



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Hermann Latvala

Alustabetonin kosteuspitoisuuden pitkäaikaisvaikutus pinnoittamisessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

19.5.2020

Tekijä Otsikko	Hermann Latvala Alustabetonin kosteuspitoisuuden pitkäaikaisvaikutus pinnoittamisessa
Sivumäärä Aika	65 sivua + 8 liitettä 19.5.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	rakennesuunnittelu
Ohjaajat	Jarmo Saarinen, yksikönpäällikkö Juha Virtanen, lehtori
<p>Insinööriyö jatkoi diplomityön <i>Alustabetonin kosteuspitoisuuden vaikutus pinnoitteen tartuntaan</i> (Saarinen, 2010) tutkimusta. Insinööriyössä tutkittiin diplomityössä 10 vuotta sitten valettuja ja eri lähtökosteuksille pinnoitettuja betonikoekappaleita (8 kpl). Betonilattioiden pinnoituksessa käytettävät pinnoitteet oli asennettu ohjeistettuja kosteusrajoja kosteammille alustoille märimmässä lähtökosteudessa betonin pinnan (0–10 mm) suhteellisen kosteuspitoisuuden ollessa 98 %.</p> <p>Insinööriyön koeosuudessa tutkittiin laboratoriokokein pinnoitteiden tartuntavetojuuksien kehittymistä pitkällä aikavälillä suhteessa alapuoliseen rakennekosteusjakaumaan. Lisäksi betonin koostumusta tutkittiin puristuslujuuskokein ja ohuthietutkimuksin.</p> <p>Tutkimuksen perusteella pinnoitemateriaalit kestivät alustabetonin korkean rakennekosteuden vaikutuksia 10 vuoden tarkasteluvälillä, kun lähes kaikkien materiaalien tartuntavetolujuustulokset kasvoivat 3,5 kuukauden iästä. Koekappaleiden betonipintojen suhteelliset kosteuspitoisuudet laskivat tarkasteluvälillä 10 vuoden takaisista (95 %) pinnoitemateriaalien vesihöyrynläpäisevyydestä riippuen 40–80 % väliin. Mittaamalla rakenteen kosteuspitoisuutta eri syvyyksillä (kosteusjakauma) pystyttiin arvioimaan pintamateriaalin vesihöyrynläpäisevyyttä ja sen vaikutusta rakenteen kuivumiseen.</p> <p>Betonirakenteessa pitkään korkealla pysyvä kosteus vaikutti tulosten perusteella edistävän betonin lujuudenkehitystä huomattavasti. Havaintoa tuki ohuthietutkimuksissa havaittu sementin korkea hydrataatioaste.</p> <p>Kaikkien tutkittujen pinnoitemateriaalien täyttäessä 2 N/mm² tartuntavetojuusvaatimuksen suurten rasiusten tiloille (by45/BLY7) voitaisiin jatkossa pinnoitemateriaalikohtaiselle kosteusraja-arvolle käyttää arvostelusyvytensä jo Saarisen ehdottamaa lähempänä rakenteen pintaa olevaa mittaussyvyttä 0,4 × A (1–3 cm) nykyisen ohjeistetun A (3–7 cm) sijaan. Myös rakenteen pinnan (5 mm) kosteuspitoisuuden tulisi alittaa kosteusraja-arvo varmistaen näin rakenteen looginen kuivuminen pinnasta ympäröivään ilmaan.</p> <p>Tutkimuksen mukaan huolellinen pinnoitustyö lujaan betonipintaan vaikutti olevan alustan rakennekosteutta tärkeämpi tekijä pinnoitteen tartunnan kehityksen kannalta olettaen, ettei rakenteeseen kohdistu ylimääräistä kosteusrasitusta esim. maaperästä. Nykyisten käytössä olevien materiaalien kohtaisen kosteusraja-arvojen tarkentaminen vaatisi lisätutkimusta eri betonilaaduilla ja pinnoitteilla. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa voitaisiin huomioida myös ulkopuolisen kosteuden tuoma vaikutus pinnoitteiden tartunnan kehitykseen.</p>	
Avainsanat	betoni, kosteus, pinnoite, tartunta

Author Title Number of Pages Date	Hermann Latvala Long-Term Effects of Subconcrete's Moisture Content with Coatings 65 pages + 8 appendices 19 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Jarmo Saarinen, Head of Unit Juha Virtanen, Lecturer
<p>The engineering thesis followed a Master's thesis <i>The effect of the humidity of the concrete on the bonding of the coating</i> (Saarinen, 2010). In the Master's thesis most common types of concrete coatings were applied to subconcretes of different moisture contents exceeding the moisture limit values of the time as the instructions of the moisture measurements set the depth of moisture assessments to structural dependent depth (A). A more precise moisture distribution had to be determined by moisture measurements from the surface of the structure (0–5 mm) and from the depth of $0.4 \times A$.</p> <p>The adhesive tensile strengths and the moisture distributions of 8 test pieces, saved from the Master's thesis 10 years ago, were studied by laboratory tests. The purpose of the study was to determine the effects of the additional moisture to the development of the adhesive tensile strengths of the coatings to adjust current instructions. In addition the structure and quality of the subconcrete were examined more closely from 3 test pieces by thin-thiestudy and compressive strength tests.</p> <p>According to the study the different types of coatings withstood the high structural humidity in long-term as the adhesive strengths of almost every coating grew in the period of 10 years. Depending on the features of coating materials the moisture contents of subconcretes reduced from 95 % to 40–80 %. Coatings were able to harden and to develop good adhesion to the surface before the moisture rose from the surface part (1–3 cm) of the structure.</p> <p>The effects of retaining high moisture content in concrete seemed also to affect positively on the development of compressive strength exceeding the assumed time span of strength development with modern cements. The observed high hydration in cement supported the discovery.</p> <p>In the future, as all the materials studied met the requirements set by the Concrete Association of Finland (by45/BLY7) for the areas exposed to great stress (2 N/mm²), it might be considered to determine the moisture content of the subconcrete from the measurement depth of $0.4 \times A$. To ensure the adequate drought of the surface of the structure moisture measurements should also be performed from the surface (0–5 mm). Concerning the product-specific moisture limit values more comprehensive study would be required. The effects of external moisture stress with other stresses should also be considered with potential follow-up research.</p>	
Keywords	concrete, moisture, coating, adhesion

Alkusanat

Insinööriytyö on tiedon- ja taidonnäyte, joka parhaimmillaan luo uutta sekä opettaa tekijäänsä. Tämä työ on ollut avartava ja periksiantamattomuutta opettanut polku, jonka varrella olen saanut monipuolista ja laadukasta opastusta. Tahdon kiittää Vahanen Rakenusfysiikka Oy:tä ja yrityksen mahtavaa työyhteisöä tarjoamastaan mahdollisuudesta toteuttaa insinööriytyö osaavassa ympäristössä. Kiitokset asiantuntevasta ohjauksesta Sami Niemelle ja Hannu Pyyllle, mutta erityisesti ohjaajalleni Jarmo Saariselle.

Tahdon osoittaa erityistä huomiota myös työni mahdollistaneille rahoittajille: TKR-Marketing Oy, Teknos Oy, Tikkurila Oyj, Fescon Oy, Nanten Oy ja Betoniteollisuus ry sekä heidän edustajistaan koostuneelle rautaiselle ohjausryhmälle. Koulun puolelle kiitokseni osoitan lehtori Juha Virtaselle työni ohjauksesta.

Insinööriytyötä viimeistellessä on tekijän todettava mielenkiinnon ja kehityshalun vievän pitkälle, mutta myöskään kahvin ja työskentelyasentojen vaikutusta ei voi missään nimessä vähätellä. Kaikkein tärkeintä on kuitenkin ollut läheiset ihmiset, jotka ovat jaksaneet kuunnella murheitani ja jaarittelujani. Lämpimimpien kiitosten toivonkin tavoittavan etenkin puolisoni sekä muut läheisimpäni, jotka uskoivat tekemiseeni ja olivat tukenani läpi tämän projektin.

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tutkimuksen tausta	2
1.2	Tavoite ja rajaus	3
2	Betonin kosteustekninen toiminta ja pinnoittaminen	5
2.1	Kosteus betonissa	5
2.2	Kosteusliikkeet	7
2.3	Betonipinnoitteet	9
3	Alustabetonin kosteus ja pinnoitteen tartunta	14
3.1	Alkuperäinen tutkimus	14
3.2	Pitkäaikaistarkastelun lähtökohdat	18
4	Tutkimusmenetelmät	20
4.1	Kosteusmittaukset	20
4.2	Tartuntavetolujuuskokeet	25
4.3	Puristuslujuuskokeet	28
4.4	Ohuthietutkimukset	29
5	Laboratoriokokeet	31
5.1	Ennakkovaihe	31
5.1.1	Ennakkovaiheen koejärjestely	31
5.1.2	Kosteusmittaustulokset ja tulosten tarkastelu	33
5.1.3	Tartuntavetolujuustulokset ja tulosten tarkastelu	38
5.2	Varsinaiset tutkimukset	40
5.2.1	Koejärjestely	40
5.2.2	Kosteusmittaustulokset ja tulosten tarkastelu	43
5.2.3	Tartuntavetolujuustulokset ja tulosten tarkastelu	48
5.2.4	Puristuslujuustulokset ja tulosten tarkastelu	52
5.2.5	Ohuthietutkimukset	55
5.2.6	Luotettavuustarkastelu	56
6	Johtopäätökset	58

7	Yhteenveto	62
	Lähteet	65
	Liitteet	
	Liite 1. Koekappaleisiin käytetyn betonin annostiedot	
	Liite 2. Koestussuunnitelma	
	Liite 3. Tutkimuspäiväkirja	
	Liite 4. Ennakkovaiheen kosteusmittaustulokset	
	Liite 5. Ennakkovaiheen tartuntavetolujuustulokset	
	Liite 6. Kosteusmittaustulokset	
	Liite 7. Tartuntavetolujuustulokset	
	Liite 8. Ohuthie- ja puristuslujuustutkimukset (Tutkimusseloste laboratoriotutkimuksista)	

Termit

Diffuusio	Höyryn siirtyminen suuremmasta pitoisuudesta pienempään.
Hydrataatioreaktio	Veden aikaansaama kemiallinen reaktio.
Kapillaarinen siirtyminen	Veden siirtyminen materiaalissa huokosrakennetta pitkin huokosissa vallitsevan alipaineen johdosta.
Kosteusjakauma	Betonirakenteessa eri syvyyksillä vallitsevien kosteuspitoisuuksien muodostama profiili.
Kosteusraja-arvo	Materiaalikohtaisesti määritetty kosteuspitoisuuden enimmäisarvo, joka tulee alittaa laadukkaan lopputuloksen varmistamiseksi.
Pigmenti	Hienojakoinen jauhe, jolla värjätään materiaaleja.
Polymeeri	Yhteen liittyneestä pienimolekyylisistä rakenneyksiköistä koostuva aine.
Tartuntavetolujuus	Materiaalien välisten tartuntapintojen lujuutta kuvastava suure.
Vesihöyrynläpäisevyys	Materiaalin ominaisuus, joka kuvastaa vesihöyryn kulkeutumista materiaalin lävitse.

1 Johdanto

Pinnoitteiden tarkoituksena on luoda rakenteelle viimeistely pintakerros, joka suojaa rakennetta ja parantaa pintaosien kestävyttä. Toisin kuin alustaan liimattavat tai kelluvat päällystemateriaalit, pinnoitteet asennetaan kauttaaltaan kiinni rakenteen pintaan muodostaen yhtenäisen pintakerroksen. Suojaavien ominaisuuksien lisäksi pinnoitteet luovat myös esteettisen pinnan rakenteelle. Pinnoitteiden käyttökohde, ominaisuudet ja kestävyys määräytyvät käytettyjen materiaalien, asennustyön ja rasitusten mukaan.

Betoniin oleellisena raaka-aineena kuuluva vesi yhdessä sementin kanssa mahdollistaa rakenteen tavoitellun lujuudenkehityksen. Prosessista jäävä ylimääräinen vesi, eli rakenekosteus, alkaa olosuhteista riippuen kuivua betonirakenteesta. Kosteuden siirtymiseen ja kuivumiseen vaikuttaa betonin ominaisuudet, mutta oleellisimpina vaikuttajina toimivat rakenteen lämpötila sekä ympäröivät olosuhteet: lämpötila ja suhteellinen kosteuspitoisuus. Betoni reagoi vallitseviin ympäröiviin olosuhteisiin pyrkien tasapainoon niiden kanssa. Myös rakenteen paksuus sekä kuivumispinnat vaikuttavat kosteuden siirtymiseen.

Betonin pintaan levitettävät pinnoitekerrokset vaikuttavat vesihöyrynläpäisevyyden ja kerrospaksuuden mukaan betonin kosteusliikkeisiin ja pinnoitteen alle betoniin muodostuvaan kosteusjakaumaan. Toisaalta betonin korkea kosteuspitoisuus pinnoitteiden alla voi vaikuttaa negatiivisesti pinnoitteiden tartuntavetolujuuden kehitykseen. Tyypillisesti betonin liian korkea kosteuspitoisuus vaurioittaa betonin pintaan asennettavaa pinnoitetta tai sen tartuntaa jo kovettumisvaiheessa, mutta myös myöhemmässä vaiheessa kosteuspitoisuus voi nousta liian korkeaksi ja pinnoite vaurioitua tai irrota alustastaan. Insinööriyön kirjallisuusosiossa tutkitaan betonin kosteusteknistä toimintaa ilmiönä sekä betonirakenteiden pinnoitteita.

Betonilattioissa käytetään erilaisia pinnoitteita parantamaan lattian pinnan ominaisuuksia erilaisia käyttörasituksia sekä -olosuhteita vastaan, jotka saattaisivat vaurioittaa käsittelemätöntä betonilattiaa. Lattiapinnoite toimii lattian käyttöpintana, johon rasitukset kohdistuvat, joten sen onnistunut asennus on merkittävässä osassa pinnoitteen pitkäikäisyyden kannalta. Pinnoituksen pitkäaikaiskestävyyteen vaikuttaa työmenetelmien

lisäksi oleellisesti pinnoitteen asennus hyvissä olosuhteissa puhtaalle ja riittävän lujalle betonipinnalle sekä alustabetonin kosteuspitoisuus.

Voimassa olevien ohjeistusten mukaan (by54/BLY12, Betonilattioiden pinnoitusohjeet. Suomen Betoniyhdistys ry. 2010.) betonilattialta edellytetään riittävän kuivaa pintaosaa ennen pinnoitteen asennusta betonin kosteusraja-arvon riippuessa käytettävästä pinnoitteesta. Kuivalla pintaosalla pyritään mahdollistamaan pinnoitteen tarttuminen ja kovettuminen betonirakenteen pintaan, ennen kuin syvemmällä rakenteessa oleva kosteus ehtii vaikuttaa heikentävästi tartunnan muodostumiseen tai kovettumisreaktioon.

Kosteusmittausohjeet syvyyksineen perustuvat vuosien 2004–2007 Betonilattioiden päällystämisen ohjeistus eli BePO-projektiin, joka keskittyi kosteuserkempiin päällysteisiin pinnoitteiden käsittelyn ollessa vähäisempää. Projektin perusteella julkaistiin *Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen* –julkaisu (Merikallio & Niemi & Komonen. 2007.) Julkaisussa esitetään ohjeistuksia betonin kosteuspitoisuuden määrittämiseen ennen lattiarakenteiden päällystämistä sekä mittaussyvyyyksiä ja kosteusraja-arvoja eri lattiapäällysteille. Lisäksi julkaisun ja monien kokemusten perusteella julkaistiin RT-ohjekortti *Betonin suhteellisen kosteuden mittaus* (2010).

1.1 Tutkimuksen tausta

Lähtökohtana tutkimukselle toimii diplomityö *Alustabetonin kosteuspitoisuuden vaikutus pinnoitteen tartuntaan* (Saarinen, Jarmo. 2010), jossa pyrittiin täsmentämään laboratoriokeihin lähinnä lattiapäällysteille, kuten muovimatot ja parketit, suunnattuja julkaistuja kosteusmittausohjeistuksia pinnoitteille sopiviksi. Diplomityössä pinnoitettiin neljässä eri lähtökosteudessa olleita koekappaleita ja niistä seurattiin alustabetonin kosteuspitoisuuden sekä eri pinnoitteiden tartuntavetolujuuksien muutoksia viikon, kuukauden ja 3,5 kuukauden iässä. Diplomityössä havaittiin, ettei betonin kosteuspitoisuudella ollut merkittävää vaikutusta pinnoitteen tartuntavetolujuuteen koestettujen pinnoitteiden osalta, vaikka pinnoitus toteutettiin materiaalivalmistajan ohjeistamia kosteusraja-arvoja määremmälle alustalle. Pinnoitteiden asennettavuudessa tai toimivuudessa ei havaittu muutakaan vikaa tarkastelujakson aikana.

Käytössä olleiden ohjeistusten mukaan rakenteen paksuudesta riippuvalla arvostelusyvyydellä A (3–7 cm) tulee betonin kosteuden alittaa materiaalitoimittajan ilmoittama pinnoitemateriaalista riippuva kosteusraja-arvo ennen pinnoitusta. Ohjeistus mukailee betonilattioiden päällysteille esitettyjä ohjeistuksia (BePO-projekti), jotka perustuvat siihen, että betonilattiassa arvostelusyvyydellä A oleva kosteuspitoisuus tasapainottuu päällysteen alle sen asentamisen jälkeen. Tutkimuksen perusteella ehdotettiin, ettei alustabetonin kosteuspitoisuutta tarvitsisi määrittää rakenteen paksuudesta riippuvalla arvostelusyvyydeltä A, vaan määrittäminen voitaisiin tehdä rakenteen pintaosista näytepalamenetelmällä syvyyksiltä 5 mm sekä $0,4 \times A$ (1–3 cm).

Diplomityön perusteella päivitettiin betonilattioiden pinnoitusohjeita kosteusmittausohjeiden osalta. Ohjeessa todetaan:

Useimmille pinnoitteille riittää, että betonirakenteen pintaosat (0...5 mm) ovat pinnoitushetkellä kuivuneet sen verran, että pinnoitteen lujittuminen ja kiinnittyminen ehtivät tapahtua onnistuneesti ennen pinnoitteen alapuolisen kosteuden nousua (by54/BLY12, Betonilattioiden pinnoitusohjeet. Suomen Betoniyhdistys ry. 2010.)

Tutkimuksesta säilytettiin koekappaleita jokaisesta pinnoiteyhdistelmästä jatkotutkimuksiin, jotka toteutetaan nyt kymmenen vuoden kohdalla.

1.2 Tavoite ja rajaus

Työn tavoitteena on saada tietoa betonilattioissa yleisimpinä käytettyjen pinnoitteiden tartunnan kehittymisestä pidemmällä ajanjaksolla sekä selvittää pinnoitteiden alle alustabetoniin muodostuvan kosteusjakautuman käyttäytymistä ja vaikutuksia pinnoitteiden tartuntavetolujuuksiin ohjeistusten tarkentamiseksi luotettavasti. Kymmenen vuotta siten pinnoitettujen koekappaleiden (8 kpl) pinnoitteen tartuntavetolujuutta ja kosteusjakautumaa tutkitaan laboratorion kokein.

Laboratorion kokeiden avulla tarkoituksena on saada tietoa pinnoitteiden toimivuudesta pidemmällä aikavälillä, kun koekappaleet on pinnoitettu kymmenen vuotta sitten kosteusraja-arvot ylittävälle alustabetonille. Tutkimusmenetelmät vastaavat alkuperäisen tutkimuksen menetelmiä. Lisäksi tässä työssä tutkitaan kolmen koekappaleen betonin puristuslujuutta ja koostumusta tarkemmin puristuskokeilla ja ohuthietutkimuksilla.

Tutkittavat koekappaleet ovat pienikokoisia (noin 530 mm x 370 mm x 70 mm) ja niiden esikäsitteily sekä pinnoitustyö on toteutettu huolellisesti vuonna 2009. Tämän lisäksi koekappaleiden säilytys on tapahtunut sisätiloissa ja suojassa rasituksilta. Tutkimus rajataan käsittelemään alustabetonin rakennekosteuden pitkäaikaisvaikutusta pinnoitteiden tartuntavetolujuuteen sekä pinnoitteiden alle kehittyvää kosteusjakaumaa, kun rakenne pääsee kuivumaan pääosin vain yhteen suuntaan pinnoitteen lävitse.

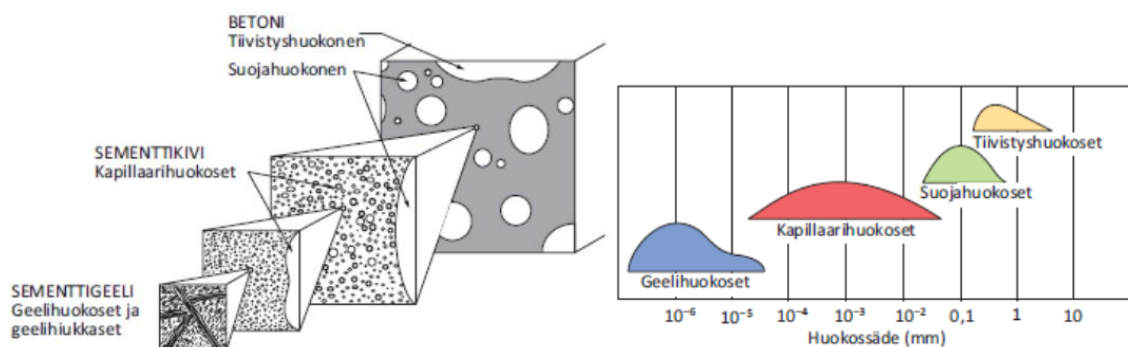
2 Betonin kosteustekninen toiminta ja pinnoittaminen

2.1 Kosteus betonissa

Betonin osa-aineita ovat vesi, sementti, runkoaine sekä mahdolliset lisä- ja seosaineet. Vettä vaaditaan, jotta betonin kovettuminen ja lujuudenkehitys alkavat hydrataatioreaktioiden vaikutuksesta. Hydrataatioreaktiossa sementti reagoi kemiallisesti veden kanssa muodostaen sementtikiveä. Reaktio jatkuu teoriassa niin pitkään, kun sementillä on vettä saatavilla. [1, s. 37.]

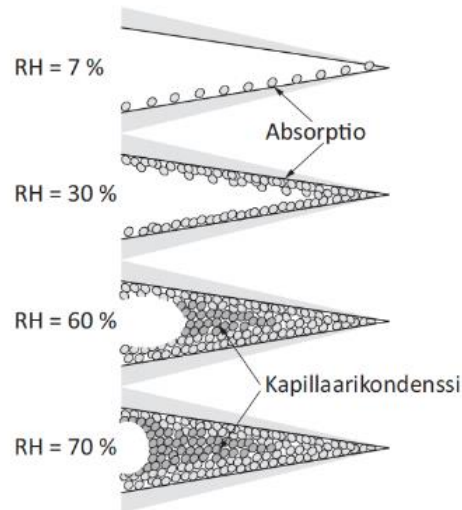
Käytännössä kaikki käytetty sementti ei pääse reagoimaan veden kanssa. Reagoineen sementin määrää kuvataan hydratoitumisasteella α , joka ilmaisee, kuinka suuri osa käytetystä sementistä on hydratoitunut. Prosessissa kemiallisesti sitoutuneen veden määrä on noin 25% hydratoituneen sementin määrästä. Hydrataation määrään ja nopeuteen vaikuttaa oleellisesti betonin vesi-sideainesuhde (v/s). [2, s. 12; 3, s. 5.]

Valmiin betonin huokosrakenne riippuu myöskin käytetystä vesi-sideainesuhteesta. Huokoisena materiaalina betoni on hygroskooppista, eli se pyrkii vastaanottamaan tai luovuttamaan kosteutta, kunnes saavutetaan tasapainotila ympäröivien olosuhteiden kanssa. Pienimmissä (1–5 nm) geelihuokosissa kosteus ei siirry kapillaarisesti veden muodossa, toisin kuin suuremmissa kapillaari-, suoja- ja tiivistyshuokosissa. Huokosrakennetta havainnollistetaan kuvassa 1. Kosteus liikkuu betonin sisällä myös höyryn muodossa diffuusiolla. [1, s. 81–84.]



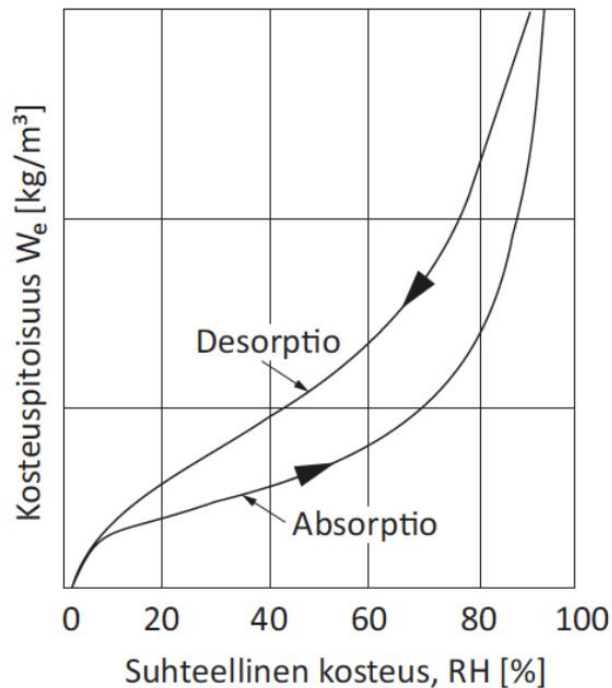
Kuva 1. Kuvassa on havainnollistettu betonin huokosrakennetta (tiivistyshuokoset, suojahuokoset, kapillaarihuokoset ja geelihuokoset) sekä niiden mittasuhteita (huokossäde). [1.]

Kuljetuksen ja työstettävyyden mahdollistamiseksi betoniin tarvitaan ylimääräistä vettä, joka sitoutuu fysikaalisesti rakenteeseen. Osa tästä ylimääräisestä kosteudesta on vesihöyrynä huokosten ilmatilassa ja osa sitoutuneena huokosten seinämiin vesimolekyylimerroksena (absorptio). Korkeammissa kosteuspitoisuuksissa vesi voi sitoutua huokosten pintaan myös kapillaarisesti, kuten kuvassa 2 havainnollistetaan. [1, s. 531–533.]



Kuva 2. Kuvassa on havainnollistettu kosteuden sitoutumista huokosrakenteisiin eri suhteellisen kosteuspitoisuuden (RH %) vallitessa. [1.]

Betonihuokosten kykyyn sitoa kosteutta vaikuttaa käytetty vesi-sideainesuhde, rakenteen huokoisuus, lämpötila sekä hydratoitumisaste. Fysikaalisesti sitoutuneen veden määrä eli kosteuspitoisuus betonirakenteessa ilmoitetaan yleensä painoprosentteina kuivapainoon nähden (p-%) tai kosteussisältönä tilavuuden suhteen (kg/m^3). Betonin kosteutta kuvataan myös suhteellisen kosteuspitoisuutena (RH %), joka ilmaisee huokosten ilmatilan vesihöyryn määrää tietyssä lämpötilassa. [2, s. 14–15.] Kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden välille muodostuu kuvassa 3 havainnollistettu betonin ominaisuuksista ja lämpötilasta riippuvainen tasapainokäyrä eli sorptiokäyrä.

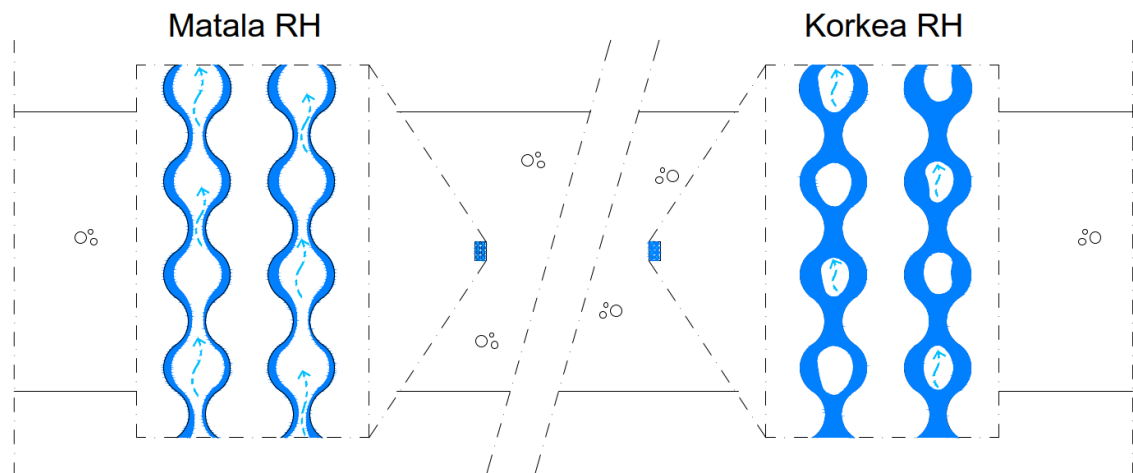


Kuva 3. Erään betonin sorptiokäyrä. Betonin kyky sitoa kosteutta tietyn suhteellisen kosteuden vallitessa riippuu betonin ominaisuuksista, lämpötilasta sekä siitä, onko rakenne kuivumassa (desorptio) vai kostumassa (absorptio). [1.]

Sorptiokäyrä ilmaisee, kuinka paljon tietyn betonin huokosiin on sitoutunut kosteutta tietyn suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vallitessa. Käyrään vaikuttaa betonin ominaisuuksien ja lämpötilan lisäksi se, onko betoni kuivumassa (desorptio) vai kostumassa (absorptio). [2, s. 15–16.]

2.2 Kosteusliikkeet

Samoin kuin betonin kosteuspitoisuuteen myös kosteuden liikkumiseen vaikuttaa oleellisesti betonin ominaisuudet, lämpötila sekä ympäröivät olosuhteet. Kun betoni pyrkii tasapainoon ympäristönsä kanssa, kosteus liikkuu rakenteessa kapillaarisesti ja diffuusiolla. Kapillaarisesti liikettä tapahtuu vain suhteellisen kosteuspitoisuuden ollessa korkea. Liike on myös huomattavasti nopeampaa kuin diffuusiolla tapahtuva. Kuvassa 4 havainnollistetaan kosteuden liikkumista betonissa. [1, s. 535–536.]



Kuva 4. Vasemmalla kuvassa esitetään betonin huokosrakenteisiin absorptoitunutta kosteutta huokosten seinämällä, mutta kosteus liikkuu huokosissa matalan suhteellisen kosteuspitoisuuden vallitessa vain diffuusiolla (siniset nuolet). Korkeamman suhteellisen kosteuspitoisuuden vallitessa kosteus siirtyy diffuusion lisäksi myös kapillaarisesti, kun huokosrakenteeseen sitoutunut kosteus pystyy muodostamaan kapillaariverkoston, kuten oikealla kuvassa esitetään.

Ylimääräisen kosteuden poistumista betonin pinnasta kutsutaan haihtumiskuivumiseksi. Haihtumiskuivumista tapahtuu valun jälkeen nopeasti, sillä syvemmällä rakenteessa oleva kosteus pääsee liikkumaan kapillaarisesti kohti haihtumispintaa. Kun pintaosien suhteellinen kosteus laskee haihtumiskuivumisen vaikutuksesta, kosteuden kapillaarinen siirtyminen katkeaa. Tämän jälkeen kosteus siirtyy pintaa kohden vain diffuusiolla. Ajan myötä betonin kuivuessa myös diffuusiolla tapahtuva liike hidastuu entisestään. Tämä johtuu kasvaneesta välimatkasta haihtumisrintaman ja pinnan välillä. [1, s. 535–536.] Kosteuspitoisuudet vaihtelevat pinnan ja haihtumisrintaman välillä muodostaen rakenteeseen kosteusjakauman, jolloin rakenteen kosteuspitoisuudet eri syvyyksillä vaihtelevat betonin ominaisuuksien ja ympäröivien olosuhteiden mukaisesti [4].

Kosteuden haihtuminen aiheuttaa betonissa tilavuuden muutoksia kuten rakenteen kutistumista. Betonimassan muut osa-aineet pyrkivät täyttämään poistuneen veden jättämän tilan, jolloin betoniin syntyy sisäisiä voimia. Sisäisten voimien vaikutuksesta betonin tilavuus pienenee, kunnes tarpeeksi kovettuneen betonimassan hiukkaset eivät pysty enää liikkumaan. Kun veden haihtumisesta johtuvat sisäiset voimat kasvavat suuremmiksi kuin kovettuvan betonin lujuus on, syntyy kohtaan halkeama. [1, s. 75–77.] Liian

nopeaa haihtumista kovettuvan betonin pinnalta pyritään vähentämään jälkihoidolla. Jälkihoidossa kosteuden poistuminen betonin pinnalta estetään esimerkiksi muovikalvolla tai jatkuvalla kastelemisella. Hyvä jälkihoito mahdollistaa etenkin betonin vetolujuuden kehityksen. [4.] Poistuva kosteus voi vahingoittaa myös ympäröiviä rakenteita, kuten puisia rakenneosia taikka heikentää pinnoitteiden tartuntaa. [1, s. 527–531.]

2.3 Betonipinnoitteet

Pinnoitteiden tarkoituksena on suojata betonirakenteen pintaa rasituksilta ja siten parantaa rakenteen säilyvyyttä. Maalien ja lakkojen ohella käytettävät pinnoitemateriaalit ovat erilaisia polymeeriyhdisteitä, jotka koostuvat yleensä sideaineesta, pigmentistä, liuottimesta ja lisäaineista. Kun pinnoite tarttuu alustabetoniin, muodostuu näistä yhtenäinen pintakerros eikä materiaalien välille jää tilaa esimerkiksi mikrobikasvulle, kuten muunlaisilla päällystemateriaaleilla. [5, s. 9; 6, s. 1–2.]

Pinnoitteet hidastavat betonista poistuvaa kosteutta. Poistuvan kosteuden määrään vaikuttavat pinnoitteen materiaaliominaisuudet, kuten vesihöyrynläpäisevyys, sekä pinnoitteen kerrospaksuus. Samat tekijät vaikuttavat myös pinnoitteiden kestävyysasteeseen. Käyttökohteesta riippuen pinnoitteiden tulee kestää mekaanista ja kemiallista rasitusta sekä sää-, lämpö- ja sähkörasitusta. [6, s. 24–36.]

Betonilattioiden pinnoitusohjeessa (by54/BLY12, 2010) pinnoitemateriaalit jaetaan koostumuksen ja ominaisuuksien mukaisesti seuraaviin tyypeihin:

- **Pölynsidonta/ohennettavat maalit ja lakat (kevyt käyttö)**
 - Levitetään kahtena kerroksena, paksuus < 150 µm, vesi- tai liuotinpohjainen
- **Liutteettomat maalit ja lakat (kevyt ja keskiraskas käyttö)**
 - Levitetään kahtena tai useampana kerroksena, paksuus > 100 µm / kerros, liutteeton tai vesipohjainen
- **Liutteeton pinnoite (keskiraskas käyttö)**
 - Levitetään kahtena tai useampana kerroksena, kokonaispaksuus 300 ...1000 µm, liutteeton
- **Monikerrospinnoite (keskiraskas ja raskas käyttö)**

- Levitetään useana kerroksena liuotteetonta maalia tai pinnoitetta. Pintaan sirotellaan kiviaines, kokonaispaksuus > 2 mm. Ns. sandwich-rakenne.
- **Itsesiliävä pinnoite (keskiraskas ja raskas käyttö)**
 - Levitetään pohjustetulle alustalle yhtenä kerroksena, paksuus 2...3 mm, sileä pinta, tarvittaessa voidaan karhentaa.
- **Hierrettävä pinnoite (keskiraskas ja raskas käyttö)**
 - Voimakkaasti täytetty, hierrettävä pinnoite, paksuus > 4 mm, yleensä pintalakattu
- **Itsesiliävä massapinnoite (raskas ja erittäin raskas käyttö)**
 - Täytetty itsesiliävä massapinnoite erittäin kovaan käyttöön, paksuus 4 ...6 mm, sileä pinta, tarvittaessa voidaan karhentaa.
- **Hierrettävä massapinnoite (raskas ja erittäin raskas käyttö)**
 - Voimakkaasti täytetty, hierrettävä massapinnoite erittäin kovaan käyttöön, paksuus > 6 mm, tiivis koko paksuudeltaan.

Pinnoitejaottelussa esitetyt käyttöluokat esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Betonipinnoitteiden käyttöluokkien kuvaukset [5].

Käyttöluokka	Kuvaus
Kevyt käyttö	Pääasiassa kävelyliikennettä ja tilapäisesti myös kumipyöräisiä ajoneuvoja
Keskiraskas käyttö	Säännöllistä kävelyliikennettä, toistuvaa trukkiliikennettä ja satunnaisesti muovipyöräisiä kärryjä
Raskas käyttö	Jatkuva trukkiliikenne, kovamuovisilla pyörillä varustettuja kärryjä sekä satunnaisia iskuja
Erittäin raskas käyttö	Jatkuva raskas liikenne ja iskuja

Pinnoitemateriaaleista monipuolisin on epoksi, josta löytyy tuotteita useasta pinnoitetyypistä. Epoksinpinnoitteiden ominaisuudet vaihtelevat käytetyn hartsityypin ja kovetteen mukaan. Ominaisuuksiin vaikuttaa myös käytetty liuotintyyppi, sillä epoksinuotteita löytyy vesiohenteisena, liuotinohenteisena ja liuotteettomana. [6, s.75–76.] Eri tyyppisten epoksinpinnoitteiden ominaisuuksia esitetään muiden materiaalien kanssa taulukossa 2.

Epoksinnoitteiden lisäksi erittäin monipuolisia ovat myös polyuretaanipinnoitteet, joita on neljää perustyyppiä:

- 1-komponenttiset kosteuskovettuvat maalit ja lakat
- 2-komponenttiset kemiallisesti kovettuvat pinnoitteet
- 2-komponenttiset kosteuskovettuvat pinnoitteet
- yhdistelmäpolyuretaanit

Polyuretaanipinnoitteet ovat tyypillisesti elastisia ja ne kestävät hyvin erilaisia rasituksia. [6, s. 101–108.] Esimerkkejä epoksi- ja polyuretaanipinnoitteesta esitetään kuvassa 5.



Kuva 5. Kuvissa on esitetty esimerkkejä epoksi- ja polyuretaanipinnoitteista. Vasemmalla on polyuretaani (Nanten PU Flex BIO) ja oikealla epoksinnoite (Nanten HM W epoksihier-topinnoite). [kuvat: www.nanten.fi]

Nopeasti kovettuvat akryylipinnoitteet tarjoavat hyvän kulutuksen ja iskujen kestävyuden. Akryylipinnoitteet ovat normaalisti massatyypisiä ja niiden kalvopaksuus on tyypillisesti 3 mm ylöspäin. Akryylien tilalla voidaan pinnoitemateriaalina käyttää sementtipolymeeripinnoitteita, joilla on akryyleja vastaavia ominaisuuksia. Muita yleisesti käytettyjä pinnoitetyyppejä ovat vinyyliesterit, elastomeerit ja polyurea. [5, s. 26–27.]

Taulukko 2. Pinnoitetyyppien materiaaleja ja niiden ominaisuuksia. [5.]

Pinnoitetyyppi	Materiaali	Ominaisuudet
Pölynsidonta-aineet	Fluatointi	Ei muodosta kalvoa. Soveltuu käytettäväksi alhaisisakin lämpötiloissa. Vesihöyryä läpäisevä.
	Imeytyvät tuotteet	Sitovat pölyn.
Ohennettavat maalit ja lakat	Vesiohenteiset epoksit	Läpäisevät vesihöyryä.
	Liutinohenteiset epoksit	Kohtuullinen mekaanisen rasituksen kestävyys. Parantavat betonialustan pinnan lujuutta.
	Kosteuskovettuvat polyuretaanit	Kohtuullinen mekaanisen rasituksen kestävyys. Parantavat betonialustan pinnan lujuutta.
Liutteettomat maalit, lakat ja pinnoitteet	Epoksit	Kohtuullinen mekaanisen ja kemiallisten rasitusten kestävyys. Helposti puhdistettavissa.
	Polyuretaanit	Kohtuullinen mekaanisen ja kemiallisten rasitusten kestävyys. Helposti puhdistettavissa.
	Vinyyliesterit ja yhdistelmäpolyuretaanit	Erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys.
Itsesiliävät massapinnoitteet	Epoksimassat	Hyvä mekaanisen ja kohtuullinen kemiallisen rasituksen kestävyys. Helposti puhdistettavissa.
	Polyuretaanit	Hyvä mekaanisen ja kemiallisen rasituksen kestävyys. Hyvä halkeamien silloituskyky. Toimivat myös vedeneristeenä. Helposti puhdistettavissa.
	Akryylit	Hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Nopeasti reagoivia. Voimakas haju työn aikana. Vesitiiviitä.
	Sementti-polymeerimassat	Hyvä mekaanisen rasituksen ja erinomainen lämmön kestävyys. Nopeasti kovettuvia. Vesitiiviitä.
Hierrettävät massapinnoitteet	Epoksit	Erittäin hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Kestävät lämpöshokkeja.
	Akryylit	Erittäin hyvä mekaanisen rasituksen kestävyys. Toimivat vedeneristeenä. Nopeasti reagoivia. Voidaan työstää myös alhaisissa lämpötiloissa.
	Polyuretaanit	Erittäin hyvä mekaanisen ja hyvä kemiallisen rasituksen kestävyys. Hyvä iskunkestävyys. Toimivat vesieristeenä.
	Vinyyliesterit ja yhdistelmäpolyuretaanit	Erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys.
Erikoispinnoitteet	Sähköä johtavat pinnoitteet	Pinnoitemassa maadoitettavissa.
	Elastiset pinnoitteet (elastomeerit)	Erittäin hyvä halkeamien silloituskyky myös alhaisissa lämpötiloissa.
	Polyurea	Ruiskutettavia ja nopeasti kovettuvia. Erittäin hyvä mekaaninen kestävyys ja erinomainen lämmön sekä kemikaalien kestävyys.

Toimivuuden ja säilyvyyden kannalta kaikkien pinnoitteiden kohdalla on kiinnitettävä huomiota huolelliseen alusta- ja pinnoitustyöhön. Ennen pinnoitusta tulee betonipinnasta

poistaa kaikki tartuntaa heikentävä aines kuten sementtiliima ja jälkihoitoaine. Betonipinta voidaan esikäsitellä esimerkiksi timanttihionnalla tai sinkopuhdistamalla. Esikäsitelyn jälkeen pinta imuroidaan huolellisesti ennen pohjusteen asennusta. Pinnoitteita voidaan asentaa myös ilman pohjustetta, jolloin pinnoitemateriaali asennetaan suoraan betonipintaan. [5, s. 33–38.]

Asennus- ja alustatöiden lisäksi pinnoitteen tartuntalujuuteen vaikuttaa pinnoitettavan rakenteen kosteuspiitoisuus. Pinnoitteen täytyy päästä kovettumaan tarpeeksi kuivaan pintaan, ennen rakenteesta pois pyrkivän kosteuden nousua. Betonilattioiden pinnoitusohjeessa, by54/BLY 12 todetaan: ”Useimmille pinnoitteille riittää, että betonirakenteen pintaosat (0...5 mm) ovat pinnoitushetkellä kuivuneet sen verran, että pinnoitteen lujittuminen ja kiinnittyminen ehtivät tapahtua onnistuneesti ennen pinnoitteen alapuolisen kosteuden nousua”. [5, s. 29–30.] Betonilattiat, by45/BLY7 asettaa valmiin lattiapinnan vetolujuudeksi suurten rasiusten tiloihin 2,0 N/mm² ja keskisuurten rasiusten tiloihin 1,2 N/mm². [7, s. 37.]

3 Alustabetonin kosteus ja pinnoitteen tartunta

Diplomityössä *Alustabetonin kosteuspitoisuuden vaikutus pinnoitteen tartuntaan* (Saari-
nen, Jarmo. 2010.) tutkittiin kahdeksan eri pinnoiteyhdistelmän tartuntalujuutta erilai-
sissa alustabetonin kosteustapauksissa. Alkuperäisessä tutkimuksessa seurattiin pin-
noitettujen koekappaleiden kosteuskehitystä sekä pinnoitteiden tartuntavetolujuutta 3,5
kuukauden ikään asti. [8, s.127.] Diplomityön tutkimusosuus toimii tämän insinööriyön
oleellisena lähtötietona. Tässä luvussa esitellään alkuperäinen tutkimus ja johtopäätök-
set vuodelta 2010 sekä lähtökohdat pitkäaikaistutkimukselle.

3.1 Alkuperäinen tutkimus

Alkuperäisen tutkimuksen (Saarinen, 2010) koeosuus aloitettiin valamalla Rudus Oy:n
valmistamalla betonilla noin 70 koekappaletta elintarvikeallasmuotteihin, joiden koko oli
530 mm x 370 mm x 80 mm. Koeosuuden betonina käytettiin normaalisti sitoutuvaa lat-
tiabetonia, jonka lujuusluokka oli K30, notkeusluokka S3 ja runkoaineen maksimiraeko-
kona #8 mm. Betonissa käytetty sementti oli nopeasti kovettuvaa rapidsementtiä (R).
Sementin, runkoaineen ja veden lisäksi betonin osa-aineina oli huokostinta ja lentotuh-
kaa. Betoniresepti on esitetty Rudus Oy:n kuormakirjassa liitteessä 1 sekä alla taulu-
kossa 3.

Taulukko 3. Alkuperäisessä tutkimuksessa käytetyn betonin osa-aineet ja määrät (kg/m³), vesi-
sementtisuhde (v/s) sekä vesi-sideainesuhde (v/s+0,25lt). [8.]

Betoniresepti	
osa-aine	kg / m ³
0 - 8 hienoa	532
0 - 8 karkea	1114
huokostin	2,3
CEM II 42,5R	358,5
lentotuhka	64
vesi	250
v/s =	0,7
v/(s+0,25lt) =	0,67

Taulukossa 3 esitetyn reseptin mukaan valmistetun betonimassan vesi-sementtisuhte (v/s) oli 0,7. Betoniin lisäystä lentotuhkasta 25% laskettiin toimivaksi sideaineena, jolloin käytetyn betonin teholliseksi vesi-sideainesuhteeksi (v/s+0,25lt) muodostui 0,67.

Koekappaleiden valamisen jälkeen betonimassa tiivistettiin sauvatäryttimellä ja linjattiin muoviasioiden yläreunaan, hierrettiin sekä terässliipattiin. Jälkihoitoajan alussa koekappaleet peitettiin usean kappaleen peittäväillä muoveilla kahdeksi päiväksi. Tämän jälkeen betonipinnat sumutettiin märäksi ja yksittäisten koekappaleiden päälle asennettiin jälkihoitomuovi, joka tiivistettiin muotin reunoille kuvan 6 mukaisesti.



Kuva 6. Kuvassa vasemmalla on tilannekuva koekappaleiden linjauksesta ja oikealla jälkihoitomuovi on tiivistetty yksittäisen koekappaleen päälle [8].

Jälkihoidon jälkeen koekappaleiden pinnasta hiottiin timanttilaikalla sementtiliima pois ja runkoaineen maksimiraekoosta noin $\frac{1}{3}$ näkyviin. Hionnan jälkeen betonipinta imuroitiin kahteen kertaan imurin putkella ristiin. Alkuperäisessä tutkimuksessa pinnoitettaville koekappaleille määrityi neljä eri kosteustapausta, jotka olivat:

- **heti** = kahden viikon jälkihoitoajan jälkeen koekappale pinnoitettiin tunnin kuluttua.
- **1 vrk** = kahden viikon jälkihoitoajan jälkeen koekappale pinnoitettiin vuorokauden kuluttua.
- **kasteltu** = kahden viikon jälkihoitoajan jälkeen koekappaleet kuivuivat 11 – 13 vuorokautta, jonka jälkeen niitä kasteltiin pinnasta seitsemän vuorokauden ajan. Ennen pinnoitusta betonin pinta pyyhittiin kuivaksi ja pinnoitettiin tunnin kuluttua kuivauksesta.
- **märkä** = viiden viikon jälkihoitoajan jälkeen koekappaleita kasteltiin kahdeksan vuorokautta ja pinta pidettiin kosteana sumuttamalla pinnoitukseen saakka.

Kosteustapauksissa kasteltu ja märkä koekappaleiden pintaan reunoille liimattiin muovilistat, joiden rajaamassa kaukalossa annettiin irtoveden imeytyä betoniin kuvassa 7 esitetysti.



Kuva 7. Vasemmalla on esitetty timantilla pinnasta hiottu koekappale, josta sementtiliima on poistettu kokonaan ja silmämääräisesti arvioiden noin 1/3 runkoaineen maksimirakkoista on näkyvillä. Oikealla kuvassa on näkyvissä koekappaleen päällä pidetty vesipatja kaukalossa kosteustapauksissa kasteltu ja märkä. [8.]

Alkuperäisen tutkimuksen koekappaleista määritettiin lähtökosteudet ennen pinnoitusta syvyyksiltä 5 mm, 10 mm ja 32 mm. Lähtökosteudet kosteustapauksittain on esitetty alla taulukossa 4.

Taulukko 4. Koekappaleiden suhteelliset kosteudet syvyyksillä 5 mm, 10 mm ja 32 mm eri kosteustapauksille ennen pinnoitusta. [8.]

Kosteustapaus	Suhteellinen kosteus [%] syvyydellä		
	5 mm	10 mm	32 mm
1 vrk	84,0	93,4	95,8
heti	93,1	94,2	95,8
kasteltu	96,8 – 98,2*	95,6 – 97,3*	91,7 – 93,9*
märkä	98,4	98,1	94,3

* kosteuspitoisuus riippui koekappaleen kuivumisajasta jälkihoidon ja kastelun välissä

Huolellisten alustustöiden jälkeen koekappaleet pinnoitettiin kahdeksalla eri pinnoiteyhdistelmällä (P1 - P8). Pinnoitemateriaaleina Saarisen tutkimuksessa käytettiin kolmessa koekappaleessa epoksinnoitteita (P1, P7 ja P8), kahdessa koekappaleessa polyuretaanipinnoitteita (P2 ja P3) sekä lisäksi akryylipinnoitetta (P6), polyuretaani-akrylaatti-

maalia (P5) ja kasviöljypohjaista muovipolymeeripinnoitetta (P4). Pinnoitteiden asennuksessa käytettiin yhteensopivia pohjusteaineita. Pinnoitetuotteiden ja pohjusteiden yhdistelmät ja tuotetyypit on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Alkuperäisen tutkimuksen pinnoiteyhdistelmät tuoteniminen ja -tyypeineen. [8.]

Pinnoiteyhdistelmä		Tuote	Tyyppi
P1	Pinnoite	Nanten SL epoksimassa	2-komp. liuotteeton itsesiliävä epoksihartsipohjainen
	Pohjuste	HM epoksi	2-komp. liuotteeton epoksihartsipohjuste
P2	Pinnoite	Teknos Teknofloor 660F	2-komp. liuotteeton polyuretaanipinnoite
	Pohjuste	Teknofloor primer 310F	2-komp. liuotteeton epoksilakka
P3	Pinnoite	Sikafloor 400 N Elastic	1-komp. vähäliuotteinen kosteuskovettava polyuretaani
	Pohjuste	Sikafloor 156	2-komp. liuotteeton epoksilakka
P4	Pinnoite	TKR -peruspinnoite	Elastinen kasvisöljypohjainen muovipolymeeri
	Pohjuste	TKR -peruspinnoite	Pohjusteena sivelykerros pinnoitemateriaalilla
P5	Maali	Tikkurila Betolux Akva	Vesiohenteinen polyuretaani-akrylaattimaali
	Pohjuste	Betolux Akva pohjuste	Vesiohenteinen akrylaattipohjusteaine
P6	Lakka	Nanten DC 307	Metakrylaattipohjainen akryylilakka
	Pinnoite	Nanten DC 205	2-komp. Metakrylaattipohjainen akryylimassapinnoite
	Pohjuste	Nanten DC 101	Metakrylaattipohjainen pohjustuslakka
P7	Pinnoite	Nanten SL epoksimassa	2-komp. liuotteeton itsesiliävä epoksihartsipohjainen
	Pohjuste	M -pohjustin	2-komp. liuotteeton epoksihartsipohjuste
P8	Pinnoite	Basf Mastertop 1710	Vesipohjainen epoksi

Saarisen tutkimuksessa seurattiin taulukossa 5 esitettyjen kahdeksan eri pinnoiteyhdistelmän tartuntavetolujuuden kehitystä viikon, kuukauden ja 3,5 kuukauden iässä, kun pinnoitteet oli asennettu alustabetonin eri lähtökosteustapauksille (taulukko 4). Lisäksi tartuntavetolujuuskokeiden kanssa samanaikaisesti tarkasteltiin alustabetonin kosteuskajauman kehitystä pinnoitteiden alla.

Alkuperäisen tutkimuksen johtopäätösten mukaan pinnoitteet kestivät varsin hyvin ohjearvoja ylittävää alustabetonin kosteutta, kun pinnoitustyö toteutettiin muuten huolellisesti materiaalivalmistajien ohjeistusten mukaan. Tulosten perusteella pinnoitteiden alle

tasoittui syvyydeltä 5–10 mm mitattu kosteuspitoisuus pinnoitushetkellä. Suuressa osassa tapauksia alustabetonin kosteuspitoisuudella ei ollut merkittävää vaikutusta pinnoitteiden tartuntavetolujuuksiin ja osalla pinnoitteista saavutettiin jopa suurimmat tulokset pinnoitettaessa märimmälle alustalle. Saarisen diplomityön perusteella ehdotettiin pinnoitustyöhön menettelyä alustabetonin kosteuspitoisuuden määrittämiseen, jonka mukaan kosteuspitoisuus määritettäisiin näytepalamenetelmällä rakenteen pintaosasta (5 mm) ja rakennepaksuudesta riippuvalla syvyydeltä $0,4 \times A$ (1–3 cm).

3.2 Pitkäaikaistarkastelun lähtökohdat

Alkuperäinen tutkimus tarjoaa otolliset lähtökohdat pitkäaikaistarkastelulle. Vakiopaksuiset koekappaleet on valettu samaan aikaan 18.11.2009 samalla betonireseptillä, jonka osa-aineet määrineen on dokumentoitu liitteessä 1 ja esitetty taulukossa 3. Kun betonin koostumus on tiedossa, voidaan sen fysikaalista toimintaa arvioida eri tilanteissa. Näin voidaan olettaa kaikkien valettujen koekappaleiden betonin käyttäytyvän vakio-olosuhteissa samankaltaisesti.

Betonin jälkihoito, pinnan hionta ja imurointi sekä tartunta-aineen levitys ennen pinnoitusta on Saarisen tutkimuksessa toteutettu huolellisesti laboratorio-olosuhteissa. Tämä vähentää työvirheiden mahdollisuutta pinnoitustyössä ja siten tutkimuksen lopputulokseen vaikuttavia muuttujia. Näin ollen pitkäaikaistarkastelun merkitseviksi tekijöiksi muodostuu taulukossa 4 esitetyt alustabetonin kosteustapaukset sekä taulukossa 5 esitetyt pinnoiteyhdistelmät.

Saarinen esittää diplomityössään tarvetta pidemmälle seuranta-ajalle alkuperäisen tutkimuksen seuranta-ajan ollessa 3,5 kuukautta. Saarisen tutkimuksesta jätettiin ylimääräisiä koekappaleita, joita on säilytetty kuvan 8 mukaisesti Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n tiloissa. Koekappaleiden pinnoitteet ovat ehjiä eikä niistä ole suoritettu aiempia tutkimuksia. Muottina toimineiden muoviasioiden rajapinnat on tiivistetty alumiiniteipillä pinnoitteisiin reunoilta tapahtuvan kuivumisen estämiseksi. Säilytys on tapahtunut noin +20 °C sisäilmassa suojassa vaihtelevilta olosuhteilta ja rasituksilta. Sisäilmassa tapahtuva vuodenaikojen mukainen kosteuspitoisuuden vaihteluväli on normaalisti 15–65 %.



Kuva 8. Alkuperäisessä tutkimuksessa valettujen ja pinnoitettujen koekappaleiden säilytys on tapahtunut sisätiloissa (n. +20 °C) kymmenen vuoden ajan. Muovimuottien ja pinnoitteiden rajapinnat on tiivistetty alumiiniteipillä reunoilta tapahtuvan kuivumisen estämiseksi.

Tässä työssä tarkastellaan diplomityössä valettujen ylimääräisten koekappaleiden osalta pinnoitteiden tartuntavetolujuuksia sekä määritetään koekappaleiden kosteuspitoisuus eri syvyyksiltä. Tarkasteltavat koekappaleet on pinnoitettu 10 vuotta sitten ja tavoitteena on saada tietoa pinnoitteiden toimivuudesta pidemmällä aikavälillä.

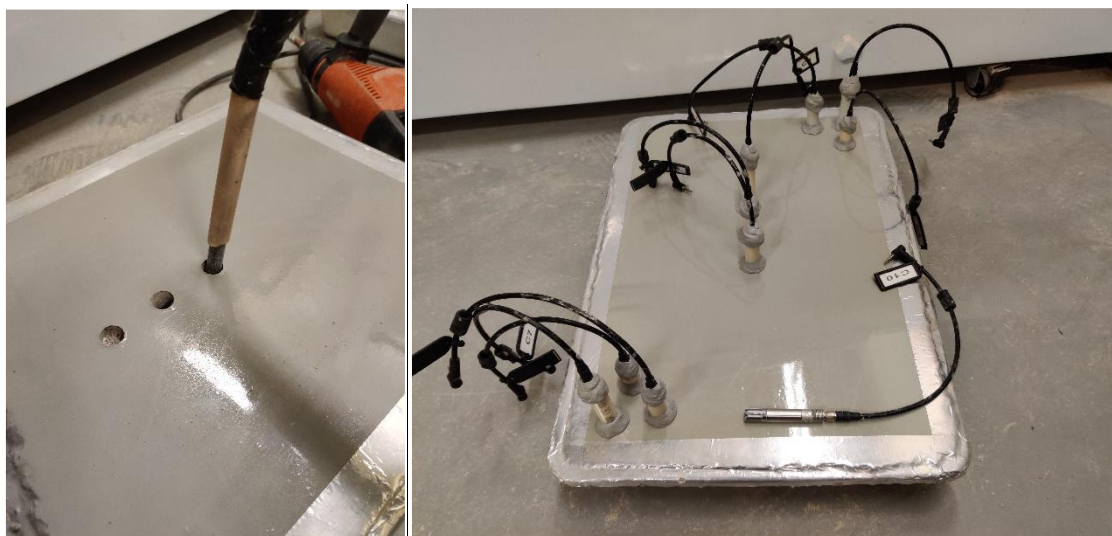
4 Tutkimusmenetelmät

Koekappaleiden veto- ja puristuskokeisiin sekä kosteusmittauksiin käytetään Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n päivittäisessä käytössä olevia mittalaitteita, jotka kalibroidaan säännöllisin väliajoin. Mittausten lisäksi kappaleista havainnoidaan aistinvaraisesti tutkailten pinnoitteen kuntoa, pinnoitteen tartuntaa koputtelukokeen avulla sekä reunojen teippausten kuntoa.

4.1 Kosteusmittaukset

Porareikämenetelmä

Porareikämittausten toteutustapa on esitetty yksityiskohtaisesti RT 14-10984 -ohjekortissa (Betonin suhteellisen kosteuden mittaus, 2010). Mittausmenetelmässä koekappaleeseen porataan kuivamenetelmällä halkaisijaltaan 16 mm reiät tarkasteltavaan mitaussyvyyteen. Porauksesta syntynyt pöly imuroidaan huolellisesti rei'istä ja niiden ympäristöstä (kuva 9, vasemmalla). Porattuun reikään asennetaan tiivis mittausputki, joka tiivistetään reunoistaan koekappaleen pintaan tiivistemassalla. Putki puhdistetaan imuroidalla ennen kuin sinne asennetaan suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittapää (Vaisala HMP 40S -mittapää). Putken pää tiivistetään huolellisesti mittapään kaapeliin kuvassa 9 oikealla esitetysti.



Kuva 9. Vasemmalla on kuva porareian imuroinnista. Yhden mittapisteen reiät on porattu syvyyksille 10 mm, 32 mm ja 50 mm. Oikealla on koekappaleen mittaputkien sisään asennettu Vaisala HMP 40S mittapää. Mittaputken ja koekappaleen sekä mittaputken pään ja mittapään kaapelin liitoskohdat on tiivistetty tiivistysmassalla.

Mittapäiden annetaan tasaantua putkissa kolmen vuorokauden ajan, jonka jälkeen niistä luetaan mittaussyvyydellä putkeen tasaantuneet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot Vaisala HM40 -lukulaitteella.

Näytepalamenetelmä

Näytepalamittaus toteutetaan RT 14-10984 -ohjekortin (Betonin suhteellisen kosteuden mittaus, 2010) ohjeistuksen mukaan. Kuvia näytepalamenetelmän työvaiheista esitetään kuvissa 10–12. Työssä koekappaleiden pinnoite ja pohjuste poistetaan, minkä jälkeen betonin pinnasta piikataan korkeintaan 5 mm paksuisia betonimurusia. Menetelmässä betonimuruset kerätään kahteen koeputkeen, jotka imuroidaan puhtaaksi ylimääräisen irtoaineksen johtaessa vääristyneisiin mittaustuloksiin. Koeputkien sisään asennetaan suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittapää (Vaisala HMP 40S -mittapää), joiden kaapeli tiivistetään koeputken suuaukkoon tiivistemassalla.



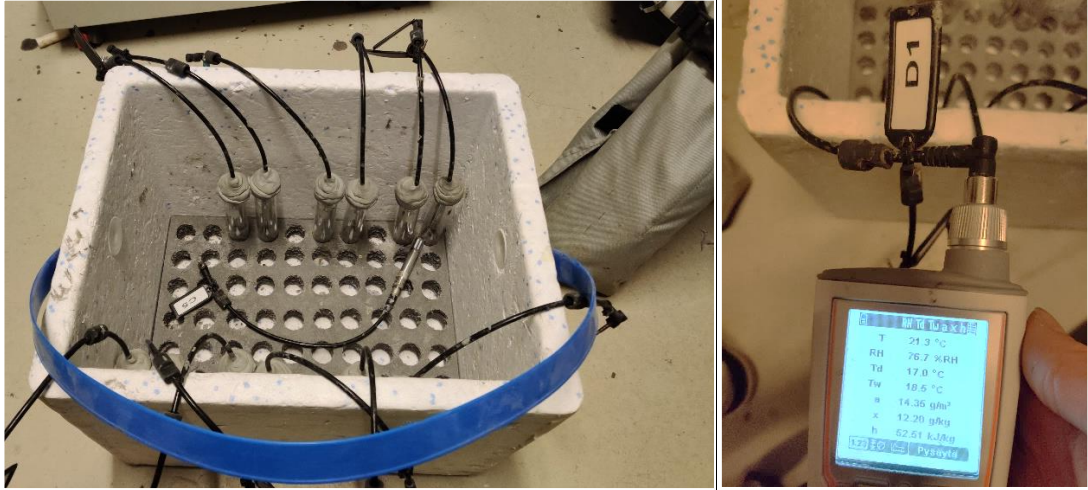
Kuva 10. Kuvassa vasemmalla on näytepalamenetelmän alueelta poistettu pinnoite ja pohjuste. Alueen yläosasta on piikattu betonimurusia, alaosassa on näkyvillä piikkaamatonta aluetta. Oikealla muruset on kerätty imuroituihin koeputkiin, joihin on asennettu suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mittapäät. Mittapäiden kaapelit on tiivistetty koeputkien suuaukkoihin.

Näytteenkeräyksen jälkeen syntynyt kuoppa tasoitetaan seuraavaa keräystä varten 5 mm tavoitesyvyyttä ylemmäs, mikä varmistetaan mittaamalla kuopan pohjan etäisyys pinnasta. Syvyyssmittauksissa vähennetään pinnoitteen paksuus, jolloin tulos kuvastaa haluttuja syvyyksiä alustabetonista. Näin seuraavaksi piikattavat betonimuruset edustavat mittaussyvyyden tilaa. Näytteenkeruuteen ei kelpuuteta yli 5 mm paksuisia betonimurusia niiden vaikuttaessa mittaustulokseen.



Kuva 11. Vasemmalla on esitetty näytekuopan syvyyden varmistus. Kyseisen koekappaleen pinnoitteen paksuus on n. 2 mm, joten seuraavat näytemuruset tulevat betonin syvyydeltä 5–10 mm. Oikealla kuvassa on yli 5 mm paksuinen betonimurunen, joita ei hyväksytä näytteenkeruussa.

Prosessi toistetaan, kunnes näytteet on kerätty kaikilta halutuilta mittaussyvyyksiltä koeputkiin. Tiivistetyt koeputket mittapäineen siirretään lämpölaukussa vakio-olosuhteisiin. Näytteitä säilytetään yhden vuorokauden ajan noin +20 °C lämpötilassa.



Kuva 12. Vasemmalla on kuvattu näytteiden säilytys. Yhden vuorokauden tasaantumisen jälkeen, näytteistä luetaan lämpötila ja suhteellinen kosteus Vaisala HM40 -lukulaitteella oikealla kuvassa esitetysti.

Vuorokauden aikana koeputkiin tasaantuu betonimurusten suhteellinen kosteus, joka lämpötilan lisäksi luetaan mittapäistä Vaisala HM40 -lukulaitteella. Pinnasta suoritettavien näytepalamittausten lisäksi insinööriyössä mitataan ennakkokokeissa kosteuspitoisuutta myös koekappaleen pohjasta sekä 10 mm syvyydeltä pohjasta.

Kuivatuspunnitusmenetelmä

Koekappaleiden absoluuttista kosteussisältöä (p-%) mitataan kuivatuspunnitusmenetelmällä standardin SFS-EN 1097-5 mukaisesti. Betonista irrotetut muruset kerätään tarkkuusvaa'alla punnittuihin foliovuokiin (kuva 17 vasemmalla). Näytteet punnitaan ja niiden annetaan kuivua lämpökaapissa (+105 °C) kuvassa 17 oikealla esitetysti. Näytteet punnitaan, kunnes ne ovat saavuttaneet vakiopainonsa eikä punnituksissa havaita painon alenemista.



Kuva 13. Vasemmalla on kuvattu näytteen punnitus tarkkuusvaa'alla ja oikealla näytteet ovat kuivumassa lämpökaapissa kuivumassa. Kuivumisen jälkeen näytteet punnitaan uudelleen.

Näytteestä määritetään painoprosenttikosteus kaavalla 2:

$$u = \frac{m_{\text{märkä}} - m_{\text{kuiva}}}{m_{\text{kuiva}}} \times 100 \% \quad (2)$$

jossa $m_{\text{märkä}}$ = näytepalan alkuperäinen massa
 m_{kuiva} = näytepalan vakiomassa

Näytepalamenetelmässä käytettyjä betoninäytteitä voidaan varsin luotettavasti käyttää absoluuttisen kosteuspitoisuuden määrittämiseen [8, s. 97–99]. Tässä työssä kuivatuspunnitusmenetelmässä käytetään samoja betonimurusia kuin suhteellisen kosteuden määrittämisessä näytepalamenetelmällä. Näytteiden annetaan kuivua lämpökaapissa vähintään 7 vuorokauden ajan.

Pintakosteusilmaisin

Pintakosteusilmaisimet eivät mittaa varsinaisesti kosteuspitoisuutta, vaan materiaalin sähkönjohtavuuden avulla ne antavat arvion kyseisen kohdan kosteuspitoisuudesta. Pintakosteusilmaisimet mittaavat laitekohtaisesti arvion koko mittaussyvyydeltä, jonka vuoksi eri tarkastelusyvyyksillä vallitsevia kosteuspitoisuuksia ei pystytä mittaamaan luotettavasti.

Pintakosteusilmaisimet muuntavat sähkövirran laitekohtaiseksi lukuarvoksi. Mittaustulokseen vaikuttaa kosteuspitoisuuden lisäksi esimerkiksi eri materiaalit rakenteen pinnassa tai mittausalueelle sijoittuvat raudoitteet betonissa. Pintakosteusilmaisimilla ei voidakaan luotettavasti mitata kosteuspitoisuuksia, vaan ne soveltuvatkin paremmin kosteampien kohtien kartoitukseen laajoilta pinnoilta taikka tietyn rakenteen kosteuspitoisuuden muutoksen tarkkailuun. Tämä edellyttää kuitenkin kokenutta laitteen käyttäjää, joka osaa tehdä oikeat johtopäätökset laitteen ilmoittamista arvoista.

4.2 Tartuntavetolujuuskokeet

Eri pinnoitteiden tartuntavetolujuuksia tarkastellaan vetokokeiden avulla, jotka suoritetaan F- 20 D Easy M -vetolaitetta käyttäen. Vetolujuuskokeet toteutetaan standardia SFS-EN 1542 mukaillen. Vetolujuudet määritetään kolmen vedon keskiarvona. Työvaiheita vetolujuusmittauksista esitetään kuvissa 14–17.

Vetoalue rajataan 50 mm halkaisijan timanttikruunulla poraamalla koekappaleen pinnasta. Poraus ulotetaan noin 10 mm syvyyteen alustabetoniin, jotta vetokokeella saadaan määritettyä heikoin kohta rakenteen pinnasta ilman, että pinnoitteen sitkeys enää vaikuttaa tulokseen. Porauksesta syntyneet pölyt imuroidaan alueelta. Vetoalue ja -nappi puhdistetaan tämän jälkeen asetonilla.



Kuva 14. Vasemmalla laatan vetoalueet on rajattu 50 mm halkaisijan timanttikruunulla ja oikealla on esitetty puhdistettava vetoalue ja -nappi sekä puhdistukseen käytetty aseton.

Puhdistetulle vetoalueelle levitetään syanoakrylaatti-pikaliima. Tämän jälkeen vetonappiin suihkutetaan kiihdytintä nopeuttamaan liiman kovettumisreaktiota. Vetonappi painetaan tämän jälkeen huolellisesti vetoalueeseen.



Kuva 15. Vasemmalla on vetoalueelle levitetty pikaliima ja oikealla vetonappiin on suihkutettu kiihdytintä.

Liiman kovettuttua poistetaan reunoille pursunneet liimat puukolla, jotta reuna-alueiden ylimääräinen liima ei suurenni vedettävän alueen pinta-alaa ja näin ollen vääristä vetolujuustulosta.



Kuva 16. Vetoalueen reunan yli pursunneet liimat (näkyvissä kuvassa vasemmalla) poistetaan puukolla.

Vetolaite kiinnitetään paikoilleen vetonappiin ja suoritetaan vetokoe. Tartuntavetolujuus määrittyy kaavalla 1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

jossa σ = vetolujuus (N/mm²)
 F = murtovoima (N)
 A = vetokappaleen pinta-ala (mm²)



Kuva 17. Vasemmalla vetolaite F-20 D Easy M on kiinnitetty vetonappiin ja valmiina suoritettavaan vetokokeeseen. Oikealla nähdään laitteen mittaama vetolujuus (2,696 N/mm²) ja murtokohta tarkastelussa.

Laite ilmoittaa murtoon vaaditun vetolujuuden ja murtokohta esitetään tarkastelun jälkeen kirjaimin:

- A = alustabetonin koheesiomurtuma
- A/B = adheesiomurtuma alustan ja ensimmäisen pinnoitekerroksen välillä
- B = koheesiomurtuma ensimmäisessä pintakerroksessa
- B/C = adheesiomurtuma ensimmäisen ja toisen pinnoitekerroksen välillä
- C/Y = adheesiomurtuma liiman ja pintakerroksen välillä
- Y = liiman koheesiomurtuma
- Y/Z = adheesiomurtuma liiman ja vetokappaleen välillä

Murtokohdan tyyppi ilmaistaan yksittäisinä termeinä (100%) tai niiden yhdistelminä (esim. 80% / 20%) silmämääräisen arvioinnin perusteella. Vetolaitteen voiman kasvunopeutena käytetään halkaisijaltaan 50 mm pyöreätä vetonappia käyttäen koville pinnoitteille 98 N/s (0,05 N/s/mm²) ja elastisille pinnoitteille 294 N/s (0,15 N/s/mm²).

4.3 Puristuslujuuskokeet

Betonin puristuslujuuskokeita varten koekappaleista porataan 50 mm halkaisijan timanttikruunulla lieriön muotoinen näytekappale, joka sahataan sekä hiotaan siten, että sen korkeuden ja halkaisijan suhde on 1:1 (kuva 18 oikealla). Näytekappaletta säilytetään laboratorio-olosuhteissa 3 vuorokauden ajan standardin SFS-EN 13971 mukaisesti.



Kuva 18. Vasemmalla on esitetty koekappaleista timantilla poratut näytekappaleet ja oikealla näytekappaleet on sahattu ja hiottu 1:1 korkeuden ja halkaisijan suhteen.

Näytekappale punnitaan tarkkuusvaa'alla ja saadun massan sekä kappaleen mittojen perusteella määritetään kappaleen tiheys standardin SFS-EN 12390-7 mukaisesti. Valmisteltu näytekappale asetetaan tämän jälkeen Form + Test Alpha 3-3000 AR -laitteeseen (kuva 19), jolla suoritetaan puristuskoee standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti. Laite puristaa näytettä kasvavalla voimalla, kunnes näytekappale murtuu.



Kuva 19. Näytekappale asetettuna Form + Test Alpha 3-3000 AR –laitteeseen ja valmiina puristuskokeeseen.

Näytekappaleen murtoon vaadittu voima jaetaan kappaleen poikkileikkausalan suhteen, jolloin lieriön puristuslujuus saadaan kaavalla 3:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

jossa σ = puristuslujuus (MPa)
 F = murtovoima (N)
 A = näytekappaleen pinta-ala (mm²)

Saatu puristuslujuus muunnetaan 150 mm särmäisten kuutioiden puristuslujuudeksi by65 Betoninormit –ohjeiden mukaisesti.

4.4 Ohuthietutkimukset

Ohuthietutkimusta varten koekappaleista porataan puristuslujuusnäytteiden tavoin halkaisijaltaan 50 mm lieriön muotoinen näytekappale. Näytekappaleesta valmistellaan noin

0,02–0,025 mm paksuinen leike standardien ASTM C856-18a ja NT Build 381 mukaisesti. Ohuen leikkeen läpi kulkevan valon avulla näytettä tarkastellaan Nikon E600 polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopilla. Ohuthienäytteiden avulla selvitetään betonin koostumusta, rakennetta sekä sementin hydrataatioastetta.

5 Laboratoriokokeet

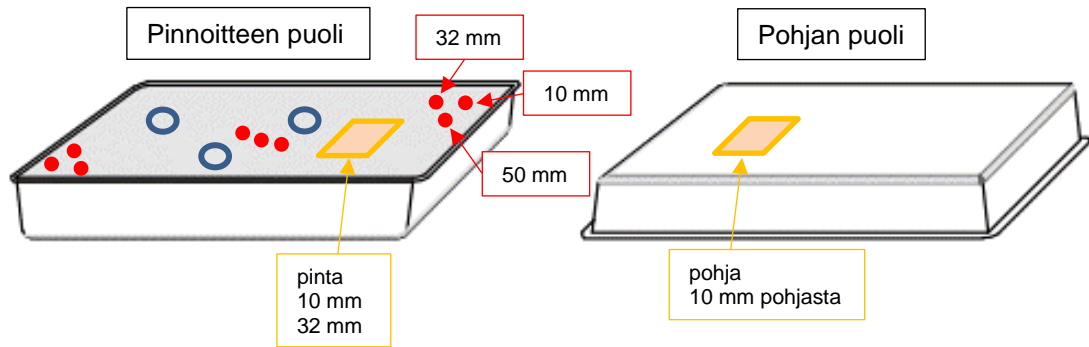
Ennen laboratoriokokeisiin ryhtymistä koeosuuden toteutus ja riskit arvioidaan liitteenä 2 olevaan koestussuunnitelmaan, jonka tarkoituksena on varmistaa koeosuuden työvaiheiden luotettava suoritus. Suunnitelman toimivuus varmistetaan ennakkovaiheella ennen varsinaista koeosuutta. Tässä luvussa käsitellään insinööriyön koeosuuden kulku, tulokset sekä niiden tarkastelut.

5.1 Ennakkovaihe

5.1.1 Ennakkovaiheen koejärjestely

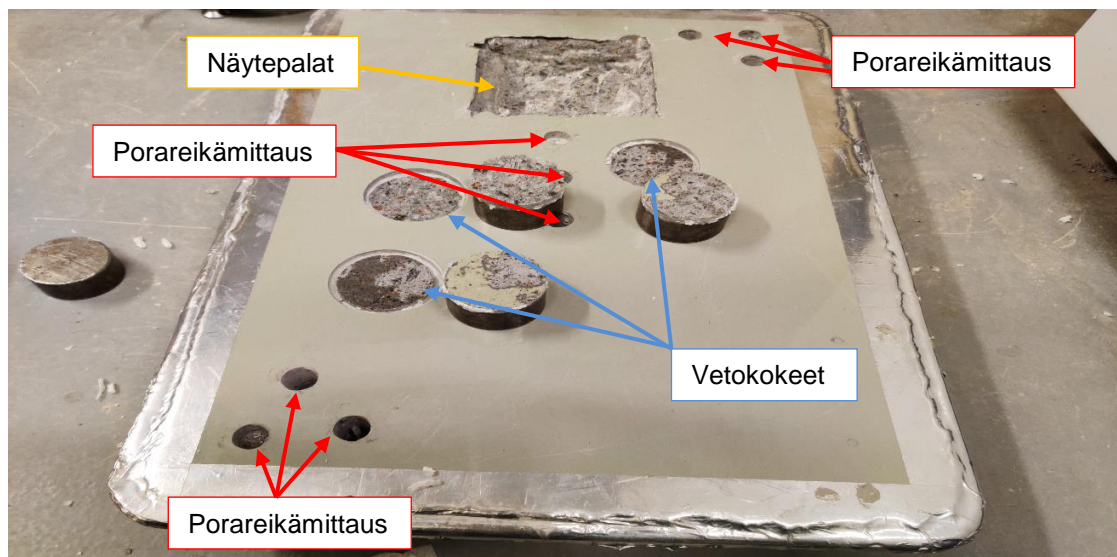
Koestukset aloitetaan ennakkokokeilla kahdelle saman kosteustapauksen koekappaleelle (P2 ja P4, kosteustapauksella 1 vrk). Pinnoiteyhdistelmien ja kosteustapausten määritelmät on esitetty luvussa 3.1 taulukoissa 4 ja 5. Ennakkokokeiden tarkoituksena on varmistaa koestussuunnitelman toimivuus sekä mahdollistaa suunnitelman päivitys tarvittaessa. Lisäksi ennakkovaiheessa tarkastellaan koekappaleiden kosteusjakaumaa tarkemmin.

Tarkemmalla koekappaleiden kosteusjakauman tarkastelulla pyritään saamaan tietoa betonin kosteusliikkeiden suunnasta. Betonin suhteellista kosteuspitoisuutta ja absoluuttista kosteussisältöä mitataan ennakkovaiheessa näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmillä syvyyksien pinta, 10 mm ja 32 mm lisäksi valumuottina toimineen muoviasian alta koekappaleen alapinnasta ja 10 mm syvyydeltä pohjasta katsottuna. Näytepalamenetelmän lisäksi suoritetaan porareikämittaukset kolmesta mittapisteestä syvyyksiltä 10 mm, 32 mm ja 50 mm. Kaksi porareikämittausta suoritetaan samalta syvyydeltä kuin näytepalamittaukset sekä yksi syvemmältä rakenteesta. Porareikämittausten mittapistet (3 kpl) jaetaan tutkittavan koekappaleen nurkkiin ja keskiosaan selvittääkseen onko kuivumista tapahtunut enemmän kappaleen reuna-alueilta muovimuotin rajalta. Kuvassa 20 havainnollistetaan ennakkovaiheen laboratoriokokeiden mittapisteitä.



Kuva 20. Kuvassa on esitetty esimerkit koekappaleiden mittapisteistä ja -syvyyksistä ennakkovaiheessa. Siniset ympyrät kuvastavat pinnoitteen tartuntavetolujuuskokeita, punaiset pisteet suhteellisen kosteuden mittauksia porareikämittausmenetelmällä kolmelta eri syvyydeltä ja oranssit nelikulmiot suhteellisen kosteuden mittauksia näytepalamenetelmällä kolmelta eri syvyydeltä sekä pohjasta määritettynä kahdelta syvyydeltä.

Koekappaleiden kunto tarkastetaan aistinvaraisesti ja pinnoitteelle suoritetaan koputtelukoe, jonka avulla arvioidaan pinnoitteen tartuntaa alustaansa. Koekappaleiden pinnan kosteutta kartoitetaan kahdella pintakosteusilmaisimella (Gann Hydrotest LG1 ja Tramex CME4). Pintaa rikkomattomien tutkimusmenetelmien jälkeen pinnoitteille suoritetaan tartuntavetolujuuskokeet ja kosteusmittausten näytteiden keruu. Koekappaleelle ennakkovaiheessa tehtyjä mittauksia havainnollistetaan kuvassa 21.



Kuva 21. Kuvassa on nimeten esitetty esimerkki ennakkovaiheessa koekappaleelle tehdyistä mittauksista.

Ennakkovaiheen perusteella arvioidaan koestussuunnitelman toimivuus ja tehdään siihen mahdolliset tarkennukset luotettavien tutkimustulosten varmistamiseksi.

5.1.2 Kosteusmittaustulokset ja tulosten tarkastelu

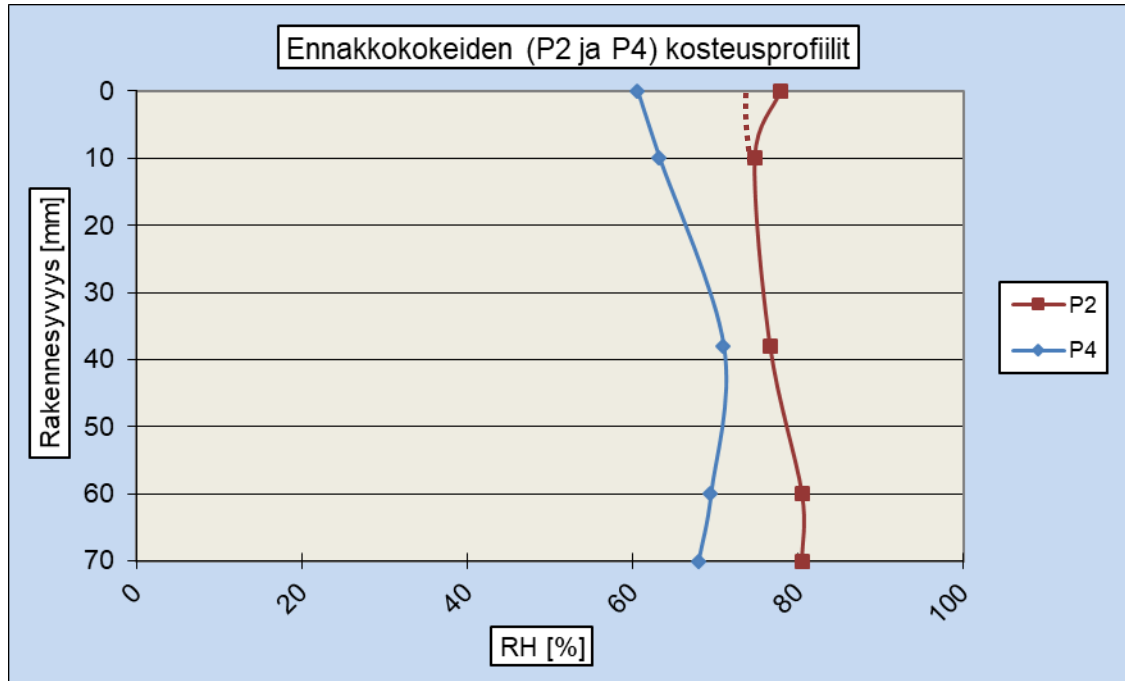
Ennakkovaiheen kosteusmittausten tulokset eri menetelmillä määritettyinä on esitetty taulukossa 6. Pinnoiteyhdistelmän P2 alta määritetyt suhteellisen kosteuspitoisuuden mittaustulokset ovat korkeampia (75–80 RH%) kaikilla tarkastelusyvyyksillä kuin pinnoiteyhdistelmän P4 alta määritetyt (61–71 RH%). Mittaustuloksista nähdään rakenteen kosteusjakauma mittaussyvyyden mukaan. Pinnoiteyhdistelmän P2 kohdalla havaitaan poikkeama pinnoitteen alapuolisen (syvyydellä pinta) suhteellisen kosteuspitoisuuden tuloksen ollessa korkeampi kuin syvemmällä rakenteen pintaosissa (syvyyksillä 10 mm ja 32 mm). Painoprosentteina määritetyssä kosteuspitoisuudessa tätä poikkeamaa ei nähdä, vaan arvot nousevat pääosin pinnalta syvemmälle edettäessä.

Taulukko 6. Ennakkokokeiden eri menetelmillä määritetyt kosteusmittaustulokset tarkastelusyvyyksien mukaan. Pintakosteusmittareiden (Gann ja Tramex) tulokset on mitattu pinnoitteiden päältä.

Pinnoiteyhdistelmä		Kosteusmittaustulos syvyydeltä					
nro	menetelmä	pinta	10 mm	32 mm	50 mm	60 mm	pohja
P2	RH [%] näytepala	77,9	74,8	76,6		80,5	80,5
	p-%	6,3	6,3	6,7		6,2	6,5
	RH [%] porareikä		71,6	76,6	79,3		
	Gann	95 - 100					
	Tramex	3,4					
P4	RH [%] näytepala	60,6	63,3	71,0		69,5	68,0
	p-%	4,4	5,2	6,0		6,3	5,7
	RH [%] porareikä		58,5	63,8	68,5		
	Gann	100 - 105					
	Tramex	4,2					

Pinnoiteyhdistelmän P4 tapauksessa pohjaosasta mitatut suhteelliset kosteuspitoisuudet ovat alhaisempia kuin rakenteen keskiosassa. Tähän osatekijänä voi vaikuttaa koe-kappaleen reunan alumiiniteippauksissa havaittu repeämä, joka mahdollistaa pohjan kuivumista muoviasian reunan kautta.

Absoluuttiset kosteuspitoisuudet ovat pinnoiteyhdistelmällä P2 varsin lähellä toisiansa kaikilla mittaussyvyyksillä. Pinnoiteyhdistelmän P4 alta määritetyt absoluuttiset kosteuspitoisuudet ovat pintaosissa alhaisempia kuin syvemällä rakenteessa lukuun ottamatta syvyydeltä pohja määritettyä mittausta. Alustabetonien kosteusjakaumia havainnollistetaan kuvassa 22. Pinnoiteyhdistelmän P2 alta määritetty pintaosia korkeampi suhteellisen kosteuden mittaustulos vääristää betonin kosteusjakauman käyrää. Kuvaan 22 on hahmoteltu punaisella pisteviivalla koekappaleen muiden kosteusmittaussyvyyksien tulosten perusteella todennäköisempää tilannetta kuvaavampi tilanne pinnoitteen alla.

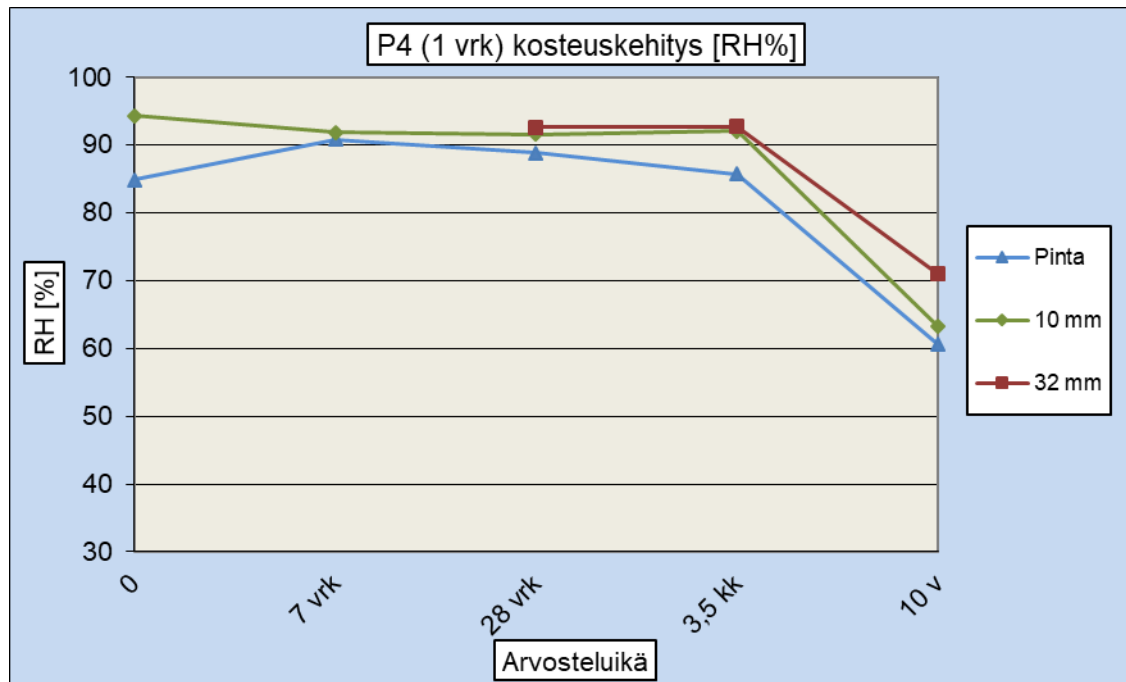


Kuva 22. Kuvaajassa on esitetty ennakkokokeiden koekappaleiden (P2 ja P4) suhteellisen kosteuspitoisuuden (RH %) käyrät rakennesyvyyden mukaan (kosteusjakauma). Syvyys 0 mm kuvastaa koekappaleen pintaa ja 70 mm pohjaa. Pinnoiteyhdistelmä P2 käyrän pintaosan arvioitua todellista kosteuspitoisuutta on esitetty katkoviivalla.

Kuvissa 23–25 on esitetty kuvaajat, joissa on esitetty tämän tutkimuksen lisäksi alkuperäisen tutkimuksen aikana tehtyjen mittausten tulokset pinnoiteyhdistelmille P4 ja P2 kosteustapauksessa 1 vrk. Kuvaajissa esitetään koekappaleiden kosteusjakaumien kehitys eri syvyyksillä kymmenen vuoden takaisesta pinnoitushetkestä eteenpäin. Kuvaajan käyrät kuvastavat suhteellisia kosteuspitoisuuksia (RH %) sekä absoluuttisia kosteuspitoisuuksia (p-%) mittaussyvyyksiltä pinta, 10 mm ja 32 mm mittaussyvyyskohdan suhteen. Kuvaajissa alkuperäisen tutkimuksen mittaustulokset ensimmäisen 3,5 kk ai-

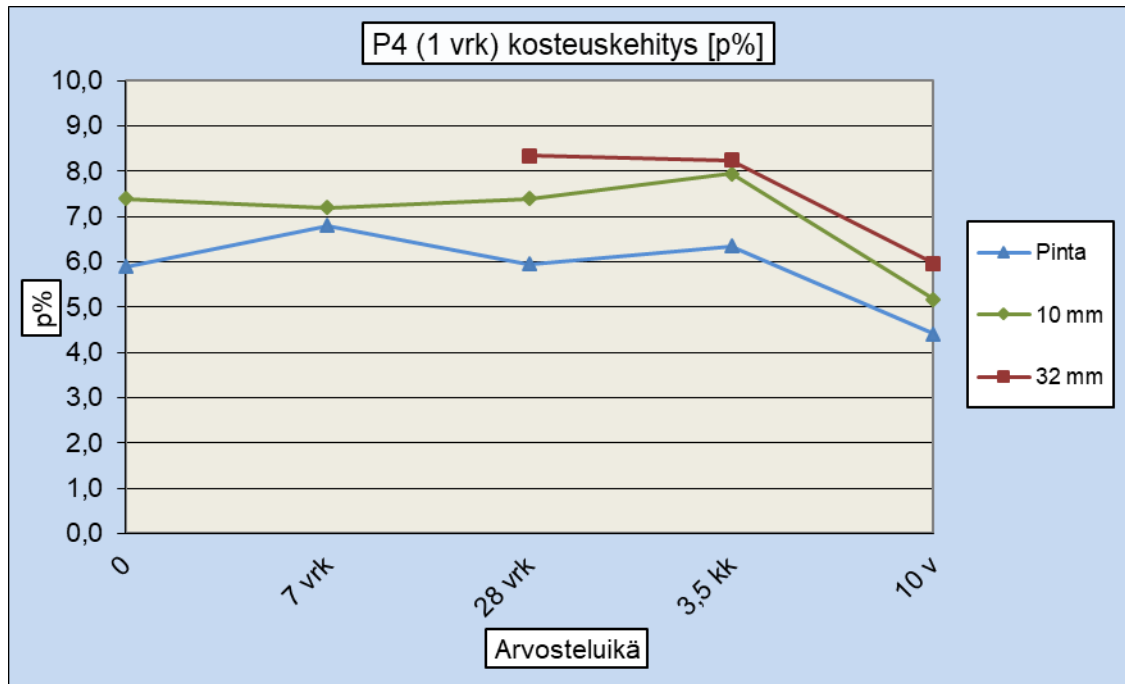
kana on esitetty vaaka-akselilla epätodellisessa suhteessa kymmenen vuoden tarkastelujaksoon nähden, jotta alkuvaiheen kosteuskäyttäytymistä pystytään havainnollistamaan selkeämmin.

Kuvassa 23 on esitetty pinnoiteyhdistelmän P4 alta määritettyjen suhteellisen kosteuspitoisuuksien mittaustulokset. Käyristä havaitaan kosteuspitoisuuden laskevan kaikilla tarkastelusyvyyksillä kymmenen vuoden takaisista tuloksista.



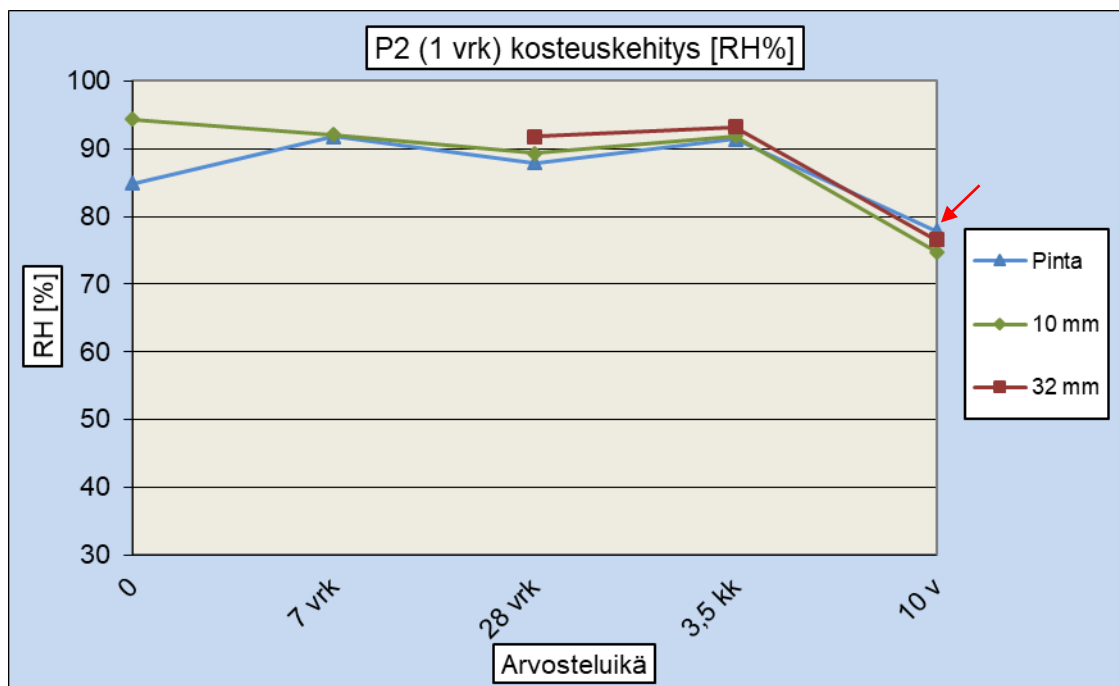
Kuva 23. Kuvaajassa on esitetty pinnoiteyhdistelmä P4 ennakkokokeiden suhteellisen kosteuspitoisuuden (RH %) kehitys tarkastelusyvyyksillä pinta, 10 mm ja 32 mm alkuperäisestä pinnoitushetkestä eteenpäin.

Kosteuspitoisuuksien muutosta painoprosenttikosteuksina pinnoiteyhdistelmän P4 tapauksessa esitetään kuvassa 24. Käyrät esittävät samoja mittasyvyksiä kuin suhteellisen kosteuspitoisuuden käyrät. Painoprosenttikosteuksien havaitaan myötäilevän suhteellisen kosteuspitoisuuden käyrästä: kosteuspitoisuudet laskevat kaikilla tarkastelusyvyyksillä.



Kuva 24. Kuvaajassa on esitetty pinnoiteyhdistelmä P4 ennakkokokeiden painoprosenttikosteuden (p%) kehitys tarkastelusyvyyksillä pinta, 10 mm ja 32 mm arvosteluiän suhteen.

Kuvassa 25 on esitetty pinnoiteyhdistelmän P2 alta määritettyjen suhteellisen kosteuspitoisuuksien mittaustulokset. Kosteusmittaustulosten havaitaan laskevan kaikilla tarkastelusyvyyksillä kymmenen vuoden takaisista tuloksista, eri syvyyksien tulosten asettuessa lähelle toisiaan. Pinnan mittaustuloksen poikkeama on havaittavissa kosteuskehityskäyrässä. Myöskin pinnoiteyhdistelmän P2 tapauksessa painoprosenteina mitatut kosteuspitoisuudet myötäilevät suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitystä. P2 painoprosenttikosteudet ja muut ennakkovaiheen kosteusmittaustulokset löytyvät tarkemmin taulukoina ja kuvina liitteestä 4.



Kuva 25. Kuvaajassa on esitetty pinnoiteyhdistelmä P2 ennakkokokeiden suhteellisen kosteuspiitoisuuden (RH %) kehitys tarkastelusyvyyksillä pinta, 10 mm ja 32 mm arvosteluian suhteen. Kuvaan on merkattu punaisella nuolella pintakosteuden poikkeama.

Kuvaajia tarkasteltaessa havaitaan kummankin koekappaleen alustabetonin kuivuneen kymmenen vuoden aikana, mutta pinnoiteyhdistelmän P2 tapauksessa kuivumisen havaitaan tapahtuneen hitaammin. Pinnoiteyhdistelmän P2 alta määritetyt kosteuspiitoisuudet jäävät huomattavasti P4 vastaavia arvoja korkeammiksi kaikilla tarkastelusyvyyksillä: P4 tapauksessa rakenteen pintaosassa (pinta–10 mm) suhteellisen kosteuden arvot lähenivät RH 60 %, kun P2 vastaavilta syvyyksiltä saadut arvot ovat RH 75 % luokkaa. Korkeampien kosteuspiitoisuuksien lisäksi pinnoiteyhdistelmä P2 eri syvyyksiltä saadut arvot ovat myös huomattavasti lähempänä toisiaan.

Mittaustulosten perusteella kosteus siirtyy syvemältä betonista rakenteen pintaosiin sen verran hitaasti, ettei pinnoiteyhdistelmän P4 alle pääse muodostumaan tasaisempaa kosteuspiitoisuutta kuten pinnoiteyhdistelmän P2 kohdalla on havaittavissa. Pinnoiteyhdistelmä P4 onkin vesihöyryä varsin hyvin läpäisevä ohuempi pinnoitekerros, kun taas pinnoiteyhdistelmä P2 tiiviimpi polyuretaanipinnoite.

Ennakkovaiheen kosteusmittaustulosten perusteella koekappaleiden kuivuminen tapahtuu pääsääntöisesti pintaosista pinnoitteen läpi eikä juurikaan muovimuotin läpi. Käytännön rakenteissa, kuten väli- ja alapohjissa, kuivumista pääsee tapahtumaan yleensä tehokkaammin useampaan suuntaan.

Varsinaisessa koeosuudessa ei nähdä tarvetta määrittää kosteuspitoisuuksia syvemältä tai pohjan kautta näytepalamenetelmällä. Mittaukset voidaan toteuttaa riittävän tarkasti käyttämällä varsinaisessa tutkimuksessa vastaavia kosteusmittausvyvyksiä kuin alkuperäisessä tutkimuksessa. Pinnoiteyhdistelmän P2 pinnan kosteusmittauksissa havaittu poikkeama johtuu veden käytöstä tartuntavetolujuuskokeiden aluerajauksessa ensimmäisessä koekappaleessa, jolloin koekappaleen pintaan on päässyt ylimääräistä vettä. Aluerajaukset toteutetaan ensimmäistä koekappaletta lukuun ottamatta kuivamenetelmällä.

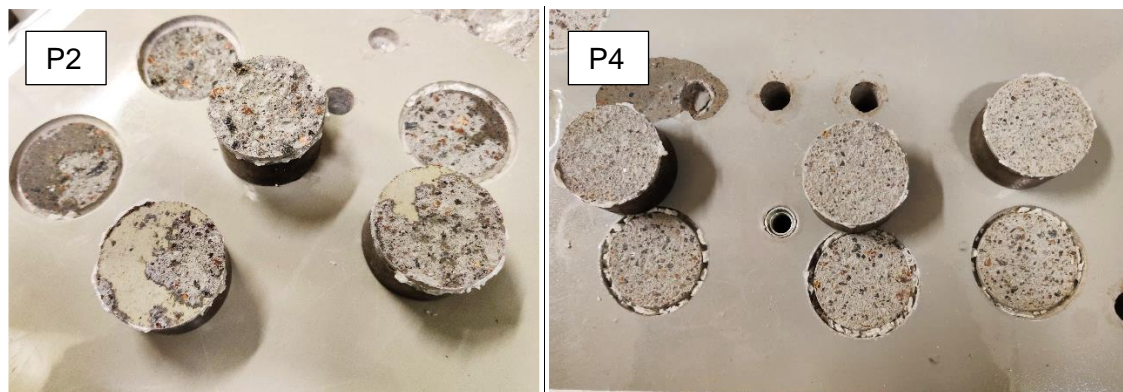
5.1.3 Tartuntavetolujuustulokset ja tulosten tarkastelu

Ennakkovaiheen tartuntavetolujuuksien mittaustulokset on esitetty taulukossa 7. Taulukossa on esitetty keskiarvo kolmesta tartuntavetokokeesta sekä tyypillinen murtotyyppi ja -syvyys. Tarkemmat taulukot ja valokuvat mittaustuloksista esitetään liitteessä 5. Ennakkovaiheen tartuntavetolujuuksien mittaustuloksissa on eroavaisuutta pinnoiteyhdistelmien välillä. Pinnoiteyhdistelmän P4 vetokokeet toteutetaan ennakkovaiheessa materiaalivalmistajan toiveesta sekä elastisten pinnoitteiden että kovien pinnoitteiden vetonopeuksilla (98 N/s ja 294 N/s). Pinnoiteyhdistelmä P4 saa molemmilla vetonopeuksilla identtiset tulokset kolmen vedon keskiarvona (2,8 N/mm²). Pinnoiteyhdistelmän P2 vetolujuus saa arvon 4,6 N/mm².

Taulukko 7. Ennakkovaiheen tartuntavetolujuustulosten keskiarvot sekä tyypilliset murtotyypit ja –syvyydet pinnoiteyhdistelmittäin.

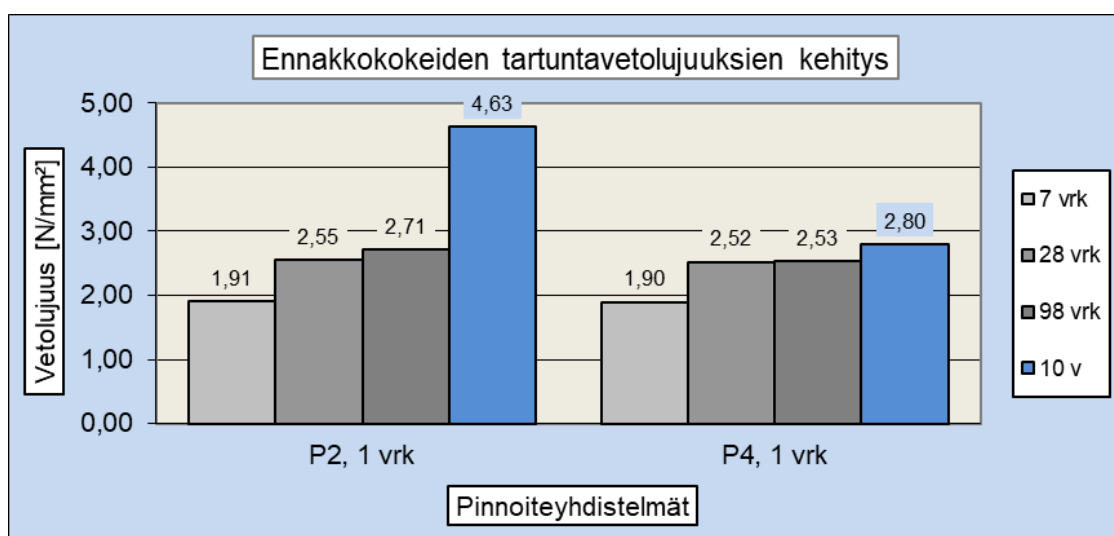
Pinnoiteyhdistelmä				
nro	Veto- nopeus	Vetolujuus	Murtotyyppi	Murtosyvyys
P2	294 N/s	4,6 N/mm²	A; B/C	pinnoite–3 mm
P4	294 N/s	2,8 N/mm²	A; A/B	pinnoite–2 mm
P4	98 N/s	2,8 N/mm²	A; A/B	pinnoite–2 mm

Myöskin murtotyypit poikkeavat pinnoiteyhdistelmien välillä. Pinnoiteyhdistelmän P4 vetoalueiden murto tapahtuu lähes kokonaan alustabetonista (A) ja hieman alustabetonin ja pinnoitteen rajasta (A/B), kun taas P2 tapauksessa kahdella vedolla murto tapahtuu osin alustabetonista (A) ja osin pinnoitteen ja pohjusteen rajasta (B/C). Poikkeava murto esiintyy pinnoiteyhdistelmän P2 yksittäisessä vedossa, jossa murto tapahtuu 100% alustabetonista 8–10 mm syvyydeltä. Murtotyypit kuitenkin mukailevat alkuperäisessä tutkimuksessa havaittuja tyypillisiä murtotyyppisiä. Vetonappeja tarkasteltaessa nähdään ylimääräistä liimaa kummankin pinnoiteyhdistelmän tapauksessa.



Kuva 26. Ennakkovaiheen vetolujuusmittausten vetonapit (vasemmalla P2 ja oikealla P4), joihin osaan on jäänyt ylimääräistä liimaa reuna-alueille. Vetonappien vieressä on näkyvillä mittapisteiden murtoalueet.

Tarkasteltaessa pinnoitteiden vetolujuuksien kehitystä kymmenen vuoden takaisista tuloksista havaitaan kummankin koekappaleen vetolujuustuloksen kasvavan. Kasvu on huomattavampaa pinnoiteyhdistelmän P2 kohdalla. Koekappaleiden vetolujuuksien kehitys on alkanut kymmenen vuoden takaa lähes samoista arvoista (P2: 2,17 N/mm², P4: 2,53 N/mm²). Kuvassa 27 esitettyjen vetolujuuksien kehityksen mukaan pinnoiteyhdistelmän P2 vetolujuus on noussut 1,92 N/mm², kun P4 tapauksessa nousua on tapahtunut 0,27 N/mm². Molempien pinnoiteyhdistelmien tulokset ylittävät selvästi julkaisun by45/Bly7 tartuntavetolujuusvaatimuksen (2,0 N/mm²) suurten rasitusten alaisille tiloille.



Kuva 27. Kaaviossa on esitetty ennakkovaiheen tartuntavetolujuuskokeiden tulokset (N/mm²) pinnoiteyhdistelmittäin. Harmaan sävyiset palkit kuvastavat alkuperäisen tutkimuksen tuloksia.

Ennakkovaiheen vetolujuusmittausten perusteella tarkennetaan koestussuunnitelmaan vetoalueiden rajausmenetelmä kuivamenetelmäksi. Lisäksi ylimääräisten liimapurseiden puhdistus toteutetaan huolellisemmin.

5.2 Varsinaiset tutkimukset

5.2.1 Koejärjestely

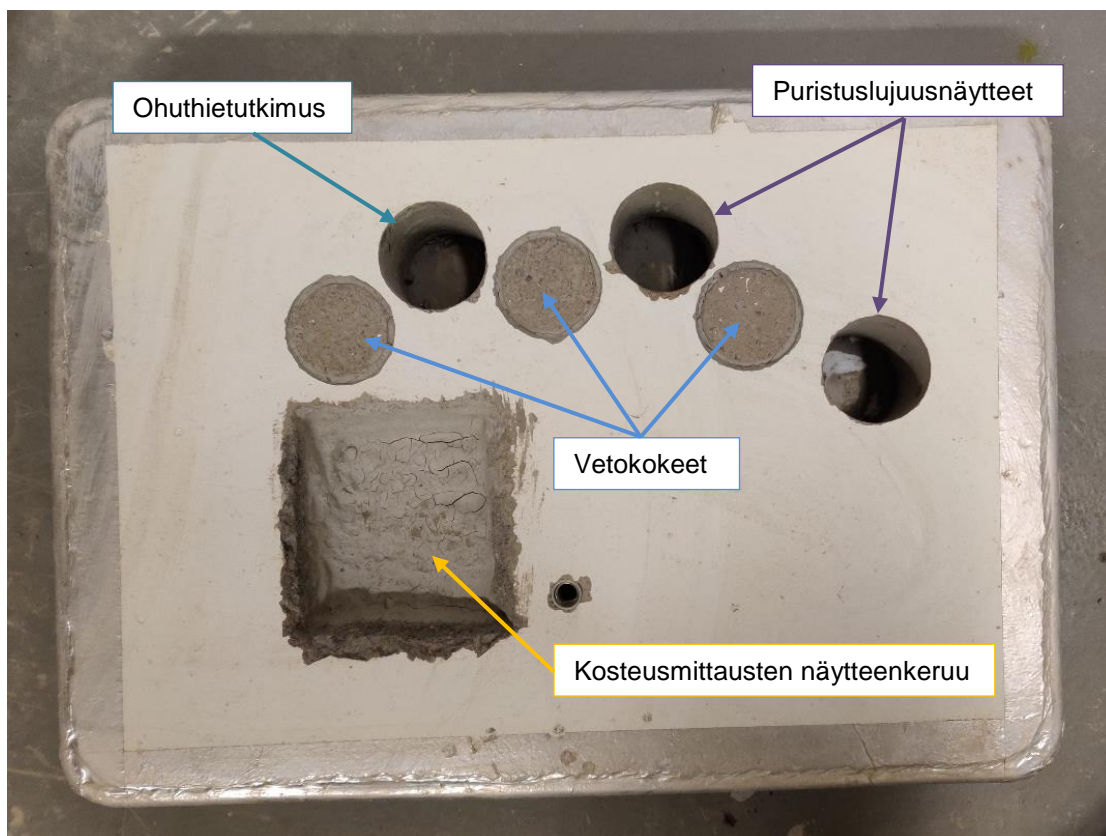
Tutkimuksen kohteena olevat koekappaleet määräytyvät alkuperäisestä tutkimuksesta jatkotutkimuksiin varattujen kappaleiden mukaan. Kahdeksan eri pinnoiteyhdistelmän ja

neljän eri kosteustapauksen yhdistelmästä valitaan insinööriyön koeosuuteen kuusi pinnoiteyhdistelmää (P1–P6) kosteustapauksesta heti sekä kaksi pinnoiteyhdistelmää (P7 ja P8) kosteustapauksesta märkä. Koestettaviksi kosteustapauksiksi valitaan käytettävissä olevista koekappaleiden kosteimmat vaihtoehdot. Valitut koekappaleet sekä alkuperäisen tutkimuksen tapaukset on esitetty taulukossa 8. Pinnoiteyhdistelmien ja kosteustapausten määritelmät on esitelty luvussa 3.1 taulukoissa 4 ja 5.

Taulukko 8. Alkuperäisen tutkimuksen koekappaleiden pinnoiteyhdistelmät kosteustapauksittain (X). Tämän tutkimuksen ennakkovaiheen koekappaleet on esitetty vaaleansinisellä ympyrällä ja varsinaisten kokeiden koekappaleet punaisella ympyrällä.

Pinnoiteyhdistelmä	Kosteustapaus			
	Heti	1 vrk	Kasteltu	Märkä
P1	X	X	X	
P2	X	X	X	
P3	X	X	X	
P4	X	X	X	
P5	X	X	X	
P6	X	X	X	
P7				X
P8	X			X

Ennakkovaiheen perusteella koestussuunnitelmaan päivitetään tartuntavetolujuuskokeiden aluerajauksen toteutus kuivamenetelmällä sekä huoleellisempi liimapurseiden poisto vetoalueen rajoilta. Ennakkovaiheessa määritettyjen tarkempien kosteusjakaumien perusteella varsinaisen koeosuuden kosteusmittaukset toteutetaan näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä vain koekappaleiden pinnan puolelta syvyyksiltä pinta, 10 mm ja 32 mm. Aistinvaraiset tarkastelut sekä pintakosteuskartoitus toteutetaan ennakkovaiheen tavoin. Kuvassa 28 havainnollistetaan varsinaisessa tutkimusosiossa toteutetut mittaukset.



Kuva 28. Kuvassa on esitetty koekappaleille toteutettujen vetokokeiden ja kosteusmittausten näytteenkeruun alueet. Lisäksi näkyvillä ovat puristuslujuustutkimuksen ja ohuthietutkimuksen näytteiden porausalueet.

Huolellisen suunnittelun ja työvaiheiden toteutuksen ohella koeosuudessa painotetaan tarkkuuteen mittatulosten dokumentoinnissa. Mittaustulokset valokuvataan ja kirjataan liitteenä 3 olevaan tutkimuspäiväkirjaan käytettyjen mitta-astioiden ja -päiden kanssa.

Kolmelle koekappaleelle toteutetaan lisäksi puristuslujuus- ja ohuthietutkimukset (kuva 28) alustabetonin tarkempien ominaisuuksien määrittämiseksi. Tarkentavat tutkimukset toteutetaan kuivimmalle ja märimmälle koekappaleelle sekä koekappaleelle, jonka pinnon tartuntavetolujuustulos saavuttaa suurimpia arvoja. Ohuthie- ja puristuslujuustutkimukset rajataan kolmeen kiinnostavimpaan koekappaleeseen tutkimusten tuodessa toissijaista tietoa betonin ominaisuuksien kehityksestä sekä resurssien johdosta.

5.2.2 Kosteusmittaustulokset ja tulosten tarkastelu

Koekappaleista näytepalamenetelmällä määritetyt suhteelliset kosteuspitoisuudet sekä kuivatuspunnitusmenetelmällä määritetyt absoluuttiset kosteuspitoisuudet esitetään taulukossa 9. Taulukossa on myös pintakosteusilmaisimilla saadut tulokset. Yksityiskohtaiset taulukot ja kuvat mittaustuloksista löytyvät liitteestä 6.

Taulukko 9. Koekappaleiden kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä (RH % ja p-%) määritettynä tarkastelusyvyyksiltä pinta, 10 mm ja 32 mm. Pintakosteusilmaisimilla saadut tulokset ovat omana sarakkeenaan.

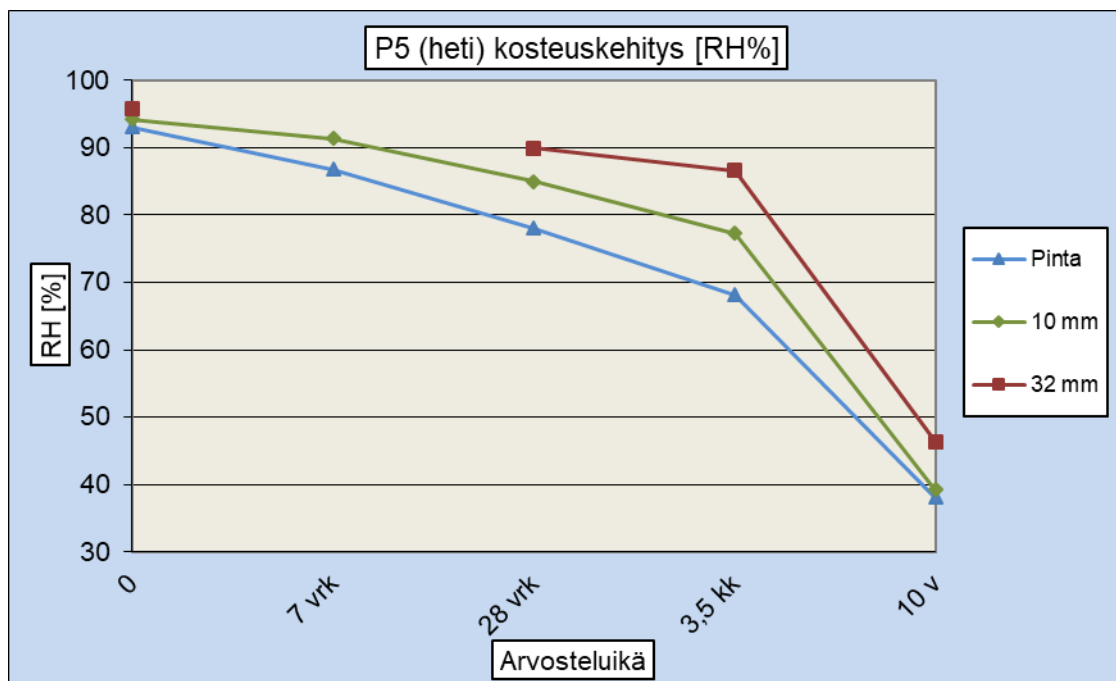
Pinnoiteyhdistelmä		Kosteusmittaustulos syvyydeltä			Pintakosteusilmaisimain	
nro	menetelmä	pinta	10 mm	32 mm	Gann	Tramex
P1	RH [%] näytepala	76,7	78,6	80,4	94 - 97	3,4
	p-%	6,2	6,4	7,9		
P2	RH [%] näytepala	76,9	81,8	81,5	100 - 105	3,6
	p-%	6,2	6,2	7,3		
P3	RH [%] näytepala	72,1	74,9	76,7	103 - 108	4,0
	p-%	4,5	6,0	7,0		
P4	RH [%] näytepala	50,4	53,0	62,3	95 - 100	3,8
	p-%	3,5	4,2	5,5		
P5	RH [%] näytepala	38,1	39,2	46,4	76 - 78	2,4
	p-%	2,1	2,7	3,7		
P6	RH [%] näytepala	74,8	76,6	80,3	70 - 75	2,4
	p-%	6,6	6,4	7,2		
P7	RH [%] näytepala	82,5	79,6	81,8	95 - 100	3,6
	p-%	5,9	7,0	7,2		
P8	RH [%] näytepala	63,1	66,3	70,8	105 - 109	4,8
	p-%	4,8	5,4	6,4		

Taulukosta 9 nähdään koekappaleiden suhteellisen kosteuspitoisuuden nousevan syvemmälle rakenteeseen edettäessä. Suhteellisten kosteuspitoisuuksien (RH %) vaihtelu tarkastelusyvyyksien välillä on noin 2–12 prosenttiyksikköä. Suurimmat vaihtelut (n. 7–12 prosenttiyksikköä) pinnan ja 32 mm välillä havaitaan pinnoiteyhdistelmien P4, P5 ja P8 tapauksissa. Näistä pinnoiteyhdistelmistä mitatut arvot ovat huomattavasti alhaisempia kaikilla tarkastelusyvyyksillä kuin pinnoiteyhdistelmien P1–P3, P6 ja P7, joilla myös vaihtelu tarkastelusyvyyksien välillä on pienempää (n. 3–5 prosenttiyksikköä).

Kuivatuspunnitusmenetelmällä mitatut painoprosenttikosteuspitoisuudet (p-%) myötäilevät suhteellisten kosteuspitoisuuksien arvoja, painoprosenttikosteuksien saadessa kuitenkin melko korkeita arvoja (6–7 p-%). Pintakosteusilmmaisimilla saadut tulokset ovat linjassa keskenään, mutta eivät mukaile pinnoitteen alapuolista kosteuspitoisuutta. Melkein kaikissa tapauksissa Gann Hydrotest LG1 saadut arvot asettuvat 95–100 väliin. Pinnoiteyhdistelmän P5 kohdalla lukema on matala (75–80). Vielä pienemmän arvon (70–75) saa P6, vaikka pinnoitteen alapuolinen kosteuspitoisuus on korkea. Toisin käyttäytyy hyvin kuivunut koekappale P4, joka saa pintakosteusilmmaisimilla korkeamman arvon (Gann 95–100).

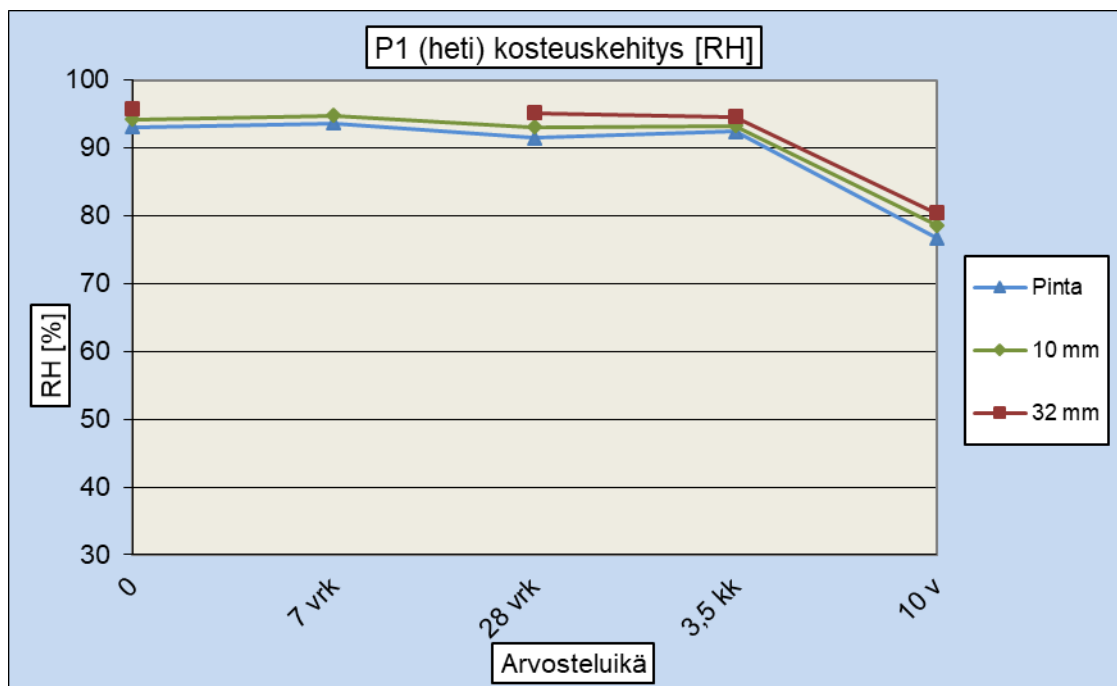
Suhteellisen kosteuspitoisuuden mittaustuloksissa havaitaan poikkeama pinnoiteyhdistelmän P7 mittauksissa verrattuna vastaavista kohdista määritettyihin painoprosenttikosteuspitoisuuksiin. P7 tapauksessa korkea suhteellisen kosteuspitoisuuden arvo (82,5 %) saa muihin mittaustuloksiin verrattuna alhaisemman painoprosenttiarvon (5,9 p-%). Tämän lisäksi P7 eri syvyyksiltä mitatut suhteelliset kosteuspitoisuudet ovat poikkeuksellisen lähellä toisiaan, aivan pinnan tulosten ollessa korkeimmat.

Verrattaessa tutkimustuloksia kymmenen vuoden takaisiin tuloksiin havaitaan jokaiseen koekappaleeseen syntyvän omanlaisensa kosteusjakauma. Kosteuspitoisuuksien muutosnopeudessa havaitaan kuitenkin suurta vaihtelua: pinnoiteyhdistelmien P4 ja P5 tapauksissa kosteuspitoisuudet ovat pienentyneet huomattavasti. P4 alustabetonin pintaosien (pinta–10 mm) suhteellinen kosteus on laskenut alle 55 % ja P5 tapauksessa vastaavalla syvyydellä arvo on alle 40 %. Kuvassa 29 on esitetty pinnoiteyhdistelmän P5 kosteusjakauman kehitys kymmenen vuoden ajalta.



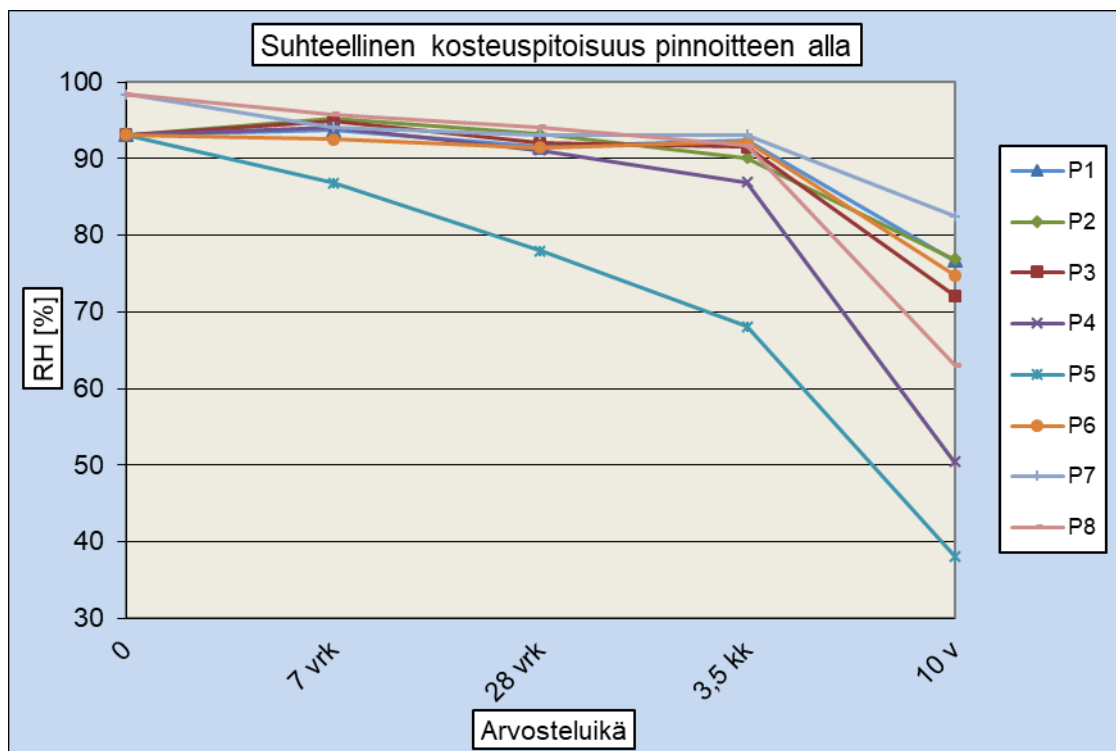
Kuva 29. Kuvaajassa on esitetty pinnoiteyhdistelmän P5 alapuolisen kosteusjakauman kehitys suhteellisena kosteuspitoisuutena (RH%) tarkastelusyvyyksiltä pinta, 10 mm ja 32 mm. Kuvaaja antaa esimerkin hyvin kuivuneesta rakenteesta mittaustulosten laskiessa reilusti kymmenen vuoden takaisista mittauksista.

Kuvassa 30 on esitetty pinnoiteyhdistelmän P1 kosteusjakauman kehitys eri tarkastelusyvyyksillä. Pinnoiteyhdistelmän P1 alla kosteuspitoisuudet tarkastelusyvyyksillä ovat hyvin lähellä toisiansa. Pinnoitteen ollessa tiivis tapahtuu kuivumista pinnoitteen läpi hitaasti, jolloin kosteusjakauma rakenteessa pysyy lähes tasapainotilanteessa eri syvyyksillä. Kun verrataan kuvassa 30 ja kuvassa 29 esitettyjä esimerkkejä koekappaleiden kosteusjakauman kehityksestä, havaitaan hyvin kuivuneen rakenteen kosteuspitoisuuksien laskevan selvästi jo ensimmäisen 3,5 kuukauden mittauksissa.



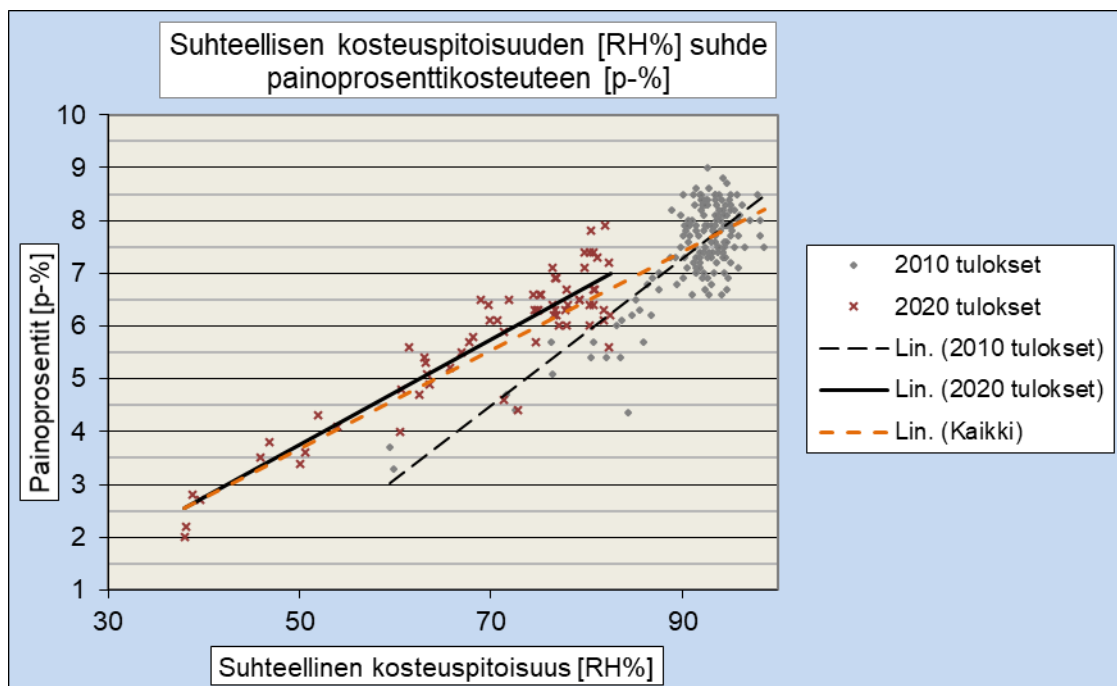
Kuva 30. Kuvaajassa on esitetty pinnoiteyhdistelmän P1 kosteusjakauman kehitys suhteellisena kosteuspitoisuutena (RH%) arvosteluvyvyksiltä pinta, 10 mm ja 32 mm. Kuvaaja antaa esimerkin heikommin kuivuneesta rakenteesta mittaustulosten laskiessa maltillisemmin kymmenen vuoden takaisista mittauksista.

Kuvassa 31 on esitetty koonti kaikkien pinnoiteyhdistelmien alapuolelta mitatuista kosteuspitoisuuksista. Käyrät esittävät suoraan pinnoitteiden alta (syvyydeltä *pinta*, 0–5 mm) mitattuja suhteellisia kosteuspitoisuuksia pinnoitushetkestä lähtien. Käyristä on havaittavissa selkeä ero vesihöyryä hyvin ja heikosti läpäisevien materiaalien välillä. Tarkasteltaessa kuvaajia havaitaan hyvin vesihöyryä läpäisevien materiaalien (P4, P5 ja P8) käyrien laskevan jyrkemmin 3,5 kuukauden ja kymmenen vuoden välissä, suhteellisen kosteuspitoisuuden saavuttaessa alle RH 65 %, jopa alle RH 40 % (P5), arvoja. Heikommin vesihöyryä läpäisevien materiaalien (P1–P3, P6 ja P7) kohdalla lasku on loivempaa, suhteellisen kosteuspitoisuuden arvojen jäädessä selvästi yli RH 70 %.



Kuva 31. Kuvaajassa on esitetty pinnoitteiden alapuolisen (0–5 mm) kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen. Eri pinnoitusyhdistelmien käyriä on havainnollistettu eri värein. Kaksi pinnoitusyhdistelmää (P7 ja P8) pinnoitettiin märemmälle alustalle, mistä johtuu käyrien lähtöpisteiden eroavaisuus muihin verrattuna.

Kuvassa 32 esitetään koonti vuoden 2010 tutkimuksen ja tämän tutkimuksen kosteusmittaustulosten suhteellisten kosteuspitoisuuksien suhde koeputkissa olleista betoninäytteistä määritettyihin painoprosenttikosteuksiin. Alkuperäisen tutkimuksen näytteenotot varhaisessa vaiheessa kuvaavat korkeiden suhteellisen kosteuspitoisuuden arvojen (yli RH 85 %) suhdetta painoprosenttikosteuteen, kun taas tässä tutkimuksessa mitatut tulokset puolestaan kuvaavat pääosin alle RH 85 % suhteellisen kosteuspitoisuuden suhdetta painoprosenttikosteuteen.



Kuva 32. Kuvaajassa on esitetty suhteellisen kosteuspitoisuuden (RH%) suhde koeputkissa olleista betoninäytteistä määritettyyn painoprosenttikosteuteen (p-%). Mittaustulokset on eroteltu vuosittain ja niiden sisäisiä ja yhtenäistä kehitystä kuvataan viivoilla.

Kuvan 32 perusteella koekappaleista tässä tutkimuksessa määritettyjen suhteellisten kosteuspitoisuuksien suhde painoprosenttikosteuksiin mukailee vuoden 2010 tuloksia. Kummankin tutkimuksen tuloksissa havaitaan korkeammassa kosteuspitoisuudessa suurempaa hajontaa kuin matalammassa kosteuspitoisuudessa. Hajonta saman betoni-laadun mittauksissa johtuu mm. kiviaineksen epätasaisesta jakautumisesta näytteissä: jos näytteessä on paljon kiviainesta, pystyy siihen sitoutumaan vähemmän kosteutta. Hajonta on samaa suuruusluokkaa kummankin tutkimuksen tulosten välillä ja hajonnan vaihtelevuus korkeamman ja matalamman kosteuspitoisuuden välillä muodostuu otantamäärien erosta: korkeamman kosteuspitoisuuden näytteitä on huomattavasti enemmän kummankin tutkimuksen tuloksissa.

5.2.3 Tartuntavetolujuustulokset ja tulosten tarkastelu

Suoritettujen koputtelukokeiden perusteella kaikki pinnoitteet ovat hyvin kiinni alustasaan. Pinnoiteyhdistelmien tartuntavetolujuuskokeiden tulokset esitetään taulukossa 10. Taulukossa on pinnoiteyhdistelmittäin käytetty vetonopeus, kolmen vedon keskiarvo

(N/mm²) sekä tyypillinen murtotyyppi ja -syvyys. Pinnoiteyhdistelmien P7 ja P8 tapauksessa vetolujuus määritettiin viiden mittaustuloksen keskiarvona suuren vaihtelun vuoksi kolmen ensimmäisen vedon välillä. Yksityiskohtaiset taulukot ja kuvat mittaustuloksista löytyvät liitteistä 7.

Taulukko 10. Pinnoitteiden tartuntavetolujuuskokeiden tulokset pinnoiteyhdistelmittäin. Taulukossa on esitetty käytetty vetonopeus, kolmen vetokokeen keskiarvo (N/mm²) sekä tyypillinen murtotyyppi ja -syvyys. P7 ja P8 vetolujuus on määritetty viiden vetokokeen keskiarvona.

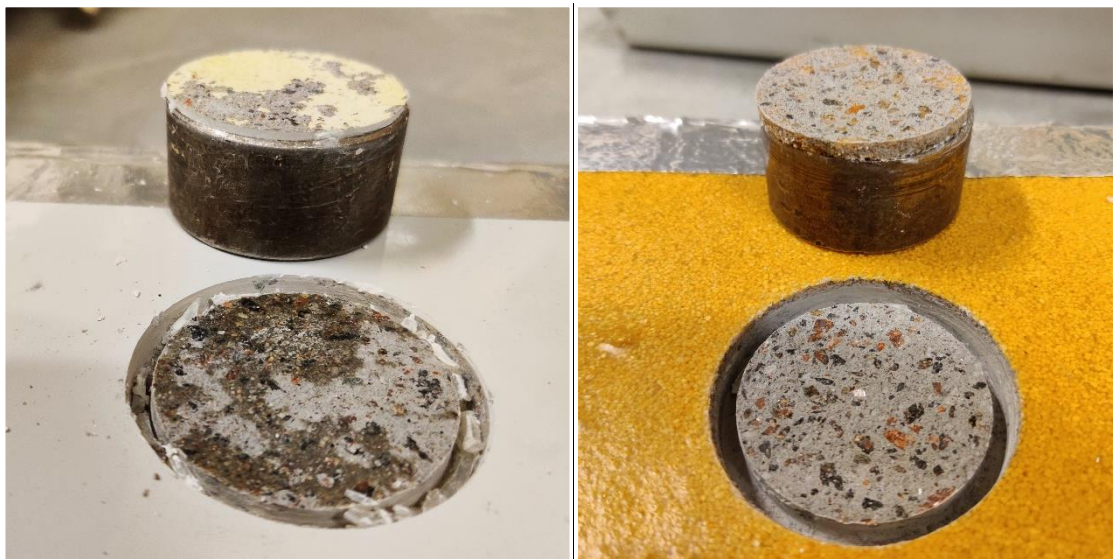
Pinnoiteyhdistelmä				
nro	Vetonopeus	Vetolujuus (ka)	Murtotyyppi	Murtosyvyys
P1	98 N/s	3,6 N/mm²	A	5–10 mm
P2	294 N/s	4,3 N/mm²	A; B/C	pinnoite–3 mm
P3	294 N/s	3,1 N/mm²	A; B/C	pinnoite–2 mm
P4	294 N/s	2,5 N/mm²	A; A/B	pinnoite–2 mm
P5	98 N/s	2,0 N/mm²	A; A/B	maali–2 mm
P6	98 N/s	2,6 N/mm²	A; A/B	pinnoite–2 mm
P7	98 N/s	2,1 N/mm²	A; B/C	pinnoite–2 mm
P8	98 N/s	2,3 N/mm²	A; A/B	pinnoite–2 mm

Tartuntavetokolujuustuloksissa havaitaan eroavaisuuksia pinnoiteyhdistelmien välillä. Suurimpia, yli 3 N/mm²:n, vetolujuuden arvoja saavat pinnoiteyhdistelmät P1–P3, joista P2 vetolujuus nousee muihin pinnoiteyhdistelmiin verrattuna selkeästi korkeimmaksi (4,3 N/mm²). Pinnoiteyhdistelmien P4–P8 saadut tulokset ovat 2,6 N/mm² tai alle. Heikompien tulosten joukosta ovat P7 ja P8 tapauksia, jotka on lähtötilanteessa pinnoitettu mörkimälle alustalle. Kaikkien pinnoiteyhdistelmien kohdalla tartuntavetolujuustulokset täyttävät Betoniyhdistyksen julkaisussa by45/BLY7 asetetun pinnan vetolujuuden vaatimuksen suurten rasiusten tiloille (2,0 N/mm²).

Tyypilliset murtotavat jakautuvat myös pinnoiteyhdistelmien kesken mukaillen alkuperäisessä tutkimuksessa havainnoituja murtotyyppisiä. Koetuksissa esiintyvät murtotyypit ovat:

- **A; A/B:** murto osin alustabetonista ja osin alustabetonin sekä pinnoitteen ensimmäisen kerroksen välillä
- **A; B/C:** murto osin alustabetonista ja osin pinnoitteen ensimmäisen ja toisen kerroksen välillä
- **A:** murto täysin alustabetonista.

Esimerkkejä eri murtotyypeistä esitetään kuvissa 33 ja 34.

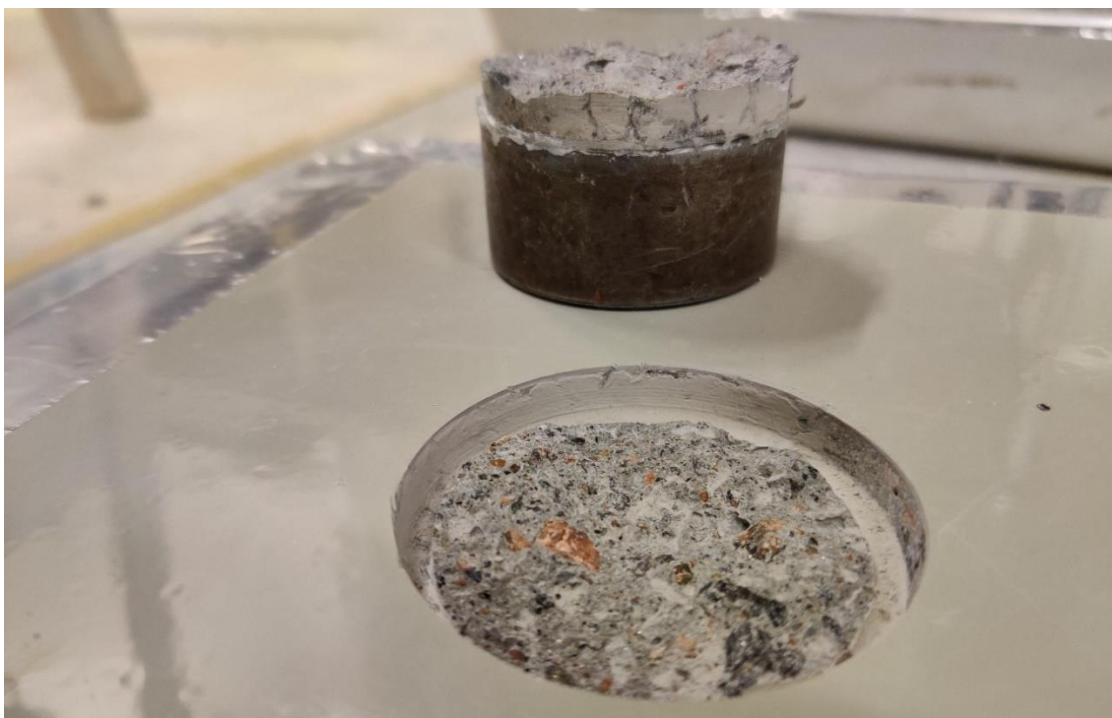


Kuva 33. Kuvissa on havainnollistettu murtotyyppisiä A; B/C (vasemmalla) ja A; A/B (oikealla). Oikealla kuvatussa murtoalueessa pinnoiteyhdistelmästä P6 murto on tapahtunut laajemmin alustabetonista (A) kuin vasemmalla kuvatussa P7 murtoalueessa.

Pinnoiteyhdistelmien P4, P5, P6 ja P8 yleisin murtotyyppi on kuvassa 33 oikealla esitetty A; A/B. Yleisenä murtotyyppinä A; B/C nähdään pinnoiteyhdistelmillä P2, P3 ja P7. Murtolaajuus alustabetonista vaihtelee pinnoiteyhdistelmittäin, mutta tyypillisesti A; A/B murto tapahtuu laajemmin alustabetonista kuin A; B/C.

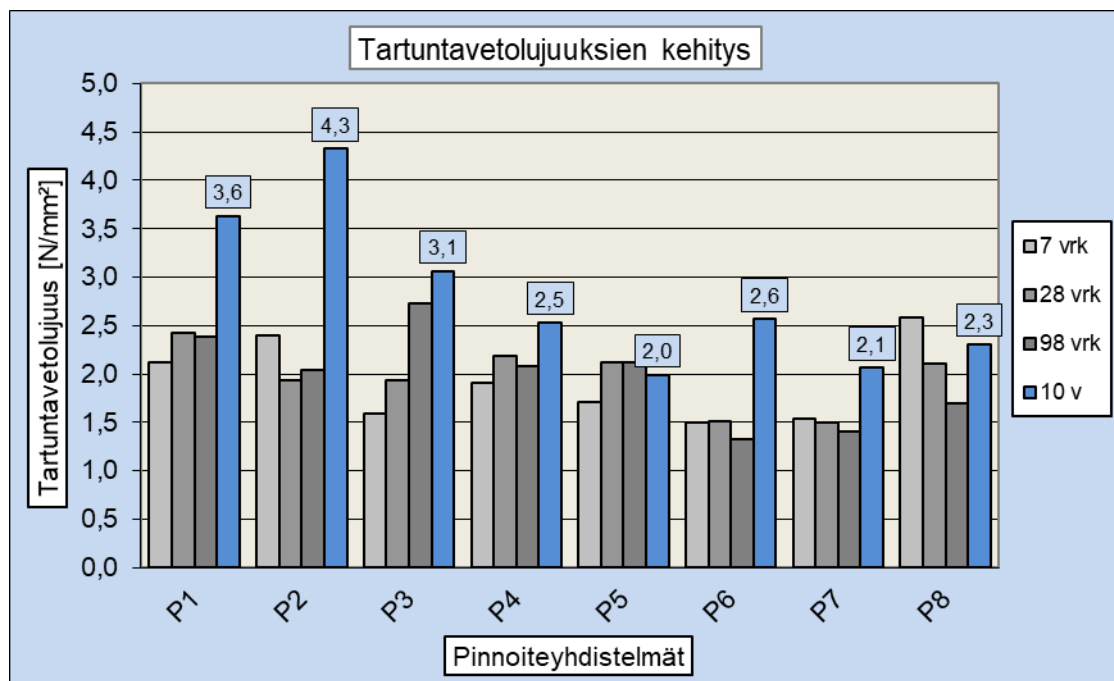
Pelkän alustabetonin (A) murron tapauksia ilmenee yhdessä vedossa pinnoiteyhdistelmästä P2 ja kahdessa vedossa pinnoiteyhdistelmästä P1, jossa alustabetonin sisäinen murto on yleisin murtotapa. Murto tapahtuu tällöin syvemmältä rakenteesta (5–10 mm)

ja mitatut vetolujuudet ovat yli 3,5 N/mm². Esimerkki pelkän alustabetonin murrosta esitetään kuvassa 34.



Kuva 34. Kuvassa on havainnollistettu murtotyyppi A. Murto on tapahtunut täysin alustabetonista syvemmillä rakenteista (5–10 mm). Vetokoe on toteutettu pinnoiteyhdistelmästä P2 vetotuloksen ollessa 4,9 N/mm².

Kun saatuja tartuntavetolujuustuloksia verrataan kymmenen vuoden takaisiin tuloksiin, havaitaan kaikkien pinnoiteyhdistelmien, paitsi P5, vetolujuuksien kasvavan. Voimakkainta kasvu on ollut pinnoiteyhdistelmillä P2 ja P6, joiden tulokset kaksinkertaistuvat 3,5 kuukauden iästä. Heikoin kehitys havaitaan pinnoiteyhdistelmillä P3 ja P4, joiden vetolujuudet nousevat vain 15–20 prosenttiyksikön verran. Pinnoitteiden tartuntavetolujuustulokset pinnoitusyhdistelmittäin on esitetty kuvan 35 pylväskaaviossa. Kaaviossa esitetään alkuperäisen tutkimuksen tuloksia harmailla pylväillä.



Kuva 35. Kaaviossa on esitetty pylväillä eri pinnoiteyhdistelmien tartuntavetolujuustulosten keskiarvot (N/mm^2). Harmaansävyiset pylväät kuvastavat alkuperäisessä tutkimuksessa mitattuja vetolujuuksia 7, 28 ja 98 vuorokauden iässä.

Kaaviosta havaitaan merkittävästi kasvaneita vetolujuusarvoja pinnoiteyhdistelmillä P1 ($2,4 \rightarrow 3,6 \text{ N/mm}^2$), P2 ($2,0 \rightarrow 4,3 \text{ N/mm}^2$) ja P6 ($1,3 \rightarrow 2,6 \text{ N/mm}^2$). Heikommat kehitykset nähdään yhdistelmillä P5, P4 ($2,1 \rightarrow 2,5 \text{ N/mm}^2$) ja P3. Näistä P5 tapauksessa vetolujuus heikkenee hieman 3,5 kuukauden iästä ($2,1 \rightarrow 2,0 \text{ N/mm}^2$) ja P3 vetolujuus on saavuttanut verrattain korkeita arvoja jo alkuperäisessä tutkimuksessa ($2,7 \rightarrow 3,1 \text{ N/mm}^2$). Vetolujuudet kasvavat myös pinnoiteyhdistelmien P7 ($1,4 \rightarrow 2,1 \text{ N/mm}^2$) ja P8 ($1,7 \rightarrow 2,3 \text{ N/mm}^2$) tapauksissa, jotka on pinnoitettu märälle alustalle (kosteustapaus märkä). Tämän lisäksi pinnoiteyhdistelmät P2 (heti) ja P4 (heti) saavuttavat samaa suuruusluokkaa olevan vetolujuusarvon kuin ennakkovaiheen pinnoiteyhdistelmät P2 (1 vrk) ja P4 (1 vrk). Kosteustapauksen heti pintaosan suhteellinen kosteuspitoisuus pinnoitushetkellä (93,1 %) on huomattavasti suurempi kuin kosteustapauksen 1 vrk (84,0 %).

5.2.4 Puristuslujuustulokset ja tulosten tarkastelu

Tartuntavetolujuuskokeissa havaittujen merkittävästi kasvaneiden tartuntavetolujuuksien johdosta määritetään koekappaleiden puristuslujuuksia pinnoiteyhdistelmistä P2,

P5 ja P7. Puristuslujuuskokeita tehdään kaksi rinnakkaista puristusta kustakin koekappaleesta. Pinnoiteyhdistelmän P2 puristuslujuuskokeissa havaitun suuren hajonnan takia toteutetaan kaksi ylimääräistä puristuskoetta kyseiselle koekappaleelle. Taulukossa 11 on esitetty puristuslujuustulokset pinnoiteyhdistelmittäin.

Taulukko 11. Pinnoiteyhdistelmien P2, P5 ja P7 puristuslujuuskokeiden näyte­kappaleiden mitat, tiheydet, murtokuorma (kN), lieriönäytteen puristus­lujuus (MPa) sekä muunnettu puristus­lujuus 150 mm särmäiselle kuutionäytteelle (MPa). [Liite 8]

Tunnus	b) Mitat (mm)	Tiheys (kg/m ³)	Murto­kuorma (kN)	Puristus­lujuus (MPa)	a) Kuutiolujuus (MPa)	Kuutiolujuuksien keskiarvo (MPa)
1B (P2)	L 49x48	2268	113,8	60,4	66,4	59,6
1C (P2)	L 49x49	2269	79,5	42,2	46,4	
1D (P2)	L 50x50	2246	107,0	54,5	59,9	
1E (P2)	L 50x50	2244	117,2	59,7	65,7	
29B (P5)	L 49x50	2229	97,1	51,5	56,6	55,2
29C (P5)	L 49x50	2217	92,2	48,9	53,8	
60B (P7)	L 49x50	2269	133,4	70,7	77,8	77,3
60C (P7)	L 49x49	2285	131,4	69,7	76,7	

a) Puristuslujuustulokset on muunnettu 150 mm särmäisten kuutioiden puristuslujuudeksi Betoninormien By 65 2016 kohdan 5.2.3.2 mukaisesti.

b) Mitat: Lieriönäytteissä (L) Ø x h.

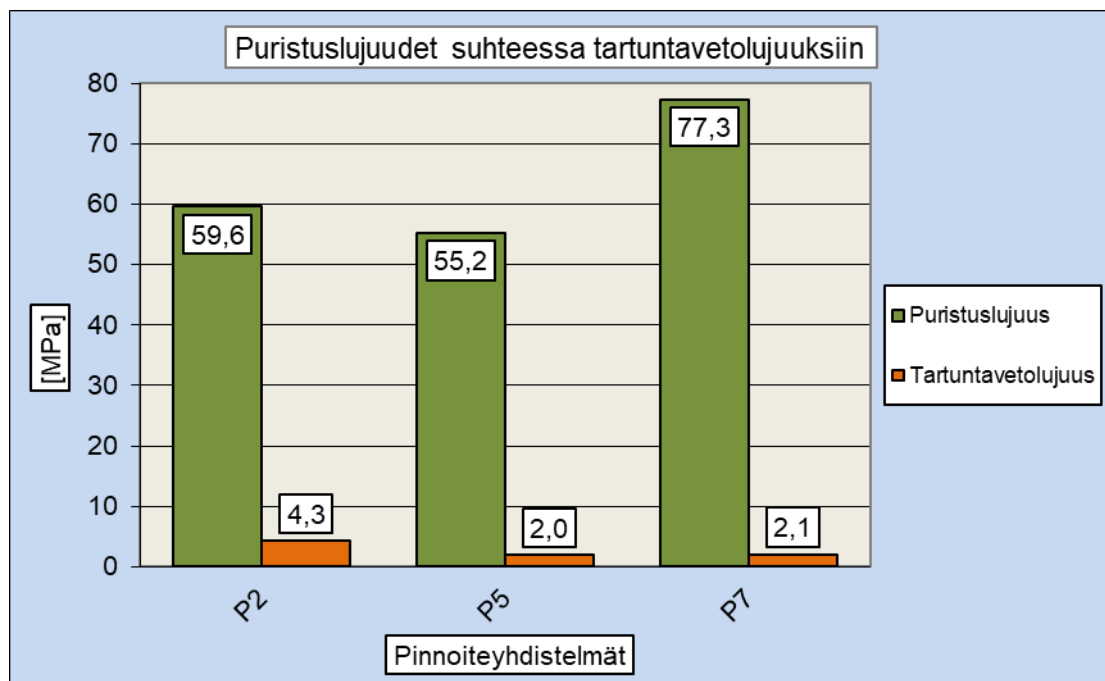
Pinnoiteyhdistelmien P2 ja P5 puristuslujuuksien keskiarvot ovat samaa suuruusluokkaa (55–60 MPa), kun taas pinnoiteyhdistelmän P7 puristuslujuus on huomattavasti korkeampi (77 MPa). Arvot vastaavat jopa korkealujuusbetonia, vaikka betonitehtaan sisäisen laadunvarmistusraportin mukaan vastaavilla suhteitustiedoilla valmistetuista betoneista puristuslujuudet ovat olleet 45 MPa luokkaa 28 vuorokauden iässä.

Pinnoiteyhdistelmän P2 näyte­kappaleiden pinnoissa on havaittavissa valuharventumia (tiivistys­huokosia). Sama ilmiö havainnoidaan myös murtuneissa kappaleissa, kun murtokohtaa tarkastellaan lähemmin. Kuvassa 36 esitetään näyte­kappaleen sisältä paljastuneita huokosia, jotka voivat osaltaan vaikuttavat kappaleen puristus­lujuuteen heikentävästi.



Kuva 36. Kuvassa on esitetty pinnoiteyhdistelmän P2 näytekappale (1E) puristuskokeen jälkeen. Murtuneesta betonista nähdään rakenteen sisään jääneitä tiivistyshuokosia.

Betonin vetolujuuden ollessa tyypillisesti 5–8 % puristuslujuudesta havaitaan tutkittujen koekappaleiden kohdalla vain pinnoiteyhdistelmän P2 tulosten suhteen (n. 7,2 %) asetuvan tähän väliin. P5 tapauksessa suhde on noin 3,6 % ja P7 vetolujuus on noin 2,7 % puristuslujuustuloksesta. Alhaisempien tartuntavetolujuustulosten tapauksista (P5 ja P7) saavuttaa P7 huomattavasti suuremman puristuslujuustuloksen (77 MPa) kuin pinnoiteyhdistelmä P5 (55 MPa). Pinnoiteyhdistelmän P7 puristuslujuus on myös merkittävästi suurempi kuin korkeamman tartuntavetolujuustuloksen saavuttaneen P2 arvo (57 MPa). Pinnoitteiden tartuntavetolujuuskokeissa vetoalueen rajausta on toteutettu noin 10 mm syvyyteen, joten tilanne ei varsinaisesti vastaa koekappaleen betonista toteutettavaa vetolujuuskoetta. Kuvassa 37 havainnollistetaan puristuslujuuksien ja tartuntavetolujuuksien suhdetta koekappaleittain.



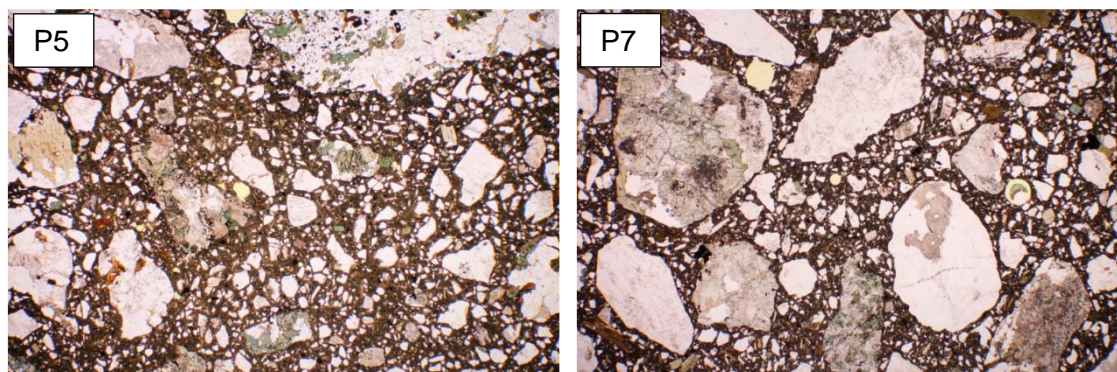
Kuva 37. Kuvaajassa on esitetty vihreillä pylväillä pinnoiteyhdistelmien betonin puristuslujuustulokset (MPa) ja oransseilla pylväillä pinnoitteiden tartuntavetolujuustulokset (N/mm² eli MPa).

Puristuslujuuskokeista saadut tulokset kuvastat siis paremmin betonin ominaisuuksia, kun taas pinnoitteen tartuntavetolujuudet kuvaavat pinnoitteen tartuntaa alustaan eikä varsinaisesti betonin vetolujuutta lukuun ottamatta tartuntavetokokeen rajauksen syvyyttä (noin 10 mm). Tästä syystä puristuslujuustulosten suhde tartuntavetolujuustuloksiin ei asetu normaaliin vaihteluväliin pinnoiteyhdistelmien P5 ja P7 tapauksissa. Pinnoiteyhdistelmän P2 tapauksessa vetokokeissa taas yksi murto on tapahtunut kokonaan betonista ja arvot mukailevat saatuja puristuslujuuksia. Alustabetonit saavuttavat korkeita puristuslujuustuloksia huolimatta käytetystä pinnoitemateriaalista, vaikkakin kosteimpana pysynyt koekappale (pinnoiteyhdistelmä P7) saa huomattavasti suuremman puristuslujuusarvon kuin pinnoiteyhdistelmien P2 ja P5 koekappaleet.

5.2.5 Ohuthietutkimukset

Puristuslujuuden lisäksi pinnoiteyhdistelmien P2, P5 ja P7 betonin ominaisuuksia tutkitaan tarkemmin ohuthietutkimuksilla mikroskoopin avulla. Tutkittujen näytteiden mukaan kaikkien pinnoiteyhdistelmien betonit ovat homogeenisia eivätkä ne rakenteeltaan tai

koostumukseltaan poikkea toisistaan merkittävästi. Pinnoiteyhdistelmien P2 ja P7 ohuthienäytteet ovat lähes identtiset keskenään, P5 tapauksessa karkea kiviaines on jakautunut näytteen alueella epätasaisemmin. Kuvassa 38 on esitetty pinnoiteyhdistelmien P5 ja P7 ohuthienäytteet.



Kuva 38. Pinnoiteyhdistelmien P5 (vasemmalla) ja P7 (oikealla) ohuthienäytteet. Kiviainesrakeet näkyvät vaaleina ja vaalean kirjavana alueina, sementtikivi tummana matriisina ja huokosilma keltaisena. Kuvan lyhyt sivu vastaa 7 mm näytteessä. Pinnoiteyhdistelmän P5 näytteessä karkea kiviaines on jakautunut epätasaisemmin. [Liite 8.]

Ohuthietutkimuksen mukaan kaikkien pinnoiteyhdistelmien sementtien hydrataatioasteet ovat melko korkeat, mikä vahvistaa puristuslujuuskokeissa saatuja korkeita arvoja. Ohuthienäytteissä ei kuitenkaan havaita puristuslujuusnäytteissä esiintyneitä tiivistys-huokosia, mikä osoittaa betonin ominaisuuksien vaihtelevan tarkasteltavan kohdan mukaisesti. Tarkemmat havainnot ohuthietutkimuksista esitetään liitteessä 8.

5.2.6 Luotettavuustarkastelu

Tutkimusosuuden kokeiden suoritus ja työvaiheet suunniteltiin tarkasti ennen tutkimuksiin ryhtymistä Saarisen diplomityön perusteella. Tutkimusmenetelmien ja -menettelyjen ohjeistus tapahtui myös tarkasti Saarisen toimesta. Lisäksi kokeiden toteutettavuus varmistettiin ennakkokokeiden avulla. Kaikki työvaiheet toteutettiin kontrolloiduissa laboratorio-olosuhteissa ja säännöllisessä käytössä olevilla mittalaitteilla, jotka kalibroidaan säännöllisin väliajoin. Saatua mittaustuloksia voidaan näin pitää luotettavina. Mittalaitteiden tulokset ja vetokokeiden murtokohdat valokuvattiin ja dokumentoitiin tarkasti tutkimuspäiväkirjaan, mikä pienensi kirjausvirheiden mahdollisuutta tutkimusten aikana.

Kokeet toteutettiin kiinnittäen tarkkuutta kaikkiin työvaiheisiin. Kosteusmittauksissa varmistettiin oikea syvyys ennen jokaista näytteenkeruuta ja näytteitä säilytettiin vakio-oloissa ennen mittapäiden lukua. Tartuntavetokokeiden vetoalueen rajaus, vetoalueen ja vetonapin puhdistus sekä vetonapin liimaus toteutettiin huolellisesti. Tämän lisäksi ylimääräiset liimapurseet poistettiin, jotta ne eivät vaikuttaisi vääristävästi mittaustuloksiin. Suurten mittaustulospoikkeamien esiintyessä kyseiset kokeet uusittiin. Näin toimittiin esimerkiksi pinnoiteyhdistelmien P7 ja P8 vetolujuusmittauksissa, joissa toteutettiin kaksi ylimääräistä vetokoetta luotettavamman keskiarvon saamiseksi.

Puristuslujuuskokeet ja ohuthietutkimukset toteutettiin vain kolmelle pinnoiteyhdistelmälle, joten otanta on suppea. Kyseiset tarkastelut toteutettiin ammattilaisten toimesta, mikä mahdollistaa luotettavat tulokset. Puristuslujuustulokset vahvistivat tartuntavetolujuustulosten kuvastavan pinnoitteiden tartuntaa. Betonin rakenne ja ominaisuudet ovat kehittyneet monen pienen tekijän vaikutuksesta, mikä selittää eroja eri koekappaleiden puristuslujuuksien välillä. Mikrorakenne voi vaihdella runsaasti jopa yhden koekappaleen välillä johtuen esimerkiksi betonin tiivistyksen onnistumisesta, mistä johtuen ohuthienäytteet ja puristuslujuuskokeet kuvastavat melko niukasti tilannetta koekappaleen tietyssä pisteessä.

6 Johtopäätökset

Laboratoriokokeiden perusteella kymmenen vuotta sitten eri kosteuksisille alustoille pinnoitetut koekappaleet kestävät korkeaa rakennekosteutta hyvin myös pidemmällä aikavälillä. Tuloksista todetaan pinnoitteiden tartuntavetolujuustuloksien nousevan 3,5 kuukauden iästä kymmenen vuoden ikään kaikilla tutkituilla pinnoitteilla paitsi polyuretaaniakrylaattimaalilla. Kyseinen tuote onkin varsin kevyt maalikerros, mutta se täyttää silti kymmenen vuotta asennuksen jälkeen, kaikkien muiden tutkittujen materiaalien tavoin, Betoniyhdistyksen julkaisun by45/BLY7 pinnan tartuntavetolujuusvaatimuksen suurten rasiusten alaisille tiloille (2 N/mm²).

Tutkimuksessa suurimmat tartuntavetolujuustulokset saavuttavat kaksikomponenttinen liuotteeton polyuretaanipinnoite (4,3 N/mm²) ja kaksikomponenttinen liuotteeton epoksi-massa (3,6 N/mm²). Samojen pinnoitteiden sekä tutkitun akryylimassapinnoitteen tartuntavetolujuuksien kasvu alkuperäisen tutkimuksen mittauksista on huomattavaa. Korkean tuloksen saa myös kosteuskovettava yksikomponenttinen polyuretaanipinnoite, joka on saavuttanut korkeita arvoja jo alkuperäisessä tutkimuksessa. Muiden tunti jälkihoidon lopettamisen jälkeen (kosteustapaus heti) pinnoitettujen tuotteiden tartuntavetolujuuksien kasvu on maltillisempaa (elastinen kasviöljypohjainen muovipolymeeripinnoite) tai kasvua ei ole tapahtunut (polyuretaani-akrylaattimaali). Pinnoitteet, jotka on asennettu märkänä pidetylle alustalle (kosteustapaus märkä), saavuttavat myöskin yli 2 N/mm² tartuntavetolujuustulokset pitkäaikaisseurannassa. Toinen märemmän kosteustapauksen tuotteista on vesipohjainen epoksinpinnoite ja toinen kaksikomponenttinen liuotteeton epoksimassa kostean alustan pohjusteella.

Erittäin korkean tartuntavetolujuuden saavuttaneilla tuotteilla on yhteistä pinnoitettavan pinnan esikäsitteily vesihöyryä heikosti läpäisevällä (tiivillä) epoksi-pohjusteella. Tutkimustulokset varmistavat alkuperäisen tutkimuksen tuloksia, ettei kosteudella ole merkittävää negatiivista vaikutusta tyypillisesti kosteusherkeempinä pidettyjen polyuretaanituotteiden tartunnan kehittymiseen tai pinnoitteen ominaisuuksiin, mikäli kosteus suljetaan tiiviimmällä yhtenäisellä pohjustekerroksella rakenteeseen.

Betonissa tapahtuviin kosteuden liikkeisiin vaikuttavat betonin ominaisuuksien lisäksi oleellisesti pinnoitemateriaalin ominaisuuksista kuten vesihöyrynläpäisevyydestä ja pinnoitteen kerrospaksuudesta riippuvat tekijät. Betonin suhteellisen kosteuden sekä painoprosenttikosteusmittaustulosten perusteella heikosti vesihöyryä läpäisevien pinnoitteiden (epoksi-, polyuretaani- ja akryylituotteet) alapuolelle muodostuva rakenteen kosteusjakauma on hyvin tasainen eikä kosteuspitoisuudet eri mittaussyvyyksillä eroa toisistaan juurikaan. Kosteuspitoisuudet ovat myös pysyneet huomattavan korkeina verrattuna ympäröiviin olosuhteisiin. Vesihöyryä hyvin läpäisevien pinnoitetuotteiden (polyuretaani-akrylaattimaali ja elastinen kasviöljypohjainen muovipolymeeripinnoite) alle muodostuu selkeämmin havaittavissa oleva kosteusjakauma, kun alustarakenteen kosteuspitoisuudet nousevat mittaussyvyyden mukaan syvemmälle rakenteessa mentäessä.

Kosteusmittauksissa todetaan verrattain korkeita painoprosenttikosteuksia (yli 7 p-%) arvostelusyvyydellä 32 mm, jotka eivät etenkään tiiviimpien pinnoitteiden (epoksi, polyuretaani ja akryyli) kohdalla ole merkittävästi laskeneet kymmenen vuoden takaisista tuloksista. Mitattujen painoprosenttikosteuksien perusteella alustabetoniin on edelleen sitoutunut merkittävä määrä kosteutta. Vastaavat suhteellisen kosteuspitoisuuden mittaustulokset ovat 80 % luokkaa.

Molemmilla kosteusmittausmenetelmillä määritetty pinnoitteen alapuolinen kosteusjakauma kuvaa loogisesti betonirakenteen kuivumista mittaustulosten ollessa rakenteen pintaosassa kuivempia kuin arvostelusyvyydellä. Havainto ei vastaa alkuperäisen tutkimuksen tuloksia, joissa painoprosenttikosteusmittaustuloksissa havaittiin epäloogisuutta. Painoprosenttikosteusmittaustuloksiin vaikuttaa betonin kiviainespitoisuus, jolla on kosteutta ei-sitovana tekijänä merkittävä vaikutus varsinaiseen tulokseen. Eri pintakosteusilmaisimella määritetyt tulokset eroavat kosteusmittaustuloksista eikä niiden perusteella voida luotettavasti arvioida rakenteen kosteustilannetta. Pintakosteusilmaisimien tiedetäänkin toimivan lähinnä apuvälineenä tietyn rakenteen kosteimpien kohtien valikoimisessa tarkempia rakennekosteusmittauksia varten. Tutkimuksen perusteella ennen pinnoitusta luotettavimpaan betonin kosteuspitoisuuden määrittämiseen päästään, kun käytetään betonin suhteellisen kosteuspitoisuuden mittausta näytepalamenetelmällä.

Betonirakenteessa pitkään korkeana pysyvällä kosteudella tiedetään olevan betonin puristuslujuutta kasvattava vaikutus myös ensimmäisen kuukauden jälkeen. Työn puristuslujuuskokeissa havaitaan kuitenkin koekappaleissa käytetylle K30 betonille 10 vuoden iässä merkittävästi suurempia puristuslujuuksia (jopa 77 MPa). Korkeita puristuslujuustuloksia tukee betonin ohuthietutkimuksessa havaittu sementin melko korkea hydrataatioaste, joka vaikuttaa positiivisesti betonin lujuudenkehitykseen. Vastaavalla suhteitus-tiedoilla valmistetun betonin puristuslujuus 28 vuorokauden iässä on ollut 45 MPa:n lujuustasolla, mutta vaikutusten luotettava arviointi vaatisi tarkempaa tutkimusta. Alustavasti vaikuttaa kuitenkin siltä, että betonin puristuslujuuksissa voi tapahtua merkittävääkin kasvua, kun kosteus suljetaan pidemmäksi aikaväliksi korkealle tasolle eli niin sanottu pidennetään betonin jälkihoitoaika. Lisäksi betonin puristuslujuuksiin vaikuttaa oleellisesti myös betonin tasalaatuisuus. Tämä havaitaan puristuslujuuskokeiden tulosten hajonnassa heikompien koekappaleiden osalta, joiden murtopinnoissa havaitaan paikoin runsaasti ja epätasaisesti jakautuneita tiivistyshuokosia.

Hitaasti poistuvan kosteuden vaikutuksia betonin kehitykseen voisi tulevaisuudessa tutkia tarkemmin: esimerkiksi lujuudenkehityksen eroa voisi tarkastella normaalisti kuivuvan rakenteen ja hitaasti kuivuvan rakenteen välillä. Merkittävää olisi tarkastella, minkälaisella aikavälillä hidas kuivuminen vaikuttaa kehittyvän betonin ominaisuuksiin sekä pystyttäisiinkö kosteuden poistumista käytännön rakenteesta hallita tavoitteellisesti. Betonirakennetta suojaavan ominaisuuden lisäksi tiiviiden pinnoitteiden tai samankaltaisten tuotteiden avulla voitaisiin mahdollisesti varmistaa betonin ominaisuuksien haluttua kehitystä.

Tutkittujen pinnoitemateriaalien osalta pinnoitusvaiheessa vallinnut korkea rakennekosteus ei ole heikentänyt pinnoitteiden tartuntaa, vaan tartuntavetolujuudet ovat pääsääntöisesti nousseet. Tulokset tukevatkin Saarisen työn johtopäätöksiä kosteuden vähäisestä vaikutuksesta pinnoitteiden tartunnan kehitykseen, kunhan alusta- ja asennustyöt toteutetaan huolellisesti ja hallituissa olosuhteissa. Laadukkaan pinnan aikaansaamiseksi tuleekin pinnoitustyössä jo Saarisen diplomityössä esitetyn mukaisesti kiinnittää huomiota pinnoitettavan pinnan kuntoon ja puhtauteen sekä pinnoitustyön laatuun kunnollisissa olosuhteissa. Vaikka kosteusraja-arvoilla saadaan varmuutta pinnoitteiden pysyvyyteen, ne eivät korvaa huolellista toteutusta pinnoitusvaiheessa.

Pinnoitteiden sulkiessa betonipinnan ryhtyy alapuolinen kosteus nousemaan pintaa kohden ja tasaantuu pinnoitteen alle. Nousevan kosteuden vaikutukset tulee huomioida ennen pinnoitustyötä alusrakenteen kosteusmittauksilla. Tässä ja alkuperäisessä tutkimuksessa tehtyjen havaintojen perusteella kosteusjakauman tasoittuminen pinnan ja alapuolisen osan välillä tapahtuu riittävän hitaasti, jotta pinnoitemateriaalit kerkeävät kovettumaan ja tarttumaan pintaan. Rakenteen aivan pintakerroksen riittävän kuivuuden lisäksi on tärkeää huomioida rakenteen pintaosissa mahdollisesti kapillaarisella alueella vallitseva kosteus.

Tutkimustulokset vahvistavatkin Saarisen työn johtopäätöksiä kosteusmittausryvyksistä. Tulosten mukaan betonin kosteuspitoisuuden arvioimiseen ennen pinnoitusta voitaisiin jatkossa soveltaa ohjeistusta, jossa materiaalivalmistajan ilmoittama materiaali-kohtainen kostusraja-arvo tulisi alittua rakenteen pintaosissa syvyydellä $0,4 \times A$ (1–3 cm) sekä rakenteen pinnassa (0–5 mm) sen sijaan, että kostusraja-arvon alittumista edellytettäisiin nykyisten kosteusmittausohjeistusten mukaan rakennepaksuudesta riippuvalla arvostelusyvydeltä A (3–7 cm) sekä pintaosilta.

Vaikka tulosten perusteella pinnoitteet kestävätkin ylimääräistä kosteutta hyvin, vaatisi tuotekohtaisesti suositeltavien kostusraja-arvojen täsmällisempi määrittäminen laajempaa ja yksityiskohtaisempaa tutkimusta. Rakennekosteuden lisäksi lattiarakenteisiin on mahdollista siirtyä kosteutta myös ulkopuolisista lähteistä, esimerkiksi alapohjalaataan voi rakenneratkaisusta riippuen siirtyä diffuusiolla tai jopa kapillaarisesti maaperän kosteutta, mikä kohdistaa lisää kosteusrasitetta pinnoitteille. Tämän lisäkosteusrasituksen ja muiden ulkopuolisten rasitusten vaikutukset olisi myös hyödyllistä huomioida jatkotutkimuksissa esimerkiksi upottamalla koekappaleet osittain veteen heti pinnoitusvaiheessa. Tällöin voitaisiin kapillaarisesti nousevan kosteuden rasituksia arvioida pinnoitteiden tartunnan kehitykseen. Alkuperäisen tutkimuksen laattoja on vielä muutamia jäljellä hyödynnettävissä.

7 Yhteenveto

Kymmenen vuotta sitten materiaalivalmistajien ohjeistuksia kosteammalle alustabetonille asennetut pinnoitteet kestävät tutkimuksen mukaan betonin rakennekosteudesta johtuvaa rasiitusta hyvin. Laboratoriokokeiden perusteella lähes kaikkien pinnoitemateriaalien tartuntavetolujuudet kasvoivat 3,5 kuukauden kohdalla tehdyistä mittauksista. Kaikki tutkitut materiaalit täyttävät by45/BLY7 -julkaisussa määritetyn pinnan tartuntavetolujuusvaatimuksen suurten rasiitusten alaisille tiloille (2 N/mm^2) osan tuotteista saavuttaessa jopa huomattavan korkeita (yli $3,5 \text{ N/mm}^2$) tartuntavetolujuustuloksia.

Tulosten mukaan lähtötilanteessa pinnoittamisen jälkeen pinnoitteiden alta mitatut suhteellisten kosteuspitoisuuksien maksimiarvot (jopa 95 %) laskevat pinnoitteiden vesihöyrynläpäisevyyksien suhteessa 40–80 % tasolle. Alustabetoneihin vuosien aikana syntyneet kosteusjakaumat kuvaavatkin hyvin pinnoitteiden vesihöyrynläpäisevyyttä sekä alusrakenteen kuivumista erilaisten pinnoitteiden lävitse. Vesihöyryä hyvin läpäisevien materiaalien kohdalla kosteusjakauma on selkeästi havaittavissa arvojen laskiessa lähtötilanteesta selvästi, kun taas heikosti vesihöyryä läpäisevien materiaalien alla kosteusjakauma on hyvin tasainen arvojen ollessa huomattavan korkeita kaikilla tarkastelusyvyyksillä. Pinnoitteet ovat kerenneet kovettumaan ja muodostamaan hyvän tartunnan ennen alapuolelta nousevaa kosteutta. Pinnoitteiden alle tasoittunut paikoin erittäinkin korkea kosteuspitoisuus ei vaikuttanut pinnoitteiden tartuntoihin eikä pinnoitemateriaaleihin pitkällä aikavälillä.

Pinnoitteiden ominaisuuksista riippuva vesihöyrynläpäisevyys sekä betonissa hitaasti diffuusiolla sisäisesti tasoittuva kosteus mahdollistavat rakenteen kosteuspitoisuuden pysymisen korkeana pitkään. Tulosten perusteella tämä voi vaikuttaa betonin ominaisuuksiin huomattavasti. Koekappaleista tehdyissä ohuthietutkimuksissa havaittu sementin korkea hydrataatioaste korreloi saatujen suurten puristuslujuustulosten kanssa. Tämä antaaakin positiivisia viitteitä suuremmasta betonin lujudenkehityksestä pidemmällä aikajänteellä, kuin nykyisillä hienojakoisilla sementeillä on oletettu saavutettavan.

Tutkimuksen koekappaleet ovat pienikokoisia ja niitä on säilytetty suojassa muilta rasiituksilta, mutta korkeiden tartuntavetolujuustuloksien perusteella kovetuttuaan huolellisesti asennetun pinnoitteen voidaan olettaa toimivan ulkopuolisia rasiituksia vastaan

suunnitellusti. Suurempien rakenteiden kohdalla toki myös betonin kutistumasta johtuva tilavuuden muutos aiheuttaa rasituksia betonirakenteen ja pinnoitteen väliselle tartunnalle. Toisaalta heikosti vesihöyryä läpäisevä pinnoitemateriaali toimii pitkän jälkihoidon tavoin hidastaen kosteuden poistumista ja näin vähentää betonin kutistumaa. Kun huomioidaan lisäksi pitkällä aikavälillä tapahtuva betonin viruminen, vähenee kutistuman aiheuttamat jännitykset betonin ja pinnoitteen rajapinnassa. Betonipinnan sulkeminen vesihöyryä heikosti läpäisevällä tuotteella myös mahdollistaa kosteusherkeempien päällysteiden asentamisen tällaisen tiiviin ns. kosteuspuserikerroksen päälle.

Pinnoitteiden kestäessä alustabetonin korkeita kosteuspitoisuuksia pitkiäkin aikoja voitaisiin jatkossa alustarakenteen kosteuspitoisuudet ennen pinnoitusta määrittää lähempänä rakenteen pintaa olevalta rakennepaksuudesta riippuvaiselta mittausvyvydeltä $0,4 \times A$ (1–3 cm) nykyisen ohjeistuksen A (3–7 cm) sijaan. Lisäksi rakenteen pinnan (0–5 mm) kosteuspitoisuuden määrittämisellä varmistetaan pinnan riittävä kuivuus sekä betonin looginen kuivuminen pinnan kautta ympäristöön. Kosteusmittausvyvyksiltä määritettyjen kosteuspitoisuuksien tulee alittaa materiaalivalmistajien asettamat kosteusrajarvot. Raja-arvot olisi hyödyllistä ilmoittaa betonin suhteellisena kosteuspitoisuutena sen kuvastaessa rakenteen sisältämää, ympäröivien olosuhteiden kanssa tasapainoon pyrkivää betonin huokosilmassa olevaa kosteuspitoisuutta. Tulosten mukaan olisi perusteltua harkita tuotekohtaisten raja-arvojen päivittämistä tarkoituksenmukaisiksi ja tarvittaessa tutkia yksityiskohtaisemmin eri tuotteiden käyttäytymistä, sillä turhan varmallalla puolella olevat kosteusrajarvot aiheuttavat aikahäviötä.

Kosteusmittausten ja -raja-arvojen tuodessa varmuutta betonin pinnoittamisessa on kuitenkin huomioitava muiden tekijöiden vaikutukset kokonaisuuteen. Tutkimuksessa tehtyjen havaintojen mukaan alustabetonin rakennekosteuden vaikutukset pinnoitteiden pysyvyyteen ovatkin melko vähäiset, kun pinnoitustyö on toteutettu huolellisesti kontrolloiduissa olosuhteissa vaatimukset täyttävälle betonialustalle. Pinnoitteiden toimivuuden ja säilyvyyden kannalta onkin merkittävää painottaa huolellisia työvaiheita esikäsitteystä ja puhdistuksesta pinnoitteen asennukseen sekä betonialustan ominaisuuksia. Lisäksi on huomioitava otolliset olosuhteet pinnoitteen asennuksen sekä kovettumisen aikana.

Jatkotutkimusta voisi tulevaisuudessa kuitenkin tehdä liittyen pinnoitteiden materiaali-kohtaisiin kosteusraja-arvoihin ja betonin lujuuden kehittymiseen korkeissa kosteuspitoisuuksissa. Jatkossa tulisi huomioida eri pinnoitetyyppejä sekä betonilaatuja, sillä esimerkiksi korkeamman vesi-sementtisuhteen betonissa kosteus liikkuu nopeammin. Ulkopuolisen kosteusrasituksen vaikutuksia olisi hyvä tutkia tarkemmin, jotta voitaisiin arvioida jopa kapillaarisesti nousevan kosteuden vaikutuksia pinnoitteiden tartunnan kehitykseen.

Lähteet

- 1 Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. Betonitekniikan oppikirja by201. Helsinki: BY-Koulutus Oy.
- 2 Merikallio Tarja. 2009. Väitöskirja ”Betonilattian ’riittävän’ kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa”. Espoo: Teknillisen korkeakoulun Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos.
- 3 Lindberg Ralf, Wahlman Jyrki, Suonketo Jommi, Paukku Elina. 2002. Julkaisu 119 ”Kosteusvirta-tutkimus”. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- 4 <https://betoni.com>. Betonteollisuus ry:n ylläpitämä sivusto. Luettu 2.3.2020.
- 5 Suomen Betoniyhdistys ry. 2010. Betonilattioiden pinnoitusohjeet by54/BLY12. Helsinki: Betonova Oy.
- 6 Weldon, G. Dwight. 2009. Failure Analysis of Paints and Coatings. UK: John Wiley and Sons, Ltd.
- 7 Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. Betonilattiat by45/BLY7. Helsinki: BY-Koulutus Oy.
- 8 Saarinen, Jarmo. 2010. Diplomityö ”Alustabetonin kosteuspitoisuuden vaikutus pinnoitteen tartuntaan”. Espoo: Aalto-yliopiston Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta.

Koekappaleisiin käytetyn betonin annostiedot

Rudus**Kuormakirjan annostiedot**1 (1)
10.12.2009

Toimituspiste	Pvm	Kuormakirja	Tuote	m ³
Tuupakka	18.11.2009	338863	NORMAALISTI SITOUTUVA LATTIABETONI K-30 #08 S3	1,0
			Tilavuuskorjaus-%	0
			Valmistuskoko m ³	1,0

Betonin lisäominaisuudet

RUNKOAIINEEN LÄMMITYSLISÄ

Raaka-aine	Annostelu virhe / m ³	Annostelu kg / m ³	Aineryhmä
0-8 HIENO	-1,0 kg -0,2%	532,0	Hiekka
0-8 KARKEA	12,0 kg 1,1%	1 114,0	Hiekka
HUOKOSTIN	0,1 kg 5,1%	2,3	Lisäaine
RAPID	0,5 kg 0,1%	358,5	Sementti
Lentotuhka	0,0 kg 0,0%	64,0	Tuhka
LISÄVESI	0,0 kg 0,0%	0,0	Vesi
VESI KUUMA	1,3 kg 1,2%	107,5	Vesi
VESI KYLMÄ	0,0 kg -0,1%	77,8	Vesi

Kiviaineksen sisältämä vesi : 64,7 kg/m³

Kuva 1. Tutkimuksissa käytetyn betonin osa-aineet määrineen Rudus Oy:n kuormakirjassa.

KOESTUSSUUNNITELMA (Alustabetonin kosteuspitoisuuden pitkäaikaisvaikutus pinnoittamisessa)

Suunnitelman tarkoituksena on mahdollistaa insinööriyön koeosuuden sujuva toteutus sekä luotettavat tulokset. Suunnitelmassa käsitellään tulevien työvaiheiden toteutusta. Lisäksi kartoitetaan mahdollisia riskitekijöitä ja kuinka niihin varaudutaan koeosuudessa.

Koestukset

Koeosuudessa tarkastellaan kahdeksalla eri tuotteella pinnoitettuja betonisia koekappaleita, jotka on valettu 10 vuotta sitten ja pinnoitettu eri kosteustapauksissa (taulukko 1).

Taulukko 1. Koestettavien kappaleiden pinnoitteet ja kosteustapaukset. Kosteustapausten selitykset alla.

Materiaali	Kosteustapaus
P1 Epoksi	Heti
P2 Polyuretaani	Heti 1 vrk (ennakkovaihe)
P3 Polyuretaani, kosteuskovettuva	Heti
P4 Muovipolymeeri	Heti 1 vrk (ennakkovaihe)
P5 Polyuretaani-akrylaattimaali	Heti
P6 Akryyli	Heti
P7 M-pohjustettu epoksi	Märkä
P8 Vesipohjainen epoksi	Märkä

Kosteustapausten määrittäykset:

- **Heti** = pinnoitettu yhden tunnin sisällä jälkihoidon lopetuksesta
- **Märkä** = koekappaleita jälkihoidettiin viisi viikkoa (17.11.2009–21.12.2009), jonka jälkeen suoraan jälkihoidon loputtu niitä kasteltiin kahdeksan päivän ajan betonin pinnasta. Ennen pinnoitusta koekappaleesta poistettiin reunalistat ja pidettiin sumuttamalla kosteana aivan pinnoitukseen asti. Ylimääräinen vesi pyyhittiin pois juuri ennen pinnoitusta

Insinööriyössä koekappaleille suoritetaan koestukset mukaillen diplomityötä. Tavoitteena on tarkastella betonikappaleiden kuivumista pinnoitteen läpi sekä pinnoitteiden

tartuntavetolujuuksia. Koeosuuden onnistumisen varmistamiseksi eri työvaiheiden toteutus jäsennellään mahdollisimman tarkasti (taulukko 2).

Taulukko 2. Työvaiheet ja niissä huomioitavat asiat.

Työvaiheet ja -järjestys	Huomioitavaa
1) Kosteuskartoitukset pintakosteusilmaisimella	- eri laitteiden käyttö (Gann Hydrotest LG1 & Tramex CME4) - tulosten kirjaus
2) Kopokartoitus	- oikea työväline - mahdollisten kopojen alueiden merkkaukset ja kirjaus
3) Tartuntavetokokeet (3 kpl / koekappale) 0,05 tai 0,15 N/s/mm ²	- alueen rajaaminen kuivamenetelmällä - alustan puhdistus ja valmistelu huolellisesti - huolellinen liimaus (pelkän liimamurron tapauksessa uusitaan koe) - liimapurseiden poisto - vetolaitteen kiinnitys tukevasti kohtisuoraan - oikea vetonopeus pinnoitemateriaalikohtaisesti (98 & 294 N/s) - tulosten valokuvaus ja kirjaus - TKR –pinnoitteesta vetokokeet molemmilla nopeuksilla
4) Kosteusmittaukset näytepalamenetelmällä (pinta, 10 mm ja 32 mm)	- näytteidenotossa varmistetaan oikea syvyys - mitta-astiaan aineesta vain määrättyä syvyydeltä - mittapäiden huolellinen tiivistys näyteastiaan kitillä - astioiden ja mittapäiden huolellinen kirjaus ja säilytys - tulosten valokuvaus ja kirjaus

Työt aloitetaan joulukuussa 2019 ennakkokokeilla kahdelle eri pinnoiteratkaisulle P2 ja P4 (taulukko 1). Kyseisistä pinnoitteista löytyy kaksi koekappaletta ja testikokeet suoritetaan kuivemmalle kosteustapaukselle (1 vrk). Ennakkokokeet suoritetaan koesuunnitelman mukaisesti, minkä jälkeen arvioidaan toteutusta ja tuloksia sekä tarvittaessa tehdään tarkennuksia koejärjestelyihin.

Ennakkokokeiden yhteydessä tarkastellaan koekappaleiden kosteusjakaumaa tarkemmin toteuttamalla kosteusmittaukset kappaleen reunoille, keskialueelle ja pohjaan:

- Porareikämittaus syvyyksiltä 10 mm, 32 mm ja 50 mm kolmesta kohdasta (keskeltä ja nurkista)
- Näytepalamittaus
 - Koesuunnitelman mukaisesti pinnoitteen alta, 10 mm ja 32 mm
 - Lisäksi pohjasta ja 10 mm syvyydeltä pohjasta

Kosteusjakauman selvityksen avulla pyritään saamaan tietoa, miten koekappaleiden kuivuminen on tapahtunut. Koestuksia jatketaan ennakkokokeiden jälkeen varsinaisilla kokeilla ajankohtaisen koesuunnitelman mukaisesti. Tulosten perusteella arvioidaan tarvetta ylimääräisille tarkasteluille esim. ohuthietarkastelu, mikäli vetolujuuskokeiden tuloksissa havaitaan poikkeamia.

Riskit ja ennaltaehkäisy

Alla olevaan taulukkoon on kartoitettu mahdollisia riskejä liittyen koestuksiin sekä kuinka mahdollisiin ongelmiin varaudutaan.

Taulukko 3. Mahdolliset riskit ja niihin varautuminen.

Riski	Toiminta
Työvirhe mittaustilanteessa	Työvaiheiden huolellinen suunnittelu (taulukko 2) ja suorittaminen
Tulosten kirjausvirhe	Jokaisen tuloksen varmistus, dokumentointi ja valokuvaus
Laitevirhe	Käytetään yrityksessä kalibroituja laitteita, poikkeavuuden ilmetessä toistetaan koe.

Koeosuudessa painotetaan huolellista työtä valmisteluissa, koestuksissa ja tulosten kirjaamisessa.

Lisätutkimukset (22.1.2020)

Varsinaisten koetulosten perusteella tehtyjen havaintojen perusteella, päätetään kolmelle koekappaleelle toteuttaa lisätutkimuksia. Lisätutkimukset toteutetaan koekappaleille P2, P5 ja P7, joista tarkastellaan betonin koostumusta sekä pinnoitteen tartuntaa ohuthietutkimuksella. Betonista toteutetaan myös puristuslujuuskoe.

Taulukko 4. Lisätutkimukset ja niissä huomioitavat asiat.

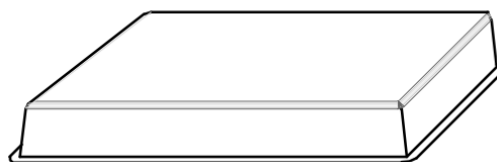
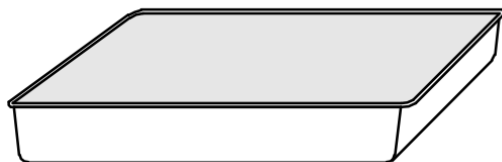
Lisäkokeet	Huomioitavaa
Puristuslujuuskokeet (Koekappaleet P2, P5 ja P7)	- 2 näytettä / koekappale - poraus timantilla 50 mm läpi - näytteen valmistelu ennen puristuskoetta
Ohuthietutkimukset (Koekappaleet P2, P5 ja P7)	- 1 näyte / koekappale - poraus timantilla 50 mm läpi - näytteen valmistelu ennen tarkastelua mikroskoopilla

TUTKIMUSPÄIVÄKIRJA (Alustabetonin kosteuspitoisuuden pitkäaikaisvaikutus pinnoittamisessa)

Perustiedot ja mittapisteet

Koekappaleen numero: _____ Koestuspäivämäärä: _____

Mittapisteiden sijainnit:



Pintakosteus- ja kopokartoitus

Tartuntavetokokeet (vetonopeus: **N/s**)

Veto 1			Veto 2			Veto 3		
lujuus [MPa]	tapa	syvyys	lujuus [MPa]	tapa	syvyys	lujuus [MPa]	tapa	syvyys

Kosteusmittaukset

Näytepalat (kerätty _____, luettu _____)									
Laatta	Syvyys	Koeputki 1				Koeputki 2			
		mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%
	ilma								
	pinta								
	10								
	32								

Painoprosenttiseuranta (ajalta: _____)								
Laatta	Syvyys	Astia	Mitta-pää	pvm astian paino	pvm astia + näyte	pvm astia + näyte	pvm astia + näyte	p%
	0 - 5							
	0 - 5							
	5 - 10							
	5 - 10							
	27 - 32							
	27 - 32							

Muut huomiot

Ennakkovaiheen kosteusmittaustulokset

Taulukoina ja kuvina esitetyt pinnoiteyhdistelmien P2 ja P4 (kosteustapauksella 1 vrk) kosteusmittaustulokset porareikä-, näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmillä määritettyinä.

Pinnoiteyhdistelmä P2 (1vrk)

Taulukko 1. Ennakkovaiheen pinnoiteyhdistelmän P2 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
47 (P2) 17.12.2019 (Arvosteluikä 10 v.)	keräysilma	C3	20,1	31,4							
	pinta	C2	21,6	77,9	6,7	C6	21,6	77,9	6,0	77,9	6,3
	10 mm	C5	21,6	74,6	6,3	C4	21,6	74,9	6,3	74,8	6,3
	32 mm	C1	21,5	76,5	6,4	C8	21,5	76,7	6,9	76,6	6,7
	mittausilma	C7	21,4	26,9							
47 (P2) 18.12.2019 (Arvosteluikä 10 v.)	keräysilma	D6	20,4	30,0							
	60 mm	D5	21,3	80,3	6,0	D8	21,3	80,7	6,4	80,5	6,2
	pohja	C4	21,3	80,7	6,7	C6	21,3	80,3	6,4	80,5	6,5
	mittausilma	D9	21,2	37,6							

Taulukko 2. Ennakkovaiheen pinnoiteyhdistelmän P2 kosteusmittaustulokset porareikämenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Mittapiste 1			Mittapiste 2			Mittapiste 3			ka
		mittapää	T (°C)	RH (%)	mittapää	T (°C)	RH (%)	mittapää	T (°C)	RH (%)	RH (%)
47 (P2) 16.12.2019 (Arvosteluikä 10 v.)	mittausilma	C10	19,3	32,4							
	10 mm	C1	19,4	72,1	C4	19,5	72,0	C7	19,5	70,7	71,6
	32 mm	C2	19,3	75,9	C5	19,4	77,7	C8	19,4	76,2	76,6
	50 mm	C3	19,2	77,3	C6	19,3	80,2	C9	19,3	80,3	79,3



Kuva 1. Kuvasarja ennakkovaiheen P2 kosteusmittauksista pinnan kautta kerätyistä näytepa-loista.



Kuva 2. Kuvasarja ennakkovaiheen P2 kosteusmittauksista pohjan kautta kerätyistä näytepa-loista.



Kuva 3. Kuvasarja ennakkovaiheen P2 kosteusmittauksista porareikämenetelmällä.

Pinnoiteyhdistelmä P4 (1 vrk)

Taulukko 3. Ennakkovaiheen pinnoiteyhdistelmän P4 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
49 (P4) 18.12.2019 (Arvosteluikä 10 v.)	keräysilma	C7	20,6	37,6							
	pinta	D6	21,1	60,7	4,8	D1	21,1	60,5	4,0	60,6	4,4
	10 mm	D2	21,1	63,2	5,3	D3	21,1	63,3	5,1	63,3	5,2
	32 mm	D4	21,1	71,3	5,9	D7	21,1	70,7	6,1	71,0	6,0
	mittausilma	D9	21,2	37,6							
49 (P4) 18.12.2019 (Arvosteluikä 10 v.)	keräysilma	D6	20,4	30,0							
	60 mm	C5	21,3	69,9	6,1	C2	21,3	69,0	6,5	69,5	6,3
	pohja	C8	21,2	67,7	5,7	C7	21,4	68,2	5,8	68,0	5,7
	mittausilma	D9	21,2	37,6							

Taulukko 4. Ennakkovaiheen pinnoiteyhdistelmän P4 kosteusmittaustulokset porareikämenetelmällä määritettyinä.

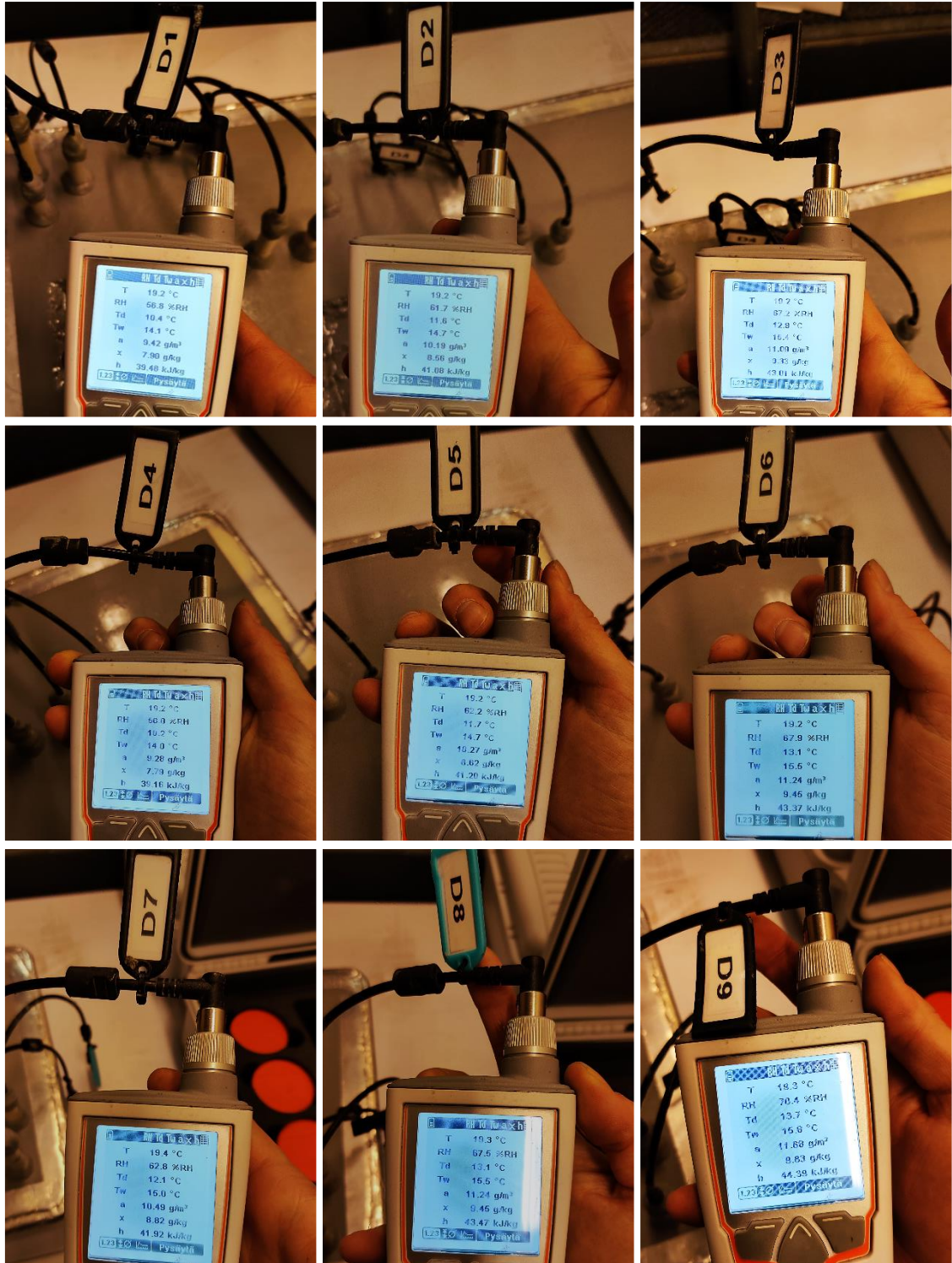
Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Mittapiste 1			Mittapiste 2			Mittapiste 3			ka
		mittapää	T (°C)	RH (%)	mittapää	T (°C)	RH (%)	mittapää	T (°C)	RH (%)	RH (%)
49 (P4) 16.12.2019 (Arvosteluikä 10 v)	mittausilma	C10	19,3	32,4							
	10 mm	D1	19,2	56,8	D4	19,2	56,0	D7	19,4	62,8	58,5
	32 mm	D2	19,2	61,7	D5	19,2	62,2	D8	19,3	67,5	63,8
	50 mm	D3	19,2	67,2	D6	19,2	67,9	D9	19,3	70,4	68,5



Kuva 4. Kuvasarja ennakkovaiheen P4 kosteusmittauksista pinnan kautta kerätyistä näytepa-loista.

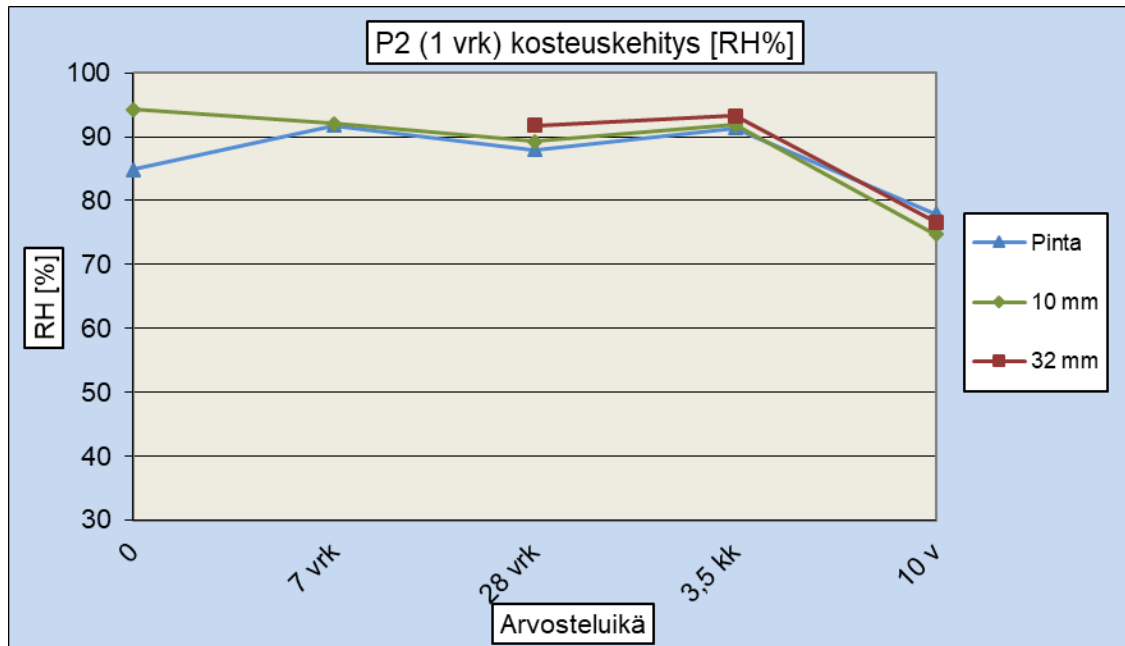


Kuva 5. Kuvasarja ennakkovaiheen P4 kosteusmittauksista pohjan kautta kerätyistä näytepa-loista.

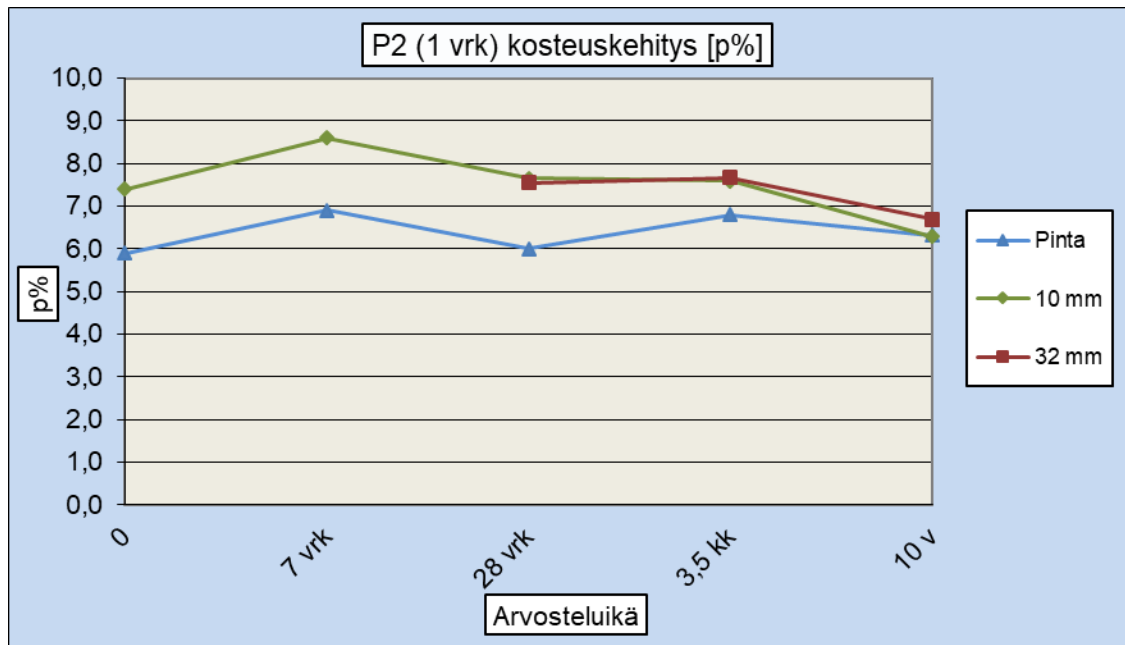


Kuva 6. Kuvasarja ennakkovaiheen P4 kosteusmittauksista porareikämenetelmällä.

Pinnoiteyhdistelmän P2 kosteuskehityskuvaajat

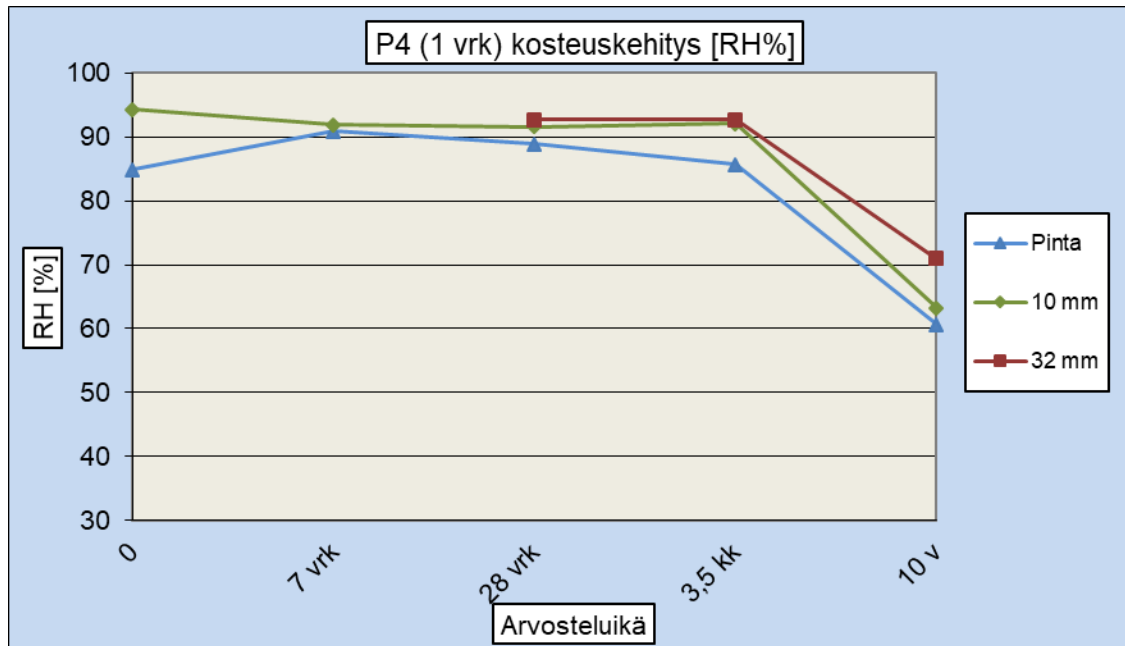


Kuva 7. Pinnoiteyhdistelmän P2 (1 vrk) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys alkuperäisestä pinnoitushetkestä eteenpäin syvyyksillä pinta, 10 mm ja 32 mm.

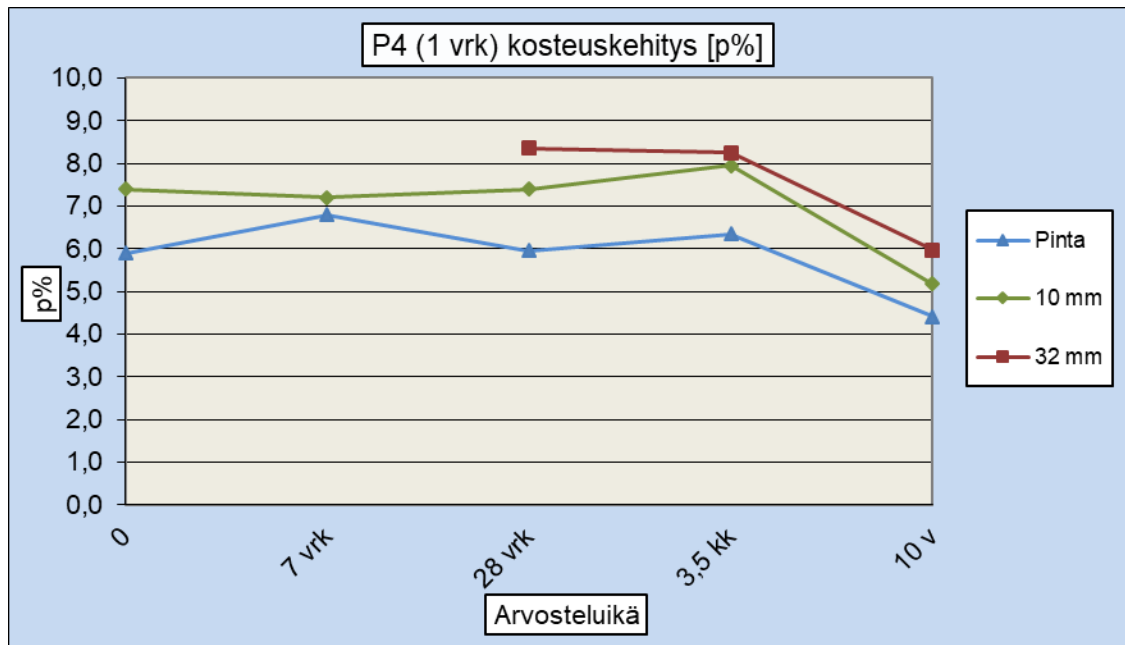


Kuva 8. Pinnoiteyhdistelmän P2 (1 vrk) painoprosenttikosteuksien kehitys alkuperäisestä pinnoitushetkestä eteenpäin syvyyksillä pinta, 10 mm ja 32 mm.

Pinnoiteyhdistelmän P4 kosteuskehityskuvaajat



Kuva 9. Pinnoiteyhdistelmän P4 (1 vrk) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys alkuperäisestä pinnoitushetkestä eteenpäin syvyyksillä pinta, 10 mm ja 32 mm.



Kuva 10. Pinnoiteyhdistelmän P4 (1 vrk) painoprosenttikosteuksien kehitys alkuperäisestä pinnoitushetkestä eteenpäin syvyyksillä pinta, 10 mm ja 32 mm.

Ennakkovaiheen tartuntavetolujuustulokset

Taulukoina ja kuvina esitetyt pinnoiteyhdistelmien P2 ja P4 (kosteustapauksella 1 vrk) tartuntavetolujuustulokset ja murtotyypit.

Taulukko 1. Ennakkovaiheen P2 ja P4 tartuntavetolujuustulokset (N/mm²), murtotyypit ja -syvyudet.

Laatta ja ikä	Veto 1			Veto 2			Veto 3			ka
	N/mm ²	Tyyppi	Syvyys	N/mm ²	Tyyppi	Syvyys	N/mm ²	Tyyppi	Syvyys	N/mm ²
47 (P2) 17.12.2019 (Arvostelu-ikä 10 v)	5,320	25 A 75 B/C	pinnoite- 2 mm	4,184	100 A	5–8 mm	4,377	90 A 10 B/C	pinnoite- 3 mm	4,63
49 (P4) 17.12.2019 (Arvostelu-ikä 10 v)	2,629	98 A 2 A/B	pinnoite- 2 mm	2,731	98 A 2 A/B	pinnoite- 2 mm	3,068	97 A 3 A/B	pinnoite- 2 mm	2,81
49 (P4) veto- nopeus 98 N/s	3,117	98 A 2 A/B	pinnoite- 2 mm	2,432	85 A 15 A/B	pinnoite- 2 mm	2,840	95 A 5 A/B	pinnoite- 2 mm	2,80

Pinnoiteyhdistelmä P2



Kuva 1. P2 ennakkovaiheen tartuntavetolujuustulokset (vetonopeudella 294 N/s) järjestyksessä vasemmalta oikealle: veto 1 (5,320 N/mm²), veto 2 (4,184 N/mm²) ja veto 3 (4,377 N/mm²).

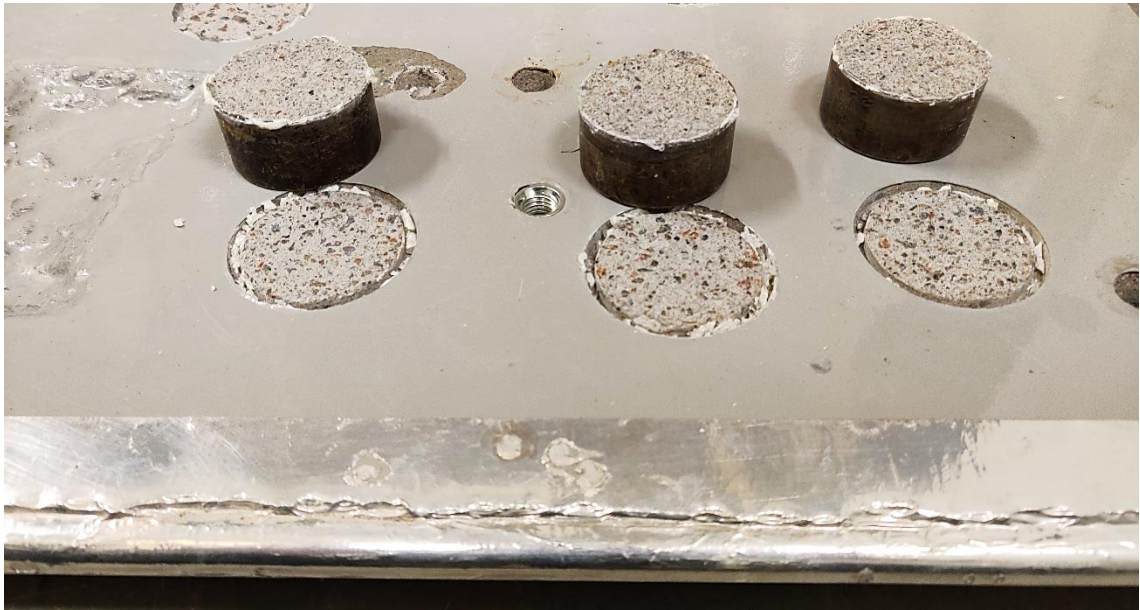


Kuva 2. Ennakkovaiheen P2 tartuntavetolujuuskokeiden (294 N/s) vetonapit ja murtoalueet vasemmalta oikealle: veto 1 (murto 25% A, 75% B/C), veto 2 (murto 100% A) ja veto 3 (murto 90% A, 10% B/C).

Pinnoiteyhdistelmä P4



Kuva 3. P2 ennakkovaiheen tartuntavetolujuustulokset (vetonopeudella 294 N/s) järjestyksessä vasemmalta oikealle: veto 1 (2,629 N/mm²), veto 2 (2,731 N/mm²) ja veto 3 (3,068 N/mm²).



Kuva 4. Ennakkovaiheen P4 tartuntavetolujuuskokeiden (294 N/s) vetonapit ja murtoalueet vasemmalta oikealle: veto 1 (murto 98% A, 2% A/B), veto 2 (murto 98% A, 2% A/B) ja veto 3 (murto 97% A, 3% A/B).



Kuva 5. P4 ennakkovaiheen tartuntavetolujuuskokeiden (vetonopeudella 98 N/s) järjestyksessä vasemmalta oikealle: veto 1 (3,117 N/mm²), veto 2 (2,432 N/mm²) ja veto 3 (2,840 N/mm²).



Kuva 6. Ennakkovaiheen P4 tartuntavetolujuuskokeiden (98 N/s) vetonapit ja murtoalueet vasemmalta oikealle: veto 1 (murto 98% A, 2% A/B), veto 2 (murto 85% A, 15% A/B) ja veto 3 (murto 95% A, 5% A/B).

Kosteusmittaustulokset

Taulukoina ja kuvina esitetyt varsinaisessa koeosuudessa koestettujen pinnoiteyhdistelmien (P1–P8) kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmillä määritettyinä.

Mittaustulokset taulukoina

Pinnoiteyhdistelmä P1 (heti)

Taulukko 1. Pinnoiteyhdistelmän P1 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
41 (P1) 20.12.2019 (Arvostelu- ikä 10 v.)	keräysilma	D8	21,8	25,0							
	pinta	D1	21,8	76,8	6,2	D2	21,8	76,6	6,2	76,7	6,2
	10 mm	D3	21,9	79,2	6,5	D4	21,7	78,0	6,4	78,6	6,4
	32 mm	D9	21,8	80,4	7,8	D10	21,8	80,3	7,4	80,4	7,6
	mittausilma	D8	21,8	28,8							

Pinnoiteyhdistelmä P2 (heti)

Taulukko 2. Pinnoiteyhdistelmän P2 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
1 (P2) 7.1.2020 (Arvostelu- ikä 10 v.)	keräysilma	C5	21,0	35,8							
	pinta	D1	21,3	76,7	6,3	D2	21,3	77,1	6,0	76,9	6,2
	10 mm	D6	21,3	81,8	6,3	D8	21,3	81,8	6,1	81,8	6,2
	32 mm	D9	21,3	82,0	7,9	D10	21,3	80,9	6,7	81,5	7,3
	mittausilma	C5	21,3	34,1							

Pinnoiteyhdistelmä P3 (heti)

Taulukko 3. Pinnoiteyhdistelmän P3 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
39 (P3) 31.12.2019 (Arvosteluikä 10 v.)	keräysilma	D10	22,3	33,4							
	pinta	D1	21,6	71,3	4,6	D2	21,6	72,9	4,4	72,1	4,5
	10 mm	D3	21,6	75,0	6,3	D6	21,7	74,7	5,7	74,9	6,0
	32 mm	D8	21,6	76,9	6,9	D9	21,6	76,5	7,1	76,7	7,0
	mittausilma	D10	21,5	24,2							

Pinnoiteyhdistelmä P4 (heti)

Taulukko 4. Pinnoiteyhdistelmän P4 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
6 (P4) 7.1.2020 (Arvosteluikä 10 v.)	keräysilma	C5	21,0	35,8							
	pinta	C2	21,3	50,1	3,4	C4	21,2	50,6	3,6	50,4	3,5
	10 mm	C6	21,3	53,9	4,1	C8	21,1	52,0	4,3	53,0	4,2
	32 mm	C9	21,3	63,1	5,4	C10	21,1	61,5	5,6	62,3	5,5
	mittausilma	C5	21,3	34,1							

Pinnoiteyhdistelmä P5 (heti)

Taulukko 5. Pinnoiteyhdistelmän P5 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	mittapää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
29 (P5) 20.12.2019 (Arvosteluikä 10 v.)	keräysilma	D8	21,8	25,0							
	pinta	C4	21,5	38,1	2,2	C5	21,6	38,0	2,0	38,1	2,1
	10 mm	C6	21,6	39,6	2,7	C7	21,5	38,8	2,8	39,2	2,7
	32 mm	C8	21,6	46,9	3,8	C9	21,6	45,9	3,5	46,4	3,7
	mittausilma	D8	21,5	29,0							

Pinnoiteyhdistelmä P6 (heti)

Taulukko 6. Pinnoiteyhdistelmän P6 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
57 (P6) 31.12.2019 (Arvostelu- ikä 10 v.)	keräysilma	D10	22,3	33,4							
	pinta	C4	21,6	74,4	6,6	C6	21,6	75,1	6,6	74,8	6,6
	10 mm	C7	21,5	75,3	6,6	C8	21,5	77,8	6,3	76,6	6,4
	32 mm	C9	21,6	79,8	7,1	C2	21,6	80,8	7,4	80,3	7,2
	mittausilma	D10	21,5	24,2							

Pinnoiteyhdistelmä P7 (märkä)

Taulukko 7. Pinnoiteyhdistelmän P7 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

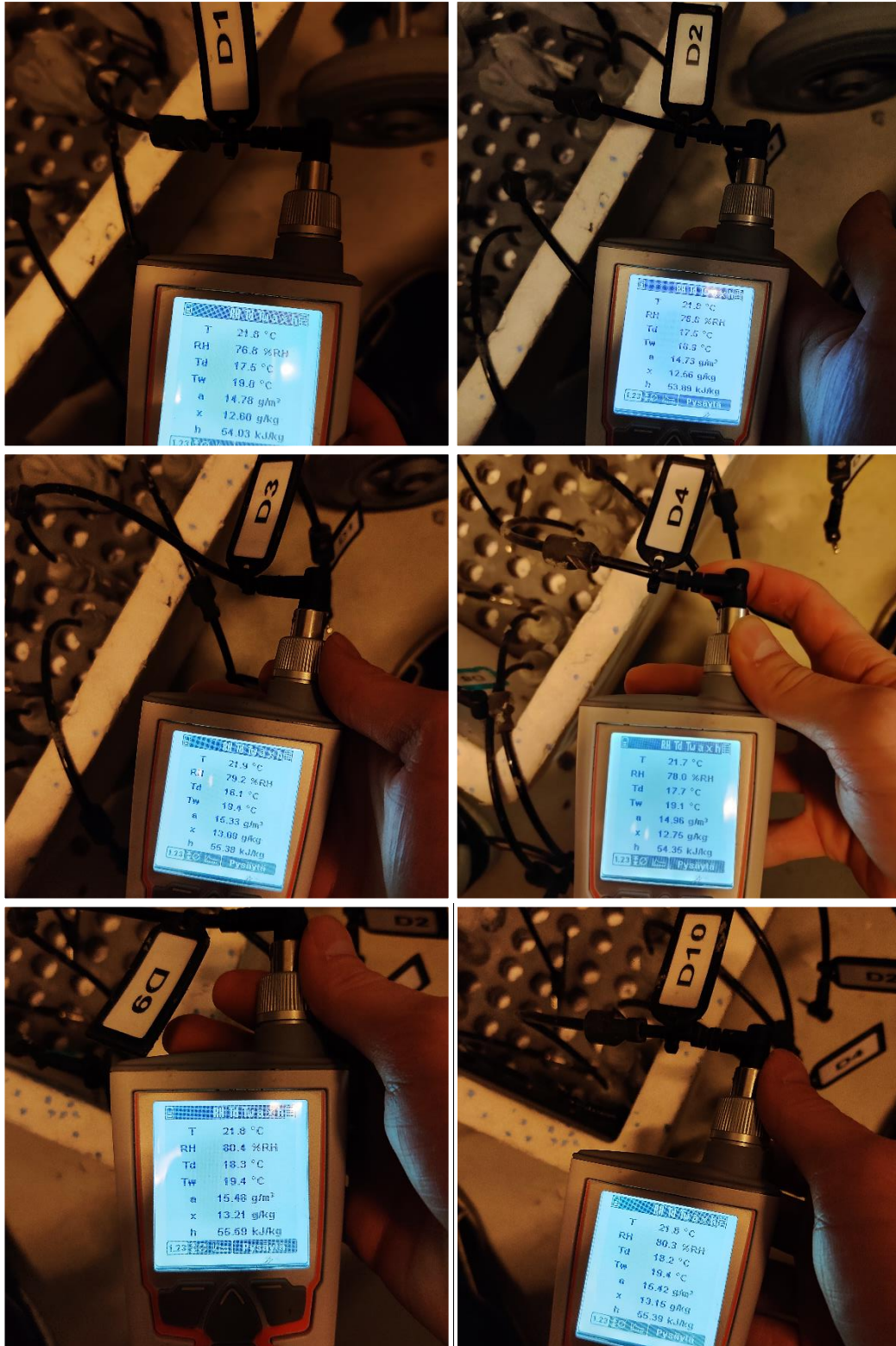
Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
60 (P7) 1.1.2020 (Arvostelu- ikä 10 v.)	keräysilma	C1	20,8	22,4							
	pinta	D1	21,5	82,4	5,6	D2	21,4	82,5	6,2	82,5	5,9
	10 mm	D6	21,5	79,8	7,4	D8	21,5	79,3	6,5	79,6	7,0
	32 mm	D9	21,5	82,3	7,2	D10	21,5	81,2	7,3	81,8	7,2
	mittausilma	C1	21,4	25,5							

Pinnoiteyhdistelmä P8 (märkä)

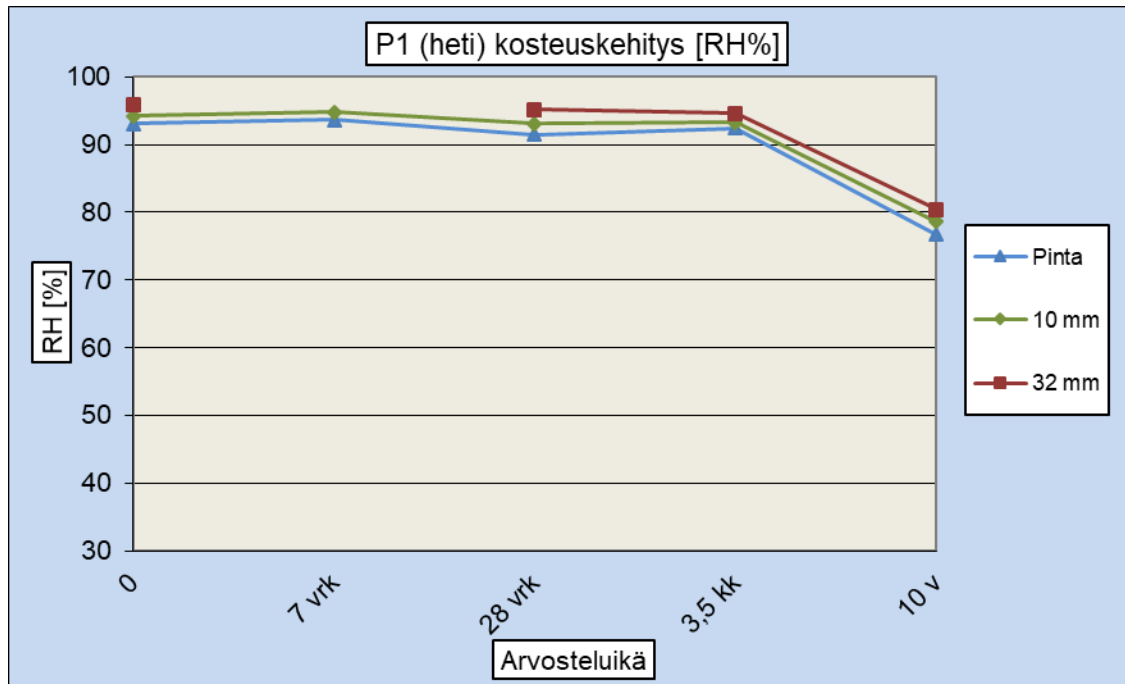
Taulukko 8. Pinnoiteyhdistelmän P8 kosteusmittaustulokset näytepala- ja kuivatuspunnitusmenetelmällä määritettyinä.

Laatta ja ikä	Syvyys/ rakenne	Koeputki 1				Koeputki 2				Keskiarvo	
		mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	mitta- pää	T (°C)	RH (%)	p-%	RH (%)	p-%
64 (P8) 1.1.2020 (Arvostelu- ikä 10 v.)	keräysilma	C1	20,8	22,4							
	pinta	C2	21,6	63,6	4,9	C4	21,5	62,5	4,7	63,1	4,8
	10 mm	C6	21,6	66,9	5,5	C8	21,5	65,7	5,2	66,3	5,4
	32 mm	C9	20,6	71,9	6,5	C10	21,4	69,7	6,4	70,8	6,4
	mittausilma	C1	21,4	25,5							

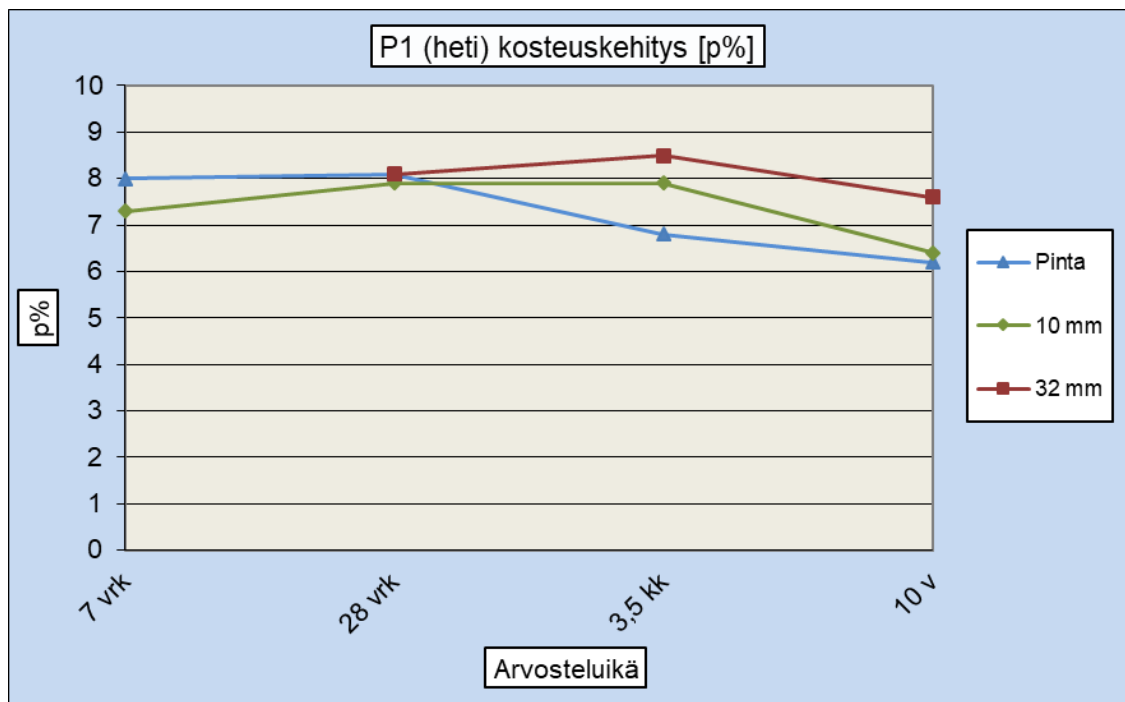
Mittaustulokset kuvina ja kaavioina - Pinnoiteyhdistelmä P1 (heti)



Kuva 1. Kuvasarja P1 kosteusmittauksista.

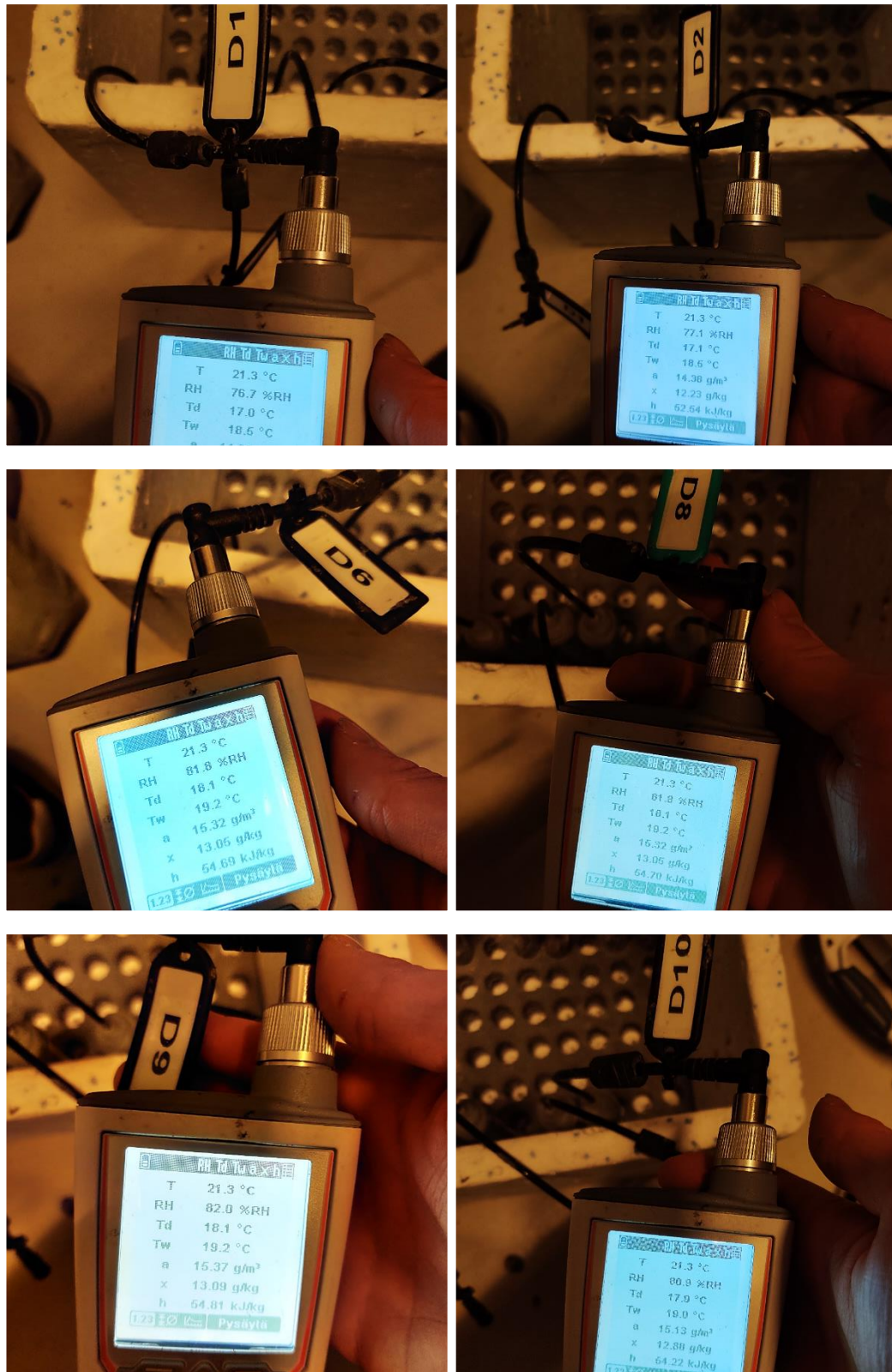


Kuva 2. P1 (heti) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen.

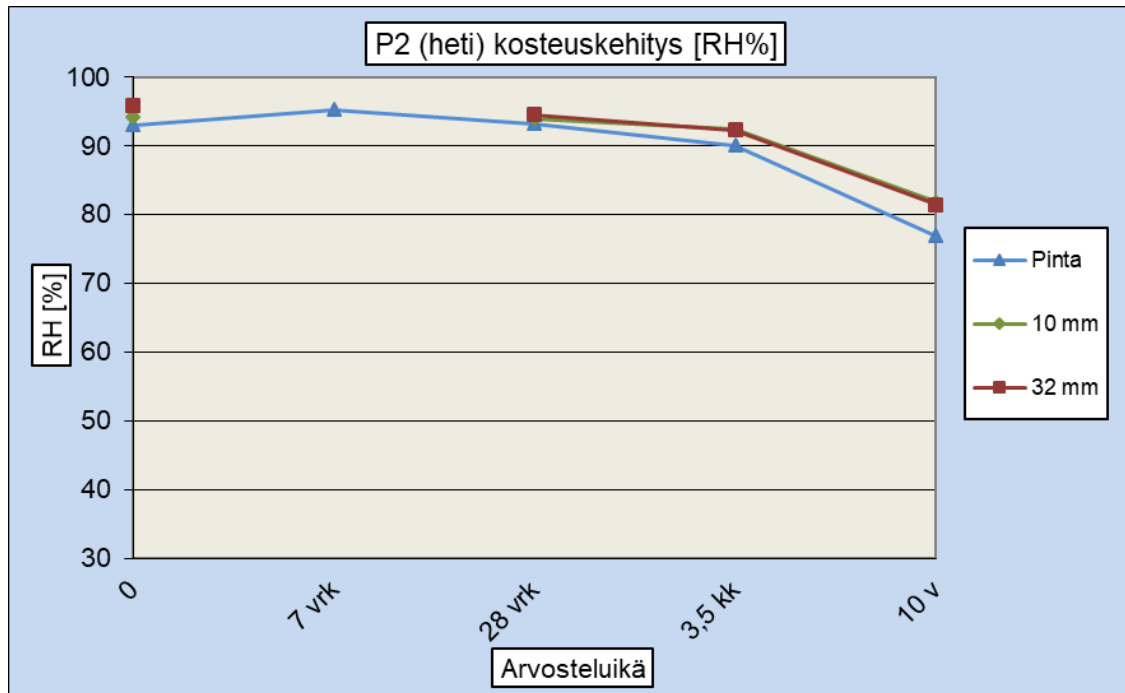


Kuva 3. P1 (heti) painoprosenttikosteuden kehitys 7 vrk iästä alkaen.

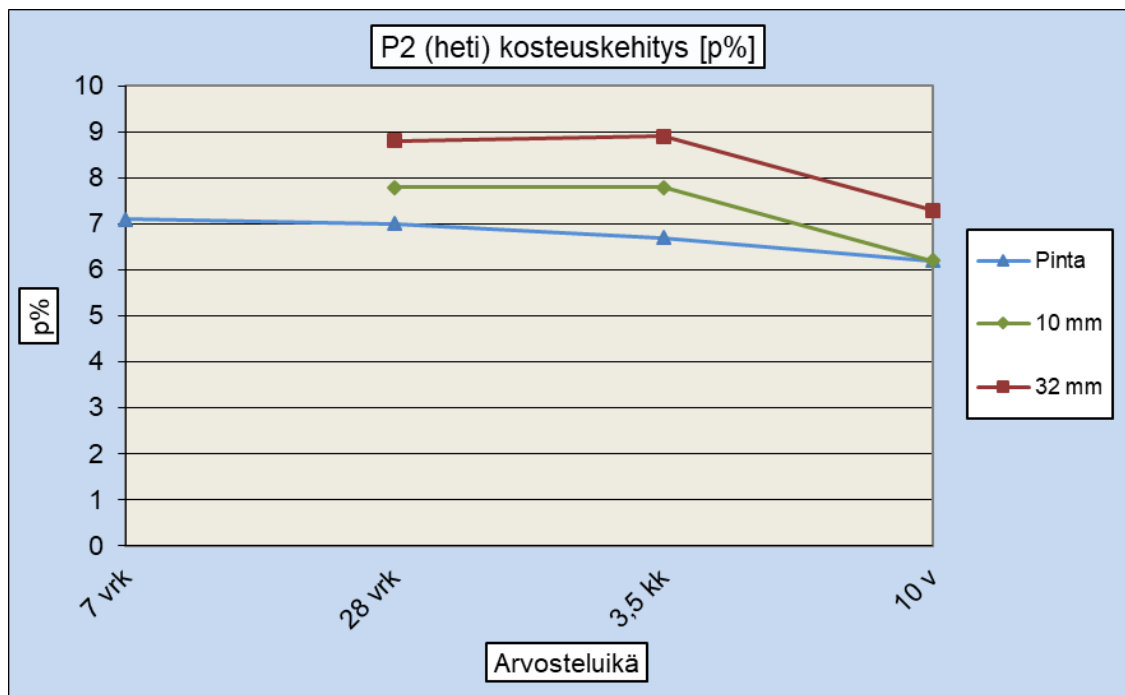
Pinnoiteyhdistelmä P2 (heti)



Kuva 4. Kuvasarja P2 kosteusmittauksista.

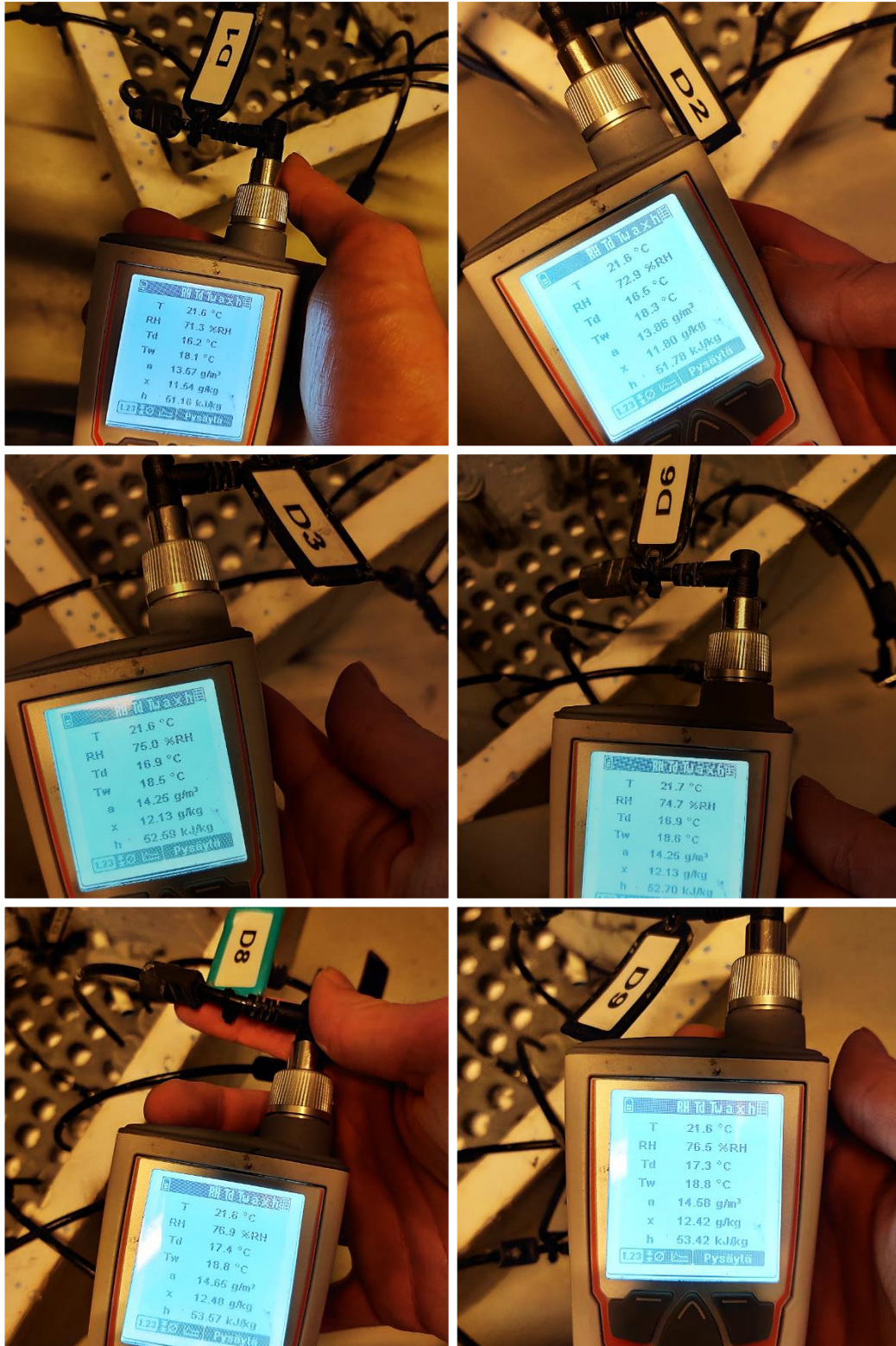


Kuva 5. P2 (heti) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen.

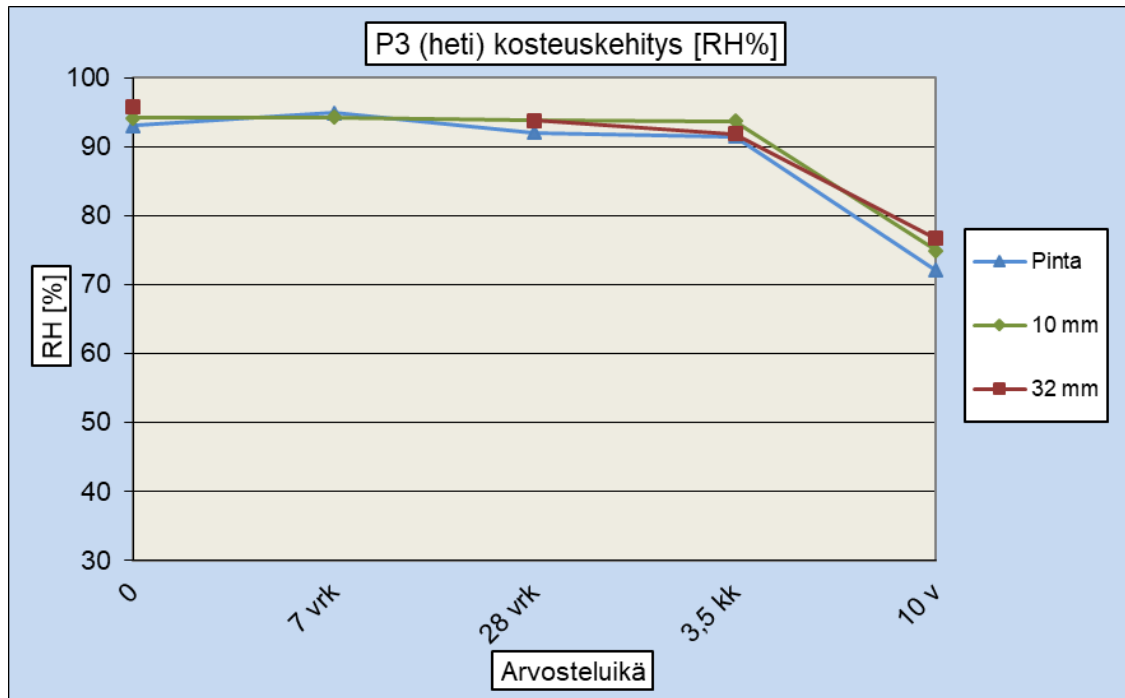


Kuva 6. P2 (heti) painoprosenttikosteuden kehitys 7 vrk iästä alkaen.

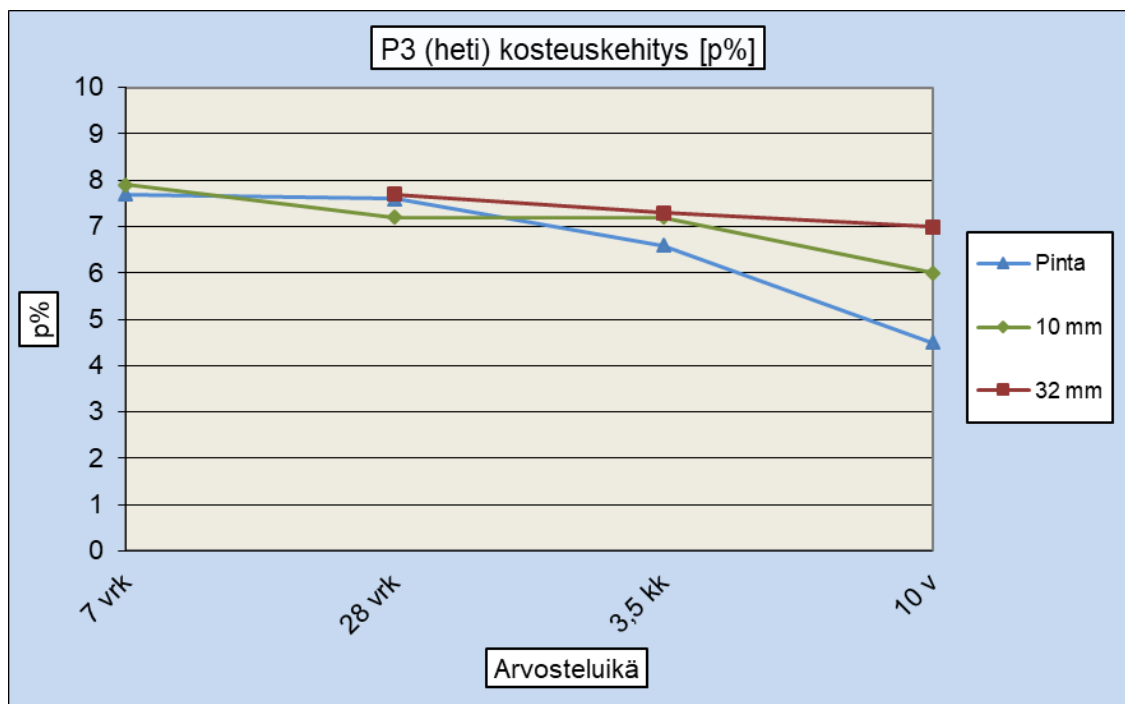
Pinnoiteyhdistelmä P3 (heti)



Kuva 7. Kuvasarja P3 kosteusmittauksista.



Kuva 8. P3 (heti) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen.

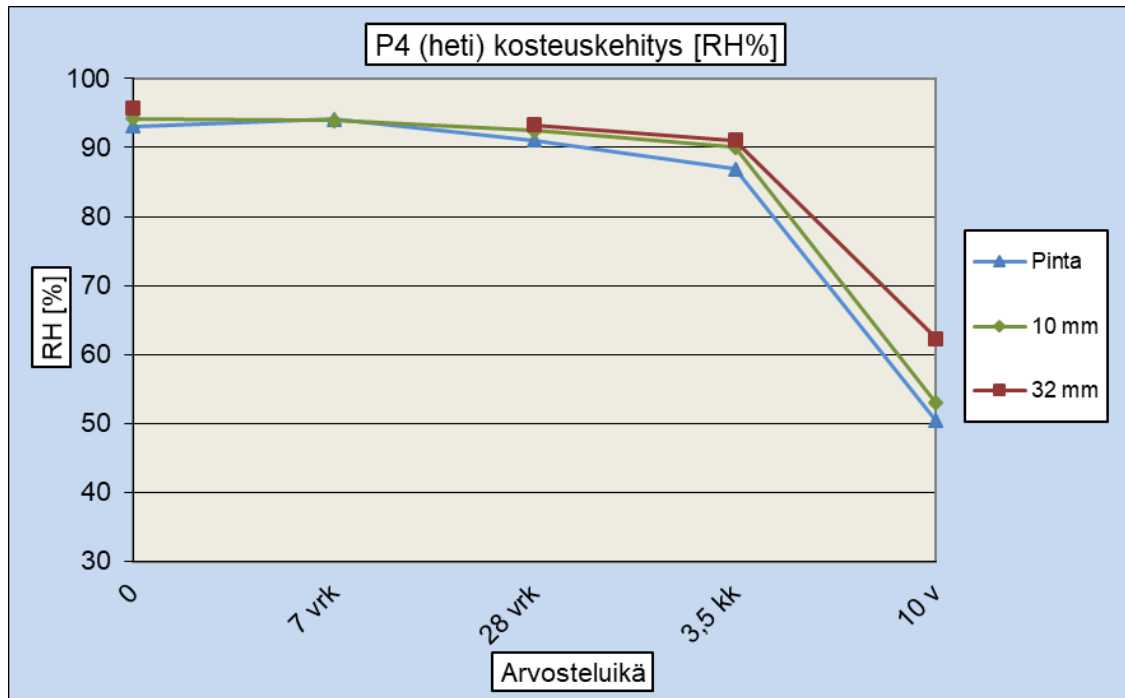


Kuva 9. P3 (heti) painoprosenttikosteuden kehitys 7 vrk iästä alkaen.

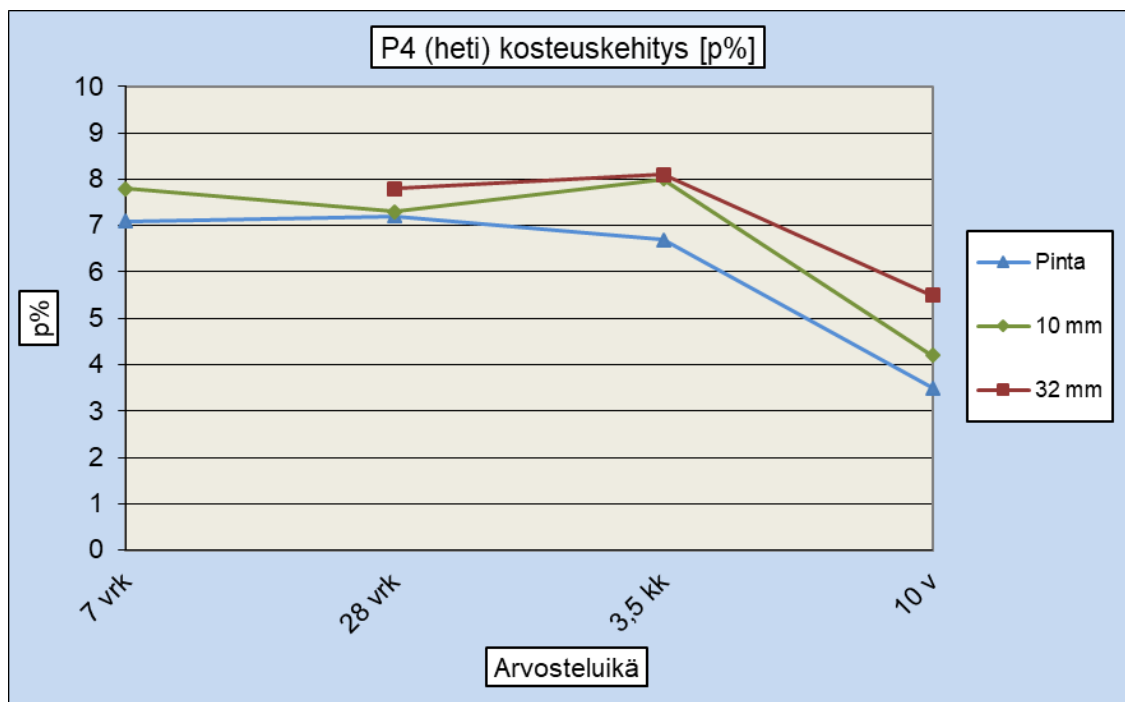
Pinnoiteyhdistelmä P4 (heti)



Kuva 10. Kuvasarja P4 kosteusmittauksista.



Kuva 11. P4 (heti) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen.

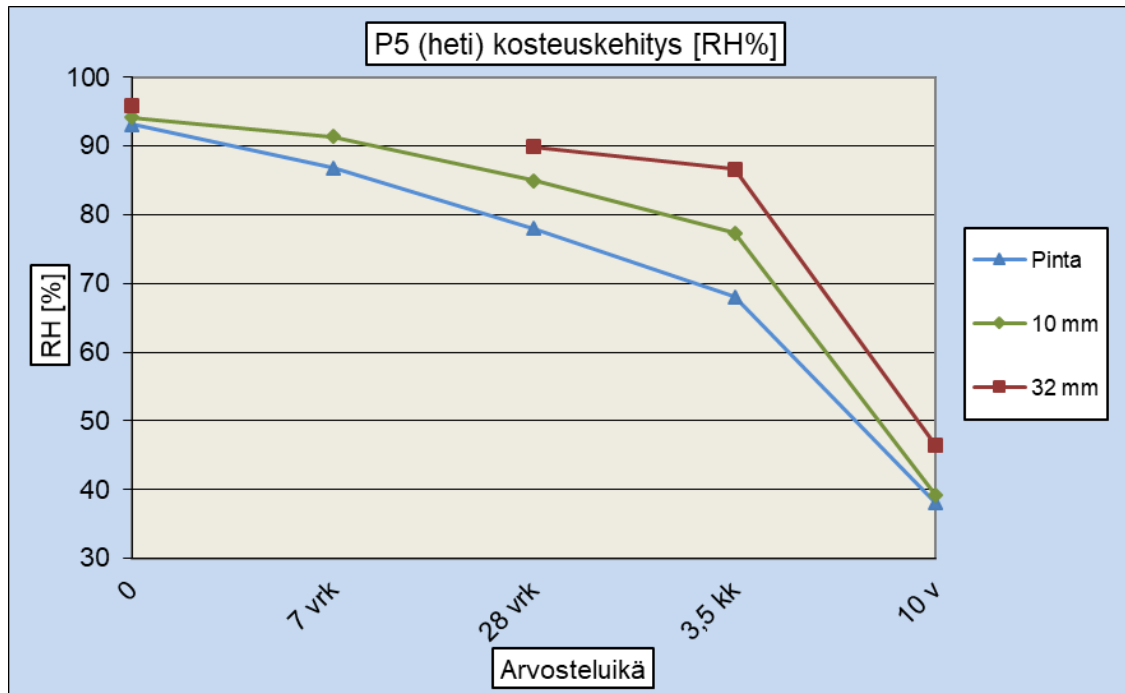


Kuva 12. P4 (heti) painoprosenttikosteuden kehitys 7 vrk iästä alkaen.

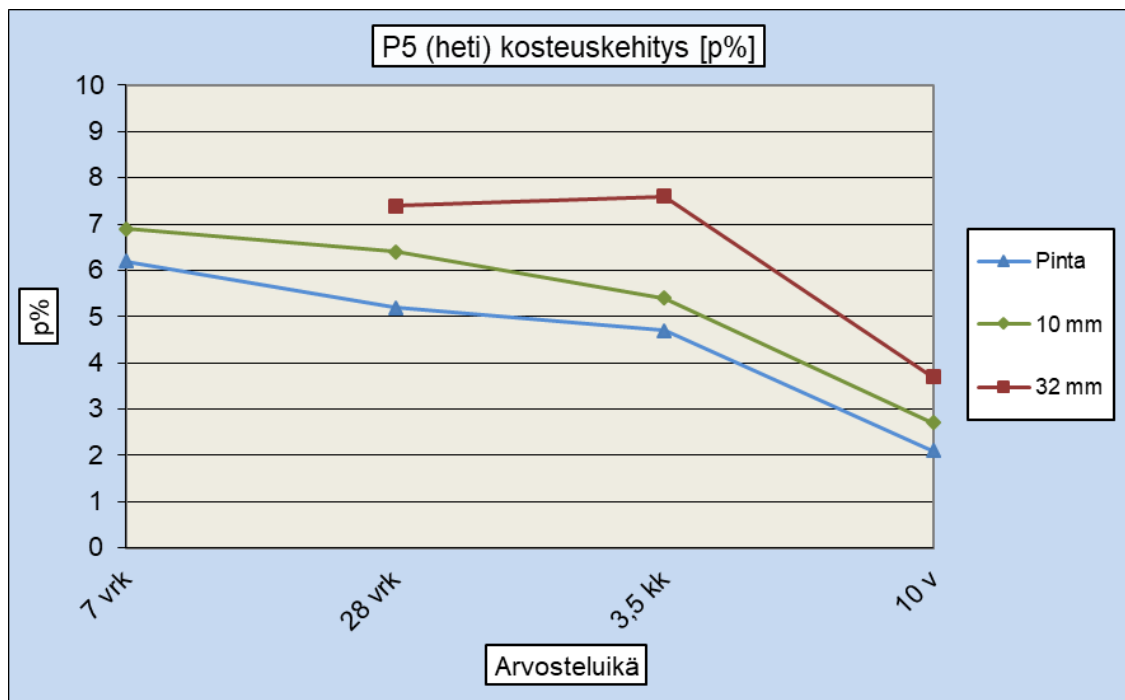
Pinnoiteyhdistelmä P5 (heti)



Kuva 13. Kuvasarja P5 kosteusmittauksista.

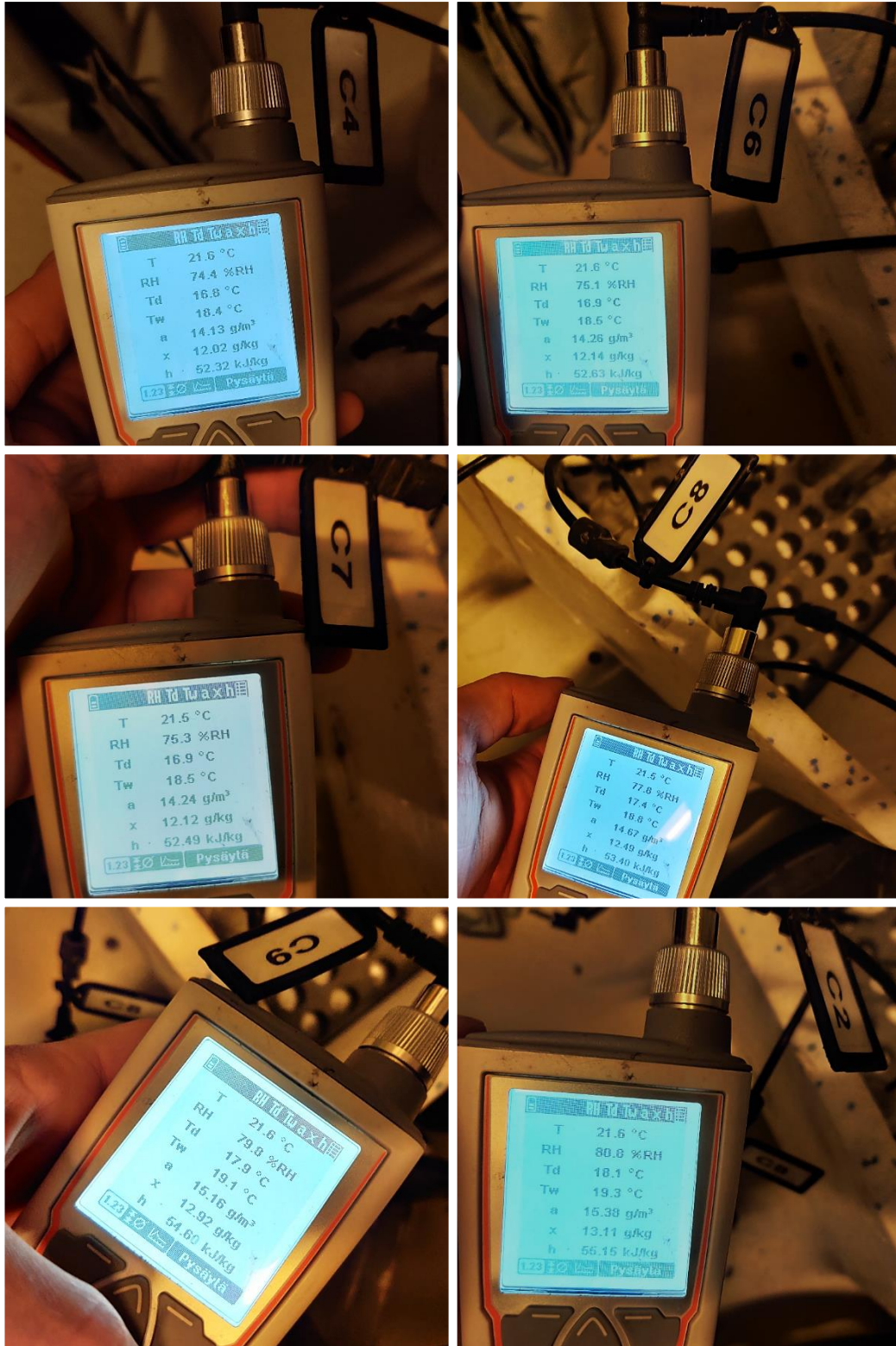


Kuva 14. P5 (hetei) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen.

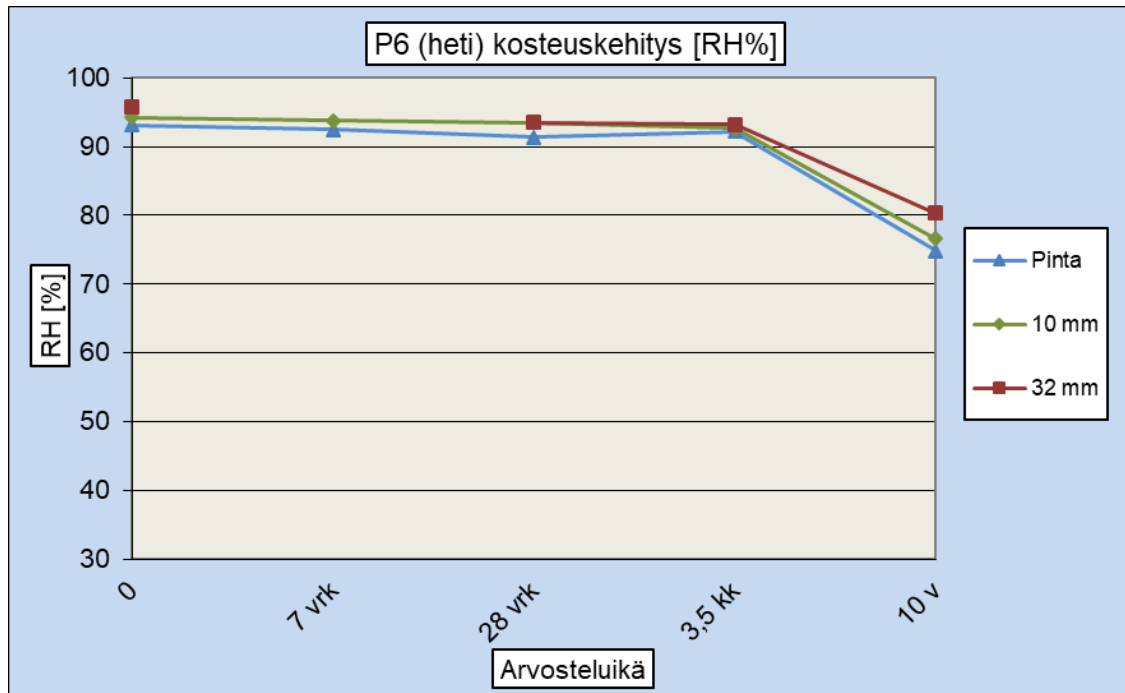


Kuva 15. P5 (hetei) painoprosenttikosteuden kehitys 7 vrk iästä alkaen.

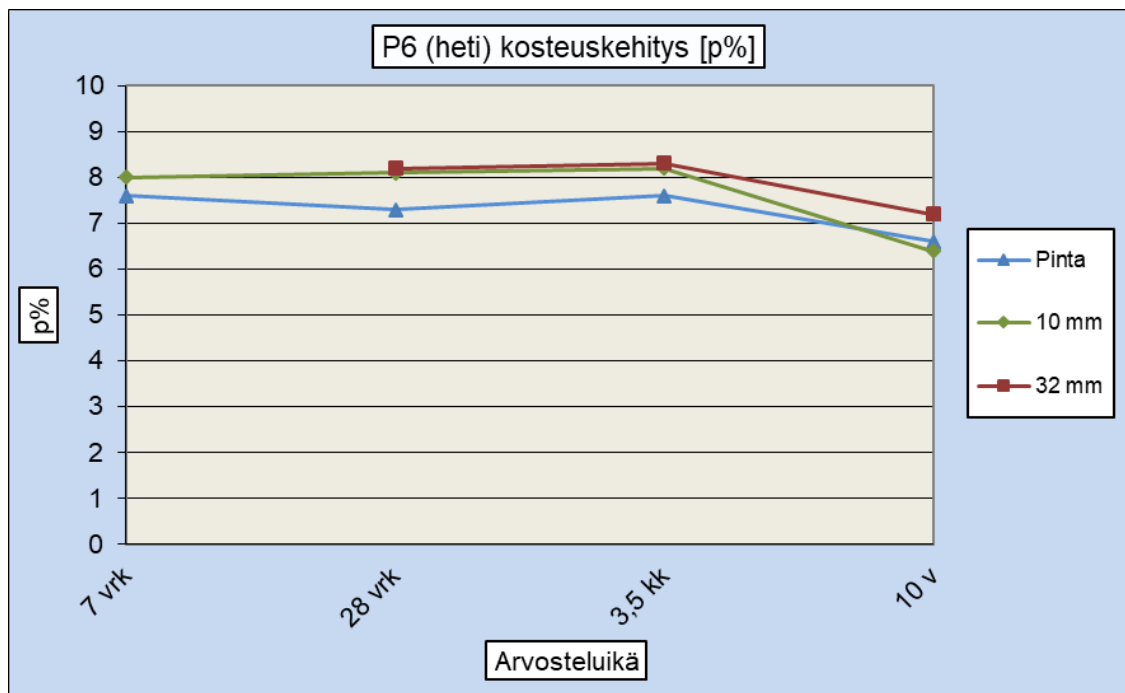
Pinnoiteyhdistelmä P6 (heti)



Kuva 16. Kuvasarja P6 kosteusmittauksista.

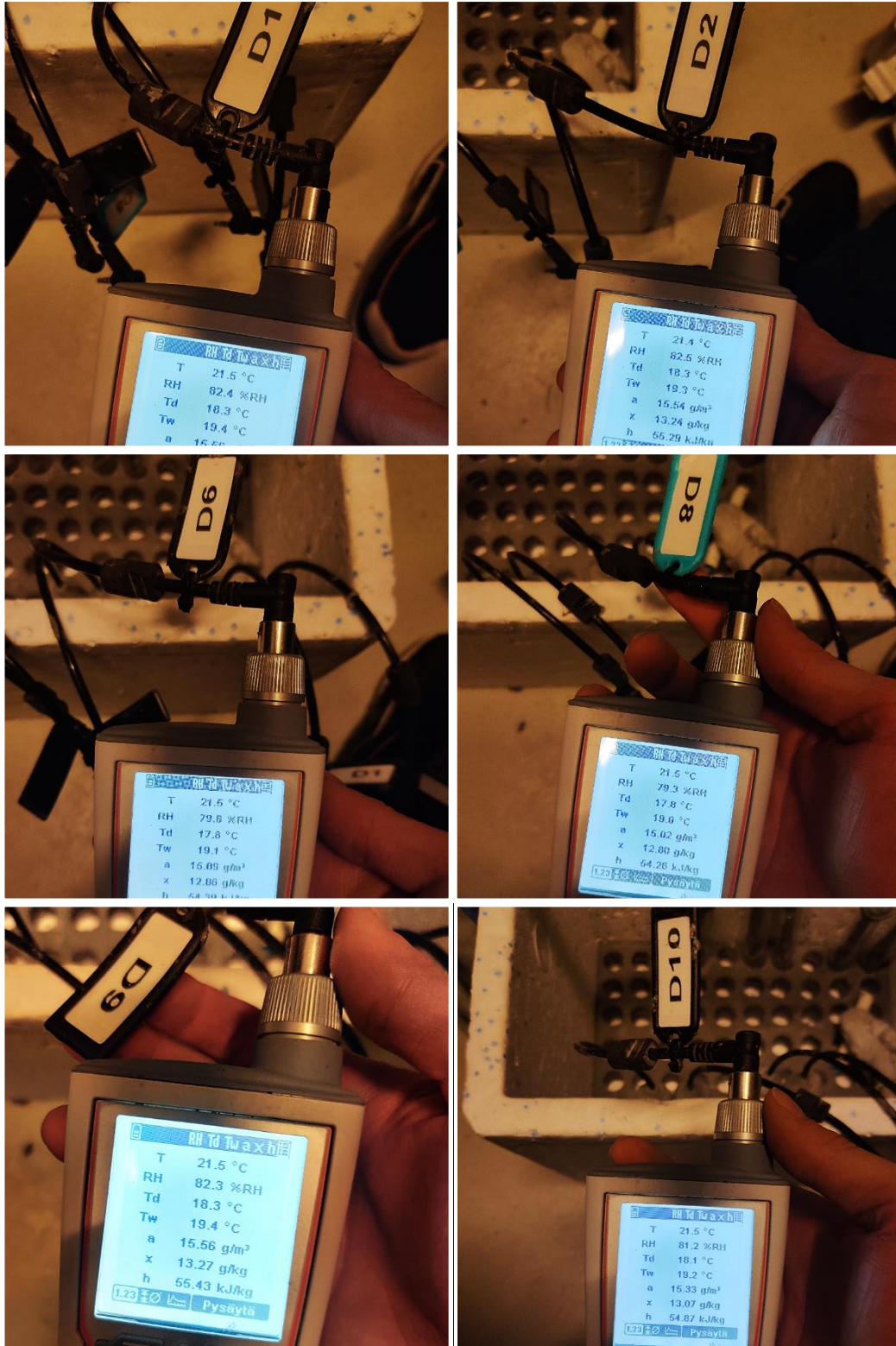


Kuva 17. P6 (heti) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen.

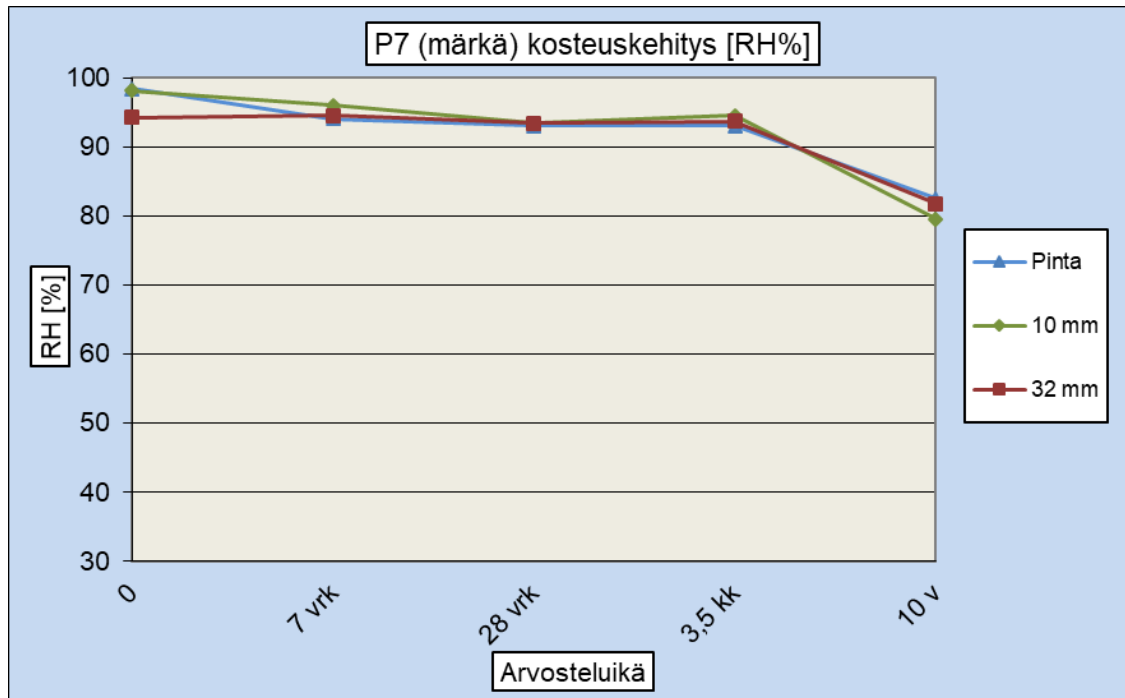


Kuva 18. P6 (heti) painoprosenttikosteuden kehitys 7 vrk iästä alkaen.

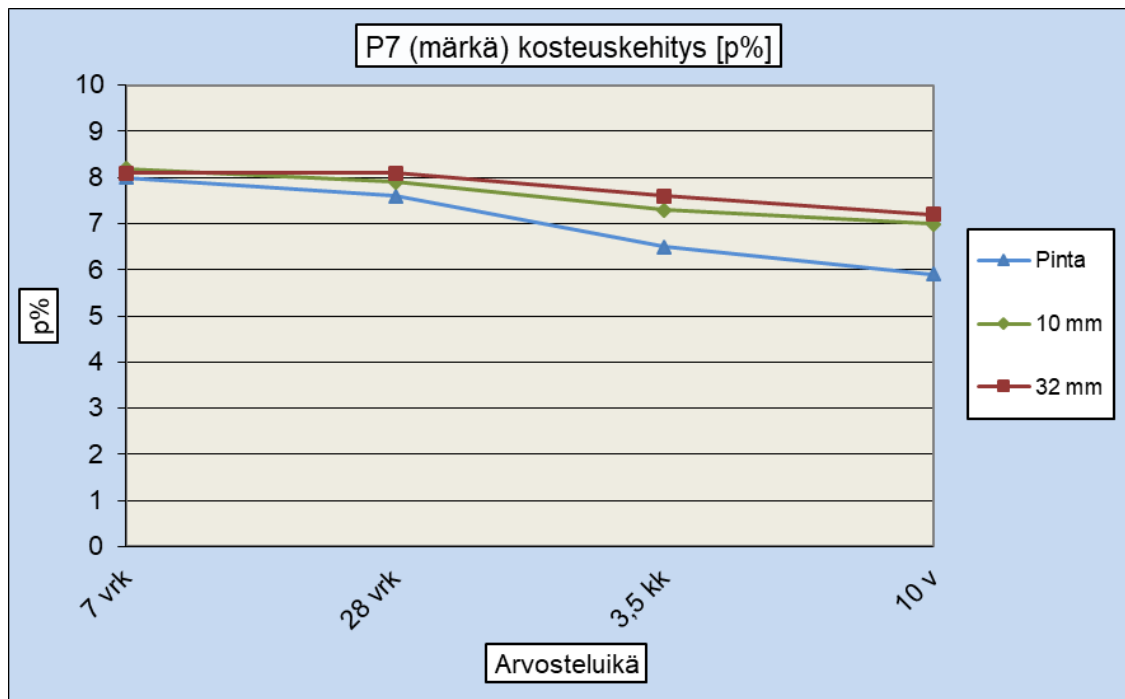
Pinnoiteyhdistelmä P7 (märkä)



Kuva 19. Kuvasarja P7 kosteusmittauksista.



Kuva 20. P7 (märkä) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen.

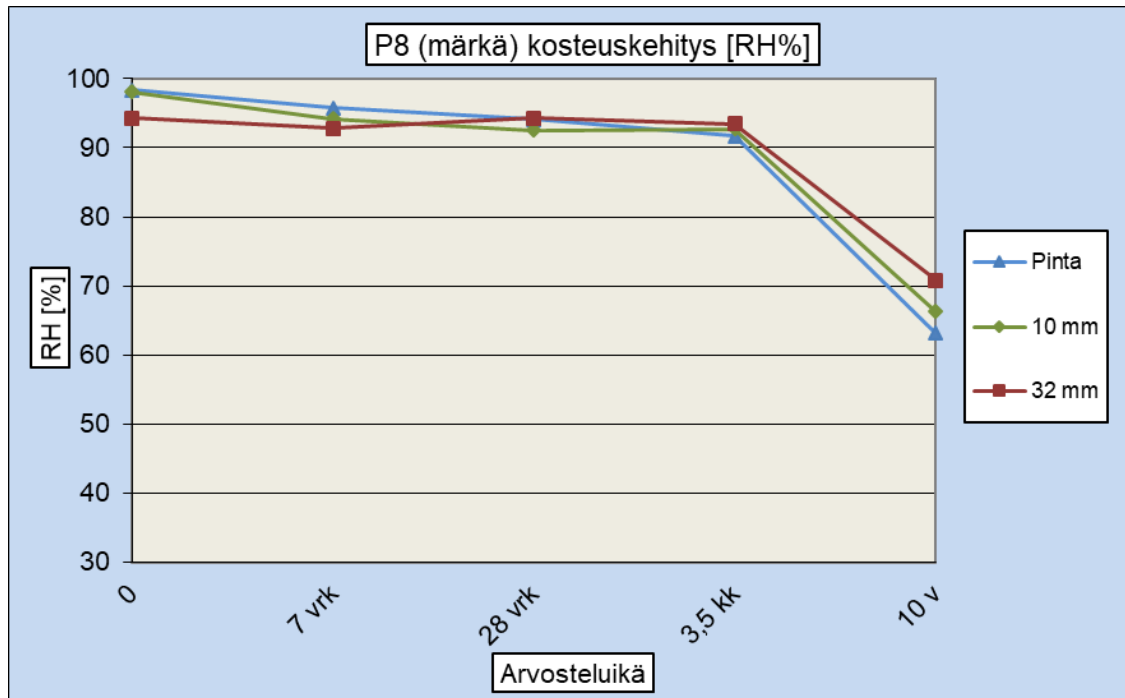


Kuva 21. P7 (märkä) painoprosenttikosteuden kehitys 7 vrk iästä alkaen.

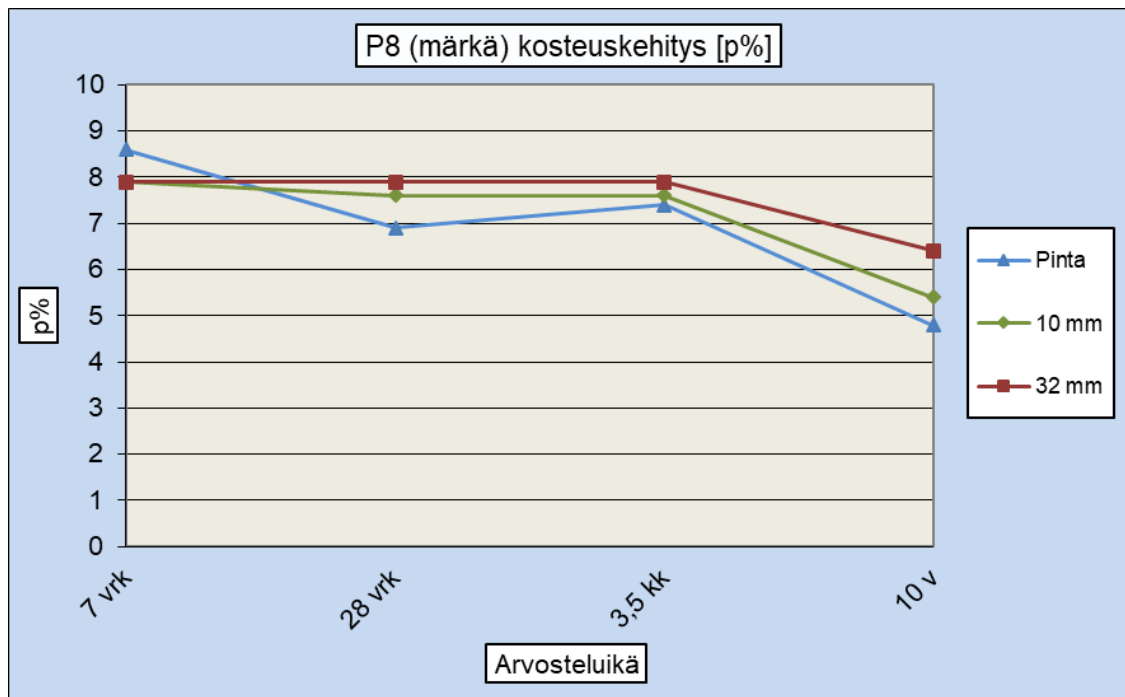
Pinnoiteyhdistelmä P8 (märkä)



Kuva 22. Kuvasarja P8 kosteusmittauksista.



Kuva 23. P8 (märkä) suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä alkaen.

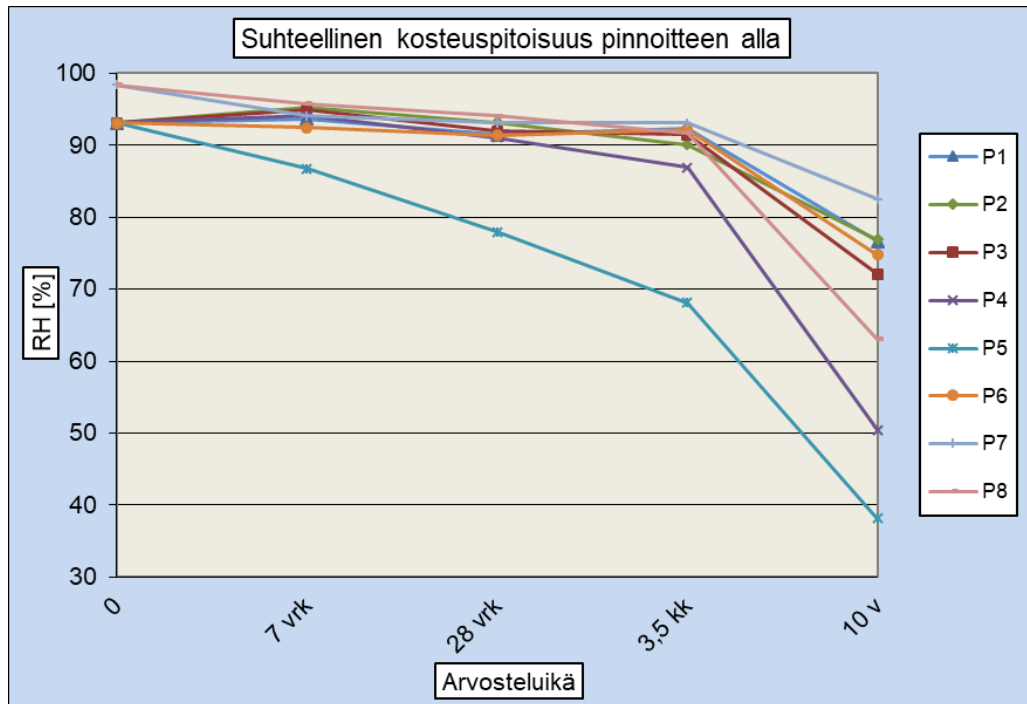


Kuva 24. P8 (märkä) painoprosenttikosteuden kehitys 7 vrk iästä alkaen.

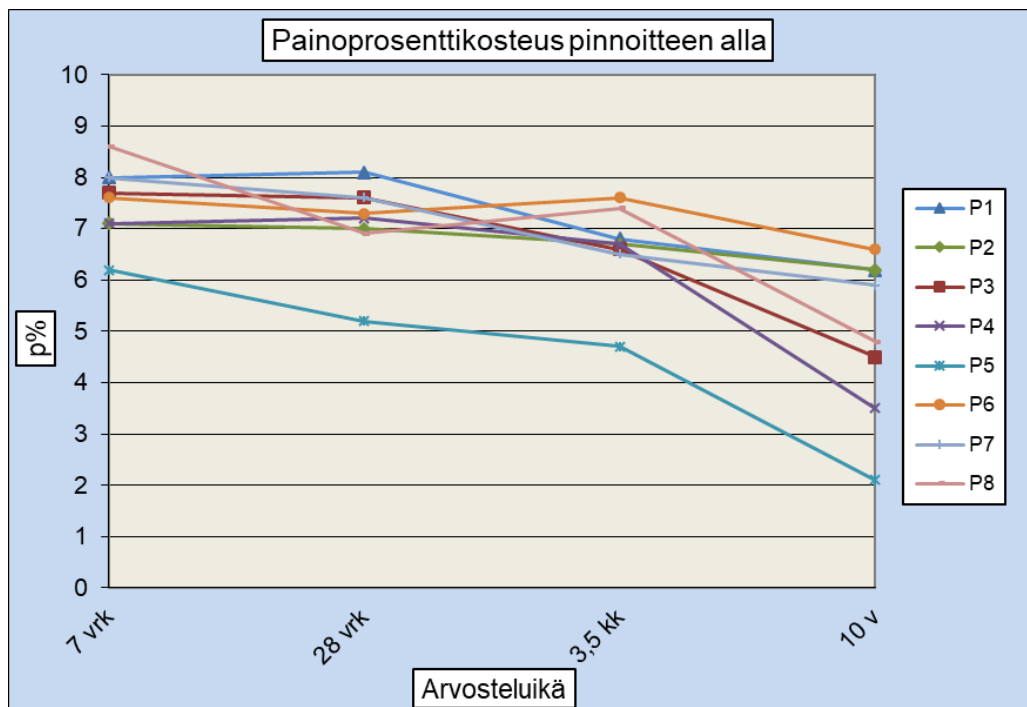
Kosteusmittaukset koottuna kaikki pinnoiteyhdistelmät (P1–P8)

Taulukko 9. Kaikkien pinnoiteyhdistelmien kosteusmittaustulokset syvyyksiltä pinta, 10 mm ja 32 mm. Sininen sarake korostaa vuoden 2020 mittauksia, muut ovat alkuperäisestä tutkimuksesta 7 vrk, 28 vrk ja 3,5 kk iästä.

Pinnoiteyhdistelmä		7 vrk		28 vrk		3,5 kk		10 v	
nro	Syvyys	RH	p-%	RH	p-%	RH	p-%	RH	p-%
P1	Pinta	93,7	8	91,5	8,1	92,4	6,8	76,7	6,2
	10 mm	94,8	7,3	93,1	7,9	93,3	7,9	78,6	6,4
	32 mm			95,2	8,1	94,6	8,5	80,4	7,6
P2	Pinta	95,3	7,1	93,2	7	90,1	6,7	76,9	6,2
	10 mm			94	7,8	92,4	7,8	81,8	6,2
	32 mm			94,5	8,8	92,3	8,9	81,5	7,3
P3	Pinta	94,9	7,7	92	7,6	91,5	6,6	72,1	4,5
	10 mm	94,3	7,9	93,8	7,2	93,7	7,2	74,9	6
	32 mm			93,8	7,7	91,9	7,3	76,7	7
P4	Pinta	94,1	7,1	91,1	7,2	86,9	6,7	50,4	3,5
	10 mm	93,9	7,8	92,4	7,3	90	8	53	4,2
	32 mm			93,3	7,8	91,1	8,1	62,3	5,5
P5	Pinta	86,8	6,2	78	5,2	68,1	4,7	38,1	2,1
	10 mm	91,4	6,9	85	6,4	77,3	5,4	39,2	2,7
	32 mm			89,9	7,4	86,6	7,6	46,4	3,7
P6	Pinta	92,5	7,6	91,4	7,3	92,2	7,6	74,8	6,6
	10 mm	93,8	8	93,5	8,1	92,7	8,2	76,6	6,4
	32 mm			93,5	8,2	93,2	8,3	80,3	7,2
P7	Pinta	94,1	8	93,1	7,6	93,1	6,5	82,5	5,9
	10 mm	96	8,2	93,4	7,9	94,5	7,3	79,6	7
	32 mm	94,5	8,1	93,4	8,1	93,7	7,6	81,8	7,2
P8	Pinta	95,8	8,6	94,1	6,9	91,7	7,4	63,1	4,8
	10 mm	94,2	7,9	92,5	7,6	92,7	7,6	66,3	5,4
	32 mm	92,8	7,9	94,3	7,9	93,5	7,9	70,8	6,4



Kuva 25. Kaikkien pinnoiteyhdistelmien pinnoitteen alapuolisen suhteellisen kosteuspitoisuuden kehitys pinnoitushetkestä eteenpäin.



Kuva 26. Kaikkien pinnoiteyhdistelmien pinnoitteen alapuolisen painoprosenttikosteuden kehitys pinnoitushetkestä eteenpäin.

Tartuntavetolujuustulokset

Taulukoina ja kuvina esitetyt pinnoiteyhdistelmien P1–P8 tartuntavetolujuustulokset ja murtotyypit.

Taulukko 1. Tartuntavetolujuustulokset (N/mm²), murtotyypit ja –syvyydet pinnoiteyhdistelmitäin

Laatta ja ikä	Veto 1			Veto 2			Veto 3			ka
	N/mm ²	Tyyppi	Syvyys	N/mm ²	Tyyppi	Syvyys	N/mm ²	Tyyppi	Syvyys	N/mm ²
41 (P1) 17.12.2019 (Arvostelu-ikä 10 v)	3,277	92 A 8 B/C	pinnoite- 2 mm	3,960	100 A	5–10 mm	3,663	100 A	5–10 mm	3,63
1 (P2) 7.1.2020 (Arvostelu-ikä 10 v)	4,890	100 A	8–10 mm	4,112	25 A 75 B/C	pinnoite- 3 mm	3,980	60 A 40 B/C	pinnoite- 3 mm	4,33
39 (P3) 30.12.2019 (Arvostelu-ikä 10 v)	2,696	80 A 20 B/C	pinnoite- 2 mm	3,165	90 A 10 B/C	pinnoite- 2 mm	3,331	85 A 15 B/C	pinnoite- 2 mm	3,06
6 (P4) 7.1.2020 (Arvostelu-ikä 10 v)	2,593	98 A 2 A/B	pinnoite- 2 mm	2,497	95 A 5 A/B	pinnoite- 2 mm	2,500	98 A 2 A/B	pinnoite- 2 mm	2,53
29 (P5) 7.1.2020 (Arvostelu-ikä 10 v)	2,062	99 A 1 A/B	maali- 2 mm	1,974	99 A 1 A/B	maali- 2 mm	1,933	98 A 2 A/B	maali- 2 mm	1,99
57 (P6) 7.1.2020 (Arvostelu-ikä 10 v)	2,276	85 A 15 A/B	pinnoite- 2 mm	2,713	75 A 25 A/B	pinnoite- 2 mm	2,702	80 A 20 A/B	pinnoite- 2 mm	2,56
60 (P7) 31.12.2019 (Arvostelu-ikä 10 v)	1,499	25 A 75 B/C	pinnoite- 2 mm	2,019	25 A 75 B/C	pinnoite- 2 mm	2,315	20 A 80 B/C	pinnoite- 2 mm	2,06
Lisävedot	2,340	10 A 90 B/C	pinnoite- 2 mm	2,131	10 A 90 B/C	pinnoite- 2 mm				
64 (P8) 31.12.2019 (Arvostelu-ikä 10 v)	2,013	95 A 5 A/B	pinnoite- 2 mm	1,630	95 A 5 A/B	pinnoite- 2 mm	3,181	90 A 8 A/B 2 C/Y	pinnoite- 2 mm	2,30
Lisävedot	2,362	90 A 9 A/B 1 C/Y	pinnoite- 2 mm	2,337	95 A 5 A/B	pinnoite- 2 mm				

Pinnoiteyhdistelmä P1 (heti)

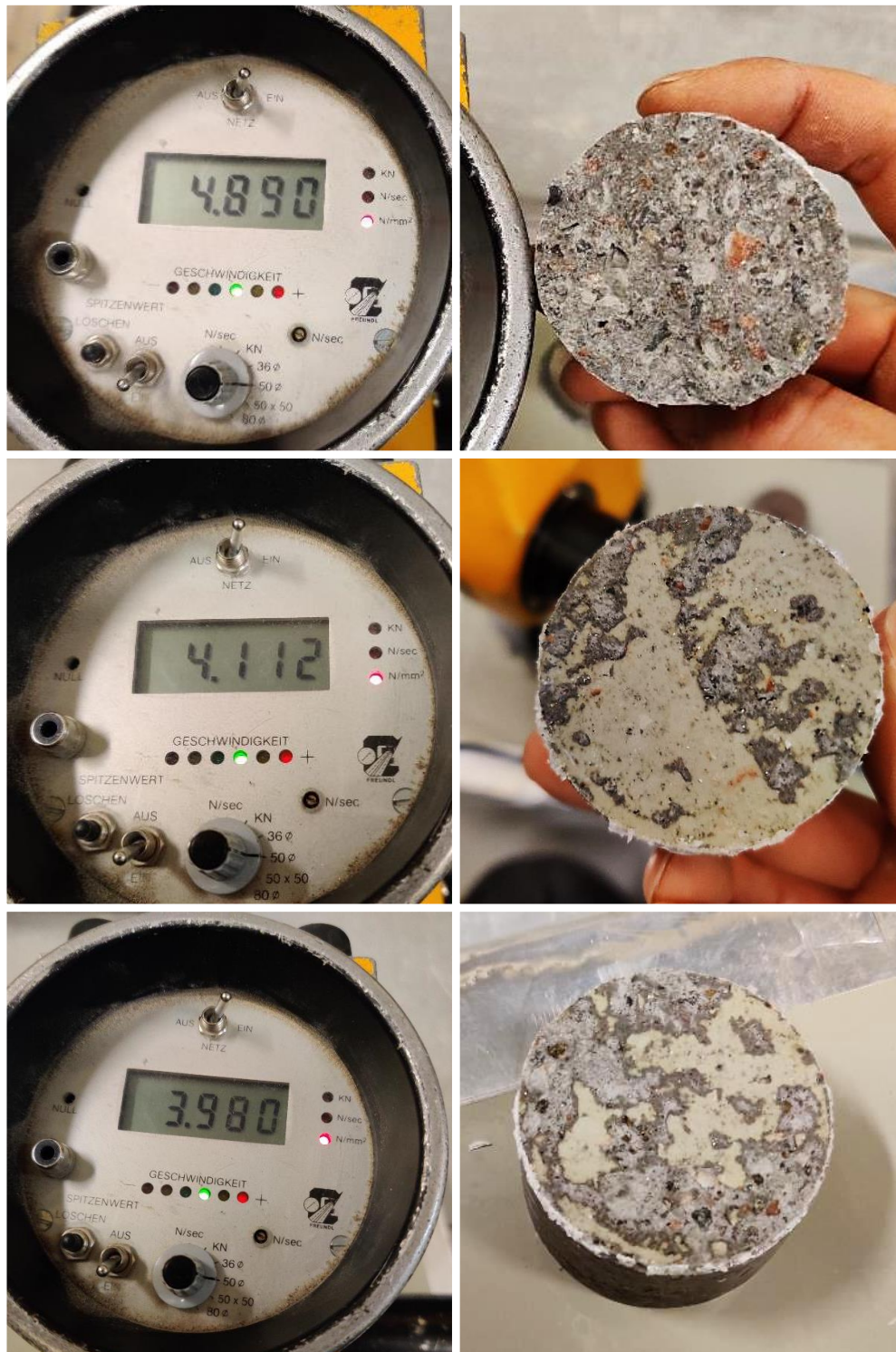


Kuva 1. Kuvasarja P1 tartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.

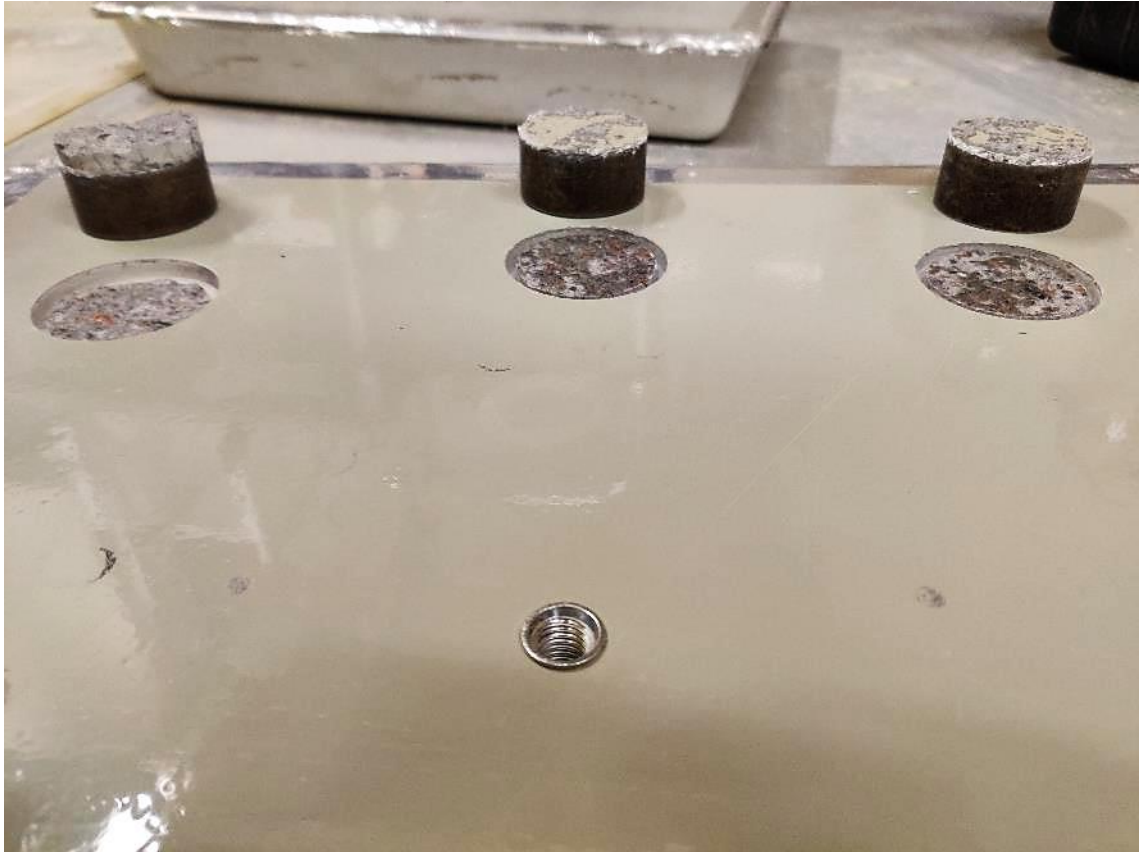


Kuva 2. P1 tartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

Pinnoiteyhdistelmä P2 (heti)



Kuva 3. Kuvasarja P2 tartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.



Kuva 4. P2 tartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

Pinnoiteyhdistelmä P3 (heti)

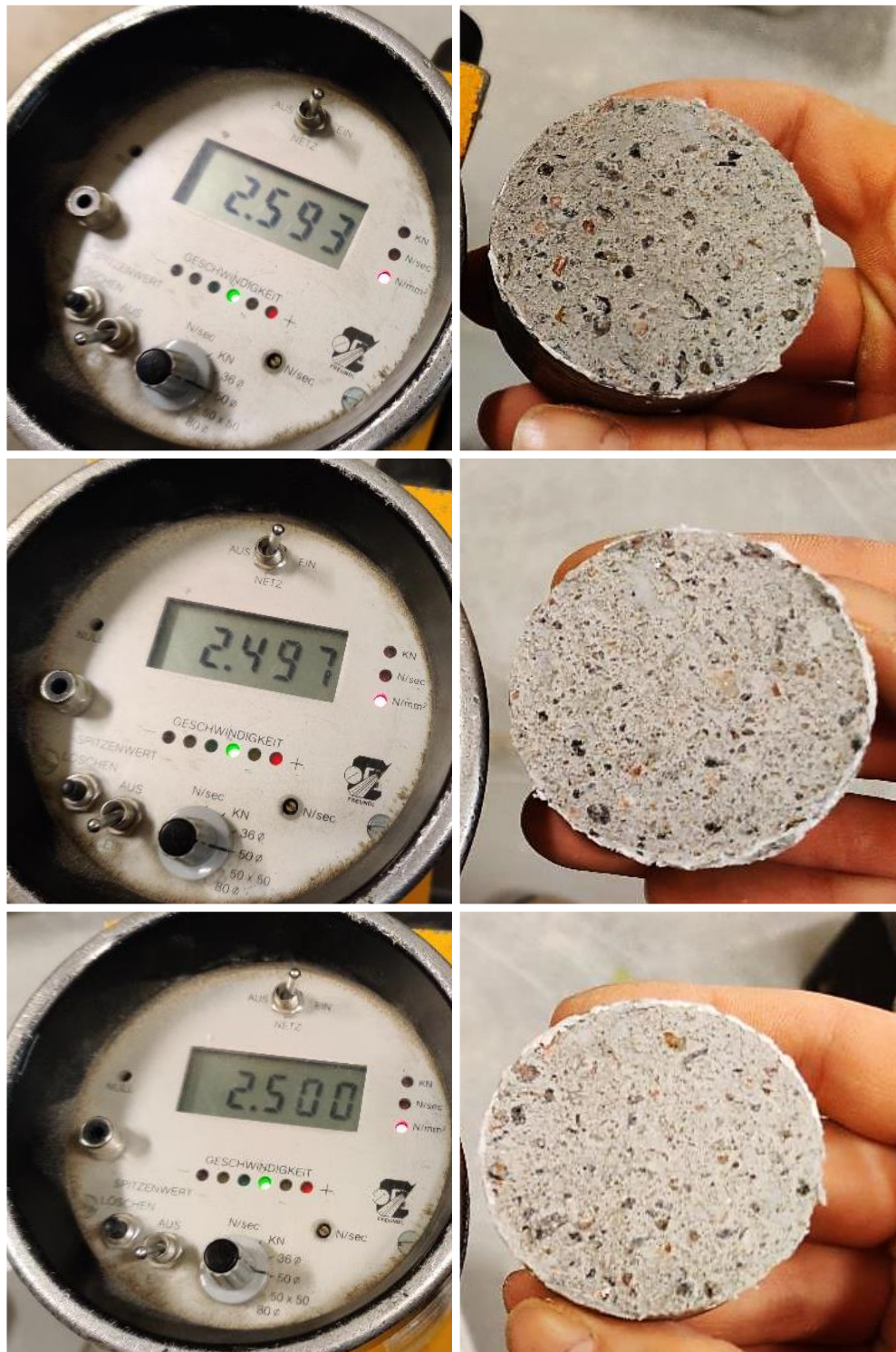


Kuva 5. Kuvasarja P3 tartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.



Kuva 6. P3 tartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

Pinnoiteyhdistelmä P4 (heti)



Kuva 7. Kuvasarja P4 tartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.



Kuva 8. P4 tartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

Pinnoiteyhdistelmä P5 (heti)



Kuva 9. Kuvasarja P5 tartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.

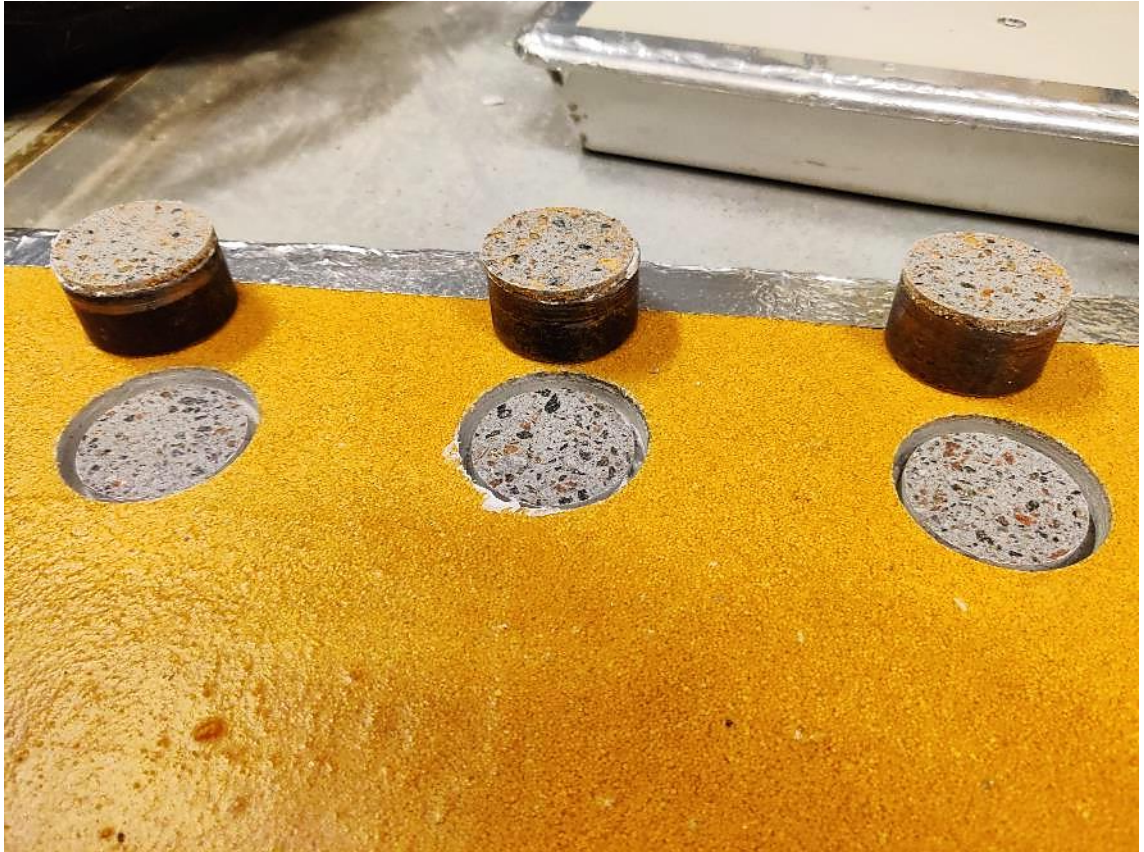


Kuva 10. P5 tartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

Pinnoiteyhdistelmä P6 (heti)



Kuva 11. Kuvasarja P6 tartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.



Kuva 12. P6 tartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

Pinnoiteyhdistelmä P7 (märkä)



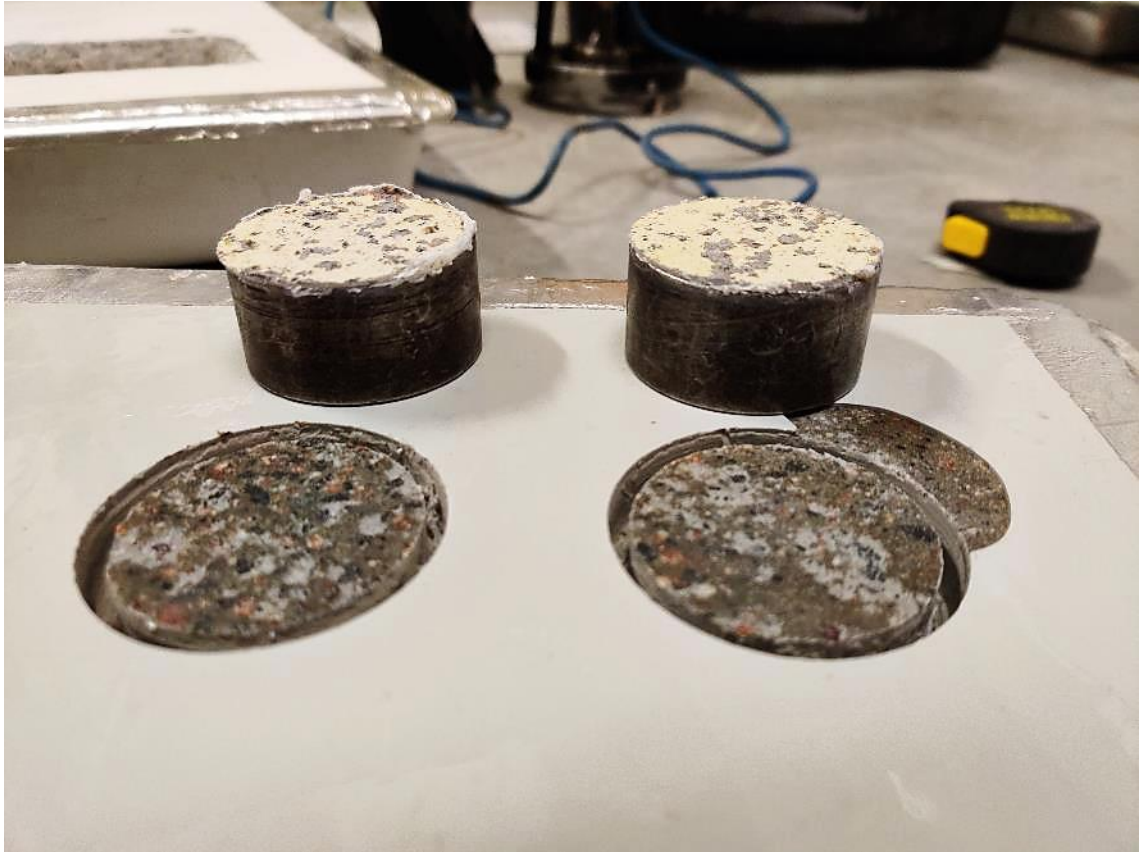
Kuva 13. Kuvasarja P7 tartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.



Kuva 14. P7 tartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

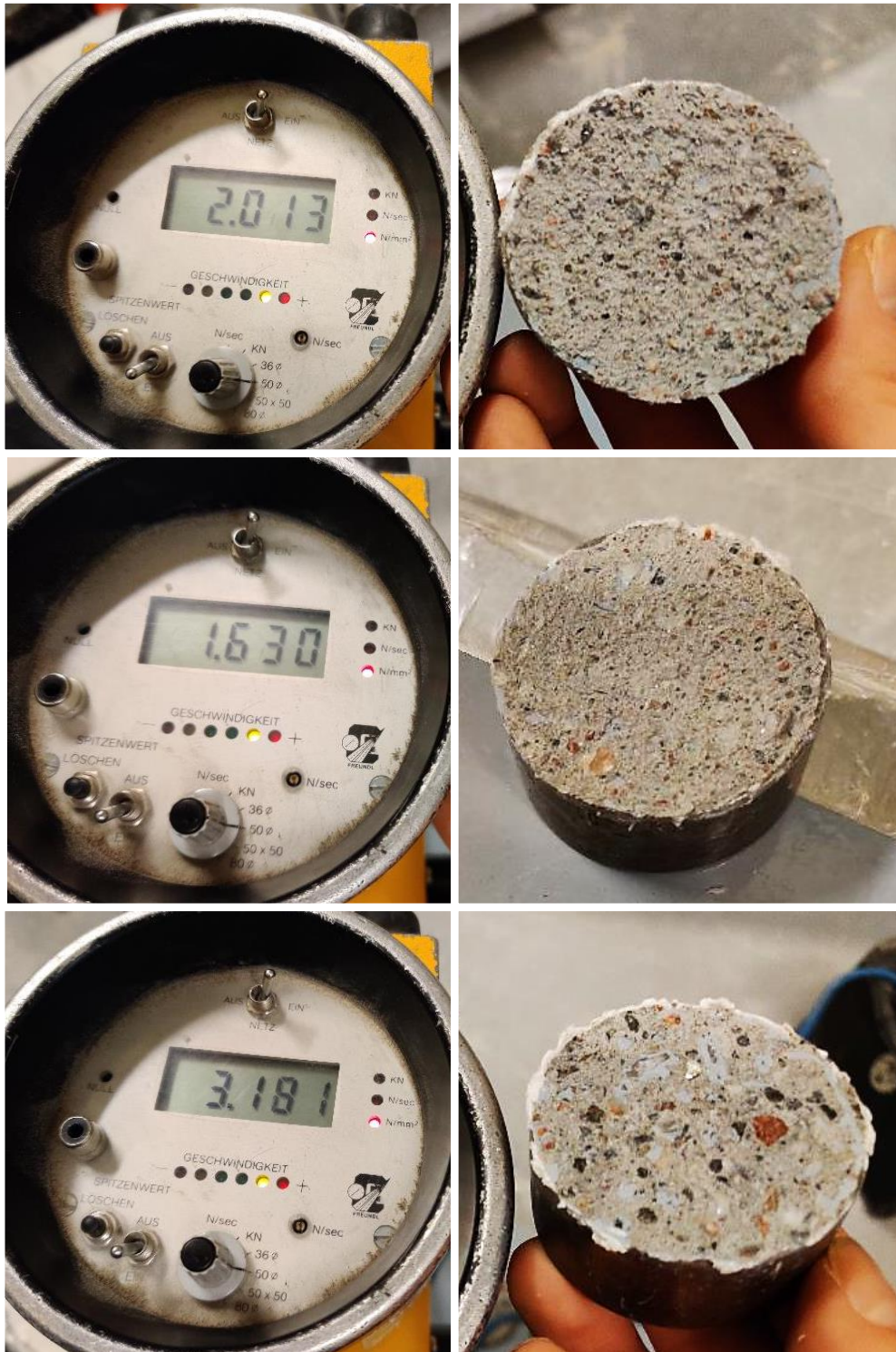


Kuva 15. Kuvasarja P7 lisätartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.



Kuva 16. P7 lisätartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

Pinnoiteyhdistelmä P8 (märkä)



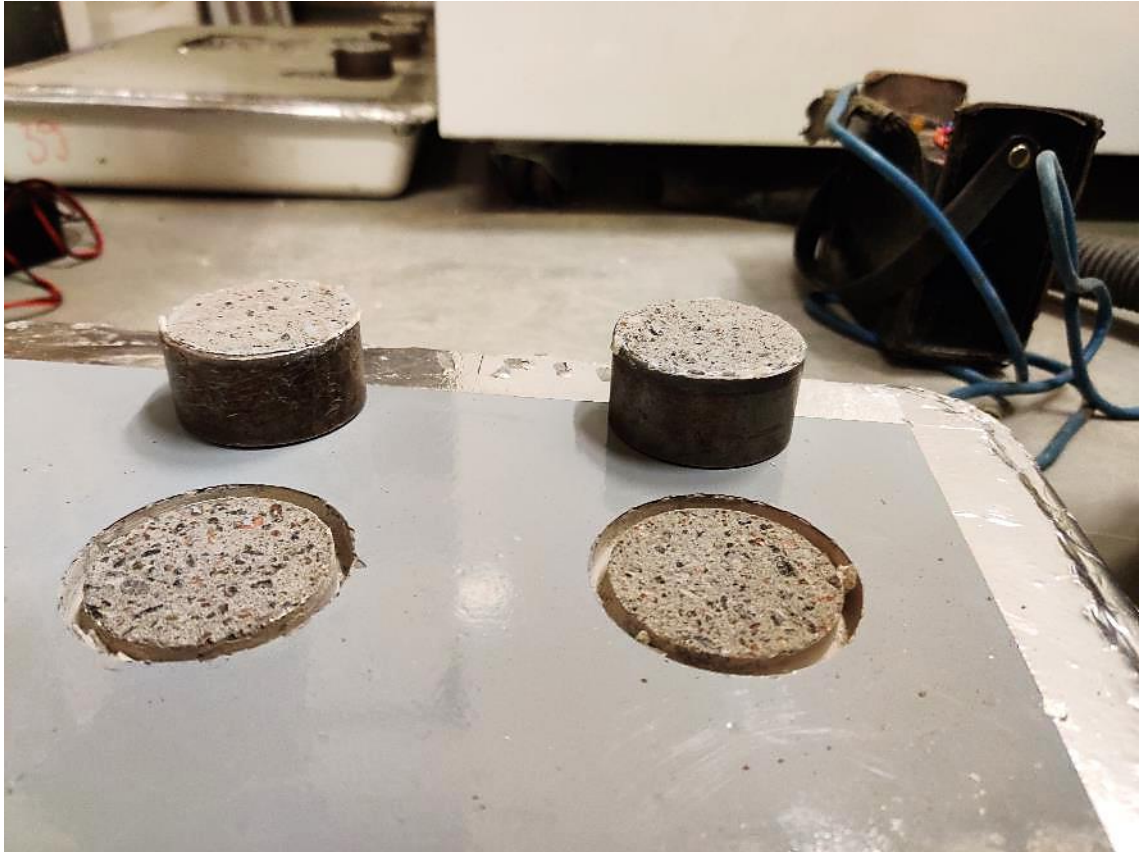
Kuva 17. Kuvasarja P8 tartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.



Kuva 18. P8 tartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.



Kuva 19. Kuvasarja P8 lisätartuntavetolujuustuloksista ja murtokohdista.



Kuva 20. P8 lisätartuntavetolujuuskokeiden vetoalueet ja -napit.

Ohuthie- ja puristuslujuustutkimukset (Tutkimusseloste laboratoriotutkimuksista)

Tutkimusseloste TT 3737

Hermann
Laboratoriotutkimukset

25.03.2020

Tilaajan tiedot

Tilaaaja Vahanen Rakennusfysiikka Oy
 Osoite Linnoitustie 5
 Postinumero 02600
 Postitoimipaikka ESPOO
 Yhteyshenkilön nimi Hermann Latvala
 Yhteyshenkilön puhelin
 Yhteyshenkilön sähköposti

Kohteen tiedot

TT-tunnus 3737
 Nimi Hermann
 Osoite
 Postinumero
 Kaupunki
 Valmistumisvuosi
 Tilauskoodi
 Tilauspäivämäärä 31.1.2020
 Erityishuomiot

Tutkimukset

Tutkimus	Näytetunnukset	Tutkimuksia yht.
Ohuthietutkimus	1A, 29A, 60A	3 kpl
Muita tutkimuksia:	Lisätietoa:	
Puristuslujuuden määrittäminen	8 kpl, näytteistä 1B, 1C, 1D, 1E, 29B, 29C, 60B ja 60C	
Liite 1	Ohuthietutkimusraportti (5 sivua)	
Liite 2	Puristuslujuuden määrittämisraportti (2 sivua)	
Tutkimusraportti liitteineen	10 sivua	

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Tämän tutkimusloston osittainen kopiointi on kielletty ilman Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kirjallista lupaa

Näytteet

#	Tunnus	Rakenneos	Pituus (min)	Pituus (max)	Leveys	Ilmansuunta	Tarkenne
1	1A	betoni	66	71	49		
2	1B	betoni	62	71	49		
3	1C	betoni	66	71	49		
4	29A	betoni	74	75	49		
5	29B	betoni	70	73	49		
6	29C	betoni	74	75	49		
7	60A	betoni	73	74	49		
8	60B	betoni	73	75	49		
9	60C	betoni	70	73	49		
10	1D	betoni	62	64	50		
11	1E	betoni	71	73	50		

Laboratorion yhteyshenkilöt

Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Linnoitustie 5
FI-02600 Espoo
Puhelin: 0207 698 698
Fax: 0207 698 699

Projektinumero

Yhteyshenkilön nimi

Sähköposti

Tilauksen kirjaajan nimi

Sähköposti

Hannu Pyy

hannu.pyy@vahanen.com

Hannu Pyy

hannu.pyy@vahanen.com

Hermann Latvalan opinnäytetyöhön liittyvä ohuthietutkimus

1 Näytteet

Kolme (3) poraamalla irrotettua näytettä, joiden tunnuksot ja irrotuskohdat olivat:

- Näyte 1A: betoni
- Näyte 29A: betoni
- Näyte 60A: betoni

2 Tutkimukset ja tutkimuksen tarkoitus

Tutkimuksen tarkoituksena oli analysoida betoneiden koostumusta, rakennetta sekä sementin hydrataatioastetta ja näiden eroja näytteiden välillä.

Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratoriossa ohuthietutkimuksia varten betoninäytteistä valmistettiin petrografiset ohuthieet näytteiden ulko- tai alapinnan suuntaa vasten kohtisuorassa suunnassa tutkittavasta pinnasta. Ohuthieen koko on 25 mm x 75 mm.

Ohuthietutkimus on akkreditoitu menetelmä. Ohuthieiden preparointi- ja tutkimusmenetelmä on esitetty standardeissa ASTM C856-18a ja NT Build 381. Kiviainekset on luokiteltu Betonin kiviainekset 2018, BY 43 mukaisesti. Ohuthieet tutkittiin Nikon E600 polarisaatio- ja fluoresenssimikroskoopilla.

Tutkimukset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

3 Tulokset

Näyte 1A: betoni

Ohuthie tehtiin näytteen ulkopinnasta noin 68 mm:n syvyydelle (poralierion kokonaispituus noin 65 - 70 mm).

Ulkopinnassa on noin 1 mm:n paksuinen **epoksikerros ja pohjaepoksi / primerkerros**. Tartuntarajapinnat ovat tiiviitä.

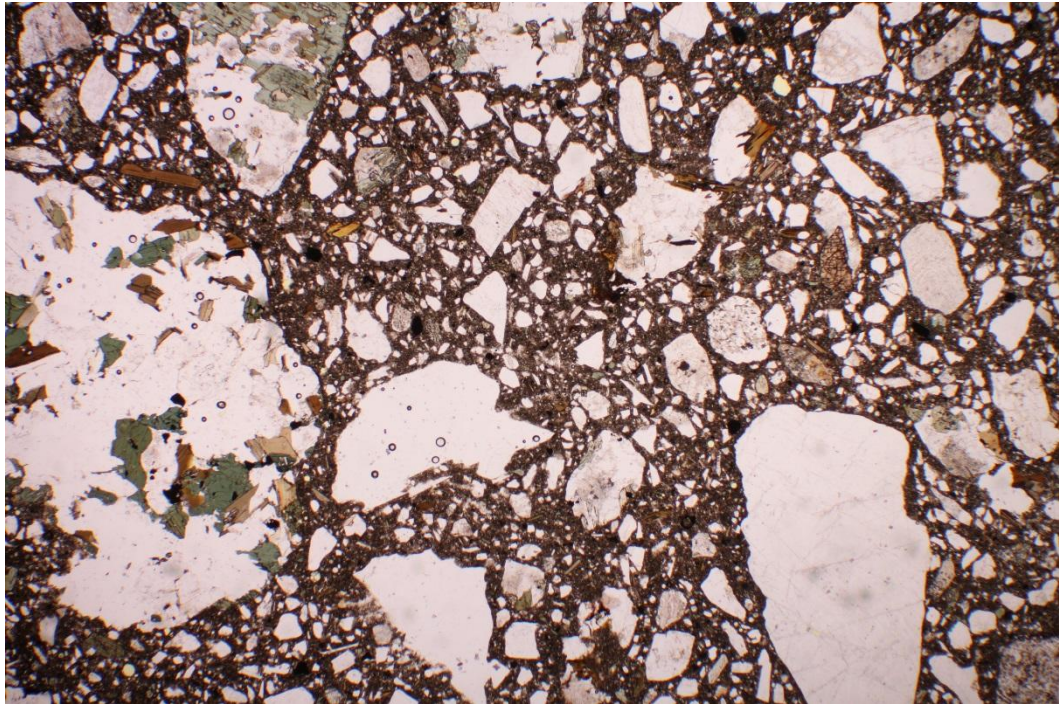
Betoni on homogeenista ja tiivistä (Kuva 1).

Karkea kiviaines on pääosin rapautumatonta graniittista kiveä ja gabroa. Kiviaineksen raemuoto on osittain pyöreä. Suurin raekoko on 6 mm. Hieno kiviaines on pääosin kvartsia ja maasälpää sekä silikaattimineraaleista koostuvia kivilajifragmentteja. Hienon kiviaineksen joukossa on kohtalaisesti, kuitenkin alle 5 % killemineraaleja. Kiviaineksen raekokojakautuma on jatkuva.

Betonin sementtikiven määrä (pasta-%) on tavanomainen. Sideaine on portlandsementtiä, jossa on seosaineena jonkin verran lentotuhkaa. Betonin vesi-sementtisuhte ei voida määrittellä tarkkaan lentotuhkasta johtuen. Sementin hydrataatioaste on melko korkea. Betoni ei ole karbonatisoitunut.

Betoni on huokostamatonta. Tiivistyshuokosia on kohtalaisen vähän melko tasaisesti jakautuneena. Betonin huokosissa ei ole kiteytymiä.

Betonissa on tavanomaista heikkoa kutistumasäröilyä ja paikoitellen vähän kiviainesrakeiden tartuntasäröilyä.



Kuva 1. Näyte 1A. Betonin mikrorakenne. Betoni on homogeenista ja tiivistä. Kiviainesraakeet näkyvät vaaleina ja vaalean kirjavina alueina, sementtikivi tummana matriisina ja huokosilma keltaisena (betonissa ei ilmahuokosia kuvan alalla). Kuvan lyhyt sivu vastaa 7 mm näytteessä.

Näyte 29A: betoni

Ohutie tehtiin näytteen ulkopinnasta noin 74 mm:n syvyydelle (poralierion kokonaispituus noin 74 - 75 mm).

Ulkopinnassa on **organinen tai silikaattimaali**, jonka paksuus on noin 0,1 mm. Tartuntarajapinta on pääosin tiivis.

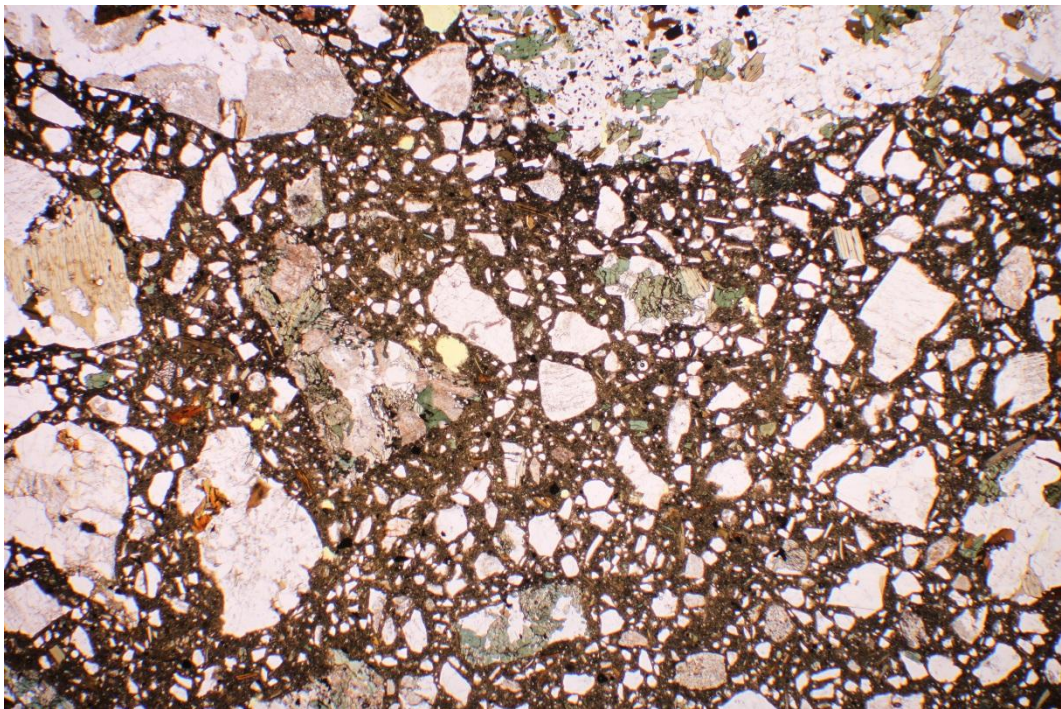
Betoni on melko homogeenista, mutta karkean kiviaineksen jakautuminen on paikoin epätasaista (Kuva 2).

Karkea kiviaines on pääosin rapautumatonta graniittista kiveä ja gabroa. Kiviaineksen raemuoto on osittain pyöreä. Suurin raekoko on 6 mm. Hieno kiviaines on pääosin kvartseja ja maasälpää sekä silikaattimineraaleista koostuvia kivilajifragmentteja. Hienon kiviaineksen joukossa on kohtalaisesti, kuitenkin alle 5 % kiuillemineraaleja. Kiviaineksen raekokojakautuma on jatkuva.

Betonin sementtikiven määrä (pasta-%) on melko suuri. Sideaine on portlandsementtiä, jossa on seosaineena jonkin verran lentotuhkaa. Betonin vesi-sementtisuhteita ei voida määrittää tarkkaan lentotuhkasta johtuen, mutta se on suurehko. Sementin hydrataatioaste on melko korkea. Betoni ei ole karbonatisoitunut.

Betoni on huokostamatonta. Tiivistyshuokosia on kohtalaisen vähän melko tasaisesti jakautuneena. Betonin huokosissa ei ole kiteytymiä.

Betonissa on tavanomaista heikkoa kutistumasäröilyä ja paikoitellen vähän kiviainesrakeiden tartuntasäröilyä.



Kuva 2. Näyte 29A. Betonin mikrorakenne. Betoni on melko homogeenista, mutta karkean kiviaineksen jakautuminen on paikoin epätasaista. Kiviainesrakeet näkyvät vaaleina ja vaalean kirjavana alueina, sementtikivi tummana matriisina ja huokosilma keltaisena. Kuvan lyhyt sivu vastaa 7 mm näytteessä.

Näyte 60A: betoni

Ohutchie tehtiin näytteen ulkopinnasta noin 73 mm:n syvyydelle (poralierion kokonaispituus noin 73 - 74 mm).

Ulkopinnassa on noin 1 mm:n paksuinen **epoksikerros ja pohjaepoksi / primerkerros**. Tartuntarajapinnat ovat tiiviitä.

Betoni on homogeenista ja tiivistä (Kuva 3).

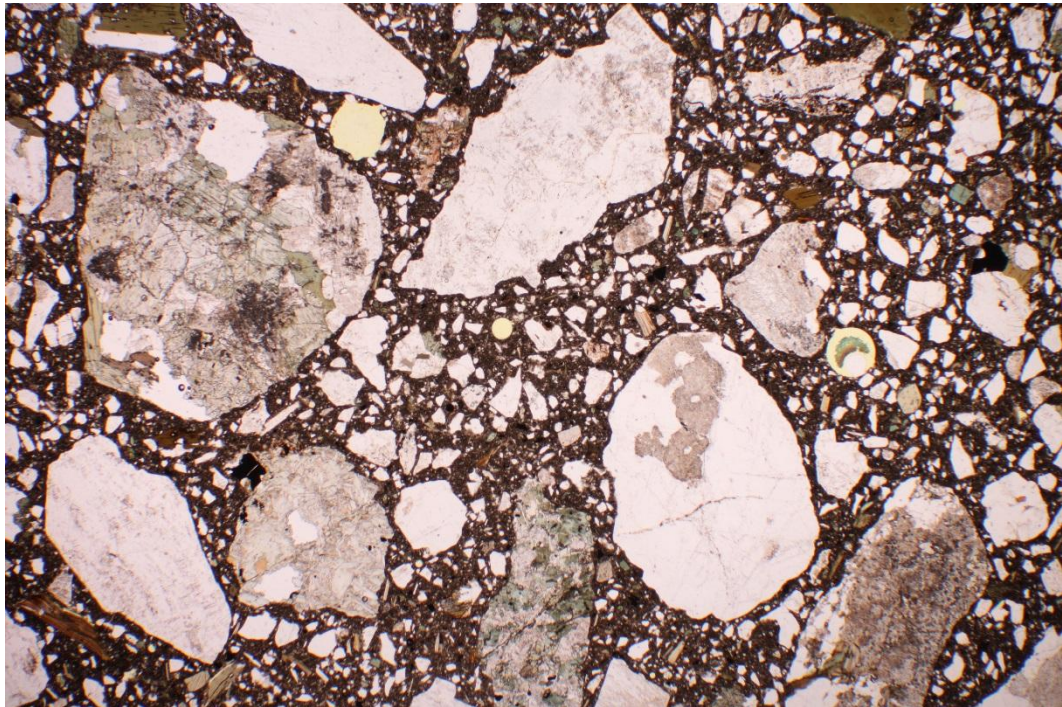
Karkea kiviaines on pääosin rapautumatonta graniittista kiveä ja gabroa. Kiviaineksen raemuoto on osittain pyöreä. Suurin raekoko on 7 mm. Hieno kiviaines on pää-

osin kvartsia ja maasälpää sekä silikaattimineraaleista koostuvia kivilajifragmentteja. Hienon kiviaineksen joukossa on kohtalaisesti, kuitenkin alle 5 % kiillemineraaleja. Kiviaineksen raekokajakautuma on jatkuva.

Betonin sementtikiven määrä (pasta-%) on tavanomainen. Sideaine on portlandsementtiä, jossa on seosaineena jonkin verran lentotuhkaa. Betonin vesi-sementtisuhdetta ei voida määrittellä tarkkaan lentotuhkasta johtuen. Sementin hydrataatioaste on melko korkea.

Betoni on huokostamatonta. Tiivistyshuokosia on kohtalaisesti melko tasaisesti jakautuneena. Betonin huokosissa ei ole kiteytyviä.

Betonissa on tavanomaista heikkoa kutistumasäröilyä ja paikoitellen vähän kiviainesrakeiden tartuntasäröilyä.



Kuva 3. Näyte 60A. Betonin mikrorakenne. Betoni on homogeenista ja tiivistä. Kiviainesraakeet näkyvät vaaleina ja vaalean kirjavina alueina, sementtikivi tummana matriisina ja huokosilma keltaisena. Kuvan lyhyt sivu vastaa 7 mm näytteessä.

4 Tulosten tarkastelu

Ohuthieet tehtiin ulkopinnasta 68 - 74 mm:n syvyydelle.

Näytteiden 1A ja 60A ulkopinnoissa on epoksikerros ja pohjaepoksi / primerkerros. Näytteen 29A ulkopinnassa on orgaaninen tai silikaattimaali.

Näytteiden betonit eivät koostumukseltaan tai rakenteeltaan juurikaan poikenneet toisistaan.

Betonit ovat pääosin homogeenisia ja tiiviitä. Näytteen 29A betoni on melko homogeenista, mutta karkean kiviaineksen jakautuminen on paikoin epätasaista ja sementtikiven määrä (pasta-%) on melko suuri.

Betoninäytteiden sideaine on portlandsementtiä, jossa on seosaineena jonkin verran lentotuhkaa. Betonien vesi-sementtisuhdetta ei voida määrittellä tarkkaan lentotuhkasta johtuen, mutta näytteessä 29A se on suurehko. Näytteiden sementtien hydrataatioasteet ovat melko korkeat eivätkä ne poikenneet toisistaan.

Espoossa 25.3.2020



Sonja Nieminen, Ins AMK
Erityisasiantuntija



Maria Niskanen, FM
Asiantuntija

Vahanen Rakennusfysiikka Oy, Laboratorio on FINAS – akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T328, akkreditointivaatimus SFS-EN ISO/IEC 17025. Akkreditoinnin piiriin kuuluvat petrografinen ohuthieanalyysi ja betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthieistä.

Tämän asiakirjan osittainen kopiointi on kielletty ilman Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n kirjallista lupaa.

Tilaaaja: Vahanen Rakennusfysiikka Oy
Projekti: HAL891
Hermannin Latvala

Tilaus: 31.1.2020

Tekijä: Vahanen Rakennusfysiikka Oy, Linnoitustie 5, 02600 Espoo
Jere Pylkkänen
Laborantti
Puh: 044 7788 644
Jere.Pylkkanen@vahanen.com

SFS-EN 12504-1 Betonin testaus rakenteista. Osa 1: Poratut koekappaleet

Näytetiedot

Näytteiden toimitus	Tilaaaja toimitti, 8 kpl lieriöitä
Näytetunnukset ja koekappaleiden tiedot	ks. taulukko 1
Testauspäivät	11.2.2020, lisänäytteet 1D ja 1E 6.3.2020
Kohde	Hermannin

Toimenpiteet laboratoriossa ja testaus

Koekappaleiden päät sahattiin ja hiottiin siten, että korkeuden ja halkaisijan suhde oli 1:1.

Koekappaleet säilytettiin laboratorio-olosuhteissa 3 vuorokautta ennen koestusta (standardin SFS-EN 13971 mukainen suositus).

Koekappaleiden tiheys määritettiin käyttäen kappaleiden massan ja mittojen arvoja. Tiheysmäärittäminen tehtiin standardin SFS-EN 12390-7 mukaisesti.

Lieriöiden pinnalta havaittuna betonin runkoaineen maksimiraekoko oli 4 - 7 mm.

Mahdolliset poikkeamat standardimenetelmästä tai poikkeamat koekappaleiden mitoissa tai koekappaleissa betoniteräksiä tms.: Näytteissä 1B – 1E havaittiin lieriöpinnassa valuharventumia.

Puristuslujuudet määritettiin standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti. Määrittäminen tehtiin Vahanen Rakennusfysiikka Oy:n laboratorion Form + Test Alpha 3-3000 AR -laitteella. Laite on kalibroitu 31.10.2019, kalibroitodistus EUFI-29-19005454-K1.

Testaustulokset näytteistä on esitetty taulukossa 1.

9.3.2020

Tulokset

Taulukko 1. Koekappaleiden puristuslujuudet.

Tunnus	b) Mitat, muoto (mm)	Tiheys (kg/m ³)	Murtokuorma (kN)	Puristuslujuus (N/mm ²)	a) Kuutiolujuus (MN/m ²)
1B	L 49x48	2268	113,8	60,4	66,4
1C	L 49x49	2269	79,5	42,2	46,4
1D	L 50x50	2246	107,0	54,5	59,9
1E	L 50x50	2244	117,2	59,7	65,7
29B	L 49x50	2229	97,1	51,5	56,6
29C	L 49x50	2217	92,2	48,9	53,8
60B	L 49x50	2269	133,4	70,7	77,8
60C	L 49x49	2285	131,4	69,7	76,7

a) Puristuslujuustulokset on muunnettu 150 mm särmäisten kuutioiden puristuslujuudeksi Betoninormien By 65 2016 kohdan 5.2.3.2 mukaisesti.

b) Mitat: Lieriönäytteissä (L) Ø x h.

Espoossa 9.3.2020

Vahanan Rakennusfysiikka Oy



Jere Pylkkänen
Laborantti



Juha Lehto
Asiantuntija

Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille.

Tämän asiakirjan osittainen kopiointi on kielletty ilman Vahanan Rakennusfysiikka Oy:n kirjallista lupaa.