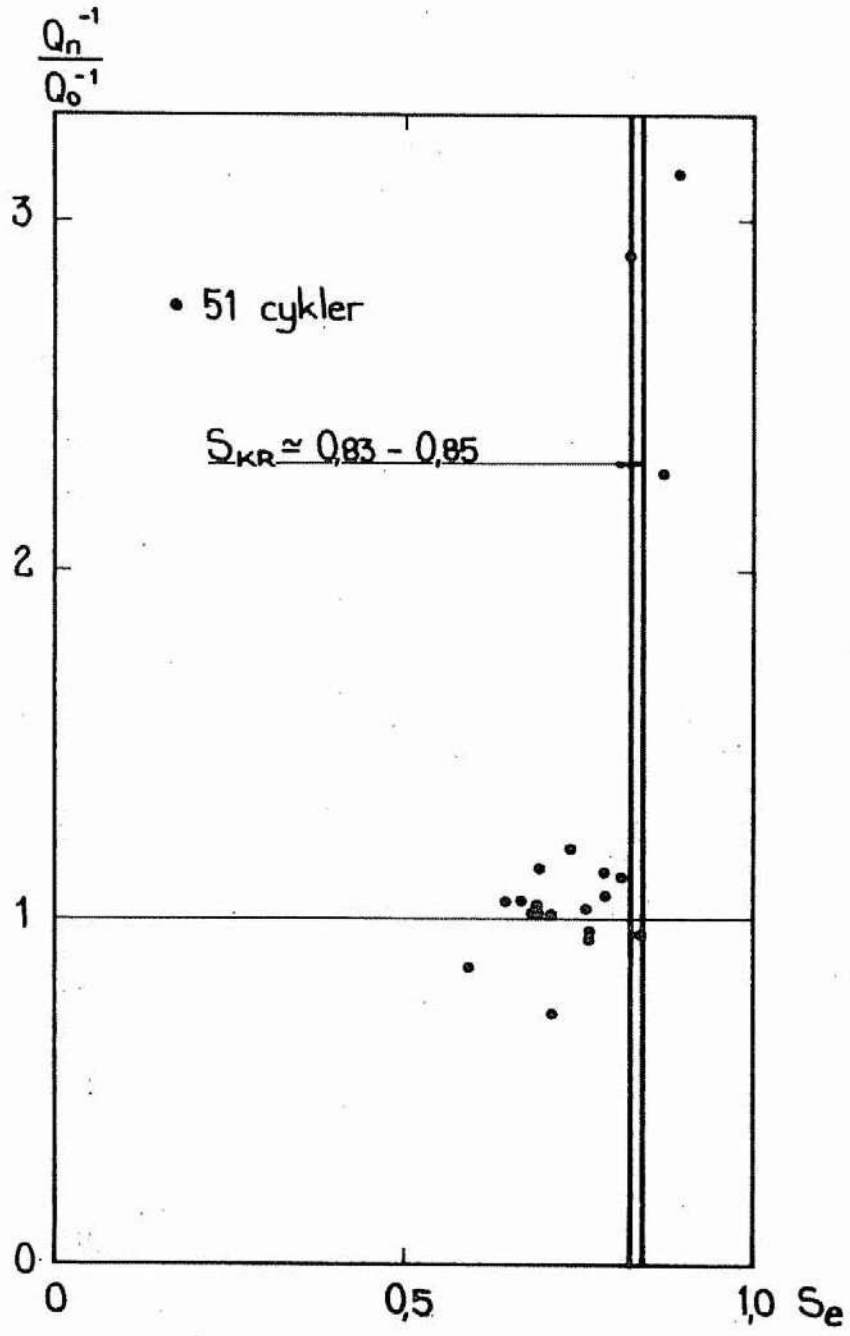


FIG 171 Material nr 25: Korrugerad asbestcement med akrylfärg. *Corrugated asbestos-cement with acrylic paint.*

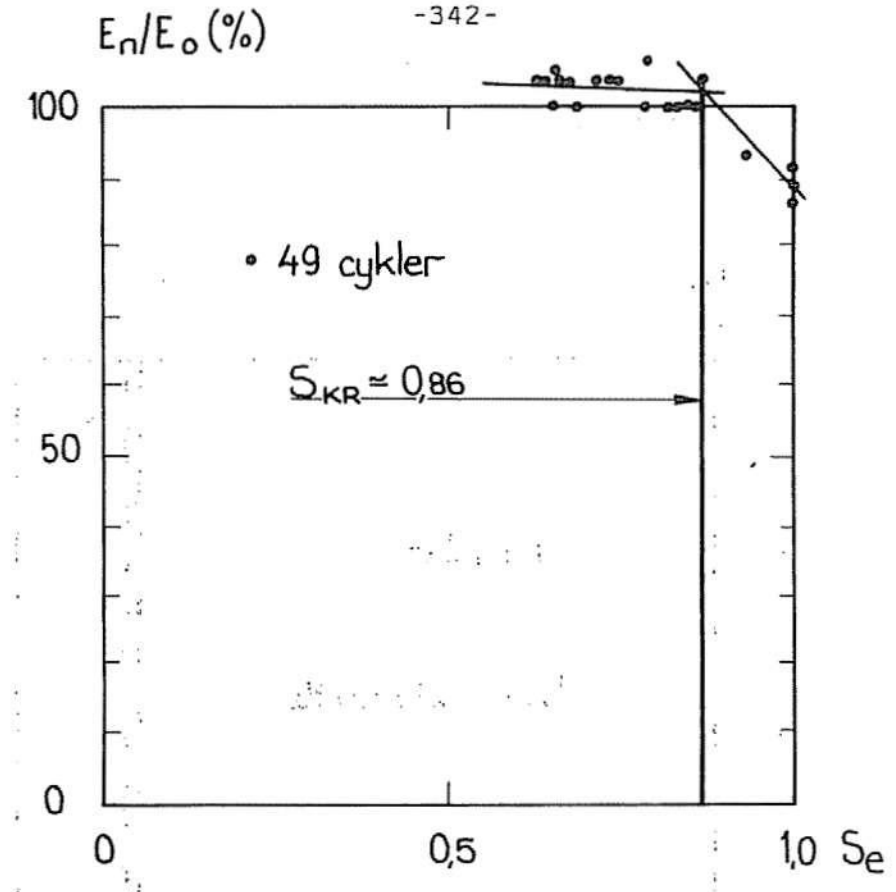


FIG 172 Material nr 26: Pressad asbestcement med silikatfärg. *Pressed asbestos-cement with silicate paint.*

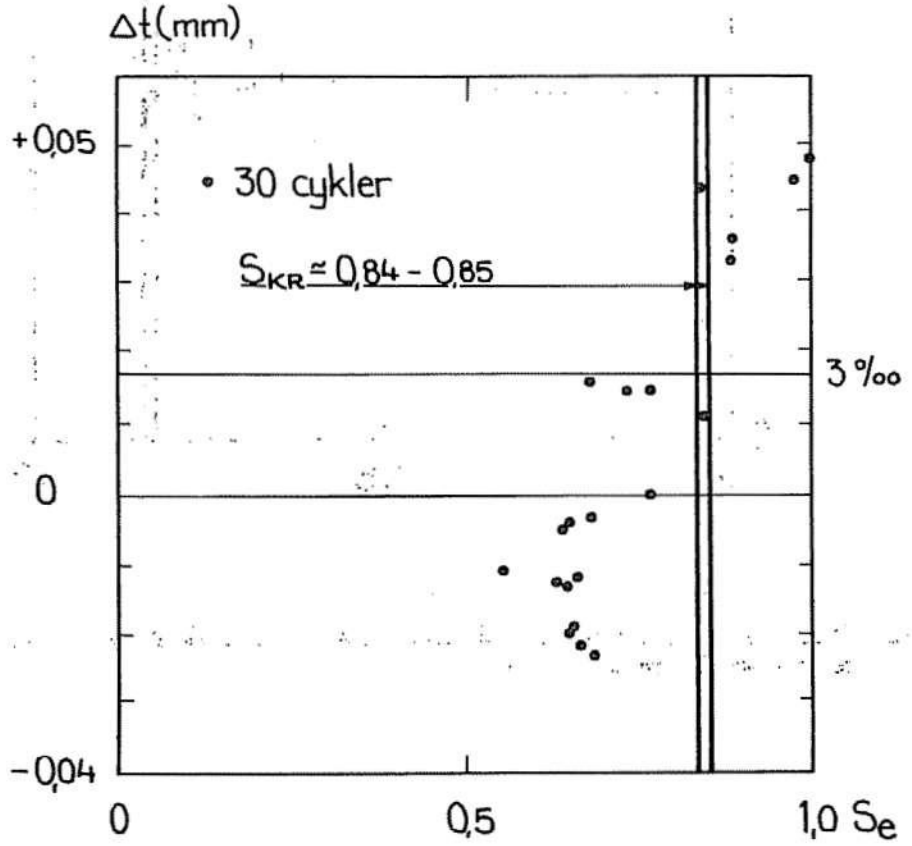


FIG 173 Material nr 27: Torrformad asbestcement med akrylfärg. *Dry-formed asbestos-cement with acrylic paint.*

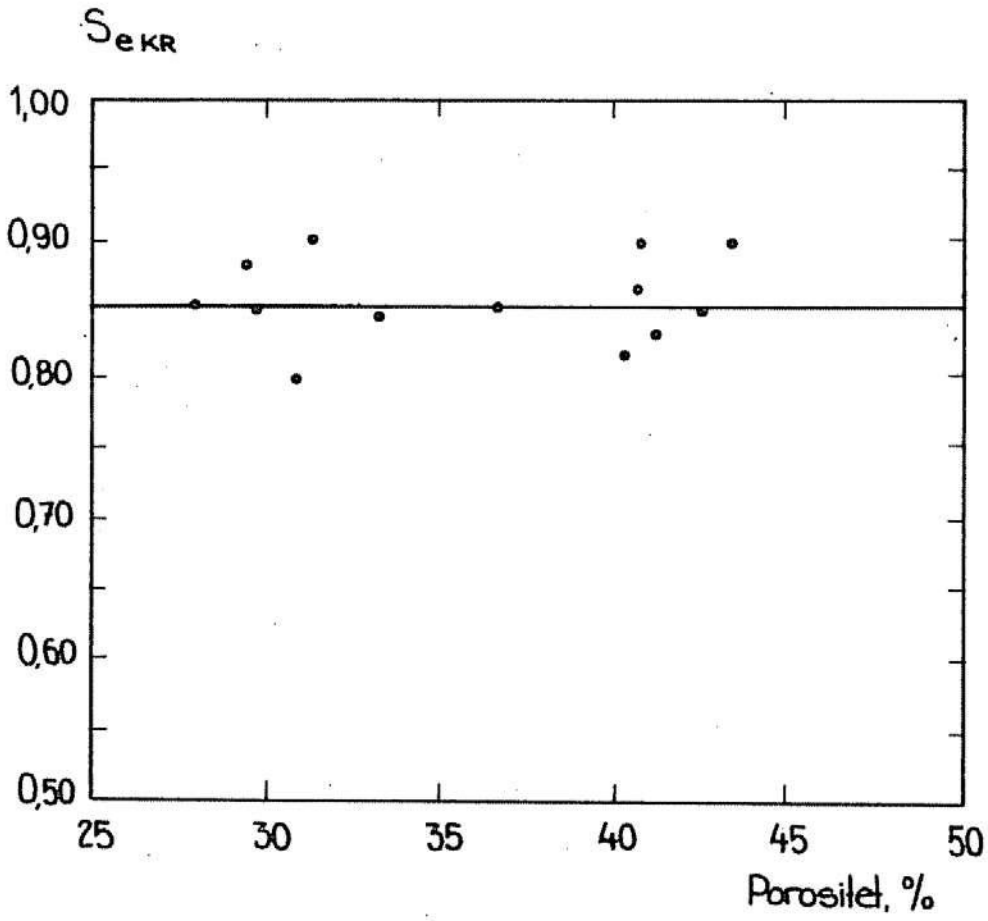


FIG 174 Inverkan av porositeten på S_{eKR} hos asbestcement. *Influence of porosity on S_{eKR} of asbestos-cements.*

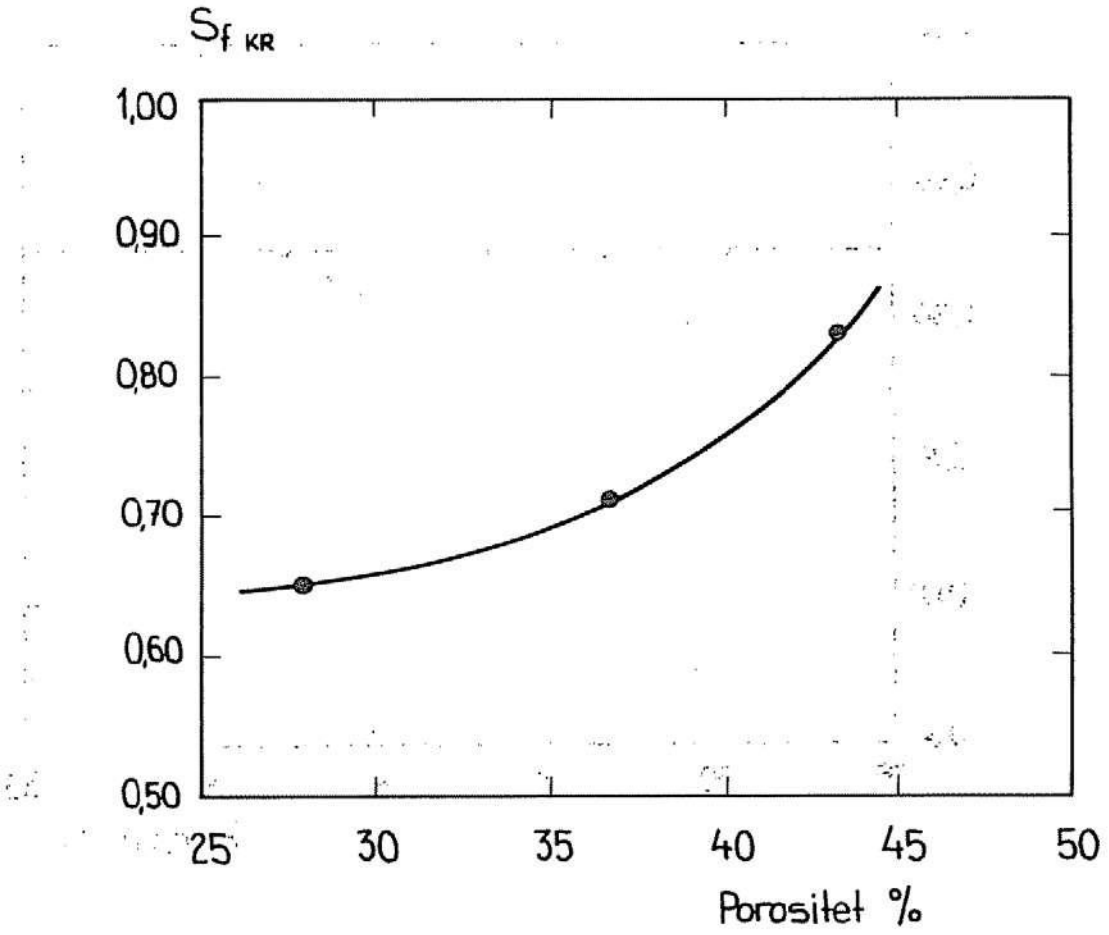


FIG 175 Inverkan av porositeten på S_{fKR} hos asbestcement. *Influence of porosity on* S_{fCR} *of asbestos-cements.*

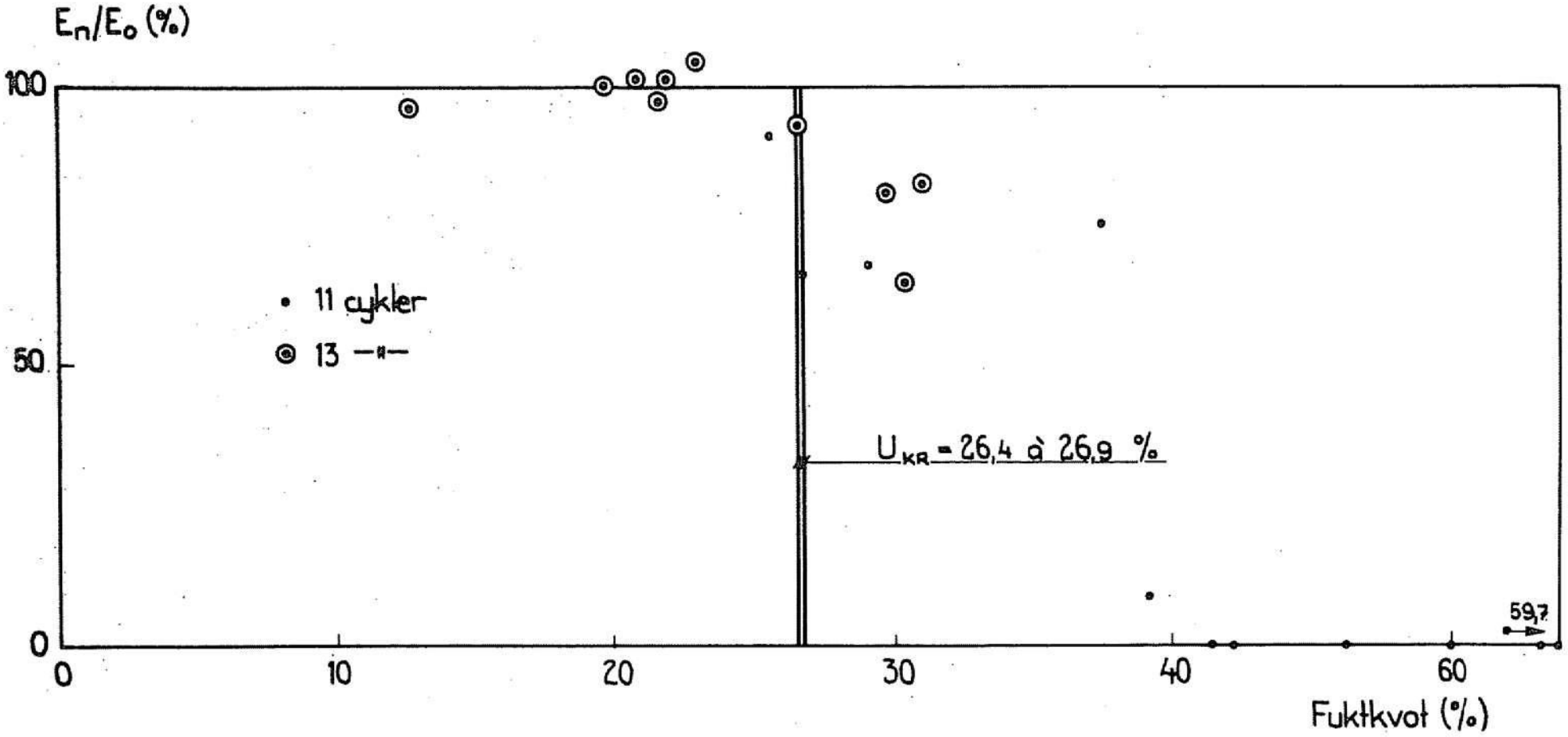


FIG 176 Material nr 28: Svenskt Lecablock, 650 kg/m^3. *Swedish Leca-concrete, density 650 kg/m^3.*

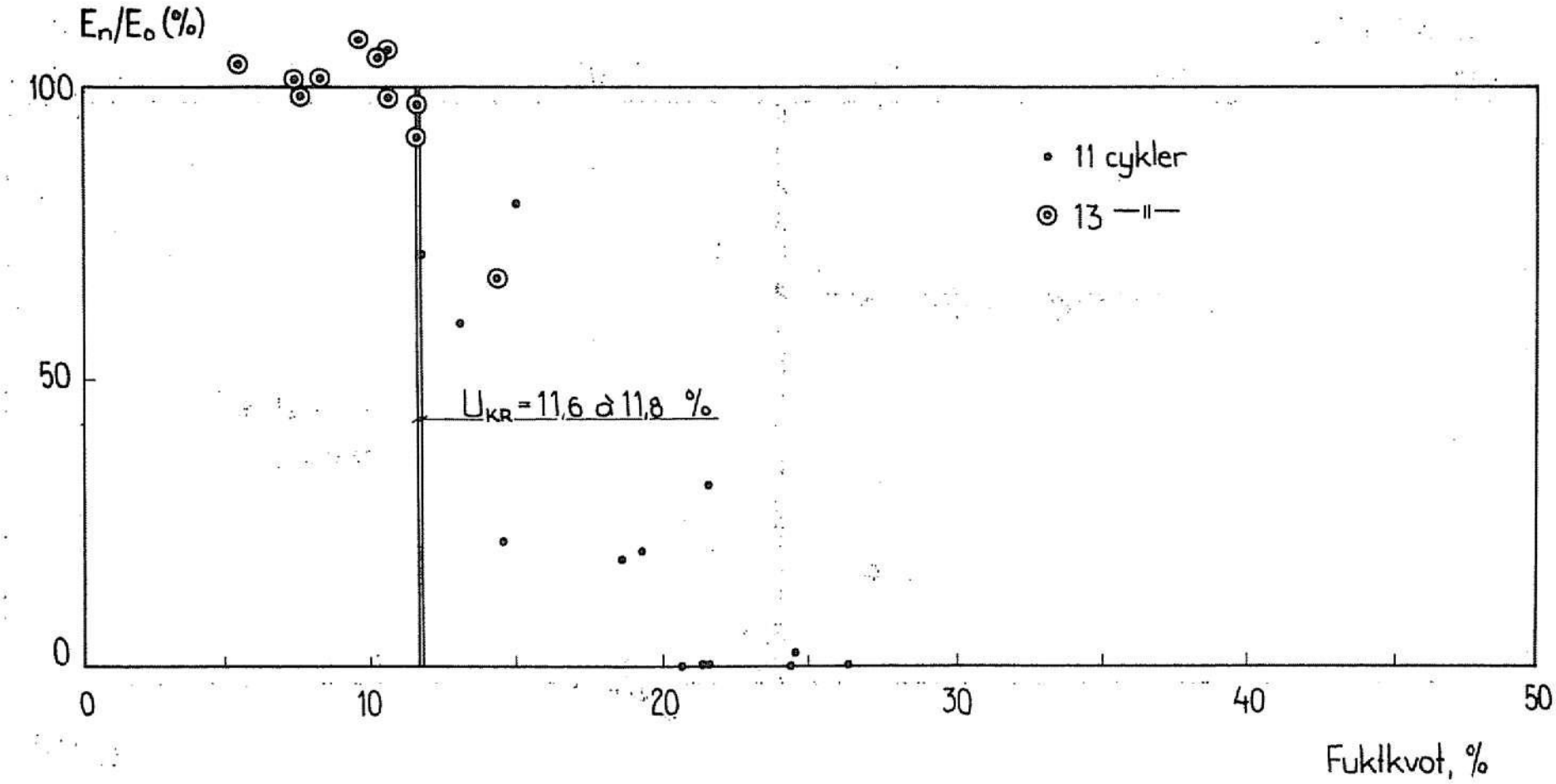


FIG 177 Material nr 29: Svenskt Lecablock, 1300 kg/m^3. *Swedish Leca-concrete, density 1300 kg/m^3.*

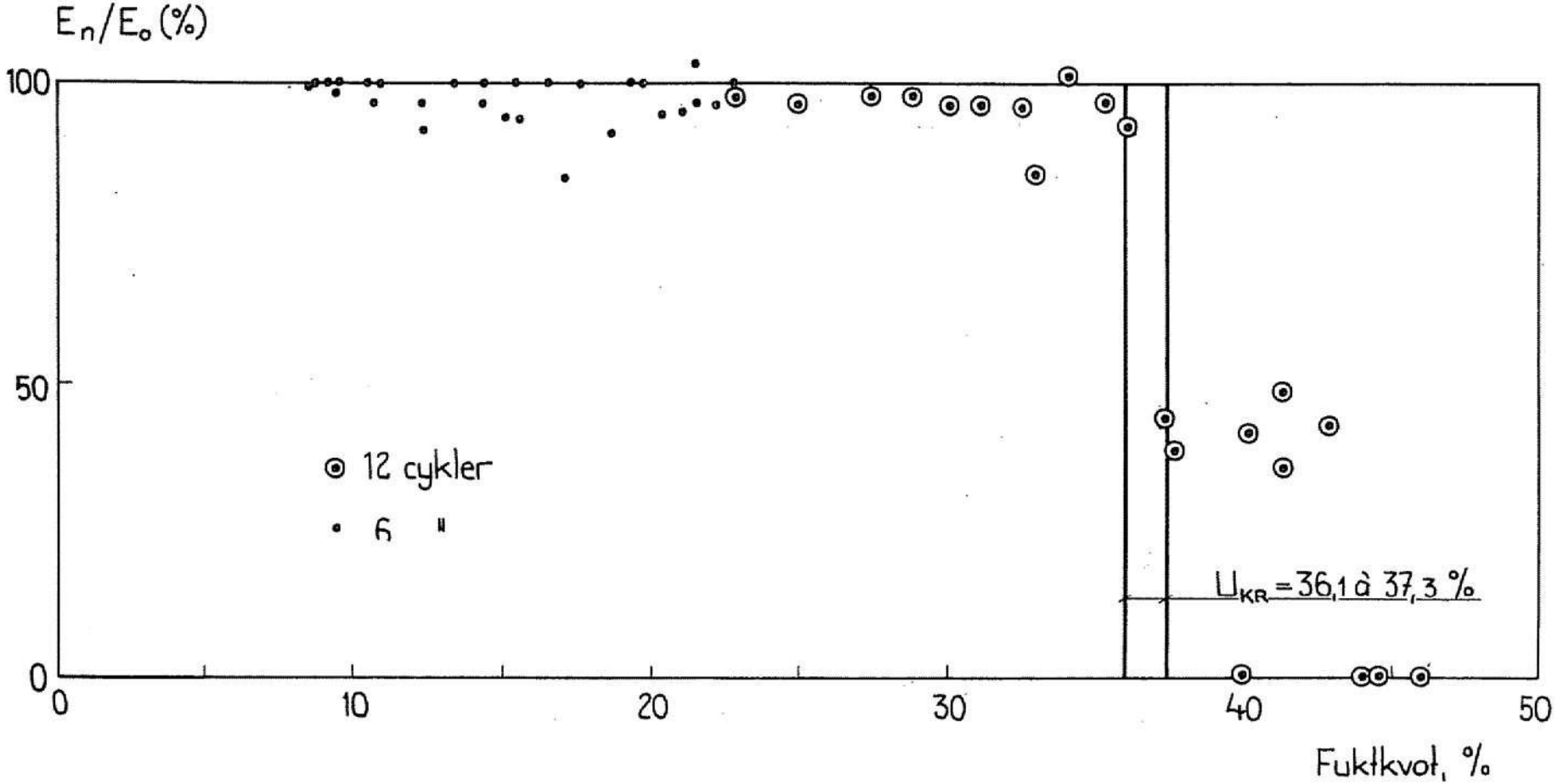


FIG 178 Material nr 30: Norskt Lecablock. Bindemedel portlandcement. *Norwegian Leca-concrete. Cement: Portlandcement.*

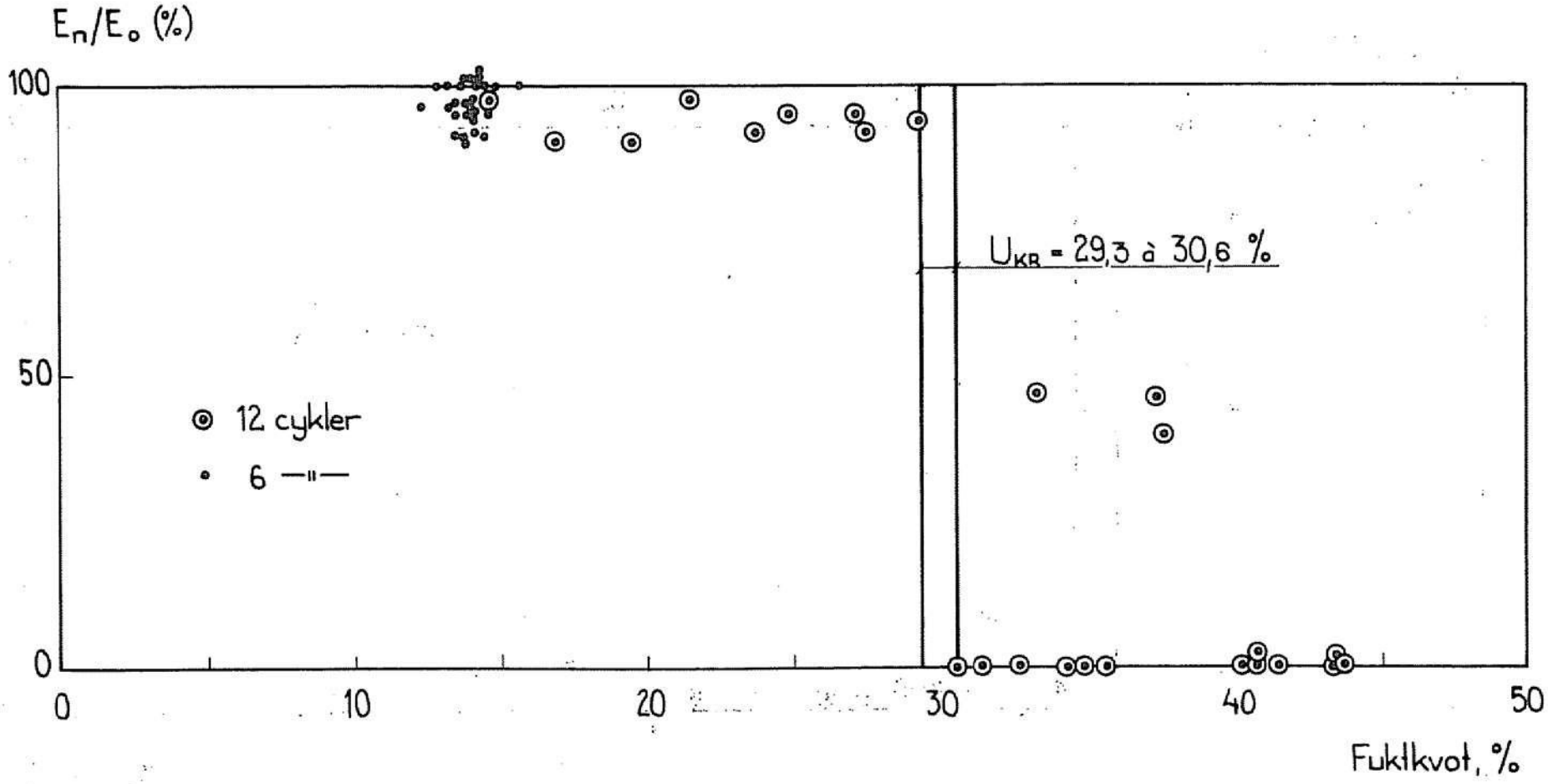


FIG 179 Material nr 31: Norskt Lecablock. Bindemedel portlandcement+stenmjöl.
Norwegian Leca-concrete. Cement: Portlandcement+stone-flour.

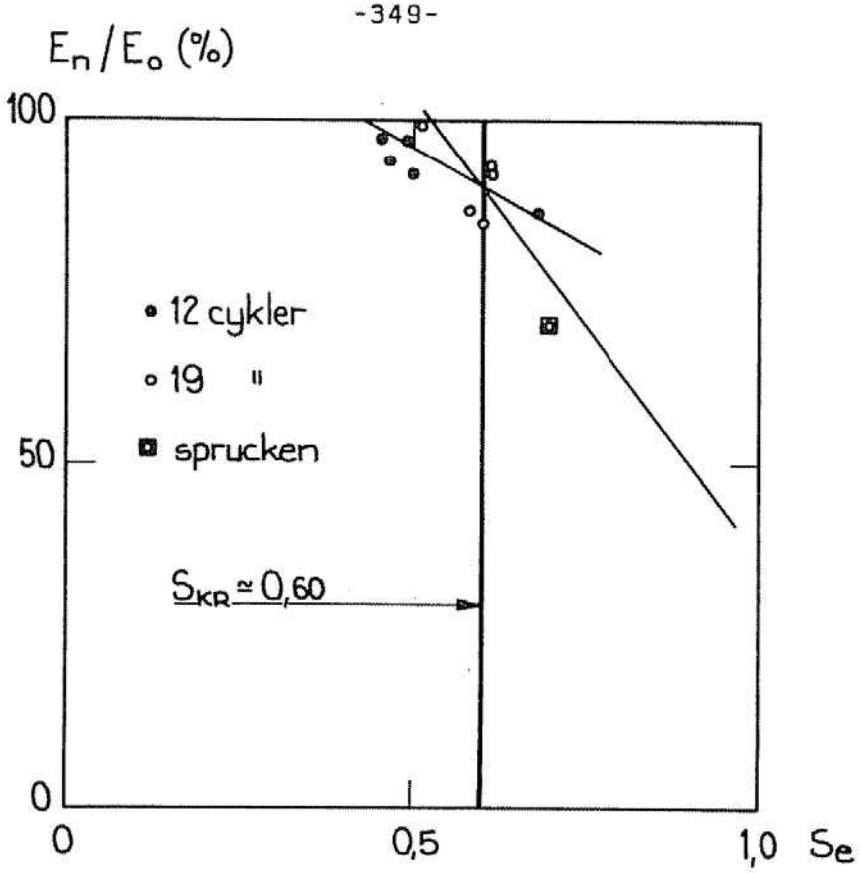


FIG 180 Material nr 32: Pimpstensbetong. *Pumice-concrete.*

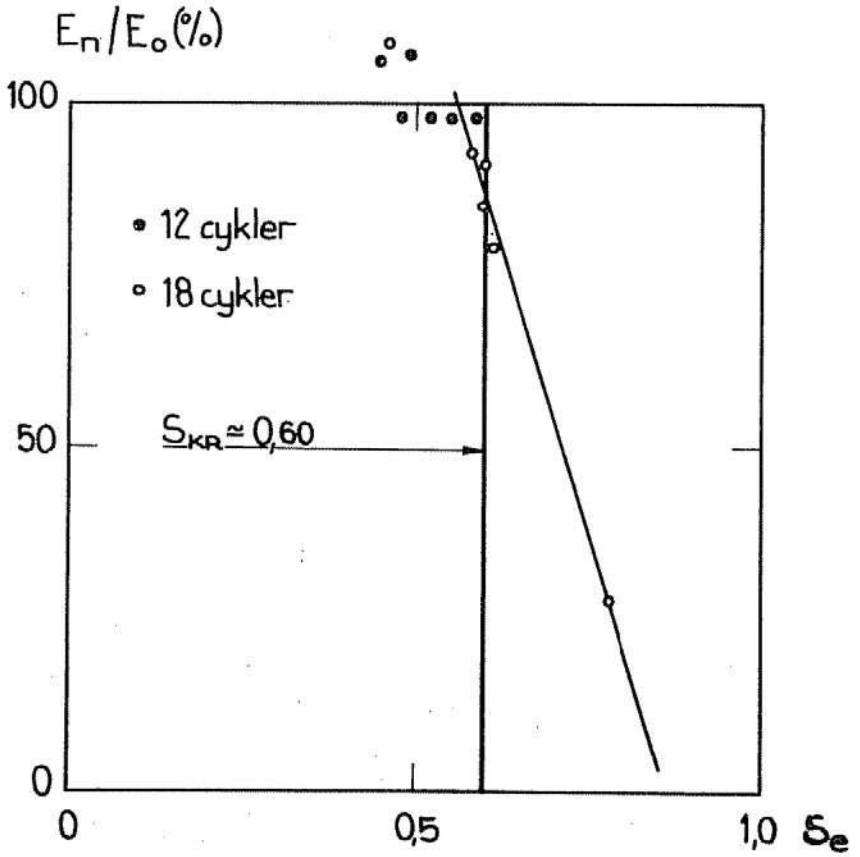


FIG 181 Material nr 33: Pimpstensbetong. *Pumice-concrete.*

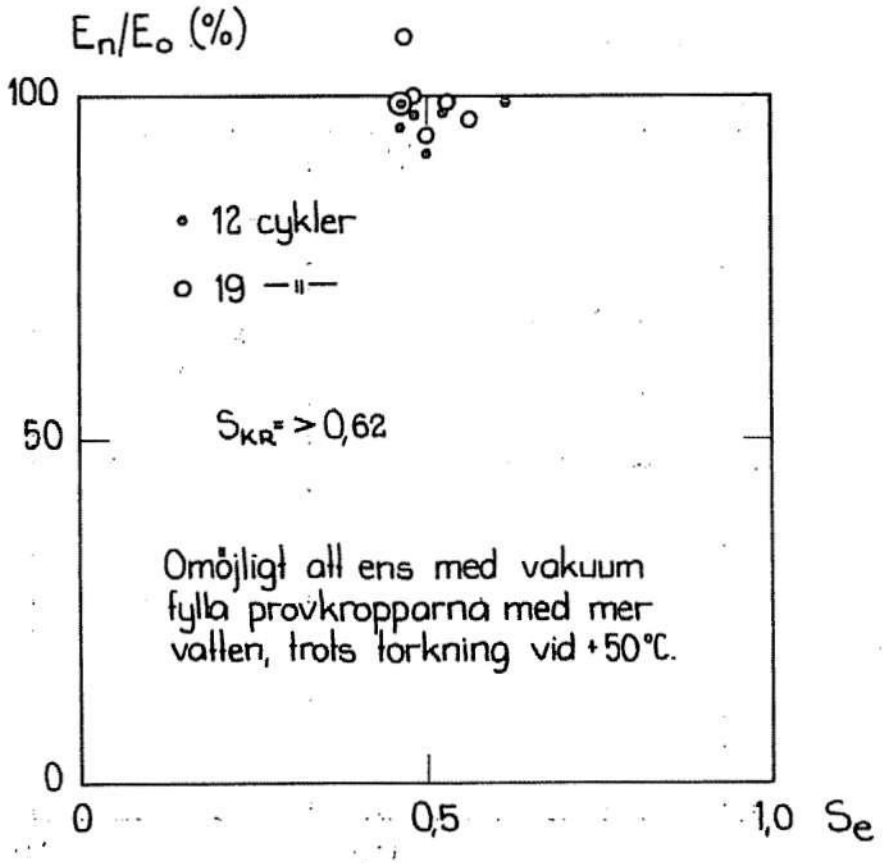


FIG 182 Material nr 34: Pimpstensbetong. *Pumice-concrete.*

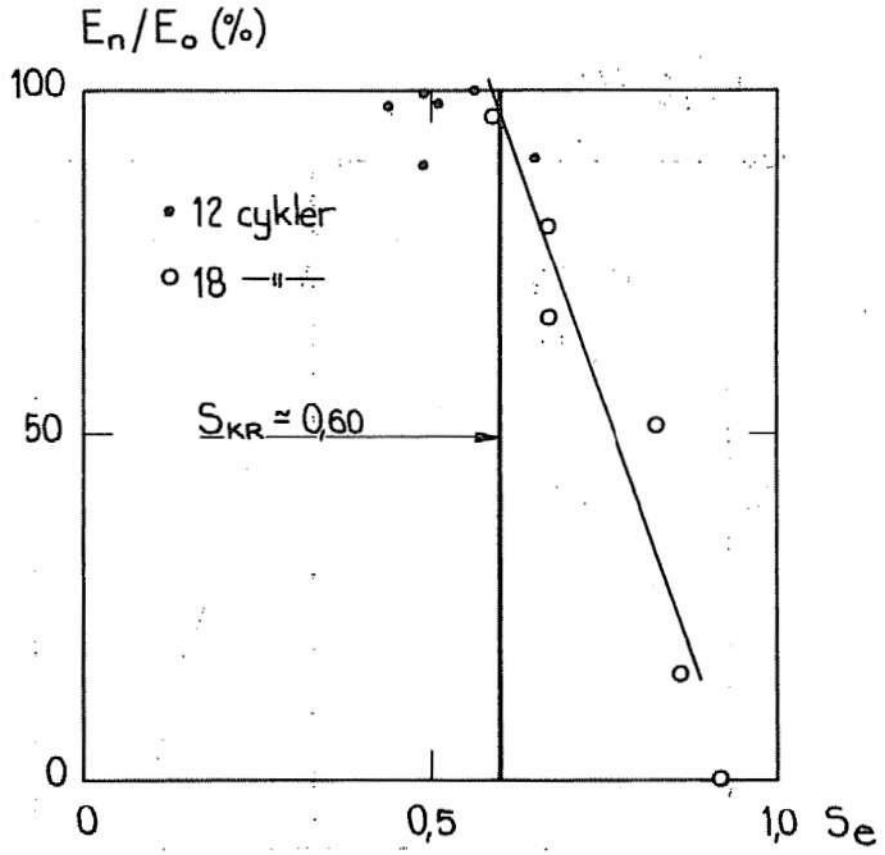


FIG 183 Material nr 35: Pimpstensbetong. *Pumice-concrete.*

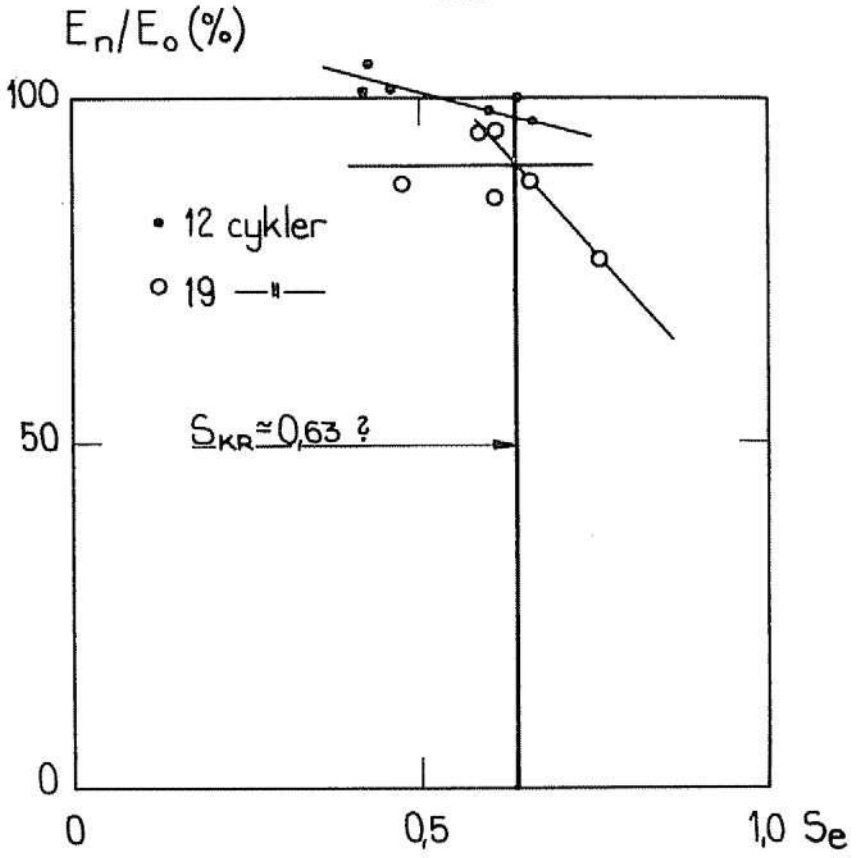


FIG 184 Material nr 36: Pimpstensbetong. *Pumice-concrete.*

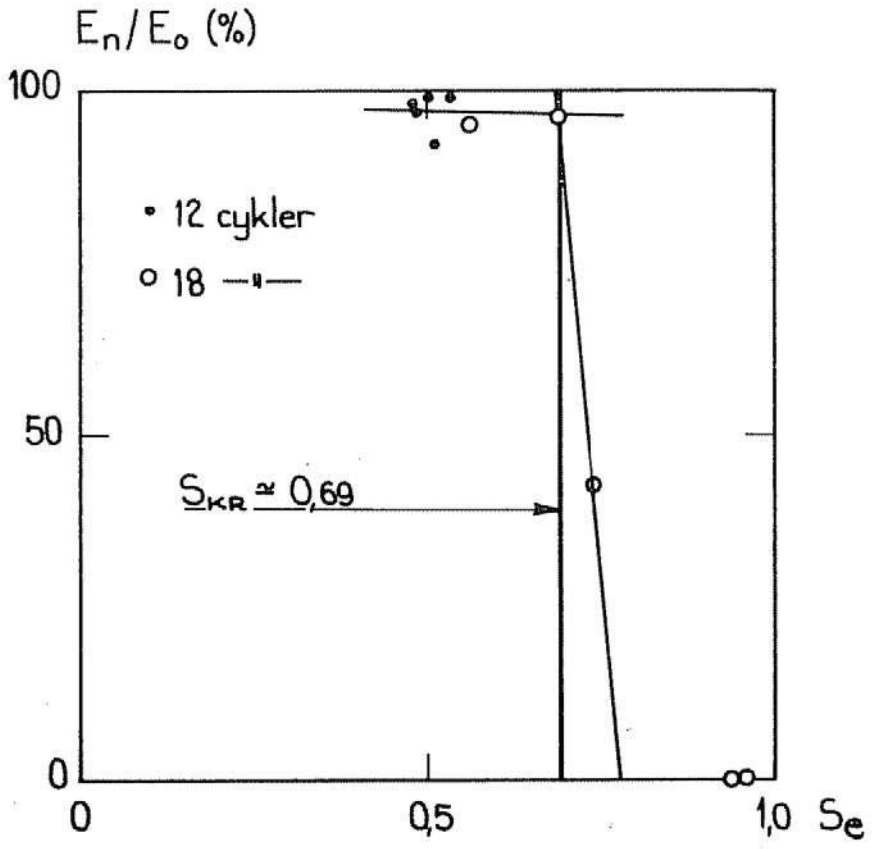


FIG 185 Material nr 37: Pimpstensbetong. *Pumice-concrete.*

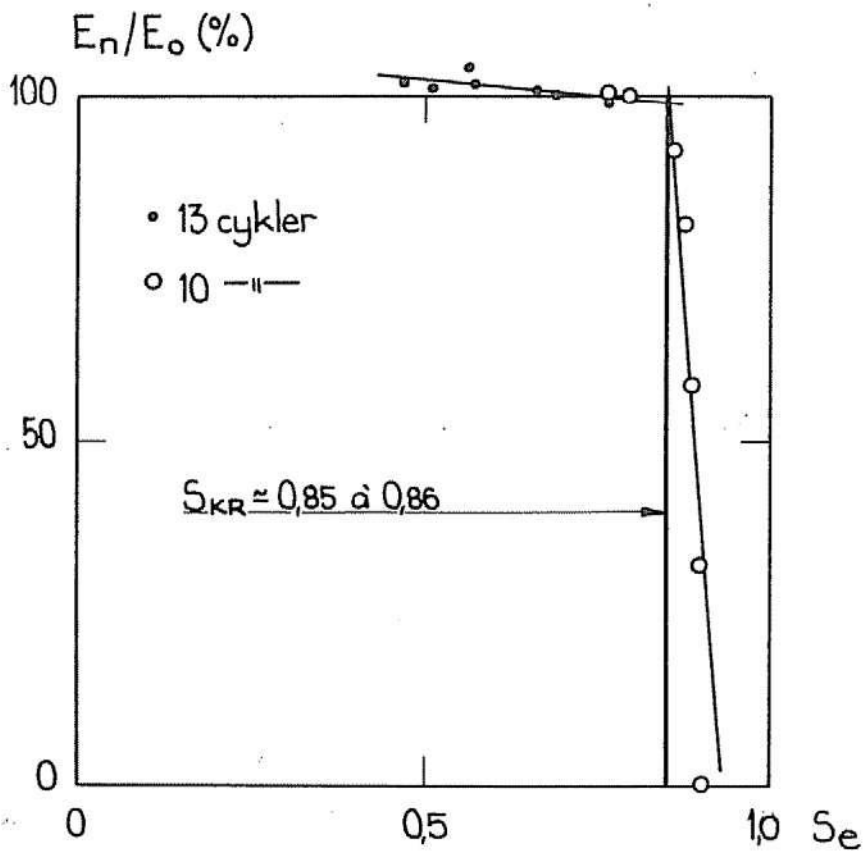


FIG 186 Material nr 38: Betong utan fiber. *Concrete without fibers.*

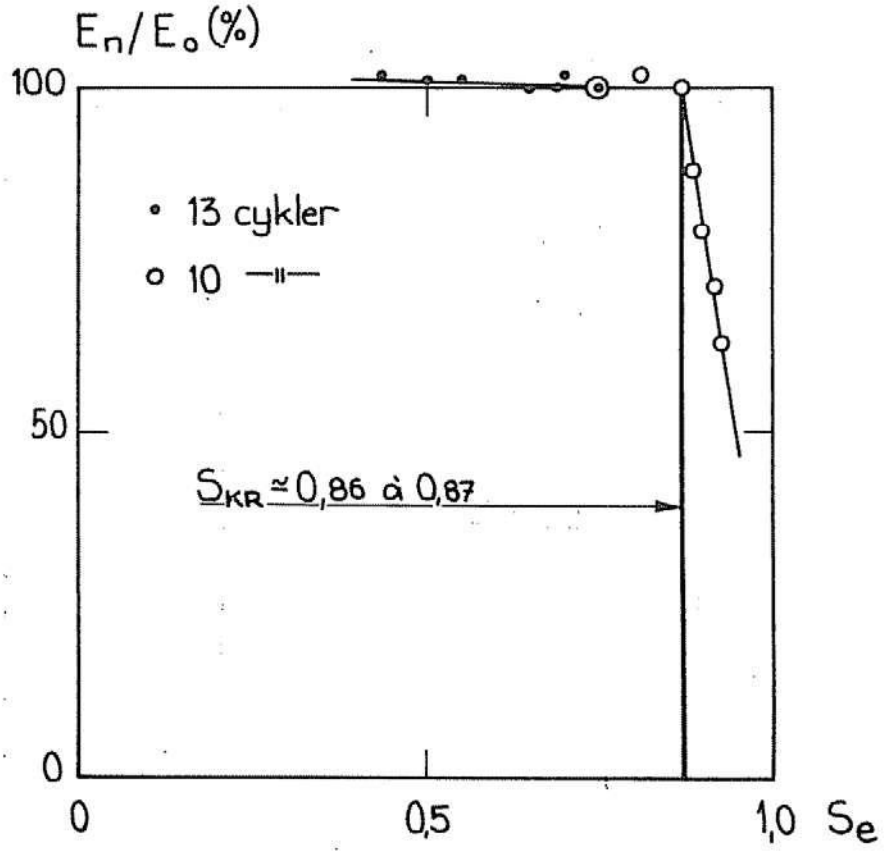


FIG 187 Material nr 39: Betong med fiber. *Concrete with fibers.*

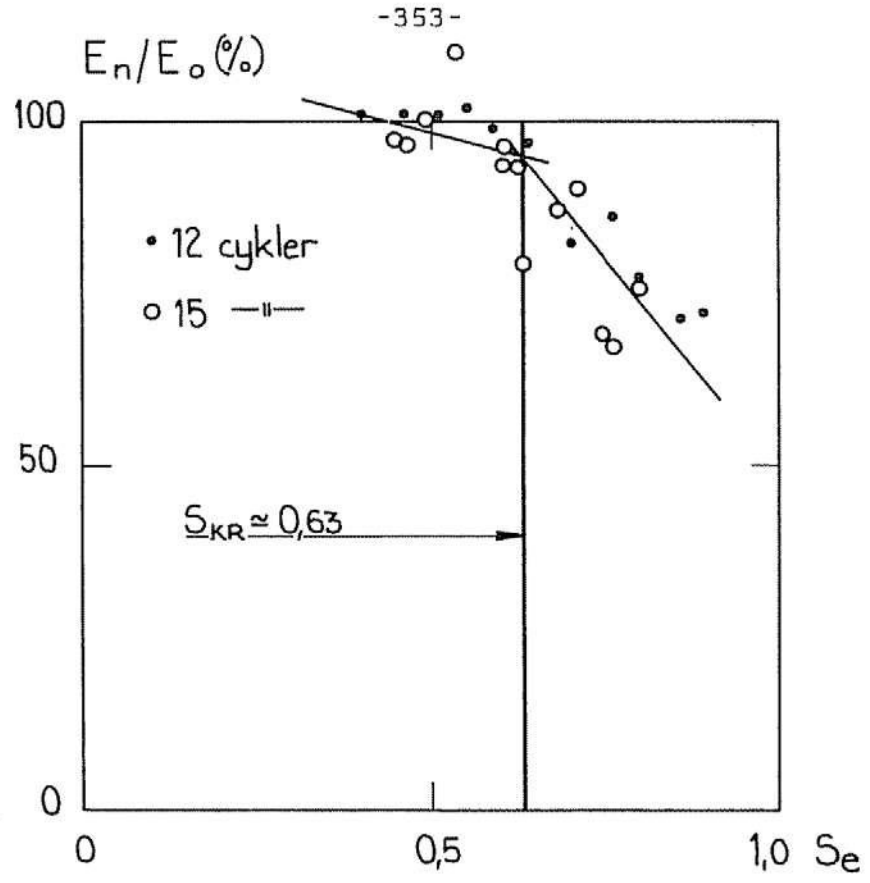


FIG 188 Material nr 40a; Betongtakpanna, vågtopp. *Concrete roofing tile, wave-top.*

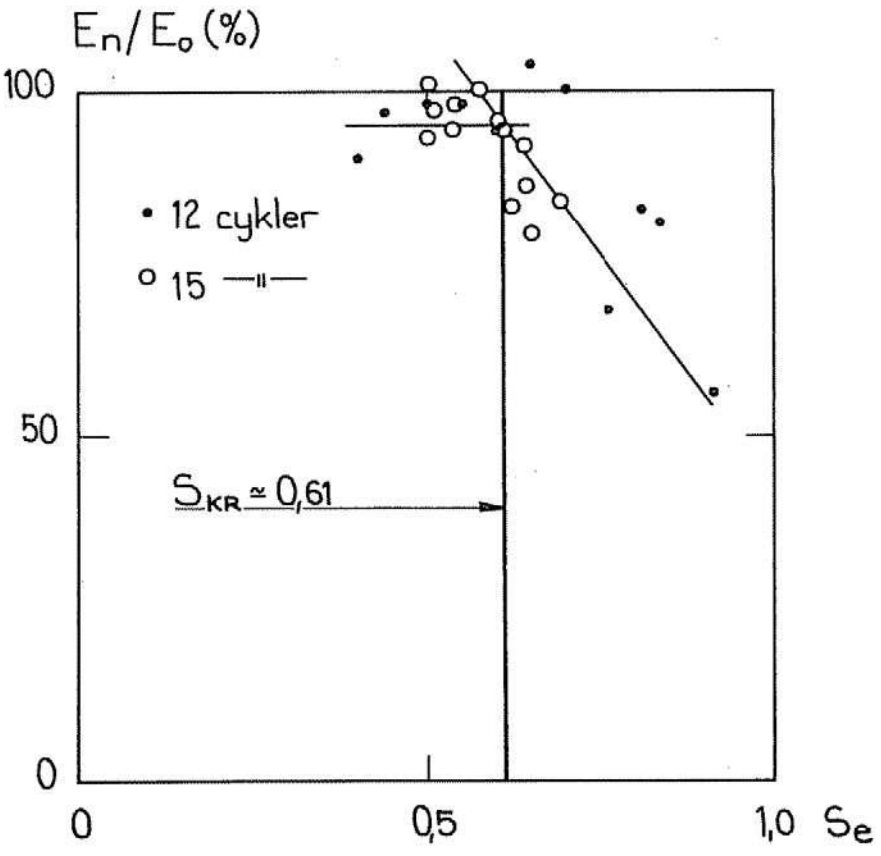


FIG 189 Material nr 40b; Betongtakpanna, vågdal. *Concrete roofing tile, wave-trough.*

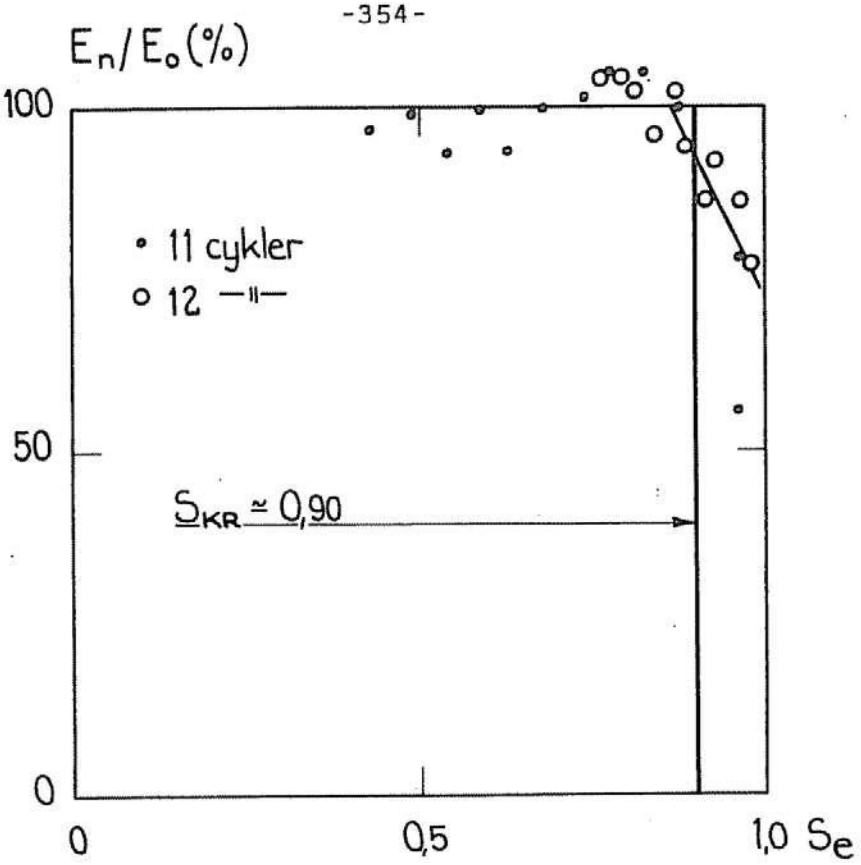


FIG 190 Material nr 41a; Tegeltakpanna. vågtopp. *Clay roofing tile, wave-top.*

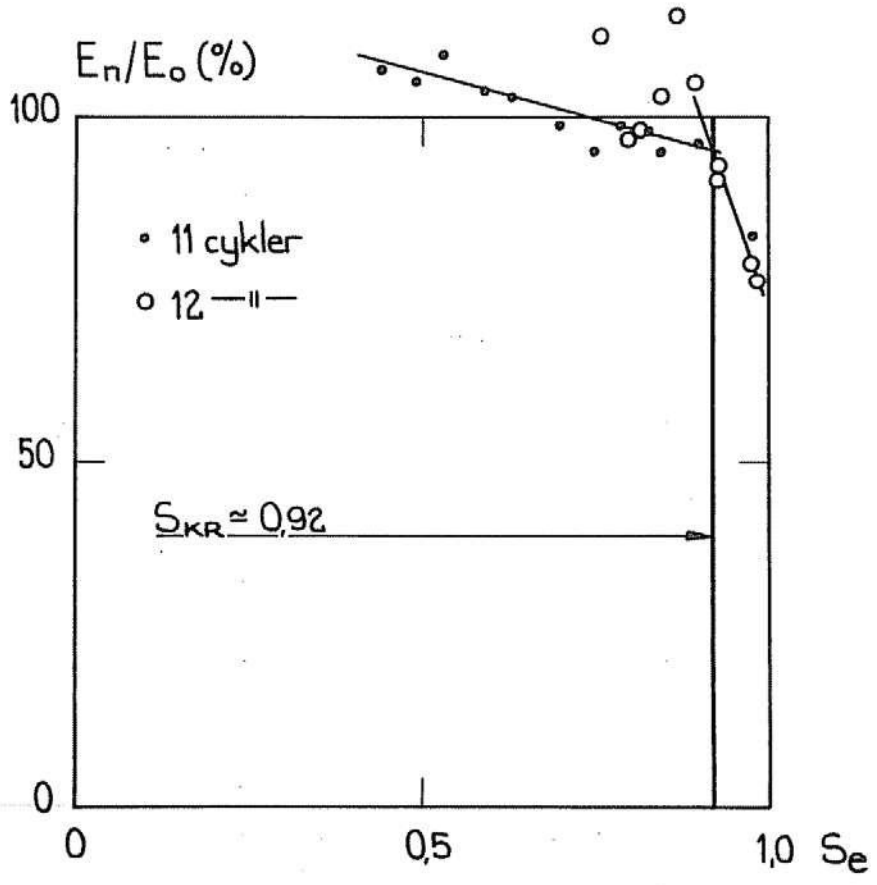


FIG 191 Material nr 41b; Tegeltakpanna, vågdal. *Clay roofing tile, wave-trough.*

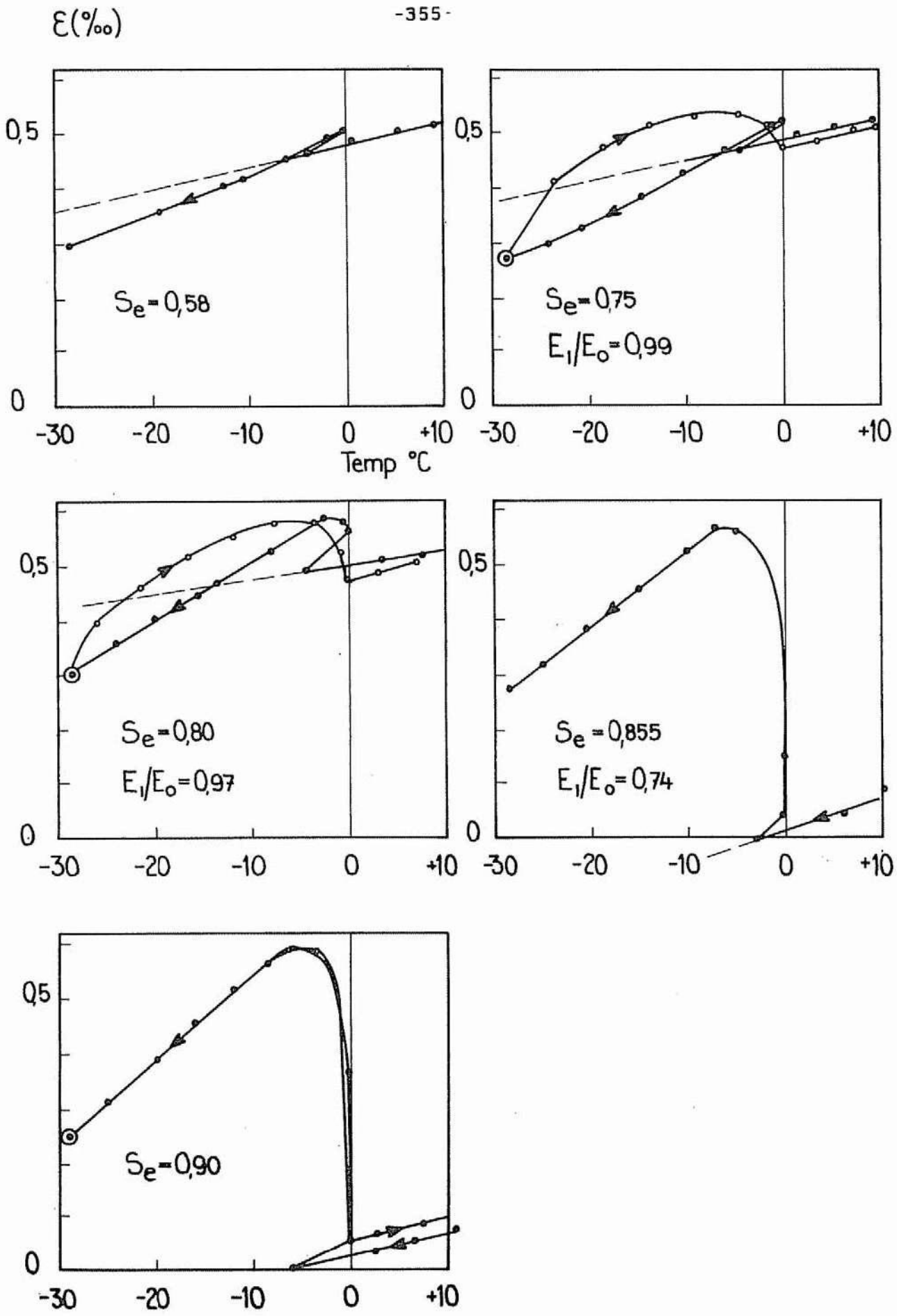


FIG 192 Material nr 1. Lösbränt tegel. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar.
Underburnt clay brick. determination of S_{CR} by one-cycle-freezings.

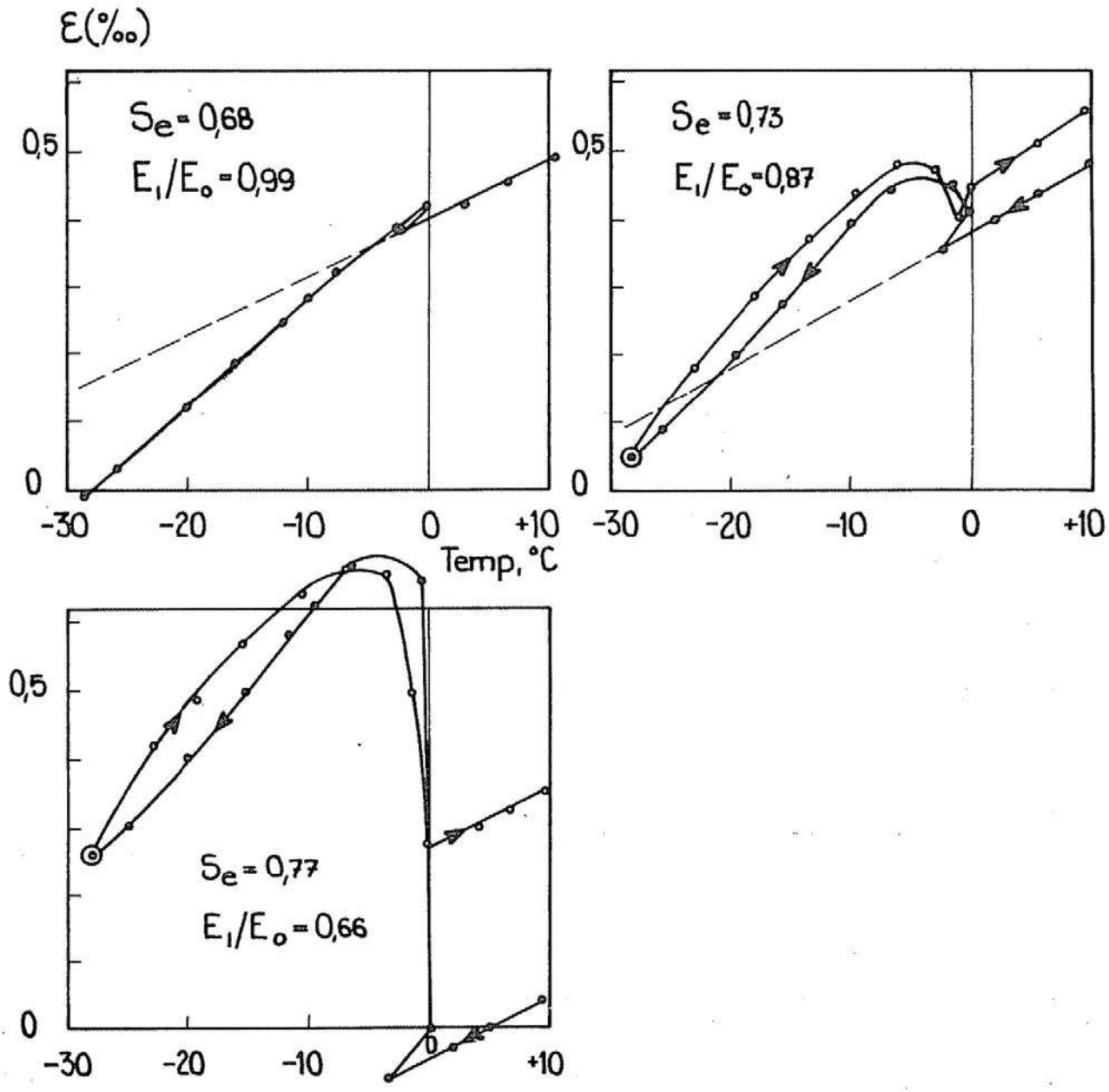


FIG 193 Material nr 2. Hårdbränt tegel. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar. Provkropp nr 1. *Wellburnt clay brick. Determination of S_{CR} by one-cycle-freezings. Specimen No 1.*

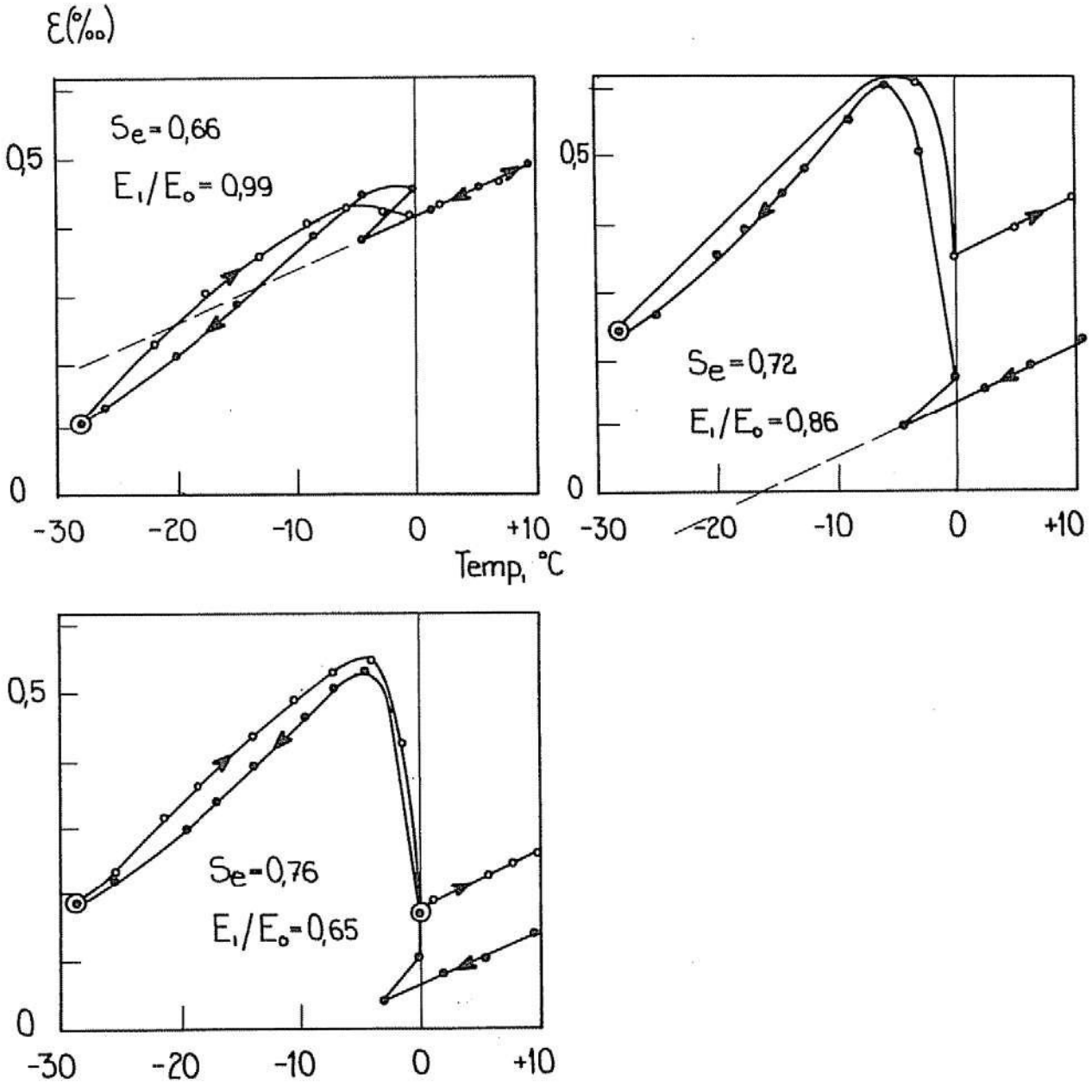


FIG 194 Material nr 2. Hårdbränt tegel. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar. Provkropp nr 2. *Wellburnt clay brick. Determination of S_{CR} by one-cycle-freezings. Specimen No 2.*

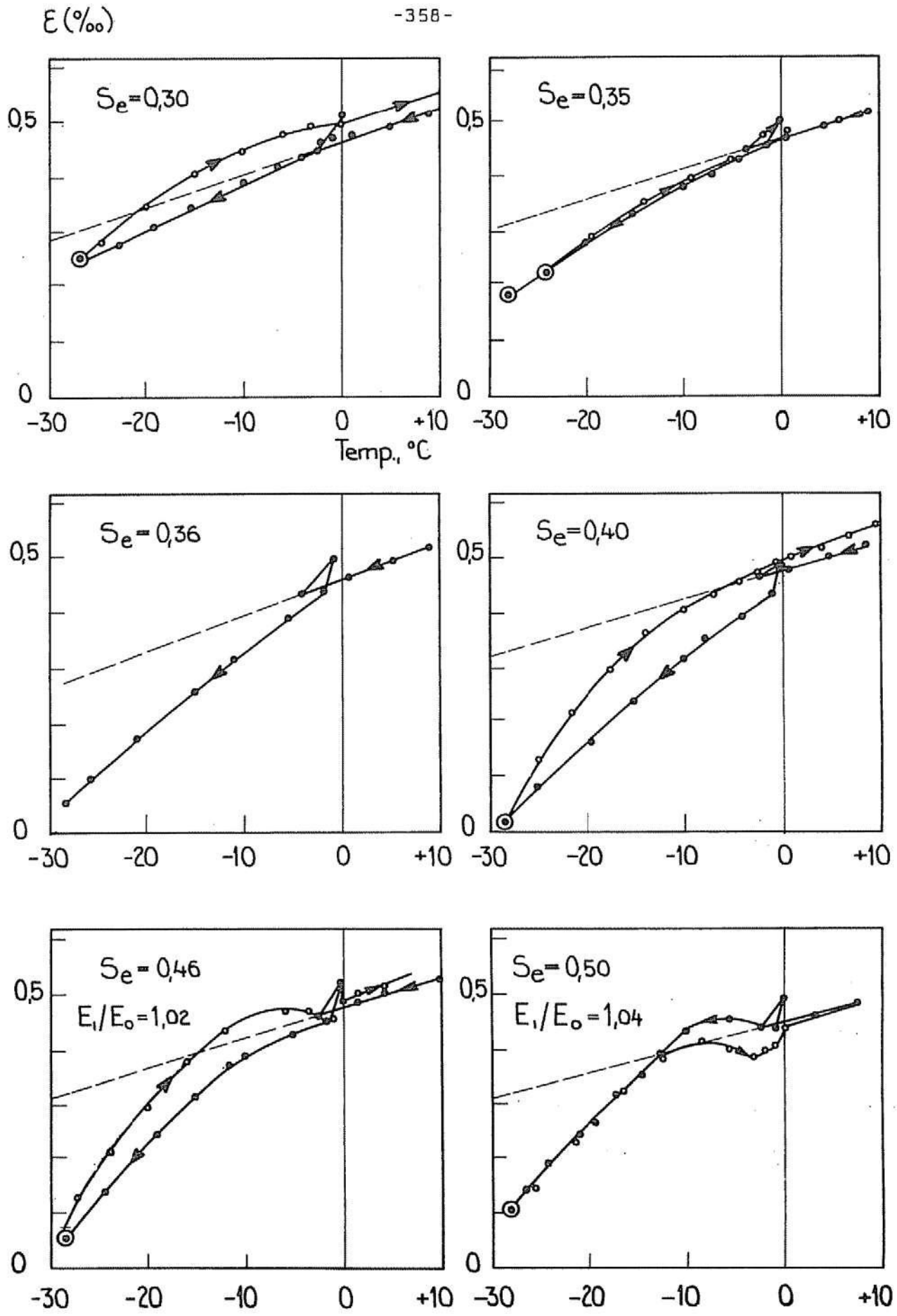


FIG 195 Material nr 8: Gasbetong typ 1. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar.
Cellular concrete type 1. Determination of S_{CR} by one-cycle-freezings.

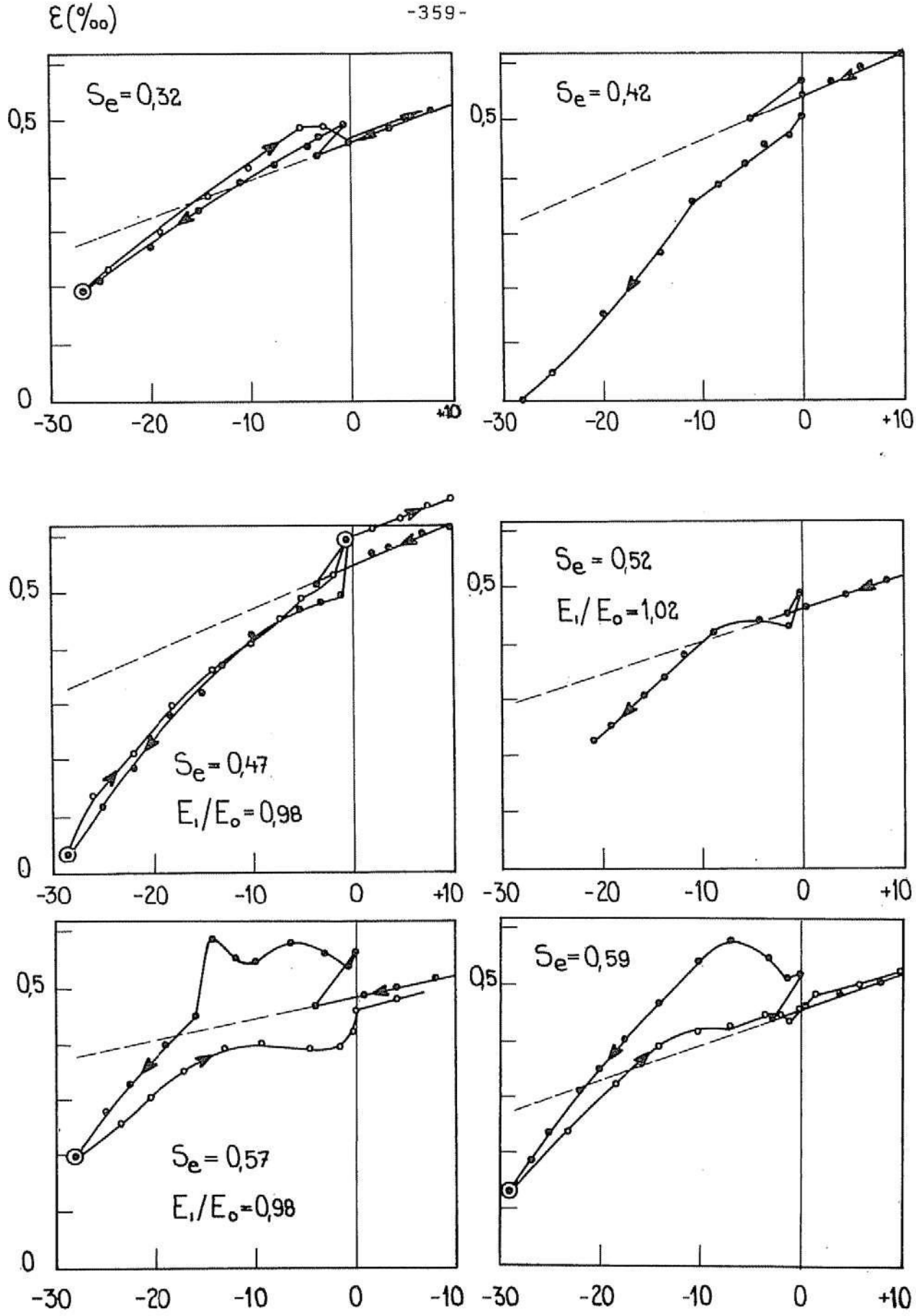


FIG 196 Material nr 9: Gasbetong typ 2. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar.
Cellular concrete type 2. Determination of S_{CR} by one-cycle-freezings.

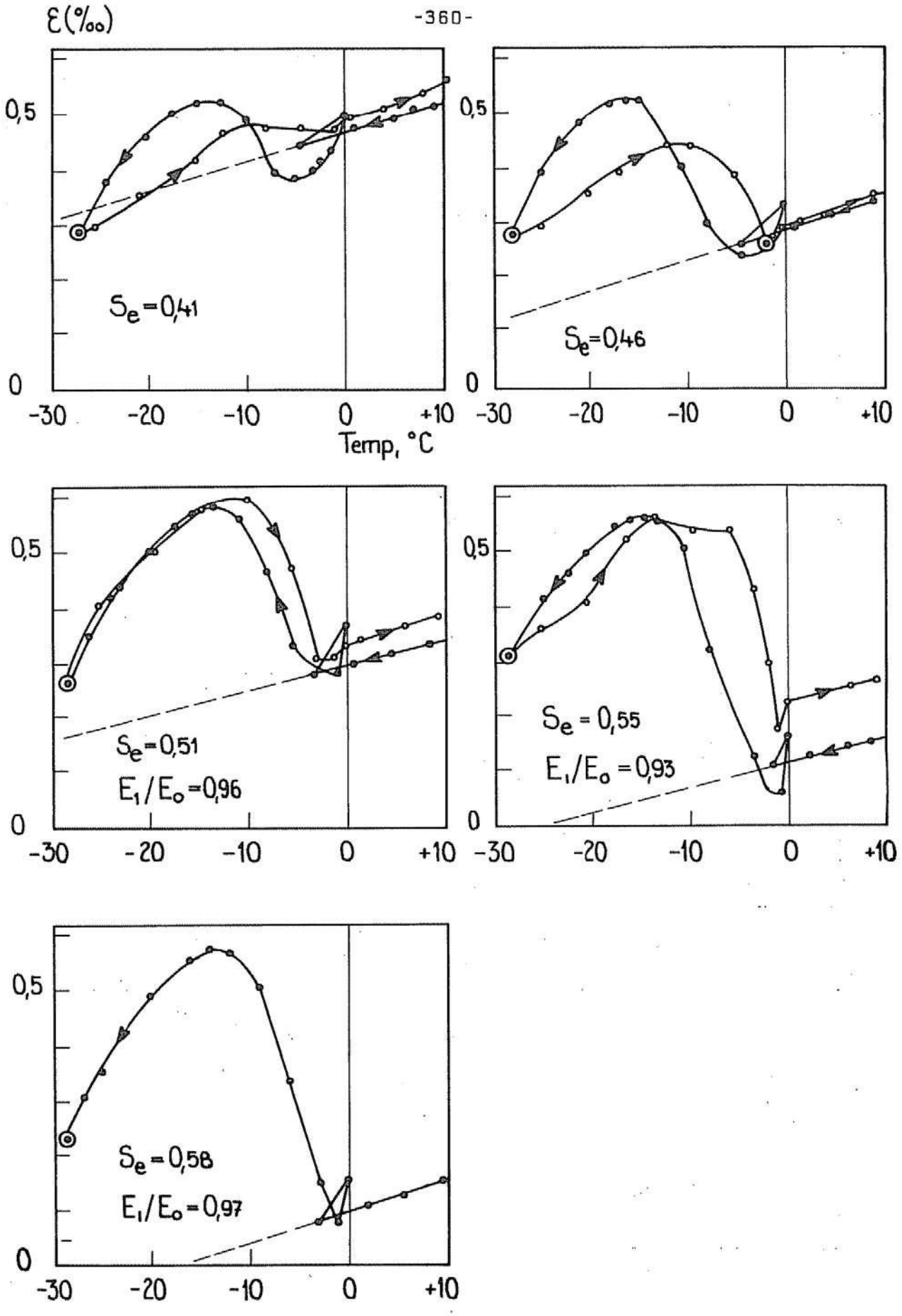


FIG 197 Material nr 10. Gasbetong typ 3. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar. Provkropp nr 1. *Cellular concrete type 3. Determination of S_{CR} by one-cycle-freezings. Specimen No 1.*

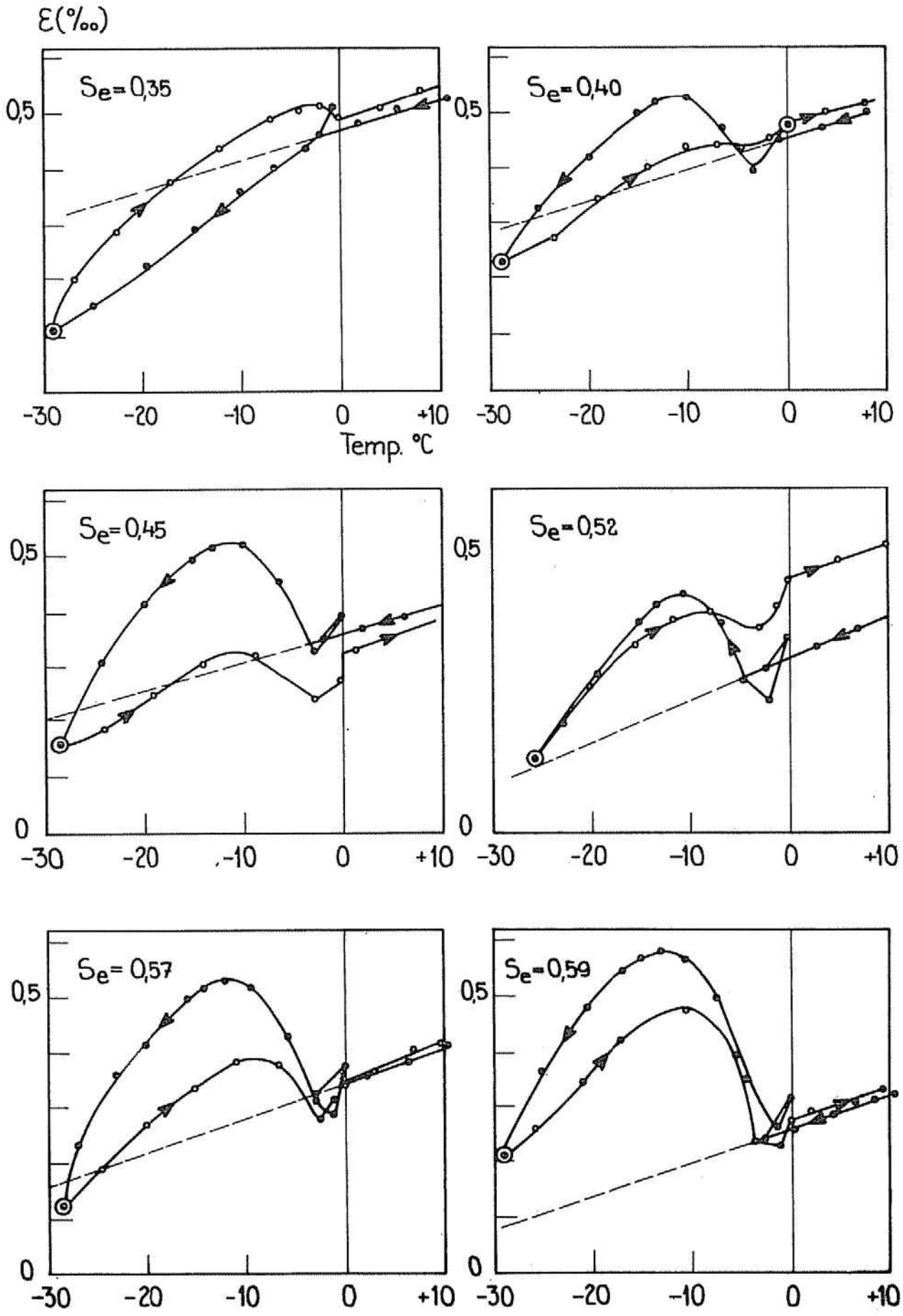


FIG 198 Material nr 10: Gasbetong typ 3. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar. Provkropp nr 2. *Cellular concrete type 3. Determination of S_{CR} by one-cycle-freezings. Specimen No 2.*

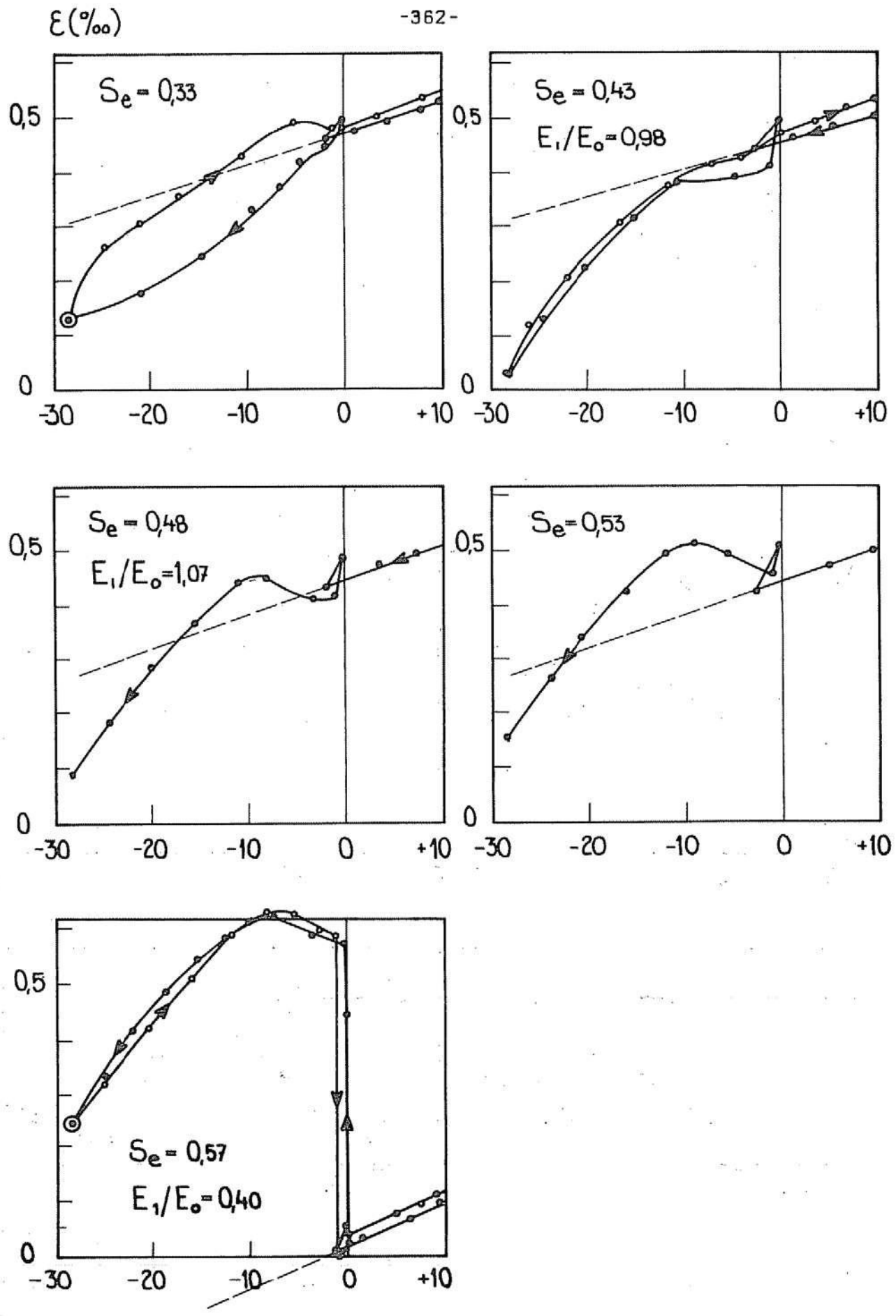


FIG 199 Material nr 11: Gasbetong typ 4. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar.
Cellular concrete type 4. Determination of S_{CR} by one-cycle-freezings.

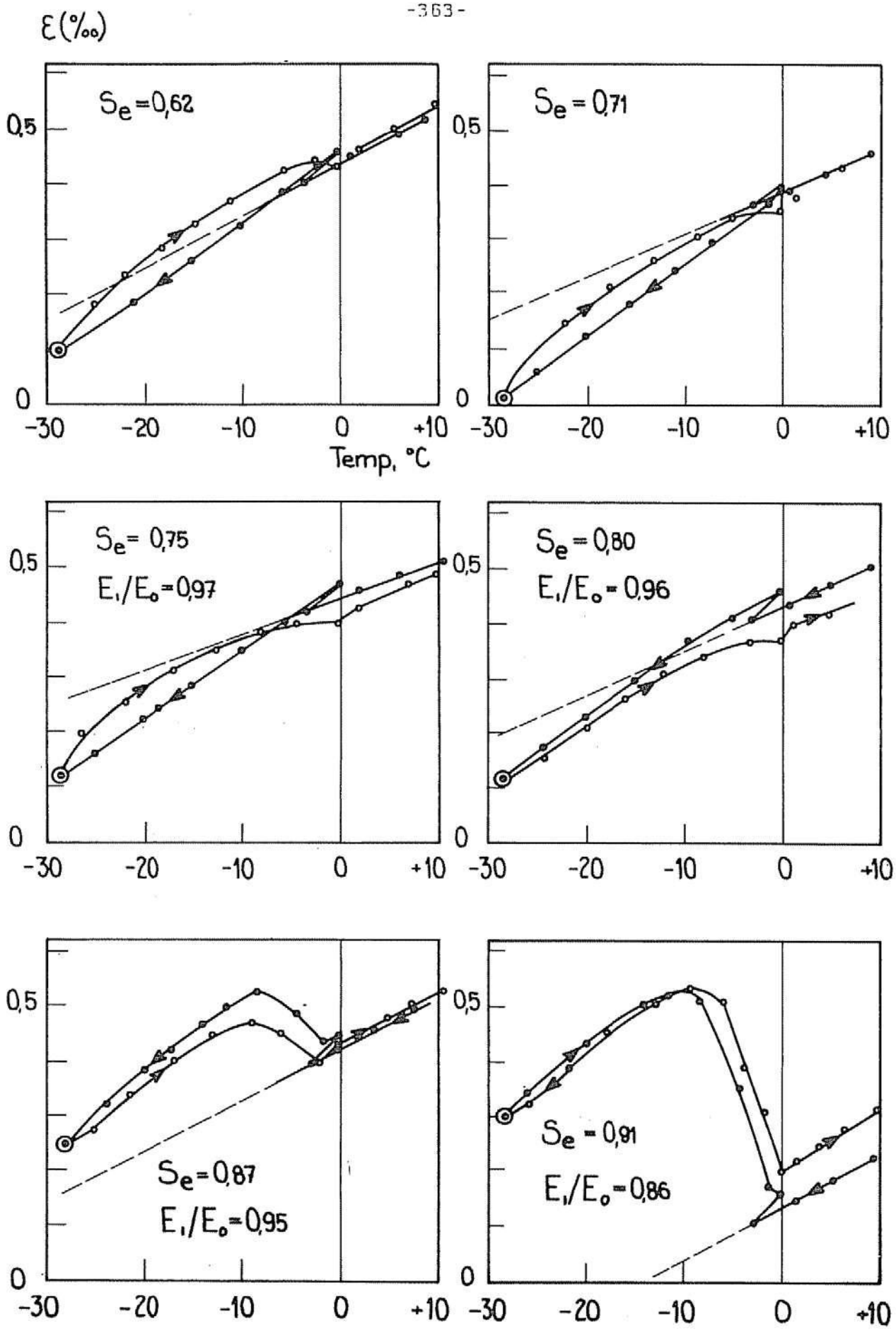


FIG 300 Material nr 7: Kalksandsten. Bestämning av S_{KR} med encykelfrysningar.
Sand lime brick. Determination of S_{CR} by one-cycle-freezings.

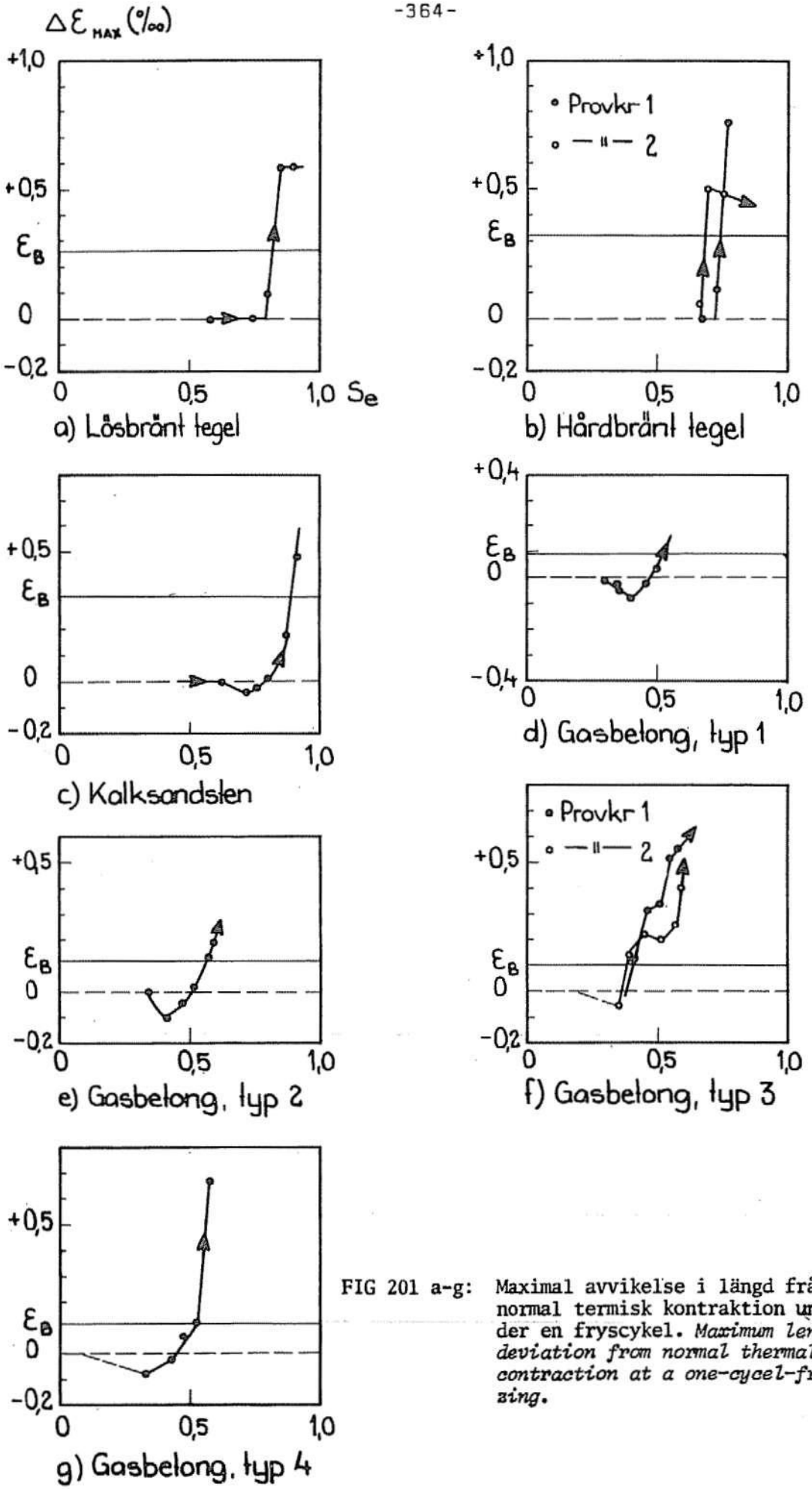


FIG 201 a-g: Maximal avvikelse i längd från normal termisk kontraktion under en fryscykel. *Maximum length-deviation from normal thermal contraction at a one-cycel-freezing.*

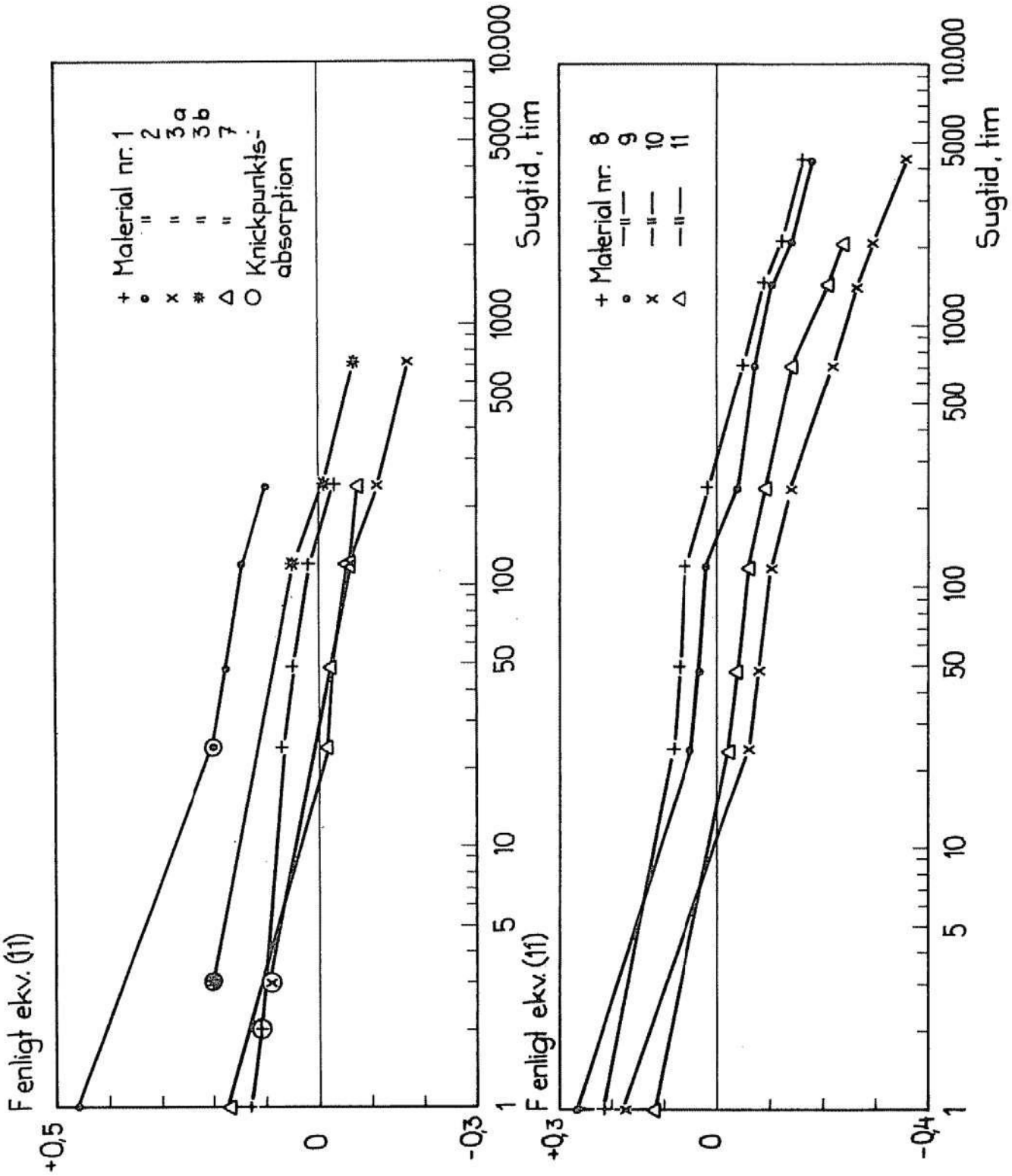


FIG 202 Beräknad frostbeständighet hos tegel och kalksandsten. *Calculated frost-resistance of clay bricks and sand lime brick.*

FIG 203 Beräknad frostbeständighet hos gasbetonger. *Calculated frost-resistance of cellular concretes.*

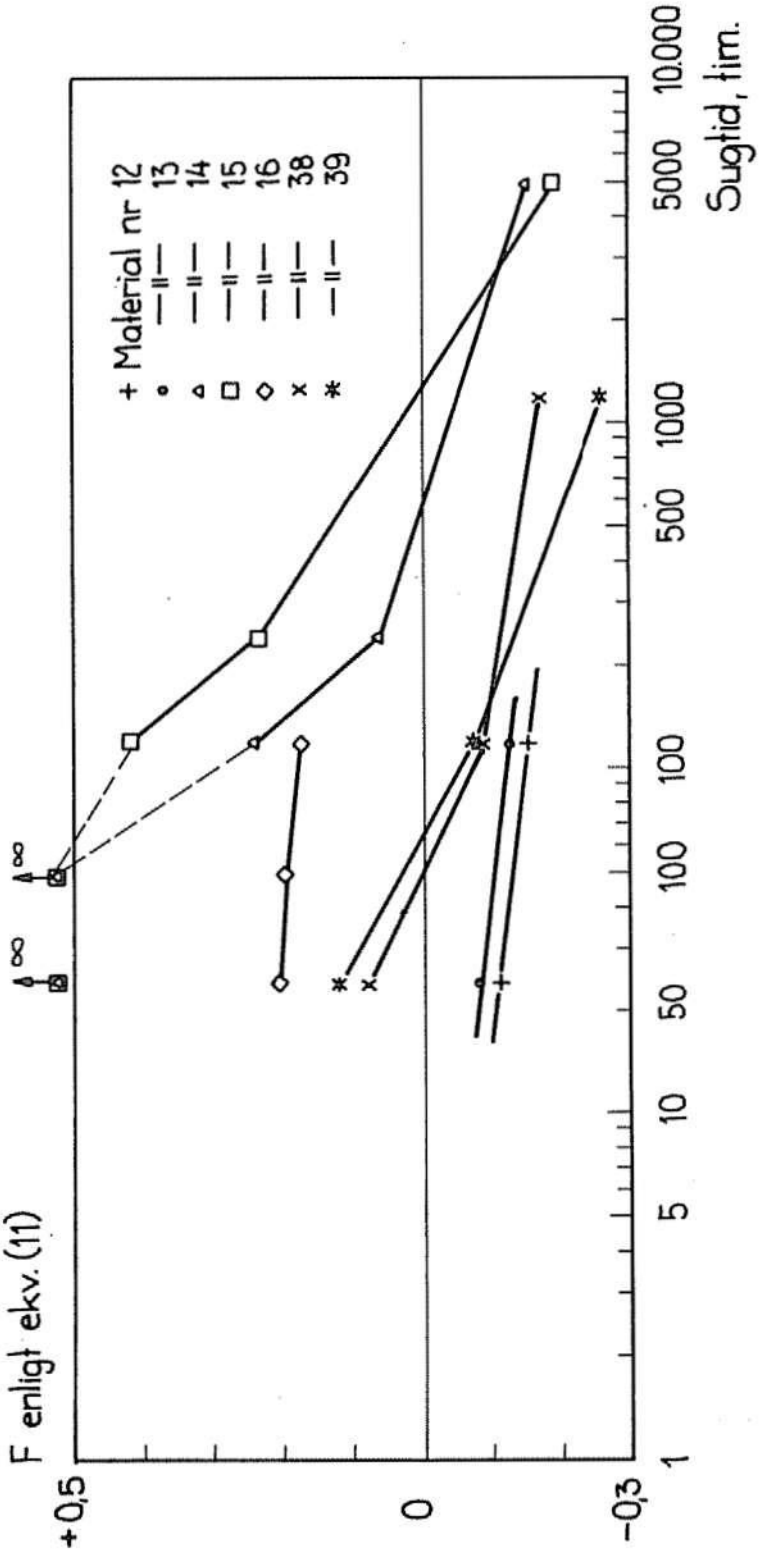


FIG 204 Beräknad frostbeständighet hos cementbruk, KC-bruk och betonger.
Calculated frost-resistance of cement mortars, lime-cement mortar and concretes.

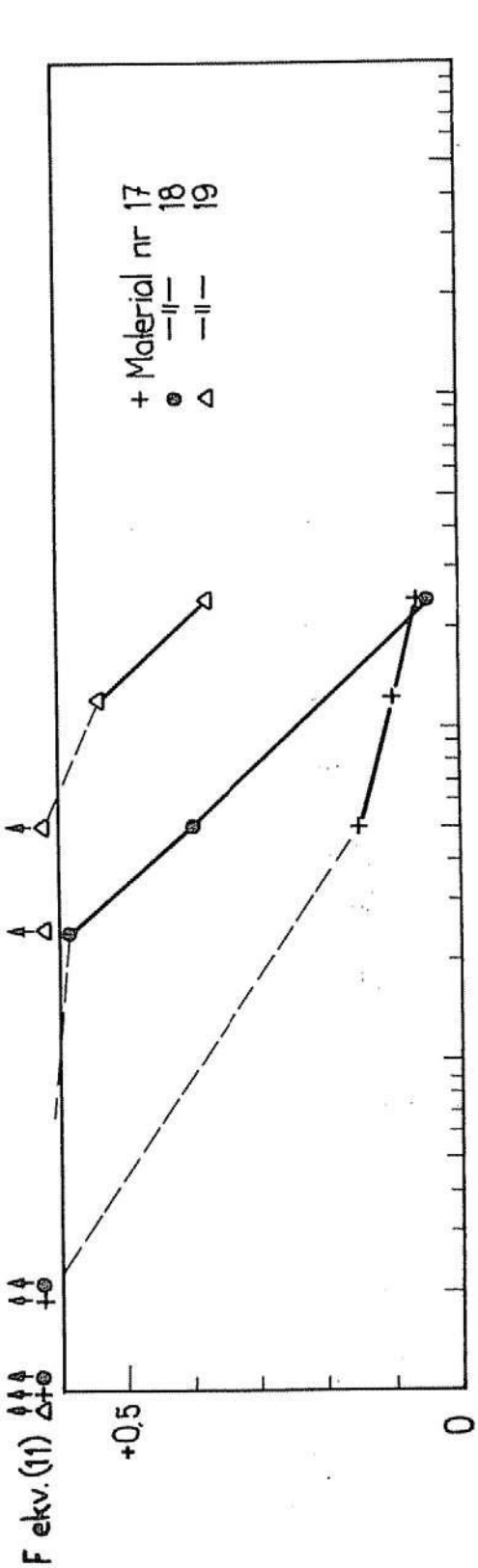


FIG 205 Beräknad frostbeständighet hos asbestcement nr 17-19. *Calculated frost-resistance of asbestos-cements No 17-19.*

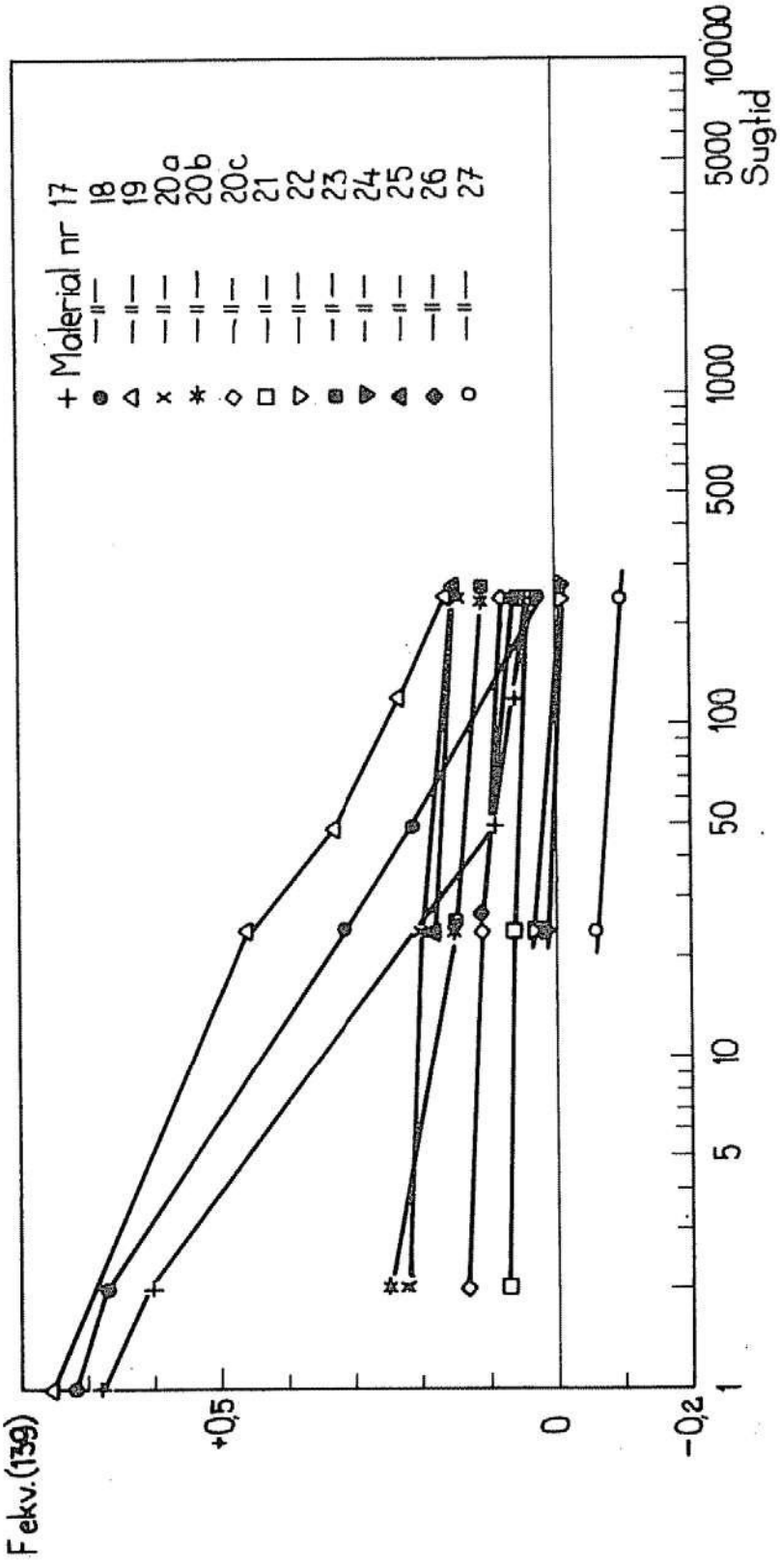


FIG 206 Beräknad frostbeständighet hos asbestcement. *Calculated frost-resistance of asbestos-cements.*

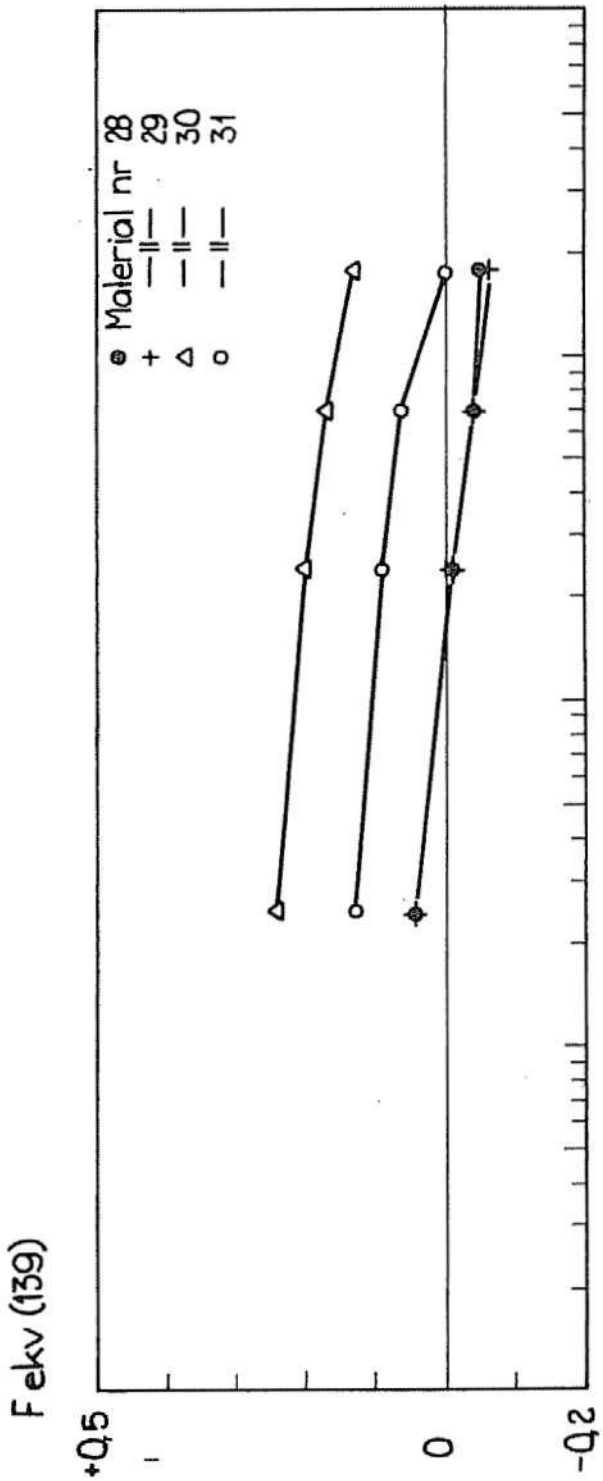


FIG 207 Beräknad frostbeständighet hos Lecablock. *Calculated frost-resistance of Leca-blocks.*

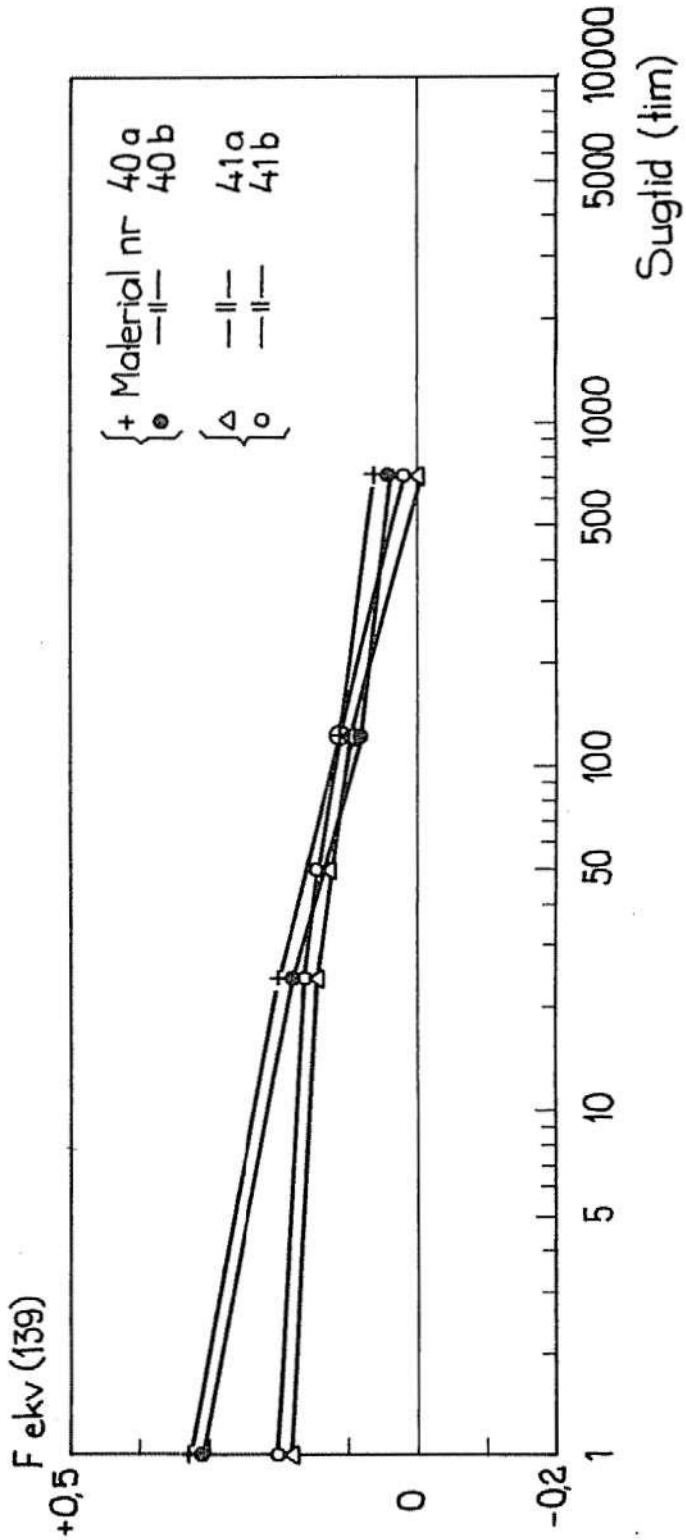
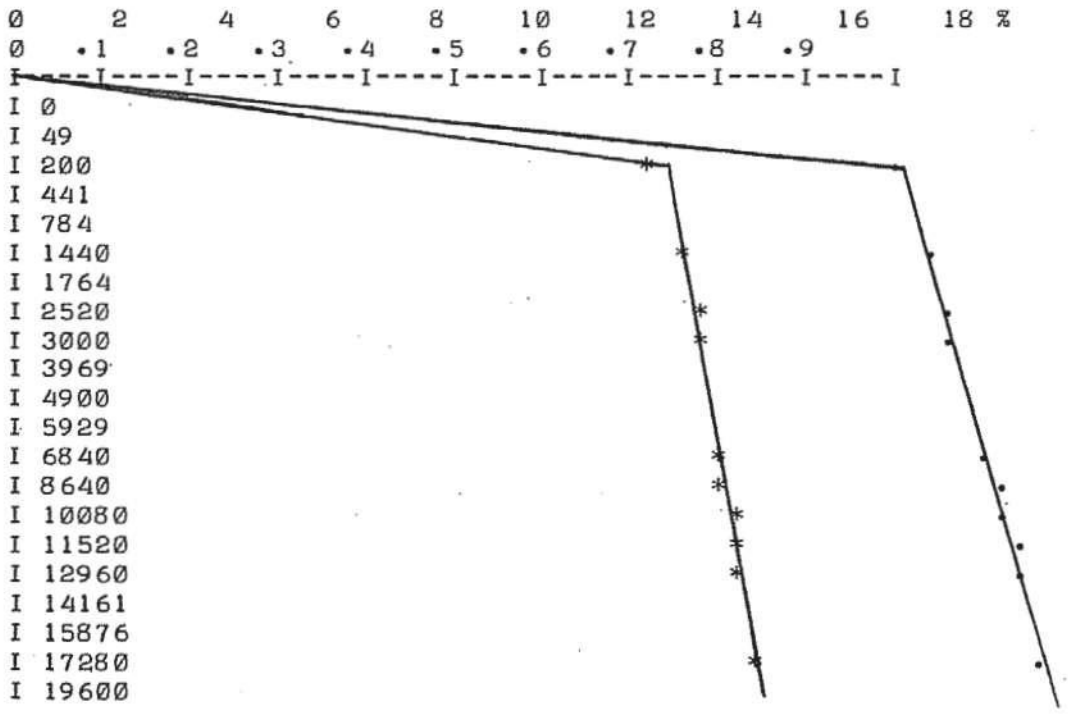


FIG 208 Beräknad frostbeständighet hos takpannor. *Calculated frost-resistance of roofing tiles.*

B I L A G A

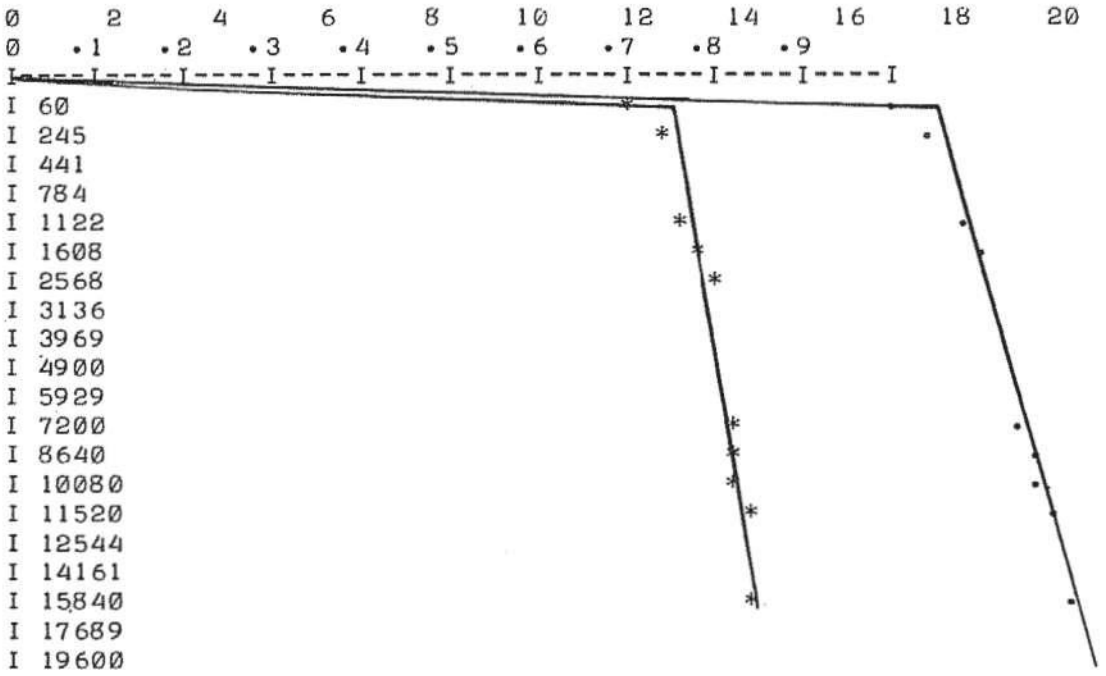
VATTENABSORPTIONSFÖRSÖK - TABELLER OCH DIAGRAM

TID	FUKTKVOT		VATTENM•GRAD	
0	•4	0	1•70000E-02	2•00000E-03
200	16•7	0	•731	2•00000E-03
1440	17•5	•1	•765	1•20000E-02
2520	17•8	•1	•781	1•00000E-02
3000	17•9	0	•783	7•00000E-03
6840	18•6	•1	•815	1•20000E-02
7020	18•7	•2	•819	1•40000E-02
8640	18•7	•1	•819	1•10000E-02
10080	18•9	0	•829	8•00000E-03
11520	19	•1	•832	1•10000E-02
12960	19•2	•1	•839	1•00000E-02
17280	19•5	•1	•853	1•30000E-02
21600	19•9	•1	•87	1•30000E-02



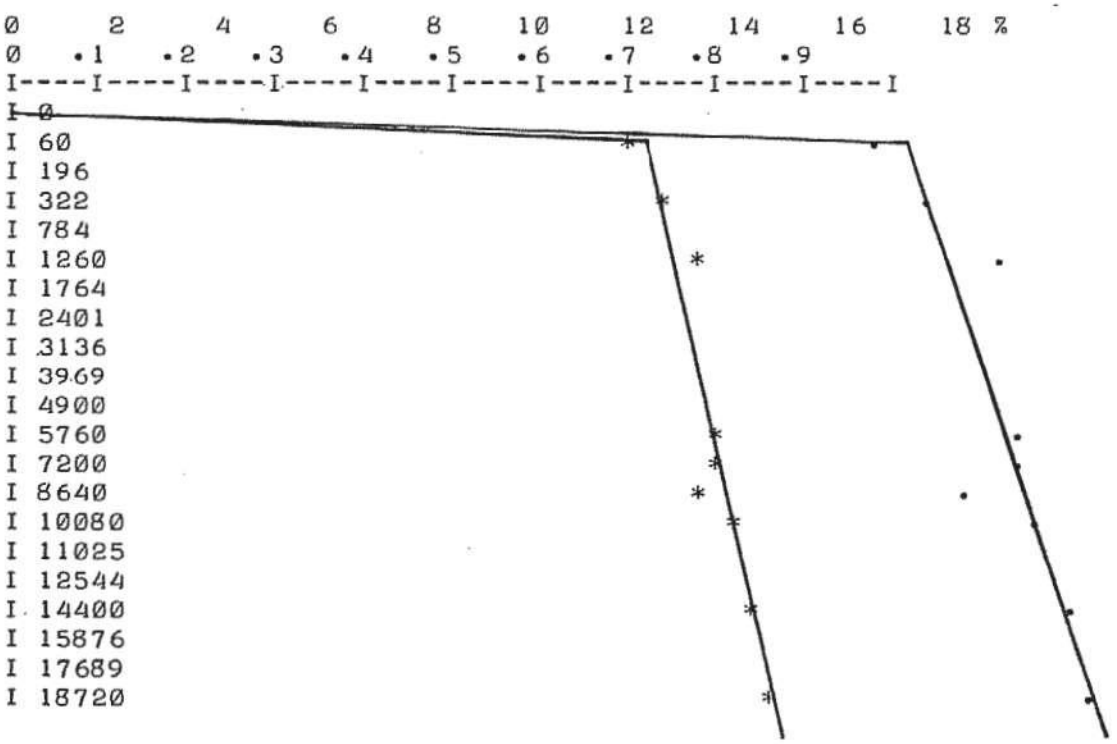
Bil 1: Mat nr 1. Serie 1. 2. 10.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	0	0	0	0
60	16.7	.7	.71	1.50000E-02
245	17.6	.7	.75	1.80000E-02
1122	18.1	.6	.77	1.40000E-02
1608	18.4	.6	.782	1.10000E-02
2568	19.1	.7	.813	1.60000E-02
2748	19.2	.7	.816	1.50000E-02
7200	19.3	.7	.82	1.60000E-02
8640	19.4	.6	.826	1.40000E-02
10080	19.6	.7	.835	1.60000E-02
11520	19.8	.6	.842	1.30000E-02
15840	20.2	.6	.859	1.40000E-02



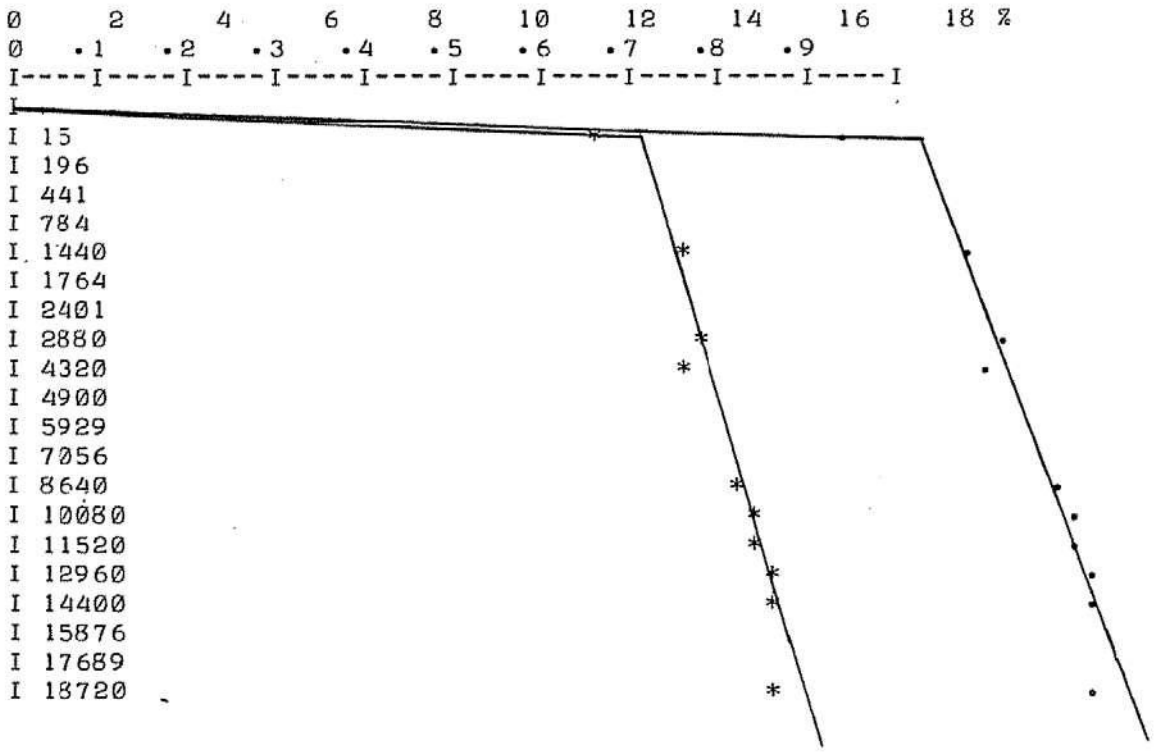
Bil 2: Mat nr 1. Serie 2. 8. 9.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	-.1	1.00000E-03	-4.00000E-03	8.00000E-03
60	16.6	8.00000E-03	.709	1.50000E-02
322	17.4	7.00000E-03	.742	1.50000E-02
1260	18.7	8.00000E-03	.798	1.40000E-02
1452	18.8	8.00000E-03	.802	1.40000E-02
5760	19	8.00000E-03	.811	1.50000E-02
7200	19.1	8.00000E-03	.815	1.40000E-02
8640	18.3	2.60000E-02	.782	.111
10080	19.6	8.00000E-03	.835	1.50000E-02
14400	20	8.00000E-03	.853	1.20000E-02
18720	20.5	8.00000E-03	.874	1.30000E-02



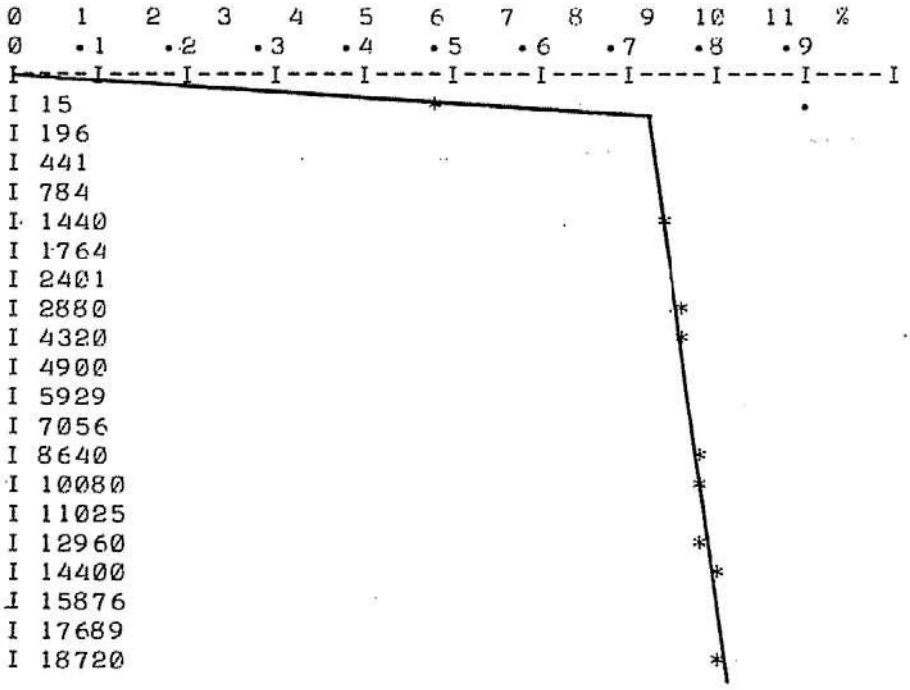
Bil 3: Mat nr 1. Serie 3. 6. 14.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	-.3	8.00000E-03	-9.00000E-03	3.60000E-02
5	10.1	2.00000E-02	.424	8.00000E-02
10	14.3	2.40000E-02	.604	9.50000E-02
15	15.8	1.60000E-02	.665	6.00000E-02
20	16.5	1.00000E-02	.695	2.90000E-02
25	16.8	8.00000E-03	.71	1.90000E-02
30	17	7.00000E-03	.716	1.70000E-02
60	17.2	7.00000E-03	.726	1.70000E-02
1440	18.2	7.00000E-03	.769	1.40000E-02
2880	18.7	7.00000E-03	.786	1.40000E-02
4320	18.4	2.90000E-02	.774	.122
8640	19.7	8.00000E-03	.828	2.10000E-02
10080	20.1	7.00000E-03	.847	1.20000E-02
11520	20.3	7.00000E-03	.854	1.30000E-02
12960	20.6	7.00000E-03	.868	1.30000E-02
14400	20.6	7.00000E-03	.868	1.40000E-02
18720	20.6	7.00000E-03	.867	1.30000E-02



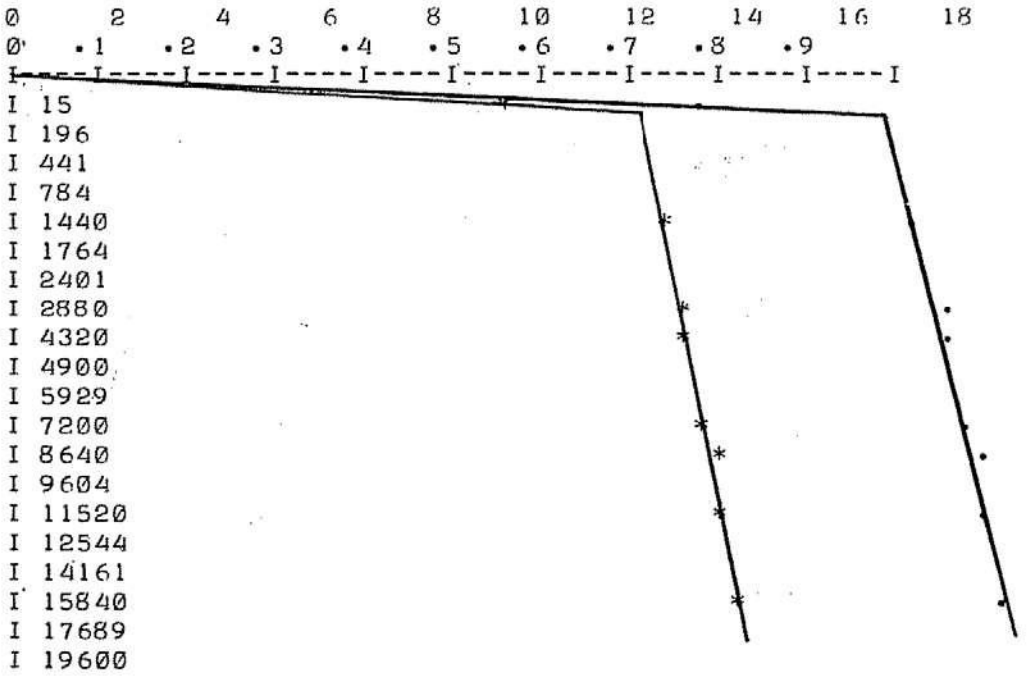
Bil 4: Mat nr 1. Serie 4. 19. 14.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	0
5	6.3	.6	.279	3.100000E-02
10	9.1	.8	.4	4.300000E-02
15	11.3	.9	.495	5.100000E-02
20	12.9	1.1	.567	5.900000E-02
25	14.4	.8	.63	5.100000E-02
30	15.1	.5	.665	3.500000E-02
60	16.3	.7	.714	1.600000E-02
1440	17.1	.8	.749	1.700000E-02
2880	17.4	.7	.763	1.600000E-02
4320	17.7	.7	.774	1.500000E-02
8640	18.1	.7	.791	1.400000E-02
10080	18.1	.7	.792	1.400000E-02
12960	18.2	.7	.798	1.400000E-02
14400	18.3	.7	.801	1.300000E-02
18720	18.5	.7	.809	1.300000E-02



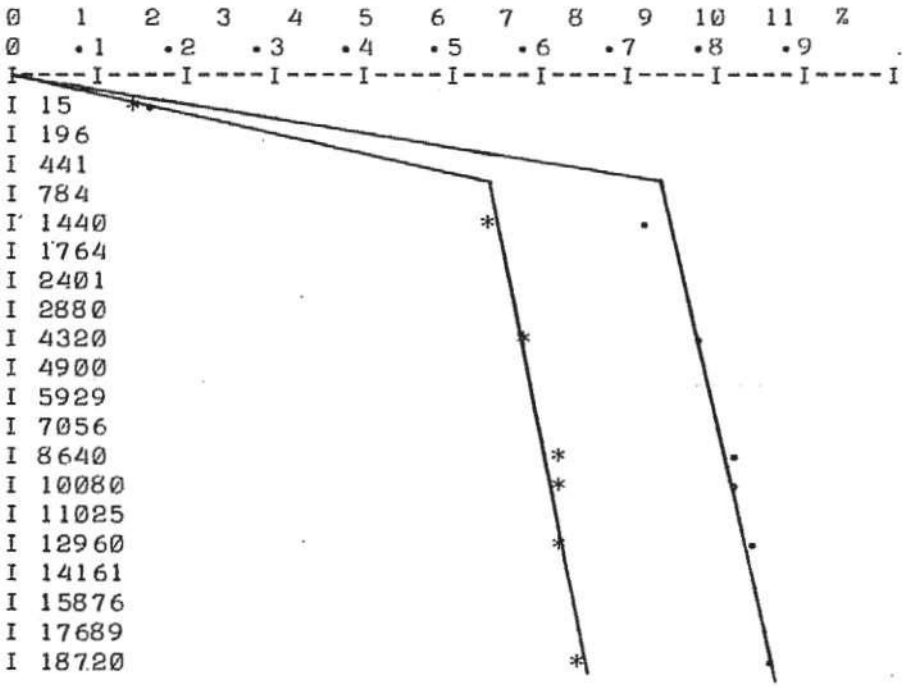
Bil 5: Mat nr 1. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 1. 11. 14.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	1.00000E-03	1.00000E-03
5	7.4	.6	.323	3.10000E-02
10	10.7	.7	.466	3.70000E-02
15	13.1	.7	.573	3.90000E-02
30	16.1	.7	.7	1.60000E-02
60	16.5	.8	.717	2.10000E-02
1440	17.3	.8	.752	1.90000E-02
2880	17.7	.8	.769	1.70000E-02
4320	17.8	.8	.777	1.70000E-02
7200	18.2	.7	.794	1.50000E-02
8640	18.4	.7	.802	1.50000E-02
11520	18.5	.7	.805	1.40000E-02
15840	18.9	.7	.822	1.30000E-02
50400.	20.1	.8	.874	1.90000E-02
106560.	21	.6	.914	1.10000E-02



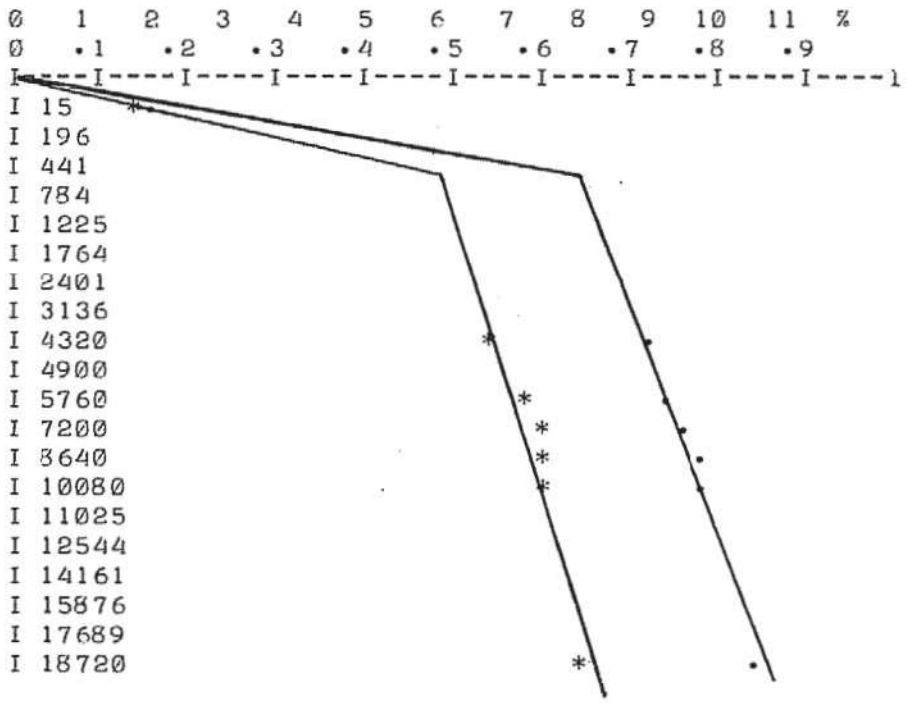
Bil 6: Mat nr 1. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 2. 10. 76.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	0
5	1.1	.2	6.70000E-02	1.20000E-02
10	1.6	.3	.101	1.70000E-02
15	2.1	.3	.127	2.00000E-02
20	2.5	.4	.151	2.50000E-02
25	2.8	.4	.173	2.80000E-02
30	3.2	.5	.195	3.20000E-02
60	4.8	.9	.289	5.50000E-02
1440	9.1	.4	.547	2.10000E-02
4320	9.9	.4	.593	1.90000E-02
8640	10.4	.4	.621	2.20000E-02
10080	10.4	.4	.624	2.30000E-02
12960	10.5	.4	.632	2.40000E-02
18720	10.9	.4	.655	2.40000E-02



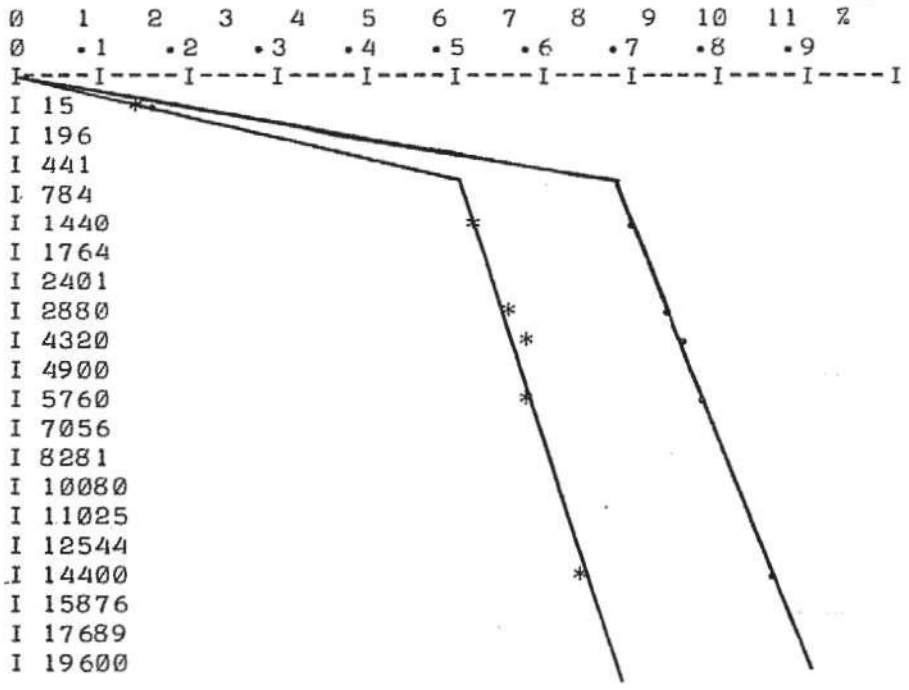
Bil 7: Mat nr 2. Serie 1. 40. 13.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	0
5	.9	.3	5.80000E-02	1.90000E-02
10	1.3	.4	8.50000E-02	2.70000E-02
15	1.7	.6	.105	3.30000E-02
20	2	.7	.124	3.80000E-02
25	2.3	.8	.141	4.40000E-02
30	2.5	.8	.157	4.90000E-02
60	3.6	1.3	.225	7.20000E-02
4320	9	1	.557	3.90000E-02
5760	9.4	1	.581	3.80000E-02
7200	9.7	1	.601	3.70000E-02
8640	9.8	1	.608	3.60000E-02
10080	9.8	.9	.61	3.20000E-02
18720	10.5	1	.652	3.20000E-02



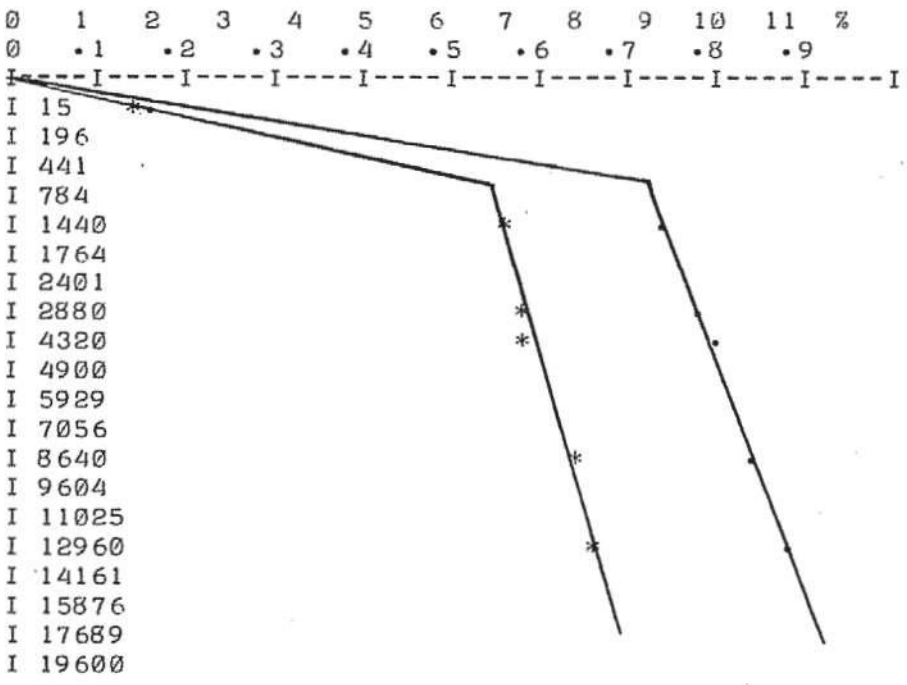
Bil 8: Mat nr 2. Serie 5. 10. 14.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	0
5	.8	.2	4.90000E-02	1.40000E-02
10	1.2	.3	7.50000E-02	1.90000E-02
15	1.6	.4	9.60000E-02	2.40000E-02
20	1.9	.5	.115	2.90000E-02
25	2.2	.5	.132	3.20000E-02
30	2.4	.6	.147	3.60000E-02
60	3.7	.9	.222	5.40000E-02
1440	8.8	.7	.529	4.30000E-02
2880	9.4	.7	.565	4.50000E-02
4320	9.7	.7	.583	4.60000E-02
5760	9.9	.7	.596	4.50000E-02
14400	10.8	.7	.649	4.60000E-02



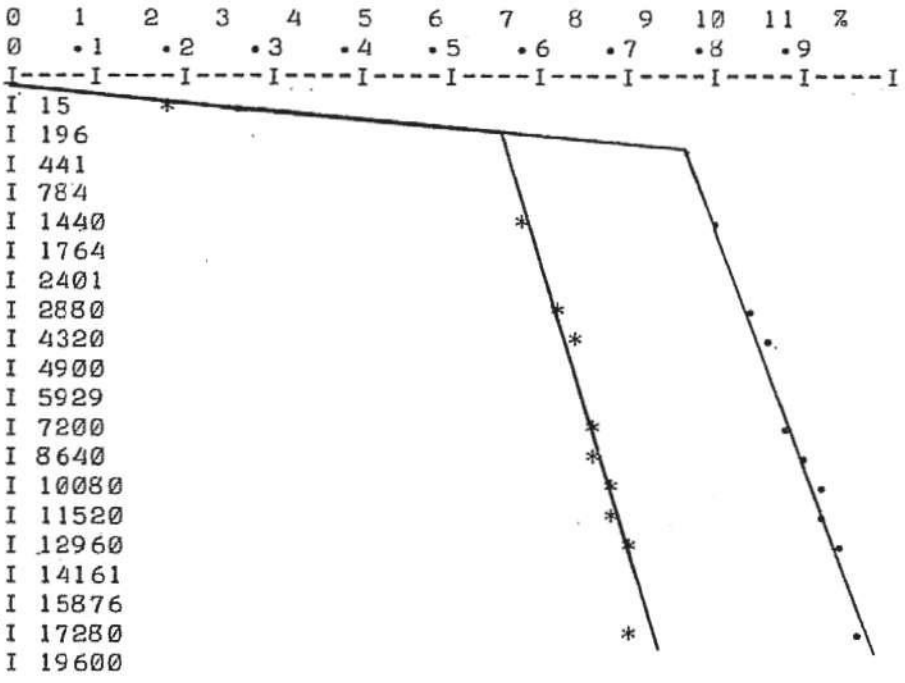
Bil 9: Mat nr 2. Serie 6. 20. 11.

TID	FUKTKVOT		VATTENM•GRAD	
0	0	0	0	0
5	1	•4	5•90000E-02	2•50000E-02
10	1•5	•6	9•30000E-02	3•60000E-02
15	1•9	•7	•118	4•00000E-02
20	2•3	•8	•141	4•50000E-02
25	2•7	•9	•163	5•30000E-02
30	3	1	•18	5•60000E-02
60	4•5	1•4	•269	7•70000E-02
1440	9•4	•4	•563	1•60000E-02
2880	9•8	•5	•582	1•70000E-02
4320	10•1	•4	•599	1•20000E-02
8640	10•7	•3	•64	8•00000E-03
12960	11•2	•2	•668	4•00000E-03



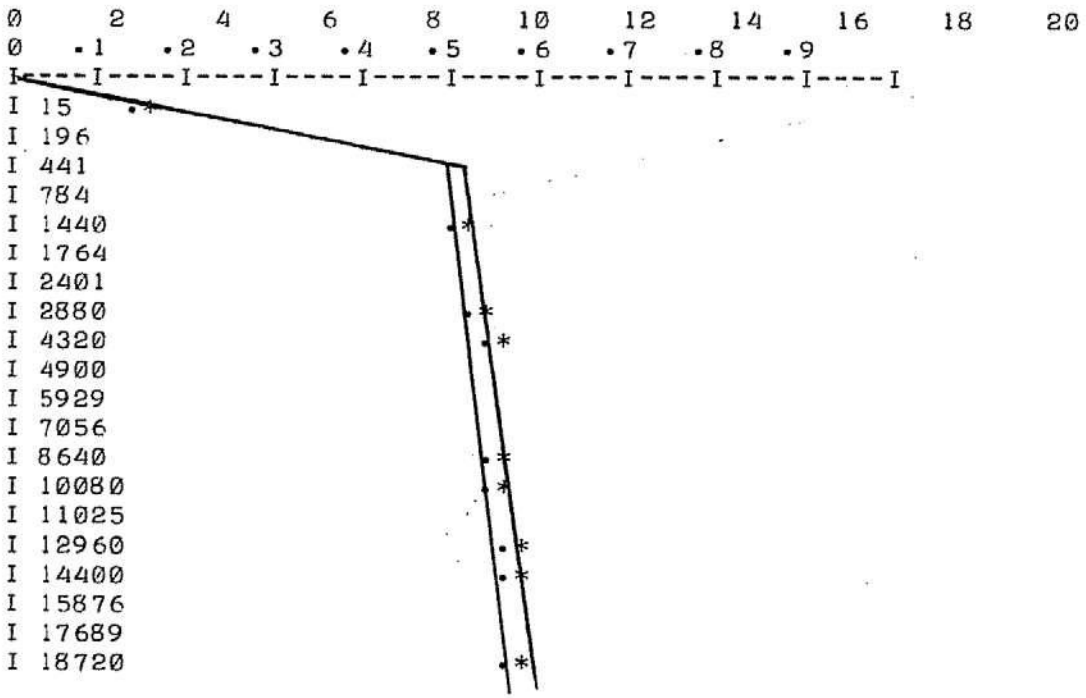
Bil 10: Mat nr 2. Serie 7. 5. 10.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	.8	.4	5.10000E-02	2.46000E-02
5	2.1	.3	.13	2.20000E-02
10	340.5	1308	20.322	78.062
15	3.3	.5	.196	3.00000E-02
20	3.7	.5	.219	3.30000E-02
25	4	.6	.242	3.50000E-02
30	4.3	.6	.26	3.70000E-02
60	5.8	.7	.349	4.50000E-02
1440	10	.4	.598	2.20000E-02
2880	10.5	.4	.626	2.40000E-02
4320	10.9	.4	.647	2.40000E-02
7200	11.2	.5	.667	2.50000E-02
8640	11.3	.5	.676	2.60000E-02
10080	11.5	.5	.682	2.60000E-02
11520	11.6	.5	.694	2.60000E-02
12960	11.8	.5	.701	2.60000E-02
17280	12	.5	.716	2.50000E-02



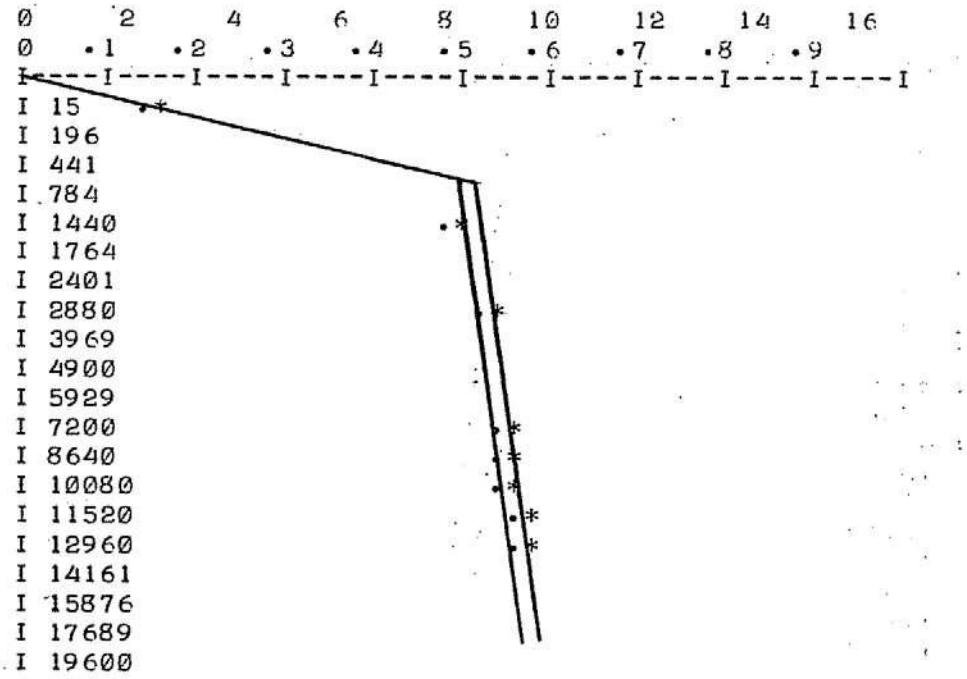
Bil 11: Mat nr 2. Serie 14. 15. 13

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	0
5	.9	1.4	5.60000E-02	8.60000E-02
10	1.3	1.4	8.30000E-02	9.00000E-02
15	1.6	1.5	.103	9.20000E-02
20	1.9	1.5	.119	9.40000E-02
25	2.1	1.5	.134	9.60000E-02
30	2.4	1.6	.148	9.80000E-02
60	3.3	1.7	.21	.104
1440	8.4	1.3	.526	7.80000E-02
2880	8.8	1.3	.547	7.70000E-02
4320	9	1.3	.559	7.80000E-02
8640	9.3	1.3	.576	7.90000E-02
10080	9.3	1.3	.58	7.80000E-02
12960	9.4	1.3	.588	7.80000E-02
14400	9.5	1.3	.591	7.80000E-02
18720	9.6	1.3	.597	8.10000E-02



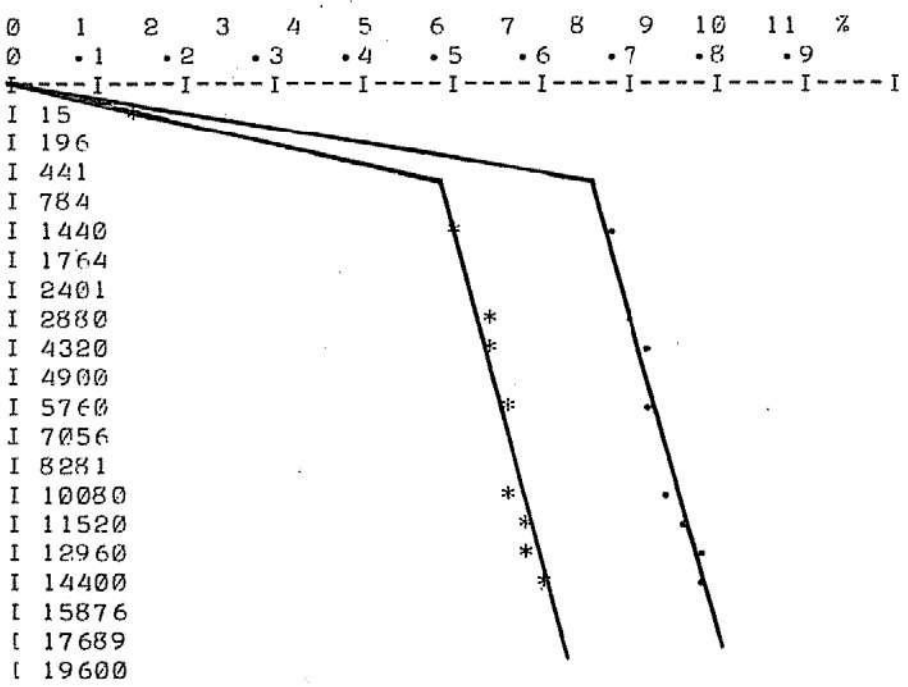
Bil 12: Mat nr 2. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 1. 8. 14.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	0
5	.7	.2	4.70000E-02	1.60000E-02
10	1.1	.2	7.10000E-02	1.40000E-02
15	1.4	.3	8.70000E-02	1.80000E-02
20	1.6	.4	.101	2.20000E-02
25	1.8	.4	.113	2.50000E-02
30	2	.5	.125	2.80000E-02
60	2.8	.6	.172	3.70000E-02
1440	8.1	1.4	.503	7.90000E-02
2880	8.7	.8	.543	2.90000E-02
7200	9.1	.8	.564	3.10000E-02
8640	9.2	.8	.57	3.20000E-02
10080	9.3	.9	.578	3.20000E-02
11520	9.4	.9	.582	3.30000E-02
12960	9.4	.9	.586	3.30000E-02



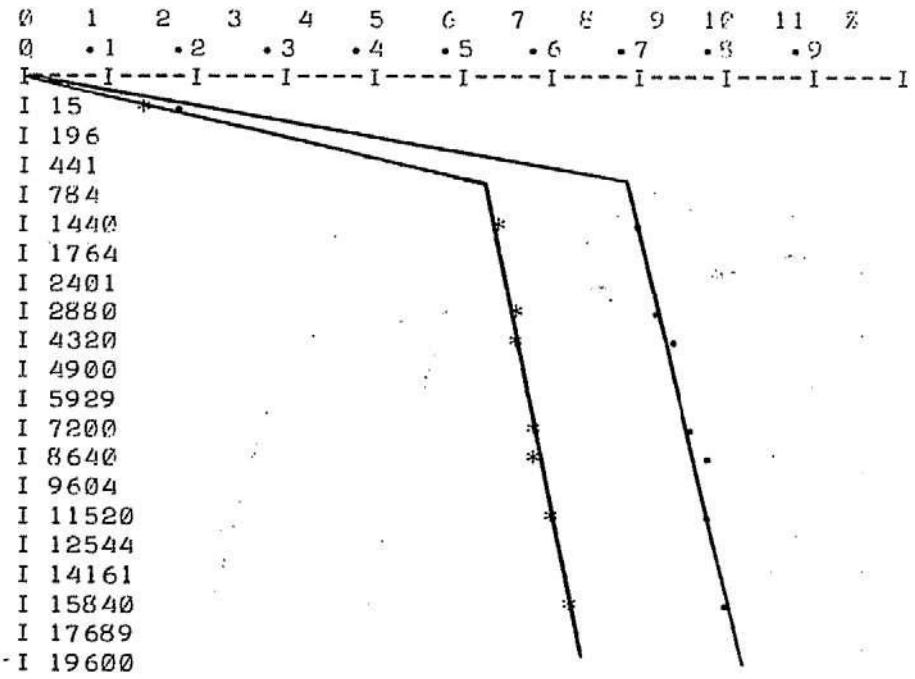
Bil 13: Mat nr 2. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 2. 16. 13.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	0	0	0	0
5	.9	.2	5.50000E-02	1.50000E-02
10	1.3	.3	8.00000E-02	2.00000E-02
15	1.6	.4	9.70000E-02	2.50000E-02
20	1.8	.4	.113	2.90000E-02
25	2.1	.5	.127	3.20000E-02
30	2.3	.5	.139	3.50000E-02
60	3.1	.8	.193	4.80000E-02
1440	8.5	.8	.518	4.40000E-02
2880	8.9	.5	.543	2.80000E-02
4320	9.1	.5	.553	2.80000E-02
5760	9.2	.5	.561	2.80000E-02
10080	9.4	.6	.573	3.00000E-02
11520	9.6	.6	.582	3.00000E-02
12960	9.8	.5	.593	2.90000E-02
14400	9.9	.5	.602	2.90000E-02
21600	10.2	.5	.622	2.60000E-02



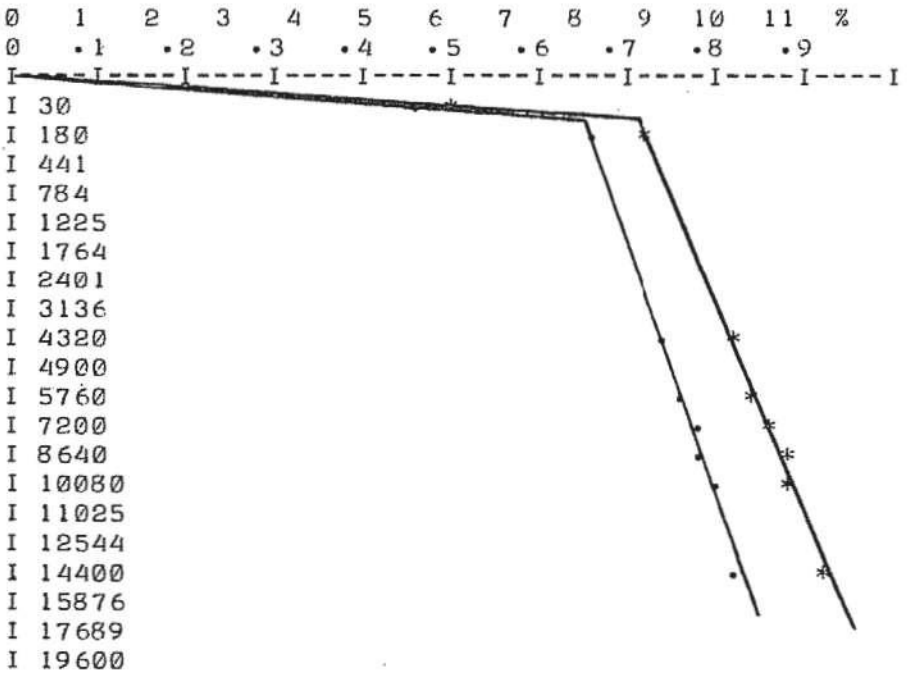
Bil 14: Mat nr 2. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 3. 8. 16.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	1.000000E-03	2.000000E-03
5	1	.3	6.600000E-02	2.100000E-02
10	1.8	.5	.109	3.500000E-02
15	2.3	.7	.14	4.500000E-02
30	3.3	1	.201	6.500000E-02
60	4.6	1.4	.281	8.700000E-02
1440	8.9	.3	.542	1.400000E-02
2880	9.2	.3	.563	1.500000E-02
4320	9.4	.3	.573	1.500000E-02
7200	9.7	.3	.593	1.500000E-02
8640	9.8	.3	.6	1.500000E-02
11520	9.8	.3	.601	1.600000E-02
15840	10.2	.3	.62	1.700000E-02
50400.	11.3	.3	.69	1.800000E-02
106560.	12	.4	.733	1.800000E-02



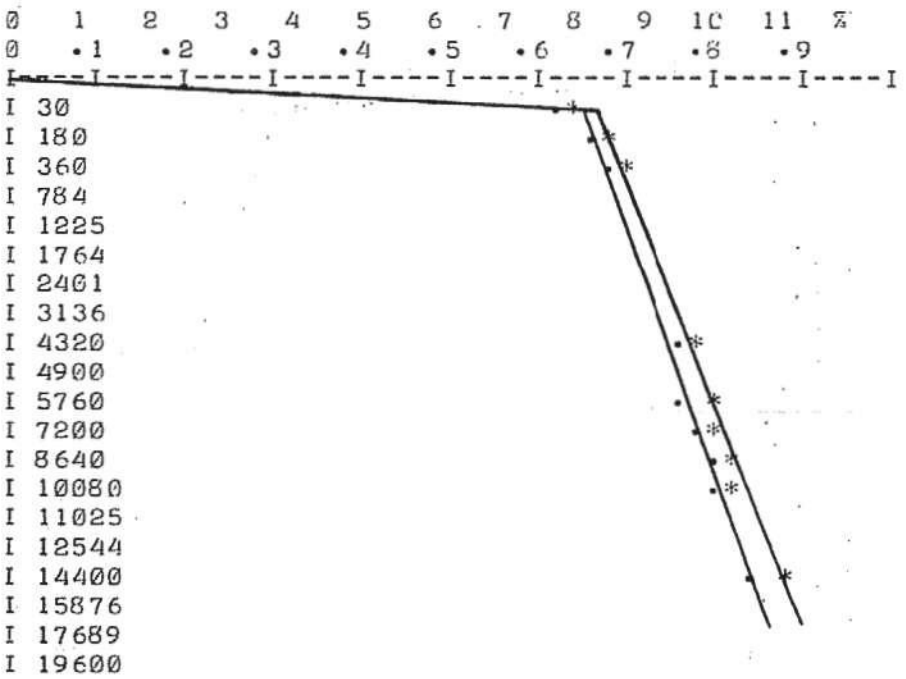
Bil 15: Mat nr 2. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 4. 10. 76.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	-.1	0	-9.00000E-03	3.00000E-03
5	2.5	1	.224	8.00000E-02
30	5.8	2	.511	.158
180	8.3	.6	.734	6.90000E-02
300	8.5	.4	.753	7.50000E-02
4320	9.4	.4	.838	8.20000E-02
5760	9.6	.4	.853	8.40000E-02
7200	9.8	.4	.868	8.50000E-02
8640	9.9	.5	.88	8.60000E-02
10080	10	.5	.889	8.70000E-02
14400	10.4	.5	.921	9.00000E-02
24480	10.7	.5	.945	9.20000E-02
40320.	11	.5	.978	9.50000E-02
56080.	11.2	.5	.996	9.60000E-02
57520.	11.2	.5	.997	9.70000E-02



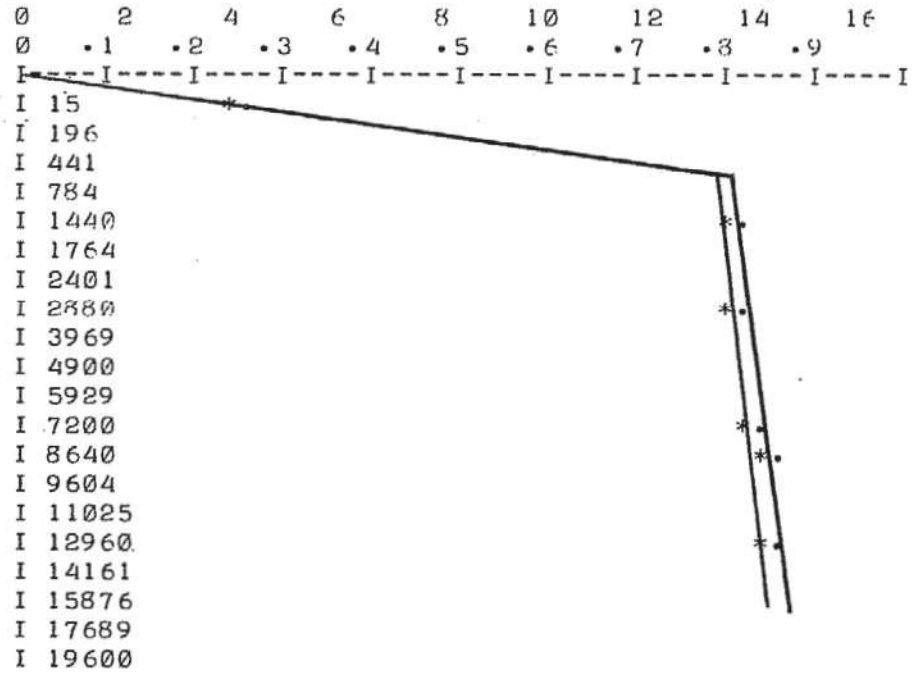
Bil 16: Mat nr 3 a. Serie 1. 6. 34.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	-.2	0	-1.10000E-02	0
5	3.8	.5	.318	2.50000E-02
30	7.8	1	.644	4.70000E-02
180	8.4	.7	.694	1.40000E-02
360	8.5	.7	.705	1.30000E-02
4320	9.5	.9	.786	2.20000E-02
5760	9.7	.9	.801	2.20000E-02
7200	9.9	.9	.819	2.70000E-02
8640	10.1	1	.831	2.70000E-02
10080	10.2	1	.84	2.80000E-02
14400	10.7	1.1	.881	3.30000E-02
24480	11	1	.911	2.90000E-02
40320.	11.2	1	.93	2.30000E-02
56080.	11.4	1	.944	2.30000E-02
57520.	11.4	1	.944	2.30000E-02



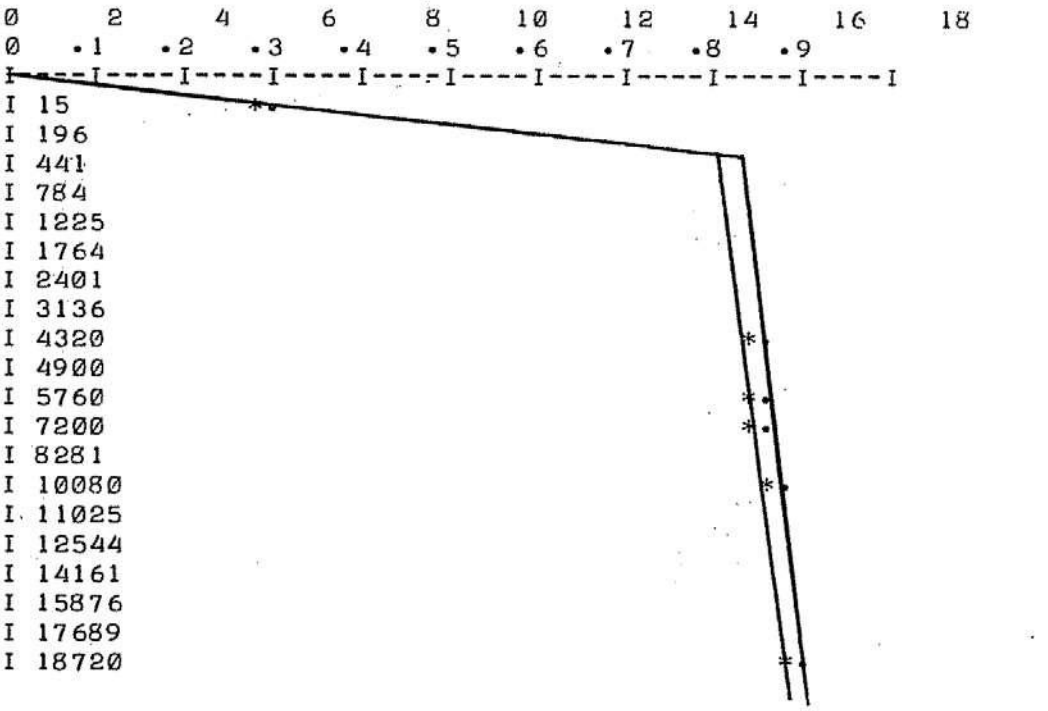
Bil 17: Mat nr 3 b Serie 2. 3. 34.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	.6	0	3.60000E-02	2.00000E-03
5	2.3	.3	.141	1.30000E-02
10	3.3	.6	.197	2.70000E-02
15	4.2	.8	.25	3.70000E-02
20	5.1	1	.304	4.90000E-02
25	6	1.2	.354	6.00000E-02
30	6.8	1.3	.405	6.50000E-02
60	9.9	2	.59	.1
1440	13.5	.8	.806	1.30000E-02
2880	13.6	.8	.81	1.30000E-02
7200	14	.8	.835	1.30000E-02
8640	14.1	.8	.842	1.30000E-02
12960	14.4	.8	.855	1.00000E-02
21600	14.9	.8	.889	1.10000E-02



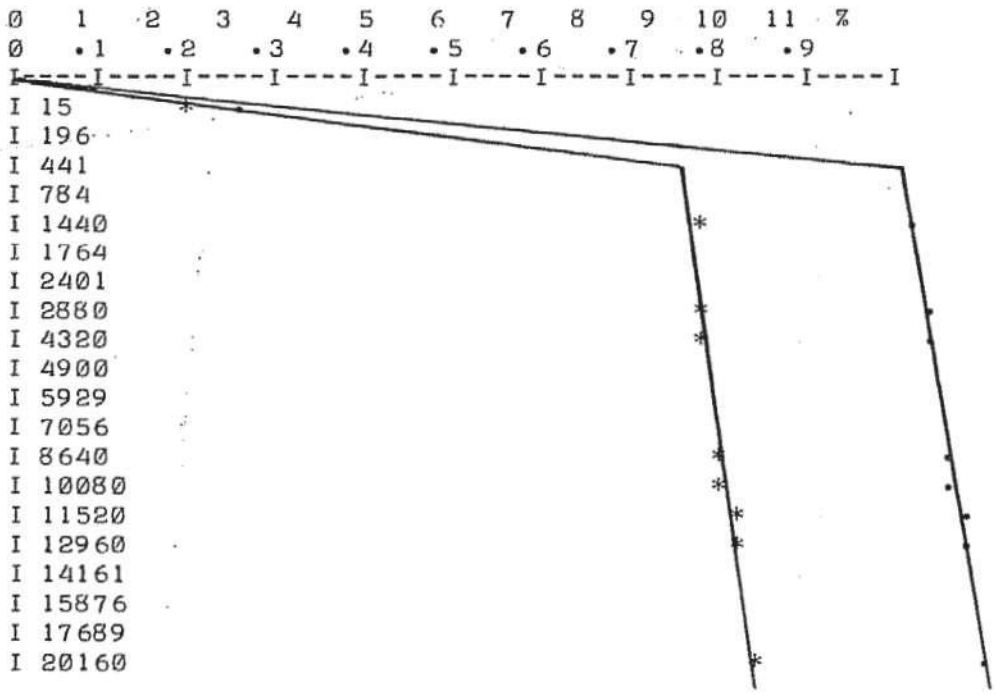
Bil 18: Mat nr 7. , Serie 2. 10. 10.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	1	1.2	6.10000E-02	7.30000E-02
5	2.7	1.2	.162	7.10000E-02
10	3.9	1.3	.234	7.90000E-02
15	5	1.7	.297	.102
20	6	2.1	.357	.126
25	7	2.4	.413	.143
30	7.8	2.5	.462	.154
60	10.9	2.9	.641	.174
4320	14.3	1.3	.841	7.70000E-02
5760	14.5	1.3	.854	7.60000E-02
7200	14.6	1.3	.859	7.60000E-02
10080	14.7	1.3	.863	7.60000E-02
18720	15.2	1.3	.894	7.50000E-02



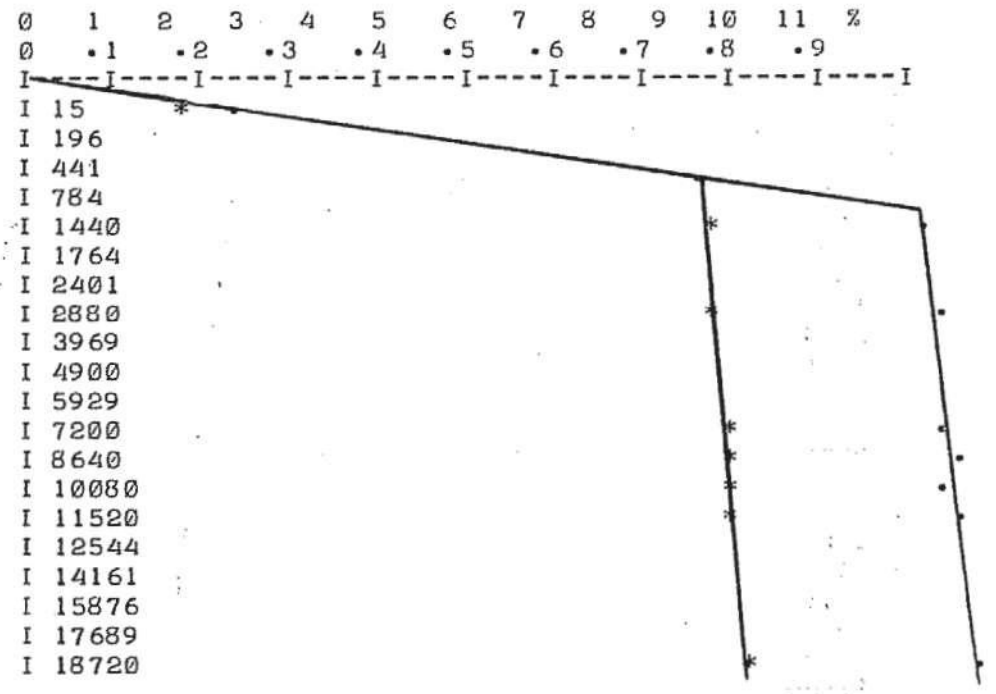
Bil 19: Mat nr 7. Serie 3. 10. 14.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	-.1	0	-1.00000E-03	1.00000E-03
5	1.7	.2	.103	1.20000E-02
10	2.5	.3	.155	1.70000E-02
15	3.3	.4	.2	2.20000E-02
20	3.9	.5	.238	2.90000E-02
25	4.5	.6	.275	3.60000E-02
30	5.1	.6	.308	3.90000E-02
60	7.3	.9	.442	5.70000E-02
1440	12.9	.4	.78	1.00000E-02
2880	13	.4	.791	1.00000E-02
4320	13.2	.4	.799	9.00000E-03
8640	13.4	.4	.812	8.00000E-03
10080	13.4	.4	.812	8.00000E-03
11520	13.5	.4	.82	6.00000E-03
12960	13.6	.5	.826	6.00000E-03
20160	13.9	.5	.845	7.00000E-03



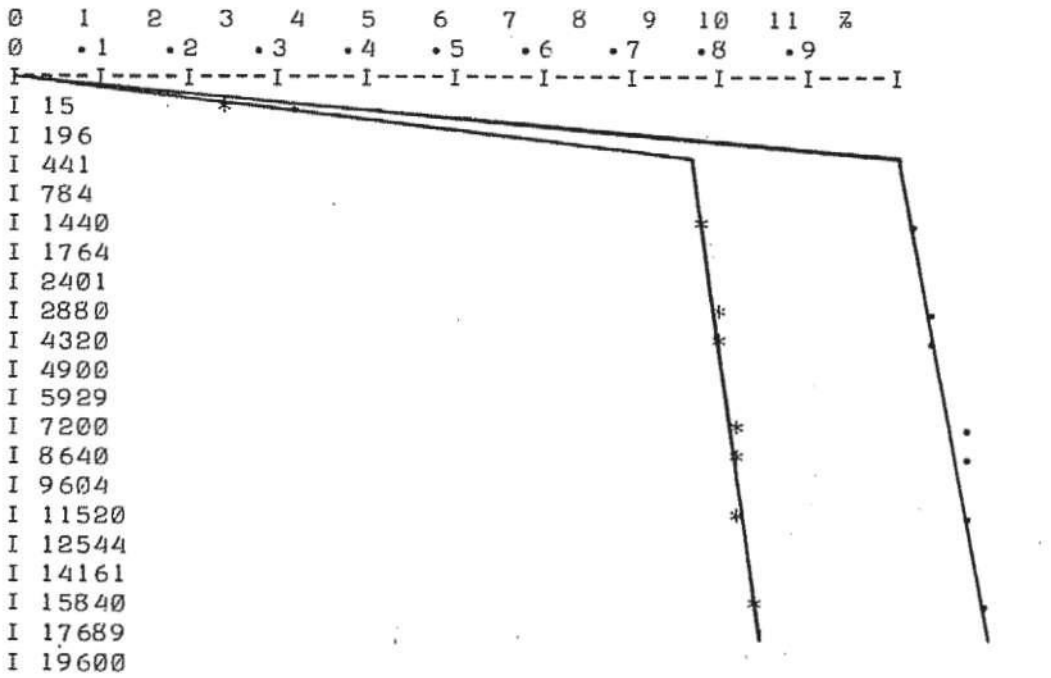
Bil 20: Mat nr 7. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 2. 10. 15.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	0	0	0	0
5	1.7	.1	.106	4.00000E-03
10	2.5	.1	.155	7.00000E-03
15	3.1	.2	.192	1.10000E-02
20	3.6	.3	.223	1.40000E-02
25	4.1	.3	.251	1.70000E-02
30	4.5	.4	.276	1.90000E-02
60	6.2	.6	.382	2.80000E-02
1440	12.8	.4	.786	7.00000E-03
2880	13	.4	.797	8.00000E-03
7200	13.2	.4	.81	1.00000E-02
8640	13.3	.4	.812	9.00000E-03
10080	13.2	.4	.81	8.00000E-03
11520	13.4	.4	.817	7.00000E-03
18720	13.5	.4	.824	7.00000E-03



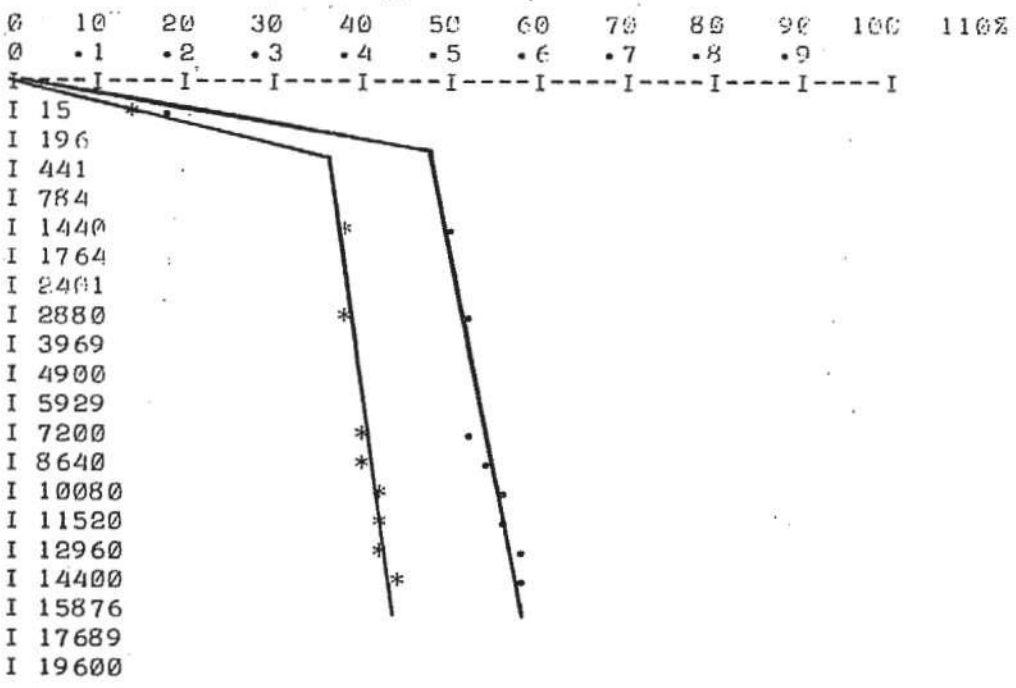
Bil 21: Mat nr 7. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 3. 12. 14.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	.2	.1	1.40000E-02	9.00000E-03
5	2.3	.7	.14	4.20000E-02
10	3.3	1.2	.203	6.80000E-02
15	4.2	1.5	.257	8.70000E-02
30	6.1	2.1	.373	.12
60	8.7	2.4	.531	.137
1440	12.9	.3	.786	9.00000E-03
2880	13.1	.3	.8	9.00000E-03
4320	13.2	.3	.808	9.00000E-03
7200	13.5	.3	.826	1.00000E-02
8640	13.7	.3	.835	9.00000E-03
11520	13.6	.3	.834	9.00000E-03
15840	13.9	.3	.847	9.00000E-03
50400.	14.7	.4	.899	6.00000E-03
106560.	15.2	.4	.926	6.00000E-03



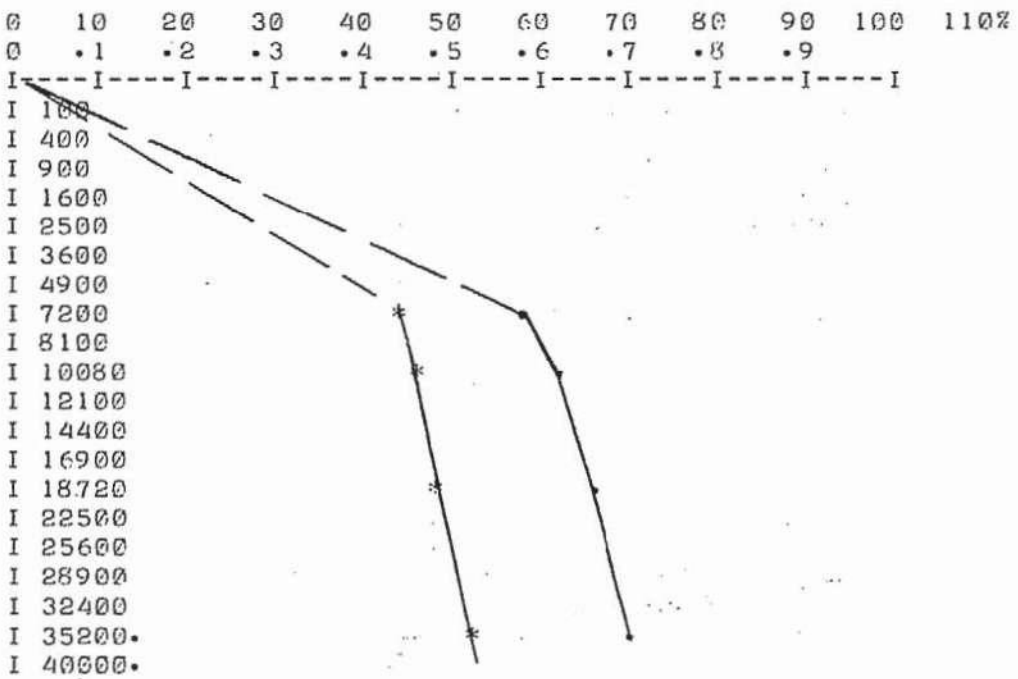
Bil 22: Mat nr 7. Storlek 40 x 40 x 120 Serie 4. 10. 76.

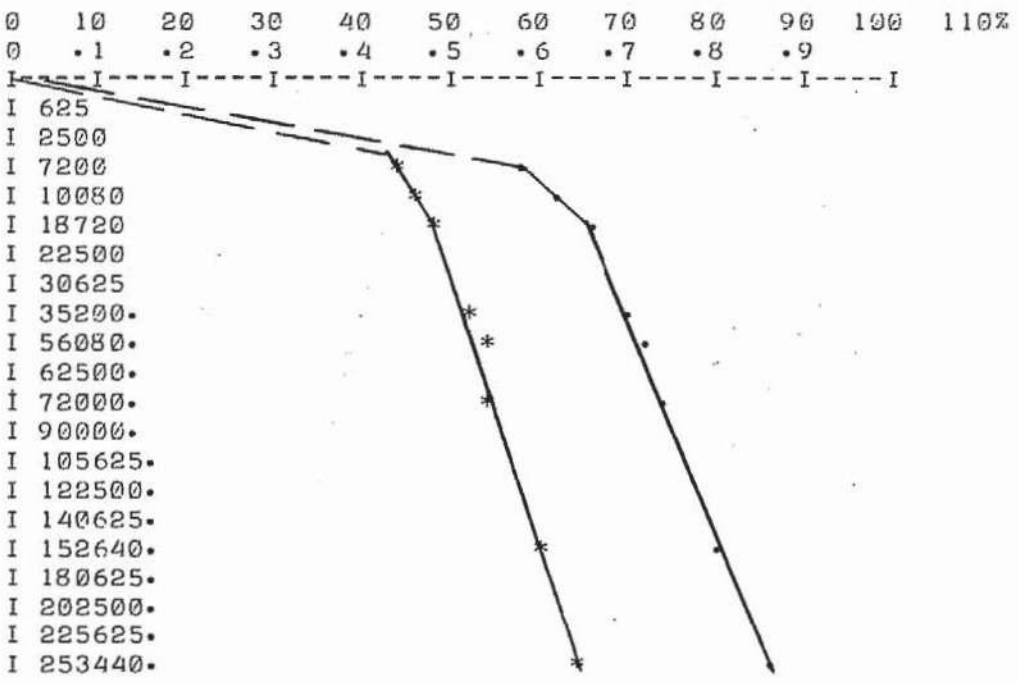
TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	.1	.1	1.00000E-03	0
5	14.3	2	8.50000E-02	1.20000E-02
10	19.2	2.8	.115	1.70000E-02
15	23.1	3.4	.138	2.00000E-02
20	26.6	4	.159	2.40000E-02
25	29.7	4.4	.177	2.70000E-02
30	32.7	4.8	.195	2.90000E-02
60	43.5	6.6	.26	4.00000E-02
1440	64	1.7	.382	1.10000E-02
2880	65.5	1.6	.39	1.00000E-02
7200	67.1	1.7	.4	1.00000E-02
8640	68.5	1.5	.408	1.00000E-02
10080	71.1	1.6	.424	1.00000E-02
11520	72.2	1.8	.43	1.10000E-02
12960	73.3	1.7	.437	1.10000E-02
14400	74.2	1.6	.443	1.10000E-02



Bil 23: Mat nr 8. Serie 1. 10. 11.

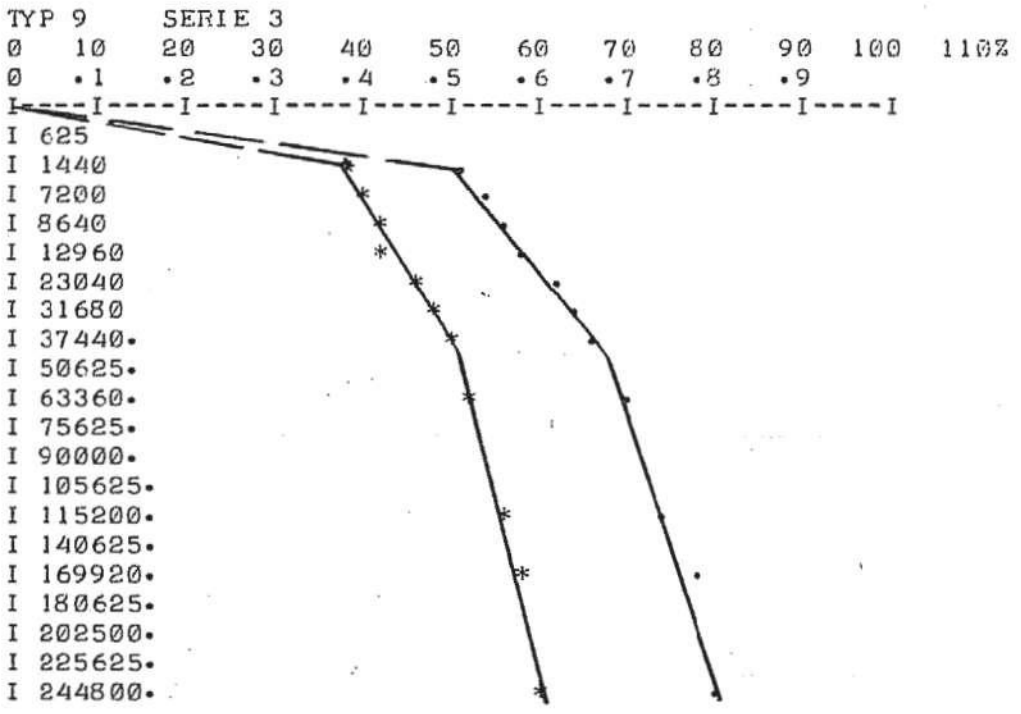
TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	0
7200	73.8	1.8	.442	1.10000E-02
10080	77.5	2.1	.464	1.20000E-02
18720	82.9	1.9	.496	1.10000E-02
35200.	88.3	2.9	.528	1.70000E-02
56080.	90.6	2.3	.542	1.30000E-02
72000.	92.8	3.5	.555	2.00000E-02
152640.	100.6	6.7	.602	4.00000E-02
253440.	109.2	10.4	.653	6.20000E-02





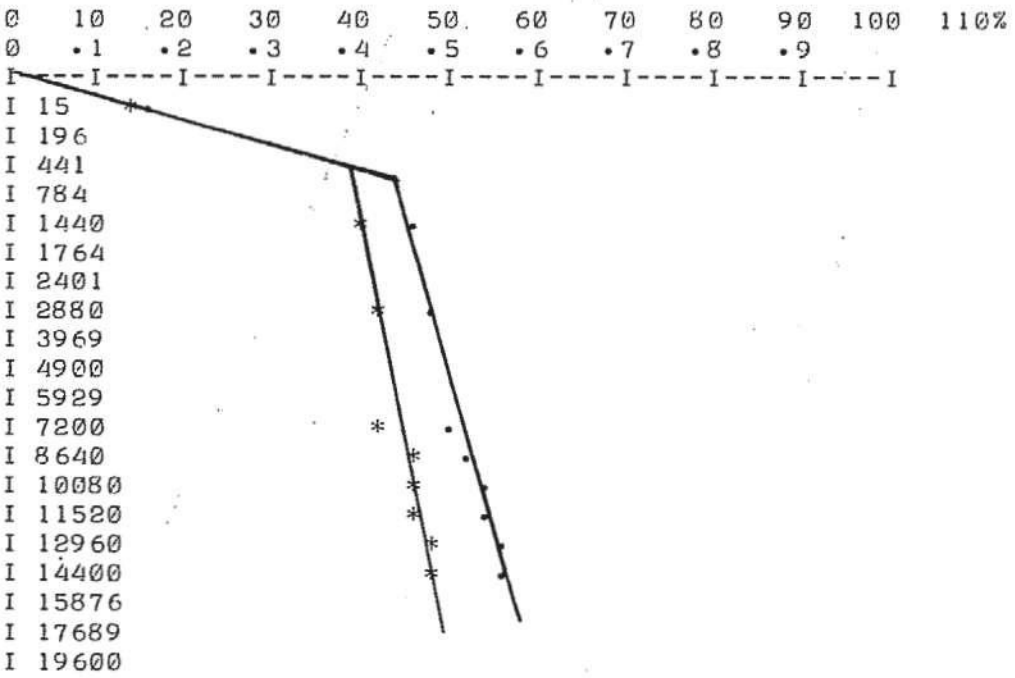
Bil 24: Mat nr 8. Serie 2. 5. 176.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	
1440	63.4	2.3	.38	1.30000E-02
2880	64.8	1.5	.388	9.00000E-03
7200	69.2	.2	.414	1.00000E-03
8640	70.4	.5	.421	3.00000E-03
10080	71.1	.5	.426	3.00000E-03
12960	72.7	.9	.435	5.00000E-03
23040	77.6	1.9	.465	1.20000E-02
31680	81.2	2.4	.486	1.50000E-02
37440.	84.2	2.6	.504	1.60000E-02
63360.	88.8	2.8	.532	1.70000E-02
115200.	93.8	2.5	.562	1.50000E-02
169920.	98.5	2.4	.59	1.40000E-02
244800.	102.3	2.2	.613	1.30000E-02



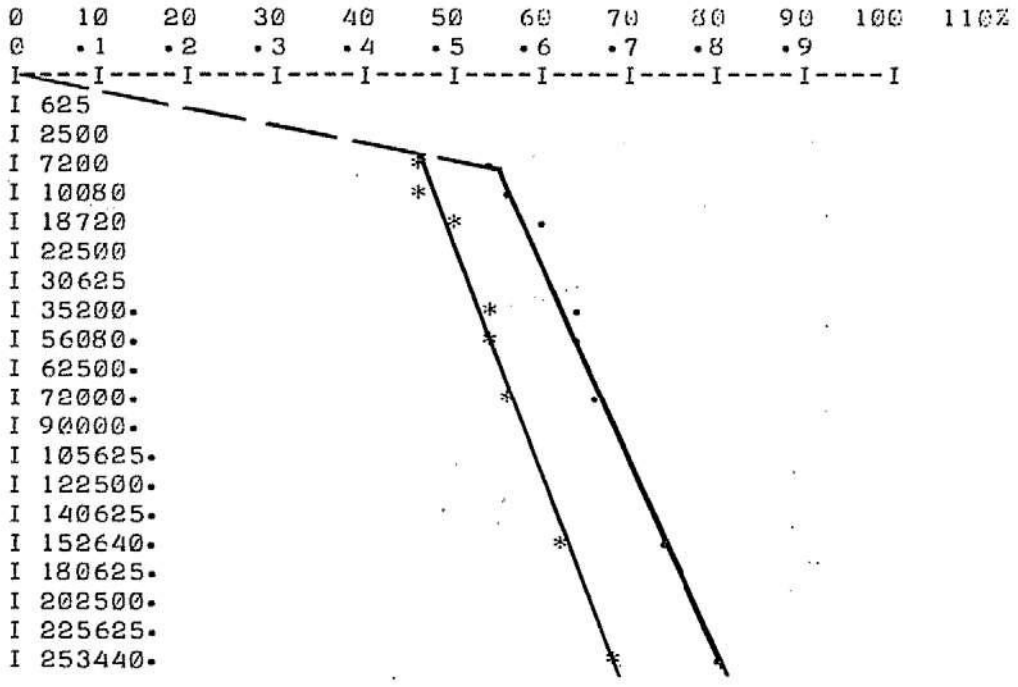
Bil 25: Mat nr 8. Serie 3. 5. 169.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	1.2	.5	8.00000E-03	3.00000E-03
5	12.5	1.6	8.60000E-02	1.30000E-02
10	16	2.2	.11	1.80000E-02
15	18.6	2.6	.128	2.10000E-02
20	20.8	3.	.143	2.40000E-02
25	22.9	3.2	.157	2.60000E-02
30	24.4	3.5	.168	2.90000E-02
60	30.5	4.8	.21	3.70000E-02
1440	59.6	1.2	.409	1.20000E-02
2880	62	1.6	.425	1.20000E-02
7200	63.4	1.8	.435	1.30000E-02
8640	67.2	1.8	.461	1.00000E-02
10080	68.5	1.8	.47	9.00000E-03
11520	69.3	2	.475	1.00000E-02
12960	70.5	2.3	.483	1.10000E-02
14400	71.2	2.1	.489	1.10000E-02



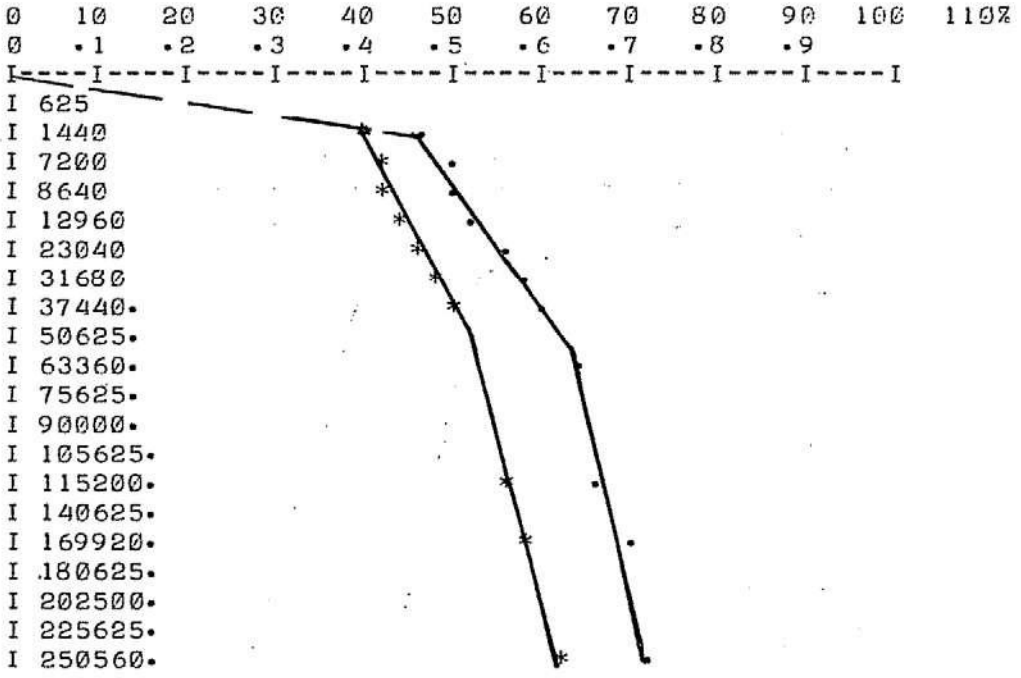
Bil 26: Mat nr 9. Serie 1. 10. 11

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	0	0	0	0
7200	68.1	1.5	.461	1.00000E-02
10080	70.7	1.6	.478	1.10000E-02
18720	75.4	1.6	.51	1.10000E-02
35200.	80.3	1.8	.543	1.20000E-02
56080.	81.7	2.1	.553	1.40000E-02
72000.	84.8	2.5	.573	1.70000E-02
152640.	92.5	2.2	.626	1.50000E-02
253440.	100.8	2.8	.682	1.90000E-02



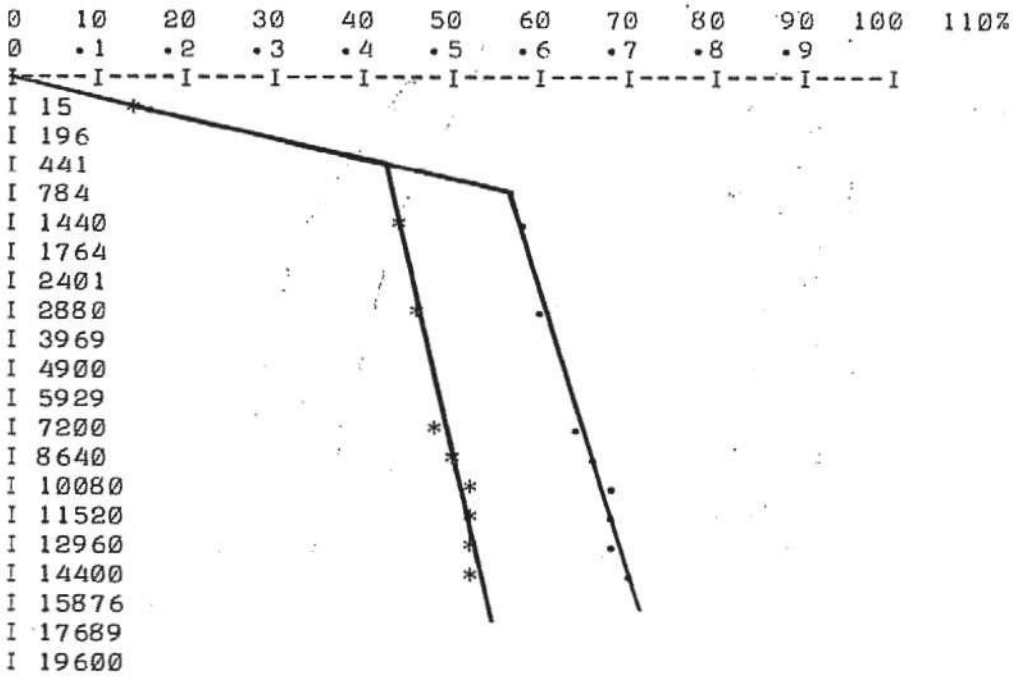
Bil 27: Mat nr 9. Serie 2. 5. 176.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	0	0	0	0
1440	59.1	1.5	.4	1.00000E-02
2880	61.1	1.9	.414	1.30000E-02
7200	64.2	1.7	.435	1.20000E-02
8640	64.7	1.7	.438	1.20000E-02
10080	65.2	1.7	.441	1.10000E-02
12960	66.3	1.6	.448	1.10000E-02
23040	70.3	1.1	.475	7.00000E-03
31680	73.4	.7	.497	5.00000E-03
37440.	75.8	.6	.513	4.00000E-03
63360.	80.1	1	.542	6.00000E-03
115200.	84.3	1.4	.571	1.00000E-02
169920.	88.4	2.7	.598	1.80000E-02
250560.	91.7	3.7	.621	2.50000E-02



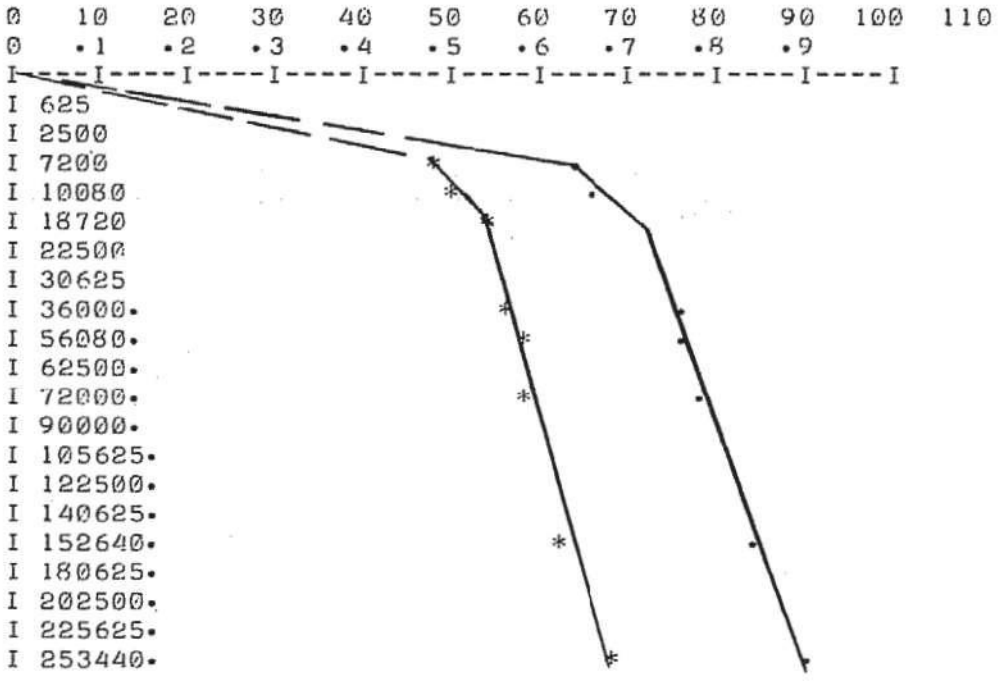
Bil 28: Mat nr 9. Serie 3. 5. 169.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	-.8	.2	-5.00000E-03	1.00000E-03
5	14.6	2	8.90000E-02	1.20000E-02
10	19	2.7	.115	1.70000E-02
15	22.4	3.4	.136	2.10000E-02
20	25.3	4	.154	2.40000E-02
25	28	4.5	.17	2.70000E-02
30	30.2	5	.184	3.10000E-02
60	38.4	6.7	.234	4.10000E-02
1440	73.7	2.5	.449	1.50000E-02
2880	77.2	1.7	.47	9.00000E-03
7200	80.4	1.6	.489	8.00000E-03
8640	83.1	1.7	.506	8.00000E-03
10080	85.5	2	.52	9.00000E-03
11520	87.3	1.4	.531	6.00000E-03
12960	87.4	1.5	.532	6.00000E-03
14400	87.7	1.4	.534	5.00000E-03



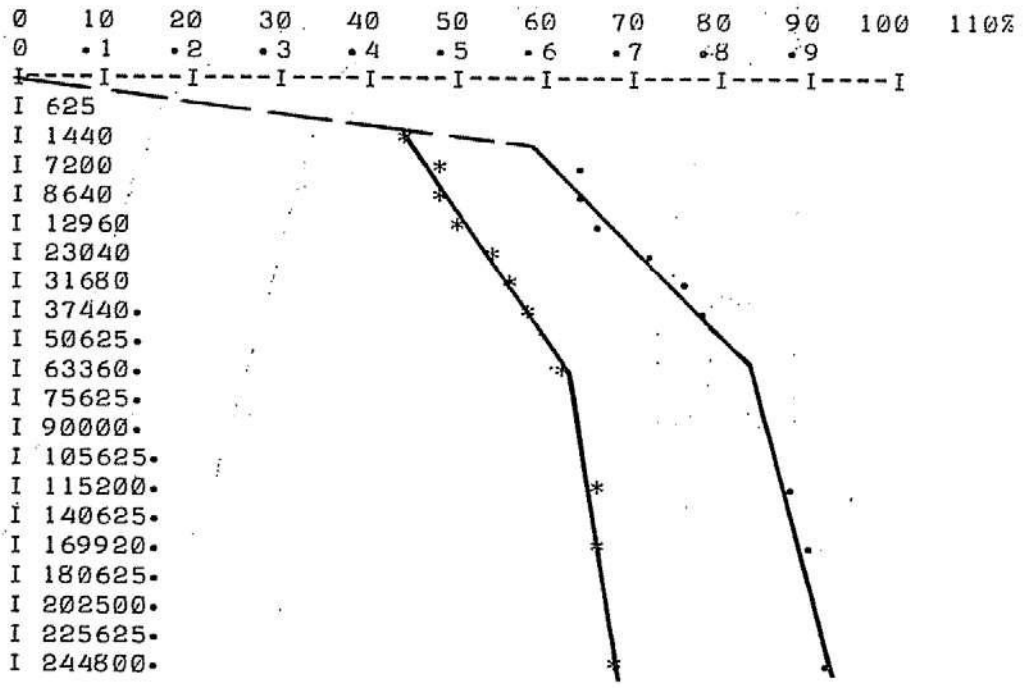
Bil 29: Mat nr 10. Serie 1. 10. 11.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	0	0	0	0
7200	82.4	1.3	.497	7.00000E-03
10080	84.9	1.2	.512	7.00000E-03
18720	90.9	1.2	.548	7.00000E-03
36000.	95.2	.8	.574	5.00000E-03
56080.	96.6	.6	.582	3.00000E-03
72000.	99.6	.9	.6	5.00000E-03
152640.	105.6	.6	.636	3.00000E-03
253440.	112.9	.9	.68	5.00000E-03



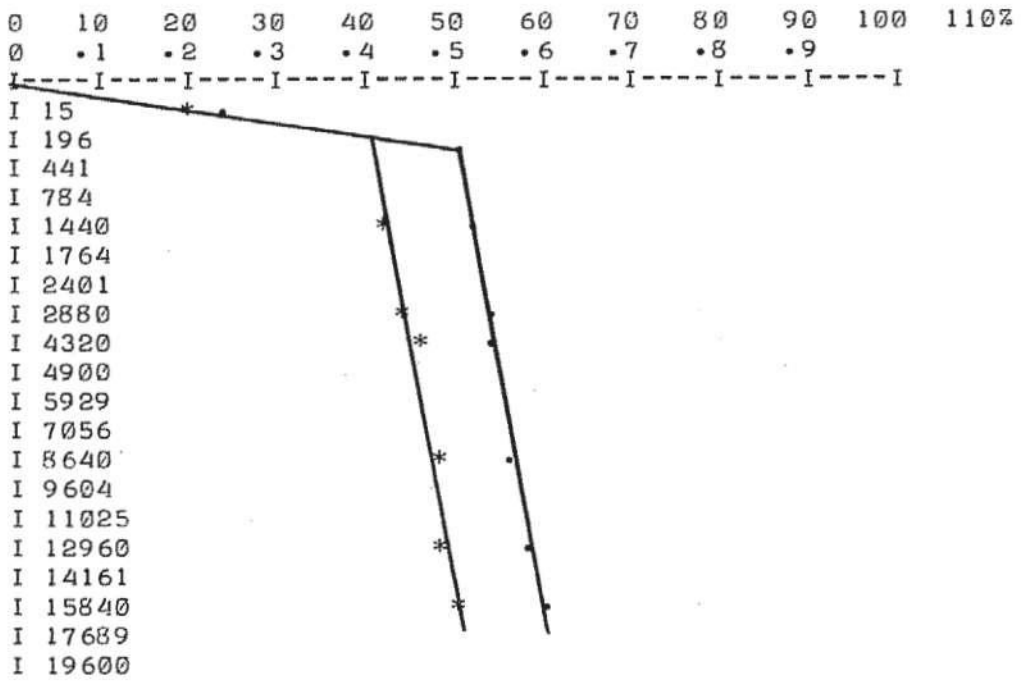
Bil 30: Mat nr 10. Serie 2.5. 176.

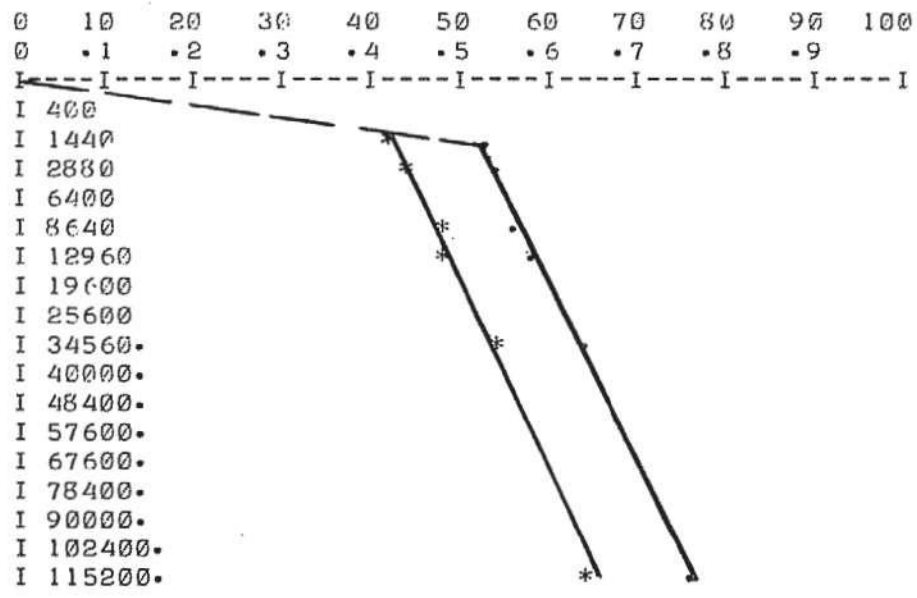
TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	0	0	0	0
1440	74	3.9	.444	2.20000E-02
2880	76.9	2.4	.461	1.40000E-02
7200	81.1	2.3	.487	1.30000E-02
8640	82.1	2.4	.493	1.40000E-02
10080	82.9	2.4	.498	1.50000E-02
12960	84.6	2.4	.508	1.50000E-02
23040	90.4	2.3	.542	1.40000E-02
31680	95.3	2.2	.572	1.30000E-02
37440.	98.6	2.2	.592	1.30000E-02
63360.	105.2	1.7	.631	1.00000E-02
115200.	110.5	1.1	.663	1.00000E-02
169920.	112.8	1	.677	1.00000E-02
244800.	115.5	1	.693	1.00000E-02



Bil 31: Mat nr 10. Serie 3. 5. 169.

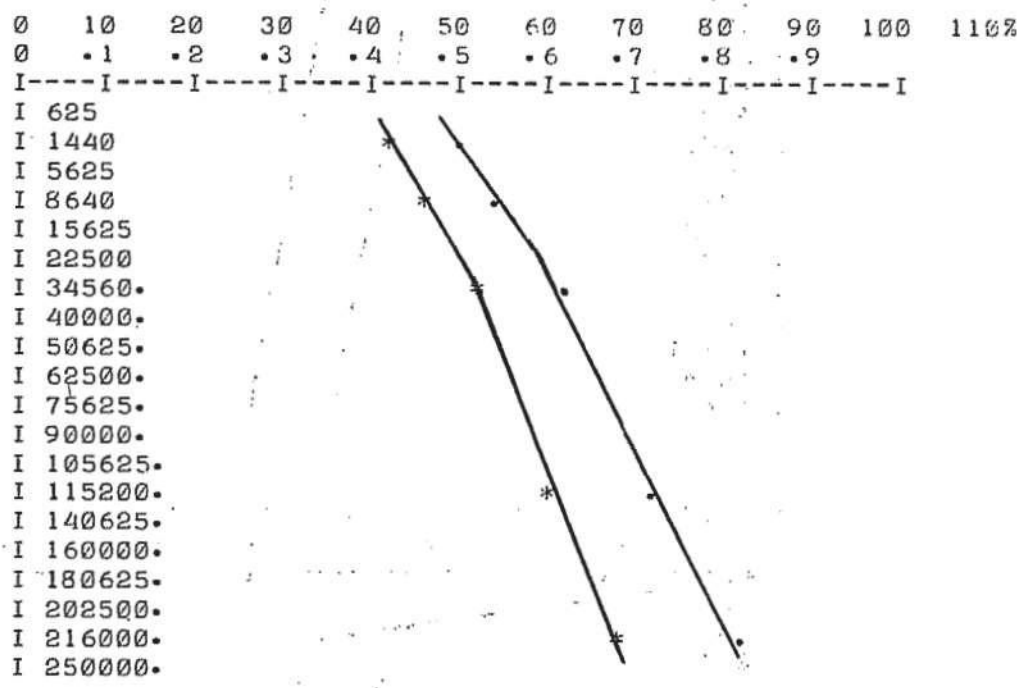
TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	.8	.2	-6.00000E-03	1.00000E-03
5	22.2	6.3	.149	4.20000E-02
10	27.5	6.9	.184	4.60000E-02
15	31.3	7.4	.21	4.90000E-02
30	38	8.1	.255	5.40000E-02
60	46	8.1	.309	5.40000E-02
1440	65.5	1.6	.439	1.00000E-02
2880	67.8	1.4	.455	9.00000E-03
4320	69.6	1.3	.467	8.00000E-03
8640	72.1	1.4	.484	9.00000E-03
12960	74.6	1.4	.5	9.00000E-03
15840	76.4	1.4	.512	9.00000E-03
34560.	82	1.4	.55	9.00000E-03
115200.	96.5	3.9	.647	2.60000E-02





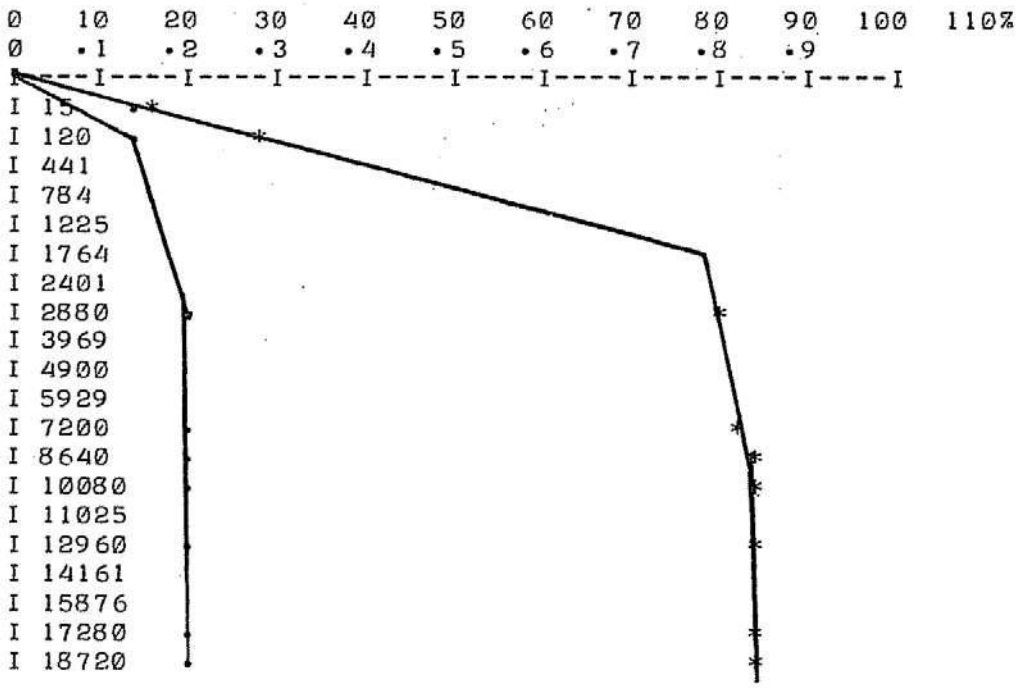
Bil 32: Mat nr 11. Serie 1. 10. 81.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GHALT	
0	0	0	0	0
60	59.7	.8	.398	5.00000E-03
1440	63.3	.3	.422	2.00000E-03
8640	69.9	.7	.466	4.00000E-03
34560.	78.5	1.9	.524	1.30000E-02
115200.	91	2.9	.607	1.90000E-02
216000.	103.7	3.	.692	2.00000E-02



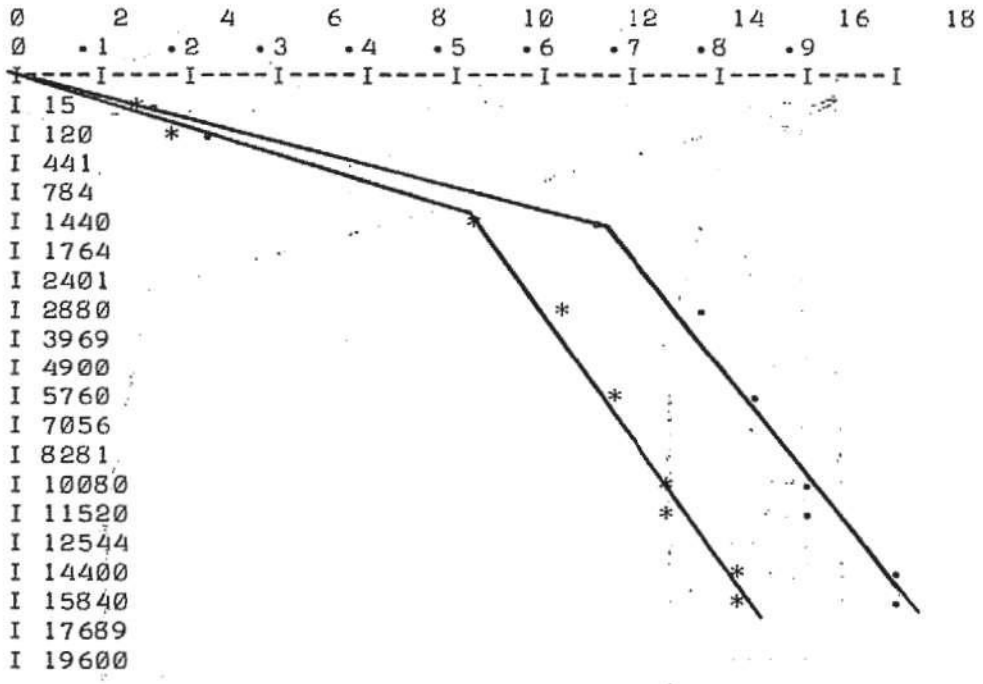
Bil 33: Mat nr 11. Serie 2. 5. 151.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	.2	.1	7.00000E-03	4.00000E-03
15	3.4	.8	.122	2.80000E-02
30	4.9	.4	.174	1.20000E-02
60	6.2	.5	.218	1.50000E-02
120	8.5	.8	.299	2.50000E-02
2880	22.9	1	.807	2.50000E-02
7200	23.7	.8	.835	2.00000E-02
8640	24	.8	.844	1.80000E-02
10080	24	.8	.846	1.80000E-02
12960	24.3	.8	.856	1.90000E-02
17280	24.4	.8	.858	1.80000E-02
18720	24.4	.8	.857	1.70000E-02
21600	24.6	.8	.867	1.50000E-02
23040	24.8	.8	.874	1.40000E-02



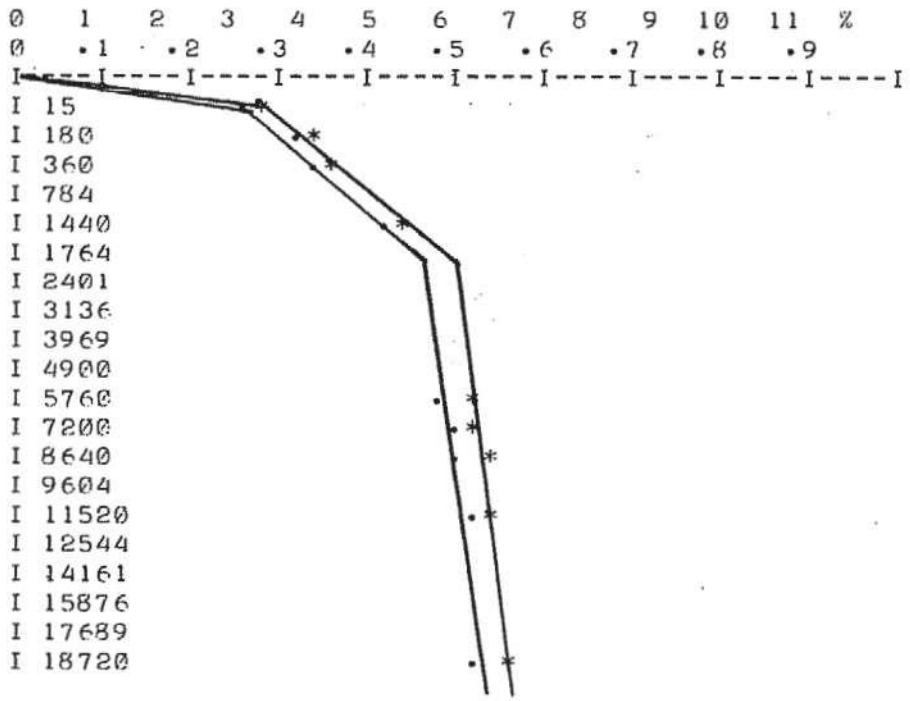
Bil 34: Mat nr 17 vaxad. Serie 1. 16. 17.

			VATTENM•GRAD	
0	•3	•2	1•90000E-02	1•00000E-02
15	1•8	•3	8•80000E-02	1•30000E-02
30	2•1	•3	•105	1•60000E-02
60	2•6	•4	•128	2•10000E-02
120	3•7	•9	•181	4•20000E-02
1440	11	2•7	•539	•123
2880	13	2•1	•636	9•10000E-02
5760	14•2	1•6	•698	6•40000E-02
10080	15•2	1•4	•744	5•00000E-02
11520	15•2	1•4	•747	4•90000E-02
14400	16•7	•7	•822	1•90000E-02
15840	16•8	•7	•825	1•90000E-02



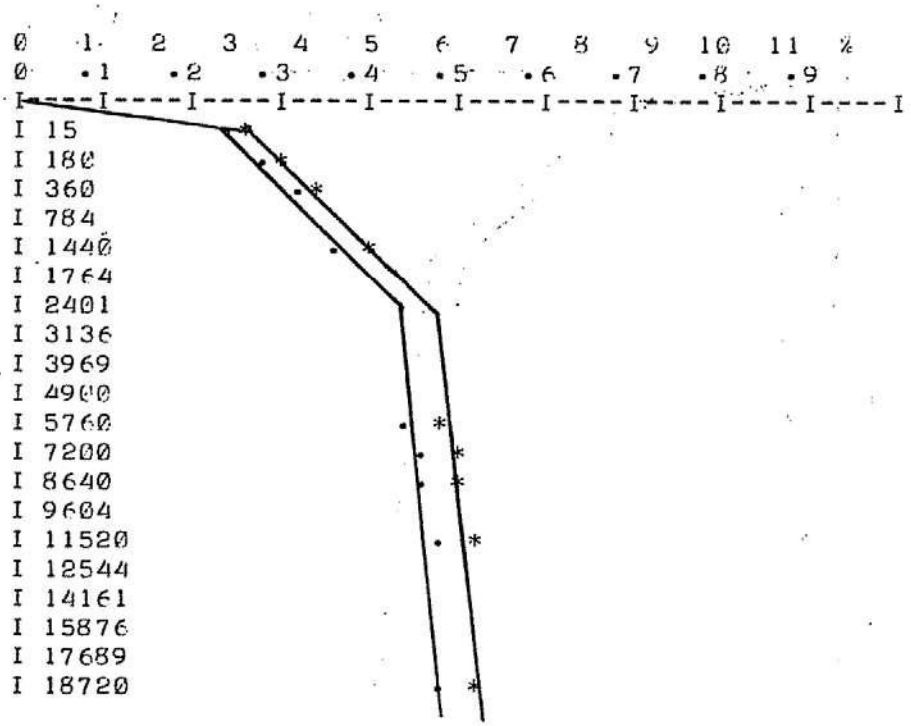
Bil 35: Mat nr 18 vaxad. Serie 2. 16.12.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	2.8	.5	.243	4.00000E-02
5	3.2	.6	.269	4.30000E-02
15	3.3	.6	.282	4.40000E-02
30	3.4	.6	.293	4.30000E-02
60	3.6	.6	.31	4.50000E-02
180	4	.6	.339	4.70000E-02
360	4.3	.6	.362	4.50000E-02
1440	5.3	.8	.446	5.80000E-02
5760	6.2	.8	.525	5.60000E-02
7200	6.3	.8	.536	5.50000E-02
8640	6.4	.8	.543	5.50000E-02
11520	6.5	.7	.553	5.00000E-02
18720	6.7	.7	.567	4.80000E-02
21600	6.7	.7	.57	4.60000E-02
27360	6.8	.7	.576	4.40000E-02
31680	6.8	.7	.577	4.40000E-02
38880.	6.8	.7	.576	4.50000E-02
51840.	6.8	.7	.576	4.40000E-02



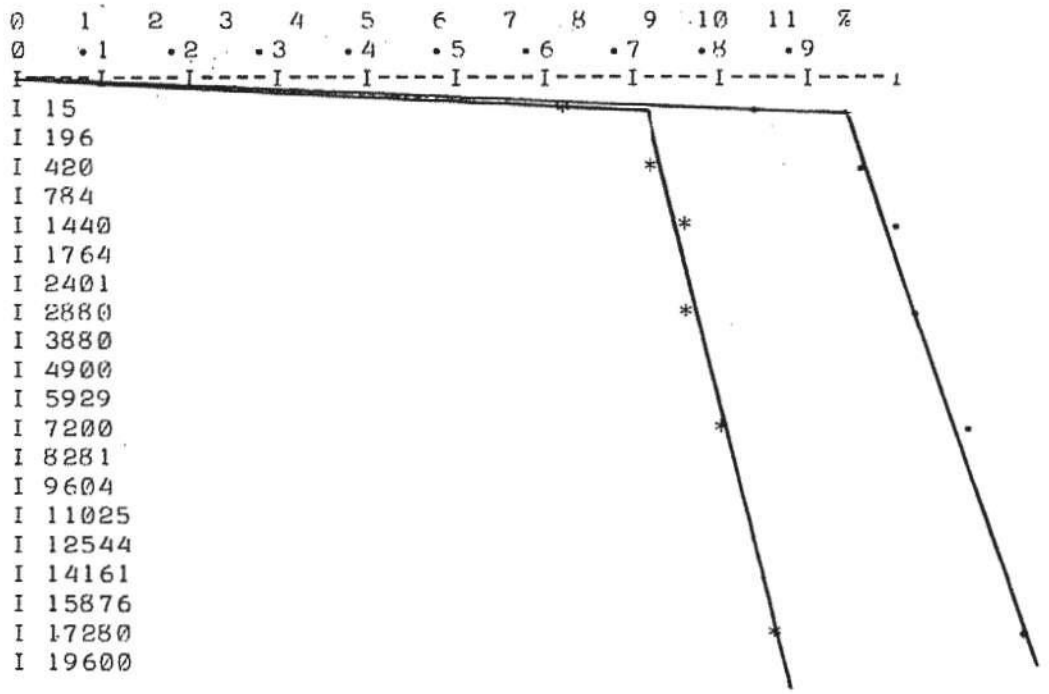
Bil 36: Mat nr 40 a + 40 b. Serie 1. 3. 26.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	2.4	.4	.212	3.600000E-02
5	2.9	.4	.251	3.700000E-02
15	3	.4	.263	3.600000E-02
30	3.1	.4	.275	3.500000E-02
60	3.3	.4	.292	3.600000E-02
180	3.7	.4	.319	3.900000E-02
360	4	.4	.347	3.600000E-02
1440	4.7	.5	.412	4.600000E-02
5760	5.6	.6	.488	5.400000E-02
7200	5.8	.5	.507	4.300000E-02
8640	5.9	.5	.513	4.300000E-02
11520	6	.5	.523	4.700000E-02
18720	6.2	.5	.537	5.100000E-02
21600	6.3	.5	.543	4.900000E-02
27360	6.3	.6	.548	5.200000E-02
31680	6.4	.5	.55	5.100000E-02
38880.	6.3	.5	.547	5.000000E-02
51840.	6.3	.6	.548	5.300000E-02



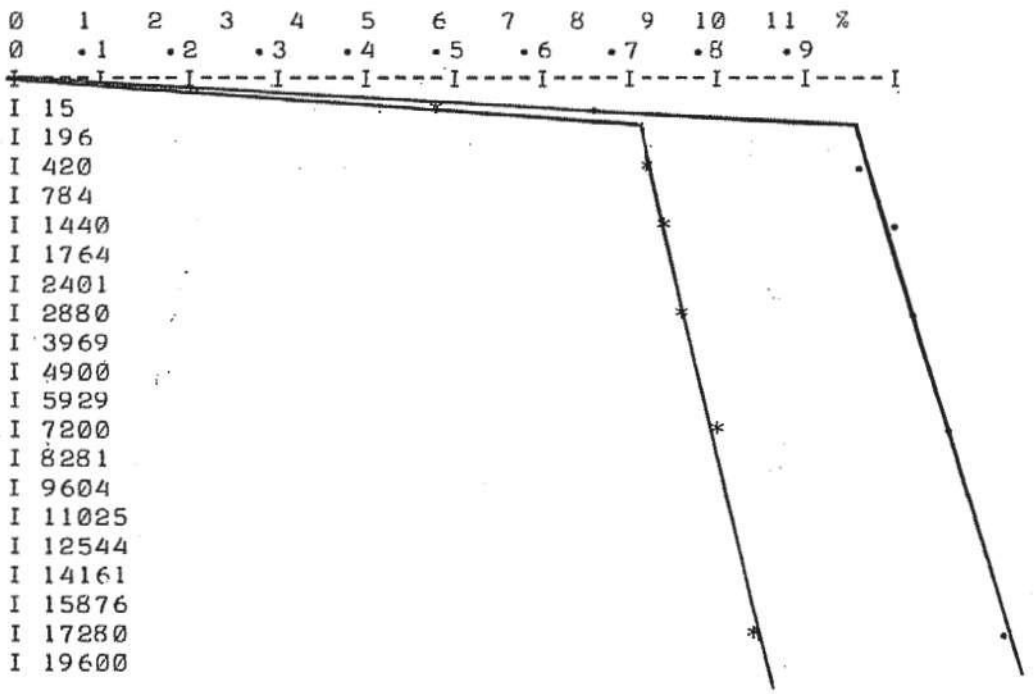
Bil 37: Mat nr 40 a + 40 b. Serie 2. 3. 36.

TID	FUKTKVOT		VATTENM.GRAD	
0	-.2	0	-8.00000E-03	5.00000E-03
5	6.1	.3	.372	1.60000E-02
15	10.5	.4	.636	2.00000E-02
60	11.9	.4	.722	1.10000E-02
420	12.2	.4	.736	9.00000E-03
1440	12.6	.4	.762	7.00000E-03
2880	12.9	.4	.778	6.00000E-03
7200	13.5	.4	.817	5.00000E-03
17280	14.3	.5	.864	7.00000E-03
33120.	14.9	.5	.901	1.20000E-02
38880	15.1	.5	.915	7.00000E-03
40320.	15.2	.5	.916	6.00000E-03



Bil 38: Mat nr 41 a + 41 b. Serie 1. 3. 28.

TID	FUKTKVOT		VATTENM. GRAD	
0	-.1	0	-5.00000E-03	1.00000E-03
5	4.9	.9	.295	5.30000E-02
15	8.3	2.2	.492	.127
60	12	.2	.715	5.00000E-03
420	12.2	.3	.729	1.00000E-02
1440	12.6	.2	.75	7.00000E-03
2880	12.9	.3	.767	1.30000E-02
7200	13.4	.4	.8	1.70000E-02
17280	14.2	.3	.842	1.30000E-02
33120.	14.7	.2	.872	6.00000E-03
38880.	14.9	.2	.887	2.00000E-03
40320.	12.4	6.1	.74	.362



Bil 39: Mat nr 41 a + 41 b. Serie 2. 3. 28

Publikationer från Institutionen för Byggnadsteknik vid Tekniska Högskolan i Lund

Bulletiner

1. Halvorsen, Ulf A. Korrosion och kalkurlakning vid sprickor i betongkonstruktioner. Lund 1966.
2. Lindblad, Sven. Impact sound characteristics of resilient floor coverings. A study on linear and nonlinear dissipative compliance. Lund 1968.
3. Nielsen, Anders. Byggnadsmaterials reologi. Problemställningar och litteratur. Lund 1968.
4. Nielsen, Anders. Krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong. Lund 1968.

Interna rapporter

1. Bankvall, Claes G. Principer för teoretisk behandling av konvektionsförloppet i en sluten värmeisolerad konstruktion. Lund 1966.
2. Ahlgren, Lennart. Grundläggande lagar för fuktvandring i porösa byggnadsmaterial. Lund 1966.
3. Ahlgren, Lennart. Uppföljning av uttorkningsförloppet hos golvbetong. Lund 1967.
4. Nielsen, Anders. Orienterande undersökning av krypning hos högtrycksånghärdad gasbetong. Lund 1967.
5. Nielsen, Anders. Orienterande undersökning av krypning under uttorkning hos högtrycksånghärdad gasbetong. Lund 1968.
6. Nielsen, Anders. Lättbetong internationellt sett. Engelska forskningsinstitut. Intryck från London 27-30 maj 1968. Lund 1968.
7. Cronström, Örjan & Forssander, Tom. Undersökning av polyetylenglykolstabiliserat trä. Lund 1968.
8. Åkerlund, Sture. Egentyngdens inverkan på brottrisken - några räkneexempel. Lund 1968.
9. Grönqvist, Nils-Ove. Utmattningshållfasthet hos armeringsstänger. Lund 1968.
10. Grönqvist, Nils-Ove. Statisk hållfasthet hos armeringsstänger tidigare utsatta för pulserande last. Lund 1969.

Rapporter

11. Bankvall, Claes G. Temperaturbestämning och värmeisole-

ringsundersökning genom strålningsmätning. Byggnadstekniska tillämpningar av IR-kameran. Lund 1969.

12. Bankvall, Claes G. Research in heat transfer. Lund 1969.
13. Bankvall, Claes G. Porositet och porstorleksfördelning. Metoder att studera och kvantifiera porositet och porstorleksfördelning. Lund 1969.
14. Bankvall, Claes G. Ensidig, evakuerbar och roterbar plattapparat för värmeisoleringsundersökningar. Lund 1970.
15. Bankvall, Claes G. Värmetransport i fibrösa material. Lund 1970.
16. Sandberg, Per Ingvar. Icke stationär fukttransport. Beräkningar med dator. Lund 1970.
17. Åkerlund, Sture. Säkerhetsproblem vid takkonstruktioner av trä. Textdel och figurdel. Lund 1970.
18. Jonasson, Hans. The propagation of sound over ground with and without acoustic barriers. Lund 1971.
19. Bomberg, Mark. Water flow through porous materials. Part 1: Methods of water transport measurements. Lund 1971.
20. Bomberg, Mark. Water flow through porous materials. Part 11: Relative suction model. Lund 1971.
21. Bomberg, Mark. Water flow through porous materials. Part 111: Applications of the relative suction model. Lund 1972.
22. Beständighet, reologi, fukt. En redovisning till Statens Råd för Byggnadsforskning över forskningen vid avd. byggnadsmateriallära, LTH åren 1968-1971. Lund 1971.
23. Hellsten, Mikael & Toolanen, Bengt. Trä impregnerat med polyetylenglykol och melaminharts. Lund 1971.
24. Snödjup och vattenvärde. Lund 1971.
25. Bankvall, Claes G. Värmetransport i fiberisolerade konstruktioner. Den naturliga konvektionens betydelse. Lund 1971.
26. Fagerlund, Göran. Samband mellan porositet och materials mekaniska egenskaper. Lund 1972.
27. Sandberg, Per Ingvar. Samtidig ångdiffusion och luftströmning genom ett poröst material. Lund 1971.
28. Nilsson, Leif. Utredning och förslag till provningsmetoder för korrugerade takplattor av asbestcement. Lund 1971.
29. Samband mellan struktur och egenskaper hos byggnadsmaterial. Lund 1972.

30. Fagerlund, Göran. Spröda porösa byggnadsmaterials forstbeständighet i relation till deras struktur - - teori och experiment. Lund 1972. Under publicering.
31. Degerman, Tryggve. Gipsregelväggars funktion som vindstabiliserande element. Krafter och deformationer vid lastupptagning genom skivverkan i gipsplattor. Lund 1972.
32. Boija, Jan, Larsson, Per-Robert & Sandberg, Bengt. Egenskapernas variation med djupet hos ensidigt vakuumbehandlade plattor av stor tjocklek. Lund I972.
33. Examensarbeten I966-7I. Sammanställning av examensarbeten utförda vid byggnadsmateriallära, LTH. Lund I972.
34. Fagerlund, Göran. Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa spröda material. Lund I973.
35. Bodlund, Kaj. Punkt-till-punkt korrelation i efterklangsrum och i väggar monterade i reduktionslaboratorium. Lund I972.
36. Ahlgren, Lennart. Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. Lund I972.
37. Cederfelt, Leif. Utformning av stålkonstr. med hänsyn till ljudisolering. Under publicering.
38. Bankvall, Claes G. Natural convective heat transfer in insulated structures. Lund I972.
39. Bankvall, Claes G. Heat transfer in insulation and insulated structure. Lund I972.
40. Fagerlund, Göran. Significance of critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials. Lund I973.
41. Fagerlund, Göran. Methods of characterization of pore structure. Lund I973.
42. Fagerlund, Göran. Nonfreezable water content of porous building materials. Lund 1973. Under publicering.
43. Sandberg, P I. Byggnadsdelars fuktbalans i naturligt klimat. Lund 1973.