LUND UNIVERSITY

Kapillaritet som orsak till nedbrytning av kalcitbundet sandsten : en hypotes

Fagerlund, Göran

1994

Link to publication

Citation for published version (APA):
Fagerlund, G. (1994). *Kapillaritet som orsak till nedbrytning av kalcitbundet sandsten : en hypotes*. (Rapport TVBM; Vol. 3058). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:
1

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

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

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

LUND UNIVERSITY

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

Download date: 18. Dec. 2025

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA
Byggnadsmaterial

UNIVERSITY OF LUND
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Division of Building Materials

KAPILLARITET SOM ORSAK TILL NEDBRYTNING AV KALCITBUNDEN SANDSTEN - *en hypotes*

Göran Fagerlund

Rapport TVBM-3058

Lund, 1994

Coden: LUTVDG/(TVBM-3058)/1-19/1994

ISSN 0348-7911

KAPILLARITET SOM ORSAK TILL NEDBRYTNING AV KALCITBUNDEN SANDSTEN - *en hypotes*

Capillarity as a cause of the deterioration of calcite-bound sandstone - *a hypothesis*

Göran Fagerlund

Rapport TVBM-3058

Lund, 1994 mars

Innehåll

Sid

1. Problemställning; Sammanfattning *(summary)*	1
2. Skede 1. Omättat kapillärflöde	2
3. Gräns mellan skeden 1 och 2	3
4. Skede 2. Mättat kapillärflöde	5
5. Regnintensiteter i Sverige	6
6. Insugning i sten vid olika intensitet/varaktighet hos regnet	8
7. Insugning i sten vid olika typfall	9
8. Kemisk upplösning av stenen	12
Referenser	16
Figurer	17
BILAGA 1	19

1. Problemställning; Sammanfattning

Vissa porösa naturstenar, som tidigare använts inom byggandet, bryts gradvis ner genom miljöpåverkan av olika typ. Ett typiskt exempel är gotländsk kalcitbunden sandsten. Denna har använts i stor omfattning i vårt äldre bestånd av prestigebyggnader , tex slott och palats, i skulpturala utsmyckningar på hus etc. Föreliggande rapport behandlar enbart denna stentyp.

Den gängse förklaringen är att olika luftföroreningar tex sura regn bryter ner stenen och att detta går snabbare i vår tid eftersom försurningen av luft och regn varit högre under det senaste halvseklet än tidigare. En annan förklaring är att stenarna skulle ha låg frostbeständighet och att frostskadorna skulle öka med ökande föroreningsgrad av det vatten som fryser inne i stenen. Även denna förklaring baseras alltså till dels på en ökad föroreningsgrad under de senaste decennierna vilken ökat frostkänsligheten. Att frostbeständigheten är rätt låg hos dessa stenar bekräftas delvis av försök som för närvarande görs vid vår avdelning; se rapporter /2/ och /5/ tom /8/.

En annan förklaring till nedbrytningen presenteras i föreliggande rapport. Det visar sig nämligen att den gotländska kalksandstenen har en extremt snabb kapillärsugning och fuktfronten tränger även vid kortvariga regn mycket djupt in i stenen. Detta gör att mycket stora vattenmängder transporteras ut ur och in i stenens ytskikt under dess långa livstid. Flera av de byggnader där stenen använts är i dag 300 år eller mer.

Rent vatten löser kalciumkarbonat. I artikeln visas genom enkla analyser av regnintensiteter i Sverige att teoretiskt sett stora urlakningar av kalcit hinner ske på djup av 20 à 30 mm under ett par seklers exponering. De skador man iakktar på framförallt skulpturala detaljer kan således förklaras genom en mycket naturlig åldringsprocess som skulle ha funnits även om ingen försurning funnits. En ökad surhetsgrad hos regnet accentuerar naturligtvis utlösningen påtagligt.

Rapporten vill enbart vara något av ett diskussionsinlägg -en hypotes. Det vore intressant att göra simulerade, accelererade tester av regnpåverkan på stenar och att därvid studera om urlakningsfenomen förekommer.

Summary

A theory for the destruction of Swedish calcite-bound sandstone is presented. It was found that this type of natural stone has a very rapid capillary suction. The capillary front penetrates to large depths even after short rains. This means that large amounts of water is transportetd into and out of the surface during the service life of the stone. Pure water dissolves calcite. It is theoretically shown that rather large amounts of calcite can be leached out of the stone into a depth of 2 to 3 cm from the surface during an exposure time of a couple of centuries. Therefore, the deterioration often observed on oldwalls and sculptural details made of the stone can perhaps be explained by this very natural ageing process.

2. Skede 1. Omättat kapillärflöde

Under detta skede är tillförseln av regnvatten till stenytan mindre än insugningen, dvs allt regnvatten som träffar stenen sugs in. Detta inträffar alltid i början av regnet och gäller under rätt lång tid när stenen inte utsätts för vatten som runnit av från andra ytor. Tidrymden som skede 1 gäller beror på stenens kapillaritetsegenskaper. Ju snabbare den suger desto längre varar skede 1. Vid mycket sugande stenar kan skede 1 gälla under rätt långa regnperioder.

Efter sugtiden t_o är den vattenmättade zonens tjocklek z_o; se Fig 1. Villkoret att total regnmängd under denna tid skall vara lika hög som insugen vattenmängd i mättade zonen ger då:

$$q \cdot t_o = P_k \cdot z_o \cdot \gamma_w \qquad (1)$$

Där

q	regnintensitet horisontellt mot stenytan ($kg/m^2 \cdot s$)
t_o	varaktighet av skede 1 (s)
P_k	för insuget vatten tillgänglig porositet (m^3/m^3)
z_o	djup av vattenmättat material (m)
γ_w	vattnets densitet (1000 kg/m^3)

Denna ekvation förutsätter att inget vatten sugs in på större djup än z_o vilket innebär en kraftig förenkling vilken dock kan vara acceptabel i detta sammanhang. För noggrannare beräkningar erfordras datorberäkningar.

Porositeten P_k kan definieras:

$$P_k = P_{tot} - P_w - P_{luft} \qquad (2)$$

Där

P_{tot}	total porositet i stenen (m^3/m^3)
P_w	vattenmättad porositet i stenen när regnet startade (m^3/m^3)
P_{luft}	den del av totalporositeten som inte kan vattenfyllas ens om stenen skulle sänkas helt ner i vatten under lång tid ("icke genomströmningsbar porositet") (m^3/m^3)

Ur (1) fås:

$$z_o = q \cdot t_o / (P_k \cdot \gamma_w) \qquad (3)$$

3. Gräns mellan skede 1 och 2

Efter tiden t_o är kapillärsugningen lika hög på djupet z_o som regnintensiteten q. Kapillärflödet kan beskrivas av den generella ekvationen:

$$q = k/[2\cdot(t_o')^{1/2}] \qquad (4)$$

Där

k	kapillaritetstalet $[kg\cdot m\cdot(s)^{1/2}]$
t_o'	fiktiv sugtid som skulle gett djupet z_o hos vattenfronten om flödet varit mättat från början (s)

Definitionsmässigt gäller för kapillärtransport; se tex /1/:

$$t = m\cdot z^2 \qquad (5)$$

Där

m	motståndstalet (s/m^2)
z	djupet hos vattenfronten (m)

Motståndstalet är ett mått på hur snabbt en vattenfront tränger in i stenen. Ju lägre m är desto snabbare tränger fronten in. Motståndstalet beror på porstoleksfördelningen hos stenen. För ett kapillärrör är m omvänt proportionellt mot rörets radie. På motsvarande sätt minskar m med ökande porstorlek i en sten. Motståndstalet är i stort sett oberoende av stenens begynnelsefukttillstånd.

Enligt ekv (5) gäller alltså:

$$t_o' = m\cdot z_o^2 \qquad (6)$$

Insättning av ekv (6) i (4) ger:

$$z_o = k/[2\cdot q\cdot(m)^{1/2}] \qquad (7)$$

Definitionsmässigt gäller; se tex /1/:

$$k = \gamma_w\cdot P_k/(m)^{1/2} \qquad (8)$$

Kapillaritetstalet beror alltså på stenens begynnelsefukttillstånd eftersom det beror på P_k; se definition av P_k i ekv (2).

Insättning av ekv (8) i (7) ger:

$$\mathbf{z_o = \gamma_w \cdot P_k/(2 \cdot q \cdot m)} \qquad (9)$$

Denna ekvation visar alltså att djupet där skede 1 övergår till skede 2 ökar med ökande porositet och minskande motståndstal när regnintensiteten är konstant. Ju mera grovporös stenen är desto lägre blir m och desto större blir djupet z_o. På motsvarande sätt gäller att för en given sten ökar djupet z_o med minskande regnintensitet. Mycket finporösa stenmaterial, tex betong, har mycket höga motståndstal, varför skede 1 i stort sett inte förekommer.

Exempel 1; jämförelse mellan gotländsk sandsten och betong

Gotländsk kalksandsten av typ Uddvide

Denna stentyp har enligt /2/ följande ungefärliga egenskaper; se även BILAGA 1 nedan:
$P_{tot} = 22$ %; $P_{luft} = 7$ %; $m = 33{,}6 \cdot 10^4$ s/m^2.

Anta att stenen är torr när regnet startar (p_w=0) och att regnintensiteten är 0,01 kg/(m^2·s) vilket är relativt måttligt (motsvarar 6 mm regn på 10 minuter). Då fås ur ekv (9):

$z_o = 1000 \cdot (0{,}22-0{,}07)/(2 \cdot 0{,}01 \cdot 33{,}6 \cdot 10^4) = 0{,}022$ m = **22 mm**

Betong av normal kvalitet i en fasad (K30)

Denna betong har ungefär följande egenskaper förutsatt att den någon gång genomgått en ordentlig uttorknings-uppfuktningscykel; se /1/.$P_{tot} = 15{,}5$ %; $P_{luft} = 2$ %; $m = 40 \cdot 10^6$ s /m^2.

Anta att stenen är i jämvikt med 80% rf när regnet börjar. Detta är ett lågt genomsnittsvärde för utomhusbetong; se Fig 3. Då är $P_w \approx 10$ %; se /1/.
Regnintensiteten är densamma som för den gotländska stenen. Då fås ur ekv (9):

$z_o = 1000 \cdot (0{,}155-0{,}10-0{,}02)/(2 \cdot 0{,}01 \cdot 40 \cdot 10^6) = 4{,}4 \cdot 10^{-5}$ m = **0,04 mm**

Detta exempel visar att en gotländsk sandsten blir vattendränkt på ett mycket större djup än betong vid ett enstaka regn. Därmed blir också de urlakningseffekter som beskrivs nedan mycket mera betydelsefulla. Data för betongen baseras på att den genomgått en kraftig uttorkning varvid kapillariteten ökar. Normal utomhusbetong, vilken aldrig kan aldrig torka ordentligt, har betydligt högre motståndstal vilket gör skillnaden mellan sandsten och betong ännu större än vad som framgår av exemplet.

Sätts ekv (3) och (9) lika fås ett uttryck för den tid t_0 när Skede 1 upphör:

$$\mathbf{t_0 = \{\gamma_w \cdot P_k/q\}^2/(2 \cdot m)} \qquad (10)$$

Eller:

$$\mathbf{t_0 = 2 \cdot m \cdot z_0^2} \qquad (11)$$

Insättning av ekv (10) i (4) ger följande samband mellan tiden t_0 och den fiktiva tid t_0' vilken motsvarar den tid av mättat kapillärflöde som skulle ha gett inträngningsdjupet z_0:

$$t_0' = t_0/2 \qquad (12)$$

Genom att flödet inte är mättat fördröjs alltså tiden tills djupet z_0 nås.

Ekv (10) visar att Skede 1 förlängs med ökad porositet och minskat motståndstal vid given regnintensitet. För en given stentyp förlängs tiden med minskad regnintensitet.

Exempel 2. Samma stenar som i exempel 1 och samma regnintensitet

Gotländsk kalksandsten.

Tiden t_0 blir enligt ekv (10):

$t_0 = \{1000 \cdot (0{,}22-0{,}07)/0{,}01\}^2/(2 \cdot 33{,}6 \cdot 10^4) = 335$ sekunder = **5,6 min**

Fasadbetong

Tiden t_0 blir enligt ekv (10):

$t_0 = \{1000 \cdot (0{,}155-0{,}100-0{,}02)/0{,}01\}^2/(2 \cdot 40 \cdot 10^6) =$ **0,2 sekunder**

Detta exempel kombinerat med exempel 1visar att ett mycket stort insugningsdjup nås i en gotländsk sandsten redan efter några få minuters rätt måttligt regn. För en betong mättas flödet mycket snabbt och inträngningen när detta sker är mycket liten.

4. Skede 2. Mättat kapillärflöde

Efter tid t_0 är kapillärinsugningen mättad eftersom vattentillförseln till stenytan är större än insugningskapaciteten. Överflödigt regnvatten rinner då nedåt på stenytan; se Fig 1.

Vid mättat kapillärflöde gäller de vanliga formlerna för inträngning av en vattenfront, ekv (5). I detta fall skall dock tiden räknas från en fiktiv starttid för sugningen vilken ges av relationen mellan t_0 och t_0'. Då gäller:

$$z = \{(\tau - (t_0 - t_0')/m\}^{1/2} \qquad (13)$$

Där

τ tiden från det regnet med intensitet q startade (s)

Efter insättning av ekv (12) fås:

$$\mathbf{z = \{(\tau - t_0/2)/m\}^{1/2}} \qquad (14)$$

Exempel 3: Samma stenar och samma regnintensitet som i exempel 1 och 2

Gotländsk kalksandsten.

Regnet pågår under 30 min dvs 1800 sekunder. Då fås enligt ekv (14):
$z = \{(1800-335/2)/33{,}6\cdot 10^4\}^{1/2} = 0{,}070$ m = 70 mm

Fasadbetong.

Samma varaktighet hos regnet som ovan. Då fås enligt ekv (14):
$z = \{(1800-0{,}2/2)/40\cdot 10^6\}^{1/2} = 0{,}007$ m = 7 mm

För betongen kan alltså skede 1 försummas . Inträngningen är mycket mindre än för en sandsten.

5. Regnintensiter i Sverige

En statistisk analys av regnintensiteten i Sverige visas i Fig 2 som hämtats ur /3/. Figuren visar statistisk "återkomsttid" av en viss kombination av regnintensitet och varaktighet för ett antal olika "regionala parametrar" (lokala klimattyper) i Sverige. Som synes är sambanden linjära i log-log-skala. Detta innebär att följande samband kan användas:

$$q = A\cdot\tau^B \qquad (15)$$

Där

A, B	konstanter som fås ur Fig 2
q	regnintensiteten [kg/(m^2·s)]
τ	regnets varaktighet (s)

En analys av Fig 2 visar att exponenten B är ca -0,65 för alla frekvenser av återkomsttiden. Koefficienten A har ungefär följande värden.

"Frekvens"	Regional parameter 40	Regional parameter 20
Återkomsttid var 10:e år:	A≈1,7	A≈1,4
Återkomsttid varje halvår:	A≈1	A≈0,55
Mycket korta återkomsttider	A≈0,95	A≈0,50

I det i denna rapport studerade problemet är det inte extremflöden som är intressanta utan årliga genomsnittsflöden, dvs ofta återkommande flöden. Extrapoleras konstanten A linjärt till mycket korta återkomsttider fås A≈0,95 resp 0,50 för de båda "klimatzonerna". Ett användbart uttryck för att beräkna normalvärden av regnintensitet kan därför vara:

$$q = 0{,}95 \cdot \tau^{-0{,}65} \quad \text{(regional parameter 40)} \qquad (16a)$$

Respektive

$$q = 0{,}5 \cdot \tau^{-0{,}65} \quad \text{(regional parameter 20)} \qquad (16b)$$

Några exempel på samspelet mellan intensitet och varaktighet baserad på ekv (16) ges i Tabell 1.

Tabell 1: Samband mellan regnintensitet, regnets varaktighet och total regnmängd vid normala regn enligt ekv (16).
Relation between the rain intensity and its duration; eq (16)

Intensitet [kg/(m²·s)]	Regional parameter 40 varaktighet (min)	Regional parameter 40 totalt regn (mm)	Regional parameter 20 varaktighet (min)	Regional parameter 20 totalt regn (mm)
0,050	1,5	4,5	0,6	2
0,025	4	6	1,7	2,5
0,010	15	9	7	4
0,007	25	10,5	12	5
0,005	42	12,5	20	6
0,002	165	20	81	9,5
0,001	464	28	235	14

Totala regnmängden ökar således med ökad varaktighet hos regnet trots att intensiteten då minskas.

6. Insugning i sten vid olika intensitet/varaktighet hos regnet

Gotländsk kalksandsten av typ Uddvide och vanlig fasadbetong behandlas i beräkningen. Data enligt Exempel 1 används. Stenytan antas vara horisontell. Regnet antas belasta stenytan vinkelrätt mot denna. Insugning beräknas för några kombinationer av intensitet och varaktighet enligt Tabell 1. Tidpunkten t_0 och max insugningsdjup z beräknas med ekvationer (10) och (14). Resultatet visas i Tabell 2.

Tabell 2: Max insugningsdjup vid olika regntyper enligt Tabell 1.
Maximum depth of the capillary front at different characteristics of the rain

Intensitet [kg/(m^2·s)] (mm)	tid t_0 (s)	Regional param. 40 varaktighet τ (s)	z (mm)	Regional param. 20 varaktighet τ (s)	z (mm)
Kalksandsten av typ Uddvide					
0,050	13	90	16	36	9
0,010	335	900	47	420	22
0,005	1340	2520	74	1200	40
Fasadbetong					
0,050	0,006	90	1,5	36	1
0,010	0,15	900	5	420	3
0,005	0,6	2520	8	1200	5,5

Beräkningen visar att inträngningsdjupet ökar med minskad intensitet trots att tiden t_0 när Skede 1 slutar blir högre. Orsaken är att en minskad intensitet rent statistiskt åtföljs av en ökad regnmängd.

Som visats tidigare är insugningen mycket högre i sandsten än i betong. Om mera realistiska data över betongens kapillaritet används, baserade på en betong som aldrig genomgått någon stor uttorkning, blir skillnaden mellan sten och betong ännu större. Detta framgår av Fig 3 vilken visar en beräkning av maximala och minimala fuktprofiler i en betongyta som utsätts för omväxlande 6 tim regn och 7 dygn i 60% rf; se /4/. Redan inom någon mm från ytan har rf sjunkit under 100%, en nivå som motsvarar fritt vatten.

7. Insugning i sten vid olika typfall

Hur mycket vatten som sugs in beror på hur stenen exponeras. Några typfall skall behandlas.

Fall 1: Horisontell stor stenyta med regn vinkelrätt mot ytan

I det enklaste fallet, vilket även behandlades i avsnittet ovan, angrips en horisontell stenyta direkt av regnet. Inget regnvatten rinner av och inget regnvatten tillkommer från andra angränsande ytor.

Insugningsdjupet ges av flödet q som är regnintensiteten. Exempel på insugningsdjup ges i Tabell 2.

Fall 2: Vertikal yta som utsätts enbart för slagregn

Insugningsdjupet ges av ett flöde q´ vilket utgör regnets horisontalkomponent.

$$q' = q \cdot \sin \theta \qquad (17)$$

Där

θ regnets vinkel mot vertikalplanet.

Vid tex 30° slagregnsvinkel blir det flöde som angriper väggen enbart 50% av regnintensiteten, vilket i motsvarande mån minskar insugningsdjupet.

Exempel 5:

Antag en vägg av stenen Uddvide. Regnintensiteten är 0,01 kg/(m^2·s) med regional parameter 40. Slagregnsvinkeln är 30° riktad mot väggen. Regnintensiteten mot väggytan är därför 0,01·sin 30° = 0,005 kg/(m^2·s). Regnets varaktighet är enligt Tabell 1 ,15 min (900 sekunder). Följande gäller enligt ekv (10):

t_0 = 1340 sekunder (se även Tabell 2)

Regnets verkliga varaktighet är således kortare än tiden t_0. Insugningsdjupet ges då av ekv (3) med tiden t_0 ersatt med regnets varaktighet τ:

$z_0 = 0{,}005 \cdot 900/[(0{,}22-0{,}07) \cdot 1000] = 30$ mm

Fall 3: en vertikal vägg men regnvatten från tex ett tak rinner över väggen

Insugningsdjupet ges av ett flöde q_{eff} som beskrivs av:

$$q_{eff} = q' + \Delta Q/A_{eff} = q \cdot \sin\theta + \Delta Q/A_{eff} \qquad (18)$$

Där

ΔQ	det tillskott som når väggen från angränsande yta (kg/s)
A_{eff}	den väggarea över vilken det avrunna vattnet fördelas (m^2)

Exempel 6:

Antag en vägg av stenen Uddvide. Regnintensiteten är 0,01 kg/(m2·s) med regional parameter 40. Slagregnsvinkeln är 30° riktad mot väggen (samma som i exempel 5). Väggen nås av vatten från ett tak med effektiva arean 6 m^2 per löpmeter takfot, dvs ΔQ=0,01·6 kg/s. Vattnet rinner över takfoten och når väggen relativt jämnt fördelat på en vertikalsträcka av 0,5 m. Effektiva regnintensiteten på denna del av väggen är då:

$$q_{eff} = 0{,}01 \cdot \sin 30° + 0{,}01 \cdot 6/0{,}5 = 0{,}125 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$$

Detta är en mycket stor regnintensitet. Tiden t_0 nås redan inom 2 sekunder. Vattenfronten är då på djupet 1,8 mm. Ett fritt vattenflöde kommer därför att tidigt rinna över väggen varför en stor del av denna utsätts för stor regnintensitet. Kapillärflödet kan därför antas vara mättat i stora delar av väggen redan från det regnet startade. Insugningsdjupet bestäms därför enbart av motståndstalet och ges av ekv (5) uttryckt på följande sätt:

$$z = (\tau/m)^{1/2} \qquad (19)$$

Där τ är regnets varaktighet (s).

Exempel 7:

Samma som exempel 6. Antag att regnet pågår 15 minuter liksom i exempel 5. Insugningsdjupet är då enligt ekv (19):

$$z = (15 \cdot 60/33{,}6 \cdot 10^4)^{1/2} = 52 \text{ mm}$$

En jämförelse med exempel 5 visar att insugningsdjupet blir ca 70% högre än om inget vatten hade tillkommit från angränsande ytor och flödat över väggen.

Exempel 8: Storleken på nedblött väggyta

Samma som exempel 7. Totalmängden, Q_{in}, som sugits in i väggen under hela regnperioden av 15 minuter blir:

$$Q_{in} = z \cdot P_k \cdot 1000 = 0{,}052 \cdot (0{,}22-0{,}07) \cdot 1000 = 7{,}8 \text{ kg/m}^2$$

Detta värde skall jämföras med total vattenmängd, Q_{tot}, som tillförs väggen

$$Q_{tot} = [0{,}01 \cdot \sin 30° + 0{,}01 \cdot 6] \cdot 15 \cdot 60 = 58{,}5 \text{ kg}$$

Den totalt tillförda vattenmängden räcker således att förse en vägghöjd av 58,5/7,8 = 7,5 meter med så mycket vatten att en mättad kapillärsugning blir möjlig.

Mycket stora vattenmängder kan således tillföras en fasad av en sandsten av typ Uddvide under ett normalt regn om väggen kan översköljas av vatten från angränsande täta ytor, tex takplåt eller liknande.

Fall 4: En lokal utstickande horisontell fris eller skulptural detalj på en vägg

Detta är ett vanligt fall. En stenfris eller en skulptural detalj av natursten sticker ut mer eller mindre horisontellt ur en tegelvägg eller en putsad vägg. Om denna har ett högt motståndstal kommer fritt vatten, som träffat väggen, att efter rätt kort tids regn flöda över väggen. Regnet rinner ner på frisen eller skulpturen och sugs in i denna. Fallet påminner om fall 3 ovan.

Den totala tillförda vattenmängden till frisen (skulpturen), Q [kg/löpmeter fris (skulptur)], under hela regnperioden är:

$$Q = Q'' \cdot H_{eff} \qquad (20)$$

Där

Q''	vatten som inte kan sugas in i väggen eftersom dennas insugningsförmåga är mindre än tillförseln av regnvatten (kg/m^2)
H_{eff}	den effektiva vägghöjd över frisen (skulpturen) från vilken vatten rinner av (m).

Exempel 9:

En putsad tegelvägg med motståndstalet $10 \cdot 10^6$ s/m^2 och totalporositeten 25%, varav 4% är vattenfylld när regnet startar och 7% inte kan vattenfyllas, drabbas av ett regn med intensiteten 0,005 kg/(m^2·s) med klimatparameter 40. Slagregnsvinkeln mot väggen är 30°. Regnets varaktighet är enligt Tabell 1, 40 min. På avståndet 8 m nedanför takfoten sticker en horisontell sandstensfris ut 30 cm från väggen.

Putsens maximala förmåga att ta upp regnvatten under hela regnperioden beräknas först. Tiden t_0 för putsen är enligt ekv (10):

$(t_o)_{puts} = \{1000\cdot(0{,}25-0{,}04-0{,}07)/0{,}005\cdot\sin 30°\}^2/(2\cdot 10\cdot 10^6) = 170$ sekunder

Sugdjupet z i putsen blir då enligt ekv (14):

$(z)_{puts} = \{(40\cdot 60-170/2)/10\cdot 10^6\}^{1/2} = 15$ mm

Total insugen vattenmängd Q_{in} blir:

$Q_{in} = (z)_{puts}\cdot P_k\cdot\gamma_w = 0{,}015\cdot(0{,}25-0{,}04-0{,}07)\cdot 1000=2{,}1$ kg/m^2

Avrunnen vattenmängd Q´´är då:

$Q'' = 0{,}005\cdot\sin 30°\cdot 40\cdot 60 - 2{,}1 = 3{,}9$ kg/m^2

Den totala vattenmängden som rinner ner på frisen är alltså enligt ekv (20):

$Q = 3{,}9\cdot 8 = 31{,}2$ kg/löpmeter

Detta är en mycket stor mängd som medför att frisen suger vatten som från en fri vattenyta. Insugningsdjupet blir enligt ekv (19):

$z = (40\cdot 60/33{,}6\cdot 104)^{1/2} = 85$ mm

Stenen hinner således bli vattenmättad på ett mycket stor djup vid varje regn av någorlunda stor intensitet.

8. Kemisk upplösning av stenen

Gotländsk kalksandsten består enligt uppgift av sandstenskorn som hopkittats av kalciumkarbonat. Varje litet sandkorn kan antas vara hoplimmat i kontaktzonen. Totala mängden kalciumkarbonat är obekant för författaren. Kompaktdensiteten hos stenen är ca 2660 kg/m^3; se BILAGA 1. Detta är ett högt värde vilket tyder på att stenen inte består av enbart kvartskorn. Skrymdensiteten är ca 2100 kg/m^3. Fastfasandelen är således ca 78%.

Det är svårt att veta hur mycket kalk som måste lösas upp för att stenen skall falla sönder. Ett ytterst approximativt värde kan man få genom att anta att stenen består av lika sora sfäriska sandkorn med diametern D hoplimmade av kalcit. Totala antalet korn x i 1 m^3 fast fas är då:

$$x = 2100\cdot 3/[2660\cdot 4\cdot\pi\cdot(D/2)^3] \qquad (21)$$

Total mantelyta M (m^2/m^3) hos alla dessa korn är:

$$M = 4\cdot\pi\cdot(D/2)^2\cdot x = 2100\cdot 3/[2660\cdot(D/2)] \qquad (22)$$

Man kan anta att varje sandkorn är hoplimmat med ett kalcitskikt med tjockleken t vilket är lika tjockt över kornets hela area. Total mängd kalcit, Q_c (kg/m^3)blir då om dess densitet antas vara densamma som kompaktdensiteten för sandkornen; 2660 kg/m^3:

$$Q_c = M \cdot t \cdot 2660 = 2100 \cdot 3 \cdot t/(D/2) \qquad (23)$$

Om vi antar att medelkornet är D= 10 µm och kalcitskiktets tjocklek är 0,2 µm så fås:

$$Q_c = 2100 \cdot 3 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-6}/(10 \cdot 10^{-6}/2) = 250 \text{ kg/m}^3$$

Detta är ca 25% av totala fastfasmängden i stenen vilket kan vara rimligt. Antag att hälften av denna kalcitmängd måste lösas upp för att stenen skall falla sönder. Enbart kontaktpunkter limmar ju samman kornen. Då fås en kritisk kalkupplösning av ca 125 kg/m^3. Detta motsvarar en porositetsökning av ca 5% vilket är en kraftig förstörning. Allvarliga skador uppstår troligen långt tidigare.

Kalciumkarbonat är svårlösligt i rent vatten men har ändå en viss löslighet. Löslighetsprodukten $[Ca] \cdot [CO_3]$ är $10^{-8,1}$. Detta innebär att en mättad lösning innehåller $8{,}9 \cdot 10^{-5}$ mol löst kalciumkarbonat per liter. Detta motsvarar 0,009 gram per liter.

För att lösa all kalciumkarbonat i en m^3 sandsten erfordras således ca $2{,}7 \cdot 10^7$ liter vatten. För att lösa så mycket kalcit att all kohesion i stenen skall gå förlorad erfordras troligen mycket mindre vattenmängd.

Varje regn ger en viss vattenupptagning till ett visst djup. Vattnet antas stanna kvar så länge i porsystemet att porvattnet blir mättat på kalciumkarbonat. Mellan varje regn torkar stenen emellertid relativt snabbt eftersom den är så öppen. Den lösta kalken transporteras med vattnet när detta torkar bort varvid kalken fälls ut på materialytan där det tvättas bort vid efterföljande regn. Varje nytt regn antas därför lösa ny kalk från materialet. Under en lång tidsperiod -100 år eller mer- kommer stora mängder vatten att transporteras ut ur och in i stenens ytparti, och stora mängder kalk kommer att kunna lösas.

Antag att medelnederbörden är N mm under ett år och att hela denna vattenmängd träffar stenytan vinkelrätt. Medelintensiteten antas vara q_m mm/s= q_m kg/(m^2·s). Medelvaraktigheten τ_m av medelregnet ges av Tabell 1. Antalet regn n per år blir då:

$$n = N/q_m \cdot \tau_m \qquad (21)$$

Varje medelregn ger ett medelinsugningsdjup z_m som ges av ekv (14). Total in-

sugen vattenmängd Q_X (kg/m^2) in till djupet z_m under X år blir:

$$Q_X = X \cdot n \cdot z_m \cdot P_k \cdot \gamma_w \qquad (22)$$

Maximal mängd utlöst kalciumkarbonat Q_c (kg/m^2) är då:

$$Q_c = 9 \cdot 10^{-6} \cdot Q_X \qquad (23)$$

Exempel 10: Regn med regional parameter 40; se Tabell 1

*Exempel 10a)*En horisontell yta av kalksandsten av typ Uddvide exponeras för genomsnittliga regn av intensiteten q_m= 0,01 kg/m^2·s. Varje regns varaktighet är enligt tabell 1 ca 15 min=900 sekunder. Total nederbörd är 600 mm/år. Antalet regn per år är:

$n = 600/(0{,}01 \cdot 900) = 67$ (Detta är ett litet värde)

Medelinsugningsdjupet för medelregnet är enligt Tabell 2, z_m = 47 mm.

Total insugen vattenmängd är då under X år:

$Q_X = X \cdot 67 \cdot 0{,}047 \cdot (0{,}22-0{,}07) \cdot 1000 = 472 \cdot X$ kg/m^2

Total mängd utlöst kalciumkarbonat är då:

$Q_c = 472 \cdot X \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 4{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot X$ kg/m^2

Total mängd kalciumkarbonat inom djupet 47 mm, vilken erfordras för totalförstörelse, är enligt antagandet i början av detta kapitel:

$(Q_c)_{tot} = 125 \cdot 0{,}047 = 5{,}9$ kg/m^2

Enligt denna beräkning erfordras därför följande antal år för att lösa så mycket kalciumkarbonat i stenens ytskikt att stenen helt faller sönder:

$X = 5{,}9/4{,}25 \cdot 10^{-3} =$ **1390 år**

Exempel 10b) Om regnintensiteten i stället är 0,05 mm/s motsvarande t_m = 1,5 min = 90 sekunder fås följande värden på olika parametrar:

$n = 600/(0{,}05 \cdot 90) = 133$
z_m=16 mm;
$Q_X = X \cdot 133 \cdot 0{,}016 \cdot (0{,}22-0{,}07) \cdot 1000 = 319 \cdot X$ kg/m^2;
$Q_c = 319 \cdot X \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 2{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot X$ kg/m^2
$(Q_c)_{tot} = 125 \cdot 0{,}016 = 2$ kg/m^2.

Detta ger följande erforderliga tid att förstöra stenen intill ett djup av 16 mm:

$X = 2/2{,}9 \cdot 10^{-3}$ = **690 år.**

Om enbart den kalk som befinner sig i vattenfyllda porer skall lösas, vilket förefaller rimligt, blir erforderlig tid lägre. Denna kalkmängd är 68% av den totala dvs 4 resp 1,3 kg/m^3 i de bägge fallen ovan.

Erforderlig tid minskar då till:

940 år vid exempel 10a
450 år vid exempel 10b

Om antalet regn per år ökas ökar också vattenomsättningen i stenen och därmed utlösningen. Detta visas av exemplet nedan.

Exempel 11: Regn med regional parameter 20; se Tabell 1

Exempel 11a) Samma som exempel 10a). Samma regnintensitet dvs 0,010 kg/(m^2·s). Regnets varaktighet blir då enligt tabell 17 minuter (420 sekunder). Beräkningen enligt samma princip som i exempel 10 ger då följande resultat:

$n = 600/(0{,}01 \cdot 420) = 143$
$z_m = 22$ mm (Tabell 2)
$Q_X = X \cdot 143 \cdot 0{,}022 \cdot (0{,}22-0{,}07) \cdot 1000 = 472 \cdot X$ (Samma som i exempel 10a)
$Q_c = 472 \cdot X \cdot 9 \cdot 10\text{-}6 = 4{,}25 \cdot 10\text{-}3 \cdot X$
$(Q_c)_{tot} = 125 \cdot 0{,}022 = 2{,}75$

Erforderligt antal år för att lösa all kalk inom insugningsdjupet är därför:

$X = 2{,}75/4{,}25 \cdot 10\text{-}3$ = **647 år**

Om enbart den kalk som befinner sig i vattenfyllda porer skall lösas blir erforderlig tid lägre. Denna kalkmängd är 68% av den totala dvs 1,9 kg /m^2. Erforderlig tid blir då:

$X = 1{,}9/4{,}25 \cdot 10\text{-}3$ = **447 år**

Exempel 11b) Samma som exempel 10b). Regnintensiteten 0,05 kg/(m^2·s) motsvarar tiden 36 sekunder. Följande parametrar erhålls:

$n = 600/(0{,}05 \cdot 36) = 333$
$z_m = 9$mm (Tabell 2)
$Q_X = X \cdot 333 \cdot 0{,}009 \cdot (0{,}22-0{,}07) \cdot 1000 = 450 \cdot X$ (Nästan samma som i exempel 11a)
$Q_c = 450 \cdot X \cdot 9 \cdot 10\text{-}6 = 4{,}05 \cdot 10\text{-}3 \cdot X$
$(Q_c)_{tot} = 125 \cdot 0{,}009 = 1{,}1$ kg/m2

Erforderligt antal år för att lösa all kalk inom insugningsdjupet 9 mm är därför

$X = 1{,}1/4{,}05 \cdot 10\text{-}3$ = **271 år**

Om enbart den kalk som befinner sig i vattenfyllda porer skall lösas blir erforderlig tid lägre. Denna kalkmängd är 68% av den totala dvs 0,75 kg /m^2. Erforderlig tid blir då:

$X = 0{,}75/4{,}05 \cdot 10\text{-}3$ = **185 år**

Beräkningen visar således att *kemiskt rent vatten* kan vara tillräckligt för att lösa upp en kalksandsten på rätt stort djup från ytan. Ett antal sekler är tillräckligt för att avsevärt skada stenen. Detta inträffar aldrig för tex en betong eftersom denna nästan alltid är vattenmättad under naturliga förhållanden, se Fig 3. Porvattnet är därför mättat på löst kalk. Detta i kombination med den låga kapillariteten gör att enbart någon mm av ytan fräts bort. I en rikt skulpterad sandsten kan däremot stora delar av ytan lösas upp och skulpturen förstöras.

Om regnvattnet är svagt surt ökar naturligtvis den kalklösande förmågan avsevärt.

Av BILAGA 1 framgår att en stentyp, "Valar", har betydligt högre motståndstal än den typ, "Uddvide", viken behandlas i exemplen i denna rapport. Stentypen "Valar" torde därför vara mycket mera motståndskraftig mot upplösning i rent regnvatten eller svagt surt regnvatten än de båda övriga stentyperna som beskrivs i BILAGA 1.

Referenser

/1/ G Fagerlund: Fuktmekaniska egenskaper. Kapitel 8:6 i Betonghandbok del "Material. Svensk Byggtjänst, Stockholm 1980.

/2/ G Fagerlund och L Wessman: Frostnedbrytning av natursten. Avd byggnadsmaterial, LTH Rapport TVBM-3047, Lund 1992.

/3/ P Sommerhein: Takavvattning med fullflödessystem. Bygg&Teknik 2/92, 1992.

/4/ G Fagerlund och G Hedenblad: Calculation of the moisture-time fields in concrete. Avd byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-3053, Lund 1993.

/5/ L Wessman: Frostnedbrytning av natursten; försöksmetodik. Avd byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-7036, Lund 1992.

/6/ L Wassman: Saltfrostnedbrytning av gotländsk sandsten; preliminära försök. Avd byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-7038, Lund 1992.

/7/ L Wessman: Frostnedbrytning av natursten. Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet, mars 1993. Avd byggnadsmaterial, LTH. Rapport TVBM-7046, Lund 1993.

/8/ L Wassman: Frostnedbrytning av natursten. Lägesrapport till Riksantikvarieämbetet. Preliminär version i manusform. Avd Byggnadsmaterial, LTH, Lund Januari 1994

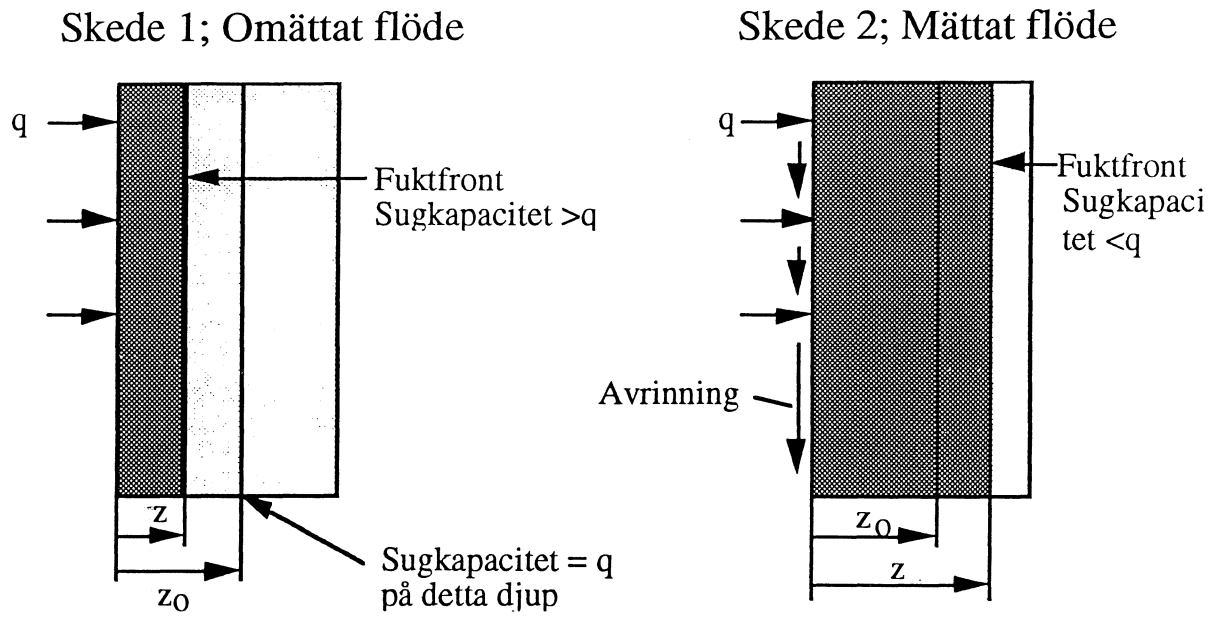

Fig 1: Figur som åskådliggör begreppen omättat respektive mättat kapillärflöde
Figure illustrating the concepts unsaturated and saturated capillary flow

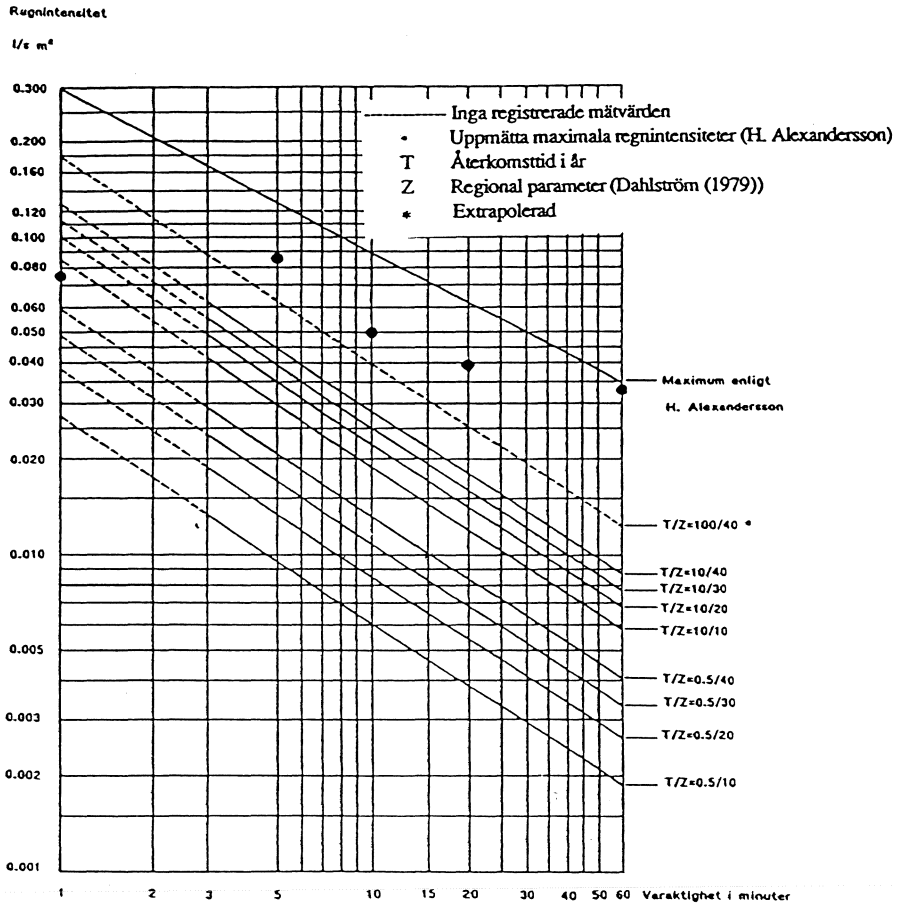

Fig 2: Regnintensiteter vid olika återkomsttider; /3/.
Rain intensity at different "return times" of the rain in years

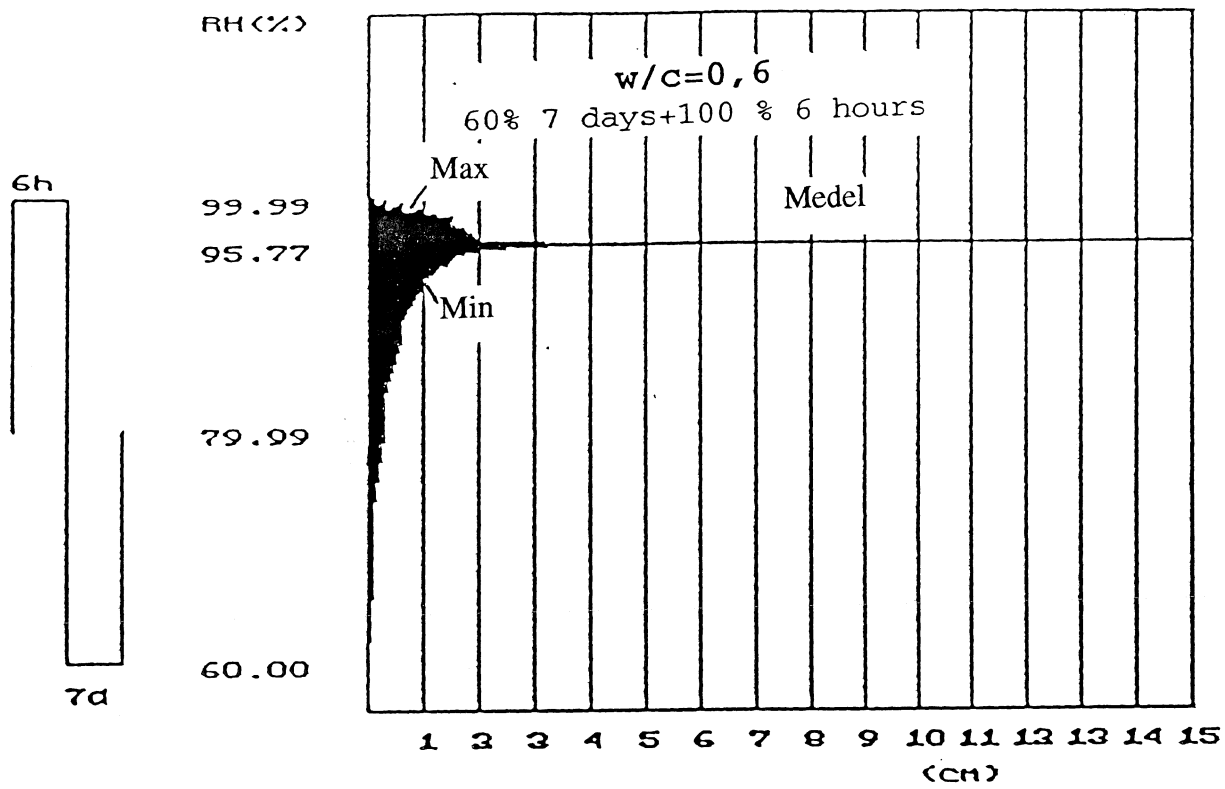

Fig 3: Beräknade max- och minprofiler hos relativa fuktigheten av en betongyta vid cykliskt varierande yttre fuktförhållanden. Betong med vattencementtal 0,6. Yttre klimat varierar mellan regn under 6 timmar och torkning i 60% rf under 7 dygn; /4/.

Calculated maximum and minimum RH-profiles in a concrete surface at cyclically varying ouer moisture conditions. Water/cement ratio 0,6. The outer climate varies between rain during 6 hours and drying at 60% RH during 7 days.

BILAGA 1:

Porositets- och kapillaritetsegenskaper hos några gotländska kalksandstenar

Data har tagits ur rapport /2/.

Tabell 1: Porositets- ocd densitetsegenskaper
Pore properties and densities of the calcite-bound sandstones

Stentyp	Totalporositet (%)		Skrymdensitet (kg/m^3)		Kompaktdensitet (kg/m^3)
	m	s	m	s	m
Uddvide	22,1	0,2	2073	11	2661
Botvide	21,6	0,2	2079	6	2652
Valar	17,5	0,5	2199	15	2666

m=medelvärde; s=standardavvikelse

Tabell 2: Kapillaritetsegenskaper
Capillary properties of the calcite-bound sandstones

Stentyp	m (s/m^2)	Pluft (m^3/m^3)
Uddvide	33,6·104	0,071
Botvide	50,0	0,071
Valar	876	0,055