



# LUND UNIVERSITY

## Fukttransportberäkningar utförda på gotländsk sandsten : risk för nedbrytning

Janz, Mårten

1998

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Janz, M. (1998). *Fukttransportberäkningar utförda på gotländsk sandsten : risk för nedbrytning*. (Rapport TVBM; Vol. 3082). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

*Total number of authors:*

1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

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

### Take down policy

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

LUND UNIVERSITY

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

LUNDS UNIVERSITET  
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

---

Byggnadsmaterial



FUKTTRANSPORTBERÄKNINGAR UTFÖRDA PÅ  
GOTLÄNDSK SANDSTEN  
– risk för nedbrytning

MÅRTEN JANZ

# Innehållsförteckning

<b>1 Inledning</b>	<b>2</b>
<b>2 Teori</b>	<b>3</b>
2.1 Allmänt .....	3
2.2 Total fukttransport vid isoterma förhållanden .....	4
2.3 Vattenabsorption över kapillärmättnad .....	5
<b>3 Beräkningsexempel</b>	<b>8</b>
3.1 Allmänt .....	8
3.2 Beräkning av vattenabsorption upp till kapillärmättnad .....	8
3.2.1 Numerisk metod .....	8
3.2.2 Materialdata .....	9
3.2.3 Exempel 1 – Fri insugning i 1 dygn .....	11
3.2.4 Exempel 2 – Cykliskt upprepat regn .....	11
3.2.5 Exempel 3 – En timmas regn med efterföljande uttorkning .....	13
3.3 Beräkning av vattenabsorption över kapillärmättnad .....	14
<b>4 Slutsatser</b>	<b>14</b>
<b>Referenser</b>	<b>15</b>

# 1 Inledning

Gotländsk sandsten är relativt lättbearbetbar och har därför ofta använts till fasadbeklädnad och i skulpturella utsmyckningar på kyrkor, palats och andra prestigebyggnader från 1600- och 1700 talet. På många av dessa byggnader har det på senare år påvisats en gradvis nedbrytning.

Fuktransporten och fuktillståndet är av största vikt för ett flertal nedbrytningsmekanismer som kan vara aktuella för gotländsk sandsten. Exempel på skador där fukten är den direkta orsaken, eller en förutsättning för att skadan skall kunna ske, är urlakning av stenen [1] och frostangrepp. I [2] visas det att det finns en påtaglig risk för frostangrepp vid höga fuktnivåer. Fukten kan även verka som ett transportmedium för föroreningar som bryter ned stenen. T.ex. kan skadliga föroreningar transporteras i det konvektiva flödet av vatten som uppstår då stenen exponeras för fritt vatten, t.ex. regn.

I denna skrift visas ett antal beräkningsexempel på hur fukttinnehållet i en gotländsk sandsten (Uddvide) kan variera med varierande randvillkor (regn och 80 % relativ fuktighet). Teorin och numerisk metod för beräkningarna beskrivs i detalj. Materialdata för beräkningarna är hämtade från [3].

Dessutom redogörs för vilka fuktnivåer som kan förväntas om stenen exponeras för vatten under lång tid. Teorin bakom dessa beräkningar, som är hämtad från [4], beskrivs kortfattat.

## 2 Teori

### 2.1 Allmänt

Fukttransport i porösa material kan delas upp *diffusion*, *mättat visköst flöde* och *kapillärt (vätske) flöde*.

*Diffusion* drivs av en skillnad i *vattenångans partialtryck*, d.v.s. vattenången rör sig från högt till lågt partialtryck. Ett vanligt sätt att beskriva denna diffusionsprocess är med *Fick's lag*:

$$g_v = -\delta_p \nabla p_v \quad (2.1)$$

där

- $g_v$  är flödet av vatten i ångfas [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];
- $\delta_p$  är ångpermeabiliteten [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ];
- $p_v$  är vattenångans partialtryck [Pa].

Ångpermeabiliteten är inte konstant, utan är en funktion av vattenångans partialtryck, d.v.s.  $\delta_p = f(p_v)$ .

*Mättat visköst flöde* drivs av en tryckskillnad i vattnet. Storleken på flödet beror dels på materialets porgeometri, dels på vätskans egenskaper. Vanligen beskrivs flödet av *Darcy's lag*:

$$g_w = -\frac{k_p}{\eta} \nabla P_w \quad (2.2)$$

där

- $g_w$  är det mättade vattenflödet [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ];
- $k_p$  är permeabiliteten [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ];
- $\eta$  är viskositeten [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ];
- $P_w$  är vattentrycket [Pa].

Mättat visköst flöde kan bara uppstå i konstruktioner som ständigt står i kontakt med vatten. I denna skrift kommer därför inte mättat visköst flöde att behandlas vidare.

Till skillnad från diffusion och mättat visköst flöde, finns det inte något vedertaget uttryck för det *kapillära flödet*. Ett sätt att beskriva kapillärtransporten är att, i likhet med Darcy's lag, använda trycket som drivande potential. Det drivande trycket är här det tryck som uppstår på grund av menisker i porsystemet. Det kapillära fuktflödet  $g_\ell$  [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] blir då:

$$g_\ell = \lambda_m \nabla s \quad (2.3)$$

där

- $\lambda_m$  är fuktkonduktiviteten [ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ ];
- $s$  är porvattenundertrycket (kapillärt undertryck) [Pa].

Utöver de ovan nämnda fuktflödena finns det ytterligare ett flöde som sker då *kapillärmättning* uppnåtts, d.v.s. då den egentliga vattenabsorptionen upphört. Detta flöde beror på att luft som är inneslutet i materialet sakta löser sig i vattnet, så att ytterligare vatten kan tränga in i materialet. Denna process kommer att behandlas vidare nedan.

## 2.2 Total fukttransport vid isoterma förhållanden

När fuktfördelningen ska beräknas är det fördelaktigt att endast ha en ekvation med en drivande potential som beskriver hela flödesförloppet, d.v.s. både vätske- och ångtransporten. Dessutom är det svårt att särskilja de olika flödena då transportkoefficienterna (ångpermeabiliteten  $\delta_p$  och fuktkonduktiviteten  $\lambda_m$ ) ska bestämmas experimentellt. Vid isoterma förhållanden är det möjligt att beskriva det totala fuktflödet med en ekvation med en drivande potential:

Om antagandena bakom Ekvation 2.1 och 2.3 är riktiga (d.v.s. om fuktflödet är linjärt proportionellt mot gradienten av det partiella ångtrycket och porvattenundertrycket) kan det totala fuktflödet tecknas som summan av de enskilda flödena (här i en dimension):

$$g = -\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} + \lambda_m \frac{\partial s}{\partial x} \quad (2.4)$$

Vid lokal jämvikt finns det ett samband mellan  $p_v$  och  $s$  samt mellan alla följande tillståndsvariabler: ånghalt  $v$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], relativ fuktighet  $\phi$ , fuktkvot  $u$  [ $\text{kg}/\text{kg}$ ] och fukthalt  $w$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Sambandet mellan  $u$  och  $w$  tecknas:

$$w = u \rho \quad (2.5)$$

där  $\rho$  är skrymdensiteten [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]. Tillståndsvariablerna  $\phi$ ,  $v$  och  $p_v$  kan relateras till varandra med följande samband:

$$\phi = \frac{v}{v_s} = \frac{p_v}{p_s} \quad (2.6)$$

där  $v_s$  och  $p_s$  är mätnadsånghalten respektive mätnadsångtrycket som båda är beroende på temperaturen.

Ett samband mellan  $v$  och  $p_v$  ges av allmänna gaslagen:

$$p_v = \frac{RT}{M_w} \cdot v \quad (2.7)$$

där

$R$  är allmänna gaskonstanten ( $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ );

$T$  är den absoluta temperaturen [ $\text{K}$ ];

$M_w$  är vattnets molvikt ( $0.018 \text{ kg}/\text{mol}$ ).

Kelvinekvationen ger ett samband mellan porvattenundertrycket  $s$  och relativa fuktigheten  $\phi$ :

$$s = -\frac{RT\rho_w}{M_w} \cdot \ln \phi \quad (2.8)$$

där  $\rho_w$  är vattnets densitet. Fuktkvoten  $u$  och fukthalten  $w$  kan relateras till relativ fuktighet  $\phi$  via jämviktsfuktkurvor och till porvattenundertrycket  $s$  via kapillära jämviktsfuktkurvor.

Enligt [5] kan fuktillståndet i ett poröst material beskrivas av tre oberoende tillståndsvariabler; totalt lufttryck, temperaturen sams någon av  $p_v$ ,  $v$ ,  $s$ ,  $\phi$ ,  $u$  eller  $w$ . Om det totalt lufttrycket antas vara konstant behövs två oberoende tillståndsvariabler för att beskriva fuktillståndet. Råder det dessutom isoterma förhållanden räcker det men en tillståndsvariabler, nämligen någon av  $p_v$ ,  $v$ ,  $s$ ,  $\phi$ ,  $u$  eller  $w$ . Med hjälp av Ekvation 2.6 och

Ekvation 2.8 kan alltså Ekvation 2.4 skrivas om till en ekvation med en drivande potential och en transportkoefficient vid isoterma förhållanden.

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial p_v} \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} = -\frac{RT\rho_w}{M_w} \cdot \frac{1}{p_v} \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.9)$$

d.v.s.

$$g = -\delta_p \frac{\partial p_v}{\partial x} + \lambda_m \left( -\frac{RT\rho_w}{M_w} \cdot \frac{1}{p_v} \right) \frac{\partial p_v}{\partial x} = -D_{new} \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (2.10)$$

där den nya transportkoefficienten  $D_{new}$  är:

$$D_{new} = \delta_p + \lambda_m \frac{RT\rho_w}{M_w} \cdot \frac{1}{p_v} \quad (2.11)$$

Fuktflödet  $g$  kan alltså beskrivas med vilken som helst av tillståndsvariablerna  $p_v$ ,  $v$ ,  $s$ ,  $\phi$ ,  $u$  eller  $w$  som drivande potential. I det allmänna beskrivs flödet som:

$$g = -D_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (2.12)$$

och i tre dimensioner som:

$$g = -D_\varphi \nabla \varphi \quad (2.13)$$

där  $\varphi$  kan vara vilken som helst av tillståndsvariablerna  $p_v$ ,  $v$ ,  $s$ ,  $\phi$ ,  $u$  eller  $w$  och  $D_\varphi$  är en transportkoefficient som beror på fukttinnehållet. För att erhålla ett uttryck som beskriver fukttinnehållets variation med tiden sätts Ekvation 2.13 in i en massbalans:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi) \quad (2.14)$$

Det är detta samband (i en dimension) som ligger till grund för de beräkningsexempel på fuktfördelning efter olika tid och med olika randvillkor som visas nedan.

### 2.3 Vattenabsorption över kapillärmättnad

I ett material som utsatts för kapillärsugning finns det alltid en viss mängd innesluten luft. Materialet är alltså inte fullständigt vattenmättat när kapillärsugningen upphör. Den vattenmättnadsgrad som uppnås vid kapillärsugning kallas *kapillärmättnadsgrad*. De inneslutna luftbubblorna kommer dock gradvis lösas i vattnet, vilket leder till en långsam vattenabsorption över kapillärmättnad. Hastigheten med vilken denna absorption fortskrider är proportionell mot luftens löslighet i vatten, som i sin tur är proportionell mot det övertryck som råder i luftbubblan. För en sfärisk luftbubbla kan detta övertryck  $\Delta P$  [Pa] tecknas som:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{r} \quad (2.15)$$

där

- $\sigma$  är vattnets ytspänning [N/m];
- $r$  är luftbubblans radie [m].

Som framgår av Ekvation 2.15 bildas det ett större övertryck i små luftbubblor än i stora. Detta medför att små luftbubblor löser sig snabbare i vattnet än stora.

Denna process är mycket viktig då många beständighetsproblem uppstår vid fuktnivåer över kapillärmättnad. Ett exempel på hur vattenabsorption sker visas i Figur 2.1. Trots att denna absorption är viktig för att många beständighetsproblem finns det mycket liten kunskap om hur denna långsamma vattenabsorption ska modelleras. Ett möjligt sätt är att lägga till en källterm i Ekvation 2.14 [3]:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\varphi \nabla \varphi) + f(w) \quad (2.16)$$

där källtermen  $f(w)$  är en funktion av fukttinnehållet  $w$  (d.v.s. även innesluten luftmängd). Med Ekvation 2.16 är det alltså möjligt att beskriva fukttransporten under kapillärmättnad (ångdiffusion och kapillärtransport) och fukttransporten över kapillärmättnad med en enda ekvation.

I [4] ges ett annat förslag till hur vattenabsorptionen över kapillärmättnad kan modelleras. Den långsamma vattenabsorptionen över kapillärmättnad förmodas, för rimligt stora volymer, ske samtidigt i hela materialets volym. Vattenmättnadsgraden över kapillärmättnad  $S_a$  [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ] definieras som andel vattenfylld porvolym över kapillärmättnad:

$$S_a = \frac{V_w - V_{w, \text{cap}}}{V_p - V_{w, \text{cap}}} \quad (2.17)$$

där

$V_w$  är volym vatten i provet [ $\text{m}^3$ ];

$V_{w, \text{cap}}$  är volym vatten i provet vid kapillärmättnad [ $\text{m}^3$ ];

$V_p$  är total porvolym [ $\text{m}^3$ ].

Vattenmättnadsgraden över kapillärmättnad  $S_a$  kan då skrivas som [4]:

$$S_a = a t^b \quad (2.18)$$

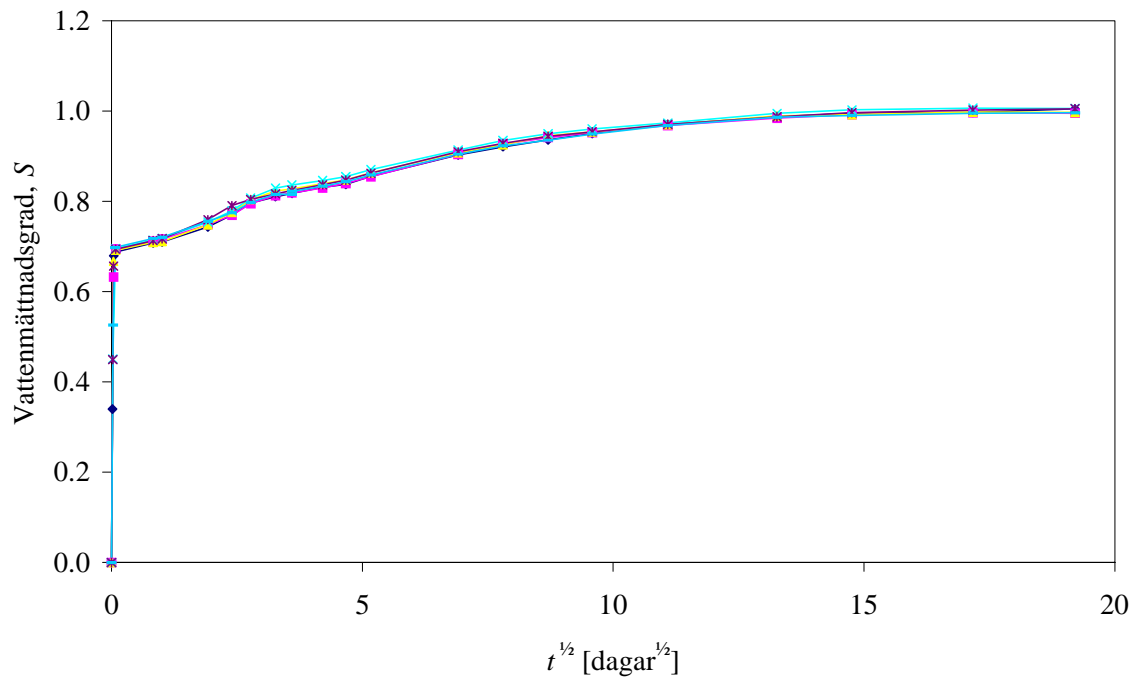
där  $a$  och  $b$  är konstanter och  $t$  [s] är tiden från det att kapillärmättnad uppnåtts.

I Tabell 2.1 visas de konstanter  $a$  och  $b$  som erhålls för Uddvide sandsten, se Figur 2.1. För betong blir  $a$  ca  $6.7 \cdot 10^{-3}$  och  $b$  ca 0.26 [4].

Tabell 2.1 Konstanterna  $a$  och  $b$  beräknade ur Figur 2.1 (Uddvide sandsten).

Prov nr	$a$	$b$
1	$6.953 \cdot 10^{-4}$	0.4430
2	$6.074 \cdot 10^{-4}$	0.4509
3	$6.391 \cdot 10^{-4}$	0.4495
4	$8.121 \cdot 10^{-4}$	0.4359
5	$9.024 \cdot 10^{-4}$	0.4278
6	$6.434 \cdot 10^{-4}$	0.4502
Medel	$7.166 \cdot 10^{-4}$	0.4429
Standardavvikelse	$1.161 \cdot 10^{-4}$	0.0094





Figur 2.1 Vattenabsorption i sex olika provkroppar av Uddvide sandsten. Provkropparnas tjocklek var ca 25 mm och med en sida exponerad för vatten. Relativa fuktigheten runt provkropparna var ca 100%. Kapillärmättnadsgraden är ca 0.79 och uppnås efter ca 6 minuter. Hela porsystemet är fyllt efter ca 230 dagar [3].

## 3 Beräkningsexempel

### 3.1 Allmänt

Beräkningen är utförd endimensionellt på en tjock konstruktion utan temperaturgradienter som periodvis utsätts för regn. Konstruktionen skulle t.ex. kunna representera en homogen sandstensvägg i en oppvärmad kyrka eller en skulptur. Materialet i konstruktionen är en kalcitbunden gotländsk sandsten (Uddvide). Beräkningen sker i två steg; upp till kapillärmättnad beräknas fuktprofiler (i princip med Ekvation 2.12 och 2.14) och över kapillärmättnad beräknas den fortsatta fuktabsorptionen med Ekvation 2.18.

### 3.2 Beräkning av vattenabsorption upp till kapillärmättnad

#### 3.2.1 Numerisk metod

Den numeriska beräkningen sker i princip med Ekvation 2.12 samt en massbalans, d.v.s. Ekvation 2.14. Men för att erhålla en ekvation som det är enkelt att arbeta med, skrivs Ekvation 2.12 med en potential  $\psi$  [kg/(m·s)], så att transportkoefficienten alltid blir lika med 1. Potentialen  $\psi$  kallas för *Kirchhoff's flödespotential* och definieras som [6]:

$$\psi = \psi_{ref} + \int_{w_{ref}}^w D_\phi d\phi \quad (3.1)$$

d.v.s.

$$\frac{d\psi}{d\phi} = D_\phi \quad (3.2)$$

Kombineras Ekvation 3.2 med Ekvation 2.12 erhålls:

$$g = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (3.3)$$

$\psi_{ref}$  är ett referensvärde vid fukthalten  $w = w_{ref}$ , som kan väljas godtyckligt.

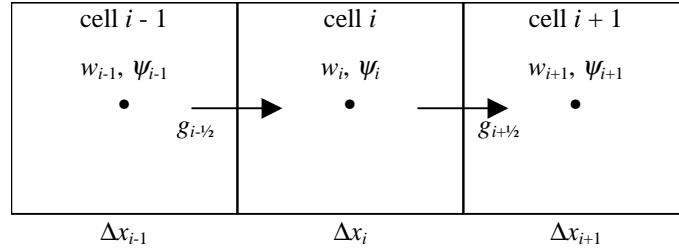
Den numeriska metod som använts är *explicit framåtdifferensmetoden*. Från Ekvation 3.3 och med beteckningar enligt Figur 3.1, kan flödet mellan två celler approximeras som:

$$g_{i-1/2} = \frac{\psi_{i-1} - \psi_i}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \quad (3.4)$$

Massbalans ger att fukthalten i cell  $i$  ökar med  $\Delta w_i$ , som är differensen mellan flödena in och ut ur cell  $i$ . D.v.s. den nya fukthalten ett tidssteg fram blir

$$w_{i,n+1} = \left( \frac{\psi_{i-1,n} - \psi_{i,n}}{\frac{\Delta x_{i-1}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} + \frac{\psi_{i+1,n} - \psi_{i,n}}{\frac{\Delta x_{i+1}}{2} + \frac{\Delta x_i}{2}} \right) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} + w_{i,n} \quad (3.5)$$

där  $n$  betecknar det tidssteg beräkningen befinner sig i.



Figur 3.1 Cellerna  $i-1$ ,  $i$  och  $i+1$  med beteckningar.

I de beräkningar som utförts här har en cellindelning med lika stora celler använts, d.v.s.  $\Delta x_{i-1} = \Delta x_i = \Delta x_{i+1} = \Delta x$ . Detta ger att  $w_{i,n+1}$  kan skrivas som:

$$w_{i,n+1} = (\psi_{i-1,n} + \psi_{i+1,n} - 2\psi_{i,n}) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + w_{i,n} \quad (3.6)$$

förutom för cell 1 vid randen ( $\Delta x_{i-1} = 0$ ) där den nya fukthalten blir:

$$w_{1,n+1} = (2\psi_{rand,n} + \psi_{2,n} - 3\psi_{1,n}) \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} + w_{1,n} \quad (3.7)$$

Flödespotentialen  $\psi_{rand,n}$  är randvillkoret som bestäms av det omgivande klimatet.

Tidsstegets storlek  $\Delta t$  bestäms av ett stabilitetsvillkor. Med lika stora celler ger detta villkor [7]:

$$\Delta t = \left( \frac{dw}{d\psi} \right)_{\min} \frac{\Delta x^2}{3} = \frac{1}{D_{w,\max}} \frac{\Delta x^2}{3} \quad (3.8)$$

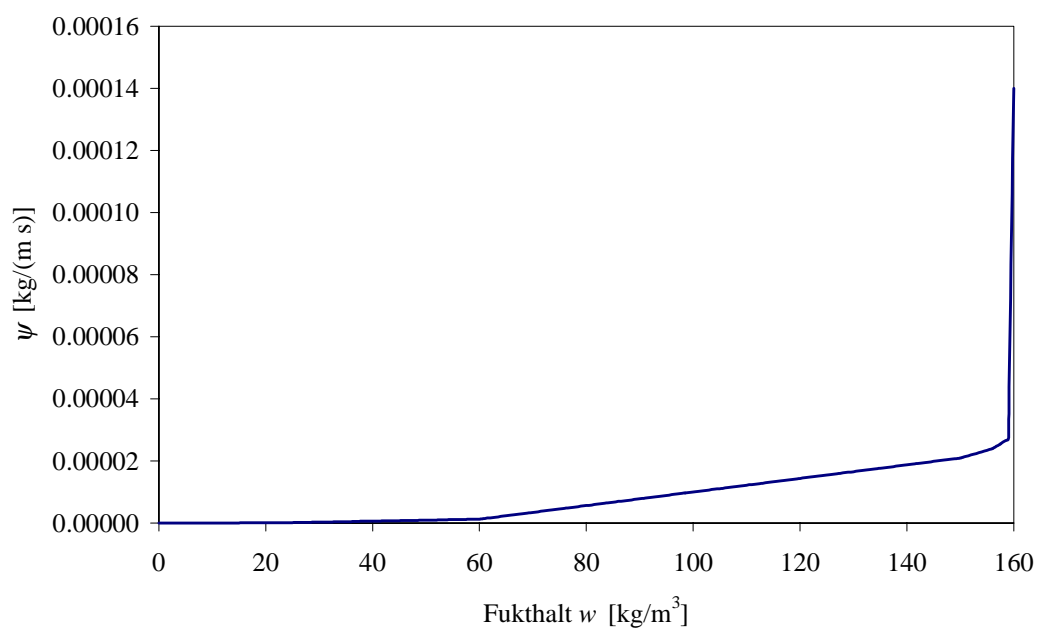
Med ovan nämnda numeriska metod har beräkningar utförts i Matlab.

### 3.2.2 Materialdata

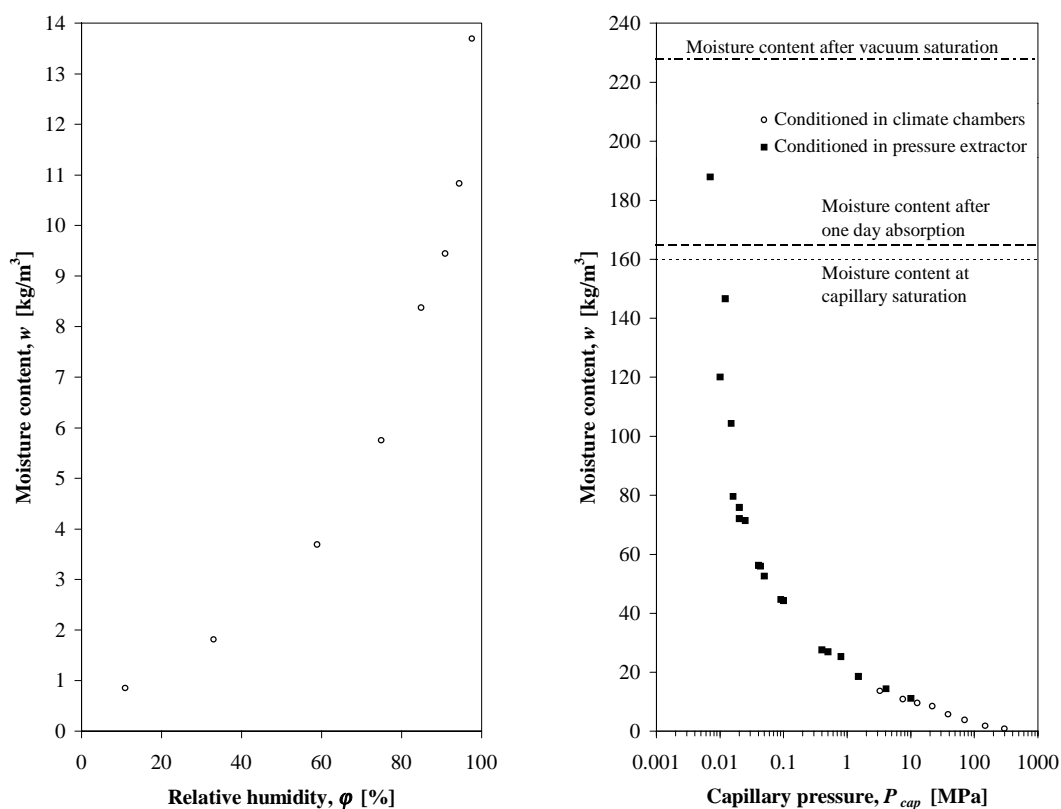
Materialet som beräkningarna är utförda på är en sedimentär kalcitbunden Gotländsk sandsten med namnet 'Uddvide'. Stenens porositet är ca 23 % och dess densitet är ca 2059 kg/m<sup>3</sup> [3]. Tunnslipsmikroskopering visar att stenen till övervägande del består av kvartskorn som är sammanfogade med kalcit med mellanliggande porer. Kornens storlek är ca 0.1-0.2 mm [8].

Den materialdata som behövs till beräkningen av fuktprofiler är sambandet mellan Kirchhoffs flödespotential och fukthalt,  $\psi(w)$ , samt jämviktisotermer. I [3] finns sådana samband redovisade för Uddvide sandsten. Den indata som används i denna rapport visas i Figur 3.2 och Figur 3.3.

Sambandet  $\psi(w)$  är utvärderat från ett samband mellan kapillaritetskoefficienten  $A$  [kg/(m<sup>2</sup>·s<sup>1/2</sup>)] och initial fuktighet  $w_{in}$ . Kapillaritetskoefficienten uppmäts via absorptionsförsök, där uppsugen vattenmängd registreras mot förlupen tid. Absorptionsförsöken utförs på provkroppar med olika initial fuktighet. Från varje absorptionsförsök framkommer en kapillaritetskoefficient. Utvärderingen av Kirchhoffs flödespotential sker sedan från sambandet  $A(w_{in})$  med en metod som baseras på Boltzmann-transformation. Både det experimentella arbetet med att mäta upp sambandet  $A(w_{in})$  samt utvärderingen av sambandet  $\psi(w)$  finns i detalj beskrivet i [3].



Figur 3.2 Sambandet  $\psi(w)$  [3].



Figur 3.3 Hygroskopisk och kapillär jämviktsfuktkurva för Uddvide sandsten [3]. I den kapillär jämviktsfuktkurvan (höger) är även de hygroskopiska värdena inlagda.

### 3.2.3 Exempel 1 – Fri insugning i 1 dygn

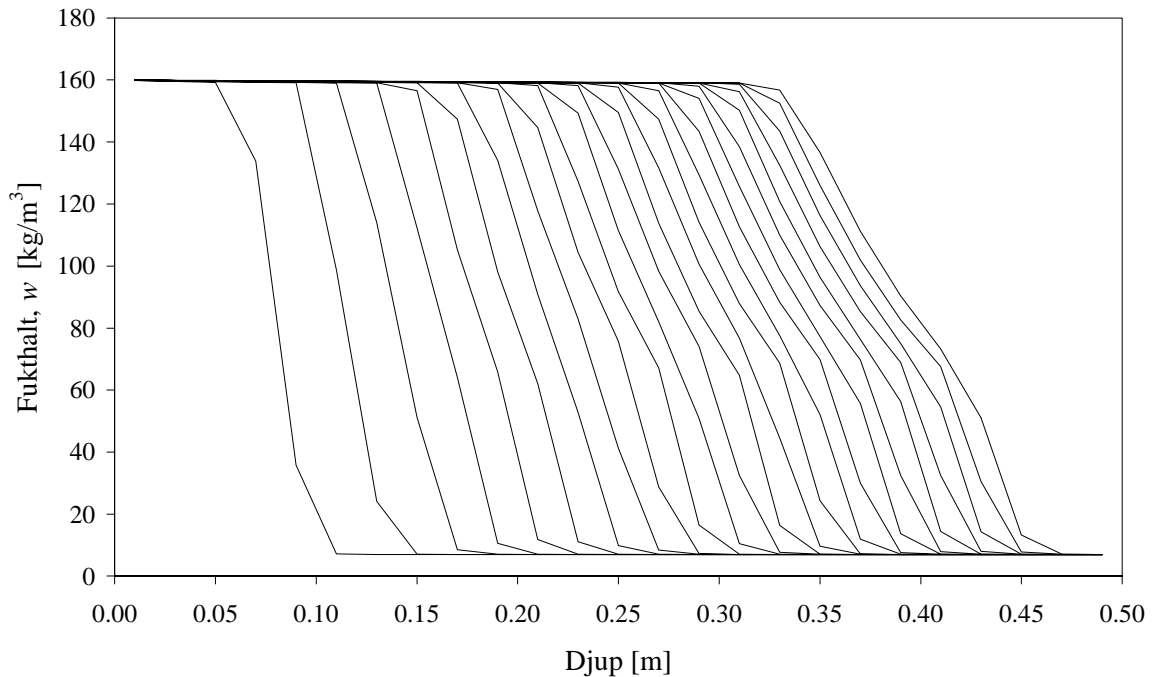
*Material:* Uddvide sandsten.

*Storlek och antal beräkningselement:* 0.5 m med 25 celler.

*Begynnelsevillkor:* I jämvikt med 80 % RF ( $w_{in} = 7 \text{ kg/m}^3$ ).

*Randvillkor:* 1 dygns regn ( $w_{rand} = 160 \text{ kg/m}^3$ ).

Figur 3.4 visar fuktprofiler uppritade med 1 timmes intervall från regnets start. Som framgår av figuren har stenen uppnått kapillärmättnad fram till ett djup av ca 0.35 m efter 1 dygn.



Figur 3.4 Fuktprofiler uppritade med 1 timmes intervall från regnets start.

### 3.2.4 Exempel 2 – Cykliskt upprepat regn

*Material:* Uddvide sandsten.

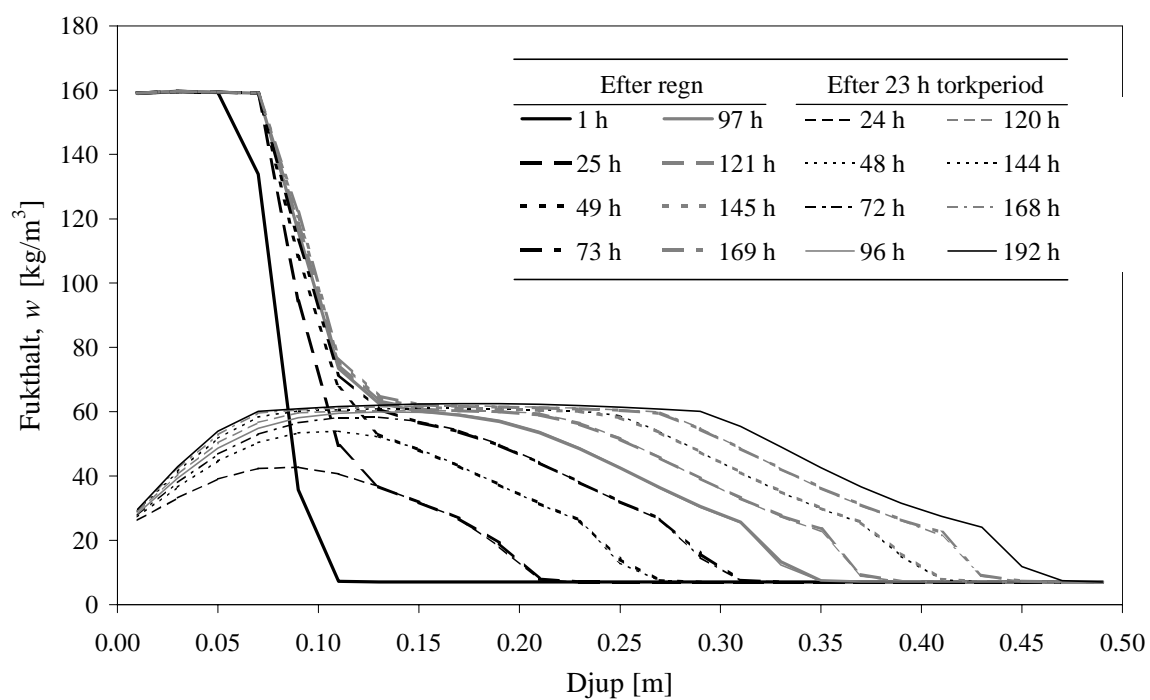
*Storlek och antal beräkningselement:* 0.5 m med 25 celler.

*Begynnelsevillkor:* I jämvikt med 80 % RF ( $w_{in} = 7 \text{ kg/m}^3$ ).

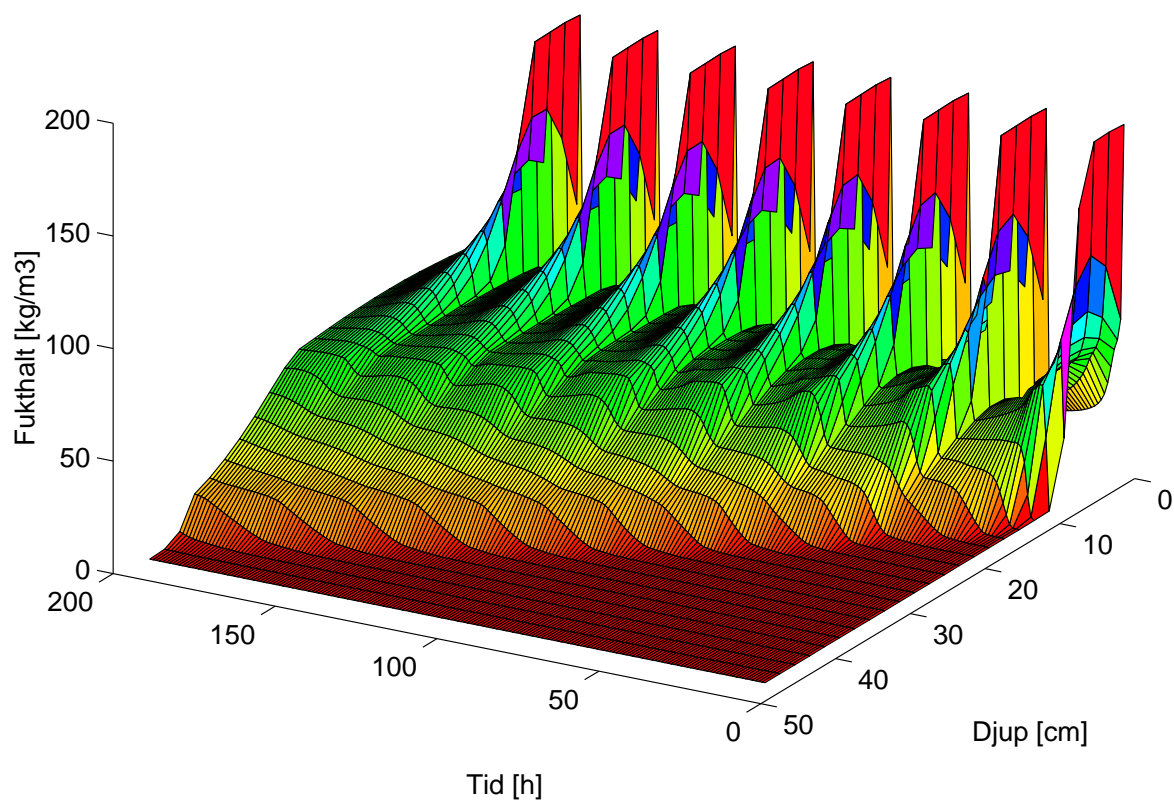
*Randvillkor:* 1 h regn ( $w_{rand} = 160 \text{ kg/m}^3$ ) följt av 23 h med 80 % RF ( $w_{rand} = 7 \text{ kg/m}^3$ ).

Denna cykel upprepas 8 gånger.

Figur 3.5 visar fuktprofiler direkt efter 1 timmas regn samt direkt efter torkperioden (23 timmar med 80 % RF). Total kapillärmättnad uppnås efter regn maximalt till ett djup av ca 7 cm. Ett ökat fukttinnehåll från startfuktnivån uppvisas allt längre in i konstruktionen. Efter 8 dygn (192 h) är fukttinnehållet förhöjt in till ett djup av ca 45 cm. Figur 3.6 visar tydligt hur fukten vandrar in i stenen vid uppregade regn.



Figur 3.5 Fuktprofiler uppritade vid olika tidpunkter.



Figur 3.6 Fuktrinrängningen vid cykliskt upprepat regn.

### 3.2.5 Exempel 3 – En timmas regn med efterföljande uttorkning

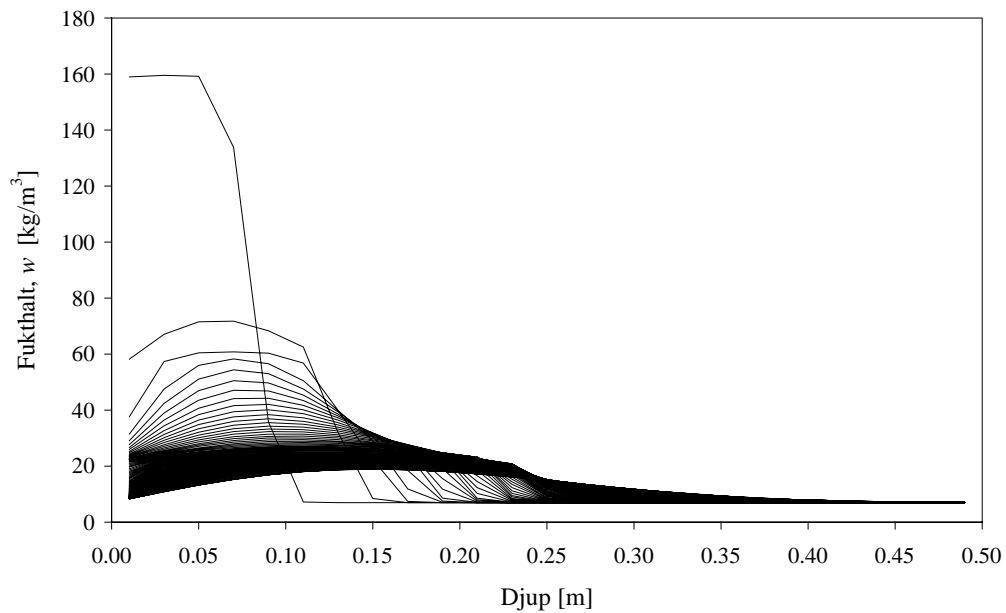
*Material:* Uddvide sandsten.

*Storlek och antal beräkningselement:* 0.5 m med 25 celler.

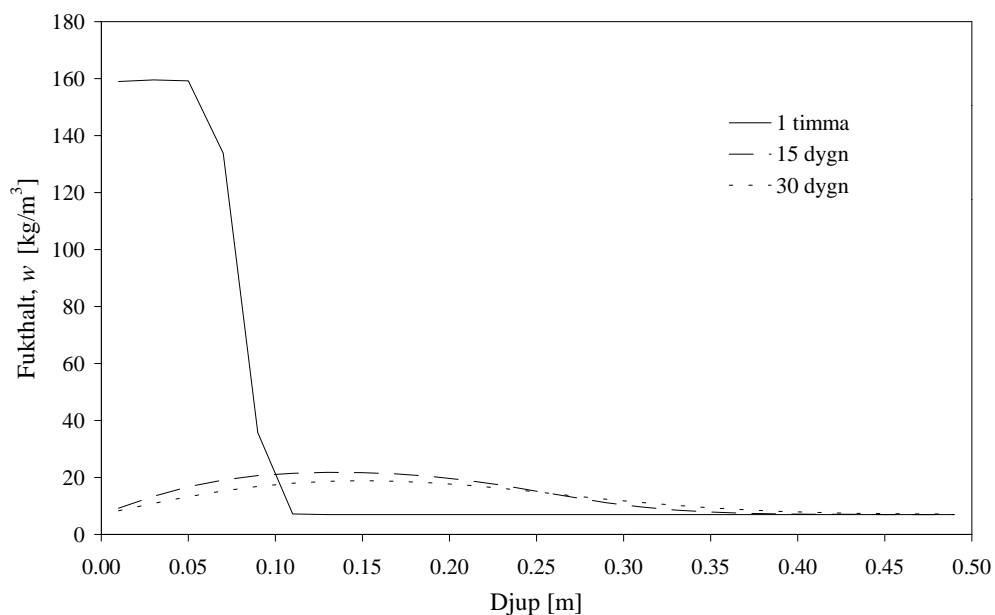
*Begynnelsevillkor:* I jämvikt med 80 % RF ( $w_{in} = 7 \text{ kg/m}^3$ ).

*Randvillkor:* 1 h regn ( $w_{rand} = 160 \text{ kg/m}^3$ ) följt av 720 h med 80 % RF ( $w_{rand} = 7 \text{ kg/m}^3$ ). Total beräkningstid blir 1 månad.

Som Figur 3.7 visar minskar fukttinnehållet mycket snabbt direkt efter avslutat regn. Däremot tar det betydligt längre tid att torka stenen mot slutet. Figur 3.8 visar att det är mycket liten skillnad mellan fuktprofilen efter 15 dygn och 30 dygn medan skillnaden mellan profilerna efter 1 timma respektive 15 dygn är mycket stor.



Figur 3.7 Fuktprofiler uppritade med 3 timmars intervall. Första profilen är ritad efter 1 timmas fri sugning. Den sista profilen är ritad efter 720 timmar (30 dygn).



Figur 3.8 Fuktprofiler uppritade efter 1 timma, 15 dygn och 30 dygn.

### 3.3 Beräkning av vattenabsorption över kapillärmättnad

Enligt [2] är den kritisk vattenmättnadsgraden  $S_{krit}$  för Uddvide sandsten 0.89 – 0.96. Vattenmättnadsgrad  $S$  [ $m^3/m^3$ ] definieras här som

$$S = \frac{V_w}{V_p} \quad (3.9)$$

där

$V_w$  är volym vatten i provet [ $m^3$ ];  
 $V_p$  är porvolymen [ $m^3$ ].

Den kritiska vattenmättnadsgrad över kapillärmättnad  $S_{a,krit}$  blir således (se Ekvation 2.17)

$$S_{a,krit} = \frac{S_{krit} - S_{cap}}{1 - S_{cap}} \quad (3.10)$$

$S_{cap}$  är enligt [3] 0.70.  $S_{a,krit}$  blir då 0.63 – 0.87.

Tiden det tar att uppnå den kritiska vattenmättnadsgraden  $S_{a,krit}$  kan beräknas som

$$t = b \sqrt{\frac{S_{a,krit}}{a}} \quad (3.11)$$

Med konstanterna  $a = 7.166 \cdot 10^{-4}$  och  $b = 0.4429$  enligt Tabell 2.1, blir tiden  $t$  till dess att risk för frostnedbrytning föreligger mellan 51 dygn och 106 dygn. Observera att detta är tiden från det att materialet är kapillärmättat.

## 4 Slutsatser

Under förutsättning av att konstanterna  $a$  och  $b$  i Ekvation 3.11 är generella, måste en sandsten av typen Uddvide exponeras för vatten i minst 50 dygn före frystillfället för att stenen ska kunna frysa sönder. D.v.s., stenen måste ingå i en konstruktion/utsmyckning som har tillförsel av vatten under en lång tid. Ett exempel på en sådan konstruktion är en fasad som kan suga vatten från marken. Om fasaden inte suger vatten kapillärt under lång tid, utan endast utsätts för slagregn, kommer den inte att frysa sönder.

Kunskapen om hur vattenabsorptionen över kapillärmättnad sker är idag dock mycket bristfällig. Det kan tänkas att de tider som är framräknade i Sektion 3.3 “Beräkning av vattenabsorption över kapillärmättnad” inte är generella, utan endast gäller under de betingelser som rådde vid det försök från vilket konstanterna  $a$  och  $b$  är utvärderade. Man bör därför inte dra allt för omfattande slutsatser om den exponeringstid det krävs för att uppnå den kritiska vattenmättnadsgraden.

Stora mängder vatten sugas in vid regn och torkar därefter snabbt ut, se Stycket 3.2.4 “Exempel 2 – Cykliskt upprepat regn”. I [1] framförs en hypotes om att sådana stora vattentransporter kan bryta ner sandstenen. Den nedbrytningsmekanism som framförs i [1] är en långsam urlakning av den kalcit som binder samman sandkornen i stenen. Denna process accelereras med ökad surhetsgrad i tillfört vatten.



## Referenser

- [1] Fagerlund, G. (1994), 'Kapillaritet som orsak till nedbrytning av kalcitbunden sandsten – en hypotes', Rapport TVBM-3058, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.
- [2] Wessman, L. (1997), 'Studies on the frost resistance of natural stone', Report TVBM-3077, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology.
- [3] Janz, M. (1997) 'Methods of Measuring the Moisture Diffusivity at High Moisture Levels', Report TVBM-3076, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology.
- [4] Fagerlund, G. (1993), 'The long time water absorption in the air-pore structure of concrete', Report TVBM-3051, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology.
- [5] Claesson, J. (1993), 'A few remarks on moisture flow potentials', Report TVBH-7163, Division of Building Physics, Lund Institute of Technology.
- [6] Arfvidsson, J. (1994), 'Isotherma fuktförlopp i porösa material – Beräkning och utvärdering av mätdata', Rapport TVBH-1007, Avdelningen för Byggnadsfysik, Lunds Tekniska Högskola.
- [7] Claesson, J. (1996), 'Partial Differential Equations. Technical Applications, Lecture notes', Deps. of Mathematical Physics and Building Physics, Lund Institute of Technology.
- [8] Wessman, L. och Carlsson, T. (1995), 'Karakterisering av några svenska naturstenar med tunnslipsmikroskopi', Rapport TVBM-7095, Avdelningen för Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola.