

Sari Rouvali

Epoksi-silaanipinnoitteen mekaaniset ominaisuudet ja puhdistettavuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka

Insinöörityö

16.5.2016

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Sari Rouvali Epoksi-silaanipinnoitteen mekaaniset ominaisuudet ja puhdistettavuus 39 sivua + 5 liitettä 16.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaaja(t)	Lehtori Arto Yli-Pentti Tutkija Juha Nikkola
<p>Työn tarkoituksena oli tutkia epoksinpinnoitteen ja epoksi-silaanipinnoitteen mekaanisia ominaisuuksia ja puhdistettavuutta. Epoksi-silaanipinnoite on epäorgaanis-organinen yhdistelmäpinnoite, jolla voidaan teoriassa parantaa useita tavanomaisen pinnoitteen funktionaalisia ominaisuuksia, kuten vetolujuutta, sitkeyttä, naarmunkestävyyttä ja kemikaalinkestävyyttä. Teräksen suojaamiseen epoksi-silaania on käytetty jo vuosia sen hyvien ominaisuuksien ansiosta.</p> <p>Tutkittavista tuoteversioista kaksi oli epoksituotteita, kaksi epoksi-silaanituotteita ja kaksi näiden yhdistelmiä. Neljälle tuoteversiolle tehtiin kolmetoista testiä, jotka olivat ominaispainon mittaaminen kuulalla, viskositeetin määrittäminen cone & plate -viskosimetrillä, käyttöajan määrittäminen, kiillon määrittäminen, kuivumisajan määrittäminen kuivumisaikalaitteella, kovuuden määrittäminen, tarttuvuuden arviointi vetokokeella, kulutuskestävyys, iskunkestävyys, taivutuslujuus, puristuslujuus, puhdistettavuus ja kemikaalinkesto. Yhdistelmäversioille tehtiin näistä kolmestatoista testistä kolme testiä, jotka olivat tarttuvuuden arviointi vetokokeella, kulutuskestävyys ja iskunkestävyys. Kolmella testillä mitattiin määrän maalin ominaisuuksia ja kymmenellä muulla testillä mitattiin kuivan maalipinnan ominaisuuksia.</p> <p>Kaikkien testien perusteella tutkittavat tuoteversiot eivät eronneet ominaisuuksiltaan kovinkaan paljon toisistaan, vaikka epoksinpinnoitteet vaikuttivat olevan parempia kuin epoksi-silaanipinnoitteet. Kaikki testimenetelmät huomioiden heikoimmin testeistä suoriutui epoksi-silaanimaalia sisältävä tuote. Yksittäisten testimenetelmien tulokset osoittivat kuitenkin, että esimerkiksi nopeaa kuivumista vaativien tuotteiden kehittämisessä epoksi-silaanipohjaiset tuoteversiot näyttäisivät soveltuvan paremmin kuin epoksinpohjaiset tuoteversiot. Taivutus- ja puristuslujuutta vaativien tuotteiden kehittämisessä epoksinpohjaiset tuotteet sen sijaan näyttäisivät olevan parempia kuin epoksi-silaanipohjaiset tuoteversiot.</p>	
Avainsanat	Epoksi-silaani, epoksi, mekaaniset ominaisuudet

Author(s) Title	Sari Rouvali Mechanical Properties and Cleanability of Epoxy Silane Coating
Number of Pages Date	39 pages + 5 appendices 16 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Materials Technology and Surface Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Arto Yli-Pentti, Senior Lecturer Juha Nikkola, Research Chemist
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to examine the mechanical properties and cleanability of epoxy coatings and epoxy silane coatings. The epoxy silane coating is an organic inorganic composite coating which can in theory enhance the functional properties of several conventional coatings, such as tensile strength, toughness, scratch resistance and chemical resistance. Epoxy silane has been used for many years for protecting steel due to its good properties.</p> <p>The following product versions were examined: two epoxy products, two epoxy silane products and two of these combinations. Thirteen tests were executed on four different product versions. The following properties were tested: determination of density, viscosity, Pot-life, gloss, drying time, hardness, abrasion resistance, and flexural and compressive strength as well. Furthermore, the tests included pull-off tests for adhesion, impact resistance, cleanability and chemical resistance. The pull-off tests for adhesion, determination of abrasion resistance and impact resistance were executed on combination versions. The properties of the wet paint were measured by three tests and in addition, ten tests were used to measure the properties of dry paint surface.</p> <p>It was discovered that there were very little differences between the properties, although epoxy coatings seemed to be better than epoxy silane coatings. However, the product including epoxy silane paint managed worst in the tests when all test methods were considered. Nonetheless, the results of the individual test methods indicated that when fast drying products are developed, those based on epoxy silane are more suitable for product development than products based on epoxy. When developing products which require flexural and compressive strength, it was discovered that epoxy-based products achieved better results than those based on epoxy silane.</p>	
Keywords	Epoxy silane, epoxy, mechanical properties

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Betonilattian vaatimuksia pintakäsittelylle	2
2.1	Pinnoituksen tarkoitus	2
2.2	Betonilattian esikäsitteily ja pinnoitus	3
3	Lattiapinnoituksessa käytettäviä tuotteita	5
3.1	Epoksi	5
3.2	Polyuretaani	6
3.3	Polyurea	7
3.4	Akryyli	8
4	Epoksi-silaani	9
5	Koesuunnitelma ja testausmenetelmät	12
5.1	Koesuunnitelma	12
5.2	Nestemäisten tuotteiden testaus	13
5.3	Kuivuminen ja kovettuminen	14
5.3.1	Heilurikovuus	14
5.3.2	Kuivuminen	15
5.3.3	Kiilto	16
5.4	Mekaaniset ominaisuudet	16
5.4.1	Kulutuskestävyys	16
5.4.2	Kiinnitarttuvuus	18
5.4.3	Iskunkestävyys	19
5.4.4	Taivutuslujuus	20
5.4.5	Puristuslujuus	22
5.5	Puhdistettavuus	23
5.6	Kemikaalinkesto	24
6	Tutkimustulokset ja niiden tarkastelu	26
6.1	Nestemäisten tuotteiden testaus	26

6.2	Heilurikovuus	27
6.3	Kuivuminen ja kiilto	28
6.4	Kulutuskestävyys	29
6.5	Kiinnitarttuvuus	30
6.6	Iskunkestävyys	31
6.7	Taivutuslujuus	31
6.8	Puristuslujuus	32
6.9	Puhdistettavuus	33
6.10	Kemikaalinkesto	34
7	Yhteenveto	35
8	Johtopäätökset	37
	Lähteet	38
	Liitteet	
	Liite 1. Heilurikovuuden mittaustulokset	
	Liite 2. Kiillon mittaustulokset	
	Liite 3. Kulutuskestävyyden tulokset ja kuivakalvonpaksuudet	
	Liite 4. Taivutuslujuuskappaleiden mitat ja tulokset	
	Liite 5. Puristuslujuuskappaleiden mitat ja tulokset	

Lyhenteet ja määritelmät

Alifaattinen	Orgaaninen molekyyli, joka ei sisällä bentseenirengasta.
Aromaattinen	Orgaaninen molekyyli, joka sisältää bentseenirenkaan.
b	Näytteen leveys, mm
F	Voima, N
GLYMO	3-Glysidyloksipropyltrimetoksisilaani. Bifunktionaalinen organosilaani
h	Näytteen korkeus, mm
ICI	<i>Cone & Plate Viscometer</i> . Viskositeetin määrittäminen
L	Taivutuspisteiden väli, mm
MMA	Metyylimetakrylaatti
Monomeeri	Molekyyli, joka voi sitoutua kemiallisesti toisiin monomeereihin muodostaen polymeerin.
Peittaus	Esikäsittelymenetelmä, jossa hapon vaikutuksesta sementti-liima liukenee voimakkaasti kuohuen.
PMMA	Polymetyylimetakrylaatti
UV-säteily	<i>Ultraviolet</i> . Ultraviolettisäteilyn aallonpituus on alle 400 nm, joka on näkyvän valon aallonpituutta lyhyempää.
VOC	<i>Volatile organic compound</i> . Haihtuva orgaaninen yhdiste
WFT	<i>Wet film thickness</i> . Märkäkalvonpaksuus

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja oli Tikkurila Oyj:n tutkimus- ja tuotekehitysyksikkö. Tikkurila on toiminut 154 vuoden ajan Vantaan Tikkurilassa. Yritys aloitti toimintansa vuonna 1862 öljynpuristamona, ja vuonna 1919 aloitettiin ensimmäisten maalien ja lakkojen valmistus sekä niiden laajamittainen markkinointi. Tutkimus- ja tuotekehitysyksikön tehtävänä on kehittää tuotteita kuluttajille, ammattilaisille ja teollisuudelle erilaisiin käyttökohteisiin. Lisäksi yksikön tehtävänä on tutkia vaihtoehtoisten ja uusiutuvien raaka-aineiden käyttöä sekä parantaa maalien ja pinnoitteiden käyttöominaisuuksia. Raaka-aineiden valintaan vaikuttavat ensisijaisesti niiden terveys-, turvallisuus- ja ympäristönäkökohdat. Suurimmat tuotekehitysyksiköt sijaitsevat Suomessa, Ruotsissa, Venäjällä ja Puolassa. Tikkurilalla on toimintaa 16 maassa, tuotantoa kymmenessä maassa ja tuotteita on saatavilla kaikkiaan noin 40 maassa. Tikkurilan kauppa- ja rakennusmaalit ovat markkinajohtajia Pohjoismaissa ja Venäjällä. Yritys listautui Helsingin pörssiin vuonna 2010. [1.]

Tässä insinööriyössä tutkittiin epoksi-silaanipinnoitteen mekaanisia ominaisuuksia ja puhdistettavuutta. Epoksi-silaania on käytetty teräksen suojaamisessa jo vuosia, ja tässä työssä tutkittiin sen vaikutusta lattiapinnoitteiden ominaisuuksiin. Epoksi-silaani on epäorgaanis-orgaaninen yhdistelmäpinnoite, joka parantaa laajalla alueella monifunktionaalisia ominaisuuksia, kuten vetolujuutta, sitkeyttä, naarmunkestävyyttä ja kemikaalinkestävyyttä. [2.]

Työn tarkoituksena oli tehdä esiselvitys markkinoilla olevista epoksi-silaanituotteista ja verrata näiden ominaisuuksia käytössä oleviin lattiatuotteisiin. Kokeista saatujen tuloksien perusteella pystytään arvioimaan oman tuotteen kehittämistä.

Työn kirjallisuusosassa kerrotaan, mitä vaatimuksia betonilattialla on pintakäsittelylle, mitä esikäsittelevaihtoehtoja on olemassa sekä betonilattian pinnoituksesta. Työssä kerrotaan myös yleisemmin käytetyistä tuotteista lattiapinnoituksessa sekä epoksi-silaanista. Testejä tehtiin kaikkiaan kolmesta, joista kolmella testillä mitattiin märän maalin ominaisuuksia ja kymmenellä muulla testillä mitattiin kuivan maalipinnan ominaisuuksia.

2 Betonilattian vaatimuksia pintakäsittelylle

2.1 Pinnoituksen tarkoitus

Betoni on eniten käytetty rakennusmateriaali maailmassa, mikä johtuu sen raaka-aineiden hyvästä saatavuudesta, yksinkertaisesta valmistusteknologiasta sekä sen hyvistä ominaisuuksista. Näitä ovat lujuus, jäykkyys, kosteuden kesto, paloturvallisuus, muokattavuus ja edullinen hinta. Betonin käyttökohteita ovat mm. rakennuksien runkorakenteet, tunnelit, sillat ja muokattavuutensa ansiosta mm. julkisivut ja pihakivet. [3.]

Teollisuudessa betonin käyttö lattiamateriaalina vaatii hyvää mekaanista ja kemiallista kestävyyttä. Ilman oikeanlaista pintakäsittelyä betonilattia ei kestä kulutusta, vaan saattaa heikentyä jo lyhyessä ajassa. Työhygienian kannalta lattian pölyäminen tulee estää ja lattian pitää olla helposti puhdistettavissa. Oikeanlaisella pintakäsittelyllä lattialle saadaan hyvä kulumiskestävyys, saadaan parannettua kemiallista ja mekaanista kestävyttä sekä estetään erilaisten likojen imeytyminen betoniin. Myös työturvallisuuden kannalta pintakäsittelyllä voidaan vaikuttaa lattian liukkauteen, antistaattisuuteen ja värimalmaan. [4, s. 4.] Kuvassa 1 on esitetty betonilattian käyttökohde teollisuudessa.



Kuva 1. Betonia käytetään paljon lattiamateriaalina teollisuudessa. [5.]

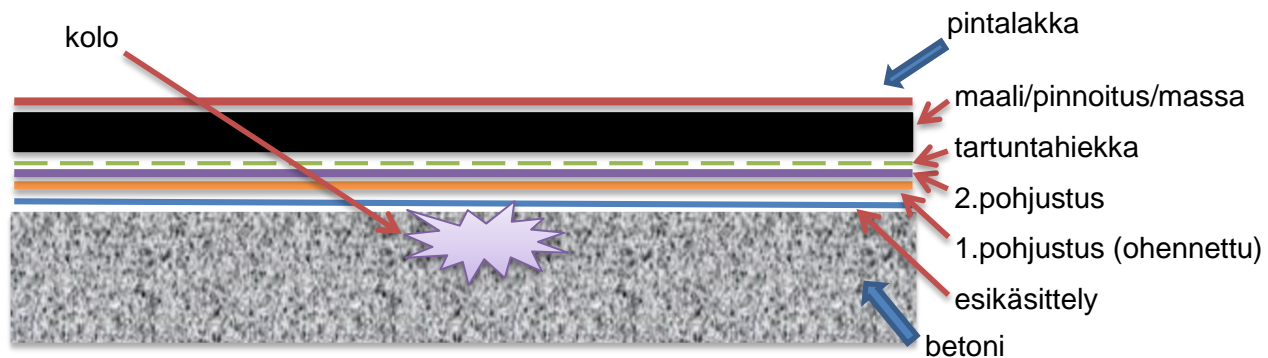
Teollisuuden lisäksi betonilattioiden käyttökohteita ovat julkiset tilat, kuten koulut, sairaalat, kauppakeskukset ja liikerakennukset sekä erilaiset toimistotilat. Julkisten tilojen lattioiden on kestävä kovaa kulutusta ja niiden olisi hyvä olla helposti puhdistettavia. Liikerakennuksien lattioiden on kestävä myös kovaa kulutusta, hyvin kosteutta ja erilaisia kemikaaleja sekä oltava turvallisia ja akustisesti miellyttäviä. [6.]

2.2 Betonilattian esikäsitteleminen ja pinnoitus

Ennen pintakäsittelyn aloittamista vanhasta lattiasta on hyvä selvittää sen ikä, kosteuspitoisuus, pintalujuus, mahdolliset aikaisemmat pinnoitteet, esteettiset vaatimukset sekä siihen kohdistuvat rasitukset. Näiden selvityksien perusteella pystytään valitsemaan oikea esikäsittelemismenetelmä sekä pintakäsittelyyn käytettävä tuote. Betonilattian kunto vaikuttaa valittavaan esikäsittelemismenetelmään. Jotkut lattiat ovat vain pinnalta likaisia, kun taas toisiin on saattanut imeytyä rasvoja tai jopa rapautua kemikaalien vaikutuksesta. [4, s. 6.]

Betonilattian esikäsittelemismenetelmiä ovat hionta, liekki-, suihku- ja sinkopuhdistus, jyrshintä sekä peittäminen. Sementtiliiman poistoon käytetyin menetelmä on hionta, mutta myös peittäminen on nopea ja helppo tapa. Lattian puhdistukseen käytetään suihku- ja sinkopuhallusta, joista sinkopuhallusta voidaan käyttää tuotannon ollessa käynnissä, koska menetelmä on pölytön ja hiljainen. Jyrshintä käytetään vanhojen paksujen pinnoitteiden poistoon. [4, s. 8–11.]

Mekaanisen ja kemiallisen rasituksen perusteella valitaan joko maalaus, pinnoitus tai massaus. Massapinnoitteet tulevat kysymykseen silloin kun lattiaan kohdistuu voimakasta kemiallista ja mekaanista rasitusta. Massoilla saadaan aikaan pinnoite, jolla on myös hyvä iskunkestävyys ja, joka kestää suuria lämmönvaihteluita. [4, s. 8–11.] Kuvassa 2 esitetään pinnoitusjärjestelmän rakenne.



Kuva 2. Pinnoitusjärjestelmän rakenne. [7.]

Pinnoitusjärjestelmän rakenne on kuvattu kuvassa 2 betonista ylöspäin. Rakenteet ovat betoni, esikäsitelty pinta, 1. ohentamalla pohjustettu pinta, 2. pohjustettu pinta, tartuntahiekoitettu pinta, maali-, pinnoitus- tai massapinta, lakattu pinta. Betonin pinnoitus voidaan tehdä seuraavasti:

- Aluksi betoni puhdistetaan liasta ja pölystä.
- Tämän jälkeen poistetaan sementtiliima tai vanha pinnoite sopivalla esikäsitelymenetelmällä.
- Ensimmäinen pohjustuskerros levitetään ohennettuna, jolla varmistetaan hyvä tunkeutuminen alustaan.
- Paikataan mahdolliset kolot, esimerkiksi epoksilakan ja hiekan seoksella.
- Toinen pohjustuskerros levitetään ohentamattomana, jolla varmistetaan, että pinta saadaan tiiviiksi.
- Sirotellaan mahdollinen tartuntahiekka, jolla varmistetaan tiettyjen tuotteiden hyvä tartunta.
- Levitetään maali, pinnoitus tai massa.
- Lopuksi levitetään pintalakka, joka antaa lattialle lopulliset ominaisuudet. [7.]

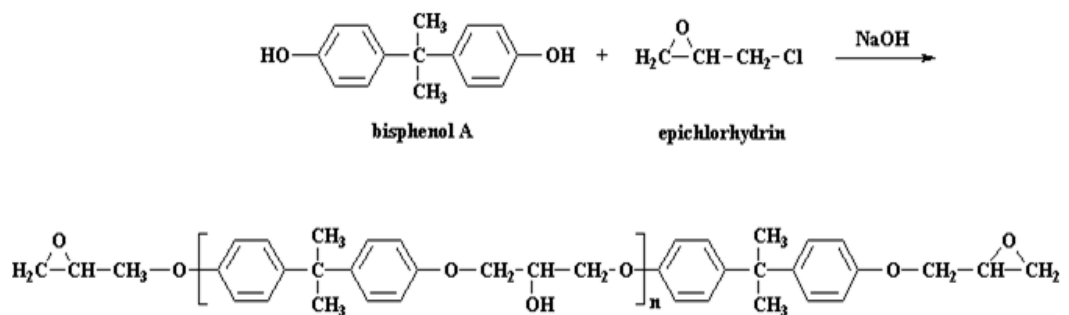
Yleisimmin käytettyjä lattiapinnoitteita ovat epokset, polyuretaanit, polyureat ja akryylit.

3 Lattiapinnoituksessa käytettäviä tuotteita

3.1 Epoksi

Epoksit voivat olla kemialliselta koostumukseltaan hyvin erilaisia riippuen käytetystä hartsista ja kovetteesta. Betonin pinnoitukseen käytetään bisfenoli A-, bisfenoli F- ja novolakka-hartseja. Yleisimmin käytetty epoksihartsi on nestemäinen bisfenoli A:n ja epikloorihydriinin reaktiotuote (kuva 3). Tähän liitettynä esimerkiksi sopiva amiinikovetin antaa pinnoitteelle erinomaiset ominaisuudet. Näitä ovat hyvä mekaaninen ja kemiallinen kestävyys, sekä alustalle saatava hyvä tartunta. Epoksin huonona puolena voidaan pitää kellastumista ja liutuuntumista auringon valon vaikutuksesta. [8, s. 77–80.]

Tuotteen pinnoitusominaisuuksiin vaikuttaa oleellisesti hartsin viskositeetti. VOC-päästöjen vähentämiseksi viskositeettia voidaan alentaa reaktiivisilla ohenteilla, jotka sitoutuvat pinnoitteisiin, perinteisten liuottimien ja ohenteiden sijasta. Reaktiivisten ohenteiden käyttö voi kuitenkin vaikuttaa heikentävästi pinnoitteen kestävyys. Bisfenoli A:han verrattuna bisfenoli F- ja novolakka-hartseilla on alhaisempi viskositeetti ja niillä on erittäin hyvä hapon- ja liuotteidenkestävyys. [8, s. 77–80.]



Kuva 3. Bisfenoli A:n ja epikloorihydriinin reaktio. [9.]

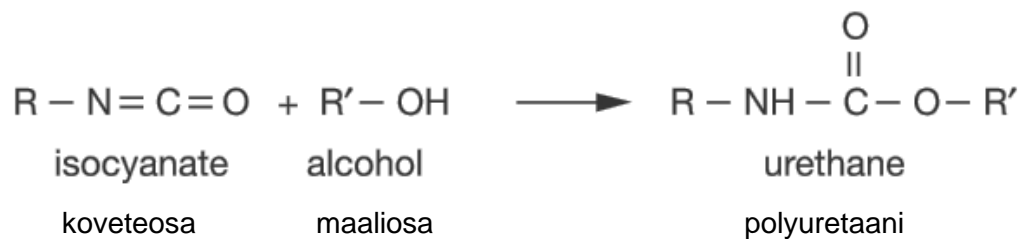
Epoksideaineiden käyttö on laajaa pinnoitus teollisuudessa johtuen niiden hyvästä tartunnasta metalleihin ja korkeasta kemikaalien ja korroosion estosta. Korkea kovettuneen epoksin kemiallinen kestävyys on seurausta vakaan hiili-hiili ja epoksimolekyylin eetterisidoksesta. Epoksideaineilla on kuitenkin kohtalaisen huonot mekaaniset ominaisuudet, kuten naarmuuntumisenesto sekä heikohko lämmön ja sään kestävyys, mikä rajoittaa niiden käyttöä korkeaa suorituskykyä vaativissa pinnoitusjärjestelmissä. [2.] Kuvassa 4 on esitetty epoksinpinnoite.



Kuva 4. Epoksinnoite. [5.]

3.2 Polyuretaani

Polyuretaanimaalit ovat kemiallisesti verkkoutuvia joko 1- tai 2-komponenttisiä pinnoitteita. Reaktiossa isosyanaattiryhmä reagoi hydroksyyliyhmän kanssa muodostaen uretaania (kuva 5). Tuotteen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa sillä, mitä kovetetta ja mitä maaliosaa käytetään. Isosyanaatteja (kovetteita) on paljon erityyppisiä, ja ne voivat olla alifaattisia tai aromaattisia. Polyuretaanit, jotka perustuvat aromaattisiin isosyanaatteihin ovat, edullisempia ja kuivuvat nopeammin kuin alifaattiset, mutta ne kellastuvat ja liituuntuvat auringonvalon vaikutuksesta. Alifaattisilla polyisosyanaateilla on taas erittäin hyvä sävyn- ja kiillonkestävyys UV-rasituksessa. Myös maaliosan (polyolin) hartsin koostumus vaikuttaa pinnoitteen ominaisuuksiin. [8, s. 84, 88.]



Kuva 5. Polyuretaanimaalin reaktio. [8, s. 84.]

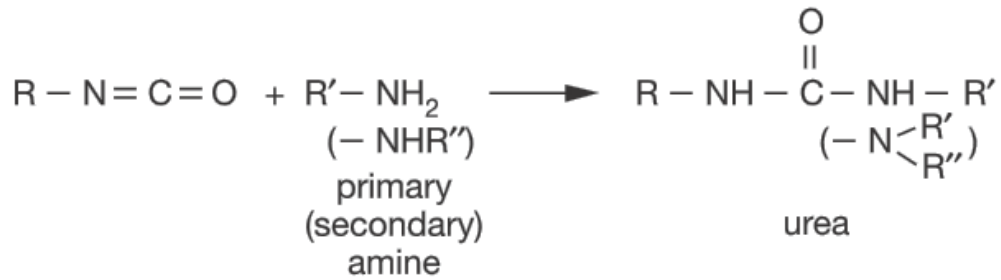
Polyuretaanimaalin hyviä ominaisuuksia ovat joustavuus, iskunkestävyys ja kulutuskestävyys sekä se kestää hyvin kemiallisia rasituksia. Näiden ominaisuuksien ansiosta polyuretaanimaali soveltuu hyvin teollisuus-, varasto- ja korjaamotilojen lattioihin (kuva 6). Polyuretaanin huonona puolena on sen herkkyys työnaikaiselle kosteudelle. [8, s. 84, 88.]



Kuva 6. Polyuretaanipinnoite [5.]

3.3 Polyurea

Polyurea koostuu samasta koveteosasta kuin polyuretaani. Tärkein ominainen piirre, joka erottaa polyurean kemiallisesti polyuretaanista, on se, että maaliosassa hydroksyyli-ryhmä (OH) korvataan amiiniryhmällä. Kuvassa 7 on esitetty reaktio, jossa amiini reagoi isosyanaatin kanssa muodostaen ureasidoksen. [10, s. 5.]

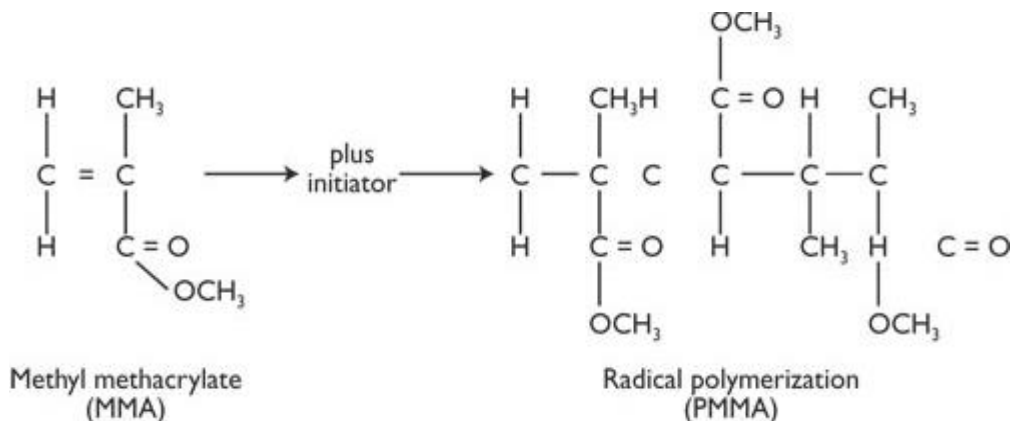


Kuva 7. Polyurean reaktio. [8, s. 84.]

Tämä autokatalyyttinen polymeeri on hyvin reaktiivinen ja kovettuu kosketuskuivaksi viidessä sekunnissa, jopa -30 asteen lämpötilassa. Polyurea on hyvin luja ja sitkeä, mutta silti joustava, kulutusta kestävä ja pitkäikäinen pinnoitemateriaali. Polyurea on myös kemikaalikestävyys- ja vesieristävyysominaisuuksiltaan parempi kuin polyuretaani. Polyurea on VOC-vapaa, helposti puhdistettavissa ja se kestää hyvin jäätymis-sulamissyklit. Polyurean käyttökohteita ovat mm. elintarviketeollisuus sekä siltojen, tunneleiden ja uima-altaiden pinnoitus. [11.]

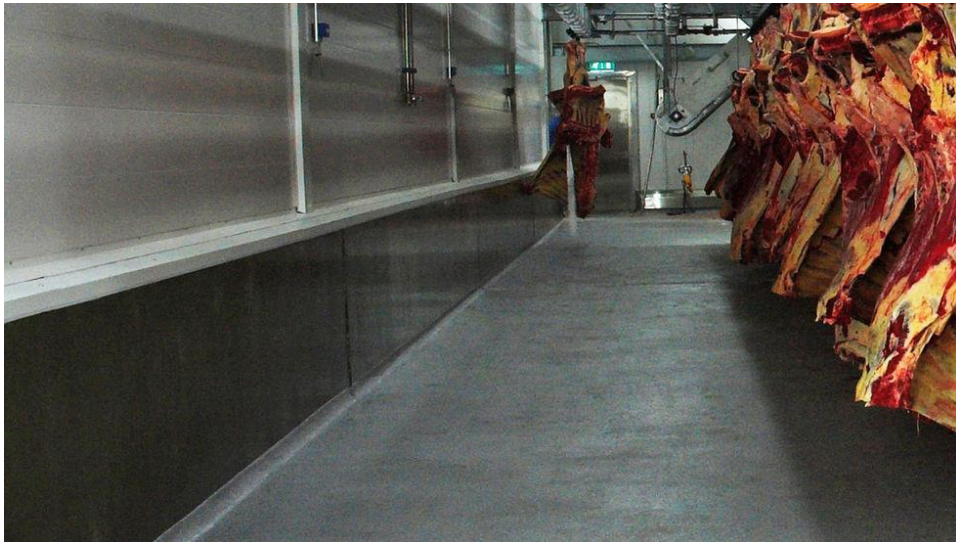
3.4 Akryyli

Metyylimetakrylaattia (MMA) käytetään usein akrylaattipohjaisten lakkojen, pinnoitteiden ja massojen sideaineena. MMA:lla on matala viskositeetti, ja se kovettuu muutamassa tunnissa hyvinkin alhaisessa lämpötilassa, jopa alle 0 °C:ssa. MMA-pohjaiset sideaineet kovettuvat radikaalin polymerointireaktion kautta (kuva 8).



Kuva 8. MMA:n kovettuminen radikaalin polymerointireaktion (PMMA) kautta. [12.]

Polymerisoidun sideaineen kemiallisen ketjun muodostuminen osoittaa, että tärkein molekyyliketju on ympäröity ja suojattu haaroittuneilla ryhmillä. Tästä syystä MMA- pohjaisilla akrylaateilla on erinomainen sään kestävyys, kemiallinen kestävyys ja lämmönkesto. Akryylien huonona puolena on voimakas haju työn aikana, ja kemikaalikeston osalta liuottimet ovat hankalia. Akryylien käyttökohteita ovat mm. elintarviketeollisuus, laitoskeittiöt ja pakastamot. [12.] Kuvassa 9 on esitetty akryyllillä pinnoitettu lattia.



Kuva 9. Akryyllillä pinnoitettu lattia. [5.]

4 Epoksi-silaani

Epäorgaanis-organisia yhdistelmäpinnoitteita on tutkittu laajasti, koska liittämällä epäorgaaniset komponentit orgaaniseen verkostoon muodostuu esimerkiksi hyvin suojaava kerros korroosiota vastaan. Ne myös parantavat laajalla alueella monifunktionaalisia ominaisuuksia, kuten vetolujuutta, sitkeyttä, naarmunkestävyyttä, kemikaalinkestävyyttä ja palo-ominaisuuksia. Epäorgaaninen komponentti takaa hyvän tarttuvuuden, koska se muodostaa kemiallisen sidoksen pohjamateriaalin (esimerkiksi metallin, lasin, puun tai betonin) ja epäorgaanis-organisen kalvon välille. Orgaaninen osa kasvattaa sidoksella tiheyttä ja joustavuutta, vähentää heikkouksia ja parantaa yhteensopivuutta polymeeri pinnoituksen kanssa. [2.]

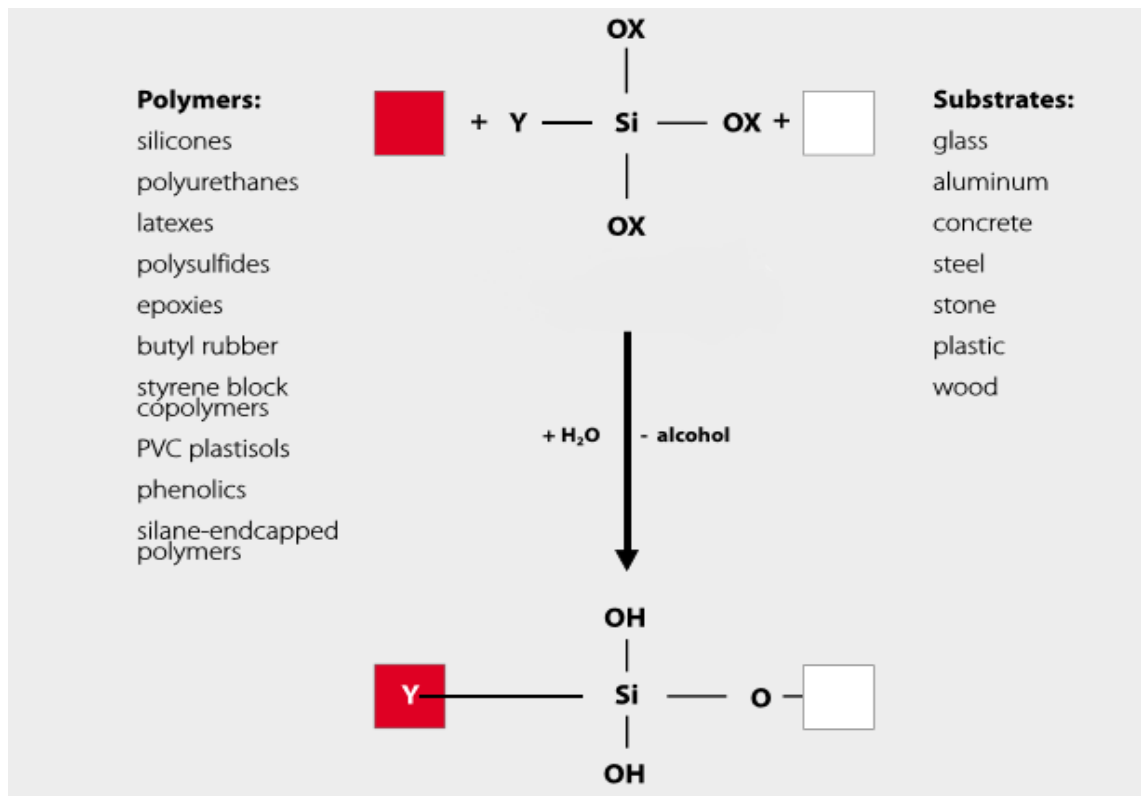
Kirjallisuuden mukaan epoksi-siloksaani (polymerisoitu silaani) pinnoitus toimii hyvänä suojaavana pinnoitteena johtuen siloksaaniketjujen (Si – O – Si) muodostumistiheyden

yhdistymisestä orgaanisiin epoksiketjuihin. Näillä pinnoitteilla on suurempi kestävyys ja parempi sietokyky ilmaston muutoksille, kuumuudelle, kemikaaleille ja UV-säteilylle kuin muiden orgaanisten polymeerien pinnoitteilla. Tällaisia epoksi-silaanipinnoitteita on käytetty teräksen suojaamisessa ja funktionalisoinnissa jo vuosia. [2.]

Metallipintojen käsittely on yksi tehokkaimmista tavoista estää sähkökemiallisesti aktiivista korroosiota metalliseoksilla. Orgaanisten tai epäorgaanis-orgaanisten pinnoitteiden käytöllä saavutetaan kestävä suoja metallin pinnalle ilman haitallisia vaikutuksia sen mekaanisille ominaisuuksille. Suoriutuakseen tehtävästään tehokkaasti suojaavilla pinnoitteilla täytyy olla sisäistä kestävyttä ja hyvä tarttuvuus alustaan, riittävää joustavuutta ja kovuutta kestää iskuja ja halkeilua ylläpitääkseen ulkomuotonsa kun sitä altistetaan kuormitukselle tai kulutetaan mekaanisesti. [2.]

Betonilattian impregnoinnissa eli imeyttämässä on tarkoitus saada betonin huokoinen pinta tiiviiksi, jotta pintaan ei imeytyisi epäpuhtauksia. Käsittely tiivistää pinnan, jolloin nesteet ja lika eivät pääse tunkeutumaan pintaan ja pinta on helpompi pitää puhtana. Yksi käytetyimmistä impregnointiaineista on silaanipohjaiset aineet, jotka tunkeutuvat betonipinnan huokosiin jättämättä kuitenkaan kalvoa betonin pinnalle. Tästä syystä käsittely on melko pitkäaikainen ja uusintakäsittely suositellaan tehtäväksi muutaman vuoden välein. Impregnointi-käsittely ei vaikuta pinnan ulkonäköön muuten kuin että kiiltoaste saattaa kasvaa jonkin verran. Silaanipohjaiset aineet eivät tunkeudu kovinkaan syvälle betonin pintaan, joten käsittely ei juuri vaikuta lattian kulutuksen kestoon. [13.]

Kuvassa 10 on esitetty silaanin toiminta tartunnan edistäjänä. Silaanin organofunktionaalinen ryhmä Y sitoutuu polymeeriin, kuten epoksiin. Organofunktionaalisen ryhmän tarkka sovittaminen polymeerin matriisiin on keskeistä optimaaliselle kiinnittymiselle ja fysikaalisille ominaisuuksille. Silikoni-funktionaaliset ryhmät OX, yleensä alkoksiryhmät, hydrolysoituvat veden vaikutuksesta aktiiviseen silanoliin (Si-OH) vapauttaen alkoholia. Seuraavaksi silanoli sitoutuu alustan (substrate) aktiivisiin ryhmiin, jotka ovat mieluiten hydroksyyli-ryhmiä. Lisäksi reaktiivinen epoksi-silaani monomeeri reagoi muiden vastaavien monomeerien kanssa muodostaen epäorgaanisen verkkorakenteen. [14.]



Kuva 10. Silaanin toiminta tartunnan edistäjänä. [14.]

3-glysidyloksipropyltrimetoksisilaani (GLYMO) on bifunktionaalinen organosilaanimonomeeri, jossa on reaktiivinen orgaaninen epoksiryhmä ja hydrolysoituva epäorgaaninen metoksisilaaniryhmä. GLYMO:n reaktiivisuuden kaksinainen luonne sallii sen sitoutua kemiallisesti epäorgaanisiin materiaaleihin sekä orgaanisiin polymeereihin. GLYMO näin ollen toimii tarttumisen edistäjänä, silloitusaineena ja alustan muokkaajana. [15.]

GLYMO on keskeinen tuotteiden ainesosa monilla teollisuuden aloilla. Maaleissa ja pinnoitteissa GLYMOa on käytetty lisäaineessa ja pohjusteessa parantamaan alustan tartuntaa, erityisesti lasin ja metallin. GLYMO:n käytöllä on saatu parannettua mekaanisia ominaisuuksia, kuten taivutuslujuutta, vetolujuutta, iskunkestoa ja elastisuutta. Myös kosteus- ja korroosionkestävyyttä on saatu paremmaksi GLYMO:n käytöllä sekä sillä on pystytty parantamaan viskositeetin virtaus- sekä muodonmuutosominaisuuksien käyttäytymistä. [15.]

Silloitusaineen kemiallinen rakenne voi vaikuttaa pinnoitteen ominaisuuksiin. Esimerkiksi amino-silaanit ovat ainutlaatuisia tarttumisen edistäjiä, jotka voivat olla osallisena sitovien epoksiryhmien tavanomaisessa kemiassa. Amino-silaanit voivat myös läpikäydä

sooli-geelihydrolyysin ja kondensaatioreaktion sekä toimia samanaikaisesti alustan tartunta-aineena. [2.]

5 Koesuunnitelma ja testausmenetelmät

5.1 Koesuunnitelma

Työssä tarkasteltiin neljää eri tuoteversiota (A–D) sekä näiden kahta eri kombinaatiota (E, F). Taulukossa 1 on esitetty käytetyt tuoteversiot. Versioille valittiin kolmetoista eri testiä, joista kolme testimenetelmää oli tarkoitettu märän maalin ominaisuuksien testaamiseen ja kymmenen testimenetelmää kuivan maalin ominaisuuksien testaamiseen. A–D-versioille tehtiin kaikki testit, E- ja F-versioille tehtiin kulumiskestävyys, kiinnitarttuvuus ja iskunkestävyys testit. Testit valittiin yrityksen sisäisten vaatimusten perusteella. Taulukossa 2 on esitetty koesuunnitelma. Yhtä testiä lukuun ottamatta kaikki testit pohjautuivat standardeihin. Nämä testit olivat ominaispainon mittaaminen kuulalla, viskositeetin määrittäminen cone & plate- viskosimetrillä, käyttöajan määrittäminen, kiillon määrittäminen, kovouden määrittäminen, kuivumisajan määrittäminen kuivumisaikalaitteella, tarttuvuuden arviointi vetokokeella, kulutuskestävyys, iskunkestävyys, taivutuslujuus, puristuslujuus ja kemikaalinkesto. Puhdistettavuuden testaus ei pohjautunut mihinkään standardiin.

Taulukko 1. Tuoteversiot

Versio	Tuote
A	Epoksi-silaanilakka
B	Epoksi-silaanimaali
C	Epoksimaali
D	Epoksilakka
E	Epoksi-silaanimaali + Epoksi-silaanilakka
F	Epoksimaali + Epoksi-silaanilakka

Taulukko 2. Koesuunnitelma

Testimenetelmä	A	B	C	D	E	F
Ominaispaino	X	X	X	X		
Viskositeetti	X	X	X	X		
Käyttöaika	X	X	X	X		
Kovuus	X	X	X	X		
Kuivumisaika	X	X	X	X		
Kiilto	X	X	X	X		
Kulumiskestävyys	X	X	X	X	X	X
Kiinnitarttuvuus	X	X	X	X	X	X
Iskunkestävyys	X	X	X	X	X	X
Taivutuslujuus	X	X	X	X		
Puristuslujuus	X	X	X	X		
Puhdistettavuus	X	X	X	X		
Kemikaalinkesto	X	X	X	X		

Kiillon, kuivumisajan ja kovuuden määrittämisessä alustana käytettiin lasilevyjä. Kiinnitarttuvuuden ja iskunkestävyyden testauksiin valittiin alustaksi betonisia puutarhalaattoja, jotka esikäsiteltiin peittaamalla. Puhdistettavuuden ja kemikaalinkeston testauksissa alustana käytettiin kuitusementtilevyjä. Kulutuskestävyydestä käytettiin laitteeseen sopivia metallisia testialustoja.

5.2 Nestemäisten tuotteiden testaus

Ennen tuotteiden applikointia niistä mitattiin kolme nestemäisen maalin perusominaisuutta: ominaispaino, viskositeetti ja käyttöaika.

Ominaispaino mitattiin käyttämällä ominaispainokuulaa, joka soveltuu matala ja keski-viskoosisten tuotteiden tiheyden määrittämiseen. Näytteen ominaispaino on sen massa (m) jaettuna tilavuudella (V), kg/l.

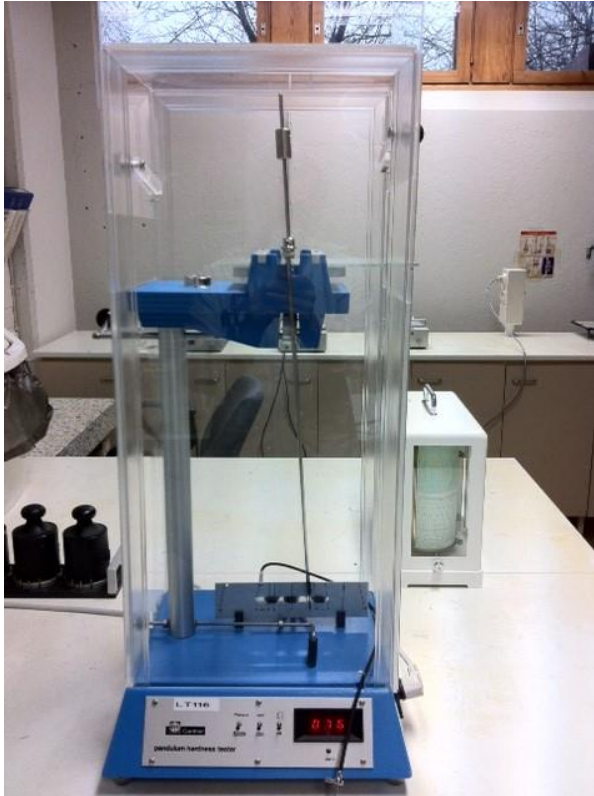
Viskositeetin mittaukseen käytettiin cone & plate- viskosimetriä, jonka tulos kertoo materiaalin vastuksesta applikoitaessa tuotetta. Käytetyn laitteen leikkausnopeus oli 10,000 s⁻¹, mittausalue 0–10 Poisea ja mittauslämpötila +23 °C.

Tuotteiden käyttöaikaa astiassa arvioidaan seuraamalla viskositeetin muutosta ajan funktiona. Menetelmä soveltuu kaksikomponenttisten tuotteiden käyttöajan mittaamiseen. Viskositeetin mittaukseen käytettiin edellä mainittua cone & plate- viskosimetriä, mutta mittaustilana käytettiin +50 °C. Aika, joka kuluu viskositeetin kaksinkertaisuuteen, kertoo tuotteen käyttöajan. [16; 17; 18.]

5.3 Kuivuminen ja kovettuminen

5.3.1 Heilurikovuus

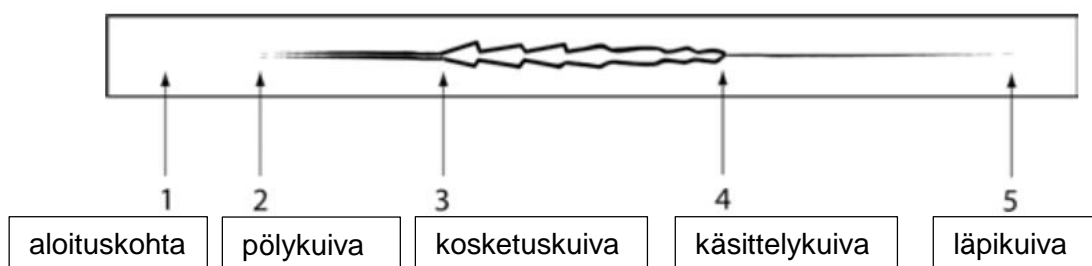
Kovuus määritettiin standardin ISO 1522:2006 mukaisesti. Kovuuden määrittämiseen käytettiin Königin heiluria, jossa heiluri asetetaan näytteen päälle. Kuvassa 11 on esitetty heilurikovuuden mittaamiseen käytetty laite. Periaatteena on se, että mitä pehmeämpi pinnoite on, sitä nopeammin heilurin liike hidastuu. Tuotteet applikoitiin lasilevyille 150/300 µm:n applikaattorilla. Levyjen mittaus suoritettiin kahdesta eri kohdasta ja niistä laskettiin keskiarvo. Mittaukset suoritettiin yhden, kahden, kolmen, seitsemän ja 14 vuorokauden kuivumisen jälkeen. Tällä saatiin selville, kuinka nopeasti pinnoite kovettui täyteen kovuuteensa. Testi suoritettiin vakiointiolosuhteissa, jossa lämpötila oli +23 °C ja kosteus (RH) 50 %. [19.]



Kuva 11. Heilurikovuuden mittaaminen

5.3.2 Kuivuminen

Kuivumisaika määritettiin mekaanisella piirturilla standardin EN ISO 9117–4:2012 mukaisesti, jonka kuivatusjaksoksi valittiin neljä tuntia. Pinnoite levitettiin 150 µm:n applikaattorilla 300 mm x 25 mm:n kokoiselle lasilevyille, jonka jälkeen levy kiinnitettiin välittömästi piirturiin. Piirturin neula laskettiin levyn päälle, merkittiin tussilla aloituskohta ja käynnistettiin laite. Maalin kuivuttua lasilevy arvioitiin kuvan 12 mukaisesti. [20.]



Kuva 12. Piirturin kuivumisvaiheet. [20.]

5.3.3 Kiilto

Kiilto mitattiin mittarilla Micro-Tri-Gloss 4430 (kuva 13) standardin SFS-EN ISO 2813 mukaan. Mittaamiseen käytettiin 60 asteen kulmaa. Tuote levitettiin vetopaperille 300 µm:n applikaattorilla. Mittaus tehtiin kuudesta eri kohdasta, joista laskettiin keskiarvo. [21.]



Kuva 13. Kiiltomittari

5.4 Mekaaniset ominaisuudet

5.4.1 Kulutuskestävyys

Kulutuskestävyyttä määritettiin standardin EN ISO 5470–1:1999 mukaisesti. Menetelmällä pystytään arvioimaan pinnoitteiden hankauskulutuskestävyyttä. Laitteena käytettiin Taber Abrasoria (kuva 14), jossa hiontalaikkoina käytettiin karkeita H-22-laikkoja, koska nämä soveltuvat hyvin lattiapinnoitteille niiden suuren kovuuden vuoksi. Varressa käytettiin yhden kilon lisäpainoja. Koelevyt olivat 102 x 102 mm, jossa oli keskellä 6,4 mm:n reikä. Jokaisesta versiosta tehtiin kolme rinnakkaista määrittystä, joiden tulos ilmoitettiin kulutusindeksinä seuraavasti:

$$I = \frac{(A-B)1000}{C}$$

jossa,

I = kulutusindeksi

A = näytteen paino ennen kulutusta, mg

B = näytteen paino kulutuksen jälkeen, mg

C = kierrosten lukumäärä

Ennen testin aloitusta levyistä mitattiin kuivakalvonpaksuudet. [22.]



Kuva 14. Kulutuskestävyyslaite Taber Abraser

5.4.2 Kiinnitarttuvuus

Kiinnitarttuvuutta arvioitiin vetokokeella standardin SFS-EN ISO 4624 mukaisesti. Menetelmällä voidaan verrata pinnoitteiden tartuntaominaisuuksia. Murtuma voi olla joko tartuntamurtuma eli adheesiomurtuma tai materiaalin sisäinen murtuma eli koheesiomurtuma.

Vetojännityksen mittaus suoritetaan kohtisuoraan pinnoitettua alustaa vasten nopeuden lisääntyessä tasaisesti. Mekaanisten ominaisuuksien lisäksi tuloksiin vaikuttaa olennaisesti alustan laatu ja esikäsittele sekä pinnoitteen kuivumisolosuhteet.

Tuotteet levitettiin telaamalla tuoteselosteiden mukaisesti betonialustalle ja annettiin kuivua seitsemän vuorokautta huoneenlämmössä ja tämän jälkeen vielä kaksi vuorokautta vakio-olosuhteissa (+23 °C, RH 50 %). Yhdelle alustalle liimattiin kuusi vetokappaletta, joiden annettiin kuivua 24 tuntia ennen vetokokeen suoritusta. Vetorasitus kohdistettiin kohtisuoraan pinnoitettuun alustaan nähden ja voimaa nostettiin tasaisella nopeudella (kuva 15). Murtolujuuden lisäksi vetokappaleesta arvioitiin murtuman tyyppi. [23.]

Tartuntalujuus σ voidaan laskea yhtälöstä:

$$\sigma = F / A$$

F = murtovoima (N)

A = vetokappaleen pinta-ala (mm²)

Tässä käytetyt vetokappaleet olivat halkaisijaltaan 20 mm, jolloin murtovoima saatiin yhtälöstä:

$$\sigma = 4F / 400\pi = F / 314 \text{ (N/ mm}^2\text{)}$$

Murtumatyyppi arvioitiin seuraavasti:

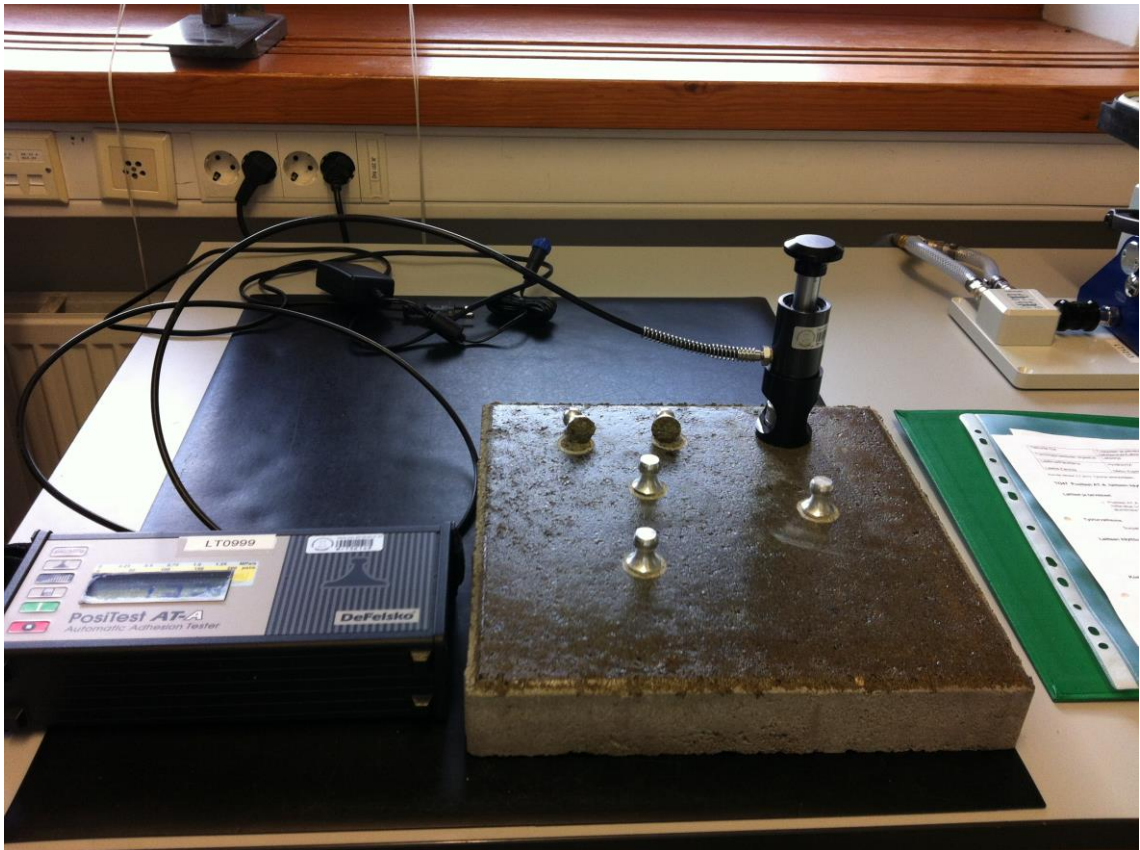
A = alustan koheesiomurtuma

A/B = adheesiomurtuma alustan ja ensimmäisen pinnoitekerroksen välillä

B = koheesiomurtuma ensimmäisessä pinnoitekerroksessa

-/Y = adheesiomurtuma liiman ja pintakerroksen välillä

Murtumapinta-ala arvioitiin murtumatyypeittäin lähimpään 10 %:iin.



Kuva 15. Kiinnitarttuvuustesti

5.4.3 Iskunkestävyys

Iskunkestävyydestä tehtiin mukailleen standardia EN ISO 6272–1:2011. Testissä määritettiin kuivan maalikalvon halkeilun kestävyys, kun siihen kohdistettiin putoava paino.

Menetelmä suoritettiin hyväksyty/hylätty testinä, jolloin testi tehtiin yhdestä pudotuskorkeudesta tietyllä massalla. Pudotuskorkeus oli 40 cm ja pudotuspainona käytettiin yhden kilon painoa. Testialustana käytettiin 300 x 300 x 45 mm:n kokoista betonilaattaa. Mittaputki asetettiin irrallisena betonilaatan päälle (kuva 16), koska testikappale ei mahtunut testilaitteeseen. Testissä paino vapautettiin tietyistä korkeudesta ja annettiin sen pudota koelevylle. Testi toistettiin viisi kertaa testialustan eri kohdissa, jonka jälkeen arvioitiin mahdolliset halkeilut. [24.]



Kuva 16. Iskunkestävyyden testaus

5.4.4 Taivutuslujuus

Taivutuslujuuden testaus tehtiin standardin ISO 178 mukaisesti. Testiä varten valmistettiin koekappaleet, joiden mittasuhteet olivat seuraavat:

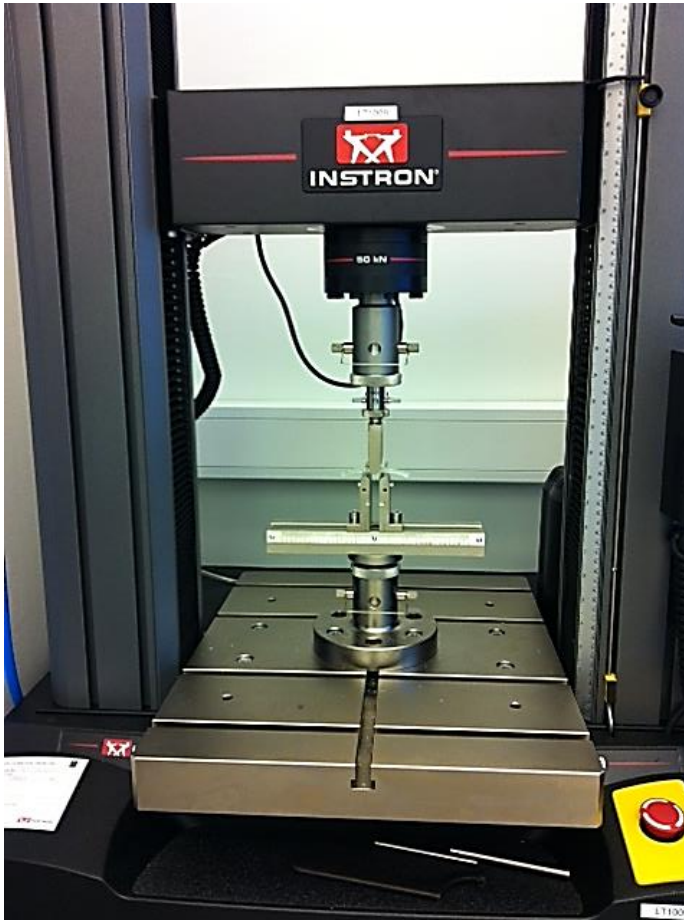
pituus $l = 80 \pm 2$

leveys $b = 10,0 \pm 0,2$

korkeus $h = 4,0 \pm 0,2$

Näytteiden valmistukseen käytettiin valmiita silikonimuotteja. Versioista valettiin näytteet muotteihin, josta ne irrotettiin vuorokauden kuivumisen jälkeen. Tämän jälkeen niitä kuivatettiin vielä 27 vuorokautta vakio-olosuhteissa (+23 °C, RH 50 %) eli kovettumisaika

oli yhteensä 28 vuorokautta. Jokaisesta tuotteesta tehtiin kolme rinnakkaista näytettä. Kuivatuksen jälkeen jokaisesta näytteestä mitattiin työntömitalla pituus, leveys ja korkeus kolmesta eri kohdasta, joista määritettiin keskiarvo. Korkeuden (h) keskiarvon perusteella laskettiin taivutusasteiden väli (mm), $L = 16/h$. Käytetty mittausnopeus määrytyi näytteen korkeuden keskiarvon mukaan. [25.] Kuvassa 17 on esitetty taivutuslujuuden mittauslaitteisto.



Kuva 17. Taivutuslujuuden mittaus

Taivutuslujuus (N/mm^2) laskettiin seuraavasti:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

F = voima, N

L = taivutusasteiden väli, mm

b = näytteen leveys, mm

h = näytteen korkeus, mm

5.4.5 Puristuslujuus

Puristuslujuuden testaus tehtiin mukailien standardia ISO 604. Standardista poiketen testissä käytettiin koekappaleita, joiden mittasuhteet olivat seuraavat:

pituus $l = 12 \pm 2,2$

leveys $b = 12 \pm 2,0$

korkeus $h = 12 \pm 2,0$

Näytteiden valmistukseen käytettiin valmiita silikonimuotteja. Pinnoiteseos valettiin muotteihin, josta ne irrotettiin vuorokauden kuivumisen jälkeen. Tämän jälkeen niitä kuivatettiin vielä 27 vuorokautta vakio-olosuhteissa (+23 °C, RH 50 %) eli kuivumisaika oli 28 vuorokautta. Jokaisesta tuotteesta tehtiin kuusi rinnakkaista näytettä. Kuivatuksen jälkeen jokaisesta näytteestä mitattiin työntömitalla pituus, leveys ja korkeus kolmesta eri kohdasta, joista määritettiin keskiarvo. Mittausnopeudeksi valittiin 5 mm/min standardin mukaan. [26.] Kuvassa 18 on esitetty puristuslujuuden mittauslaitteisto.



Kuva 18. Puristuslujuuden mittaaminen

5.5 Puhdistettavuus

Testausalustana käytettiin kuitusementtilevyjä, joille tuotteet telattiin tuoteselosteen mukaisesti. Jokaista tuotetta varten tehtiin kaksi levyä. Levyjä kuivatettiin seitsemän vuorokautta, jonka jälkeen niille asetettiin vuorokauden uunissa (+50 °C) olleet autonrenkaan palat. Toiselle levyille asetettiin kaksi kesärenkaan palaa ja toiselle levyille kaksi talvirenkaan palaa. Palojen päälle lisättiin 10 kilon painoinen betonilaatta ja tämä jätettiin huoneenlämpöön. Levyjä tarkasteltiin yhden ja seitsemän vuorokauden kuluttua. Testi tehtiin myös sillä tavalla, että koko paketti, levy, renkaan palat ja 10 kilon paino laitettiin seitsemäksi vuorokaudeksi uuniin +50 °C:seen. Arvostelu suoritettiin taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Puhdistettavuuden arvosteluasteikko

Arvosana	Kuvaus
5	ei muutosta
4	heikko muutos (esim. kiilto) < 20 % pinnasta
3	heikko muutos > 20 % tai selvä (esim. väri) muutos < 20 %
2	selvä muutos > 20 %
1	tuote irtoaa < 20 %
0	tuote irtoaa > 20 %

5.6 Kemikaalinkesto

Menetelmän avulla pystyttiin arvioimaan valittujen testiliuoksien vaikutusta maalikalvoon. Koestus tehtiin mukailien standardia SFS EN ISO 2812-3. Taulukossa 4 on esitetty testissä käytetyt liuokset.

Taulukko 4. Testiliuokset

Nro	Testiliuos
1	etikkahappo 10 %
2	muurahaishappo 10 %
3	suolahappo 36 %
4	typpihappo 50 %
5	fosforihappo 50 %
6	rikkihappo 50 %
7	ammoniakki 20 %
8	natriumhydroksidi 20 %

Koelevyinä käytettiin 29,5 x 21 cm:n kuitusementtilevyjä. Levyt pinnoitettiin telaamalla tuoteselosteen mukaisesti. Testaus suoritettiin 21 vrk:n kuivumisen jälkeen. Suodatinpaperi imeytettiin koeliuokseen, jonka jälkeen paperi siirrettiin testausalueelle ja peitettiin

lasimaljalla (kuva 19). Tämän jälkeen koelevyt jätettiin vedottomaan tilaan. Arvostelu tapahtui 24 tunnin kuluttua taulukon 5 mukaisesti. [27.]



Kuva 19. Kemikaalikestotesti

Taulukko 5. Kemikaalinkestotestin arvostelutaulukko

Arvosana	Kuvaus
5	Ei muutosta Testialuetta ei pysty erottamaan ympäröivästä alueesta.
4	Vähäinen muutos Testialueessa havaitaan muutoksia vain tietyssä valon kulmassa, esimerkiksi muutoksia kiillossa tai sävyssä. Pintarakenteessa ei muutoksia.
3	Kohtuullinen muutos Testialueessa havaitaan muutoksia useista eri katselukulmista, esimerkiksi muutoksia kiillossa tai sävyssä. Pintarakenteessa ei muutoksia.
2	Merkittävä muutos Testialueessa havaitaan selkeästi muutoksia kaikista katselukulmista, esimerkiksi muutoksia kiillossa tai sävyssä. Pintarakenteessa voi olla vähäisiä muutoksia.
1	Voimakas muutos Pintarakenne on selkeästi muuttunut. Esimerkiksi muutoksia kiillossa tai sävyssä, pintarakenne on kokonaan tai osittain irronnut, suodatinpaperi on tarttunut pintaan kiinni.

6 Tutkimustulokset ja niiden tarkastelu

6.1 Nestemäisten tuotteiden testaus

Nestemäisten näytteiden testituloksissa oli eroja, joihin vaikutti osaksi se, että versioilla oli keskenään erilaiset viskositeetit. Ominaispainon ja viskositeetin tuloksista voitiin päätellä, että versiot A ja B olivat melko matalan viskositeetin tuotteita. Käyttöaikaan reologialla ei ollut vaikutusta. Version A seoksen käyttöaika oli selkeästi pisin. Taulukossa 6 on esitetty ominaispainon, ICI:n ja käyttöajan tulokset.

Taulukko 6. Nestemäisten tuotteiden testitulokset

Testi	A	B	C	D
Ominaispaino	1,03 kg/ l	1,04 kg/ l	1,52 kg/ l	1,10 kg/ l
ICI	0,1 P	0,2 P	9,9 P	6,9 P
Käyttöaika	240 min	80 min	17 min	29 min

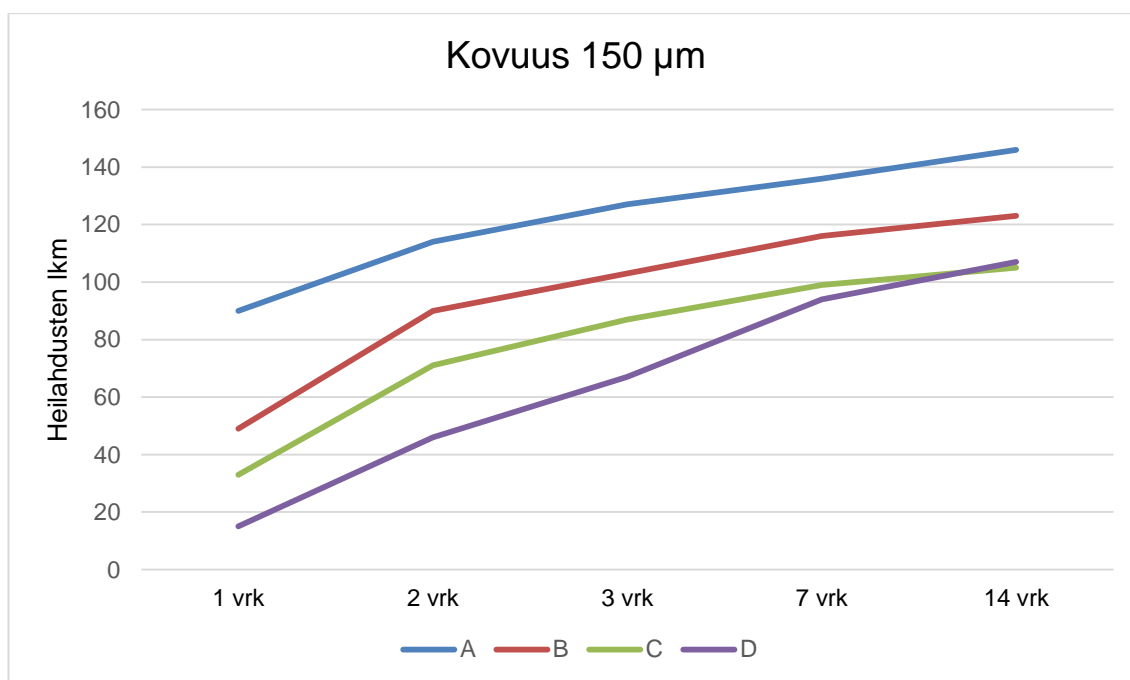
6.2 Heilurikovuus

Heilurikovuuksissa oli havaittavissa selkeitä eroja ensimmäisten vuorokausien aikana. 14 vuorokauden jälkeen erot hieman tasoittuivat, mutta tuote A oli edelleen selkeästi kovin. Heilurikovuuden keskiarvot on esitetty taulukossa 7 ja graafisesti kuvissa 20 ja 21. Kaikki heilurikovuuden tulokset on esitetty liitteessä 1.

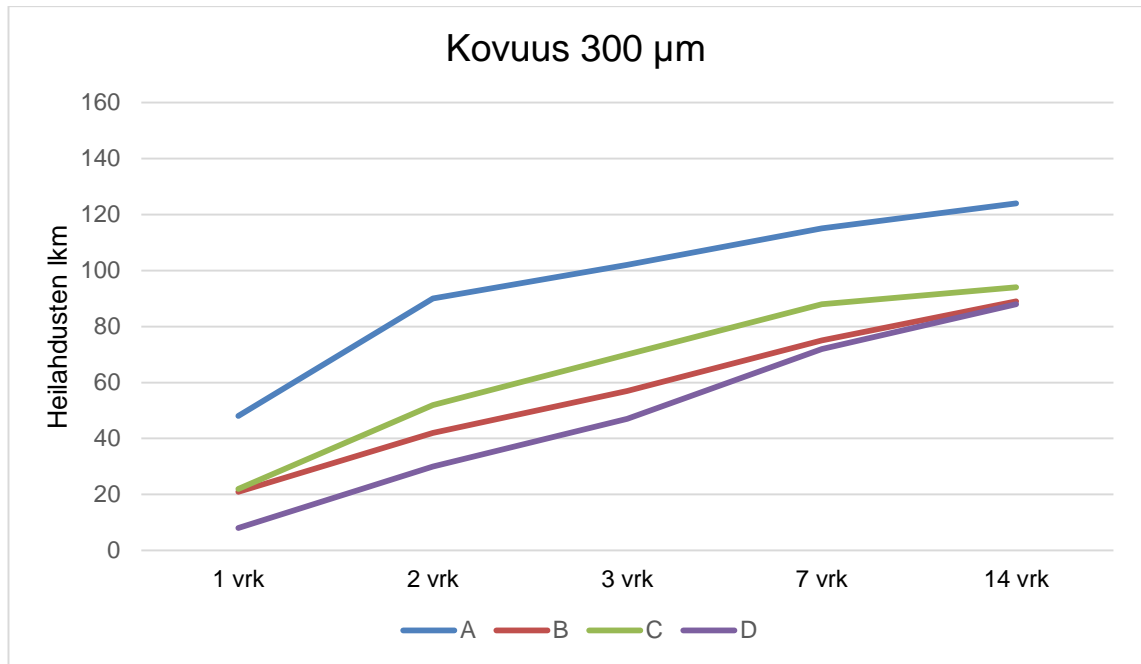
Taulukko 7. Heilurikovuuden heilahdusten keskiarvot

	A		B		C		D	
	150 µm	300 µm	150 µm	300 µm	150 µm	300 µm	150 µm	300 µm
1 vrk	90	48	33	22	49	21	15	8
2 vrk	114	90	71	52	90	42	46	30
3 vrk	127	102	87	70	103	57	67	47
7 vrk	136	115	99	88	116	75	94	72
14 vrk	146	124	105	94	123	89	107	88

µm = mikrometri



Kuva 20. Heilurikovuuden heilahduksien keskiarvot 150 µm:n märkäkalvolla



Kuva 21. Heilurikovuuden heilahduksien keskiarvot 300 µm:n märkäkalvolla

6.3 Kuivuminen ja kiilto

Kuivumisajan määrittämisessä versiot A ja B kuivuivat hyvin samalla tavalla ja samoin C ja D käyttäytyvät keskenään hyvin samalla tavalla. Kuivumisvaiheista käsittelykuiva ja läpikuiva jäivät esiintymättä, koska kuivatusjakso oli liian lyhyt. Määrittämiseen olisi sovelletun paremmin pidempi kuivatusjakso, esimerkiksi 8 tai 12 tuntia, jotta erot olisivat tulleet paremmin esille. Taulukossa 8 on esitetty kuivumisaikakokeen tulokset.

Taulukko 8. Kuivumisaikakokeen tulokset

Kuivatusjakso 4 h	pölykuiva	kosketuskuiva	käsittelykuiva	läpikuiva
A	30 min	40 min	> 4h	> 4h
B	20 min	30 min	> 4h	> 4h
C	> 4h	> 4h	> 4h	> 4h
D	> 4h	> 4h	> 4h	> 4h

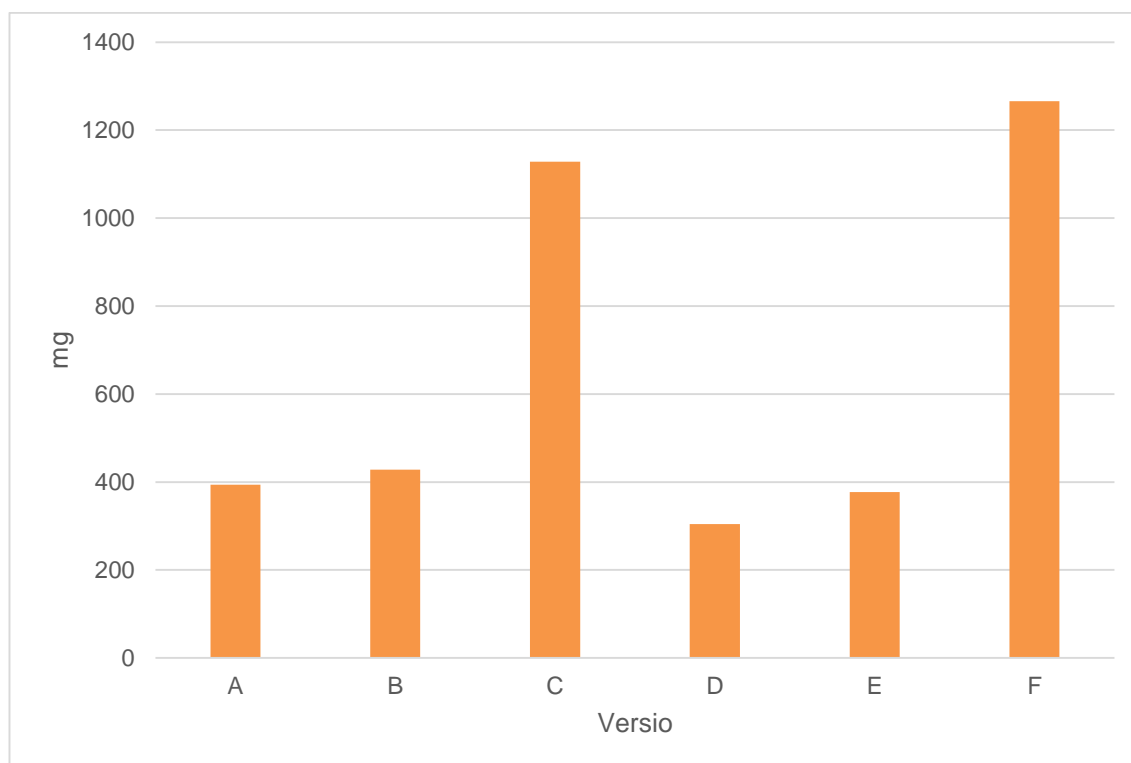
Taulukossa 9 on esitetty kiillon mittauksien keskiarvot. Kaikki mittaustulokset on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 9. 60 asteen kulman kiillon mittauksien keskiarvot

	A	B	C	D
Kiilto 60°	98,2	51,3	101,0	101,0

6.4 Kulutuskestävyys

Kulutuksenkestävyydessä parhaiten pärjasi versio D. Versiot A, B ja E olivat melko lähellä versiota D, mutta versiot C ja F poikkesivat selkeästi muista versioista. Painohäviö oli näissä melko suuri verrattuna muihin versioihin. Mitä pienempi painohäviö oli, sitä parempi. Painohäviön vaatimukseksi ylärajana käytettiin 3000 mg, joka on betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineiden harmonisoidun tuotestandardin (CE-merkintä) testauksissa kulutuskestävyyden rajana. Tämän perusteella kaikki versiot täyttivät tämän vaatimuksen. Painohäviöiden keskiarvot on esitetty kuvassa 22. Kaikki tulokset on esitetty liitteessä 3.



Kuva 22. Painohäviöiden keskiarvot

6.5 Kiinnitarttuvuus

Kiinnitarttuvuuden testauksessa kaikki arvot olivat hyvällä tasolla. Versio D oli keskiarvon perusteella paras. Vaatimuksena pidettiin sitä, että versioiden murtolujuuksien keskiarvojen tuli ylittää 2,0 N/ mm² ja jokaisen yksittäisen kuuden vetokappaleen murtolujuuden tuli olla yli 1,5 N/ mm². Kaikki versiot ylittivät nämä vaatimukset. Taulukossa 10 on esitetty murtolujuustuloksien keskiarvot. Yhtä vetokappaletta lukuun ottamatta kaikki murtumatyytit olivat 100-prosenttisesti alustan koheesiomurtumia. F-version neljännessä näytteessä esiintyi osittain adheesiomurtuma liiman ja pintakerroksen välillä. Taulukossa 11 on esitetty vetojen murtumatyytit.

Taulukko 10. Murtolujuuksien keskiarvot

Versio	1 (N/ mm ²)	2 (N/ mm ²)	3 (N/ mm ²)	4 (N/ mm ²)	5 (N/ mm ²)	6 (N/ mm ²)	ka (N/ mm ²)
A	7,55	8,62	8,15	8,91	8,75	8,23	8,37
B	7,84	7,14	8,69	7,83	8,80	9,02	8,22
C	9,50	11,54	8,40	10,24	9,94	9,19	9,80
D	7,99	11,02	11,27	10,39	11,02	11,05	10,46
E	8,49	8,45	8,39	7,66	8,88	8,82	8,45
F	10,74	10,60	9,25	5,82	10,12	10,34	9,48

Taulukko 11. Murtumatyytit

Versio	1	2	3	4	5	6
A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A
B	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A
C	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A
D	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A
E	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A	100 % A
F	100 % A	100 % A	100 % A	80 % A 20 % -/ Y	100 % A	100 % A

6.6 Iskunkestävyys

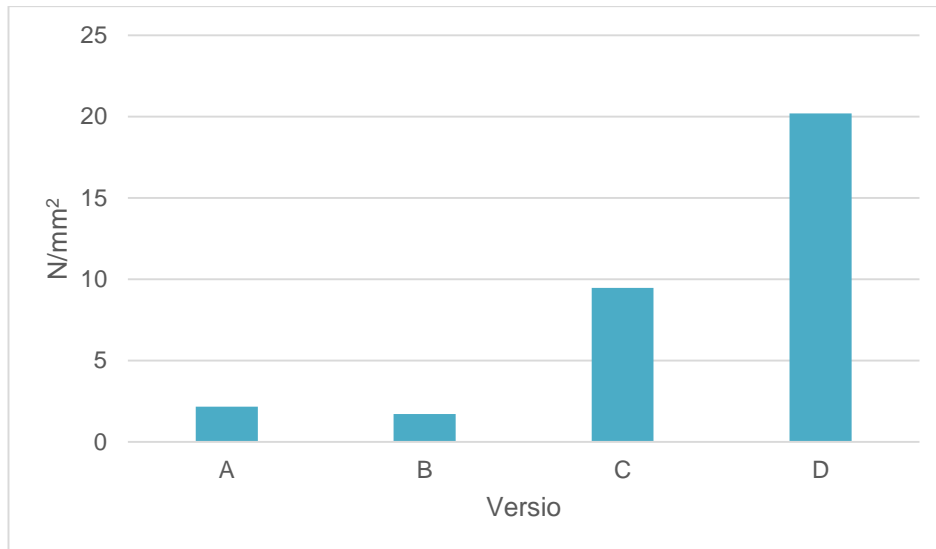
Iskunkestävyyden testauksessa käytettiin samoja pinnoitettuja betonilaattoja kuin kiinnitarttuvuuden testauksessa. Vaatimus oli, että halkeiluja ei saisi esiintyä. Testin läpäisivät hyväksytysti versiot C ja D (taulukko 12). Tuloksien perusteella pudotuskorkeus olisi voinut olla hieman matalampi, jotta mahdolliset erot olisivat tulleet paremmin esille.

Taulukko 12. Iskunkestävyydestä, joka on arvosteltu hyväksytyksi/ hylätyksi menetelmänä

Versio	1. pudotus	2. pudotus	3. pudotus	4. pudotus	5. pudotus	ka
A	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty
B	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty
C	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty
D	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty	Hyväksytty
E	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty
F	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty	Hylätty

6.7 Taivutuslujuus

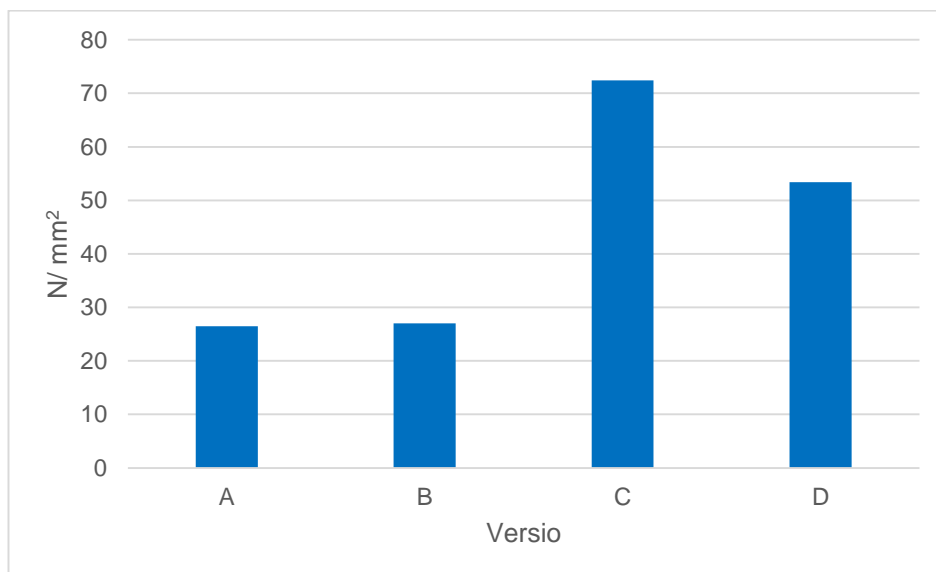
Parhaiten taivutuslujuuden testauksessa pärjasi versio D. Taivutuslujuuden testauksessa taivutusasteiden välinä käytettiin 4 mm:ä. C- ja D-versioiden mittausnopeus oli 2 mm/min ja A- ja B-versioilla 1 mm/min. Mittausnopeus määräytyi näytekappaleen korkeuden keskiarvon perusteella. Jos keskiarvo oli alle 3,50 mm, mittausnopeudeksi valittiin 1 mm/min. A- ja B-versioiden pituuksia ei voitu mitata, koska koekappaleet olivat käyräytyneet kuivumisen aikana. Pituuden mittana käytettiin standardissa mainittua 80 mm:n mittaa. Tuloksiin saattoi osittain vaikuttaa se, että A- ja B-versioiden valamisessa muotteihin ilma ei poistunut seoksista muottien täytön jälkeen. A- ja B-versiot olivat myös koostumukseltaan erilaisia kuin versiot C ja D. C- ja D-versioista ilma poistui hyvin ennen kovettumisreaktion alkamista. Kuvassa 23 on esitetty taivutuslujuuksien keskiarvot. Kaikkien koekappaleiden taivutuslujuudet ja mitat on esitetty liitteessä 4.



Kuva 23. Taivutuslujuuksien keskiarvot

6.8 Puristuslujuus

Puristuslujuustestistä parhaiten suoriutui versio C. A- ja B-versiot saivat heikoimmat tulokset. Tässä esiintyi sama ilmiö koekappaleiden valamisen suhteen kuin taivutuslujuustestissäkin. A- ja B-versioiden koekappaleiden sisältä ei poistunut ilma, mikä saattoi vaikuttaa tuloksiin. Kuvassa 24 on esitetty puristuslujuuksien keskiarvot. Kaikkien koekappaleiden puristuslujuudet ja mitat on esitetty liitteessä 5.



Kuva 24. Puristuslujuuksien keskiarvot

6.9 Puhdistettavuus

Puhdistettavuustestissä erot olivat todella pieniä eri versioiden välillä. Testi oli tarkoitettu tehdä pelkästään huoneenlämmössä, mutta selkeämpien erojen löytämiseksi versioiden välillä testi tehtiin myös +50-asteisessa uunissa. Huoneenlämmössä eroja syntyi hyvin vähän, mutta kuitenkin sen verran, että voitiin todeta version D:n olleen heikoin. Uunissa eroja versioiden välille ei syntynyt lainkaan. Taulukossa 13 on esitetty tulokset huoneenlämmössä ja taulukossa 14 on tulokset +50-asteisessa uunissa. Arviointi on tehty taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 13. Puhdistettavuustestin tulokset huoneenlämmössä

Huoneenlämpö	A	B	C	D
Kesärengas 1 vrk	5	5	5	5
Kesärengas 7 vrk	5	5	5	4
Talvirengas 1 vrk	5	5	5	5
Talvirengas 7 vrk	5	4	5	4

Taulukko 14. Puhdistettavuus testin tulokset +50-asteisessa uunissa

Uuni +50 °C	A	B	C	D
Kesärengas 7 vrk	5	5	5	5
Talvirengas 7 vrk	5	5	5	5

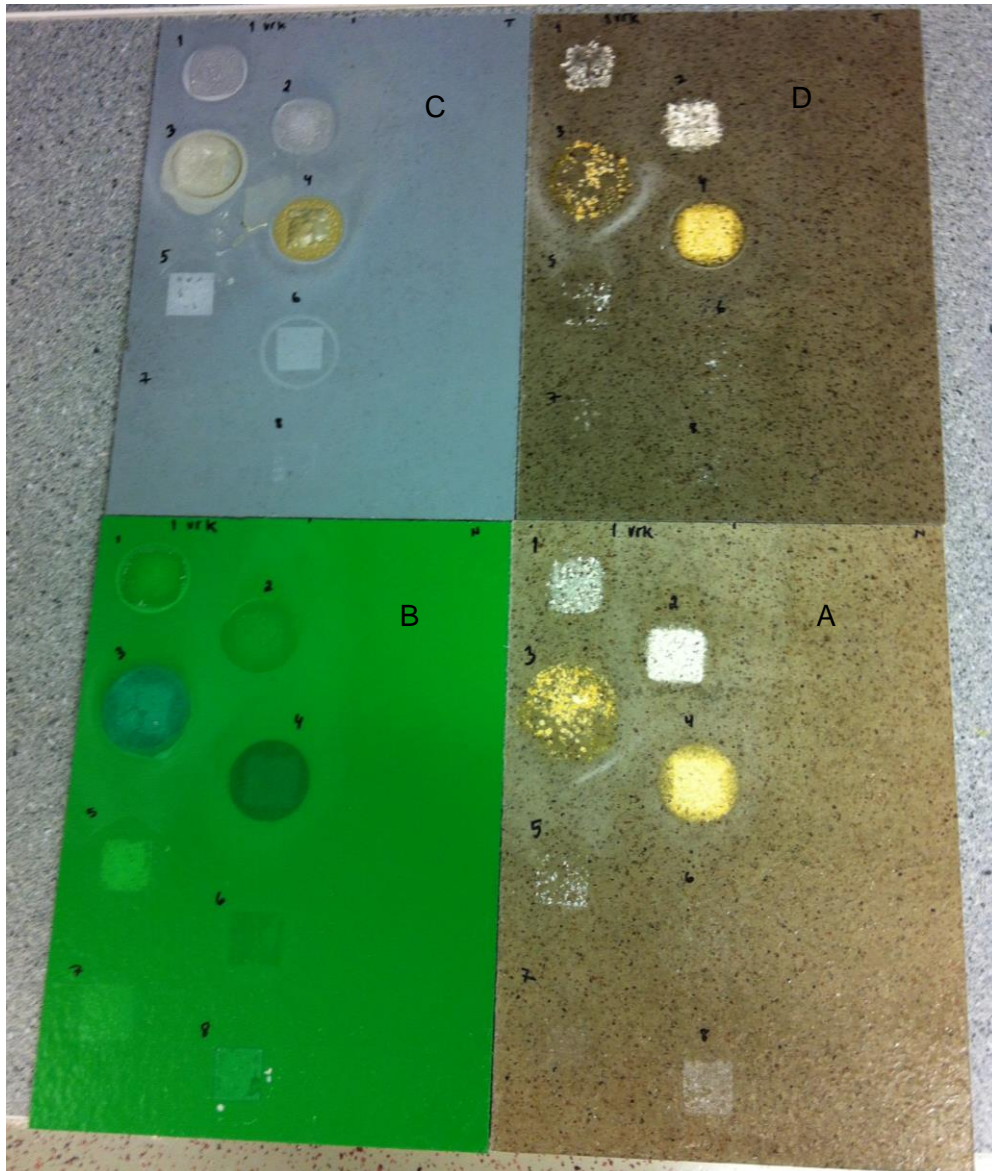
6.10 Kemikaalinkesto

24 tunnin kemikaalikestotestissä saatiin pieniä eroja esille. Arvostelu suoritettiin taulukon 5 mukaan. Parhaiten testistä suoriutuivat tuoteversiot B ja C. Liuokset 3 ja 4 osoittautui kaikille tuoteversioille hyvin rankoiksi, ja jokaisessa tuoteversiossa tapahtui voimakkaita muutoksia pintarakenteessa. Vaikka testi kesti vain vuorokauden, olivat testissä käytetyt liuokset hyvin vahvoja, mikä teki testistä vaativan. Taulukossa 15 on esitetty kemikaalikestotestin tulokset ja kuvassa 25 on esitetty testikappaleet 24 tunnin testauksen jälkeen.

Taulukko 15. Kemikaalikestotestin tulokset

Nro ja testiliuos	A	B	C	D
1 etikkahappo 10 %	1	2	1	1
2 muurahaishappo 10 %	1	2	1	1
3 suolahappo 36 %	1	1	1	1
4 typpihappo 50 %	1	1	1	1
5 fosforihappo 50 %	1 *	2	2	1*
6 rikkihappo 50 %	4	4	2	3
7 ammoniakki 20 %	5	4	5	3
8 natriumhydroksidi 20 %	2	2	4	4
Keskiarvo	2,0	2,3	2,1	1,9

*suodatinpaperi juuttunut pintaan kiinni



Kuva 25. Testikappaleet 24 tunnin testauksen jälkeen

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli verrata epoksi-silaanipinnoitteen mekaanisia ominaisuuksia ja puhdistettavuutta käytössä oleviin epoksinpinnoitteisiin. Työssä tutkittiin, saadaanko epoksi-silaanipinnoitteella parannettua lattiapinnoitteen ominaisuuksia. Työhön valittiin testimenetelmiä, jotka soveltuvat märän ja kuivan maalipinnan testaukseen. Testit kohdistuivat pääasiassa kuivan maalipinnan ja mekaanisten ominaisuuksien testaamiseen.

Tuoteversiot (A–F) eivät eronneet toisistaan kovinkaan paljon, kun otettiin huomioon kaikki tulokset eri testimenetelmistä. Yksittäisten testimenetelmien tulokset osoittivat kuitenkin, että tuoteversioiden välillä oli eroa. Tuoteversioille A–D tehtiin 13 testiä ja tuoteversioille E–F kolme testiä. Parhaimmat tulokset testeissä saivat tuoteversiot C, D ja A, joiden ero oli kuitenkin vähäinen. Pelkästään epoksi-silaania sisältävät tuoteversiot A ja B suoriutuivat kovuutta (300 µm) ja kuivumista mittaavista testeistä paremmin kuin pelkästään epoksia sisältävät tuoteversiot C ja D. Taulukossa 16 on esitetty karkeasti tulokset tuoteversioiden välisestä paremmuusjärjestyksestä eri testimenetelmien kohdalla. Arviointi tehtiin pisteytysmenetelmällä. Parhaiten testissä suoriutunut tuoteversio sai yhden pisteen ja heikoiten pärjännyt kuusi pistettä. Tuoteversioiden A–D osalta laskettiin lisäksi eri testimenetelmien yhteenlaskettu summapistemäärä. Mitä vähemmän summapisteitä tuoteversio sai, sitä parempia tuloksia se keskimäärin sai kaikissa testeissä.

Taulukko 16. Yhteenveto testituloksista

Testimenetelmä	A	B	C	D	E	F
Kovuus 150 µm*	1	4	2	3		
Kovuus 300 µm*	1	2	3	4		
Kuivuminen	2	1	3	3		
Kulumiskestävyys	3	4	5	1	2	6
Kiinnitarttuvuus	5	6	2	1	4	3
Taivutuslujuus	3	4	2	1		
Puristuslujuus	4	3	1	2		
Puhdistettavuus	1	2	1	3		
Kemikaalinkesto	3	1	2	4		
Pisteet	23	27	21	22		

*14 vrk

1	= 1. paras tulos
2	= 2. paras tulos
3	= 3. paras tulos
4	= 4. paras tulos
5	= 5. paras tulos
6	= 6. paras tulos

Iskunkestävyydestin tuloksia ei huomioitu pisteytyksessä, koska arvostelu tehtiin hyväksytty/hylätty periaatteella. Hyväksytysti testin läpäisivät tuoteversiot C ja D. Epoksi-silaa-nimaalin ja epoksi-silaanilakan yhdistelmäversiolle E ja epoksimaalin ja epoksi-silaani-lakan yhdistelmäversiolle F tehtiin kolme testiä, jotka olivat kulutuskestävyys, kiinnitart-tuvuus ja iskunkestävyys. Pisteytyksen perusteella tuoteversio C oli paras, mutta tuote-versiot D ja A suoriutuivat lähes yhtä hyvin. Tuoteversio B oli kokonaisuudessaan hieman heikompi.

8 Johtopäätökset

Summapistemäärien vertailujen sijaan tuoteversioita voitaisiin lähteä tarkastelemaan yksittäisten testien perusteella, koska tuoteversiot olivat pisteytyksen suhteen hyvin lähellä toisiaan. Uutta tuotetta kehiteltäessä lähtökohtana ovat ominaisuudet, joita tuotteelta vaaditaan. Jos esimerkiksi tuotteen suurimmat vaatimukset olisivat kovuus ja nopea kui-vuminen, olisivat tuoteversiot A ja B hyviä vaihtoehtoja. Jos taas vaadittaisiin hyvää ku-lutuksenkestävyyttä ja kiinnitarttuvuutta, olisi tuoteversio D paras vaihtoehto.

Jatkokehitystä ajatellen betonilaattojen telauksiin pitäisi kiinnittää huomiota. Tuoteversi-oiden A, B ja E telauksissa jokaisen telatun kerroksen grammamäärät punnittiin tarkasti, mutta tuoteversioissa C, D ja F telattuja määriä ei punnittu. Suositusmäärät grammaa per neliölle olivat lähes samat kaikissa tuoteversioissa, lukuun ottamatta tuoteversiota C, jossa suositeltiin hieman paksumpaa kerrosta. Taivutus- ja puristuslujuuksien testaa-misessa tuoteversiot A ja B eivät välttämättä soveltunut testiin, koska koekappaleet olivat melko paksuja ja ne jäivät hyvin hauraiksi. Tämä luultavasti vaikutti testituloksiin heiken-tävästi. Käyttöajan määrittämiseen käytetty ICI-menetelmän soveltuvuus A- ja B-tuote-versioiden osalta ei toiminut. Käyttöaika oli moninkertainen suositukseen nähden.

Työn tavoite saavutettiin saamalla hyödyllistä tietoa epoksi-silaanista ja sen mekaani-sista ominaisuuksista jatkokehitystä ajatellen. Jatkossa tarvittaisiin mahdollisesti CE-merkintöihin ja mekaanisten ominaisuuksien raja-arvoihin perustuvaa selvitystä epoksi-silaanipohjaisista tuotteista. CE-merkintöihin ja raja-arvoihin perustuva testausmene-telmä toisi luotettavuutta eri tuotteiden mekaanisten ominaisuuksien vertailuun.

Lähteet

- 1 Tikkurilan yritysesittely. 2016. Tikkurila Oyj.
- 2 Lamaka, S.V., Xue, H.B., Meis, N., Esteves, A.C. & Ferreira, M.G. 2015. Fault-tolerant hybrid epoxy-silane coating for corrosion protection of magnesium alloy AZ31. *Progress in Organic Coatings*. 80, 98-105.
- 3 Betoniteollisuus ry. Mihin betonia käytetään. Verkkodokumentti. www.beton.com. Luettu 8.3.2016.
- 4 Tikkurila Coatings. Betonilattioiden pinnoitus.
- 5 Tikkurila Oyj. Betonilattiapinnoitteet. Verkkodokumentti. http://www.tikkurila.fi/teollinen_maalaus/betonilattiapinnoitteet. Luettu 17.3.2016.
- 6 Palander Tuomas. 2010. Lattiamateriaalit ja niiden valintaan vaikuttavat tekijät.
- 7 Engblom Magnus. 2010. Teolliset lattiapinnoitteet PowerPoint- esitys.
- 8 Brock, T., Groteklaes, M., Mischke, P. 2010. *European Coatings Handbook*. Hannover: Vincentz Network.
- 9 The Macrogalleria. 2005. Epoxy Resins. Verkkodokumentti. <http://pslc.ws/macrog/epoxy.htm>. Luettu 21.4.2016.
- 10 Primeaux II, D.J. 2004. Polyurea vs Polyurethane & Polyurethane/Polyurea: What's the Difference? 2004 PDA Annual Conference, March 2–4, 2004, Tampa, Florida. s.1-20.
- 11 Teke Oy. 2013. Polyurea. Verkkodokumentti. <http://www.teke.fi/fi/tuotteet/polyurea>. Luettu 23.3.2016.
- 12 <http://www.pbpflooringsolutions.com/36-home/198-mma-article>. Luettu 25.3.2016.
- 13 Betonilattiat osa 3 – design-lattiat Martti Matsinen, diplomi-insinööri toimitusjohtaja, Piimat Oy, 2009.
- 14 Degussa AG Aerosil & Silanes. Verkkodokumentti. Luettu 21.3.2016.
- 15 Evonik Industries. Dynasylan® GLYMO. Verkkodokumentti. <https://www.dynasylan.com/lpaproductfinder/page/productsbytext/detail.html?pid=208>. Luettu 1.4.2016.

- 16 ISO 2811-2. 2011. Paints and varnishes- Determination of density Part 2: Immersed body (plummet) method.
- 17 SFS-EN ISO 2884-1. 2006. Paints and varnishes. Determination of viscosity using rotary viscometers. Part 1: Cone-and-plate viscometer operated at a high rate of shear.
- 18 EN ISO 9514. 2005. Paints and varnishes. Determination of the pot life of multi-component coating systems. Preparation and conditioning of samples and guidelines for testing.
- 19 SFS-EN ISO 1522. 2007. Paints and varnishes. Pendulum damping test. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- 20 SFS-EN ISO 9117-4. 2012. Maalit ja lakat. Kuivumiskokeet. Osa 4: Testaus mekaanisella piirturilla. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- 21 SFS-EN ISO 2813. 2014. Paints and varnishes. Determination of specular gloss of non-metallic paint films at 20°, 60° and 85°. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- 22 SFS-EN ISO 5470-1.1999. Rubber- or plastics-coated fabrics - Determination of abrasion resistance - Part 1: Taber abrader. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- 23 SFS-EN ISO 4624 2003. Maalit ja lakat. Tarttuvuuden arviointi vetokokeella. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- 24 EN ISO 6272-1. 2012. Paints and varnishes. Rapid-deformation (impact resistance) tests. Part 1: Falling-weight test, large-area indenter. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- 25 ISO 178. 1993. Plastics- Determination of flexural properties.
- 26 ISO 604. 1993. Plastics- Determination of compressive properties.
- 27 SFS EN ISO 2812-3. 2013. Paints and varnishes. Method using an absorbent medium.

Heilurikovuuden mittaustulokset

Heilurikovuuden tulokset ovat heilahduksia. Jokaisesta kalvopaksuudesta määritettiin kaksi arvoa.

WFT	A				B				C				D			
	150 µm		300 µm		150 µm		300 µm		150 µm		300 µm		150 µm		300 µm	
	mit1	mit2	mit1	mit2	mit1	mit2	mit1	mit2	mit1	mit2	mit1	mit2	mit1	mit2	mit1	mit2
1 vrk	86	94	42	54	45	53	21	21	33	33	22	22	15	15	8	8
2 vrk	116	112	84	95	89	90	42	41	71	71	51	52	47	45	29	30
3 vrk	129	125	98	106	103	102	57	56	86	88	70	70	67	67	46	47
7 vrk	131	140	109	121	116	116	76	74	98	99	88	88	94	94	71	73
14 vrk	145	147	122	126	123	123	89	88	105	104	93	94	106	107	88	88

mit = mittaus

Kiillon mittaustulokset

Kiilto 60 °	A	B	C	D
mittaus 1	97,5	53,7	101,0	101,0
mittaus 2	97,3	52,0	101,0	100,0
mittaus 3	99,0	33,4	100,0	100,0
mittaus 4	95,5	61,4	101,0	100,0
mittaus 5	100,0	61,6	99,8	102,0
mittaus 6	98,7	45,8	100,0	101,0
ka	98,2	51,3	101,0	101,0

Kulutuskestävyyden tulokset ja kuivakalvonpaksuudet

Painohäviöt on laskettu harmaalla pohjalla olevista sarakkeista maksimikierrosmäärästä, jonka kukin tuote kesti. Painohäviöiden keskiarvoista on laskettu jokaiselle tuotteelle kulutusindeksi, eli kuinka monta mg yksi kierros kuluttaa tuotetta.

Tuoteversio	Levyn nro	alku-massa (g)	massa 200 kierroksen jälkeen (g)	massa 500 kierroksen jälkeen (g)	loppu-massa 1000 kierroksen jälkeen (g)	paino-häviö (g)	kulutus-indeksi (mg)	kulutus-indeksi keskiarvo (mg)
A	1	83,361	83,220	83,040		0,320	0,6402	
	2	83,205	83,099	82,930		0,275	0,5498	
	3	83,088	82,855	82,502		0,586	1,1714	0,79
B	1	83,585	83,403	83,143		0,442	0,88	
	2	84,064	83,894	83,691		0,373	0,75	
	3	85,419	85,254	84,950		0,470	0,94	0,86
C	1	87,693			86,813	0,880	0,8802	
	2	87,085			85,970	1,115	1,1149	
	3	87,616			86,227	1,389	1,3887	1,13
D	1	79,606	79,458	79,245		0,361	0,7224	
	2	80,821	80,632	80,462		0,359	0,7178	
	3	79,456	79,327	79,263		0,193	0,3852	0,61
E	1	84,732	84,544	84,264		0,468	0,94	
	2	83,525	83,402	83,229		0,296	0,59	
	3	83,898	83,751	83,531		0,367	0,73	0,75
F	1	103,410	103,267	102,961	102,462	0,948	0,9482	
	2	99,452	99,255	98,703	97,655	1,796	1,7965	
	3	99,310	99,145	98,664	98,257	1,053	1,0533	1,27

Kulutuskestävyysslevyjien kuivakalvonpaksuudet

Versio	Vertailualue	Mitatut arvot, μm	Vertailualueiden keskiarvo, μm	Alin mitattu arvo, μm	Ylin mitattu arvo, μm
A1	1	201 188 218	198	151	228
	2	173 228 151			
	3	195 216 214			
A2	1	160 135 191	190	135	263
	2	263 212 162			
	3	239 172 181			
A3	1	208 143 163	188	143	208
	2	195 207 206			
	3	188 188 198			

Versio	Vertailualue	Mitatut arvot, μm	Vertailualueiden keskiarvo, μm	Alin mitattu arvo, μm	Ylin mitattu arvo, μm
B1	1	163 191 171	188	163	226
	2	197 185 182			
	3	195 226 184			
B2	1	236 284 187	240	186	302
	2	267 288 186			
	3	302 210 206			
B3	1	205 267 233	250	178	321
	2	321 256 178			
	3	258 221 317			

Versio	Vertailualue	Mitatut arvot, μm	Vertailualueiden keskiarvo, μm	Alin mitattu arvo, μm	Ylin mitattu arvo, μm
C1	1	1107 1078 1003	1050	966	1107
	2	966 1014 1043			
	3	1056 1107 1074			
C2	1	1149 1172 1184	1108	1028	1184
	2	1129 1088 1028			
	3	1052 1064 1108			
C3	1	971 1059 1144	1175	970	1421
	2	1330 1421 1330			
	3	1257 1089 970			

Versio	Vertailualue	Mitatut arvot, μm	Vertailualueiden keskiarvo, μm	Alin mitattu arvo, μm	Ylin mitattu arvo, μm
D1	1	182 192 210	208	160	248
	2	226 248 238			
	3	234 160 188			
D2	1	175 189 210	218	175	264
	2	233 254 264			
	3	251 206 185			
D3	1	190 236 178	216	178	253
	2	217 184 252			
	3	188 253 252			

Versio	Vertailualue	Mitatut arvot, μm	Vertailualueiden keskiarvo, μm	Alin mitattu arvo, μm	Ylin mitattu arvo, μm
E1	1	201 204 238	222	201	241
	2	226 240 235			
	3	201 211 241			
E2	1	268 189 224	236	189	283
	2	210 232 260			
	3	235 223 283			
E3	1	216 236 228	229	211	240
	2	233 229 239			
	3	211 232 240			

Versio	Vertailualue	Mitatut arvot, μm	Vertailualueiden keskiarvo, μm	Alin mitattu arvo, μm	Ylin mitattu arvo, μm
F1	1	1334 1228 1198	1326	1198	1415
	2	1393 1385 1414			
	3	1415 1355 1199			
F2	1	1157 1130 1058	1101	1019	1157
	2	1019 1064 1093			
	3	1106 1157 1124			
F3	1	1199 1222 1234	1158	1078	1234
	2	1179 1138 1078			
	3	1102 1114 1158			

Taivutuslujuuskappaleiden mitat ja tulokset

Jokaisesta koekappaleesta on mitattu pituus, leveys ja korkeus kolmesta eri kohdasta, joista on sitten laskettu keskiarvo. Rinnakkaiskokeet on ilmoitettu samalla tuoteversion kirjaimella ja 1, 2 tai 3, esimerkiksi A1, A2 ja A3.

Koekappale	Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm
A1			
mittaus 1	80,00	10,13	3,35
mittaus 2	80,00	10,10	3,37
mittaus 3	80,00	10,19	3,61
ka	80,00	10,14	3,44
A2			
mittaus 1	80,00	9,99	3,41
mittaus 2	80,00	9,99	3,33
mittaus 3	80,00	10,19	3,45
ka	80,00	10,06	3,40
A3			
mittaus 1	80,00	9,95	3,60
mittaus 2	80,00	10,00	3,31
mittaus 3	80,00	10,12	3,54
ka	80,00	10,02	3,48

Koekappale	Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm
B1			
mittaus 1	80,00	9,02	3,20
mittaus 2	80,00	9,33	3,55
mittaus 3	80,00	9,31	3,56
ka	80,00	9,22	3,44
B2			
mittaus 1	80,00	9,15	3,17
mittaus 2	80,00	9,28	3,53
mittaus 3	80,00	9,35	3,56
ka	80,00	9,26	3,42
B3			
mittaus 1	80,00	9,02	3,55
mittaus 2	80,00	9,35	3,49
mittaus 3	80,00	9,15	3,02
ka	80,00	9,17	3,35

Koekappale	Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm
C1			
mittaus 1	80,32	9,98	4,47
mittaus 2	80,36	10,03	4,76
mittaus 3	80,22	10,15	4,21
ka	80,30	10,05	4,48
C2			
mittaus 1	80,23	9,88	4,42
mittaus 2	80,28	10,01	4,80
mittaus 3	80,42	10,15	4,27
ka	80,31	10,01	4,50
C3			
mittaus 1	79,84	10,03	4,48
mittaus 2	79,85	10,16	4,75
mittaus 3	79,77	9,90	4,03
ka	79,82	10,03	4,42

Koekappale	Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm
D1			
mittaus 1	79,95	10,15	4,19
mittaus 2	80,01	10,13	4,60
mittaus 3	79,81	10,16	4,22
ka	79,92	10,15	4,34
D2			
mittaus 1	79,69	10,16	4,01
mittaus 2	79,83	10,10	4,22
mittaus 3	79,76	9,98	4,02
ka	79,76	10,08	4,08
D3			
mittaus 1	80,10	10,13	4,09
mittaus 2	80,41	10,19	4,54
mittaus 3	80,44	10,04	4,34
ka	80,32	10,12	4,32

Taivutuslujuuskokeen tulokset

Rinnakkaiskokeet on ilmoitettu samalla tuoteversion kirjaimella ja 1, 2 tai 3 esimerkiksi A1, A2 ja A3.

Koekappale	Murtolujuus (N)
A1	43,893
A2	43,325
A3	41,673
B1	32,012
B2	23,785
B3	35,754
C1	316,594
C2	309,508
C3	320,709
D1	654,761
D2	575,835
D3	613,583

Puristuslujuuskappaleiden mitat ja tulokset

Jokaisesta koekappaleesta on mitattu pituus, leveys ja korkeus kolmesta eri kohdasta, joista on sitten laskettu keskiarvo. Rinnakkaiskokeet on ilmoitettu samalla tuoteversion kirjaimella ja 1, 2 tai 3 esimerkiksi A1, A2 ja A3.

Koekappale	Mittaus	Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm
A1	mittaus 1	12,66	12,53	12,76
	mittaus 2	12,65	12,32	12,72
	mittaus 3	12,59	12,13	12,69
ka		12,63	12,33	12,72
A2	mittaus 1	12,39	12,52	12,67
	mittaus 2	12,49	12,47	12,65
	mittaus 3	12,43	12,45	12,68
ka		12,44	12,48	12,67
A3	mittaus 1	12,32	12,71	12,69
	mittaus 2	12,61	12,52	12,56
	mittaus 3	12,47	12,57	12,79
ka		12,47	12,60	12,68
A4	mittaus 1	12,35	12,73	12,57
	mittaus 2	12,24	12,58	12,5
	mittaus 3	12,45	12,7	12,55
ka		12,35	12,67	12,54
A5	mittaus 1	12,47	12,55	12,74
	mittaus 2	12,43	12,45	12,6
	mittaus 3	12,53	12,59	12,71
ka		12,48	12,53	12,68
A6	mittaus 1	12,53	12,54	12,52
	mittaus 2	12,51	12,44	12,5
	mittaus 3	12,42	12,46	12,63
ka		12,49	12,48	12,55

Koekappale	Mittaus	Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm
B1	mittaus 1	12,61	12,74	12,65
	mittaus 2	12,7	12,74	12,62
	mittaus 3	12,76	12,94	12,78
ka		12,69	12,81	12,68
B2	mittaus 1	12,9	12,91	12,81
	mittaus 2	12,84	12,74	12,77
	mittaus 3	12,78	12,76	12,73
ka		12,84	12,80	12,77
B3	mittaus 1	12,6	12,83	12,84
	mittaus 2	12,71	12,7	12,72
	mittaus 3	12,69	12,71	12,74
ka		12,67	12,75	12,77
B4	mittaus 1	12,55	12,72	12,75
	mittaus 2	12,52	12,69	12,66
	mittaus 3	12,51	12,67	12,72
ka		12,53	12,69	12,71
B5	mittaus 1	12,52	12,62	12,92
	mittaus 2	12,44	12,47	12,81
	mittaus 3	12,51	12,51	12,81
ka		12,49	12,53	12,85
B6	mittaus 1	12,74	12,82	12,77
	mittaus 2	12,7	12,68	12,76
	mittaus 3	12,75	12,64	12,72
ka		12,73	12,71	12,75

Koekappale	Mittaus	Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm
C1	mittaus 1	14,15	13,75	13,82
	mittaus 2	14,03	13,88	13,77
	mittaus 3	14,08	13,84	13,91
ka		14,09	13,82	13,83
C2	mittaus 1	14,09	13,82	13,91
	mittaus 2	14,08	13,78	13,75
	mittaus 3	14,05	13,79	13,81
ka		14,07	13,80	13,82
C3	mittaus 1	14,25	13,76	13,74
	mittaus 2	14,12	13,79	13,81
	mittaus 3	13,99	13,8	13,88
ka		14,12	13,78	13,81
C4	mittaus 1	14,26	13,71	13,83
	mittaus 2	14,22	13,74	13,87
	mittaus 3	14,14	13,84	13,87
ka		14,21	13,76	13,86
C5	mittaus 1	14,05	13,59	13,88
	mittaus 2	14,18	13,67	13,86
	mittaus 3	14,26	13,67	13,87
ka		14,16	13,64	13,87
C6	mittaus 1	14,12	13,85	13,73
	mittaus 2	14,13	13,86	13,73
	mittaus 3	14,09	13,91	13,75
ka		14,11	13,87	13,74

Koekappale	Mittaus	Pituus, mm	Leveys, mm	Korkeus, mm
D1	mittaus 1	13,84	13,86	13,6
	mittaus 2	13,84	13,82	13,77
	mittaus 3	13,87	13,82	13,81
ka		13,85	13,83	13,73
D2	mittaus 1	13,74	13,89	13,61
	mittaus 2	13,77	13,87	13,68
	mittaus 3	13,89	13,86	13,82
ka		13,80	13,87	13,70
D3	mittaus 1	14,03	13,7	13,69
	mittaus 2	14,04	13,74	13,71
	mittaus 3	14,06	13,78	13,92
ka		14,04	13,74	13,77
D4	mittaus 1	14,1	13,61	13,73
	mittaus 2	14,09	13,72	13,71
	mittaus 3	14,07	13,79	13,78
ka		14,09	13,71	13,74
D5	mittaus 1	13,89	13,73	13,52
	mittaus 2	13,8	13,79	13,64
	mittaus 3	13,75	13,86	13,78
ka		13,81	13,79	13,65
D6	mittaus 1	14,11	13,62	13,51
	mittaus 2	14,18	13,68	13,59
	mittaus 3	14,17	13,86	13,72
ka		14,15	13,72	13,61

Puristuslujuuskokeen tulokset

Rinnakkaiskokeet on ilmoitettu samalla tuoteversion kirjaimella ja 1, 2 tai 3 esimerkiksi A1, A2 ja A3.

Koekappale	Puristuslujuus (N/ mm ²)
A1	20,326
A2	24,289
A3	30,915
A4	27,503
A5	21,027
A6	34,738
B1	31,407
B2	22,732
B3	22,174
B4	23,476
B5	31,820
B6	30,313
C1	71,212
C2	73,138
C3	73,459
C4	72,812
C5	71,562
C6	72,331
D1	54,817
D2	52,513
D3	52,974
D4	52,764
D5	54,369
D6	52,931