



TAMPEREEN
TEKNILLINEN
YLIOPISTO



Aalto-yliopisto

TAMK
TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

Betonikuorielementtien kuivuminen laboratoriokokeissa ja laskennallisesti

Pauli Sekki, DI
TTY/Rakennusfysiikka

TeKes

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Tutkimus

1. Laboratoriokokeet

- Betonisen sisäkuoren kuivumisen seuraaminen käytettäessä erilaisia eristeitä
- Riittävän kuivumisajan selvittäminen



Tutkimus

2. Laskennallinen tarkastelu

- Kuorielementtirakenteen kuivumisen tarkastelu käytettäessä erilaisia eristeitä
- Tutkimuksessa hyödynnettiin laboratoriomittauksia tarkasteltaessa kuivumista hydrataation huomioivalla laskentamallilla
- Tarkasteltiin kuorielementin sisäpinnalle asennettavan vedeneristeen vaikutusta elementin kosteusjakaumaan ja kuivumiseen.



Betonin kuivuminen

- Alkuvaiheessa
 - sitoutumiskuivuminen (hydrataatio) ja
 - haihtuminen betonin pinnalta merkittävimmät ilmiöt
- Syvemmältä betonissa kosteus siirtyy nesteenä sekä vesihöyrynä



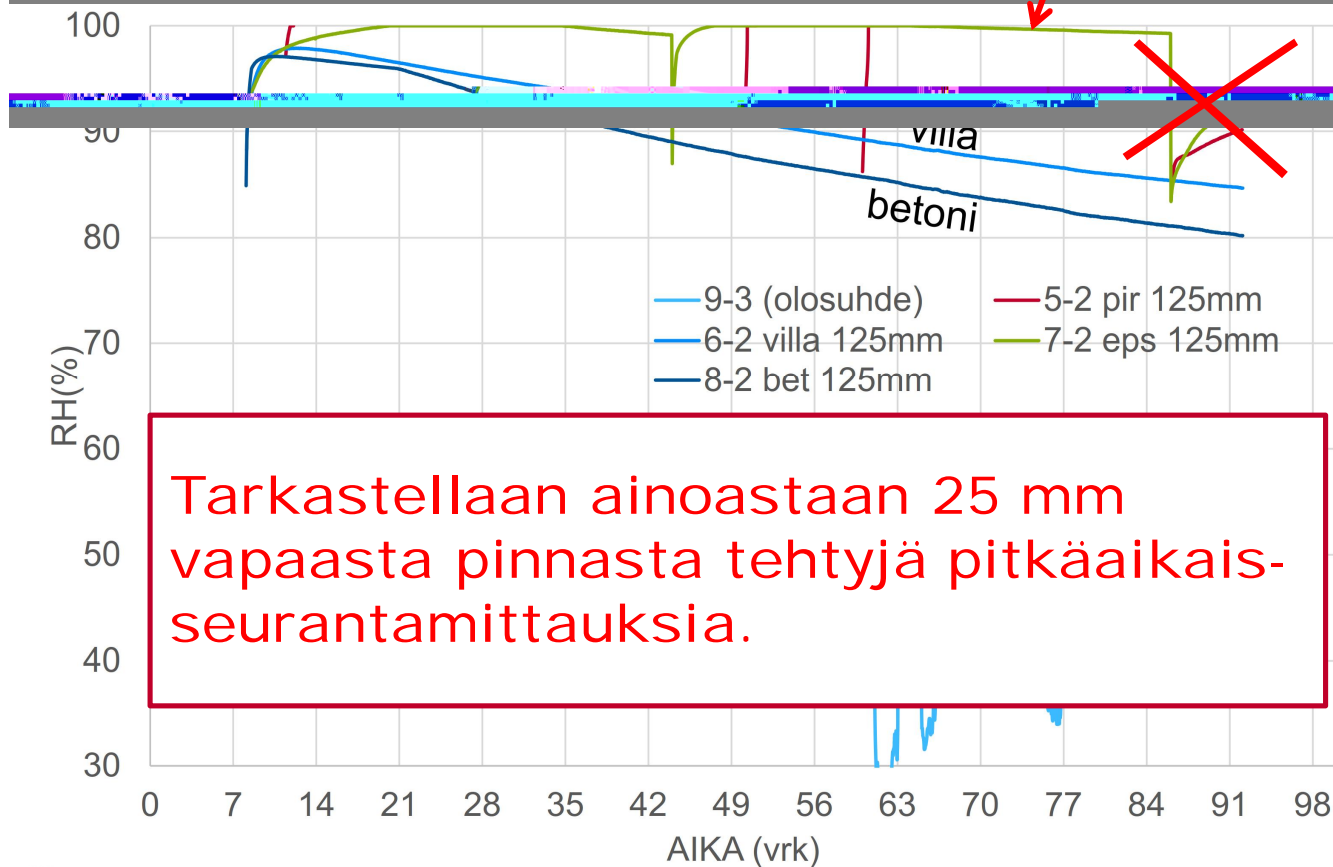
Laboratoriokokeet - kuorielementtikoeappaleet

1. **EPS: 150 mm betoni + EPS 60S 200mm**
(FF-EPS 60S), $U = 0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
2. **MV/VILLA: 150 mm betoni + Min.villa 205 mm**
(Paroc Cortex One), $U = 0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
3. **PIR: 150 mm betoni + PIR 150 mm**
(FF-PIR PLK, muovikalvo pinn.), $U = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
4. **BET: 150 mm betoni**

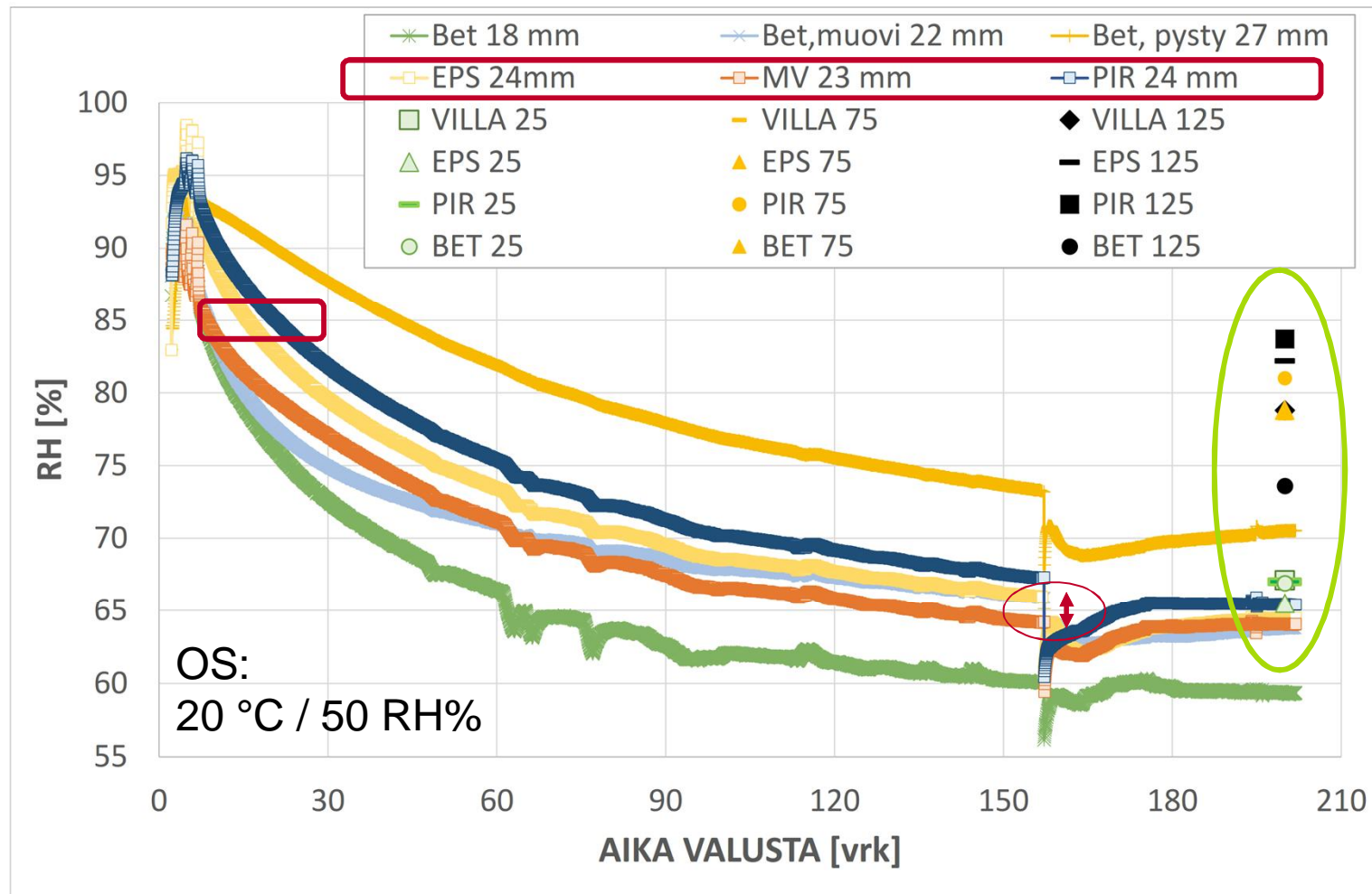


Koekappaleiden

Mittalaite soveltuu heikosti tuoreen betonin kosteusmittauksiin!



Koekappaleiden kosteusmittaukset



Porareikämittaukset – 200 vrk kohdalla

- Jakaumissa eristetyillä koekappaleilla ei suuria eroja.
- Mineraalivillaeristetty kuivunut hieman alhaisemmalle tasolle solumuovieristettyihin verrattuna.
- Eristämättömät koekappaleilla selkeästi havaittavissa kuivuminen kahteen suuntaan.

Mittaussyvyys	25 mm [RH%]	75 mm [RH%]	125 mm [RH%]
Mineraalivilla	67	79	79
PIR	67	81	84
EPS	66	79	82
EPS, jälkieristys 14 vrk	71	82	82
EPS, jälkieristys 28 vrk	71	81	80
Betoni	67	79	74
Betoni, pystyvalettu	70	80	73
Betoni, muovitettu	70	80	71



Yhteenveto kosteusmittauksista

- Sitoutumiskuivuminen laskee kosteuden noin 10 vrk aikana tasolle 90...95 RH%. Pintaosa 25 mm < 85 % alle kuukaudessa.
- 200 vrk kohdalla porareikämittausten perusteella ei merkittävää eroa eri tapausten välillä.
- Yksittäisen poranreikämittauksen perusteella ei voida kuitenkaan tehdä suurempia johtopäätöksiä.
- Tutkimuksen yhteydessä todettiin, että valittu anturi ei sovellu tuoreen betonin mittaamiseen, vaikka anturi näytti toimivan kalibroitaessa ~ 100 RH% suolaliuoksella.
- Seurantamittausten perusteella pintaosassa vain vähäinen ero solumuovieristettyjen ja mineraalivillaeristetyn välillä.



Laskennallinen tarkastelu

- Mallia kehitetty Vahanen Rakennusfysiikka Oy / Comsol Oy toimesta ja esitelty NSB2017 seminaarissa
linkki julkaisuun: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.015>
- Hydrataatio
 - Lämmöntuotto
 - Kosteusnielu
- Diffusiviteetti, kosteuden siirtyminen nesteenä
 - Perustuu mitattaviin ja erikseen arvioitaviin parametreihin
- Vesihöyryn läpäisevyys
 - Vakioarvo
 - Alkuvaiheen kuivumisessa vähäinen merkitys



Kuivumisen mallintaminen

Energia ja massatase

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot [k \nabla T + L_v \delta_p \nabla(\phi p_{sat})] + Q \quad Q = H_u \frac{d\alpha}{dt}$$

$$\xi \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot [\xi D_w \nabla \phi + \delta_p \nabla(\phi p_{sat})] + S \quad S = -\rho_s M_{f,cem} w_n \frac{d\alpha}{dt}$$

Diffusiiviteetti

$$D_w = C_1 \left\{ \alpha_0 + (1 - \alpha_0) \left[1 + \left(\frac{1 - \phi}{1 - \phi_c} \right)^n \right] \right\}$$

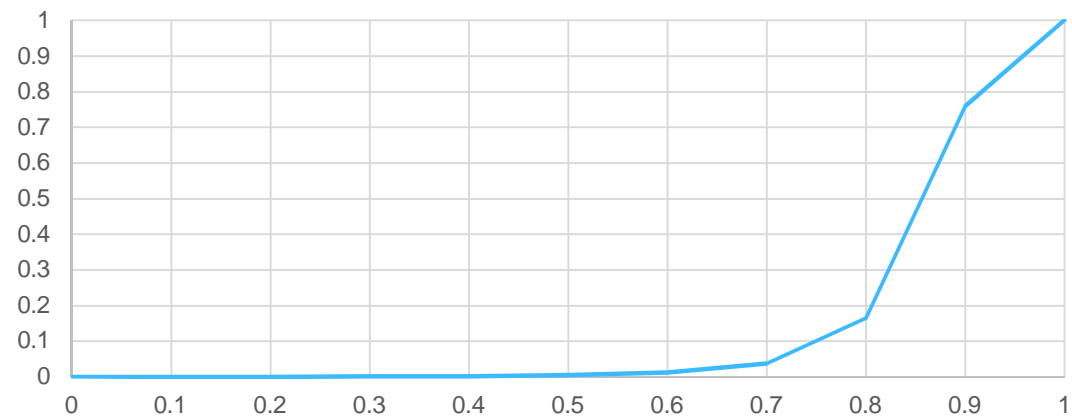


Hydrataatioaste

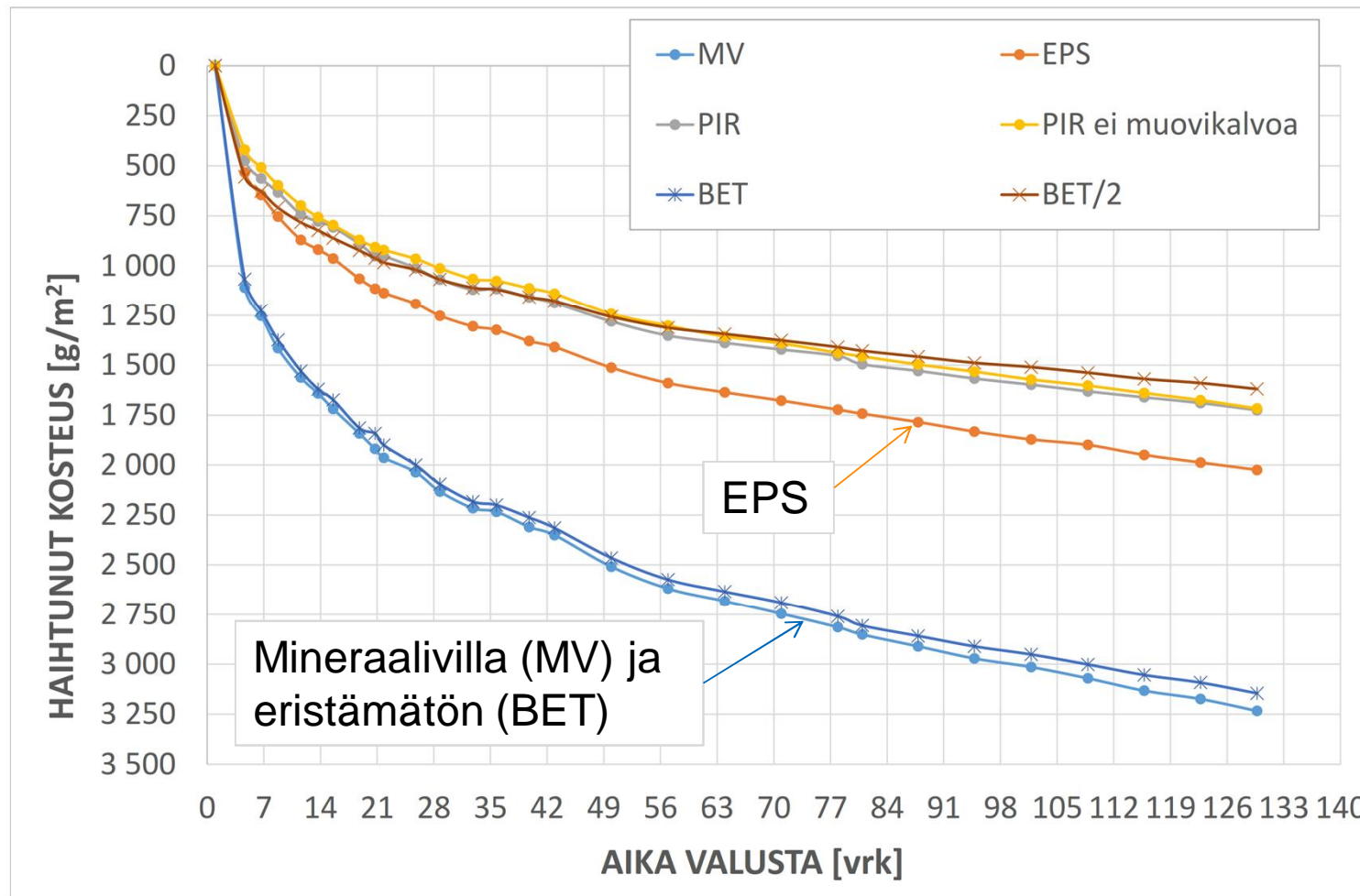
$$\frac{da}{dt} = \exp\left(\frac{E}{R T} - \frac{1}{T} b_{RH}\right) \frac{a_u b_{RH}^b}{t_e} \exp\left(\frac{E}{R T} - \frac{1}{T} b_{RH}\right)$$

$$b_{RH} \gg \frac{1}{1 + (7,5 - 7,5f)^4}^{-1}$$

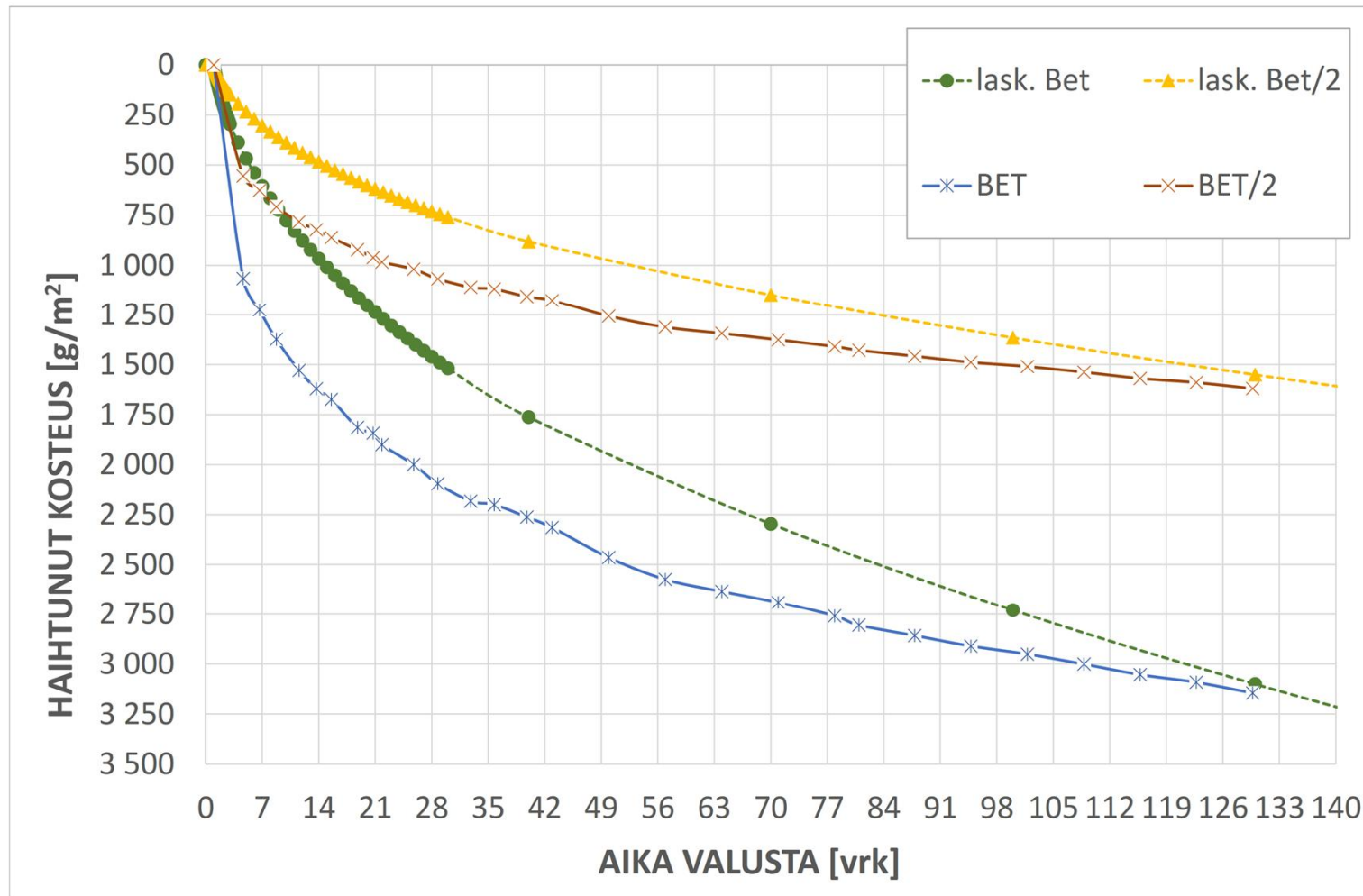
b_{RH}



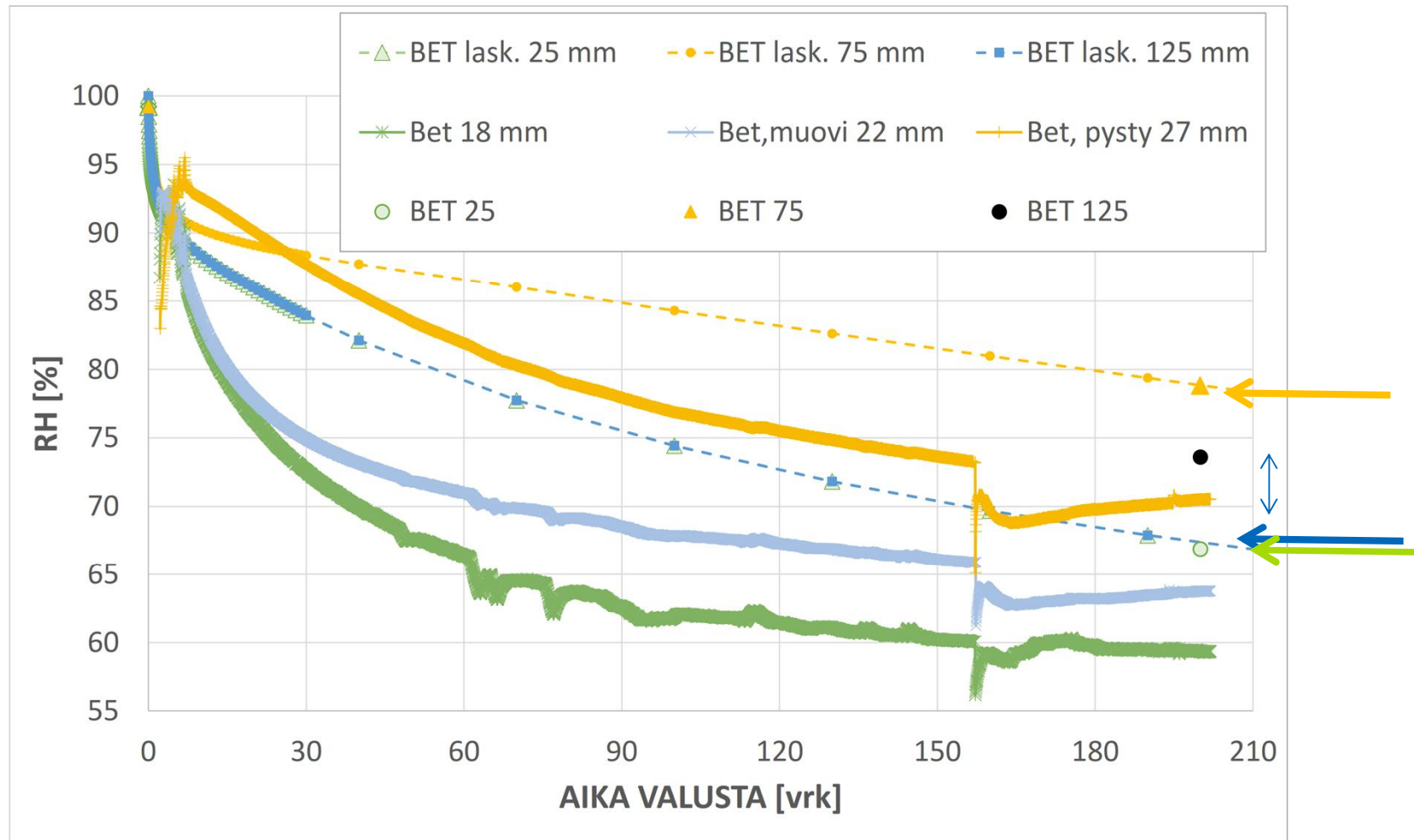
Punnituskokeet



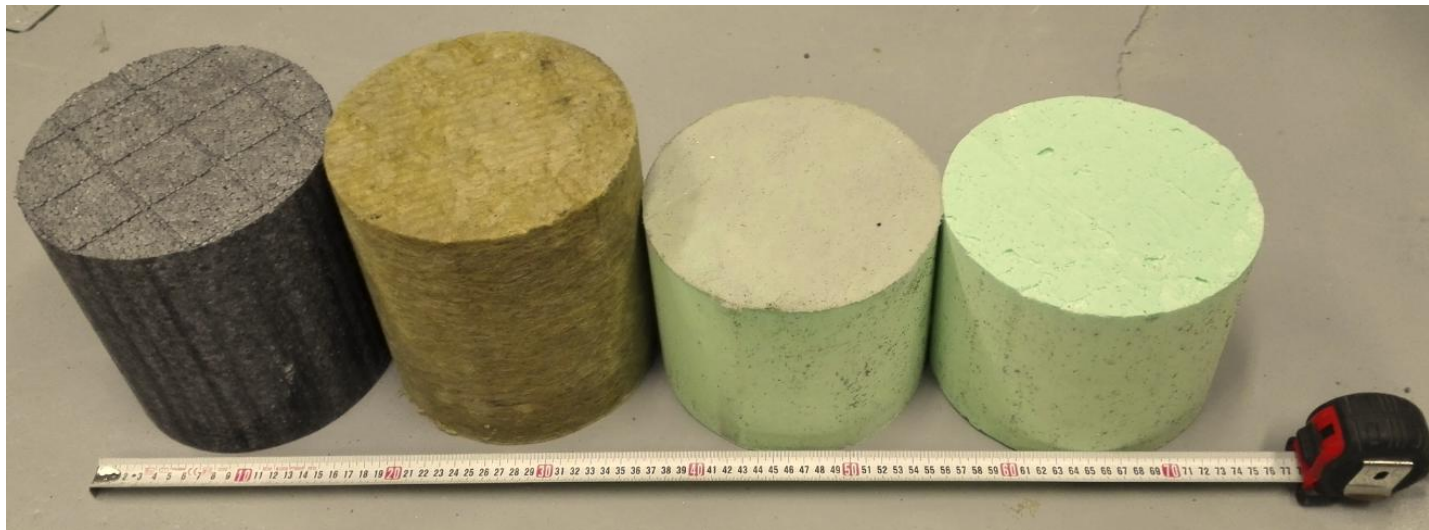
Laskenta vs. punnituskokeet



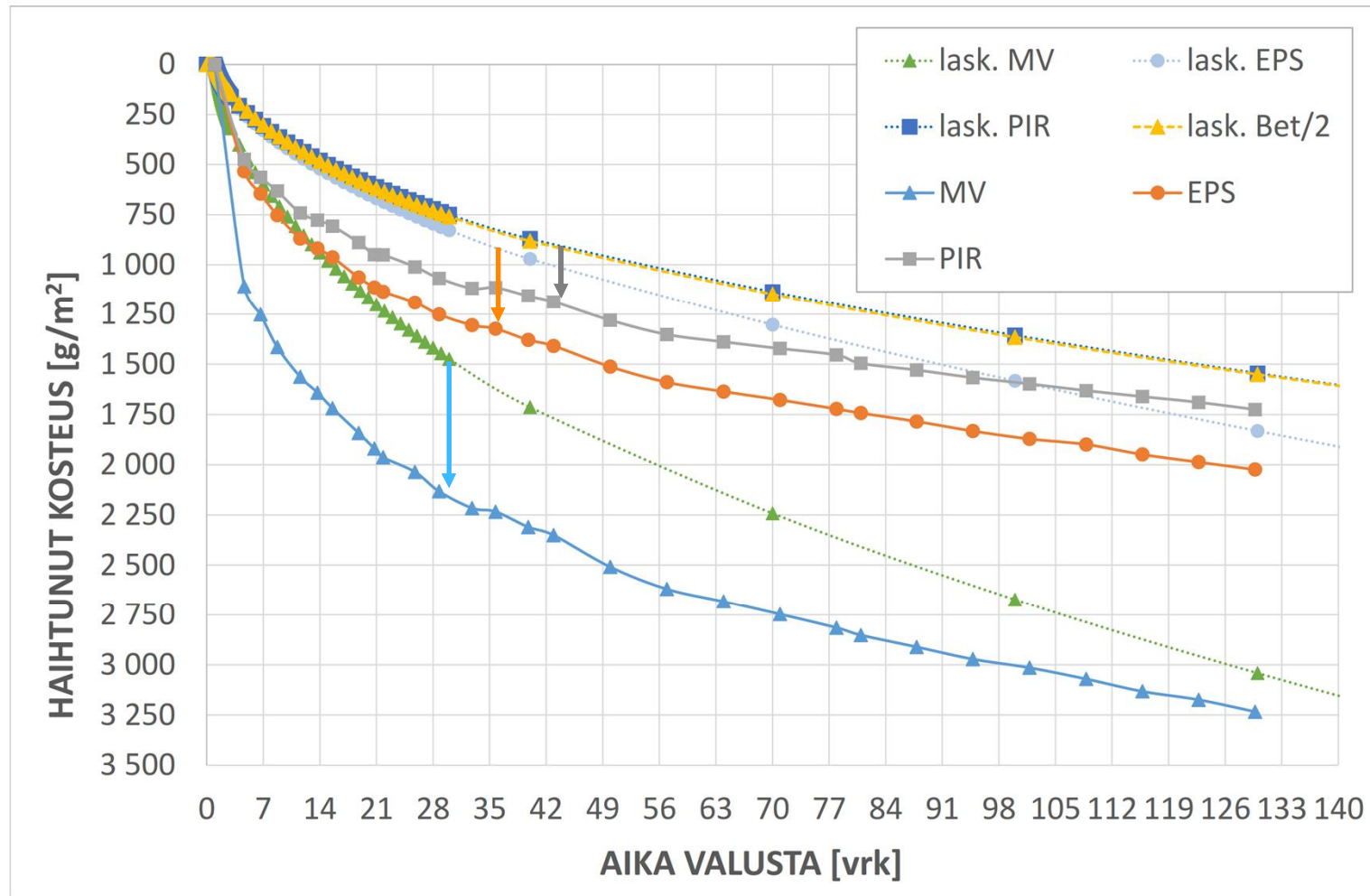
Laskenta vs. kosteusmittaukset



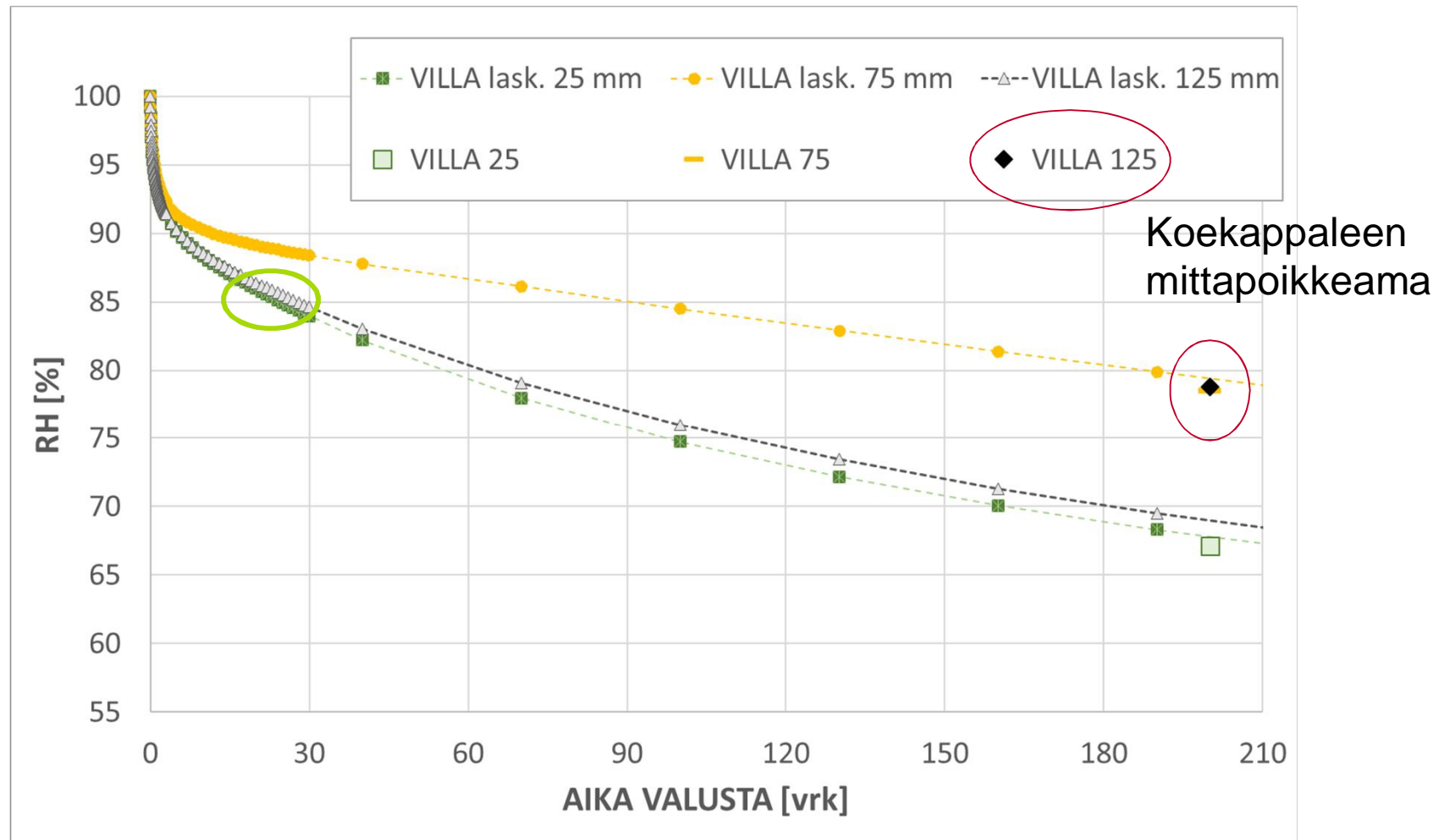
Eristevertailut



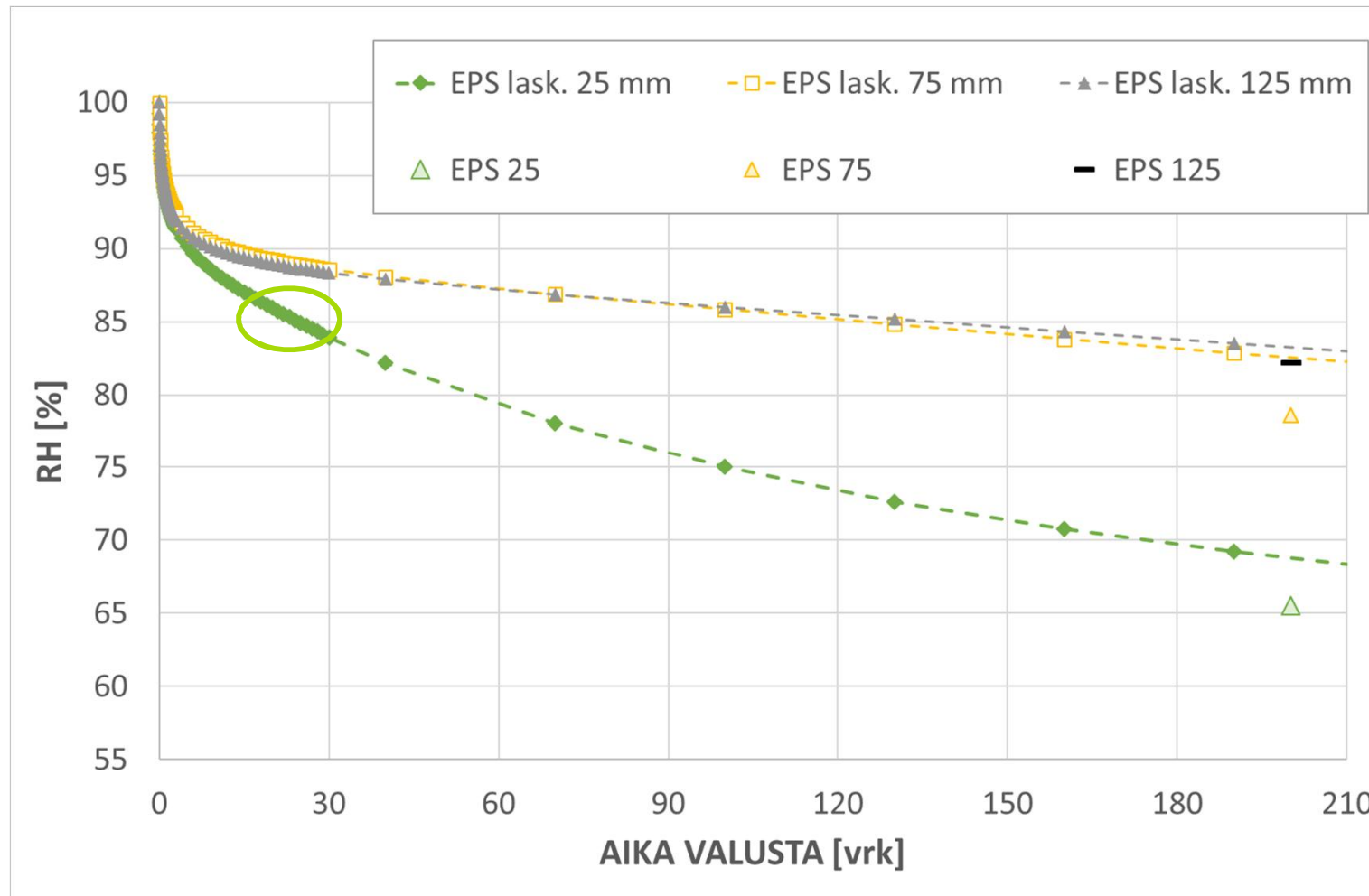
Laskenta vs. punnituskokeet - eristevertailut



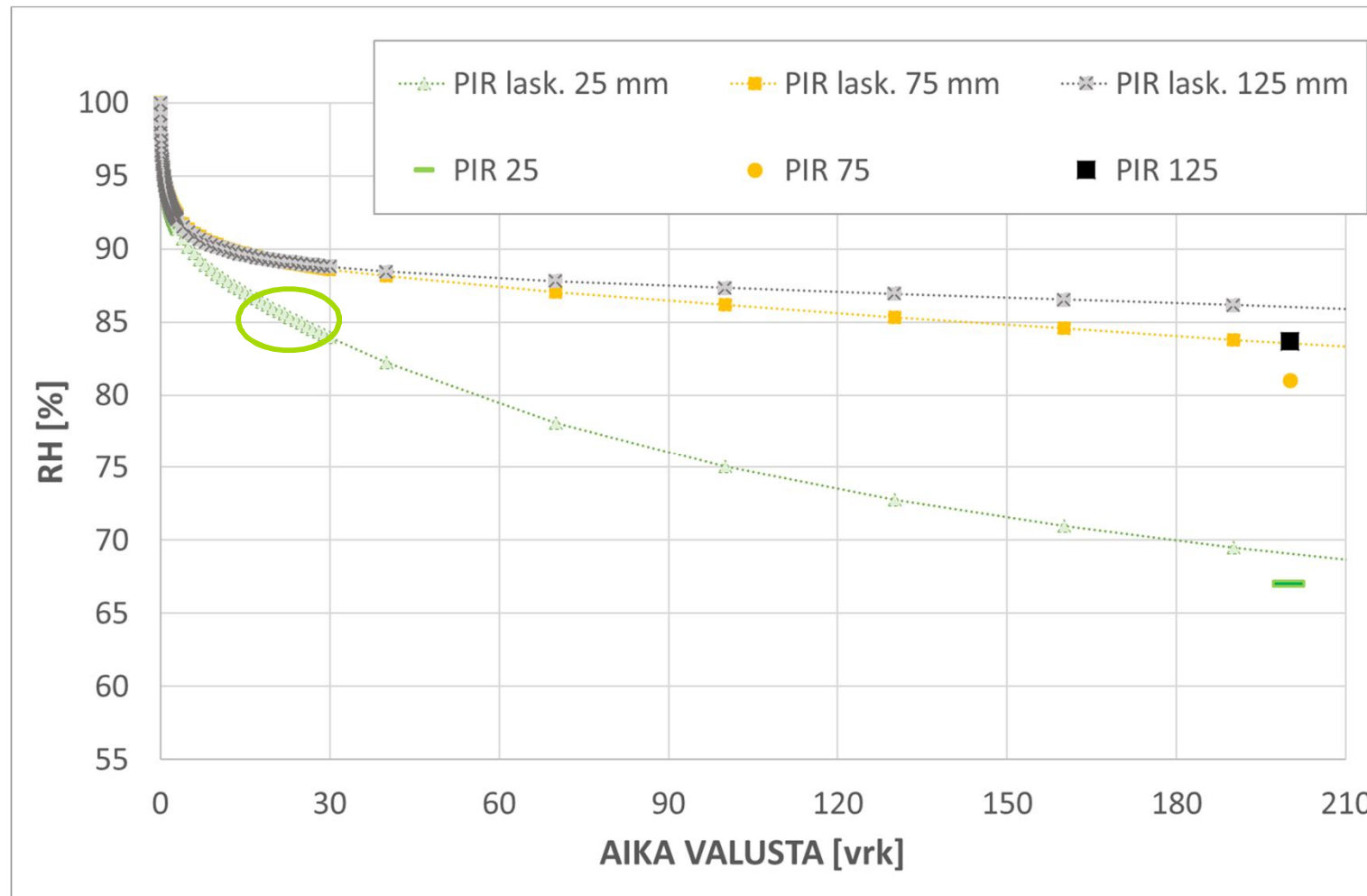
Laskenta vs. kosteusmittaukset - eristevertailut: MV



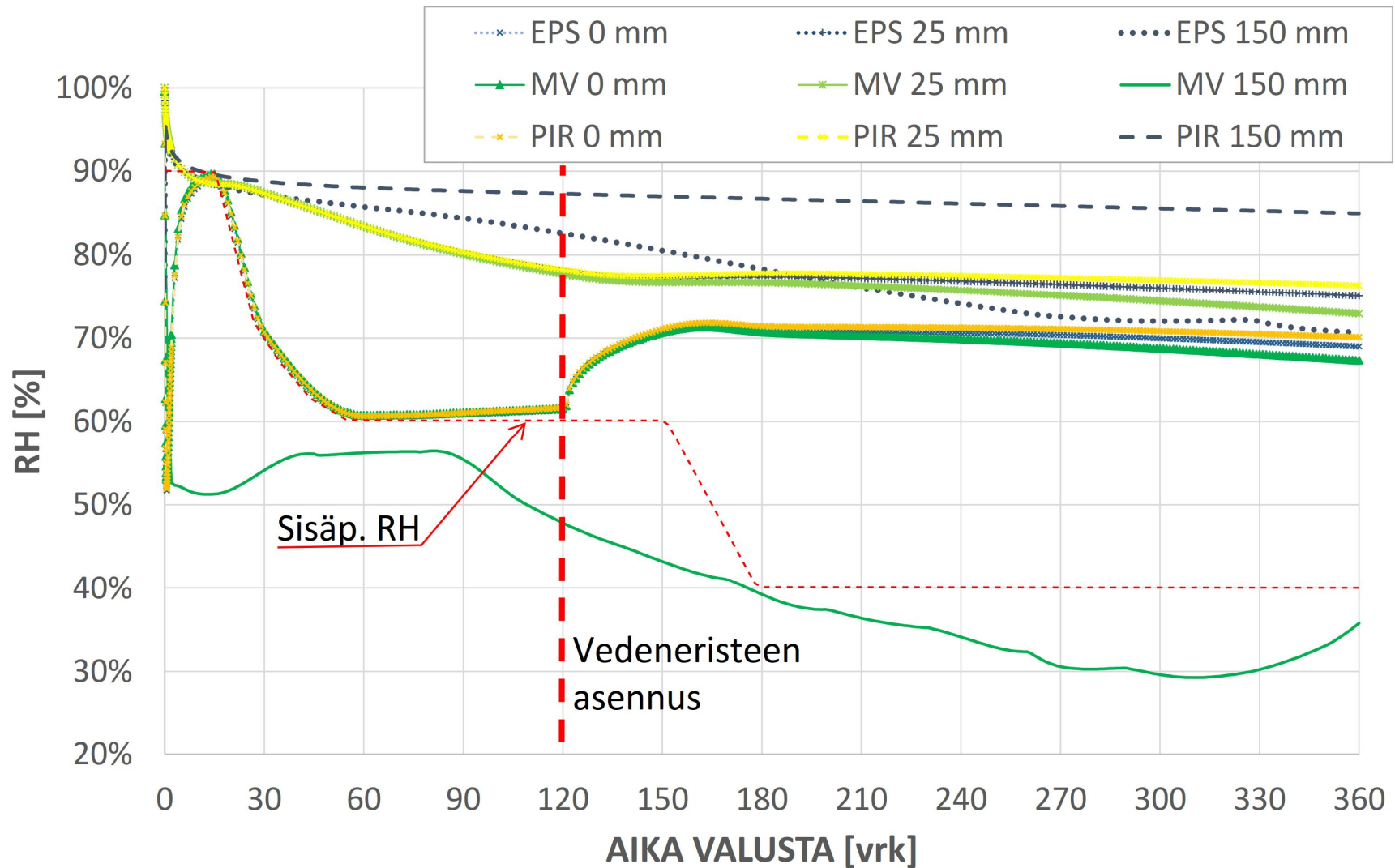
Laskenta vs. kosteusmittaukset - eristevertailut: EPS



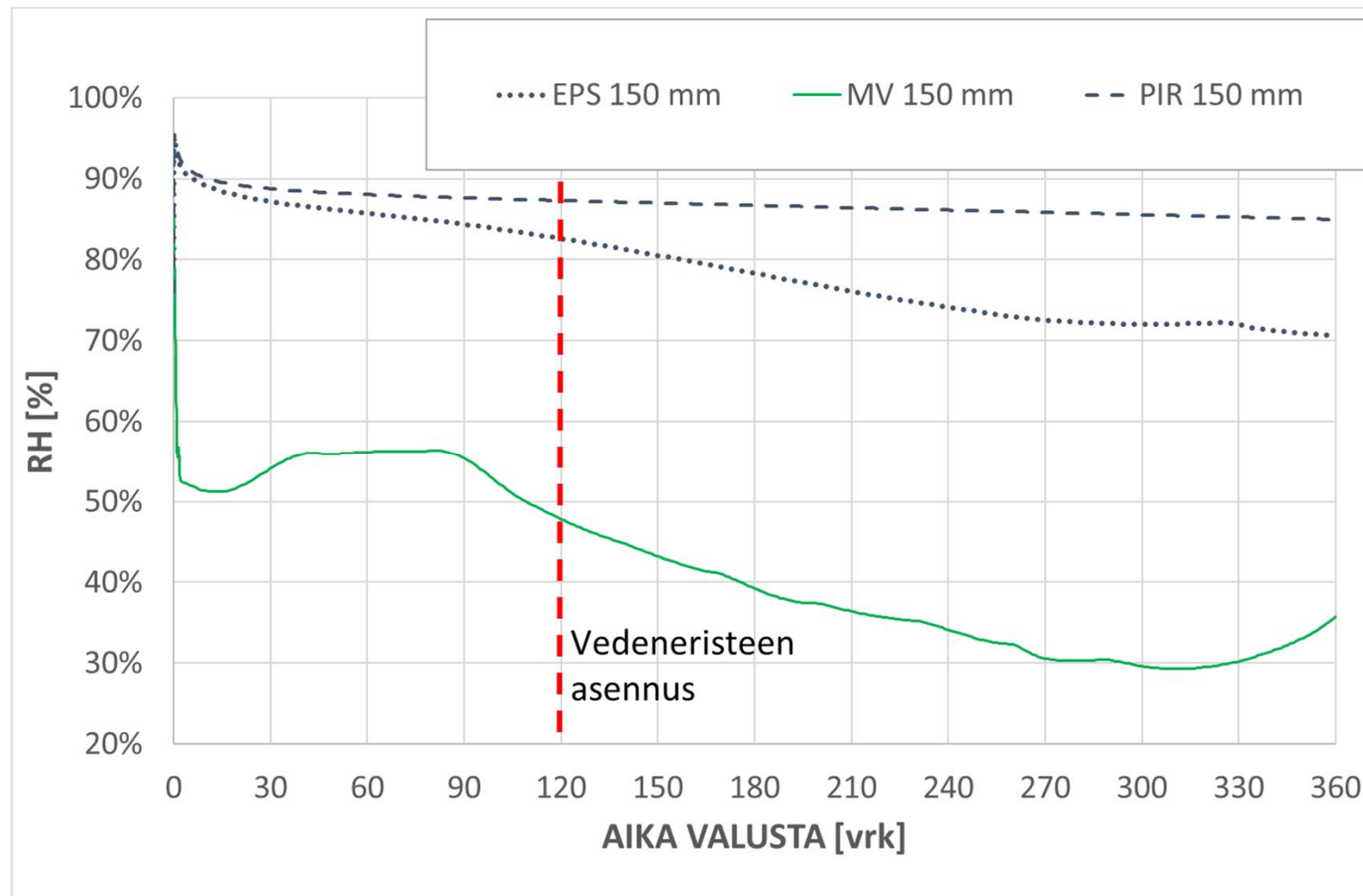
Laskenta vs. kosteusmittaukset - eristevertailut: PIR



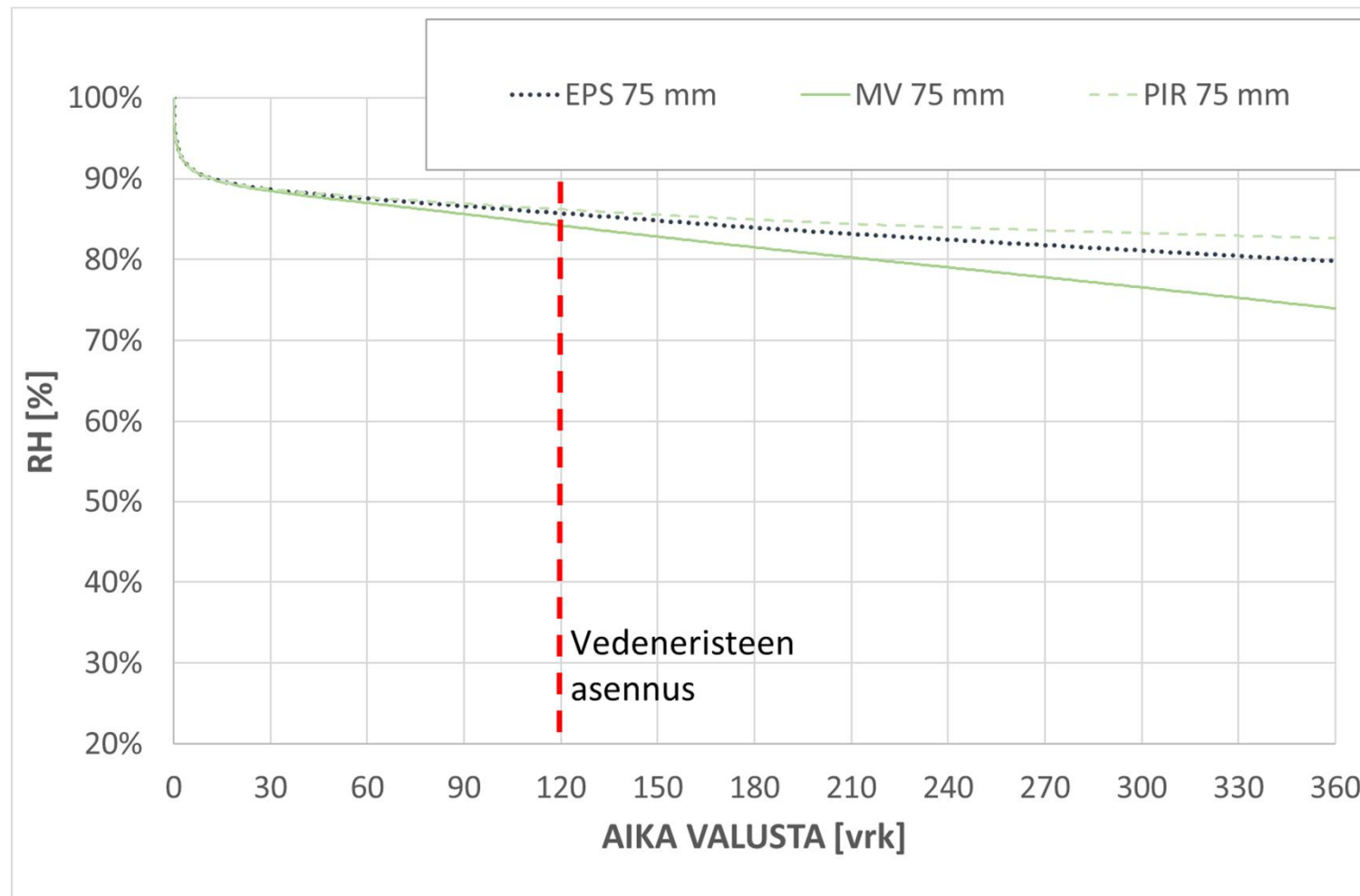
Pinnoitus OS 1



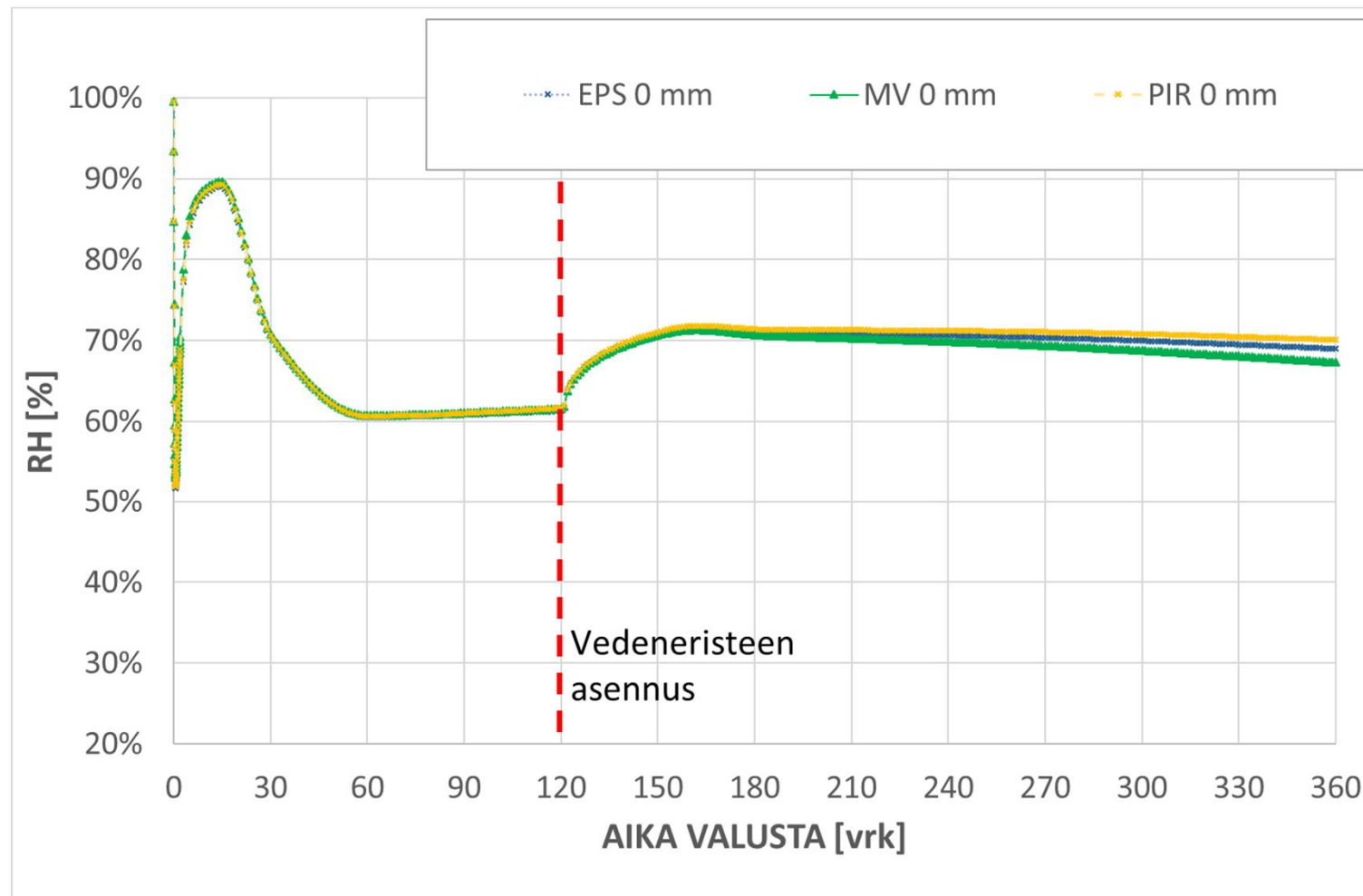
Pinnoitus OS 1 – kurielem.ulkop.



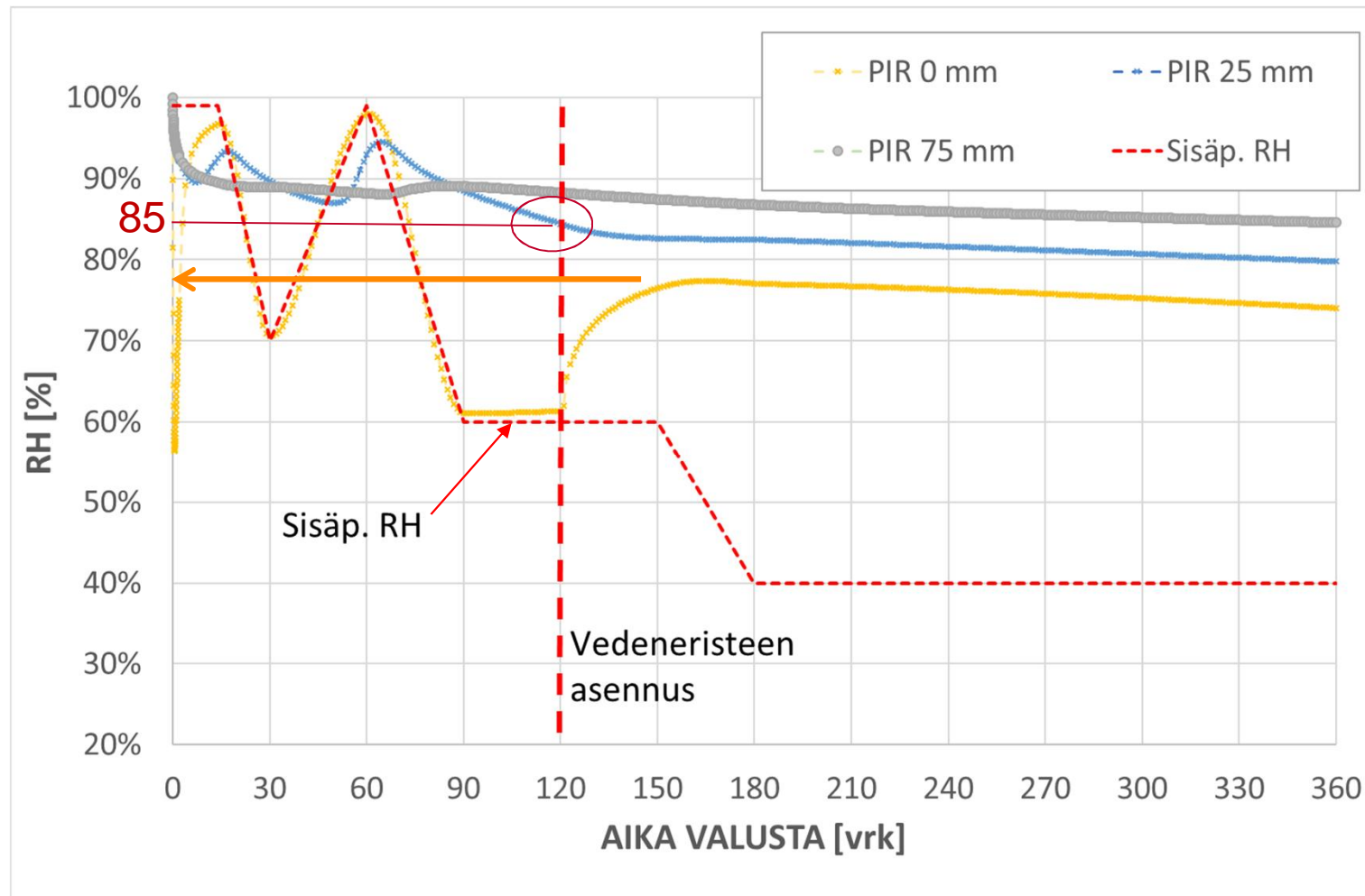
Pinnoitus OS1 – kurielem.keskip.



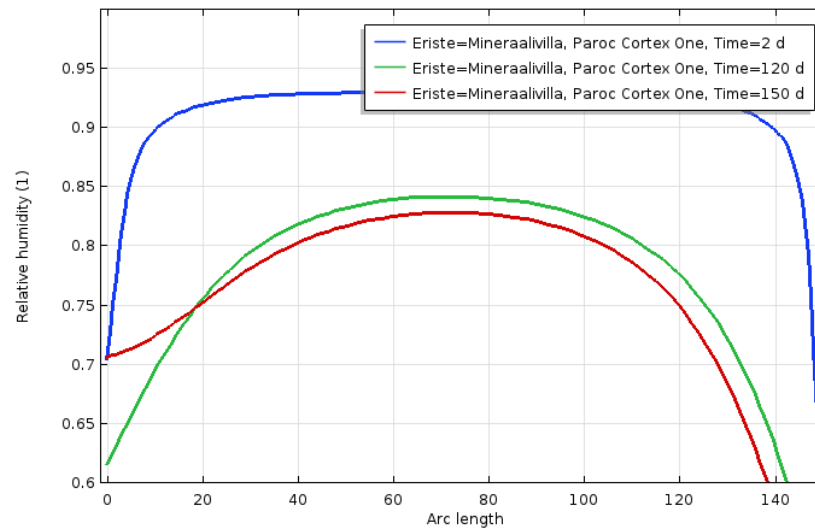
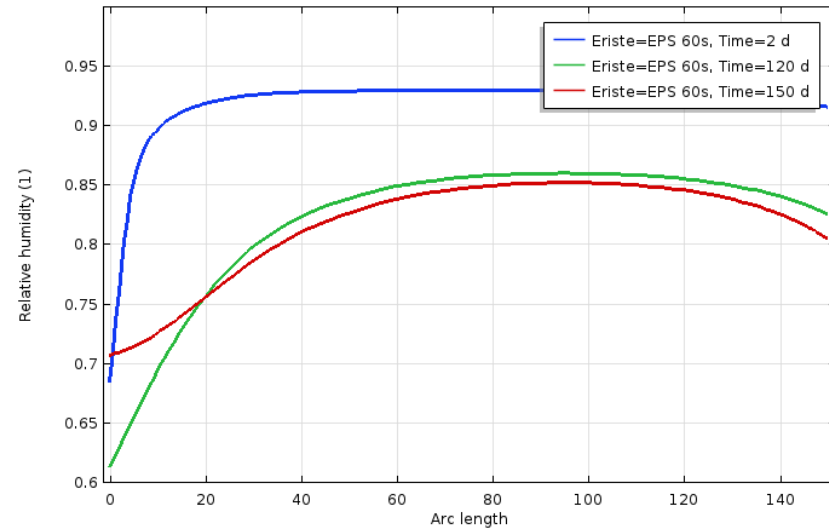
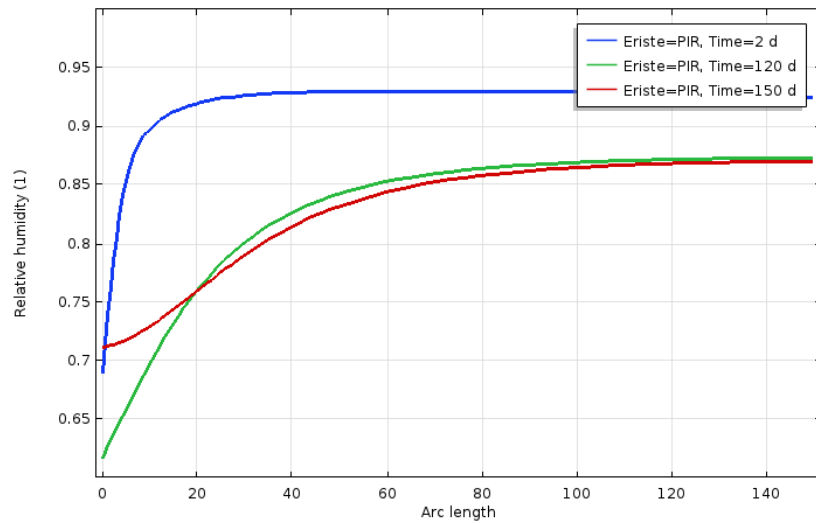
Pinnoitus OS1 - kurielem.sisäp.



Pinnoitus OS2



Kosteusjakaumat



Johtopäätökset

- Laboratorio-olosuhteissa MV-eristetty kuorielementti kuivuu punnituskokeiden perusteella huomattavasti nopeammin kuin EPS- tai PIR-eristetyt rakenteet.
- Laskenta saatiin vastaamaan vakio-olosuhteissa tehtyjä mittauksia kohtalaisen hyvin.
- Laskentatapausten perusteella sisäpinnan pinnoittaminen tiiviillä pinnoitteella ei aiheuta merkittävää riskiä pinnoitteen vaurioitumisen kannalta → kuitenkin syytä huomioida laadunvarm.
- Sisäpuolisten eristekerrosten tai lämpöä eristävien rakenneosien vaikutus arvioitava erikseen



Jatkotutkimustarpeet

- Mallin toimivuuden tarkastelu muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa.
- Miten kuivumisen alkuvaiheen laskentatuloks kosteusmäärän osalta saadaan vastaamaan paremmin käytäntöä? mm. materiaaliparametrien tutkiminen.
- Tuoreen betonin kosteusmittamittalaitteelle aiheuttamien virhetekijöiden selvittäminen mm. jatkuvatoimisia mittauksia ajatellen





Kiitos!

Pauli Sekki

pauli.sekki@tut.fi

pauli.sekki@vahanen.com

