

Skaneeriv niiskuse mõõtmine ajaloolistes hoonetes

Lembit Kurik

Tallinna Tehnikaülikool

Teadmistepõhine ehitus 2017

27.04.2017



Niiskusprobleemid ajaloolistes hoonetes

- Tüüpilised kahjustused seotud veega (biokahjustused, eflorestsents, mehaanilised kahjustused, korrosioon, külmakahjustused).
- Kahjustusi saab vähendada takistades vee pääsemist ehituskonstruktsioonidesse (parandada katused, seinte vuugid, aknad jne).
- Radikaalsed ümberehitused väga kulukad või oluliselt takistatud muinsuskaitseliste piirangute tõttu.
- Ebasobiv sisekliima (nii inimestele kui kultuuriväärtustele) vajab korrigeerimist.



Biokahjustused: Vetikas - Kaarma kirik



Kihelkonna – vetikas, roosa bakter





Eflorestsents

Sool ja vetikas – Püha kirik



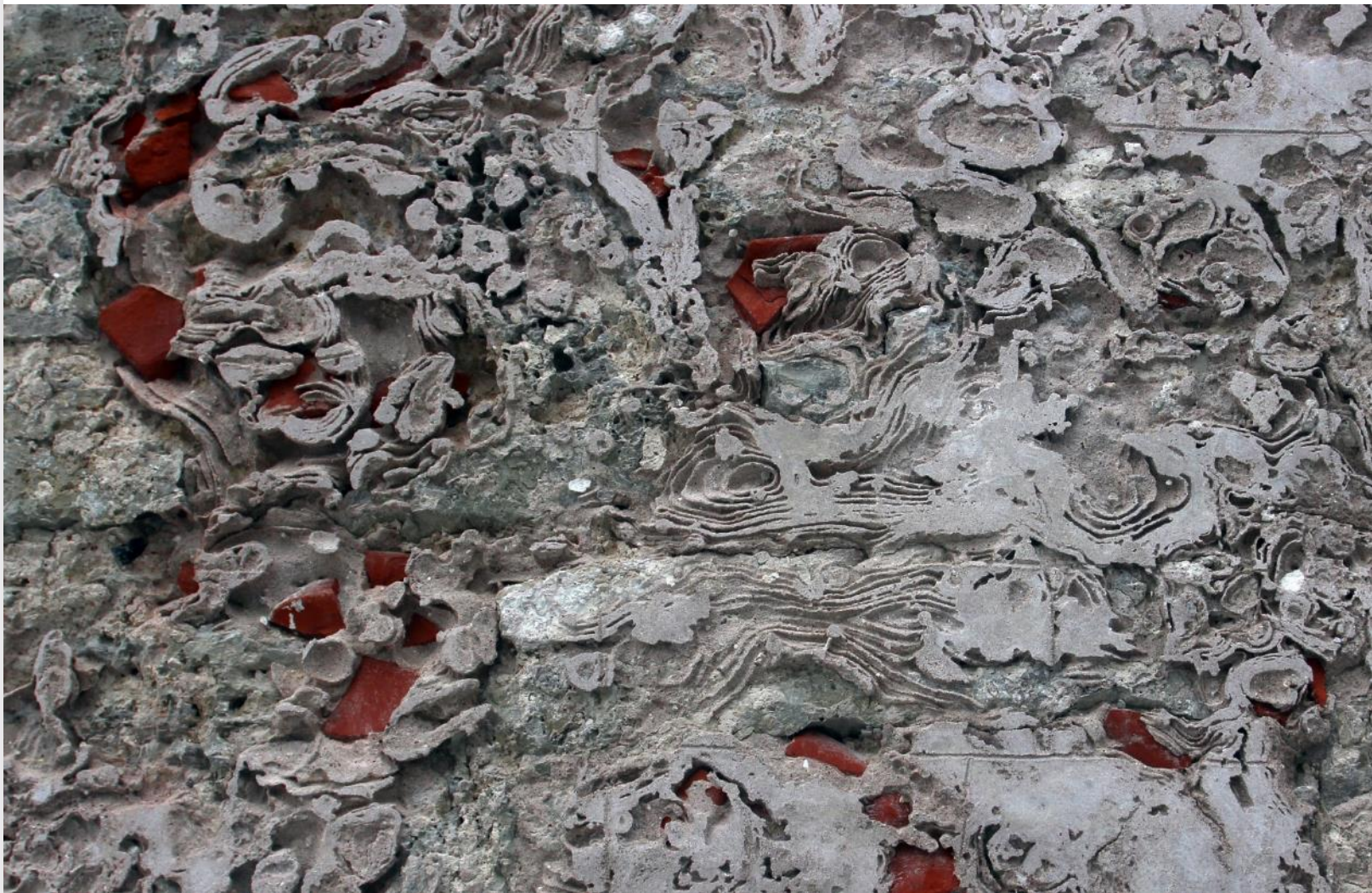
Valjala - jää, lumi, temperatuurimuutused



Kaarma - korrosioon, vetikas, sool

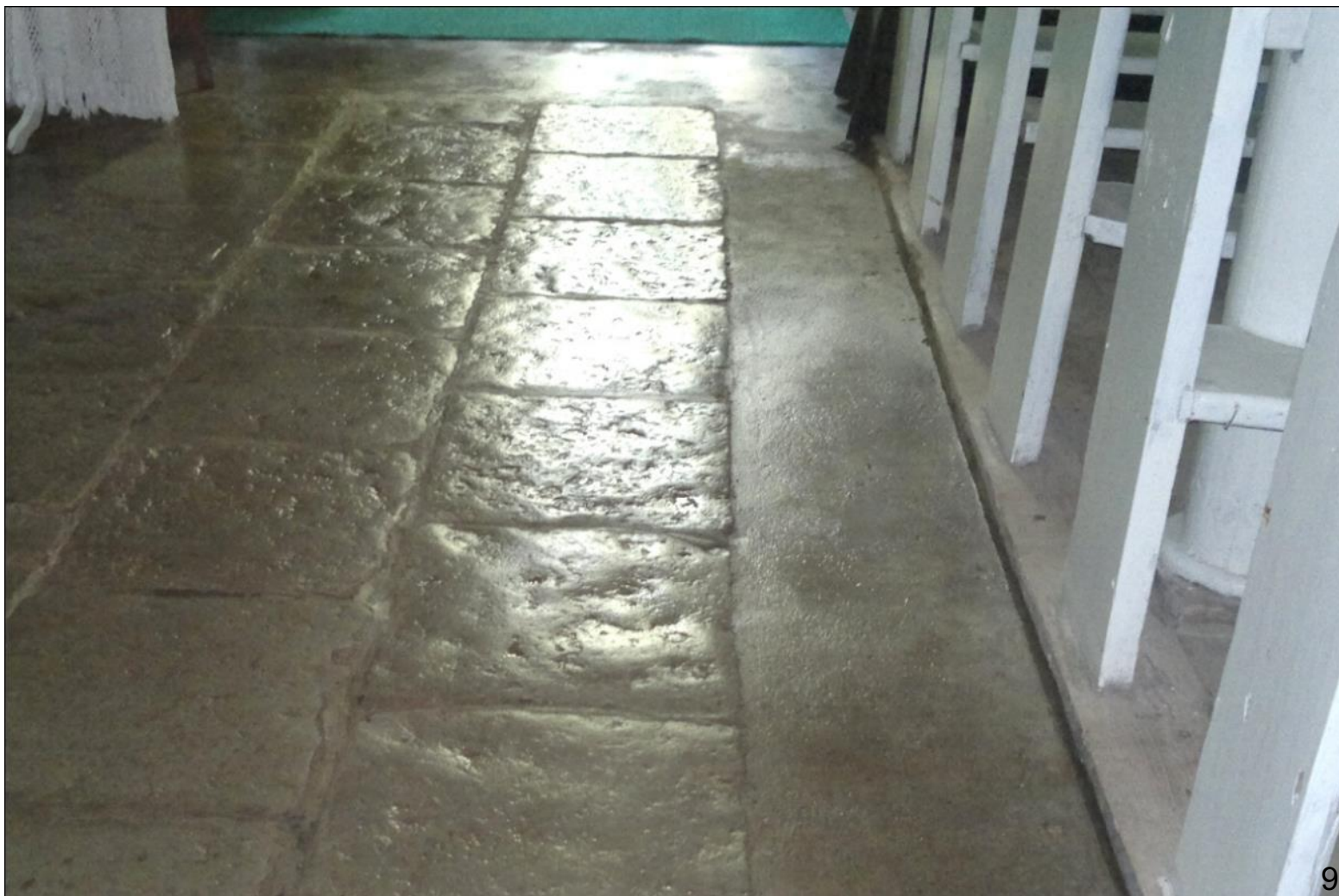


Kaarma - külmakahjustus





Ebasobiv sisekliima – Kirbla kirik



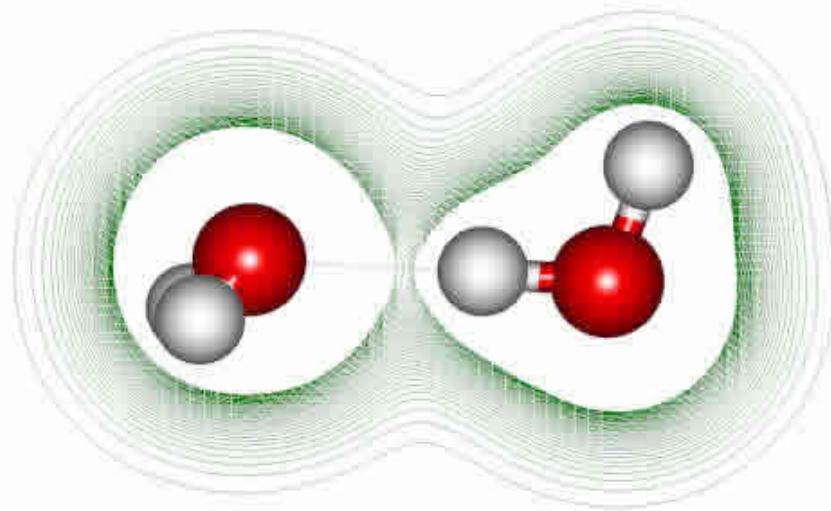
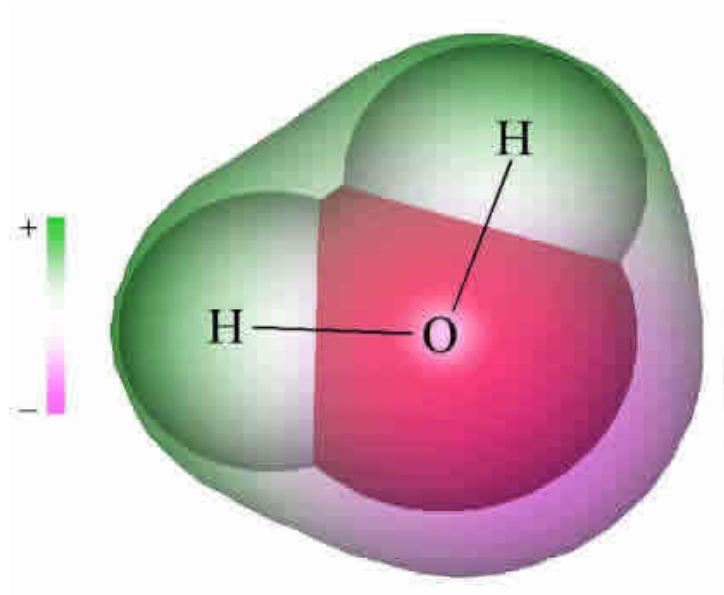


- Restaureerimisel ja hoonete haldamisel võimalikult ratsionaalsete otsuste tegemiseks vaja teada hoonete olukorda.
- Paljud kahjustused silmaga näha.
- Vajalikud ka mitmesugused mõõtmised, sealhulgas seinte niiskuskusesisaldus ja selle jaotus.



Mõni sõna veest ja materjalidest

- Vee molekul on väike polaarne molekul
O-H vahemaa 0,957- 1,00 Å,
H-O-H nurk 104,52° kuni 109°,
Wan der Waals'i ruumala 14,6 Å³





Vesi tungib ainult poorsetesse materjalidesse. Maksimaalne niiskusesisaldus saavutatakse, kui kõik tühemikud materjalis on täidetud – sellest niiskusesisalduse ülempiir. Mittepoorsetel materjalidel ainult pinnaniiskuse

Vesi võib materjalis olla mitmel kujul:

- Veeauruna
- Adsorbeerununa pooride seintele
- Kapillaarveena
- Vaba vee või lahusena
- Keemiliselt seotuna

Erinevate vee vormide vahel toimuvad üleminekud



Saaremaa ja Lääne-Eesti keskaegsete kirikute ehituskivide niiskustehnilised omadused

	Tihedus kg/m ³	Poorsus %	Veeimavus kaalu- protsentide s %	CaO %	MgO %
Kaarma dolokivi (Paadla lade)	2220 [1] 2080-2290 [3] 1960-2240 [2]	21,9 [1]	8,9 [1] 8,9 [3] kuni 10,4 [2]	26 - 31 [3]	14 - 20 [3]
Vasalemma lubjakivi	2600-2700 [3]		0,9 -1,0 [3]	46,4 - 55,5 [3]	0,3-9,1 [3]
Lasnamäe lubjakivi	2650 [1] 2590-2760 [3]	2,6 [1]	0,9 [1] 1,0-1,9 [3]	44,8 - 46,3 [3]	4,1-6,8 [3]
Selgase dolokivi (Jaagurahu lade)	2230 [1]	21,7 [1]	7,8 [1]		
Ungu lubjakivi	2430–2650 [1]	2,9-11,6 [1]	0,7-3,5 [1]		

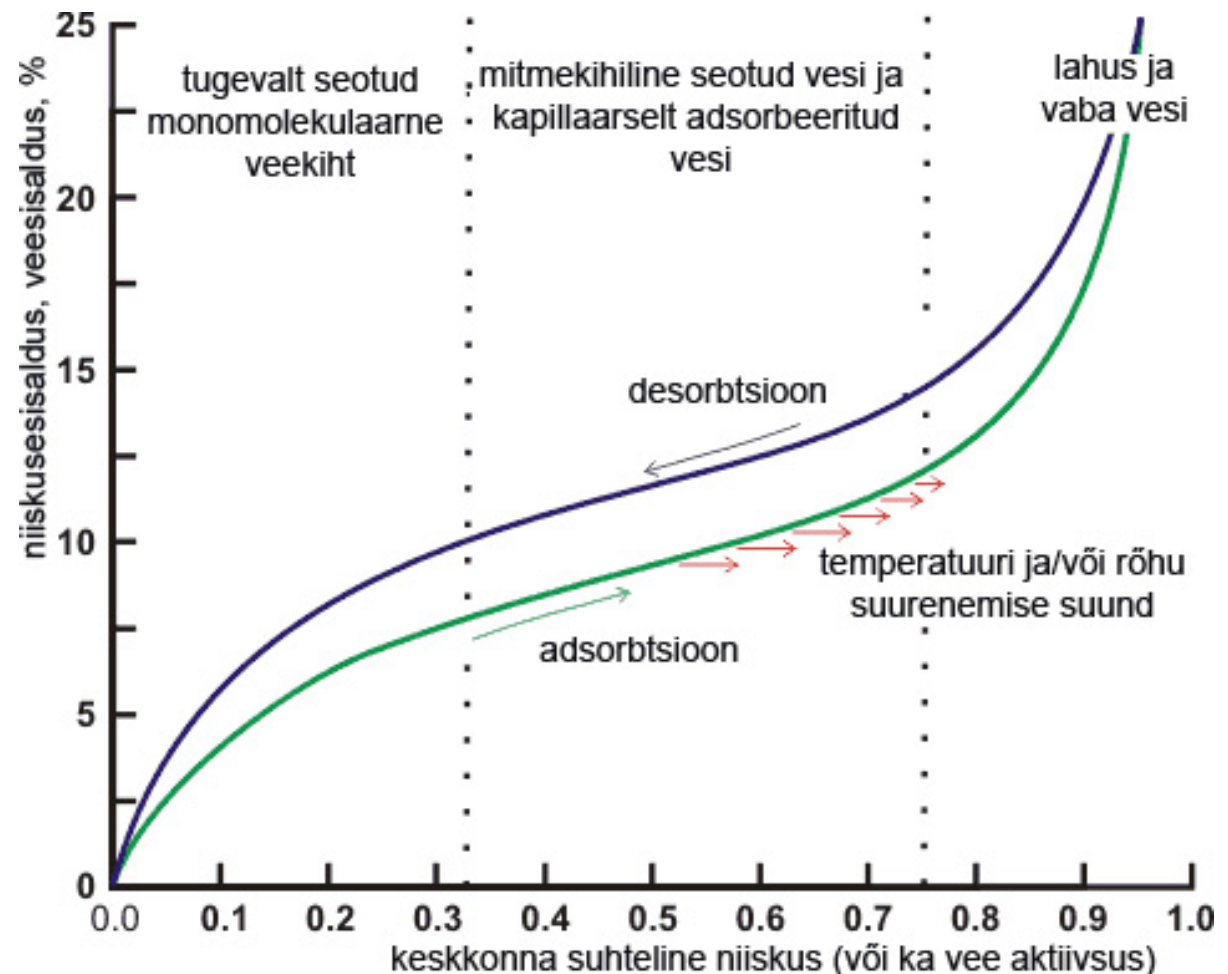
[1] www.lossikivi.ee/index.php?a=looduskivid

[2] Kaarma dolokivi näidiste mõõtmiste alusel.

[3] Helle Perens. (2003). Paekivi Eesti ehituses I. Üldiseloostus. Lääne Eesti. Eesti Geoloogiakeskus.



Konstantse niiskuse ja temperatuuri juures omandab lahtiste pooridega materjal mingi tasakaalulise niiskusesisalduse, kusjuures esineb hüsterees.



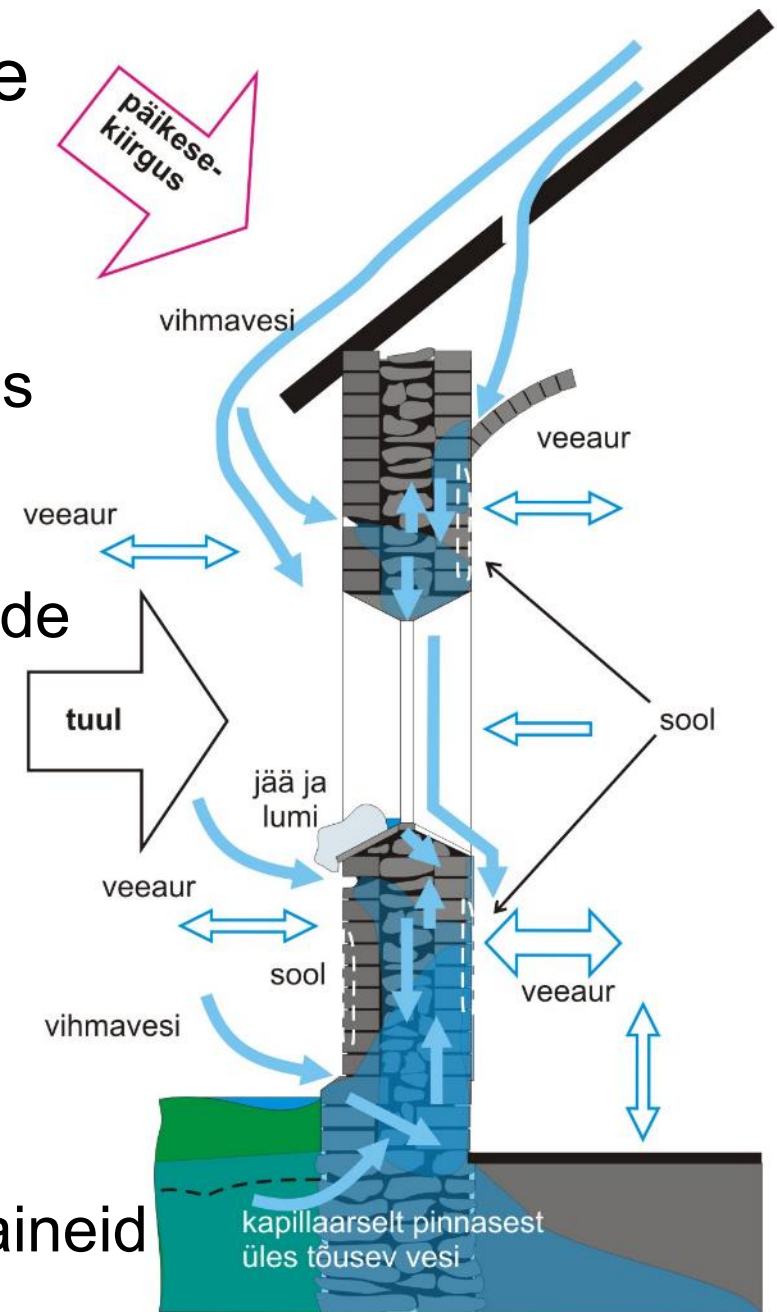
Materjali sees tasakaalulise suhtelise õhuniiskuse mõõtmisel põhineb ka üks niiskusesisalduse mõõtmise meetod



Vesi seinas ja selle ümber

Vesi võib esineda seinas mitmel erineval kujul:

- vaba veena
- adsorbeerununa pooride seinale
- kristallveena soolas
- veeauruna
- jääna
- seotuna bioloogilises materjalis
- vees on üldjuhul lahustunud erinevaid aineid





Ühikud

$$\text{niiskusesisaldus } W = \frac{\text{märgkaal} - \text{kuivkaal}}{\text{märgkaal}}$$

$$\text{kuiv} - \text{ja märgkaalu suhe} = \frac{\text{kuivkaal}}{\text{märgkaal}}$$

$$\text{niiskusesisaldus (kuivaine kohta) } F = \frac{\text{märgkaal} - \text{kuivkaal}}{\text{kuivkaal}}$$

$$\text{märg} - \text{ja kuivkaalu suhe} = \frac{\text{märgkaal}}{\text{kuivkaal}}$$

*Kaalu asemel võib olla ka mass või ruumala
Suhet väljendatakse enamasti %-na*

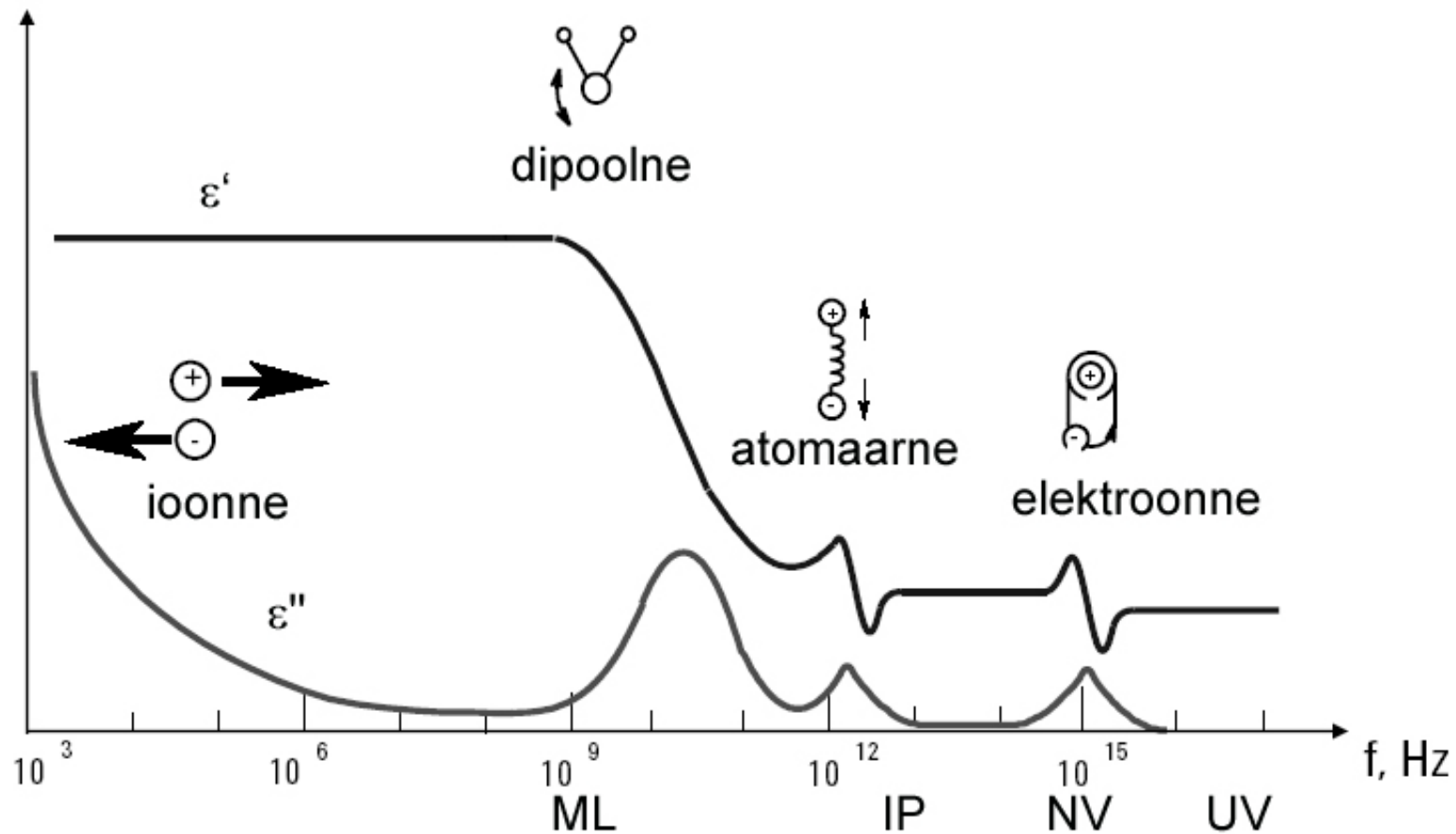


Mõnede materjalide dielektrilised konstandid

	Jerzy Wtorek, 2003	Alex Martinez, 2001
vesi	80	80
jää	3...4	3,4
kuiv liiv	3...5	4...6
märg liiv	20...40	10...30
savi	5...40	5...40
lubjakivi (kuiv)	4...8	3,1.....7,9
lubjakivi (märg)		8,8...21,7
kilt	5...15	5...15
graniit	4...6	4...6
kvarts		4,5
kaltsiit (raadio)		7,8...8,5
kaltsiit (1 MHZ)		6,4

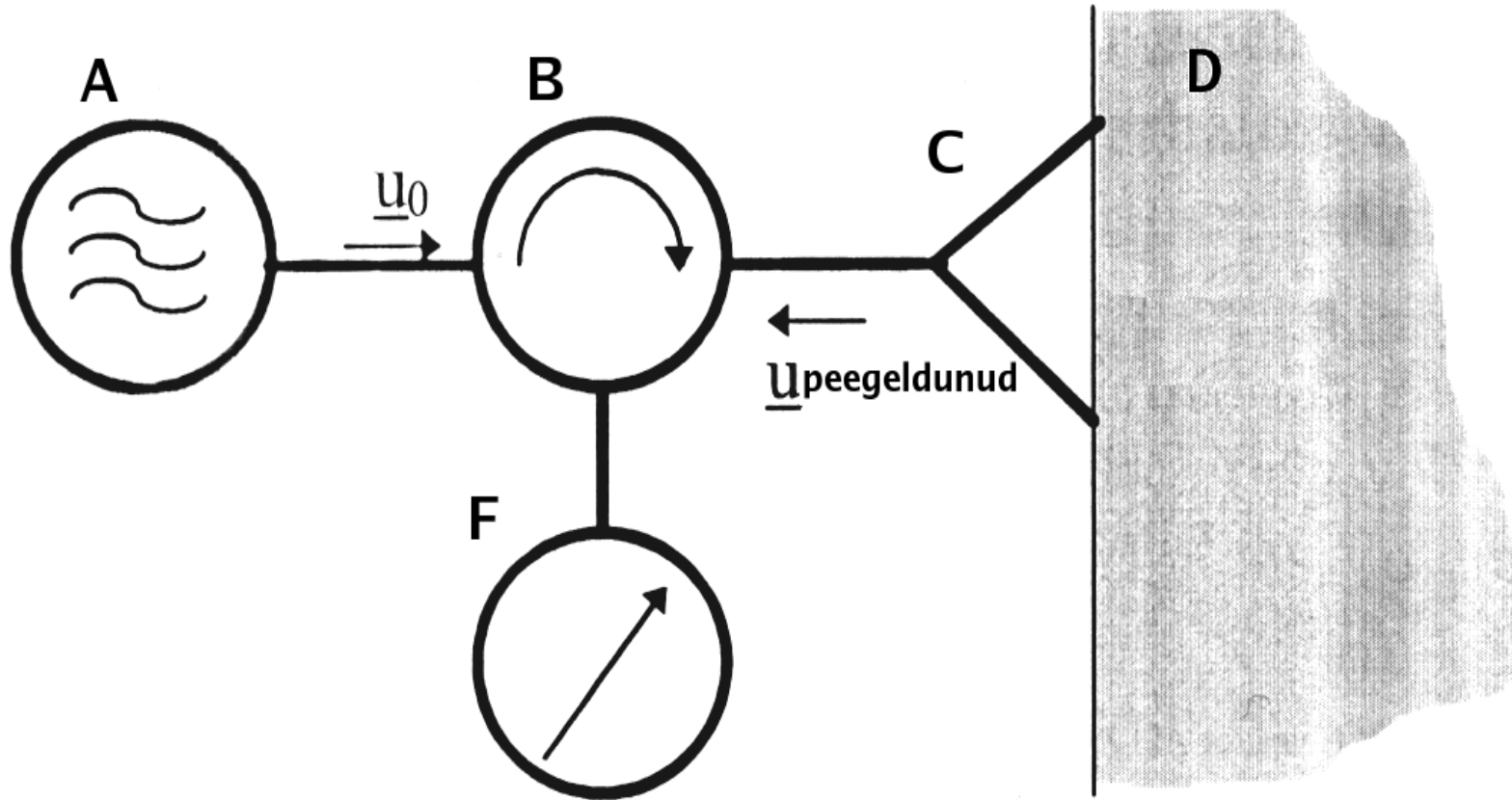


Vee dielektrilise konstandi sagedussõltuvus





Mikrolaine aquameetria



kaudne mõõtmine,
mikrolainete peegeldumise intensiivsus
sõltuvub materjali niiskusesisaldusest.



Mikrolaine aquameetria

- mittekahjustav (väga oluline kunstiväärtust omavate objektide korral)
- füüsilise kontakti vajadus puudub.
- keskkonna olukord (tolm, õhuniiskus jne) ei mõjuta mõõtmistulemust
- ioniseerivat kiirgust kasutavate meetoditega võrreldes ohutum ja kiirem
- infrapunast kiirgust kasutavate meetoditega võrreldes mõõtmisügavus oluliselt suurem
- mõõtepiirkond lai
- materjali sooldumise mõju väike
- aparatuur kallis



Niiskusesisalduse mõõtja pind- ja ruumtüüpi anduritega

tarkvara Moistanalyze

MOIST 200

MOIST P

MOIST R



Mikrolaine tajupead

					
	MOIST R	MOIST R2	MOIST D	MOIST P	MOIST S
Mõõtmisügavus kuni	3 cm	7 cm	11 cm	30 cm	80 cm
Mõõdetav ruumala	20 cm ³	150 cm ³	2 l	10...15 l	40...50 l
accuracy, %	0.1 ... 0.5	0.1 ... 0.5	0.2 ... 0.5	0.2 ... 0.5	?
Niiskusesisalduse mõõtepiirkond kuva materjali suhtes, %	0 - 400	0 -100	0 -100	0 - 400	0 - 400
Niiskusesisalduse mõõtepiirkond märja materjali suhtes, %	0 - 80	0 - 50	0 - 50	0 - 80	0 - 80



Maxwell Garnet valem:

(kehtib kui vesi ühtlase materjali sfäärilistes poorides)

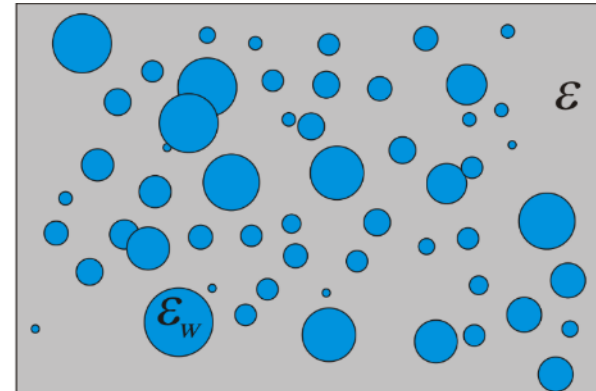
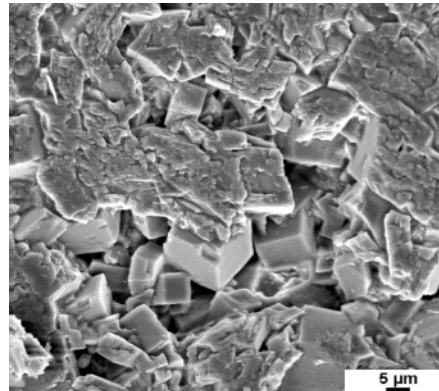
$$\epsilon_{eff} = \epsilon_m + 3f\epsilon_m \frac{\epsilon_w - \epsilon_m}{\epsilon_w + 2\epsilon_m - f(\epsilon_w - \epsilon_m)} ,$$

ϵ_{eff} - efektiivne dielektriline konstant

ϵ_w - vee dielektriline konstant

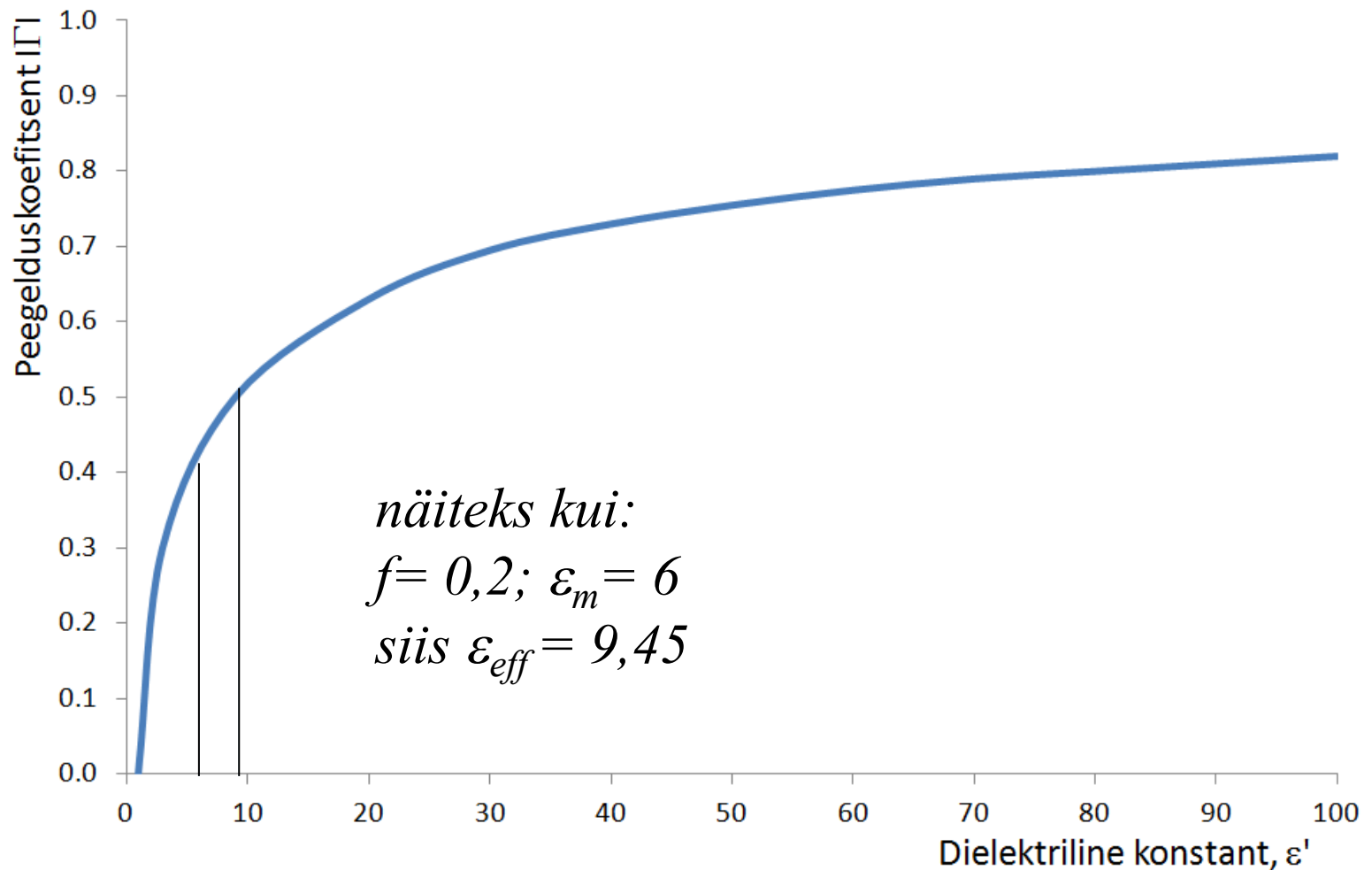
ϵ_m - kuiva materjali dielektriline konstant

f - Vee ruumalaline osa kogu materjalist





Mikrolainete peegelduskoefitsiendi sõltuvus materjali dielektrilisest konstandist sagedusel 2,45 GHz (Agilent, 2005).



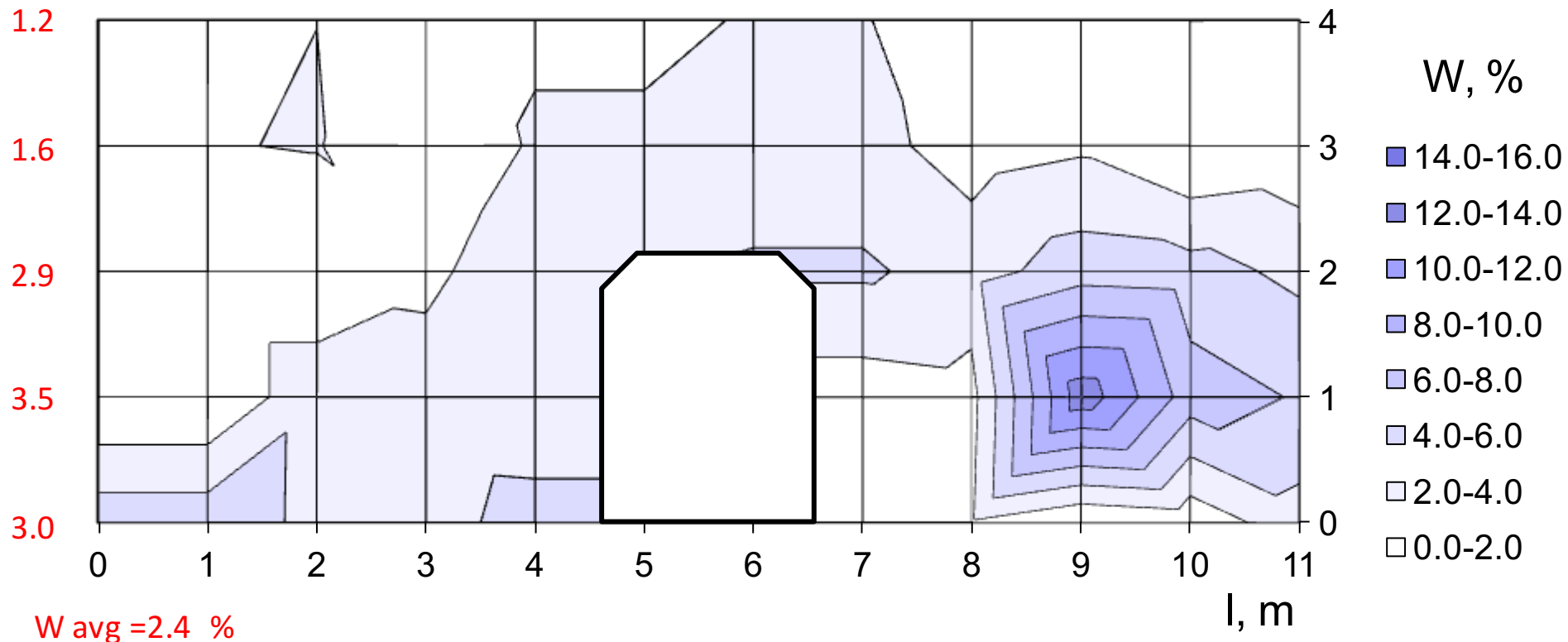


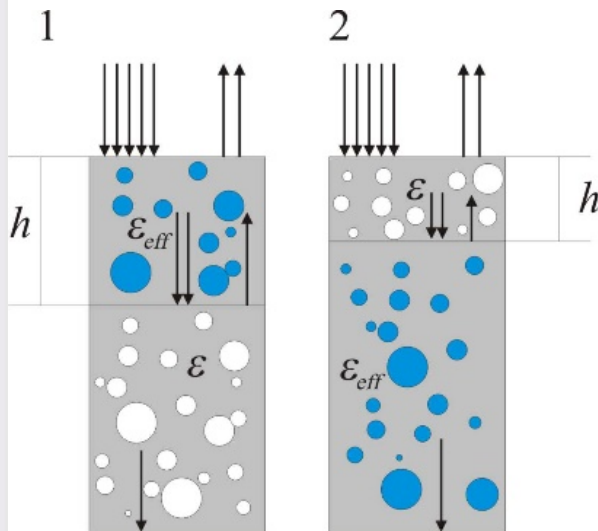
Kalibreerimine (ühtlane niiskusejaotus)

- kalibreerimiseks kasutati Kaarma dolokivi
- kasutati 3 cm paksusega plaate
- plaatide niiskusesisaldus määrati gravimeetriliselt
- materjal pole eriti homogeenne ja seepärast mõõtemääramatus suhteliselt suur
- kasutati keskmistamist
- mõõtepea Moist R kalibreerimisel tekkis probleem – niiskusesisalduse ja niiskuseindeksi vahel pole ühest seost

Tüüpiline seina niiskusesisalduse kaardistamise tulemus (2D skaneeriv mõõtmine)

W avg, h, %



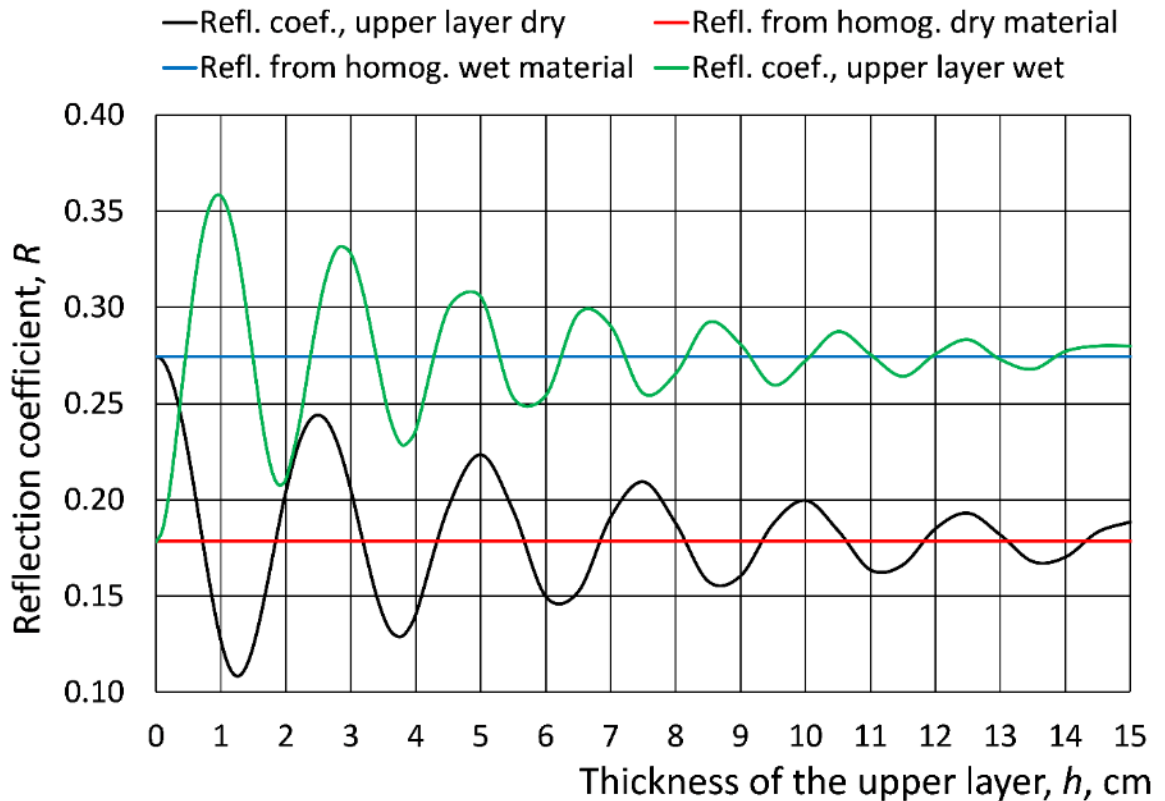


3D mõõtmiste võimalused

teoreetilised kalkulatsioonid:

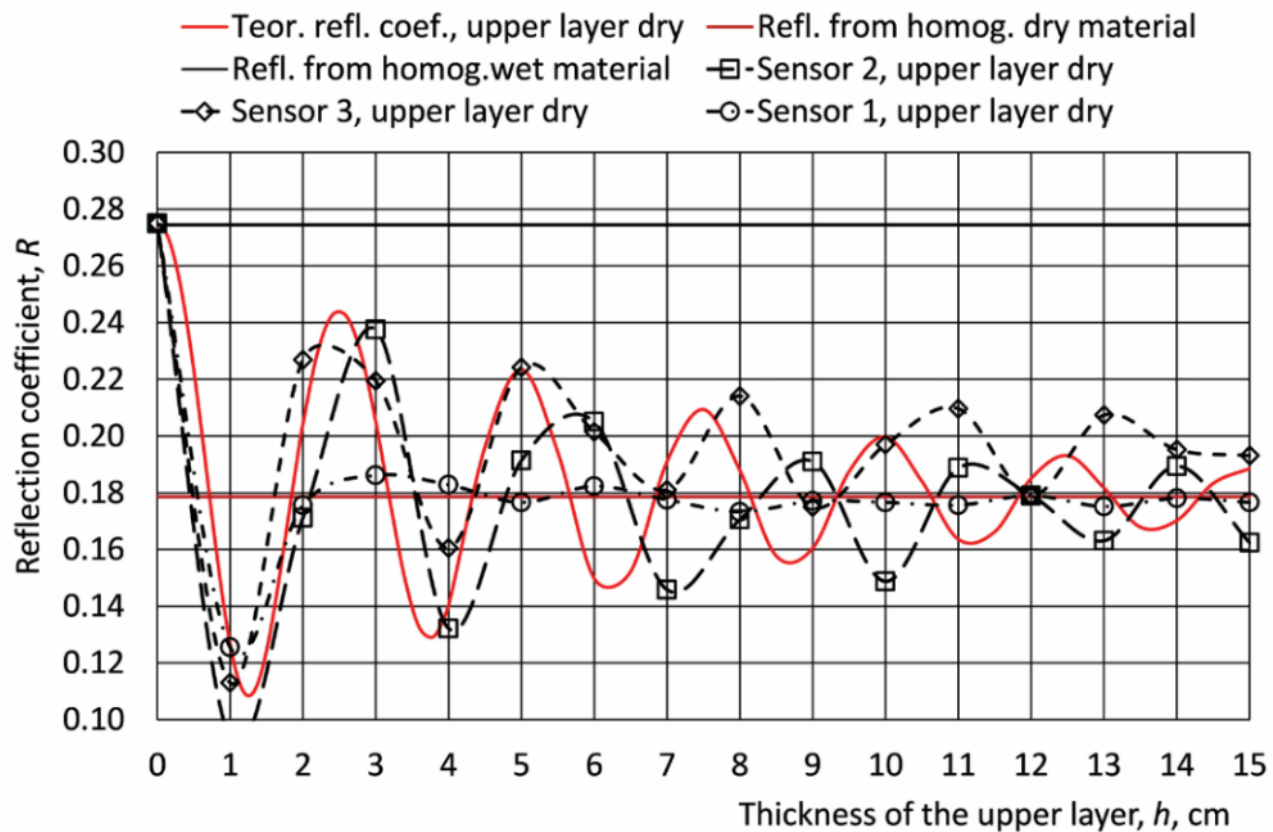
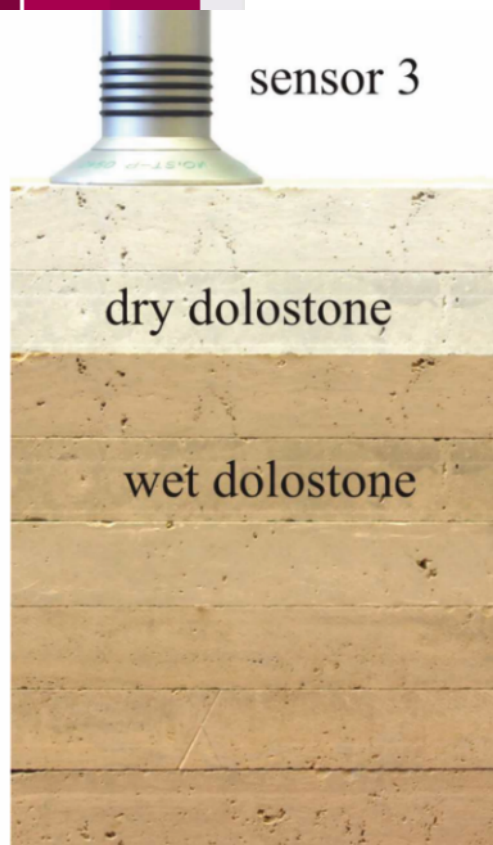
$$n_{eff} = \sqrt{\epsilon_{eff}}$$

$$R = \left| \frac{n_{eff} - n_{air}}{n_{eff} + n_{air}} \right|^2$$





Eksperimentaalsed mõõtmised

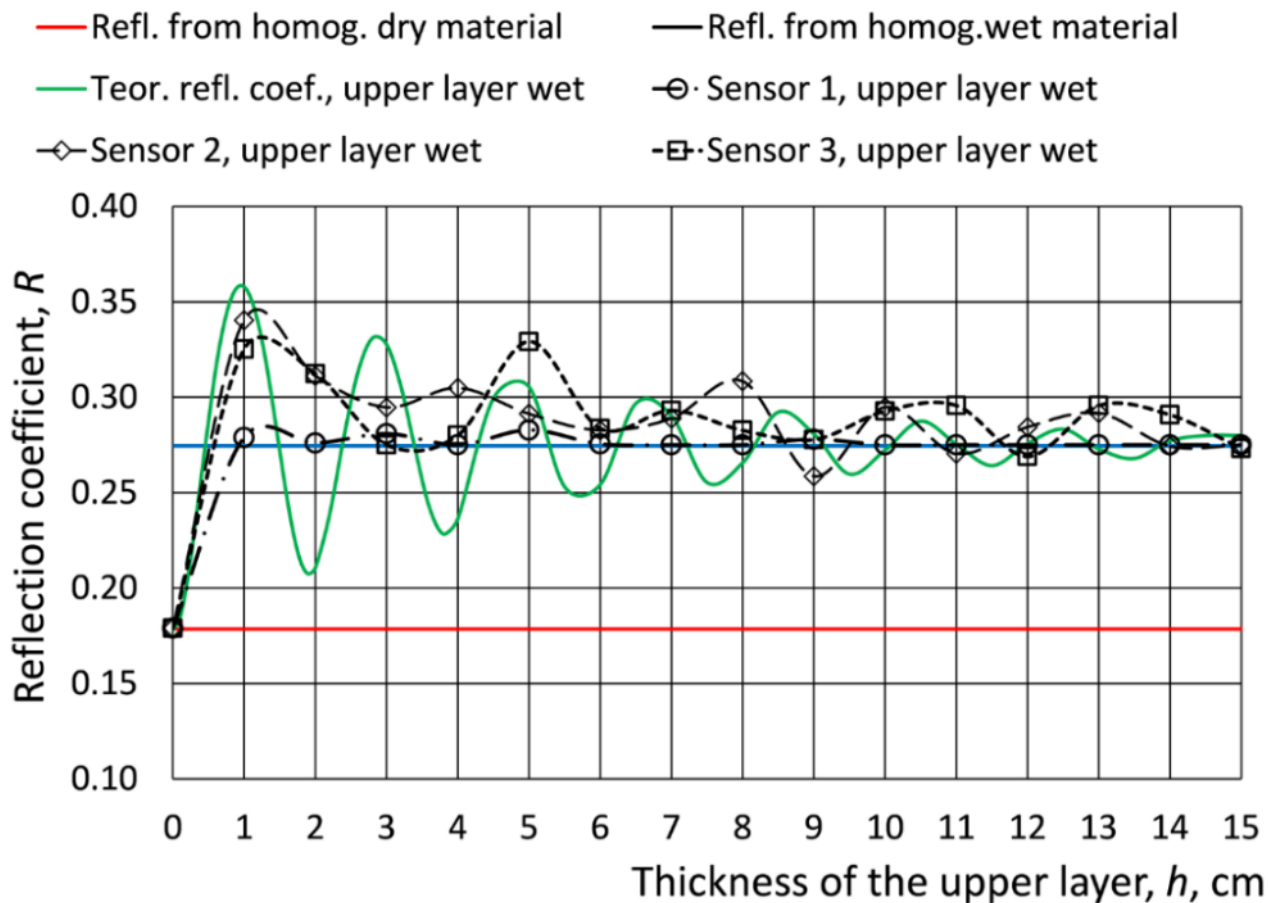


Eksperimentaalsed mõõtmised

sensor 3

wet dolostone

dry dolostone



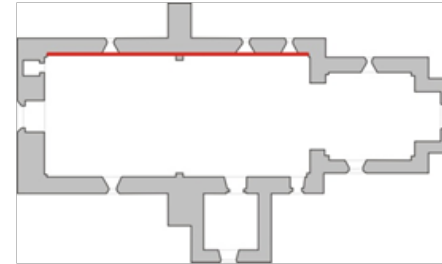


Näited:

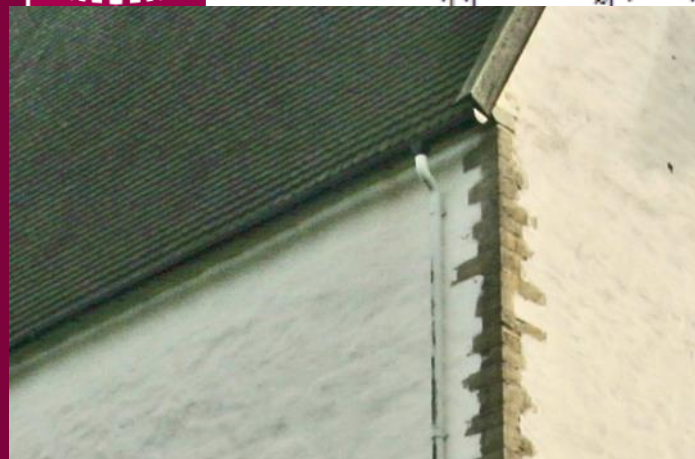
2D skaneeriv seinte niiskusesisalduse
mõõtmine



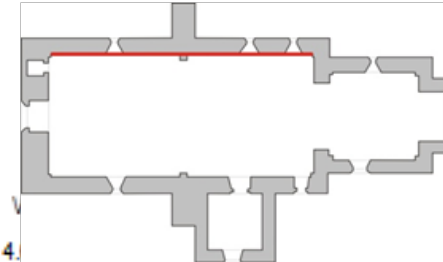
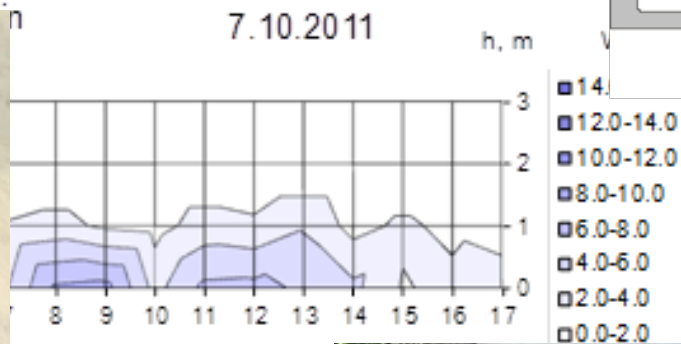
Muhu Katariina kirik



Muhu Katariina kirik



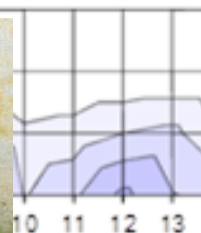
7.10.2011



10.06.2012

Wave, h, %

0.4



5.06.2014

Wave, h, %

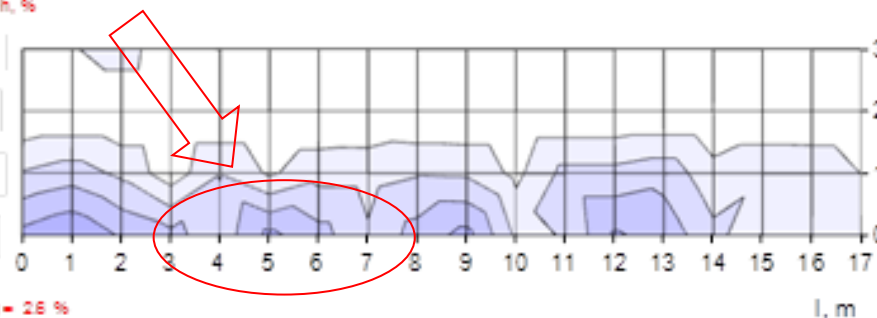
0.8

0.0

3.4

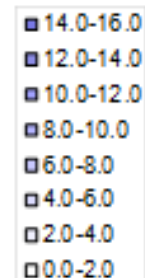
6.1

Wave = 26 %



h, m

W, %

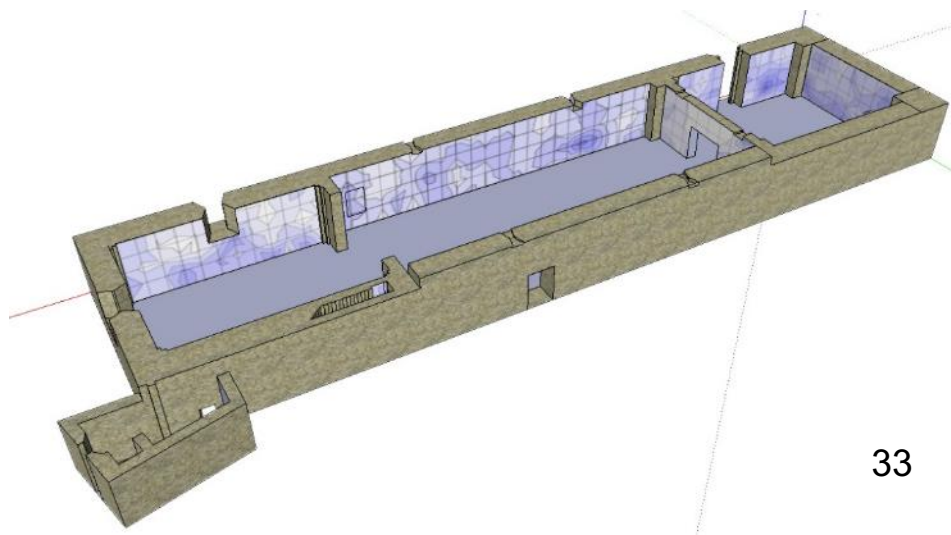


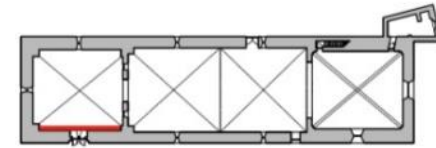


Pöide Maarja Kirik

Ehitusmaterjalid: Kaarma dolokivi, kohalik dolokivi (Jaagurahu ja Rootsiküla lademetest), detriitne lubjakivi Gotlandilt ja tellised.

Kasutati mõõtepead Moist P

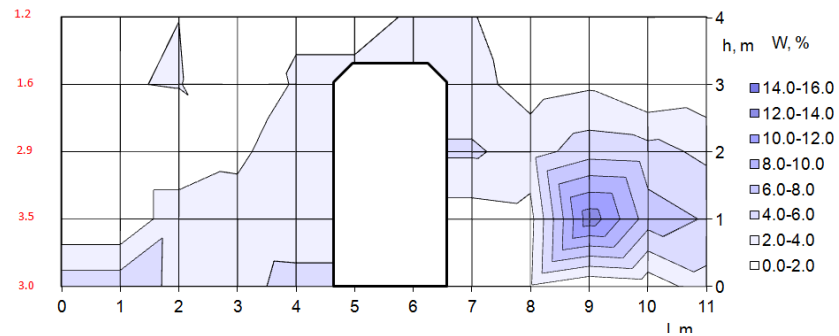




W avg, h, %

torni lounasein

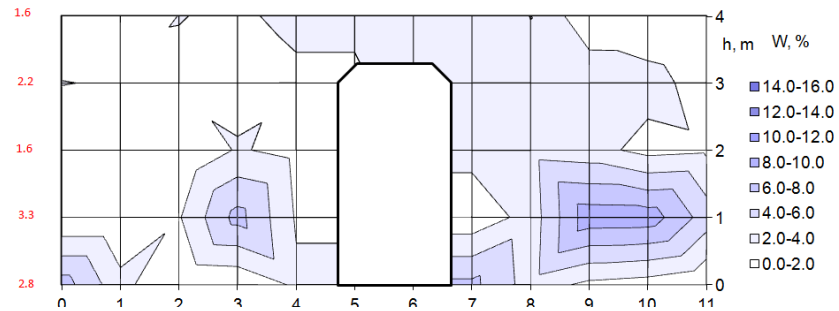
5.07.2012



W avg, h, %

torni lounasein

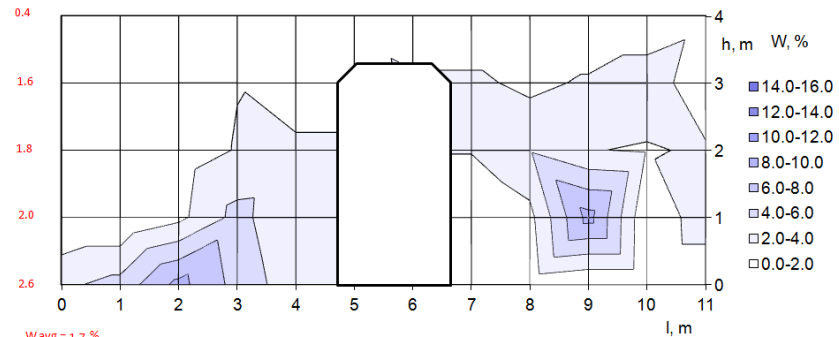
5.07.2013



W avg, h, %

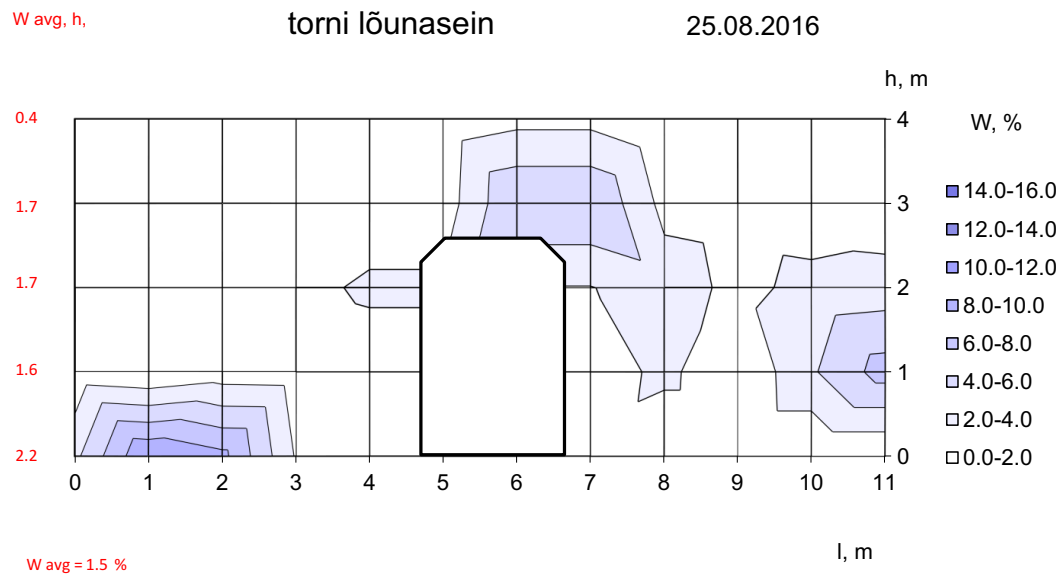
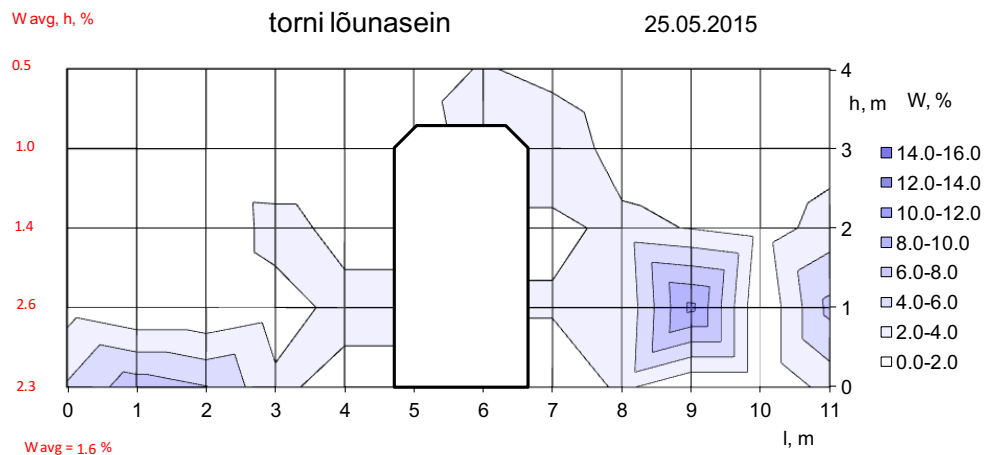
torni lounasein

7.11.2014



W avg = 1,7 %



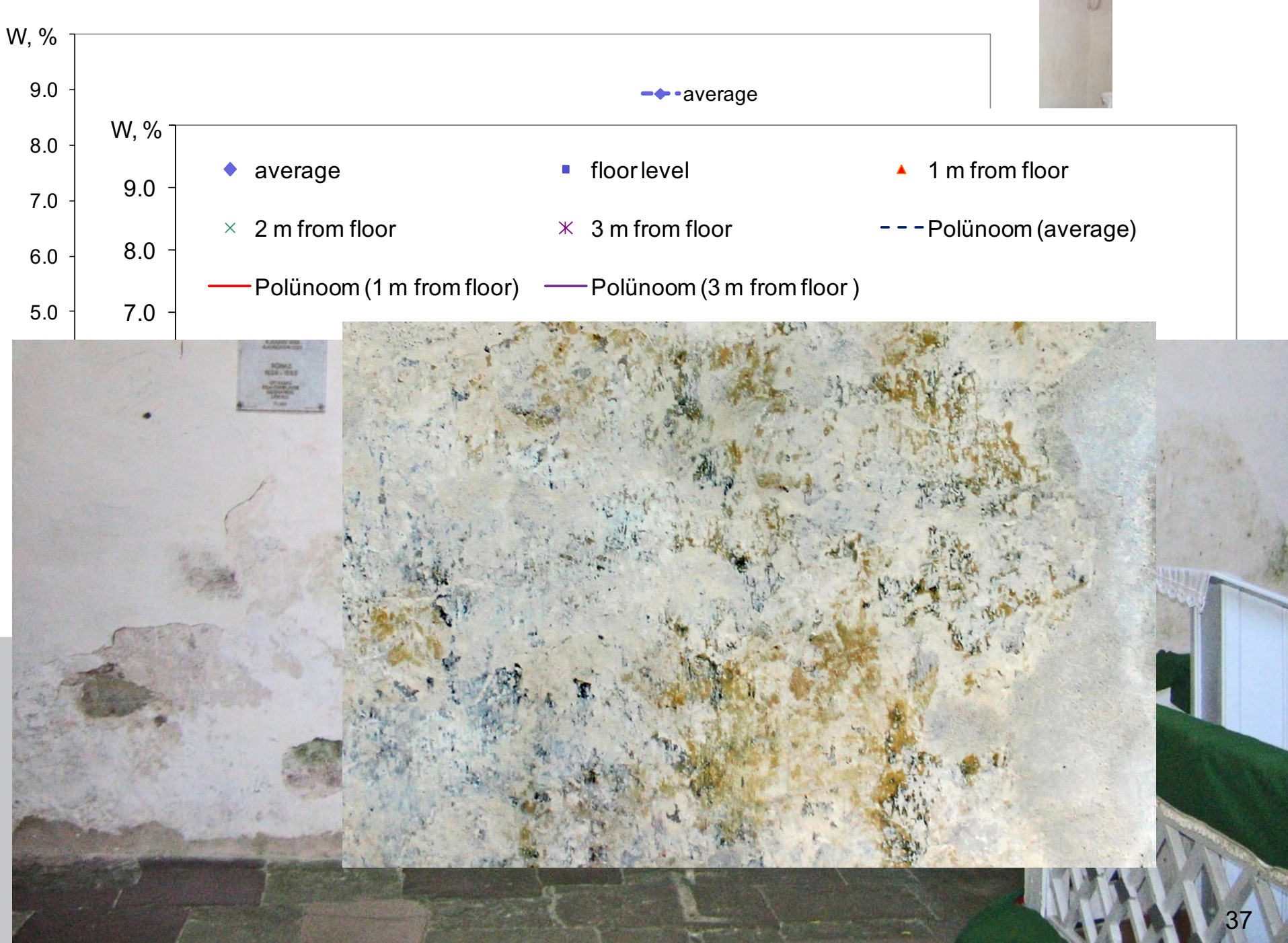


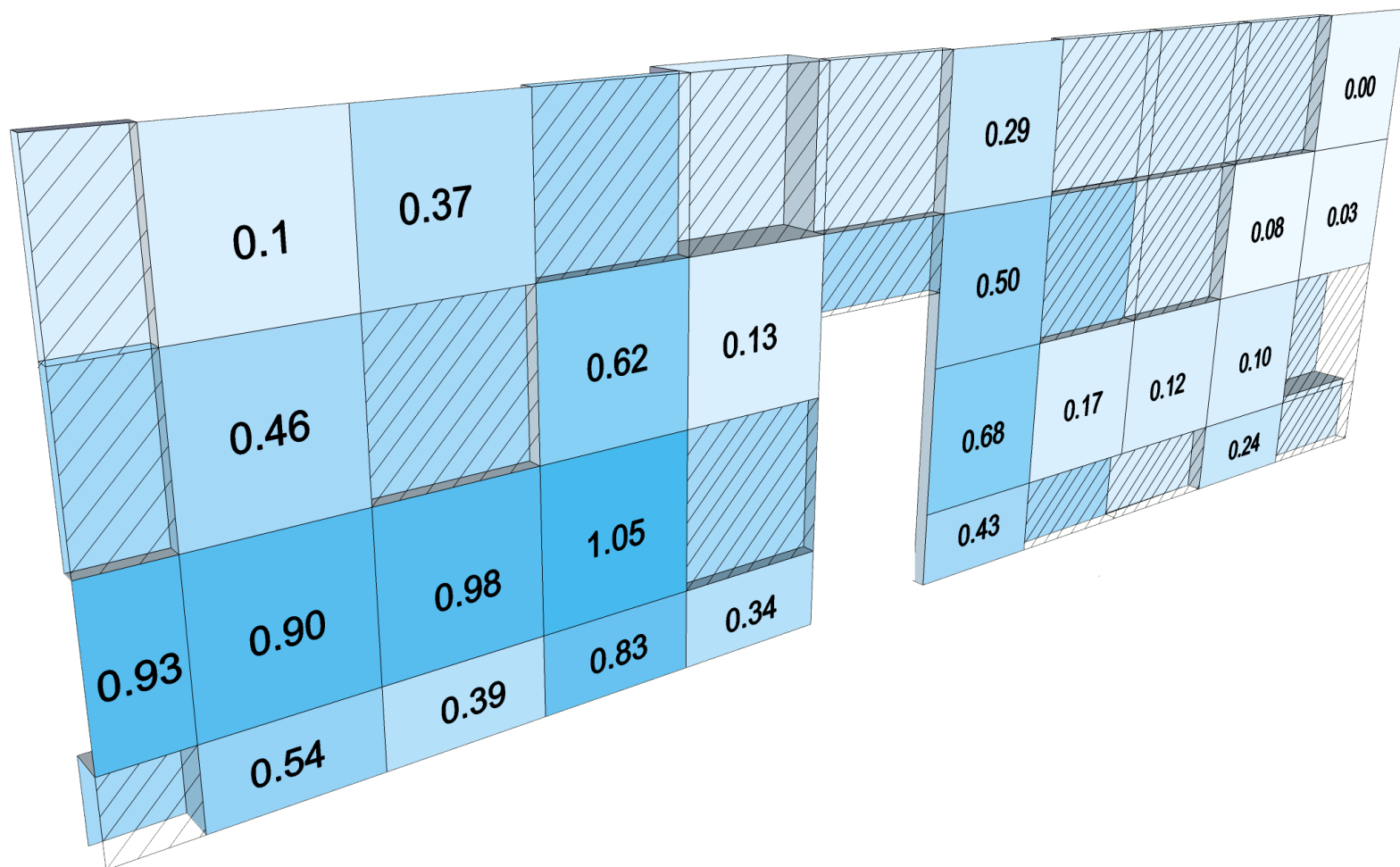


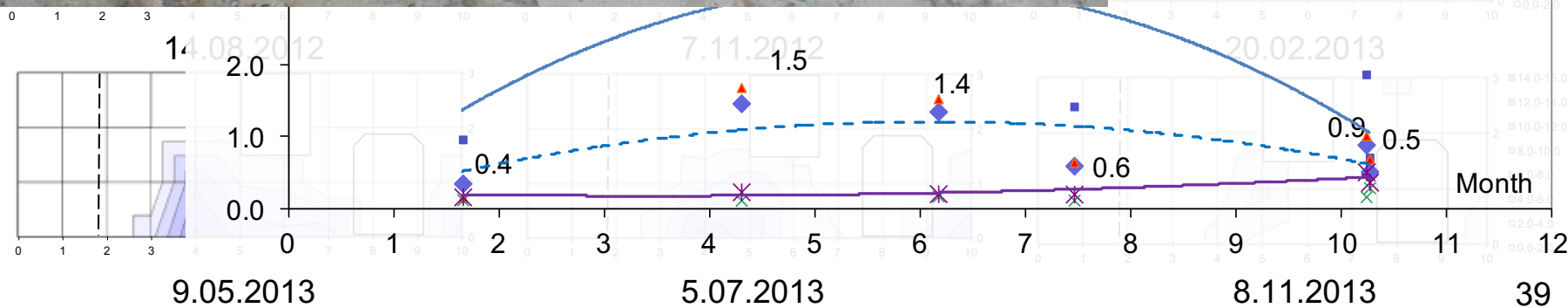
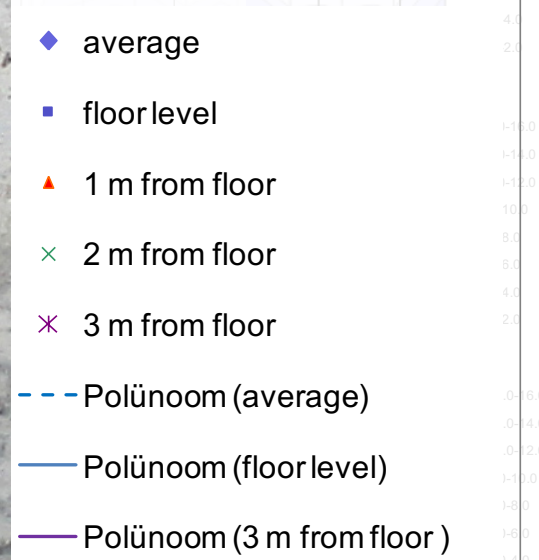
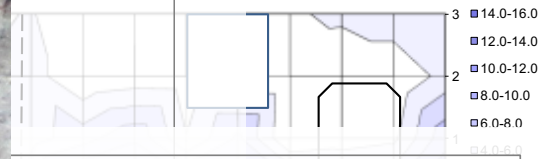
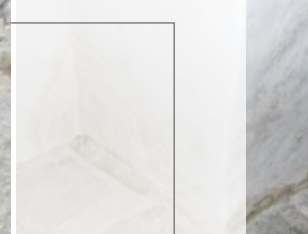
Püha Jabobi Kirik



Ehitusmaterjalid:
Kaarma dolokivi, kohalik dolokivi, rõngaspaas.







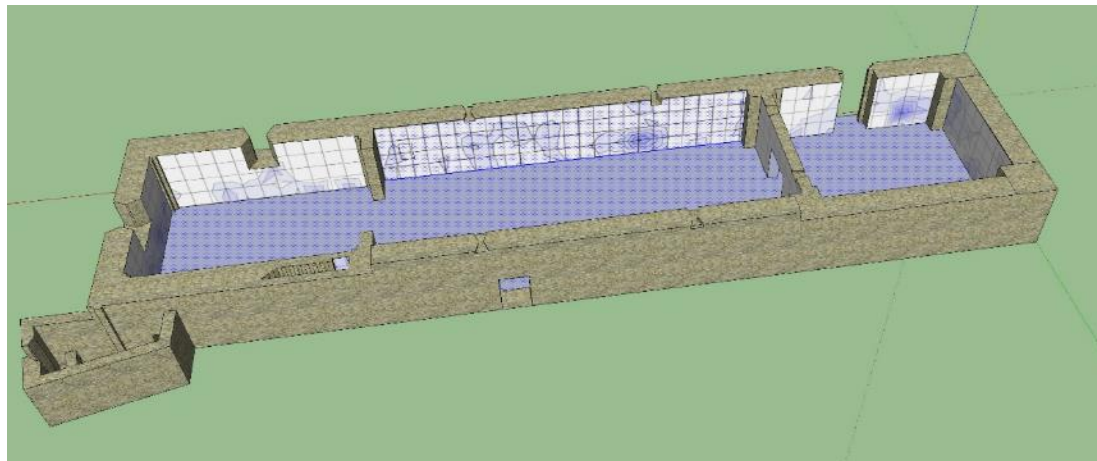


Rohkem andmeid internetis lehel: kirikud.muinas.ee

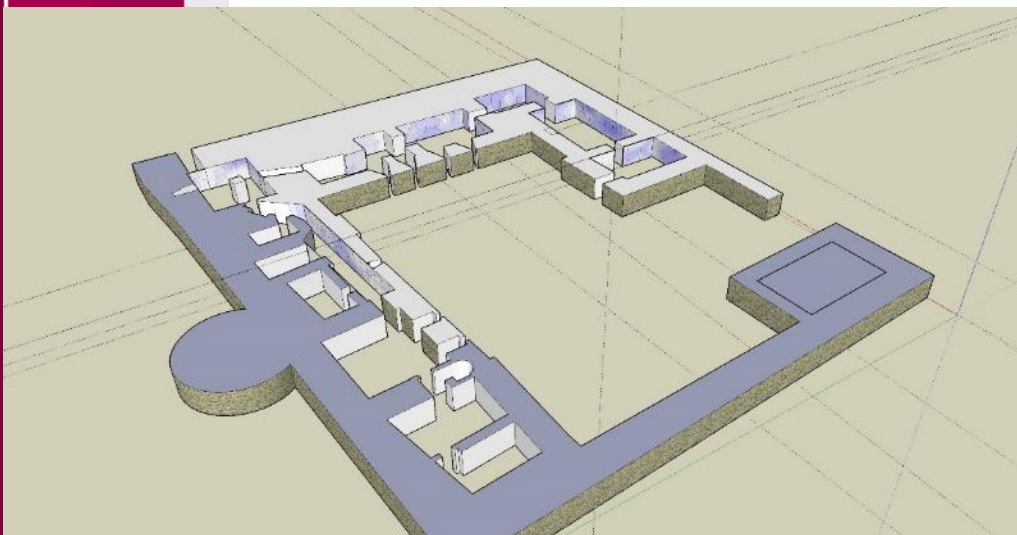




Seinte niiskuskaardid 3D mudelil



Pöide [kirik](#)



Haapsalu
piiskopilinnuse kelder



Kokkuvõte

- Mikrolainelise kiirguse peegeldumise kaudu seinte niiskusesisalduse kaardistamine on sobiv meetod kultuurimälestistena kaitse all olevate ehitiste niiskusprobleemide diagnoosimiseks.
- Meetod on informatiivne, suhteliselt kiire, ei kahjusta mõõdetavat objekti.
- Tulemused on esitatavad graafiliselt, mis oluliselt lihtsustab mõõtmistulemuste analüüsi ja probleemidest arusaamist ka mittespetsialistil



Piirangud

- Kaudsed mõõtmised, mõõtemääramatust mõjutavaid tegureid palju – seinamaterjal mittehomogeenne, seinapind ebatasane, kalibreeringu puudumine konkreetsele ehituskivile (kalibreerimine töömahukas ja erinevaid ehituskive palju) (segavad metallesemed, torud, elektrijuhtmed).
- Saab mõõta ainult vaba vett. Jää ja kristallvee mõõtmiseks tuleb kasutada teisi mõõtemetodeid (näiteks NMR).
- Kasutades keskmistamist on võimalik juhuslikku laadi mõjude osakaalu vähendada ja saada suurema usaldusega mõõtmistulemusi.
- 3D mõõtmised piiratud ja problemaatilised, peamine segav tegur – interferents. Lahendus võiks olla Ultra-Wideband (UWB) radari kasutamine.



Kasutatud materjalid

- Kupfer, K (Ed). (2005). Electromagnetic Aquametry, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Kaatze, U. (2005). Electromagnetic Wave Interaction with Water and Aqueous Solutions. In Kupfer, K (Ed), Electromagnetic Aquametry, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Triikkel, A., Kaljuvee, T., Soesoo, A., Kuusik, R. (2012). Estonian dolomites: Occurrence, resources, characterisation and new prospects for application. Veress, B., Szigethy, J. (Eds.). Horizons in Earth science research (147 - 196). New York: Nova Science Publisher Inc.
- Agilent (2005). Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials. Agilent Technologies, Inc.: U.S.A.
- Gallant MI. Layer Reflectance Calculator n.d.
<http://www.jensign.com/reflect/r8TA.html> (accessed January 29, 2017).
- Sihvola A. Mixing Rules with Complex Dielectric Coefficients. Subsurface Sensing Technologies and Applications 2000;1:393–415. doi:10.1023/A:1026511515005.