

# **ECOSAFE**

## **materiaalit ja**

# **rakennusfysikaaliset materiaalikokeet**

ECOSAFE Loppuseminaari 2.6.2023

Ilkka Tuurala

# Kutterinlastukokeet

# Yleistä

- Materiaalikokeiden tavoitteena oli tutkia ECOSAFE-rakennekokeissa käytettyjen kutterinlastu- ja savirappausmateriaalien olennaiset materiaaliominaisuudet laskennallisia tutkimuksia varten, jotta laskennan tuloksia voitiin verrata rakennekokeissa saatuihin tuloksiin.
- Tavoitteena oli myös selvittää savetuksen vaikutusta materiaaliominaisuuksiin.
- Materiaalit tutkittiin niissä asennustiheyksissä, joissa materiaaleja käytettiin ECOSAFE-rakennekokeissa (yläpohja ja seinärakennetiheys sekä vapaasti "ripoteltuna").
- Tutkittavat materiaaliominaisuudet olivat
  - Ilmanläpäisevyys
  - Lämmönjohtavuus
  - Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä
  - Lisäksi tutkittiin vesihöyrynläpäisevyys ja veden imeytymiskerroin
- Tutkitut materiaalit olivat
  - Kutterinlastu, Ehta
  - Kutterinlastu, Pölkky
  - Kutterinlastu, nimetön ("jokamiehen" höylänlastu)
  - Savetettu kutterinlastu, Pölkky (2:1 suhteessa kutterinlastua ja Tiileri-savijauhoa)
  - Savetettu kutterinlastu, Ehta (2:1 suhteessa kutterinlastua ja Tiileri-savijauhoa)



Pölkky

Pölkky-savetettu

Ehta

Nimetön lastu

# Materiaalit



Pölkky

Pölkky-savetettu

Ehta

Nimetön lastu



Ehta-savetettu (ECOSAFE2)

## Tutkitut materiaalit olivat

- Kutterinlastu, Ehta
- Kutterinlastu, Pölkky
- Kutterinlastu, nimetön ("jokamiehen" höylänlastu)
- Savetettu kutterinlastu, Pölkky (2:1 suhteessa kutterinlastua ja Tiileri-savijauhoa)
- Savetettu kutterinlastu, Ehta (2:1 suhteessa kutterinlastua ja Tiileri-savijauhoa)

# Savetetun kutterinlastun valmistus

Alla oleva ohje on lyhennetty ECOSAFE2 Savetetun Ehta -kutterin valmistuksesta

- Kutterinlastua ja (Tiileri) savijauhoa painosuhteissa 2:1
- Materiaalit säilytettiin kuivassa ja lämpimässä hallissa
- Kutterinlastu murennettiin käsin tasosekoittajaan
- Sekoittajaan lisättiin saviliete.
- Seosta sekoitettiin vähintään 10 minuuttia kunnes ainesosat kunnolla sekoittuneet
- Seos kuivattiin kevytpeitteen päällä
- Kerrospaksuus kuivauksessa 200 mm, sekoitettiin päivittäin, kuivausaika noin 2 viikkoa lämpimässä hallissa, lattialämmityksen päällä
- Kuivaamisen jälkeen säkitys (paperi)säkkeihin.

# Ilmanläpäisevyys

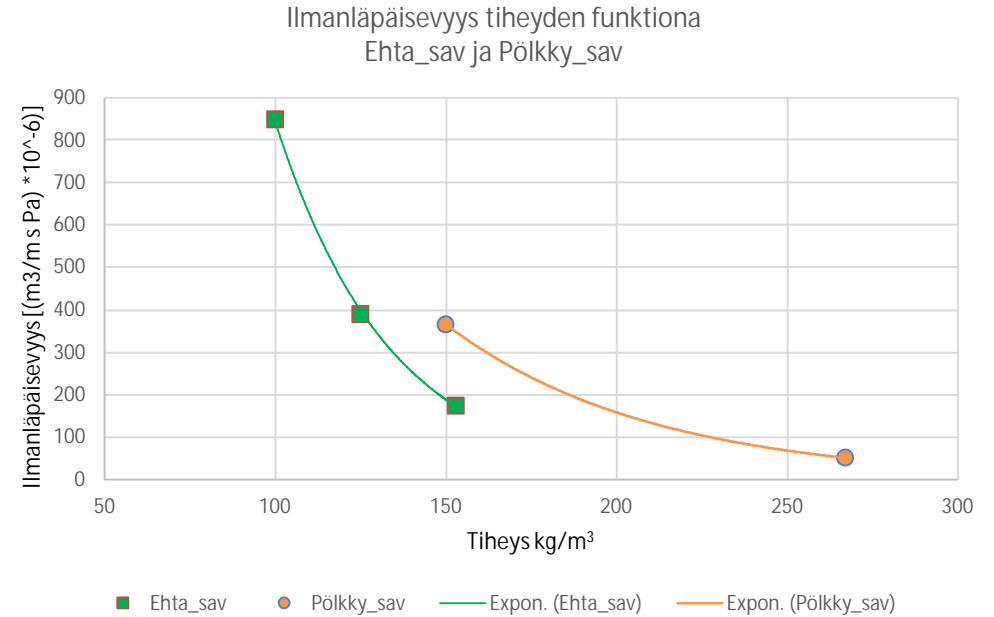
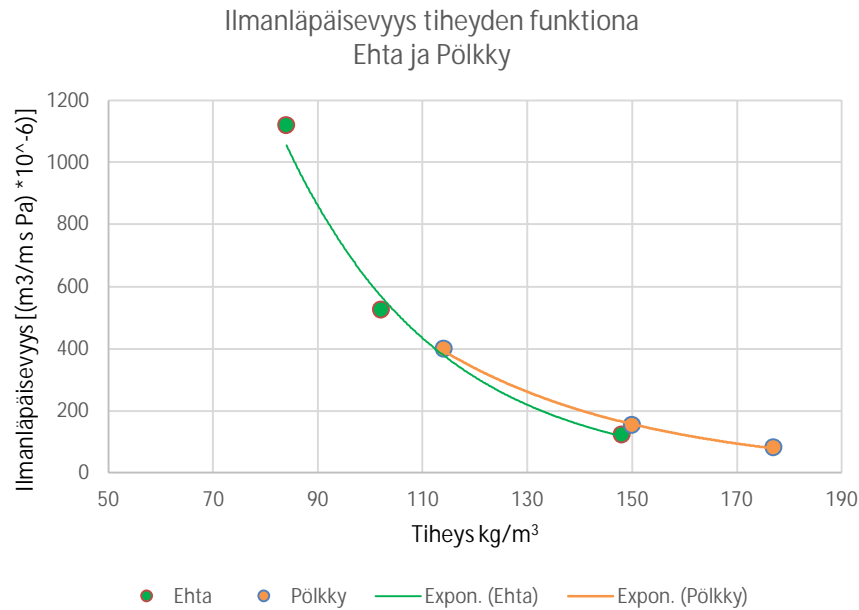
# Ilmanläpäisevyys

- Ilmanläpäisevyydellä tarkoitetaan materiaalin läpi kulkevaa ilman tilavuusvirtaa, joka läpäisee materiaalin kun ainekerroksen eri puolilla olevien ilmatilojen paine-ero on yksikön suuruinen.

Materiaali	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	"Puristuskerroin" (koekappaleen tiheyden suhde materiaalin tiheyteen vapaana)	Ilmanläpäisevyys [(m <sup>3</sup> /m s Pa) *10 <sup>-6</sup> ]
<b>Neliömäinen 200 mm x 200 mm x 200 mm</b>			
Pölkky (116 kg/m <sup>3</sup> )	116	1,0	495
Pölkky (180,0 kg/m <sup>3</sup> )	180	1,6	64
Ehta (100,0 kg/m <sup>3</sup> )	100	1,2	487
Nimetön (100,0 kg/m <sup>3</sup> )	100		516
Ehta_savetettu (84 kg/m <sup>3</sup> )	84		1910
Ehta_savetettu (150 kg/m <sup>3</sup> )	150		265
Pölkky_savetettu(148 kg/m <sup>3</sup> )	148		545
Pölkky-savetettu (220,1 kg/m <sup>3</sup> )	220		115
Pölkky-savetettu (266 kg/m <sup>3</sup> )	266		62
<b>Pyöreä halkaisija 150 mm x 200 mm</b>			
Ehta (84 kg/m <sup>3</sup> )	84	1,0	1120
Ehta(148 kg/m <sup>3</sup> )	148	1,8	122
Ehta (102 kg/m <sup>3</sup> )	102	1,2	526
Pölkky (114 kg/m <sup>3</sup> )	114	1,0	398
Pölkky (150 kg/m <sup>3</sup> )	150	1,3	153
Pölkky(177 kg/m <sup>3</sup> )	177	1,6	80
Ehta_savetettu (100 kg/m <sup>3</sup> )	100	1,2	848
Ehta_savetettu (125 kg/m <sup>3</sup> )	125	1,5	390
Ehta_savetettu (153 kg/m <sup>3</sup> )	153	1,8	174
Pölkky-savetettu (150 kg/m <sup>3</sup> )	150	1,0	366
Pölkky-savetettu (267 kg/m <sup>3</sup> )	267	1,8	52

# Ilmanläpäisevyys -asennustiheyden vaikutus

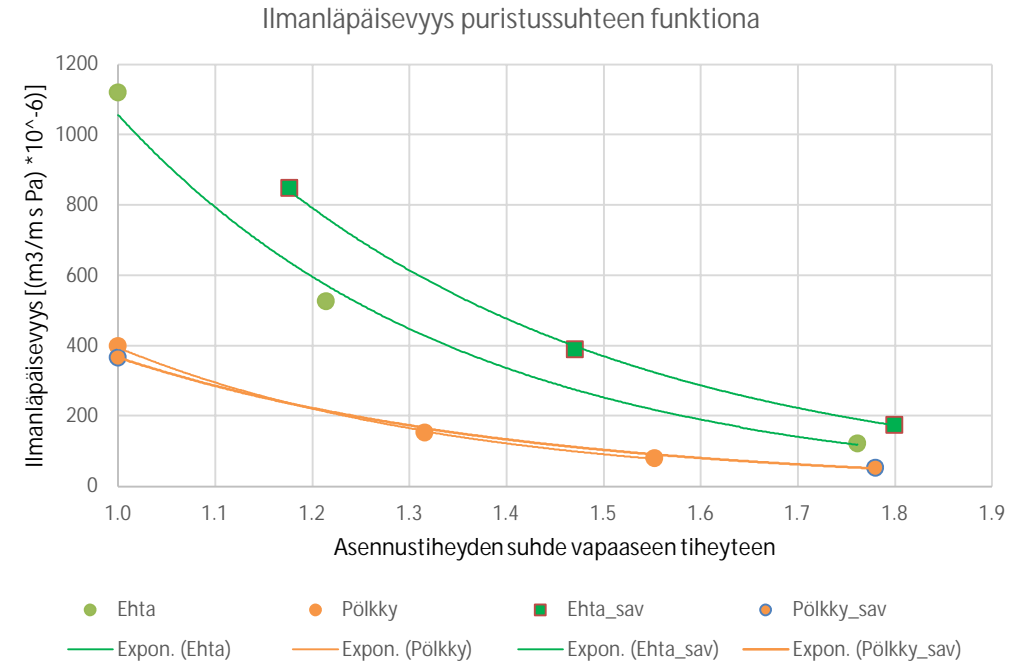
- Ilmanläpäisevyys nousee eksponentiaalisesti tiheyden pienentyessä.





# Ilmanläpäisevyys - savetuksen vaikutus

- Kun piirretään kuvaaja, jossa pystyakselilla on ilmanläpäisevyys ja vaaka-akselilla on asennustiheyden suhde vapaaseen tiheyteen, nähdään että savetetulla Pölkylä savetuksella ei ole havaittua merkittävää vaikutusta ilmanläpäisevyyteen, mutta Ehdalla vaikutusta on.
- Mahdollisesti tämä johtuu siitä, ettei itse Ehdassa ole hienoinesta kuin myös siitä, että Ehdan lastukoko on suurempaa ja paalista purettu eriste on muuttunut ilmavammaksi savetuksen yhteydessä (kastelu, turpoaminen)



# Ilmanläpäisevyys -vertailu muihin eristeisiin (RIL225)

**Taulukko L2-2.** Puhallettävien lämmöneristeiden ilmanläpäisevyyden  $k_s$  ja ilmavirranvastuksen  $AF$ , yleiset suunnitteluarvot (YP = yläpohja ja US = ulkoseinä).

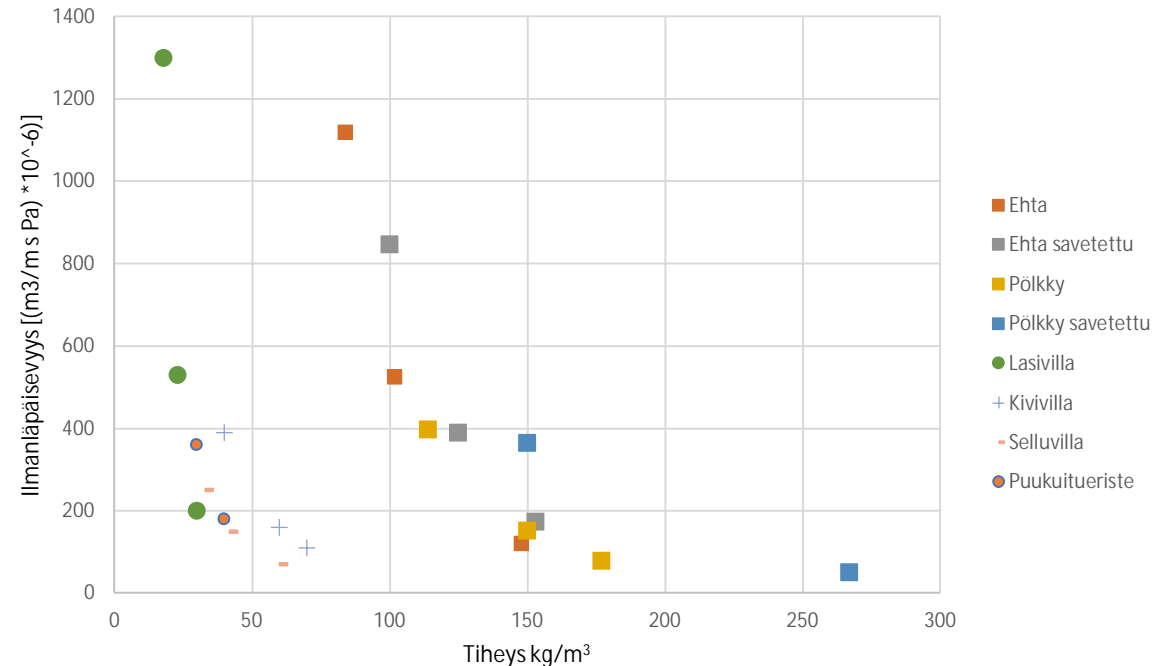
Lämmöneriste	Rakenne	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Ilmanläpäisevyys, $k_s$ ×10 <sup>-6</sup> [m <sup>2</sup> /(m·s·Pa)]	Ilmavirranvastus, $AF$ , [kPa·s/m <sup>2</sup> ]
Lasivilla	YP, avoin pinta	18	1300	0,77
Lasivilla	YP/US, kotelopuhallus	23	530	1,9
Lasivilla	YP/US, kotelopuhallus	30	200	5,0
Kivivilla	YP, avoin pinta	40	390	2,6
Kivivilla	YP, kotelopuhallus ≤ 45°	60	160	6,3
Kivivilla	YP/US, kotelopuhallus > 45°	70	110	9,1
Selluvilla	YP, avoin pinta	33	250	4,0
Selluvilla	YP, kotelopuhallus ≤ 45°	42	150	6,7
Selluvilla	YP/US, kotelopuhallus > 45°	60	70	14
Puukuitueriste	YP, avoin pinta	30	360	2,8
Puukuitueriste	YP/US, kotelopuhallus	40	180	5,6
Kutterinlastu <sup>1)</sup>	YP, avoin pinta	100	490	2,0
Kutterinlastu <sup>1)</sup>	YP/US, kotelopuhallus	150	130	7,7
Kutterinlastu <sup>2)</sup>	YP, avoin pinta	120	400	2,5
Kutterinlastu <sup>2)</sup>	YP/US, kotelopuhallus	180	80	13
Savetettu kutterinlastu <sup>1), 3)</sup>	YP, avoin pinta	110	670	1,5
Savetettu kutterinlastu <sup>1), 3)</sup>	YP/US, kotelopuhallus	160	180	5,6
Savetettu kutterinlastu <sup>2), 3)</sup>	YP, avoin pinta	150	370	2,7
Savetettu kutterinlastu <sup>2), 3)</sup>	YP/US, kotelopuhallus	260	60	17

<sup>1)</sup> Ei sisällä hienoainesta.

<sup>2)</sup> Sisältää hienoainesta n. 20 % puuaineksen kuivapainosta

<sup>3)</sup> Saven sekoitussuhde kutterinlastuun paino-osissa 1:2.

Ilmanläpäisevyyden tiheyden funktiona -vertailu muihin eristemateriaaleihin



# Lämmönjohtavuus

# Lämmönjohtavuus - lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vaikutus

- Lämmönjohtavuus vaihteli tiheydestä ja kosteusolosuhteesta riippuen välillä 0,048-0,071
- Mitattu 10 °C keskilämpötilassa 10 °C lämpötilaerolla eri suhteellisissa kosteuksissa tasapainotetuille materiaaleille. Korkeassa suhteellisessa kosteudessa mitattu myös 5 °C keskilämpötilassa
- Lämmönjohtavuus nousee suuremmassa suhteellisessa kosteudessa
- **Lähellä rakenteen ulkopintaa suurempi suhteellinen kosteus, mutta samanaikaisesti myös kylmempää**
- Kylmemmässä lämmönjohtavuus pienempi.
- Savetuksella ei havaittavaa vaikutusta lämmönjohtavuuteen.
- Eri kutterinlastuilla, eri asennustiheyksissä lämmönjohtavuudessa eroa.
- Hygroσκοoppisen materiaalin mittaaminen kosteana tuottaa helposti virhettä koetulokseen. Pidemmällä mittausajalla mitattu lämmönjohtavuus todennäköisesti alenisi kosteuden tasoittumisen myötä. Suositus ja tuotetestauksessa hygroσκοoppiset materiaalit on suositeltava testata kuivana.



Materiaali	$\lambda$ [W/(mK)]			
	13 % RH	50 % RH	94 %RH	94 %RH
Olosuhde ->	13 % RH	50 % RH	94 %RH	94 %RH
Lämpötilaero ->	5-15 °C	5-15 °C	5-15 °C	0-10 °C
Ehta -100 kg/m <sup>3</sup>	0,048	0,053	0,069	0,062
Pölkky -175 kg/m <sup>3</sup>	0,051	0,059	0,070	0,063
Pölkky-savetettu -260 kg/m <sup>3</sup>	0,055	0,060	0,071	0,065

# Lämmönjohtavuus - tiheyden vaikutus

- Tiheydet 100 kg/m<sup>3</sup>, 125 kg/m<sup>3</sup> ja 150 kg/m<sup>3</sup>
- 10 °C keskilämpötilassa 0,052-0,053 W/(mK)
- 20 °C keskilämpötilassa 0,054-0,056 W/(mK)
- Lämmönjohtavuudessa pientä kasvua tiheyden kasvaessa

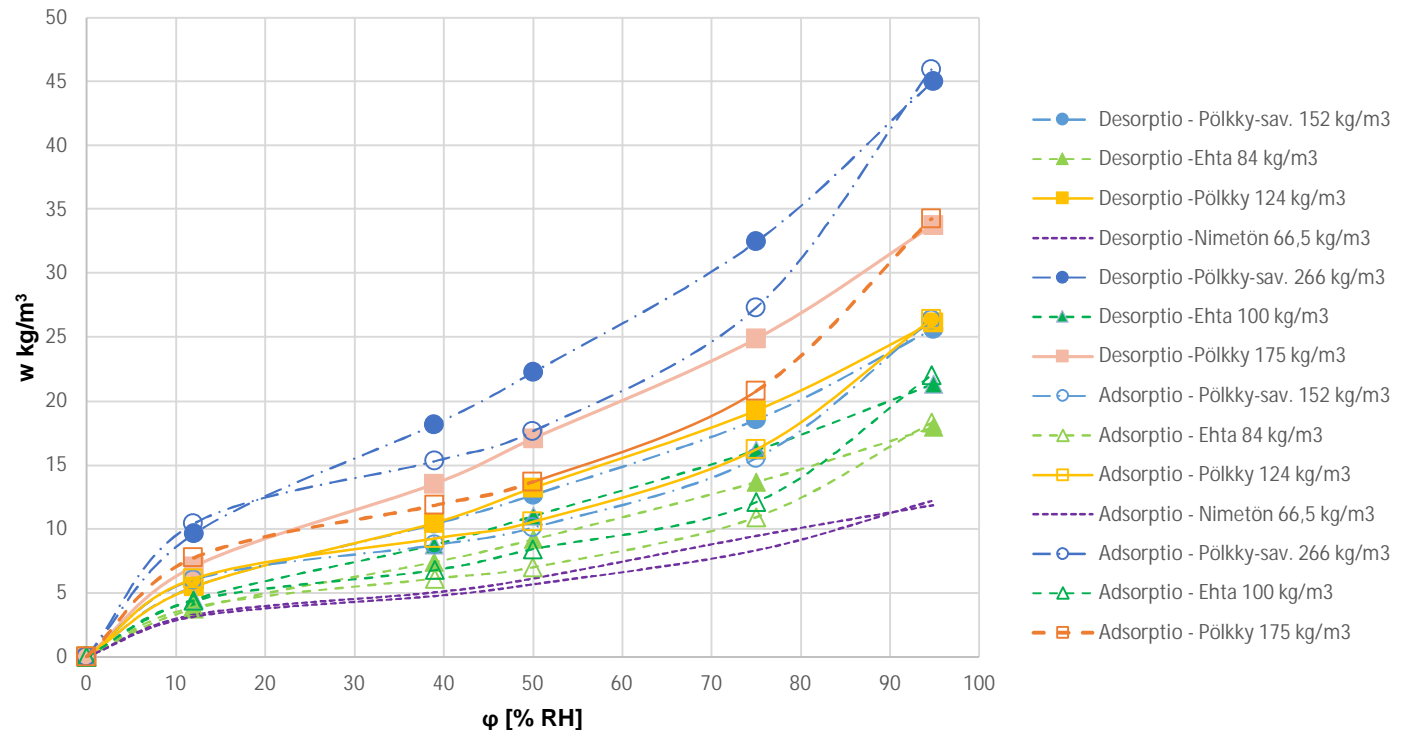
Koekappale	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Olosuhde (tasapainotus) [% RH]	Paksuus [mm]	Lämpötila ylälevy [°C]	Lämpötila alalevy [°C]	Keski-lämpötila [°C]	Mitattu lämmönjohtavuus [W/(m·K)]
Ehta savetettu	<b>100</b>	50	100	15	5	<b>10</b>	<b>0,052</b>
Ehta savetettu	<b>125</b>	50	100	15	5	<b>10</b>	<b>0,052</b>
Ehta savetettu	<b>150</b>	50	100	15	5	<b>10</b>	<b>0,053</b>
Ehta savetettu	<b>100</b>	50	100	25	15	<b>20</b>	<b>0,054</b>
Ehta savetettu	<b>125</b>	50	100	25	15	<b>20</b>	<b>0,056</b>
Ehta savetettu	<b>150</b>	50	100	25	15	<b>20</b>	<b>0,056</b>

# Tasapainokosteus

# Tasapainokosteus - asennustiheyden vaikutus

- Hygroskooppinen tasapainokosteus tarkoittaa sitä kosteuspitoisuutta, johon materiaali asettuu tietyssä ympäristön ilman suhteellisessa kosteudessa ja lämpötilassa.
- Hygroskooppinen materiaali sitoo ja luovuttaa kosteutta ilman suhteellisen kosteuden vaihteluiden mukaan.
- Hygroskooppisella materiaalilla hystereesi, ero kuivuvan (desorptio) ja kostuvan (adsorptio) materiaalin tasapainokosteuden välillä.
- Eri kutterinlastujen välillä ei merkittävää eroa.
- Tasapainokosteus nousee tiheyden noustessa.

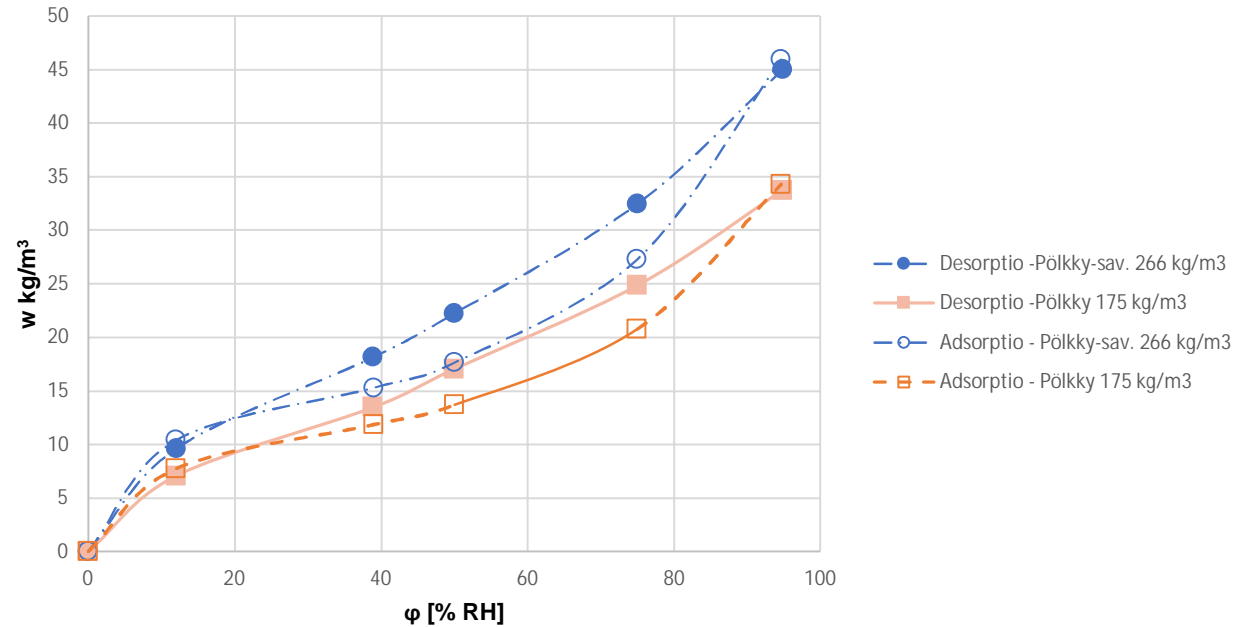
Hygroskooppinen tasapainokosteus - kg/m<sup>3</sup>



# Tasapainokosteus - savetuksen vaikutus

- Vertailussa kutterinlastu ja savetettu kutterinlastu seinärakennetiheyksissä. Nämä vastaavat suunnilleen toisiaan. Molemmissa tiheyden suhde vapaaseen tiheyteen "puristussuhde" on 1,6-1,8
- Savetuksen vaikutus näkyy korkeampana tasapainokosteuspitoisuutena.

Hygroskooppinen tasapainokosteus - kg/m<sup>3</sup>





# Savirappaus

# Savirappaus

- ECOSAFE-projektissa tutkittiin savirappausta sisäverhouksena ja erityisesti sen palo-ominaisuuksia
- Rakennusfysikaalisista ominaisuuksista savirappaukselle tutkittiin lämmönjohtavuus ja vesihöyrynläpäisevyys



# Savirappaus 1. polttokoe

- Rappaus 2-kerrosrappauksena
- Laasti valmistettiin noin päivää ennen rappausta. Kuiva-aineet pois lukien sellukuitu sekoitettiin ensin 200 litran tasosekoittajalla. Tämän jälkeen lisättiin vesi sekä veteen sekoitettu sellukuitu. Laasti sekoitettiin vielä vispiläkoneella ennen rappaustyön aloittamista ja samalla lisättiin vettä sopivan koostumuksen saavuttamiseksi.
- Rappausalustana käytettiin 15 mm vaneria ja 23 raakaponttilaudoitusta. Ennen rappausta rappausalusta kostutettiin vesisumulla, jonka annettiin imeytyä puumateriaaliin ennen rappauksen aloittamista.
- Rappaus rappausruiskulla. Ensimmäinen rappauskerros 15 mm kerros.
- Ensimmäisen ja toisen kerroksen välissä 19 mm x 19 mm silmäkoolla oleva rappausverkko hakasnaulaimella.
- Toinen 15 mm kerros rapattiin samoin kuin ensimmäinen.

Raaka-aine	Valmistaja	Menekki painoprosenttia [%]
Hiekka 0–1 mm	Kauniston sora	18
Puhallushiekka 0,2–2 mm	Kauniston sora	28
Hiekka 2–3 mm	Kauniston sora	17
Sepeli 3–7 mm	Kauniston sora	9
Savijauho	Tiileri, Tarvasjoki	13
Sideaineet	Ruti rex, kopinpehmike havupuukuidusta  (silputtuna oksasilppurilla)	0,1
	Exo Terra Snakebedding  puukuitupohjainen kuivike	0,2
	Sellukuitu	0,02
Vesi		15

# Savirappaus 2. polttokoe

- Rappaus
  - Ensimmäinen kerros vastaavasti kuin 1. polttokokeessa ja
  - 19 mm x 19 mm silmäkoolla oleva rappausverkko
  - Toinen kerros 10 mm kerroksena ja pinta hierrettiin tiiviimmäksi muovisella hierrinlastalla
  - Kolmas kerros 5 mm kerroksena ja pinta hierrettiin tiiviimmäksi muovisella hierrinlastalla

1. rappauskerros	Valmistaja	Menekki painoprosenttia [%]
Hiekka 0–1 mm		18
Puhallushiekka 0,2–2 mm		28
Hiekka 2–3 mm		17,19
Sepeli 3–7 mm		9
Savijauho	Tiileri, Tarvasjoki	13
Sideaineet	Ruti rex, kopinpehmike havupuukuidusta silputtuna	0,1
	Puukuitupohjainen kuivike	0,2
	Sellukuitu	0,02
Vesi		15

2. rappauskerros	Menekki painoprosenttia [%]
Hiekka 0–1 mm	20
Puhallushiekka 0,2–2 mm	41
Hiekka 2–3 mm	10
Savijauho	13
Sideaineet	
havupuukuitu kopinpehmike	0,2
	0,01
Vesi	16

3. rappauskerros	Menekki painoprosenttia [%]
Hiekka 0–1 mm	47
Puhallushiekka 0,2–2 mm	23
Savijauho	13
Sideaineet	
	0,05
Vesi	17

# Savirappaus - Lämmönjohtavuus

- Mitattu lämmönjohtavuus 0,38 W/(mK)
- Pinta karkea, joka vaikuttaa kontaktiin levyjen ja materiaalin välillä (ilmarakoa). Tulos on todennäköisesti todellista lämmönjohtavuutta hieman parempi.
- Vertailuna kalkkisementtilaasti 0,65 W/(mK), kalkkilaasti 0,5 W/(mK), täystiili 0,5 W/(mK)

Koekappale	Olosuhde (tasapainotus) [% RH]	Paksuus [mm]	Lämpötila ylälevy [°C]	Lämpötila alalevy [°C]	Keski-lämpötila [°C]	Mitattu lämmönjohtavuus [W/(m·K)]	Sarjan keskiarvo
S_1.1	50	26,44	20	0	10	0,397	
S_1.2	50	28,57	20	0	10	0,362	0,38
<del>S_1.3</del>	<del>50</del>	<del>29,69</del>	<del>20</del>	<del>0</del>	<del>10</del>	<del>0,2233</del>	
S_1.1	50	26,44	30	10	20	0,407	
S_1.2	50	28,57	30	10	20	0,369	0,39
<del>S_1.3</del>	<del>50</del>	<del>29,69</del>	<del>30</del>	<del>10</del>	<del>20</del>	<del>0,2309</del>	

# Savirappaus - Vesihöyrynläpäisevyys

- Osassa kappaleita halkeamia. Näiden kohdalla näkyy selviä muodonmuutoksia (voimakkaampi kosteusvirta)
- Tulokset sisältävät suurta epävarmuutta johtuen taustan halkeilusta, pinnan karkeudesta ja "kuhmuraisuudesta".
- Vesihöyrynläpäisevyys samaa luokkaa kuin Fermacell -kipsilevyllä (savirappauksen paksuuden ollessa n. 27mm ja Fermacell-kipsilevyn paksuus 12,5mm)

Kosteuspari 17-50			
Suure	Yksikkö	Savirappaus	Vertailu (Fermacell kipsilevy)
Vesihöyrynläpäisykerroin $W_v$	m/s	3,10E-04	2,71E-04
Vesihöyrynläpäisykerroin $W_p$	kg/m <sup>2</sup> sPa	2,29E-09	2,00E-09
<b>Vesihöyrynvastus <math>Z_v</math></b>	<b>s/m</b>	<b>3,22E+03</b>	<b>3,69E+03</b>
Vesihöyrynvastus $Z_p$	m <sup>2</sup> sPa/kg	4,37E+08	5,01E+08
<b>Vesihöyrynläpäisevyys <math>\delta_v</math></b>	<b>m<sup>2</sup>/s</b>	<b>8,29E-06</b>	<b>3,39E-06</b>
Vesihöyrynläpäisevyys $\delta_p$	kg/msPa	6,11E-11	2,50E-11
Vesihöyryn diffuusiovastuskerroin $\mu$	-	3,23	7,90
Diffuusiovastuskerroin $S_d$	m	0,09	0,10

**Lisää**

# Lämmönjohtavuus...

Koekappale	$\phi$ [%RH]	$\lambda$ [W/(mK)]	$\lambda_{ka}$ [W/(mK)]	K.hajonta	L.väli 95 %	Alaraja	Yläraja
E-2.1	13	0,048	0,0479	4,98E-04	1,24E-03	0,047	0,049
E-2.2	13	0,048					
E-2.3	13	0,048					
E-5.1	50	0,053	0,0529	1,01E-04	2,50E-04	0,053	0,053
E-5.2	50	0,053					
E-5.3	50	0,053					
E-1.1	93	0,067	0,0668	9,42E-04	2,34E-03	0,064	0,069
E-1.2	93	0,067					
E-1.3	93	0,066					
P-4.1	13	0,051	0,0514	1,73E-04	4,31E-04	0,051	0,052
P-4.2	13	0,051					
P-4.3	13	0,052					
P-5.1	50	0,059	0,0587	1,65E-04	4,09E-04	0,058	0,059
P-5.2	50	0,059					
P-5.3	50	0,059					
P-3.1	93	0,069	0,0695	2,95E-04	7,33E-04	0,069	0,070
P-3.2	93	0,070					
P-3.3	93	0,070					
PS-4.1	13	0,057	0,0555	1,39E-03	3,45E-03	0,052	0,059
PS-4.2	13	0,056					
PS-4.3	13	0,054					
PS-5.1	50	0,059	0,0596	6,16E-04	1,53E-03	0,058	0,061
PS-5.2	50	0,060					
PS-5.3	50	0,060					
PS-3.1	93	0,071	0,0712	1,23E-03	3,06E-03	0,068	0,074
PS-3.2	93	0,073					
PS-3.3	93	0,070					
R-1.1	50	0,054	0,0538	5,50E-04	1,37E-03	0,052	0,055
R-1.2	50	0,053					
R-1.3	50	0,054					

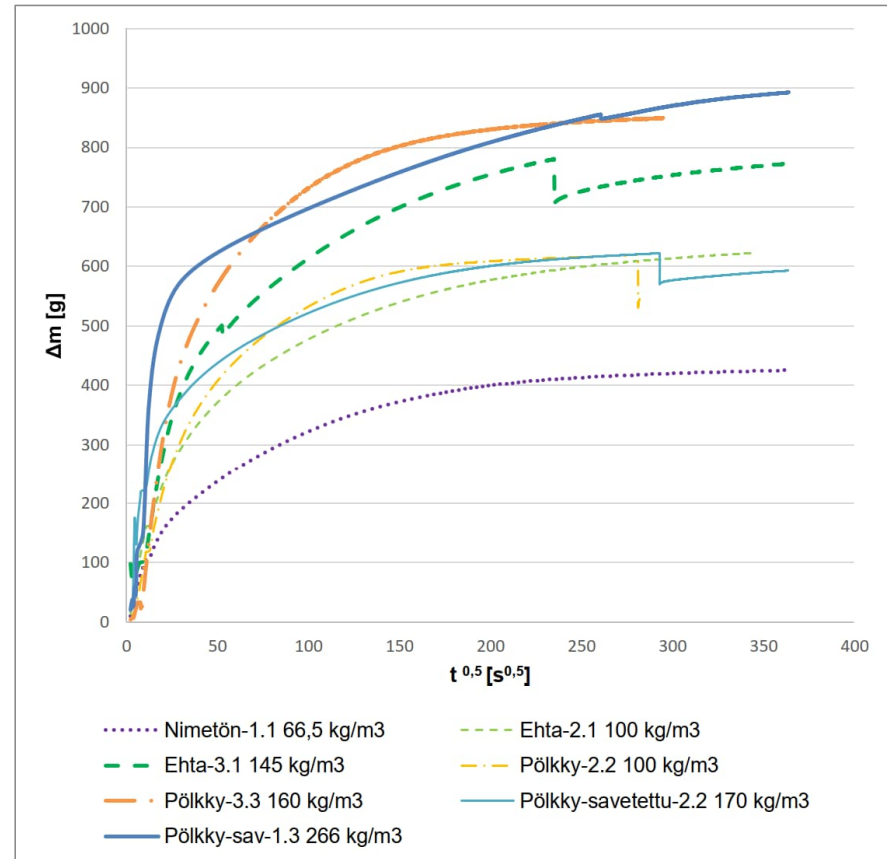


# Veden imeytymiskerroin - tiheyden vaikutus

- Materiaaliominaisuus, joka kuvaa veden imeytymisnopeutta koekappaleessa, joka laitetaan vesikosketukseen.
- Odotetusti imeytyneen veden määrä määräytyy tiheyden mukaan.

Taulukko 5.8. Tulokset, veden imeytyminen.

Materiaali	Yksikkö	Olo- suhde [% RH]	Pölkky 160 kg/m <sup>3</sup>	Ehta, 100 kg/m <sup>3</sup>	Pölkky- sav. 266 kg/m <sup>3</sup>	Nimetön, 66,5 kg/m <sup>3</sup>
Veden imeytymis- kerroin	$A_w$ kg/(m <sup>2</sup> s <sup>2</sup> )	50	0,6272 0,34–0,9	0,2305 0,15–0,41	1,0929 0,21–2,47	0,3857 0,10–0,39
Veden imeytymis- kerroin	$A_w.24$ [kg/(m <sup>2</sup> s <sup>2</sup> )]	50	0,144	0,091	0,144	0,07
Kapillaarinen kyllästyskosteus- pitoisuus	$W_{cap}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	50	478 434–484	329 288–338	489 448–518	234 216–246



Kuva 5.4 Kutterinlastumateriaalien tiheyden vaikutus veden imeytymiseen ajan neliöjuuren funktiona.