

Svetlana Boudi

Wollastoniitti funktionaalisenä täyteaineena korroosionestomaalissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinööriytyö

17.5.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Svetlana Boudi Wollastoniitti funktionaalisenä täyteaineena korroosionestomaalissa 51 sivua + 8 liitettä 17.5.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Kemiantekniikka
Ohjaajat	Tuotekehityskemisti Andrei Mukkonen, Teknos Oy Yliopettaja Kai Laitinen, Metropolia Ammattikorkeakoulu
<p>Wollastoniitti on silikaattimineraali, jota käytetään funktionaalisenä täyteaineena erityyppisissä maaleissa. Wollastoniitti parantaa korroosionestomaaleissa maalin mekaanisia ja tartuntaominaisuuksia, kestävyyttä sekä korroosionestoa.</p> <p>Insinööriyön tarkoituksena oli tutkia, miten maalin ominaisuudet muuttuvat, kun talkkia korvataan wollastoniittitäyteaineella epoksimaalissa. Samalla tavoitteena oli nostaa maalin kuiva-ainepitoisuutta 86 prosenttiin, säilyttää korroosionesto-ominaisuuksia ja lisätä kiiltoa. Testauksiin otettiin neljä eri wollastoniittinäytettä, joiden pitoisuus maaleissa oli 24 painoprosenttia sekä referenssinä oli talkkitäyteaineella epoksimaali. Alussa analysoitiin märkämaalien ominaisuudet muun muassa viskositeetit ja ominaispaino. Mekaanisia ominaisuuksia varten testeihin otettiin kolme eri tavoin käsiteltyä terästä: kylmävalssattu, kylmävalssattu harjattu ja rautafosfatoitu teräs. Pinnoitteista tutkittiin kovuutta, iskunkestävyyttä, joustavuutta sekä kiiltoa.</p> <p>Testattavien maalien ominaisuuksien perusteella paras maalinäyte sekä referenssi otettiin kondenssi-, suolasumu- ja upotustesteihin. Koestusaikoja oli 480, 720, 1 440 ja 3 000 tuntia. Koestuksen päätyttyä maalattujen koelevyjen korroosiota arvioitiin standardin ISO 4628 mukaisesti, maalikalvon tartunta testattiin vetokokeella.</p> <p>Tulosten perusteella todettiin, että wollastoniitilla täytetty epoksimaali antaa hyvän tartuntakyvyn sekä säilyttää korroosiosuojan. Referenssimaaliin verrattuna wollastoniittitäyteaineella maali pysyy hyvällä tasolla mekaanisten ominaisuuksien perusteella testituloksissa.</p> <p>Työn tavoite saavutettiin kokoamalla uutta hyödyllistä tietoa wollastoniittitäyteaineen käyttämisestä korroosionestomaalissa. Tutkimukset ovat hyödyllisiä jatkokehityksen kannalta.</p>	
Avainsanat	adheesio, epoksi, talkki, täyteaine, wollastoniitti

Author Title Number of Pages Date	Svetlana Boudi Wollastonite as a Functional Filler in Corrosion Resistance Paint 51 pages + 8 appendices 17 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Instructors	Andrei Mukkonen, Research Chemist ,Teknos Oy Kai Laitinen, Principal Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences
<p>Wollastonite is a silicate mineral which is used as functional filler in various types of paints. Wollastonite improves paint's mechanical and adhesion properties, durability and corrosion resistance in corrosion resistance paint.</p> <p>The purpose of the thesis was to research how the properties of paint change when talc is replaced by wollastonite filler in epoxy paint. At the same time, the objective was to increase the dry solid content of the paint to 86 %, to maintain anti-corrosion properties and to increase gloss. Four different wollastonite samples were taken for testing, each with a wollastonite concentration of 24 % percent by weight, and a reference sample was epoxy paint with a talc filler. In the beginning the wet paint properties were analyzed, including viscosities and specific gravity. For mechanical properties, three different types of steel were used for testing: cold rolled, cold-rolled brushed and ferro-phosphated steel. Each coating sample was analysed for hardness, impact resistance, flexibility and gloss.</p> <p>On the basis of the characteristics of the paint to be tested, the best paint sample and reference were taken for condensate, salt spray and immersion tests. Test periods were 480, 720, 1 440 and 3 000 hours. At the end of the test, the corrosion of the test plates was assessed in accordance with the ISO 4628 standard. The adhesion of the paint film was tested by a pull-off test.</p> <p>Results indicated that wollastonite-filled epoxy paint provides good adhesion and maintained corrosion protection. Comparing the reference paint with the wollastonite filler, the paint remains at a good level based on mechanical properties in the test results.</p> <p>The aim of the work was achieved by compiling new useful information on the use of wollastonite filler in a corrosion resistance paint. These analyzes are useful for further development.</p>	
Keywords	adhesion, epoxy, filler, talc, wollastonite

Sisällys

Käsitteet ja lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Maalikemiaa	2
2.1	Liutinohenteisten epoksimaalien koostumus ja ominaisuudet	3
2.2	Täyteaineiden valmistus ja luokittelu	5
2.2.1	Talkki	5
2.2.2	Wollastoniitti	7
2.3	Maalinvalmistusprosessi	8
2.3.1	Dispergointi	9
2.3.2	Jälkisekoitus ja viimeistely	9
3	Maalien ja maalipinnoitteiden tutkimusmenetelmiä	10
3.1	Viskositeetin määrittäminen	10
3.2	Ominaispaino	11
3.3	Valumiskoe	12
3.4	König-kovuus	13
3.5	Kiillon mittaus	13
3.6	Iskunkestävyydesti	14
3.7	Taivutustesti	15
3.8	Vetokoe	15
4	Korroosio	18
4.1	Korroosionestotekniikka	18
4.2	Metallien esikäsitteilyt	19
4.3	Korroosionestomaalit	20
5	Koemateriaalit	21
5.1	Tutkittava maali	21
5.2	Tutkittavat täyteaineet	21
5.3	Maalien valmistus laboratoriossa	22
5.4	Materiaalivalinta	23
5.5	Testialustojen valmistus	24
6	Koemenetelmät	25

6.1	Nestemäisten maalien ja pinnoitteiden testimenetelmät	25
6.1.1	Viskositeetti ja ominaispaino	25
6.1.2	König-kovuus ja kiilto	26
6.1.3	Valuminen	26
6.1.4	Iskunkestävyydesti	27
6.1.5	Taivutustesti	27
6.1.6	Vetokoe	27
6.2	Pinnoitteiden korroosiotestaus	27
7	Tulokset ja tulosten tarkastelu	30
7.1	Viskositeetti- ja ominaispainotulokset	30
7.2	König-kovuus ja kiiltotulokset	32
7.3	Valumakeston tulokset	34
7.4	Iskunkestävyydetulokset	35
7.5	Taivutustestin tulokset	37
7.6	Korroosiotestauksien tulokset	39
7.7	Korroosiotestauksien vetokokeiden tulokset	40
7.7.1	Kondenssitestin vetokokeiden tulokset	40
7.7.2	Suolasumutestin vetokokeiden tulokset	42
7.7.3	Vesiupotustestin vetokokeiden tulokset	43
8	Yhteenveto ja johtopäätökset	45
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1. Iskunkestävyydestin tulokset	
	Liite 2. Kondenssitestin tulokset	
	Liite 3. Suolasumutestin tulokset	
	Liite 4. Vesiupotustestin tulokset	
	Liite 5. Taivutustesti kaartiomainen tuurna, halkeamien esimerkkikuvat	
	Liite 6. Taivutustestin tulokset	
	Liite 7. Pinnoitteiden kuivakalvonpaksuudet	
	Liite 8. Kiilto 60°, König-heilurin kovuudet	

Käsitteet ja lyhenteet

Adheesio	Kahden eri aineen välinen vetovoima.
Alifaattinen	Hiilivedyt, jotka sisältävät avoimia hiiliketjuja, asykliset yhdisteet.
Amiini	Ammoniakin (NH ₃) kaltaisia yhdisteitä, joissa on vetyatomin tilalla orgaaninen ryhmä.
Anisotropia	Suunnasta riippuvainen, esimerkiksi materiaalia sanotaan anisotrooppiseksi, jos sen ominaisuuden ovat eri suunnasta erilaiset.
Aromaattinen	Yhdiste, jossa on tasomainen rengasrakenne, jonka elektronit ovat delokalisoituneet koko renkaan alueelle.
DFT	<i>Dry Film Thickness</i> . Kuivakalvonpaksuus
Dispergointi	Maalin valmistuksen tärkein vaihe, jota kutsutaan jauhatukseksi.
Hartsi	Maalin side-aine, joka sitoo maalin pigmentit ja tartuttaa maali alustaansa.
Hydrofiilinen	Vesihakuinen
Hydrofobinen	Vesipakoinen
Inhibointi	Korroosion esto inhibiittien avulla, joiden toimintamekanismi perustuu anodisen, katodisen reaktion yms. estämiseen.
Jauhatusaste	Maalin rakenteen dispergoituminen haluttuun hienousasteeseen.
Koheesio	Saman aineen sisäinen vetovoima

KV-teräs	Kylmävalssattu teräs
Käsittelykuiva	Maalikalvon tila, kun se on kuivunut läpi, vastakohtana sille, että kalvon pinta on kuiva, mutta kalvon sisältö on vielä pehmeä.
L/D	<i>Length/Diameter</i> . Pituus/Halkaisija
MPa	Megapascal, N/mm ²
NDFT	<i>Nominal Dry Film Thickness</i> . Nimelliskuivakalvonpaksuus
Oktaedri	Geometrinen kappale, jonka pinnan muodostavat 8 monikulmiota eli tahkoa.
Ominaispaino	Aineen tiheyden suhdetta veden tiheyteen määrättyssä lämpötilassa.
RPM	<i>Revolutions Per Minute</i> . Kierrosnopeus minuutissa
Termoplastinen	Lämpimänä muovautuva, kuumassa pehmenevä.
Tetraedri	Monitahokas, jossa on neljä tahkoa, tahkot ovat kolmioita.
Viskositeetti	Suure, joka kuvaa fluidin kykyä vastustaa virtaamista.
WFT	<i>Wet Film Thickness</i> . Märkäkalvonpaksuus

1 Johdanto

Nykypäivänä korkealaatuisten mineraalitäytteisten polymeerimateriaalien tuotanto, joka vastaa asiakkaiden vaatimuksia, ei ole mahdollista ilman jatkuvaa reseptien kehitystä. Tuotekehityksellä pyritään hankkimaan kustannustehokkaita materiaaleja, joilla on erityisiä ja arvokkaita ominaisuuksia. Valmistustuotannossa merkittävät energiakustannukset ja monien kemikaalituotteiden hintojen nousu johtavat siihen, että on etsittävä uusia raaka-aineita maalinvalmistusteollisuudelle. Erityisen tärkeää täyteaineiden oikealla valinnalla, mukaan lukien etsimällä edulliset toiminnalliset täyteaineet on päästä vaikuttamaan lopputuotteen kustannuksiin ja laatuun. Täyteaineet ovat aktiivinen osa maaleissa ja vaikuttavat moniin materiaalien teknisiin ja käyttöominaisuuksiin. [1, s. 61–68.]

Viime vuosikymmeninä mineraalipitoiset pinnoitteet osoittavat suurta kasvuvauhtia teollisuustuotannossa. Samaan aikaan uudenlaisten mineraalitäyteaineiden käyttöönotto edellyttää erityisiä vaatimuksia. Esimerkkinä voi olla tuotteen, tässä tapauksessa täyteaineen, tietty maksimitasoon kosteusraja sekä sen dispergoituminen. Täyteaine ei saisi vaikuttaa voimakkaasti viskositeettiin ja suuresti vähentää lopputuotteen kulutuskestävyyttä. Sen on myös oltava lämmönkestävä, eikä räjähdys- ja tulenarkaa. Näitä yleisiä vaatimuksia olisi noudettava valittaessa mineraalitäyteaineita maalinvalmistukseen. [1, s. 61–68.]

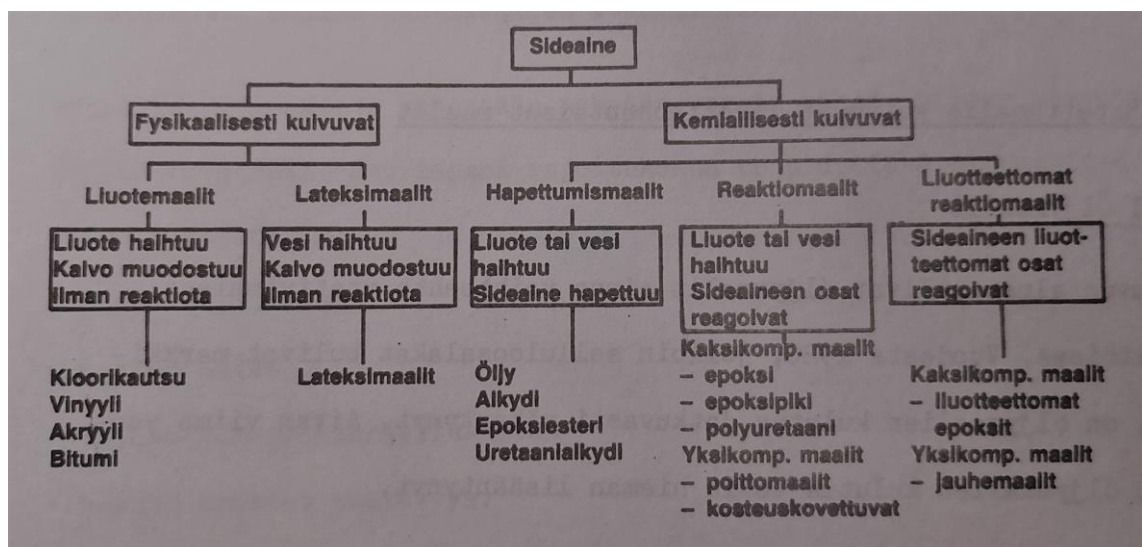
Insinööriyön tavoitteena oli selvittää Teknos Oy:n tuotekehityslaboratoriossa wollastoniittitäyteaineiden vaikutusta epoksipintamaaliin ominaisuuksiin verrattuna talkkiin. Samalla selvitettiin maalien käyttäytyminen erilaisissa olosuhteissa. Vertailtiin yhdistelmien ominaisuuksia ankarissa ilmasto- ja upotusrasitusolosuhteissa erilaisilla kiihdyttävillä lyhytaikaisilla testausmenetelmillä.

2 Maalikemiaa

Pinnoite-termi käsittää maalit, lakat tai niiden yhdistelmät. Maalit koostuvat polymeerisistä sideaineista, apuaineista, pigmenteistä ja liuottimista. Dispersioseoksessa eli maalissa sideaine, apuaineet, pigmentit ovat liuenneet liuottimeen. Maali muodostaa materiaalin pinnalle kalvon, joka suojaa kohteen ympäristön haitoilta.

Maalilla tarkoitetaan ominaisuuksia, jotka ovat maalausvaiheessa märkämaalilta vaaditut laatuksiteerit. Kun puhutaan pinnoitteesta, niin tarkoitetaan sen ominaisuudet kovettuneelta pinnalta maalauksen ja kuivumisen jälkeen. Maalin koostumus eli sen sisältämät sideaineet vaikuttavat olennaisesti edellä mainittuihin kaikkiin ominaisuuksiin. Maalien raaka-aine valikoima on laaja, niitä valitaan käyttökohteen ja sen vaatimien ominaisuuksien mukaan. Maalit jaetaan maalityyppeihin usealla eri tavalla, ja yleinen jako on niiden sisältämän sideaineen mukaan (Kuva 1). [2, s. 123.]

Sideaineet ovat kiinteitä tai nestemäisiä polymeerejä. Sideaine vaikuttaa maalin koossapysyvyyteen, kuivumisnopeuteen, adheesioon, mekaanisen rasituksen, sään ja kemikaalien kestävyteen. Sideaine sitoo ja levittää maalin pigmentit sekä kostuttaa ja siten tartuttaa alustaansa. [2, s. 161.]



Kuva 1. Maalityyppien ryhmittely sideaineen kuivumistavan mukaan [2, s. 123].

Maalituotetta valmistettaessa liuottimella säädetään viskositeettia ja valmiiseen maaliin sitä lisätään ruiskumaalausta varten. Liuottimet voidaan jakaa eri luokkiin:

- alifaattiset liuottimet
- aromaattiset liuottimet
- happea sisältävät liuottimet
- vesi. [2, s. 47–48.]

Liuotin liuottaa maalin sideaineen nestemäiseen muotoon. Liuotinaineiden tehtävä maaleissa on parantaa niiden levitysominaisuuksia, joskin niillä on merkitystä myös lopullisessa maalaustuloksen ominaisuuksissa. [2, s. 47–48.]

Apu- eli lisäaineet ovat kemikaaleja, jotka vaikuttavat maalituotteen ominaisuuksiin esimerkiksi vaahtoamiseen, juoksevuuuteen ja kuivumisnopeuteen. Apuaineisiin kuuluu erilaiset kuivikkeet, sakeuttamisaineet, vaahdonestoaineet, säilöntäaineet, kosteudensitojat ja korroosionestoaineet. [3, s.162; 2, s. 72–77.]

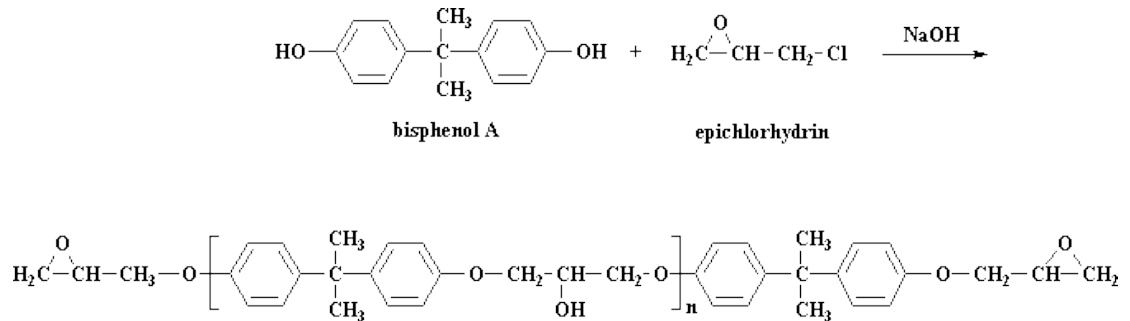
Pigmentit ja täyteaineet ovat jauhemaiset aineet, joiden tehtävä maalissa on antaa haluttu väri ja kiilto. Samalla kasvattaa maalin tilavuutta ja parantaa mekaanisia ominaisuuksia, myös suojata pinnoitetta auringonvaloa ja säätä vastaan. Pigmenttien valinta perustuu maalin käyttötarkoituksen mukaan. [3, s.162; 2, s. 54–55.]

Maalit vielä jaetaan 1- ja 2-komponenttisiksi maaleiksi. 1-komponenttiset maalit (1K-maalit) eivät vaadi kovetetta kovettuaan, maaliin sekoitetaan ainoastaan ohenne tarpeen mukaan maalausvalmisteluvaiheessa. 2-komponenttiset maalit (2K-maalit) tarvitsevat kovetteen kovettuaan. Maaliin sekoitetaan kovete ja ohenne tarvittaessa, jolloin maaliseoksen käyttöaika on rajallinen riippuen tuotteesta.

2.1 Liuotinhenteisten epoksimaalien koostumus ja ominaisuudet

Liuotinhenteiset epoksimaalit koostuvat kahdesta komponentista, muoviaineesta ja kovetteesta. Glysidyyliiryhmä on epoksihartsin reaktiivinen osa eli epoksiryhmä. Kovettumisen yhteydessä epoksiryhmät reagoivat polyamiinien, anhydridien tai amiinien kanssa (Kuva 3). Epoksiryhmiä ei esiinny kovettuneessa hartsissa eli epoksimuovissa. [2, s. 137–140.]

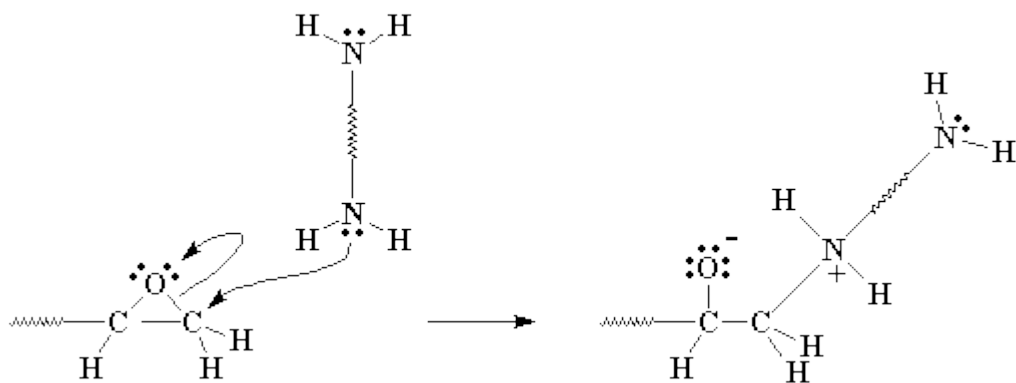
Epoksihartsien valmistus tapahtuu antamalla epikloorihydriin ja bisfenoli A:n reagoida keskenään emäksisissä olosuhteissa (Kuva 2).



Kuva 2. Epoksihartsin polymerointi [34].

Kovetteen reagoivana aineosana voi olla monta erilaista ainetta:

- alifaattinen amiini
- aromaattinen amiini
- polyamidi
- amiiniaddukti. [2, s. 137–140.]



Kuva 3. Epoksihartsin reaktio amiinin kanssa [35].

Eniten käytetään polyamidia, alifaattista amiinia ja amiinijohdannaisia liuotinhenteisten epoksimaalien kovetteena, joka yleensä määrittelee epoksihartsin kovettumisajat.

Liuottimina liuotinhenteisissä epoksihartseissa käytetään aromaattisia hiilivetyjä (ksyleeniä), alkoholeja (butanolia), ketoneja ja glykolieettereitä.

Yleisesti epoksimaalikalvon muodostumiseen lämpötilan edellytys on +10 °C, verkkoutunut maalikalvo ei liukene liuotteisiin eikä ole termoplastinen. Liuotinhenteisten epoksimaalien tärkeimmät ominaisuudet ovat hyvä kemikaalikestävyys, erinomainen kulutuskestävyys ja hyvä adheesio alustaan. [2, s. 137–140.]

2.2 Täyteaineiden valmistus ja luokittelu

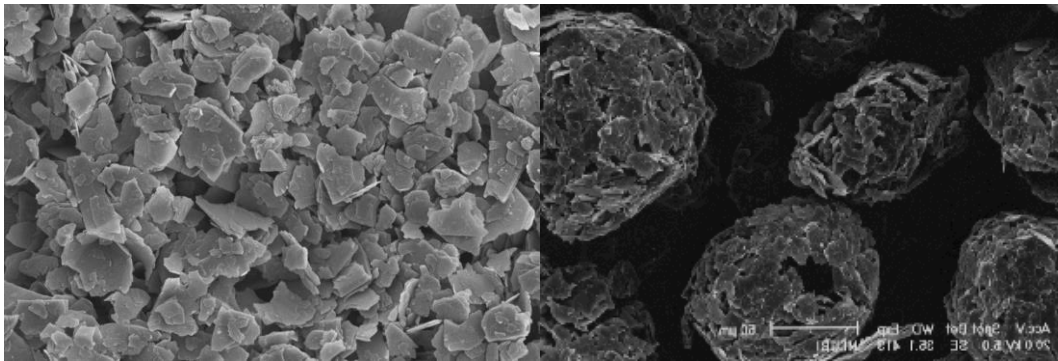
Täyteaineet ovat tavallisimmin epäorgaanisia pigmenttejä, joita saadaan mineraaleista. Niitä valmistetaan kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä valmistustavassa louhittu mineraali jauhetaan kuivana tai veden kanssa, seulotaan sopiviin jakeisiin, kuivataan ja pakataan. Toinen menetelmä on kemiallinen saostaminen. Jauhettavan ja seulottavan pigmentin raaka-aineen on oltava puhdasta, kun taas kemiallisesti saostettava mineraali voi olla epäpuhdasta. Täytepigmenttejä valmistetaan pääasiassa saostamismenetelmillä. Tällöin partikkelikokoa voidaan hallita paremmin ja saadaan valmistetuksi tasalaatuisia täyteaine-eriä. [2, s. 59–61.]

Mineraalien käyttö maaleissa antaa paremman kosteuden, sään ja liuottimien keston. Täyteaineen lisäys myös laskee raaka-ainekustannuksia. Tarkat vaikutukset vaihtelevat mineraalilajista ja mineraalin ominaisuuksista riippuen. Mineraalien pinnalla muodostuu epäorgaaninen, polaarinen ja hydratoitunut kerros. [2, s. 59–61.]

Täyteainepigmenttejä voidaan jaotella pallomaisiksi, kuutiomaisiksi, lohkariksi, hiutalemaisiksi, neulamaiseksi sekä kuitumaisiksi. Partikkelien eroavaisuudet geometriamuodoissa vaikuttavat eri lailla kovettuneen muovin ominaisuuksiin. Eri täyteaineista suosituimpia ovat kalsiumkarbonaatit, bariumsulfaatit, kalsiumsulfaatit ja talkki. Muita mainitsemisen arvoisia täyteaineita ovat magnesiumkarbonaatit, kaoliini, piidioksidi, alumiinihydroksidi, kiilteet eli mica, silikaattipigmentit sekä erilaiset orgaaniset täyteaineet. [2, s. 59–61.]

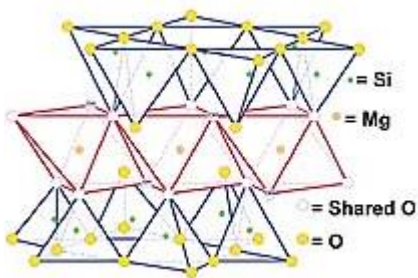
2.2.1 Talkki

Talkki eli magnesium silikaattihydraatti ($Mg_3[Si_4O_{10}(OH)_2]$) on luonnossa esiintyvä silikaattihydraatti (Kuva 5). Talkki on kuitumainen ja hydrofobinen, se himmentää maalikalvoa ja estää myös kalvon halkeilua. [19]



Kuva 4. Mikroskooppikuva talkin partikkeleiden eri muodoista (vasemmalla hiutalemainen, oikealla pallomainen talkin muoto) [36].

Talkin hiukkasmuodon ansiosta on voimakas vaikutus täyteaineena polymeereissä. Näin ollen talkkia kutsutaan aktiiviseksi täyteaineeksi. Talkki voi toimia inerttinä täyteaineena, jolla pystyy vähentämään kustannuksia huonontamatta tuotteen fyysisiä ja mekaanisia ominaisuuksia. [19]



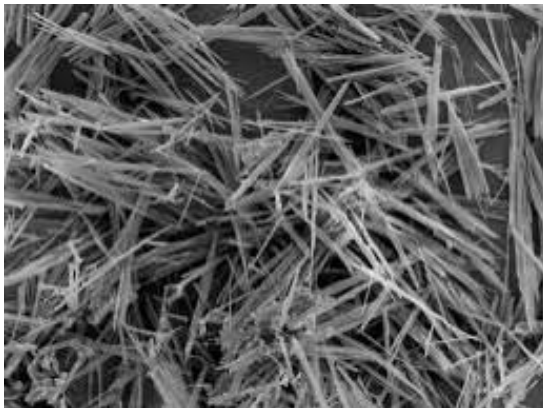
Kuva 5. Talkin rakenne [37].

Maalituotteet, jotka on täytetty talkilla, joilla on partikkeleiden hiutalemainen muoto, ovat jäykempiä verrattuna talkkiin pallomaiseen partikkelimuotoon (Kuva 4). Kaikista mineraaleista puhtaana talkin kovuus on alhaisin (1 Mohs) ja itse täyteaine on liukkaan tuntuinen. [19]

2.2.2 Wollastoniitti

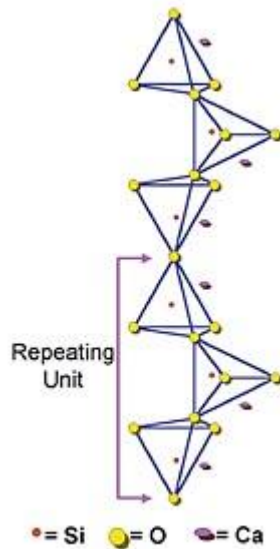
Wollastoniitti on silikaattimineraali, ja sen kemiallinen kaava on CaSiO_3 . Maaperässä metamorfoosireaktiona kvartsin ja kalsiitin välillä on syntynyt wollastoniitti. Wollastoniitin muodostaminen tapahtuu reaktioyhtälön mukaan, missä CaCO_3 (kalsiitti eli kalsiumkarbonaatti) reagoi SiO_2 :n (kvartsin) kanssa ja samalla vapautuu hiilidioksidia CO_2 . Tämä mineraali on hydrofiilinen, väriltään valkoinen ja rakenteeltaan neulamainen (Kuva 6). [20]

Wollastoniitti teoreettisesti koostuu 48,3 % kalkista (CaO) ja 51,7 % kvartsista (SiO_2). Yleensä prosenttiosuudet vaihtelevat valmistustavasta riippuen. Louhittu ja jauhettu wollastoniitti voi sisältää alumiinioksidia, rautaoksidia ja magnesiumoksidia. Sen koostumuksen ansiosta maalikalvo saa hyvän peitto- ja korroosiosuojakyvyn. [20]



Kuva 6. Mikroskooppikuva wollastoniitin partikkeleista [38].

Wollastoniitin rakenteelle on tunnusomainen toistuva, kietoutunut kolminkertainen kvartsi-tetraedri. Näiden kvartsi-tetraedreillä muodostamat ketjut on liitetty toisiinsa kalsiummolekyylin kanssa muodostaen oktaedria (Kuva 7). Tämän rakenteen ansiosta wollastoniitti kasvaa neulakiteen tavoin ja pitää tämän neulan rakenteen hajotessaan esimerkiksi jauhatusvaiheessa. Kvartsin ketjujen korkea tiheys takaa tämän mineraalin kovuuden (4,5–5 Mohs). Wollastoniitin neulaset ovat jäykkiä ja kovia. [20]



Kuva 7. Wollastoniitin rakenne [20].

Wollastoniitin käyttäminen täyteaineena määritetään neulojen suuruudella wollastoniitin kiteissä, joiden muoto lopputuotteissa säilyy hienoudesta huolimatta. Wollastoniitin pintakäsittely parantaa maalin sulkuominaisuuksia, muodostaa kemiallisen sidoksen maalimatriisin ja fillerin välille sekä parantaa kostutusmahdollisuuksia ja dispergoituvuutta. Wollastoniitti partikkeleiden anisotropiaa kuvataan mittasuhteella hiukkasten pituuden suhde niiden halkaisijaan (L/D). Mitä suurempi mittasuhte on, sitä paremmat ovat mekaaniset ominaisuudet täyteaineilla. Teollisuudessa wollastoniitin perusluokitus perustuu hiukkasten kokoon ja muotoon. [20; 31, s. 75.]

2.3 Maalinvalmistusprosessi

Maalikaavassa määrätään maalin valmistukseen käytettävät raaka-aineet, valmistusmenetelmä ja valvottavat ominaisuudet. Usein tehdään joistakin raaka-aineista ennen varsinaista valmistusta erilaisia puolivalmisteita valmistuksen helpottamiseksi. Raaka-aineiden lisäysjärjestys ja oikea lisäystapa on tärkeää valmistuksen onnistumiseksi. Esisekoituksen tarkoitus on valmistaa sopiva maalin jauhatusosa (jauhatuspanos) ennen dispergointia. Jauhatusosaan tulevat maalin pigmentit ja täyteaineet sekä osa liuottimista ja sideaineesta sekä mahdollisesti lisäaineita. Jauhatusosan sopivin viskositeetti ja koostumus riippuvat dispergointilaitteen tyypistä. Tavallisimmin käytetään dissolveria ja sekoittajaa laboratoriotiloissa (Kuva 8).



Kuva 8. Laboratorion dissolverilaite [39].

2.3.1 Dispergointi

Dispergointi, jota usein hieman virheellisesti kutsutaan jauhatukseksi, on maalin valmistuksen tärkein vaihe. Pigmenttiä valmistettaessa pigmenttihiukkaset liittyvät yhteen rykelmiksi eli agglomeraateiksi. Dispergoinnin tavoite on näiden agglomeraattien hajottaminen ja pigmenttihiukkasten pinnan kostuttaminen sideaineella. Lisäksi näin syntynyt dispersio on stabiloitava eli saatava pysymään hienojakoisena pitkiä aikoja. [3, s. 84.]

2.3.2 Jälkisekoitus ja viimeistely

Jälkisekoituksessa loput raaka-aineet lisätään dispergoituun jauhatuspanokseen. On tärkeää, että lisäys tehdään oikein ja että sekoitus on riittävän tehokas. Tarvittaessa maali sävytetään ja kun sävy on saatu oikeaksi, säädetään vielä viskositeetti ja maali suodatetaan. Valmiista maalista tarkastetaan vielä laadunvalvonta-arvoja. Tavalliset tarkastettavat ominaisuudet ovat sävyn ohella jauhatusaste, viskositeetti, ominaispaino, kiilto ja pinnan laatu. [3, s. 87.]

3 Maalien ja maalipinnoitteiden tutkimusmenetelmiä

3.1 Viskositeetin määrittäminen

Brookfield-viskosimetri eli rotaatioviskosimetri perustuu vääntömomenttiin (Kuva 9). Laitteella mitataan erittäin viskoosien nesteiden viskositeetteja. Tällä viskosimetrillä mitattaessa valitaan ensin sopiva mittauskara ja kierrosnopeus, jolla karaa pyöritetään nesteessä. Pyörimisessä syntynyt liike aiheuttaa viskositeettivastuksen, joka on sitä suurempi, mitä suurempi viskositeetti nesteellä on. Tarvitaan suurempaa vääntömomenttia vastuksen voittamiseksi, jotta pyörittäminen tietyllä nopeudella olisi mahdollista ja sitä vääntömomenttia mitataan. Kun oikea mittauskara ja kierrosnopeus on valittu, lasketaan karaa varovasti tutkittavaan nesteeseen. Annetaan pyöriä 20–30 s, kunnes osoitin on vakioitunut näyttämään joka kierroksella samaa viskositeettiarvoa. Viskositeettiarvoon vaikuttavat mittauskaran koko, kierrosnopeus ja saatu lukema. Laite ilmoittaa lukeman senttipoise-yksikkönä (cP). [26]



Kuva 9. Brookfield-viskosimetri [40].

Brookfield-KU-2-viskosimetri on myös rotaatioviskosimetri (Kuva 10). Viskosimetrissä käytetään lapamuotoista karaa, jota lasketaan tutkittavaan nesteeseen. Karaa pyörii vakionopeudella ja laite ilmoittaa lukeman Krebbs-yksikössä, KU-arvo, joka vaihtelee 40–141 välillä. [46]



Kuva 10. Brookfield-KU-2-viskosimetri [41].

Cone & Plate-viskosimetrillä on ympyräkartion muotoinen levy kiinnitetty akselissa. Mittauksessa laitetaan tippa maalia laitteen osoitetuille levyille ja lasketaan ympyräkartio päälle. Viskosimetrin akseli pyörii vakionopeudella ja ilmoittaa lukeman poisena (P) (Kuva 11). [7, s. 285–286.]



Kuva 11. Cone & Plate-viskosimetri [42].

3.2 Ominaispaino

Nesteen ominaispaino voidaan mitata tiheyspaloja käyttäen. Kun nesteeseen upotetaan kiinteä kappale, kappaleeseen vaikuttaa ylöspäin vaikuttava voima, josta nesteen tiheys voidaan laskea, kun tunnetaan kappaleen tilavuus. Kaadetaan testattava neste tai maali astiaan, kuitenkin maksimissaan 1 litran vetoiseen astiaan. Punnitaan astiassa oleva ainetta 0,01 g:n tarkkuudella. Upotetaan pallo, joka on

kiinnitetty statiivissa, näytteeseen ja kirjataan saatu lukema ylös. Lasketaan nesteen tiheys kaavasta:

$$Dt = \frac{m^1 - m_0}{V_p} + 0.012 \left(\frac{g}{cm^3} \right), \quad (1)$$

jossa

m_0 on astian paino ilman palloa

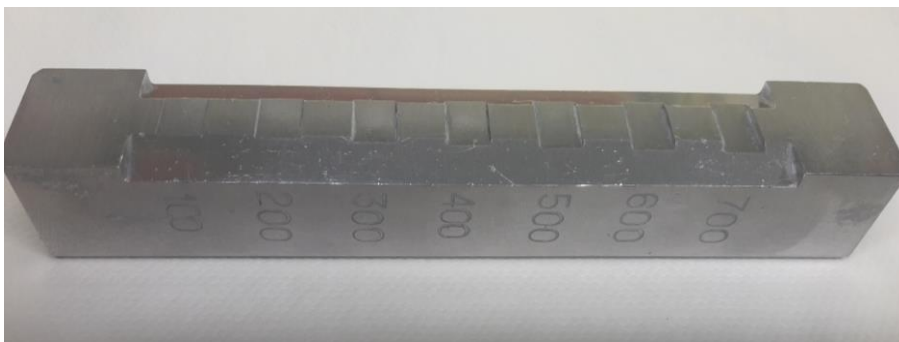
m_1 on astian paino pallon kanssa

V_p on pallon tilavuus

Merkitään nesteen tiheys kolmella desimaalilla ja arvolla g/cm^3 . [7, s. 298–299.; 25.]

3.3 Valumiskoe

Valumakestotestissä käytetään applikaattoria (Kuva 12), jolla saadaan eripaksuisia maalikalvoja. Paksuudet voivat vaihdella 50–2 000 μm :n välillä. Valumakoe tehdään peittopaperille tai kylmävalssatulle teräslevylle. Maalin levityksen jälkeen levy laitetaan pystyyn ja annetaan kuivua. Ohuempi maali valuu tietyllä kalvonpaksuudella tai muodostaa maaliraidan reunukseen paksun valuman. Mitä korkeampi viskositeetti maalilla on, sitä paksumpia kalvoja käytetään. [48]



Kuva 12. Valumarauta 100–700 μm .

3.4 König-kovuus

Heilurikovuusmittaus on standardin ISO 1522 mukainen menetelmä, jossa kovuus mitataan heilurilla, jolla saadaan kalvolle König-arvo sekunteina (Kuva 13). König heiluri lepää kahden kuulun varassa. Laitteessa on poikkitankoon kiinnitetystä pystysuorassa tangossa liikkuva vastapaino, joka säätää heilahduksen taajuutta. Kiillotetulla lasilevyllä heilahdusajan tulee olla $1,4 \pm 0,02$ s ja vaimennusajan 6^o:n poikkeamasta 3^o:n poikkeamaan 250 ± 10 s. Heilurin koko massan tulee olla $200 \pm 0,2$ g. [22]



Kuva 13. BYK-Gardner pendulum hardness tester-heiluri [43].

3.5 Kiillon mittaus

Kiillon mittauksen periaate on polarisoimatonta valkoista valoa suunnatusta mitattavaan pintaan tulokulmissa. Valoilmaisimella mitataan pinnasta heijastuvat valon intensiteettiä, se kasvaa kiillon lisääntyessä. Maalit ja lakat jaetaan mitatun 60 asteen kiillon mukaan eri ryhmiin (Taulukko 1). [7, s. 353.]

Taulukko 1. Kiilto 60° eri ryhmät.

1	täyskiiltävä	yli 80 yksikköä
2	kiiltävä	61...80 yksikköä
3	puolikiiltävä	36...60 yksikköä
4	puolihimmeä	11...35 yksikköä
5	himmeä	6...10 yksikköä
6	täyshimmeä	0...5 yksikköä

3.6 Iskunkestävyystesti

Iskunkestävyys testimenetelmä (Impact resistance) perustuu standardiin ASTM D2794, jossa tarkistetaan, miten voimakkaita iskuja maalikalvo voi kestää rikkoutumatta, kun koelevylle pudotetaan kuula kuulanpudotuslaitteella. Kuulanpudotuslaitteena on Gardner SPI Impact tester ja kuula painoltaan 1 kg (Kuva 14). [23]



Kuva 14. Gardner SPI Impact tester [44].

3.7 Taivutustesti

Taivutustestimenetelmä perustuu standardiin SFS-ISO 6860, jossa määritetään maali- ja lakkapintojen halkeamista tai irtoamista taivutettaessa koelevyä kartiomaisen tuuman ympärille vakio-olosuhteissa. Tuurna on muodoltaan katkaistu kartio, jossa pienin halkaisija on 3,2 mm ja suurin halkaisija on 38 mm. Tuurnan pituus on 203 mm (Kuva 15). [24]



Kuva 15. Kartiomainen tuurna.

3.8 Vetokoe

PosiTest AT-A on mittalaite, jolla mitataan pinnoitteen kuten maalin, muovin tai metallin ruiskutuksen tartunnan eli adheesion voimakkuutta (Kuva 16). Tämä vetomenetelmä on tarkoitettu paksujen pinnoitteiden testaukseen ja perustuu standardiin SFS-EN ISO 4624 (Maalit ja lakat. Tarttuvuuden arviointi irtivetokokeella mukaisesti.). [33]



Kuva 16. PosiTest AT-A vetokoelaite [45].

Testin murtolujuuden lukema ilmoitetaan megapascalina (Kaavat 2–3) ja silmämääräisesti määritetään murtuman tyyppi. Murtumapinta-ala arvioidaan prosentteina, pyöristettynä lähempään 10 %:iin (Taulukko 2). [33]

Taulukko 2. Adheesio murtumatyypit.

Murtumatyyppi	Tulkinta
A	Alustan koheesiomurtuma
A/B	Adheesiomurtuma alustan ja ensimmäisten pintakerroksen välillä
B	Koheesiomurtuma ensimmäisessä pinnoitekerroksessa
B/C	Adheesiomurtuma ensimmäisen ja toisen pinnoitekerroksen välillä
<i>n</i>	Koheesiomurtuma monikerrosyhdistelmän kerroksessa <i>n</i>
<i>n/m</i>	Adheesiomurtuma monikerrosyhdistelmän kerrosten <i>n</i> ja <i>m</i> välillä
-/Y	Adheesiomurtuma liiman ja pintakerroksen välillä
Y	Liiman koheesiomurtuma
Y/Z	Adheesiomurtuma liiman ja vetokappaleen välillä

Murtolujuus σ , yksikkönä megapascal, saadaan laskettua yhtälöstä

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

jossa F on mitattu kuormitus (N) ja A näytteen alkuperäistä poikkipinta-ala neliömillimetreinä.

Vetokappaleiden halkaisijaltansa 20 mm saadaan murtolujuus, yksikkönä megapascal, yhtälöstä (3)

$$\sigma = \frac{4 F}{400\pi} = \frac{F}{314} \quad (3)$$

Kaikkien mittauksen keskiarvo lasketaan lähimmän kokonaisluvun tarkkuudella. [33]

4 Korroosio

Korroosio on toimintamekanismi, jossa materiaalit syöpyvät ja tuhoutuvat. Korroosion tapahtumasarjassa metalli reagoi ympäristönsä kanssa muodostaen erilaisia yhdisteitä. SFS-EN ISO 8044 ”Metallien ja metalliseosten korroosio. Termit ja määrittelyt” määrittelee korroosion seuraavasti:

Fysikaalis-kemiallinen reaktio metallin ja sen ympäristön kanssa, joka aiheuttaa muutoksia metalliin ominaisuuksiin ja joka voi johtaa metallin, sen ympäristön tai teknisen järjestelmän, johon ne kuuluvat, toiminnan merkittävään heikentymiseen. [9]

Korroosio-termiä ei rajata vain metalleihin, vaan sitä myös käytetään muovien, keraamien, betonin ym. tuhoutumisesta ympäristön vaikutuksesta. [9]

Korroosion aiheuttamat ongelmat ovat eniten materiaali-, ylläpito- ja seisokkikustannuksia. Merkittäviä edellytyksiä ovat myös työtyöturvallisuus, kasvu- ja elinympäristö sekä luonnonvarojen väärinkäyttö säästävän teknologian toimintaperiaatteiden mukaan. [5]

4.1 Korroosionestotekniikka

Useimpien korroosionestomenetelmien toimintaa kuvataan passivoitumisella ja sähkökemiallisella korroosio teorialla. Korroosioneston ratkaisut ja menetelmät perustuvat sekapotentiaaliteorian mukaiseen korroosioreaktioiden nopeuden muuttamiseen ja suojaavien reaktiotuotekerrosten muodostamiseen. [6, s. 141–142.]

Korroosio koostuu osareaktiosta, joista jokainen on edellytyksenä korroosion jatkumiselle. Korroosionestoa suunniteltaessa on tutkittava käytettävissä olevat mahdollisuudet eri osa reaktioiden pysäyttämiseksi tai hidastamiseksi. Soveltuvat korroosionestoratkaisut useisiin tapauksiin ovat esimerkiksi

- hapettimen poisto korroosiojärjestelmästä
- katodisen reaktion inhibointi
- anodisen reaktion inhibointi
- sähkökemiallinen suojaus
- pinnoittaminen. [6, s. 141–142.]

Materiaalin valinnassa ovat peruslähtökohtina rakenteen valmistus-, lujuus-, ja käyttötekniikkaan liittyvät kyseenalaisuudet, unohtamatta taloudellisuutta. Pintakäsittelyyn päädyttäessä otetaan huomioon hankinta-, suoritus- ja ylläpitokustannukset. [6, s. 141–142.]

Pääsääntöisesti teräs suojataan pintakäsittelyillä korroosion estämiseksi. Pintakäsittelyvaihtoehdot ovat maalaus, kuumasinkitys, muut pintakäsittelyt kuten mekaaninen sinkitys sekä sähkösaostus. Teräspintojen maalaus ja suojaus maalaamalla kutsutaan korroosionestomaalaukseksi. Tähän liittyy pintojen esikäsittelyt, pohjamaalaus ja korroosionestopigmenttien levitys alustalle. Tarvittaessa tehdään välikerrosmaalaus halutun kuivakalvopaksuuden saavuttamiseksi. Lopuksi tehdään pintamaalaus sään- ja valonkestävyyteen varmistamiseksi sekä halutun kiillon ja sävyn aikaansaamiseksi. [4, s. 685–687.]

4.2 Metallien esikäsittelyt

Esikäsittelyjä ovat erilaiset puhdistusmenetelmät sekä kemialliset käsittelyt, esimerkiksi kromatointi ja fosfatointi, joilla saadaan reaktiotuotepinnoitteita. [4, s. 567–574.]

Pesumenetelmän ja käytettävien aineiden valintaan vaikuttavat monet tekijät, esimerkiksi tuotannon määrää ja laatu, epäpuhtauksien määrää ja laatu ja seuraava käsittelyvaihe. Vesipesulla voidaan pinnasta poistaa suoloja ja happotahroja. Pesutehoa parannetaan nostamalla lämpötilaa tai mekaanisen vaikutuksen avulla. Vesipesun lisäksi on mm. alkalinen pesu sekä liuotin- ja emulsiopesuja. [4, s. 567–574.]

Mekaanisen esikäsittelyn tarkoitus on ruosteen ja esimerkiksi vanhan maalin poistaminen niin, että pinnoitteelle tulee olemaan hyvä tartuntapohja. Näitä esikäsittelymenetelmiä ovat kaavinta, teräsharjaus, hakkaus ja raesuihkupuhdistus. [4, s. 567–574.]

Fosfatoinnissa muodostetaan ohut, eristävä metallifosfaattikalvo metallin pinnalle. Kalvon koostumus riippuu metallista ja fosfatointimenetelmistä. Maalauksen esikäsittelynä käytetään pääasiassa rauta- ja sinkkifosfatointia ja niiden muunnoksia.

Fosfatointikäsitteilyt tapahtuvat tavallisesti upottamalla tai ruiskuttamalla. [4, s. 567–574.]

Kromatointi on alumiinin ja sinkin esikäsitteilymenetelmä, joka parantaa maalin tarttuvuutta ja korroosionkestävyyttä. [4, s. 567–574.]

4.3 Korroosionestomaalit

Materiaalin suojaus tapahtuu teräksen pintakäsittelyillä, jolloin rakenne suunnitellaan niin, että pintakäsittely on toteutettavissa ja myöhemmin huolettavissa. Pintakäsittely toteutetaan käytännössä yleisimmin maalaamalla. Korroosionestomaalausjärjestelmät voidaan valita standardin SFS-EN ISO 12944 vaihtoehdoista rasisolosuhteiden mukaisiin pinnoitepaksumuksiin. Kun on valittu standardien mukainen pintakäsittely, on käyttäjän oikeus odottaa teräsrakenteilta tarkoituksenmukaista käyttöaikaa ja kestävyttä. [30, s. 9–10.]

Liuteohenteisten korroosionestomaalien valikoima on laaja, esimerkkinä tässä ryhmässä ovat alkydi-, kloorikautsu-, vinyyli-, epoksi- ja polyuretaanimaalit. Kalvon muodostaminen tapahtuu liuottimien haihduttua kalvosta. Eri liuottimilla on vaikutus kalvonmuodostukseen ja kuivumisnopeuteen. Epoksimaali tarttuu hyvin metallialustoihin ja sen kulutuksenkestävyys on hyvä, johtuen kovasta pinnasta. Epoksimaalikalvon kemikaalinkestävyys on myös hyvä. Epoksimaalien heikkous on liituuntuminen ulkona, mutta siitä huolimatta niitä käytetään kemikaalinkestävässä maalauksessa ulkona. Liuteohenteisiä epoksimaaleja ja pinnoitteita käytetään upotusrasituksessa olevien kohteiden suojaukseen ja kovaan kemialliseen ja mekaaniseen rasitukseen. [4, s. 680–685.]

5 Koemateriaalit

5.1 Tutkittava maali

Tutkittava maali on kaksikomponenttinen, niukkaliuotteinen, nopeasti kuivuva epoksinnoite. Maalia käytetään raesuihkupuhdistettujen teräspintojen pohjamaalina tai yksikerrosmaalina mekaanista ja kemiallista rasitusta kestävässä epoksimaalausjärjestelmissä. Maali kuivuu ja kovettuu nopeasti huoneenlämmössä ja sillä on kohtuullisen pitkä käyttöaika. Kovettuminen korotetussa lämpötilassa on erittäin nopeaa. Maali kuivuu nopeasti päällemaalauskuivaksi ja soveltuu siten nopeaan maalausrytmiin. Se kestää kovaa kulutusta, öljyjä, rasvoja, liuotteita ja kemikaaliroiskeita. Se on kuiva-ainepitoisuudeltaan 82 tilavuus- % ja täyteaineena on talkki. Tätä maalia kutsutaan maalinäytteeksi F, se on referenssinä koestustestauksissa ja sen laadunarvonta-arvoja käytetään vertaluksi testimenetelmissä.

Tässä projektissa tavoitteena oli nostaa maalinäytteen F kuiva-ainepitoisuutta 86 %:iin, hieman nostaa kiiltoa, säilyttää korroosionesto-ominaisuuksia ja lisätä valumakestoja. Lisäksi tärkeänä oli antaa mahdollisuudet ruiskuttaa kerralla paksummat kalvot menettämättä hyviä ruiskutusominaisuuksia eli nostamatta merkittävästi viskositeettiarvoja (Taulukko 7, s. 29).

Kovetteena on amiinipohjainen kovete, seossuhde on 4:1 ja seoksen pot-life eli käyttöaika on yksi tunti.

5.2 Tutkittavat täyteaineet

Tutkittavana oli neljä wollastoniittinäytteitä A–D ja referenssinä testimenetelmissä oli talkkinäyte E (Taulukko 3). Wollastoniittinäytteiden ero on partikkelikoossa, pituus-halkaisijasuhde on 3:1. Mitä suurempi pituus-halkaisijasuhde partikkeleilla on, sitä paremmat ovat täyteaineen mekaaniset ominaisuudet. Teoreettinen tiheys kaikilla on melkein sama eli noin $2,9 \text{ g/cm}^3$ ja kovuus Mohsin asteikolla $4\frac{1}{2}$ –5.

Laseranalysaattorilla näytteistä analysoidaan raekoko, joka ilmoitetaan d_{50} - ja d_{98} -arvona. Tuotteen raekojakauman keskiarvo ilmaistaan d_{50} -arvolla. Tosin d_{98} -arvolla

imaistaan partikkelikoko, jota pienempiä 98 % tuotteen partikkeleista on. Aineistoa tutkiessa oli havaittu, että d_{98} -arvot eivät ole tiedossa eivätkä näkyvissä missään. Suurin hajontaluku olisi antanut lisää tietoa tähän. On mahdollista, että kyseisen näytteen erän seulonta-analyysissä on ollut jonkinlainen poikkeama.

Taulukko 3. Täyteaineiden ominaisuudet [29].

Näyte	Partikkelikoko d_{50} (μm)	Kirkkaus R_y (%)	Bulkkitiheys (g/100g)	Öljyluku (g/100g)	Ominaispinta- ala (m^2/g)
A	17	86	0,90	19	1,10
B	12,5	88	0,80	20	1,35
C	9	89	0,74	23	1,60
D	3,5	90	0,47	25	3,25
E	15	79	0,7	24	2,0

5.3 Maalien valmistus laboratoriossa

Tuotteen suunnittelussa jouduttiin soveltamaan standardeja, jotka kattavat laadunhallintajärjestelmän, sekä eri ryhmille tarkoitettut tuotespesifiset standardit. Laboratoriossa tehtyjä testejä varten jauhettiin reseptin mukaan jokaista maalia noin litran näytteitä. Wollastoniitin massaosuus on 1:1 talkin suhteen ja kaikki versiot jauhettiin samaa massaosuutta käyttäen eli 24 p % reseptin määrästä (Taulukko 4).

Taulukko 4. Maalin reseptirakenne.

Komponentti	Massaosuus %
Epoksihartsi	23
Paksuntaja	0,5
Titaanidioksidi	6
Silikaatti	24
Karbonaatti	31
Sulfaatti	3
Aromaattinen liuotin	9,5
Alkoholi	2,4
Epoksipastat	0,6

Maalien jauhatuksessa käytettiin laboratoriodissolveria (Kuva 8), 1litran jauhatustastia ja dissolveriterää, jonka halkaisija oli 8 cm. Hienousasteen tavoite maaleissa oli <100 µm. Taulukosta, nähdään eri versioiden dispergointiajat, lämpötilat, sekoitineliimen kierrosnopeudet, hienoudet ja yleiset kommentit dispergointivaiheista (Tauluko 5). Maalien annettiin vakioitua vakiohuoneessa ennen testien alkua vähintään vuorokauden.

Taulukko 5. Eri versioiden dispergointivaiheet.

Maalinäyte	Aika (min)	Lämpötila (C°)	Kierrosnopeus (rpm)	Hienous (µm)	Kommentit dispergointivaiheesta
A	18	47	1700	60	OK
B	15	57	900	60	Paksu jauhatuspanos
C	30	45	900	70	OK
D	7	47	1500	40	Paksu jauhatuspanos
E	12	47	2000	70	OK

Dissolverijauhatuksen dispergointivaiheessa oli eroavaisuuksia maalinäytteiden välissä. Versioiden B ja D jauhatuspanokset muuttuivat hyvin paksuksi ja sitkeäksi, sekä lämpötilan nousu oli nopea. Kaikki nämä havainnot osoittivat jo siinä vaiheessa, että viskositeetti tulee olemaan kaikilla erilainen.

5.4 Materiaalivalinta

Maalattavien pintojen materiaaliominaisuudet ovat hyvin erilaiset, ja niitä on hyvä ottaa huomioon maalausmenetelmiä valittaessa. Jotta käyttötilanteeseen voisi valita sopivan alustan, on tunnettava pinnan toiminta kokonaisuutena. Pintaa ei tarkisteta erillisenä asiana, vaan koko maalausjärjestelmän rakenne ja käyttäytyminen otetaan huomioon.

Testeissä käytettävänä alustoina toimivat Q-paneelit, jotka ovat standardinmukaiset alustat maalien, liimojen, metallipinnoitteiden ja muiden pintakäsittelymateriaalien testien valinnassa. Teräksen valinnassa päädyttiin kolmeen erikäsiteltyyn teräksiin: kylmävalssattu teräs, kylmävalssattu harjattu teräs ja rautafosfatoitu teräs. Koolta kaikki olivat 102x152x0,81 mm. Kriittisissä maalien ja pinnoitteiden erilaisissa testeissä teräspaneelit minimoivat metallien vaihteluista aiheutuvat virheet.

5.5 Testialustojen valmistus

Valumatestiä varten vedokset tehtiin pahvipaperille 100–700 µm:n applikaattoria käyttäen. Iskunkestävyys- ja taivutustesteissä teräksille maalit levitettiin applikointimenetelmällä, käyttäen eri paksuisia mm. 200 µm, 300 µm ja 500 µm:n kalvonlevittäjiä.

Kovuus- ja kiiltotestiä varten maalivedokset tehtiin lasille, joka oli kooltaan 100x150 mm. Maalinäytteet applikoitiin kalvonlevittimellä 120 µm:n märkäkalvonpaksuuksilla. Annettiin kuivua vakiohuoneessa koko testin ajan. Mittausväliksi riitti 1 vuorokauden ja 7 vuorokauden tulos.

Koestustestauksissa mm. kondenssi-, suolasumu- ja upotustesteissä alustoina toimivat hiekkapuhalletut kylmävalssatut levyt. Maalaukset suoritettiin käyttäen korkeapaineruiskua, joka on tarkoitettu kaksikomponenttimaalien ruiskuttamiseen. Toinen maalikerros ruiskutettiin seuraavana päivänä. Levyt vakioitiin ennen koestustestauksia (23 °C / RH 50 %).

6 Koemenetelmät

Kaikille maalinäytteille valittiin testit sekä määrän että kuivan maalin ominaisuuksien testaamiseen. Kaikki testit noudattavat tiettyjä standardeita. Vaatimukset liittyvät yrityksen käytössä olevaan laadunhallintajärjestelmään, tuotteen suunnitteluun, valmistukseen, rakenteeseen ja materiaaleihin.

Pinnoitteilta vaadittavat ominaisuudet perustuivat referenssinä määrättyyn maalin ominaisuuksiin. Wollastoniittinäytteillä valmistettujen maalien on päästävä annettujen raja-arvoihin sisään, luukuun ottamatta kiilto- ja valumarajoja. Valmistusprosessissa kaikkien maalinäytteiden kohdalla tärkeimmät edellytykset ovat dispergointivaiheen kesto ja jauhatuspanoksen optimaalinen sekoitettavuus. Valmiin maalin reologiset ominaisuudet taas vaikuttavat maalipinnoitteiden maalattavuuteen. Maalipinnan ulkonäköön liittyy myös ominaispiirteitä, niistä tarkastettiin pinnan struktuuri ja kiiltoaste. Raaka-aineiden eroavaisuus taas vaikutti mekaanisiin ominaisuuksiin. Tärkeimmät niistä ovat taivutus, iskunkestävyys ja adheesio. Näiden kaikkien arvojen saavuttaminen samanaikaisesti oli haastavaa ja piti optimoida ominaisuuksia niin, että ne ovat riittävällä tasolla käyttökohteen vaatimukseen nähden. Pinnoitteiden kosteuden- ja korroosiokestävyyden täytyy olla hyvä.

6.1 Nestemäisten maalien ja pinnoitteiden testimenetelmät

Kaikki testit suoritettiin Teknos Oy:n tutkimus- ja tuotekehityslaboratorion tiloissa. Valmiit maalit ja maalatut levyt pidettiin vakio-olosuhteissa, jossa lämpötila oli 23 °C ja kosteus RH 50 %. Maalien viskositeetti mittaukset suoritettiin seuraavana päivänä maalin valmistettua. Koestuslevyt kuivattiin testauksesta riippuen vähintään 1–7 vuorokautta vakiohuoneessa.

6.1.1 Viskositeetti ja ominaispaino

Brookfield-mittauksissa käytettiin karaa 6 ja 20 rpm:n nopeutta. Karaa merkkiuran tasolla asetettiin maalipurkkiin ja annettiin laitteen käynnistettynä pyöriä noin puolen minuutin ajan. Laitteen ilmoittamat tulokset saatiin senttipoiseina, joita muunneltiin pascaleiksi.

Brookfield-KU-2-viskomittarin käytössä on vain yksi kara, joka kiinnitettiin laitteeseen ja vivusta alaspäin vedettyä se uppoaa maalinäytteeseen ja pyörii noin 10 sekuntia. Tulokseksi laite ilmoitti arvoja Krebbs-yksikössä.

Cone & Plate-viskositeetin mittauksissa sopiva määrä maalinäytettä levitettiin laitteen mittaustasolle ja kara laskettiin sen päälle. Laite pyöritti karaa 750 rpm kierrosnopeudella ja tuloksen arvot saatiin poiseina.

Ominaispainon mittauksessa käytettiin laboratorion vaaka ja ominaispalloa. Maalipurkki laitettiin vaa'an päälle ja taarattiin. Ominaispallo, joka oli kiinnitetty statiiviin, laskettiin maalinäytteeseen ja vaa'an antama lukema kirjattiin ylös kolmen desimaalin tarkkuudella.

6.1.2 König-kovuus ja kiilto

Heilurikovuusmittauksessa käytettiin BYK Gardnerin kovuusmittalaitetta. Heilurikovuudet määritettiin SFS EN ISO 1522 standardin mukaan König-menetelmällä. Laitteeseen asennettiin tutkittava lasilevy ja vapautettiin heiluri kuuden asteen kulmasta ja mittaustulokseksi saatiin heilumisaika sekunteina. Laitteen lukema pysähtyy kun heiluri ei ylitä enää kolmen asteen poikkeamaa. Kovilla pinnoitteilla on pidemmät heilahdusajat kuin pehmeillä pinnoitteilla. Mittaus suoritettiin kaksi kertaa per näytelevy ja mistä laskettiin keskiarvo.

Kiillon mittaus perustuu standardiin ISO-2813, mittaukset tehtiin kiiltomittarilla käyttäen 60°:n kulmaa. [47] Kiiltoaste mitattiin näytelevyistä, jolloin siihen vaikutti aina valon tulokulma ja käytössä oli polarisoimaton valkoinen valo. Jokaisesta näytteestä mitataan kolme kiiltoarvoa ja laite laskee niistä keskiarvon. Kiillon vaihtelevuus oli 0–100 yksikköä.

6.1.3 Valuminen

Valumistesteissä testimaalit applikoitiin kalvonlevittimellä pahvipaperille siten, että pahvipaperin asetettiin pystysuoraan asentoon. Näin ollen vedetyt raidat olivat vaakasuorassa asennossa, paksuin raita alimpana. Muutos voitiin jo nähdä pahvin

oltua 5 min pystysuorassa asennossa. Tarkemmin lopputulos saatiin määritetyksi maalin kuivuttua käsittelykuivaksi.

6.1.4 Iskunkestävyystesti

Menetelmässä käytettiin kuulanpudotuslaitetta. Nostettiin putkessa oleva paino ylös, asetettiin testilevy alustan ja kuulan väliin, maalikalvo yläpuolella. Nostettiin nostovipu tietylle korkeudelle ja laskettiin paino vapaasti putoamaan koelevyn päälle. Irrotettiin levy ja tarkistettiin onko maalikalvossa halkeamia. Jos niitä ei ollut, niin nostettiin paino 25 mm:a kerralla, kunnes halkeamia muodostui. Iskunlujuus tulos ilmoitettiin yksikössä kg/cm.

6.1.5 Taivutustesti

Testimenetelmässä oli käytössä kaartiomainen tuurna. Tuurna on asennettu vaakasuorassa jalustalevyille. Kääntövipulla taivutettiin koekappaletta kartiotuurnan ympäri 180° 2–3 sekunnissa. Ennen sitä kiinnitettiin koelevy kiinnitysmekanismeilla. Tutkittiin maalikalvoa paljain silmin tai suurennuslasilla. Merkittiin koelevyn halkeaman loppukohta, joka on kauimpana kartiotuurnan kapeammasta päästä.

6.1.6 Vetokoe

Vetokoe tehtiin standardin ISO 4624 mukaisesti. Yhteen koelevyyn liimattiin kaksi vetonappula. Testissä käytettiin halkaisijaltaan 20 mm:n alumiininappulaa ja LOCTITE-syanoakrylaattipohjaista pikaliimaa. Parantaakseen tartuntaa liiman ja pinnoitteen välillä hiottiin kuivuneen pinnoitteen kevyesti hiekkapaperilla ennen liiman levitystä. Annettiin kuivua vuorokauden ennen vetokoetta. Liiman kuivuttua koelevyjen maalipintaa porattiin porakoneella metalliin asti. Vasta sen jälkeen koelevy asetettiin vetolaitteeseen ja vetonappula vedettiin irti.

6.2 Pinnoitteiden korroosiotestaus

Standardien avulla varmistetaan maalauksen parempaa ja tasaisempaa laatua. Standardit antavat tutkittua tietoa, ja niiden avulla yhdenmukaistetaan määritelmiä,

ohjeita, arvosteluperusteita ja vaatimuksia. Kokonaisprosessi hahmottuu helposti ja työn yhteisen linjan myötä säästetään maalaustyön suunnittelussa ja kustannuksissa. Korroosionestomaalausstandardeissa esikäsittelylle, maaliyhdisteille, laadunvalvonnalle ja maalauksille luodaan tiettyjä kriteereitä. Maaliaineilta ja maaleilta ei vaadita tarkkoja koostumuksia, mutta niiden pitää vastata tiettyjä ominaisuuksia. [49]

Maalausjärjestelmien soveltuvuutta arvioidaan laboratoriossa käyttäen veden kondenssitestä (ISO 6270), neutraalia suolasumutestiä (ISO 9227) sekä vesiupotuskestävyystestiä (ISO 2812-1). Maalauksen suunnitteluun ja korroosiomaalauksen kestävyysvaikutukset vaikuttavat rakenteen ympäristö- ja erikoisrasitukset.

Standardissa ISO 12944-2 ilmastorasitukset jaetaan kuuteen eri luokkaan:

- C1 hyvin lievä
- C2 lievä
- C3 kohtalainen
- C4 ankara
- C5-I erittäin ankara (teollisuus)
- C5-M erittäin ankara (meri).

Veteen upotetuille ja maanalaisille rakenteille on standardi ISO 12944-2:

- Im1 makeavesiupotus, esim. jokirakenteet, vesivoimalat
- Im2 meri- ja murtovesiupotus, esim. satamarakenteet
- Im3 maanalaiset rakenteet, esim. maanalaiset säiliöt, teräspaalut ja vastaavat.

[28, s. 12.]

Testattavien maalien ominaisuuksien perusteella parhaalta näytti maaliversio A. Sitä otettiin kondenssi-, suolasumu- ja upotustesteihin. Referenssinä rasiustesteissä oli alkuperäinen maali (maalinäyte F), jossa täyteaineena on talkki ja kuiva-ainepitoisuus 82 %. Koestukseen ei ole otettu maalinäytettä E, joka on toiminut referenssinä laadunvalvontatesteissä, koska se ei täyttänyt ruiskutusviskositeetin eli Cone & Plate kohdalla vaatimuksia.

Maalaamossa testauksia varten valmistettiin standardin mukaiset maalaustyöt kyseisistä maaleista. Maaliversio A:ta oli ruiskutettu korkeapaineruiskulla paksummat kalvot, kuten oli toivottu, jotta olisi nähtävissä korroosionkesto. Resurssien ja ajan puutteessa välteltiin tekemästä maalaustyötä, jossa olisi maaliversio A suoraan verrannollinen alkuperäiseen maaliin, eli maalattu ohuemmillä kalvoilla (Taulukko 6).

Kaikki koestustulokset löytyvät liitteistä 2,3,4 ja tarkemmat selitykset tulosten käsittelyosiossa (Luku 7.6).

Taulukko 6. Maalausjärjestelmän maalaus ja dokumentaatio.

Maali	Maalausalusta	Pinnan esikäsittely	NDFT (μm)	Total DFT (μm)
Maalinäyte A	Kuumavalssattu teräs	Sa 2 1/2	2 x 250	500
Maalinäyte F (referenssi)	Kuumavalssattu teräs	Sa 2 1/2	2 x 150	300

7 Tulokset ja tulosten tarkastelu

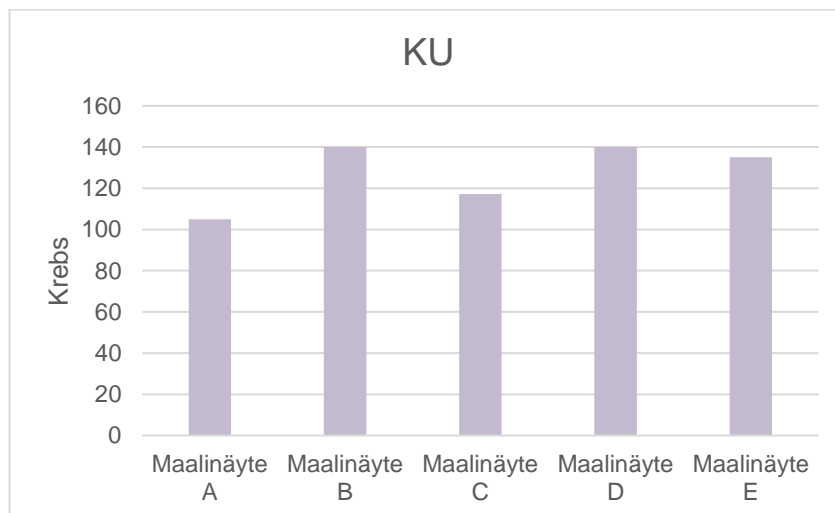
Maalinäyte F oli referenssinä, johon testimaalien arvoja verrattiin. Maalinäytteen F laadunvalvonta-arvot ovat erillisessä taulukossa (Taulukko 7), koska tämän maalin kuiva-aine pitoisuus ei täytä laaduntarkastuksen ruiskutusviskositeetin kohdalla vaatimuksia.

Taulukko 7. Alkuperäisen maalin asetetut raja-arvot ja maalinäytteen F laadunvalvonta-arvot.

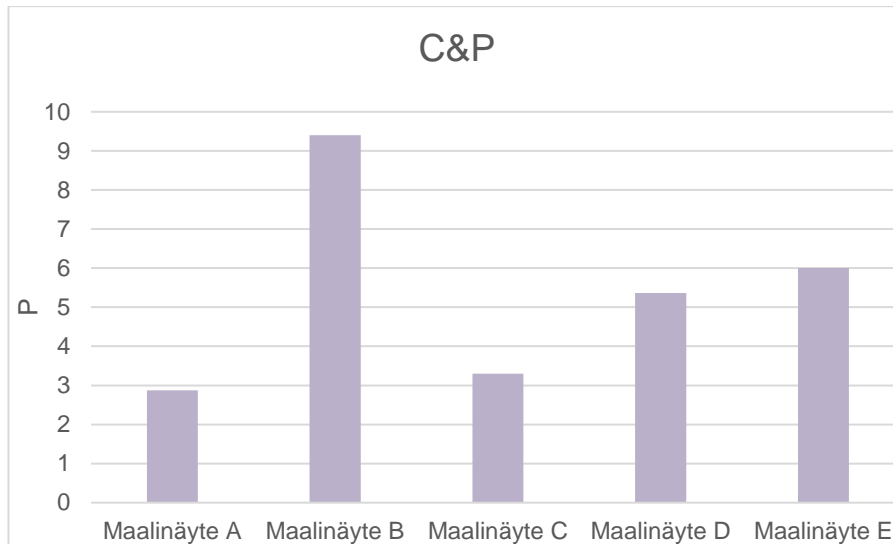
	OMP (g/cm ³)	KU	C & P (P)	Br 6/20 (P)	Valuma (µm)	Kiilto 60°
Raja-arvot	1,76– 1,84	100–130	1,7–2,8	100–120	200	10–40
Maalinäyte F	1,76	108,0	2,4	120	200	11,0

7.1 Viskositeetti- ja ominaispainotulokset

Maalien valmistusvaiheessa huomattiin, että niiden viskositeetti saattaa olla korkea. KU-2-viskositeettitulosten perustella nähtiin, että maalinäytteiden B ja D arvot olivat >140, eli nämä maalit eivät olleet mitattavissa Brookfield-KU-2-viskometrillä (Kuva 17).

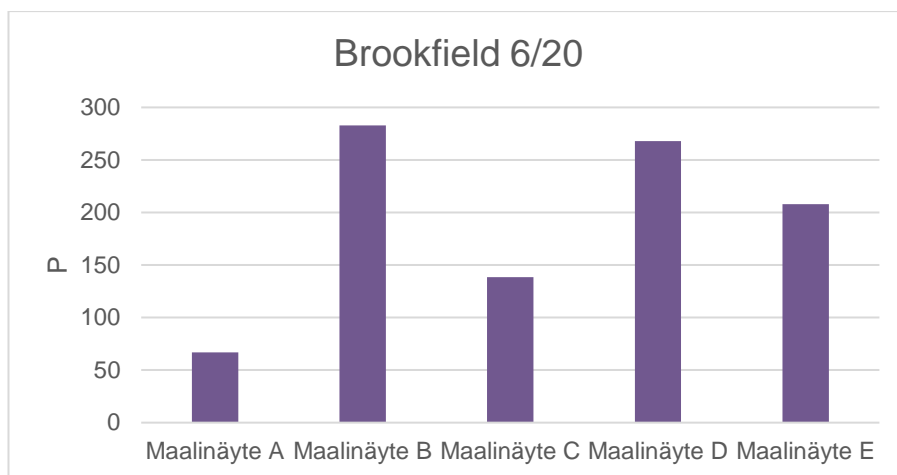


Kuva 17. Brookfield-KU-2-viskositeetin mittaustulokset.



Kuva 18. Cone & Plate-viskositeetin mittaustulokset.

Maalinäytteiden E ja C tulokset C&P- ja Brookfield-viskositeeteissa olivat korkeampia kuin tavoitetut laadunarvonta-arvot (Taulukko 7). Parhaalta näytti maalinäyte A, kaikilla viskositeettiarvoilla (Kuvat 17–19).



Kuva 19. Brookfield-viskositeetin mittaustulokset.

Wollastoniittinäytteiden valmistaja tuottaa erilaisia wollastoniittinäytteitä, erikokoisia ja eri mittasuhteella. Pituus-halkaisija toimittajan antamien tietojen mukaan on 3:1 kaikilla. Maalinäyte A oli aika matalan viskositeetin tuote, myös pienemmän partikkelikoon täyteaineet nostivat viskositeettia enemmän kuin suuremman partikkelikoon täyteaineet. Kaikkien viskositeettiarvojen perusteella nähtiin melko loogista

viskositeettien järjestystä ja kasvua. Tämä voi selittää eri partikkeleiden koolla wollastoniittinäytteissä, ominaispinta-alalla tai pituus-halkaisijasuhteella.

Ominaispaino mitattiin omp-pallomenetelmällä. Maalinäytteen C ominaispaino on pienempi verrattuna muihin, mutta aika lähellä alempaa raja-arvoa (Taulukko 8).

Taulukko 8. Maalinäytteiden ominaispaino, g/cm³.

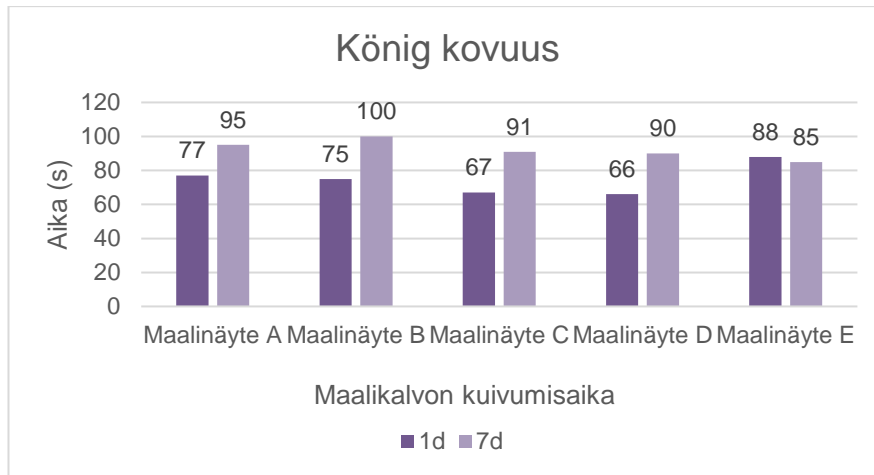
Maalinäyte	Maalinäyte	Maalinäyte	Maalinäyte	Maalinäyte	Maalinäyte
A	B	C	D	E	F referenssi
1,820	1,830	1,650	1,840	1,830	1,790

Ominaispainon avulla vielä pyrittiin varmistamaan, että kaikki raaka-aineet olivat lisättyinä maalissa. Ennen mittausta sekoitusvaiheessa maaliin voi muodostua ilmaa, jolla on vaikutusta mittaustulokseen. Tämä on melko tavallista tarpeeksi täytetyissä maaleissa. Maalinäytteen C valmistuksessa oli pitkä dispergointiaika (Taulukko 5). Muiden maalinäytteiden ominaispainon tuloksissa ei ole muuta huomioitavaa.

7.2 König-kovuus ja kiiltotulokset

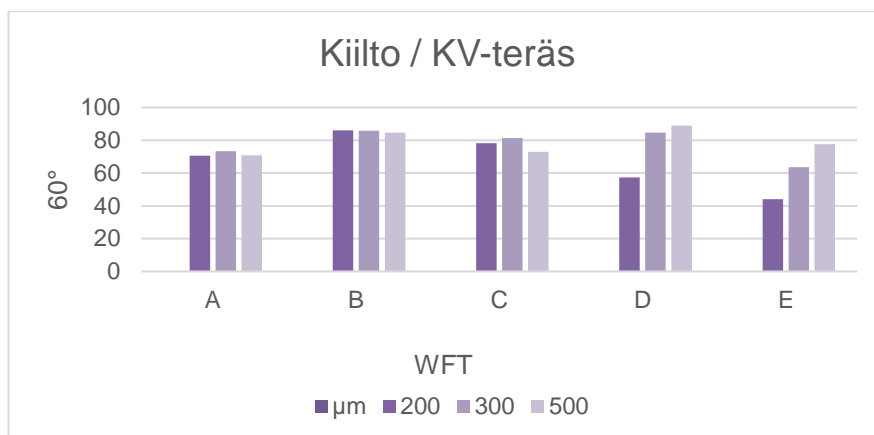
Maalien kuivumisominaisuudet voivat poiketa toisistaan, ja kuivumisajoissa on siten eroja. Komponentit sekoitettiin hyvin keskenään oikeassa suhteessa, sekoituksen aikana tapahtui kemiallinen reaktio ja maali alkoi kovettua. Korkealla kuiva-ainepitoisuus tai liuotteettomalle epoksimaalille hyväksyttävä kovuus 24 tunnin kuivumisen jälkeen on vähintään 50 sekuntia.

Ensimmäisen vuorokauden kohdalla wollastoniitilla jauhetut maalit olivat pehmeämpiä verrattuna talkilla jauhettuun maaliin. Vertailemassa wollastoniitti-maalinäytteitä 1 vuorokauden jälkeen versio A antoi korkeimmat arvot. Viikon kuluttua nähtiin jo loppukovuus, jossa onnistuivat parhaiten B- ja toiseksi A-maalinäytteet verrattuna referenssiin. Mitatuissa kovuusarvoissa ominaisuuksien kannalta ei ollut merkittävää eroa, kaikki kovuusarvot olivat > 50 s (Kuva 20).



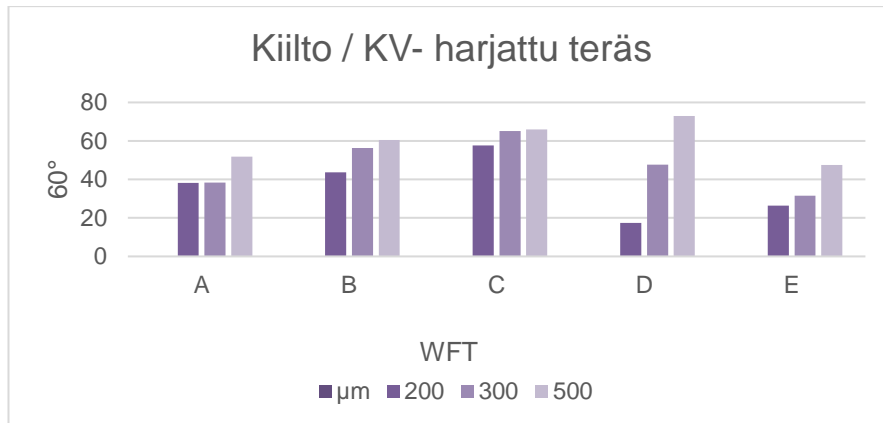
Kuva 20. König -kovuuden mittaustulokset.

Kaikki kiillot mitattiin teräslevyiltä. Yhtenä projektin ajankohtana oli nostaa hieman kiiltoa. Kuvista 21–23 nähdään eri alustojen, versioiden ja kalvonpaksuuksien kiiltoerot.

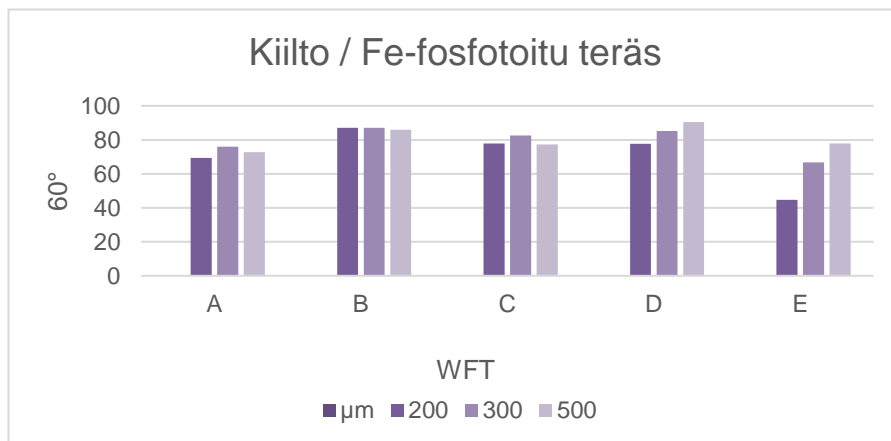


Kuva 21. Kiilto 60° / KV-teräs.

KV-terästen ja rautafosfatoitujen levyjen välillä ei ollut merkittävää eroa kiilloissa. KV-harjatuilla levyillä taas oli selkeä ero, johtuen ehkä alustan strukturoidusta pinnasta (Kuvat 21–23).



Kuva 22. Kiilto 60° / KV-harjattu teräs.



Kuva 23. Kiilto 60° / Fe-fosfotoitu teräs.

Olellaisesti mitä paksumpi kalvo, sitä kiiltävämpi pinta on. Versiolla A on hieman korkeammat kiillot verrattuna referenssiin E kaikilla alustoilla, muuten kiiltoarvot olivat korkeat verrattuna lähtöarvoihin (Taulukko 7).

7.3 Valumakeston tulokset

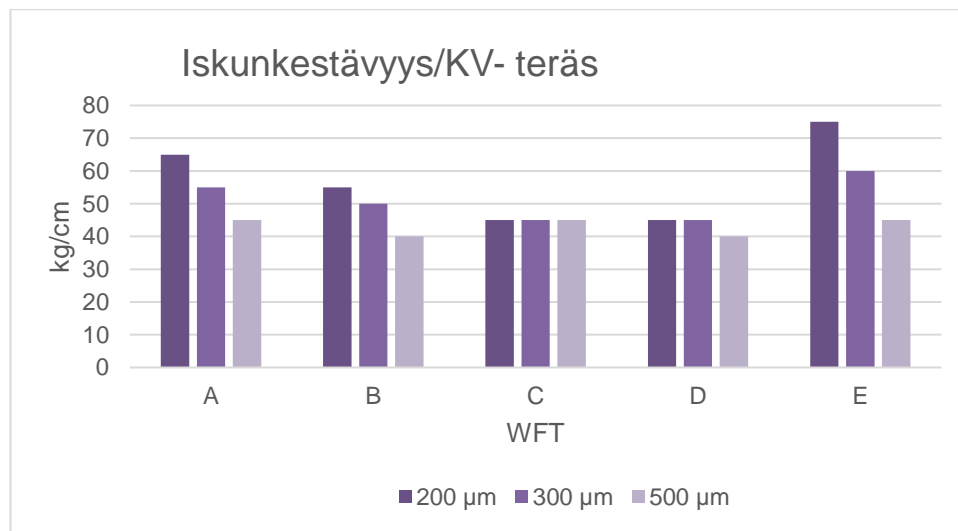
Valumakestotuloksista voidaan todeta, että versiot B–E ovat hyviä, mutta viskositeettien perusteella ne ovat hylättyjä. Parhaaksi tässä osiossa oli maalinäyte A, vaikka se ei kestänyt 700 μm:n rajaa, mutta oli silti >200 μm:a (Taulukko 9).

Taulukko 9. Valumakeston tulokset.

Maalinäyte	100 µm	200 µm	300 µm	400 µm	500 µm	600 µm	700 µm
A	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hylätty
B	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty
C	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty
D	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty
E	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty	hyväksytty
F	hyväksytty	hyväksytty	hylätty	hylätty	hylätty	hylätty	hylätty

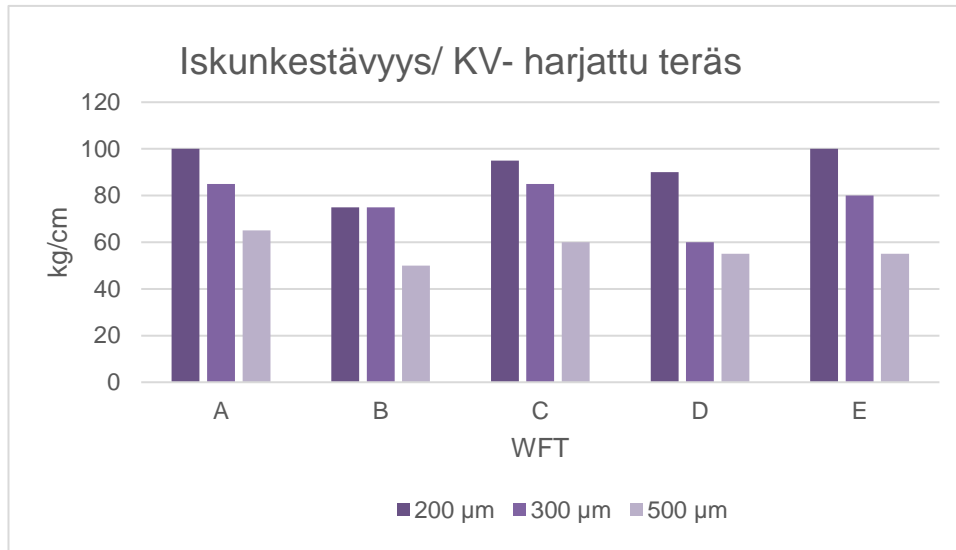
7.4 Iskunkestävyytulokset

Maalikalvon DFT-kuivakalvonpaksuudet löytyvät liitteestä 7. Testin suorittua maalipinta on ollut levyjen yläpuolella eli isku tapahtui suoraan maalipintaan. Kuvista 24–26 nähdään eri alustoilla iskunkestävyytuloksia. Mitä korkeampi taulukon pylväs on, sitä paremmin se on kestänyt iskuja testissä.

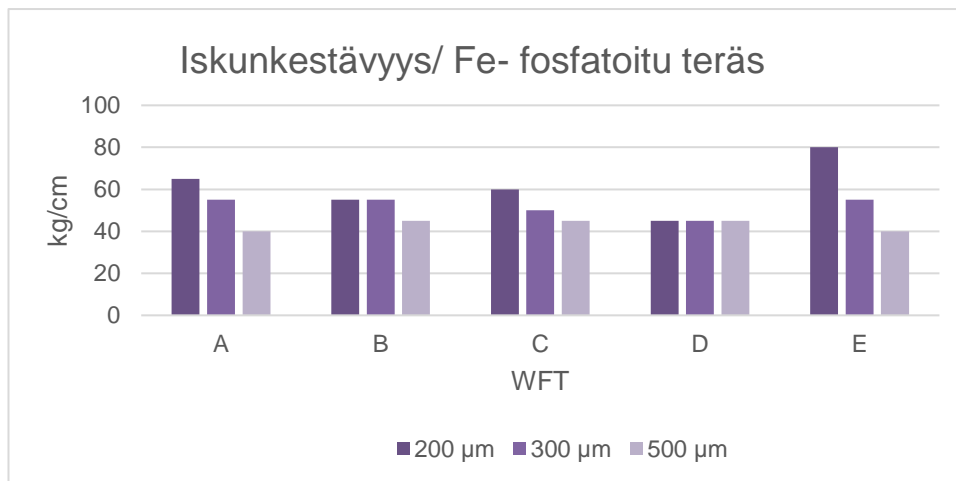


Kuva 24. Iskunkestävyys, kylmävalssatuilla teräksillä.

Iskunkestävyydestä 300 µm:n ja 500 µm:n märkäkalvonpaksuudella (WFT) kalvot kestivät huonommin kuulan pudotusta kaikilla teräksillä. Rautafosfatoitu teräs osoittautui heikoksi tässä testissä (Kuva 26). Parhaiten olivat kestäneet maalinäytteet kylmävalssatulla harjatulla teräksellä, 200 µm:n märkäkalvonpaksuus oli optimaalinen näille testille (Kuva 25).



Kuva 25. Iskunkestävyys, kylmävalssatuilla harjatuilla teräksillä.



Kuva 26. Iskunkestävyys, rautafosfatoituilla teräksillä.

Kaikkien tulosten perusteella kaikilla alustoilla paras maaliversio wollastoniitilla oli maalinäyte A, jonka arvot olivat 60–100 kg/cm riippuen kalvonpaksuudesta, verrattuna muihin wollastoniitti-maalinäytteisiin. Talkilla jauhettu referenssi näytti joustavammalta, mikä taas viittaa siihen, että wollastoniitti ei lisää maalin joustavuutta (Kuvat 24–26).

7.5 Taivutustestin tulokset

Kaikissa levyissä halkeilu oli näkyvässä koko pituudelta eli 203mm tai se ei ole näkyvässä olleenkaan, joten taulukoissa oli esitetty halkeilun suuruus silmämääräisesti. Halkeilun luokitteluun liittyvät kuvat löytyivät liitteestä 5.

Halkeilun luokittelu:

Ei halkeilua = 0

Vähäistä halkeilua = 1

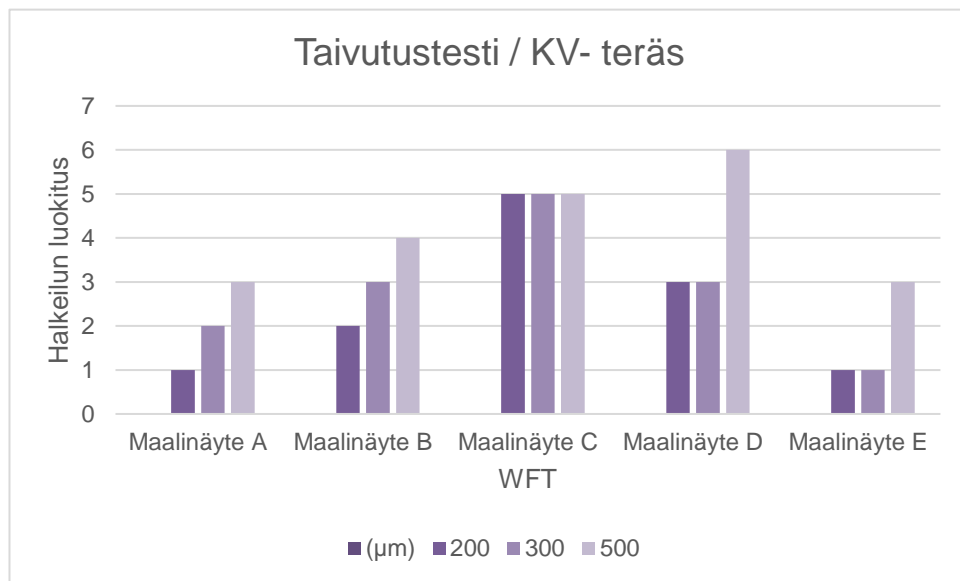
Pieniä halkeamia = 2

Keskikokoisia halkeamia = 3

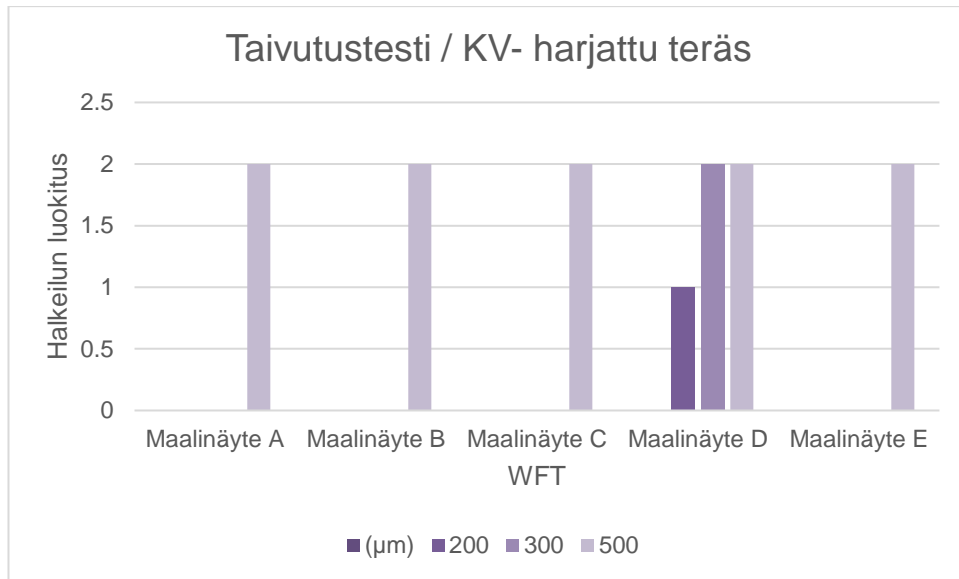
Isoja halkeamia = 4

Isoja halkeamia, osittain irti = 5

Maalikalvo on irti = 6

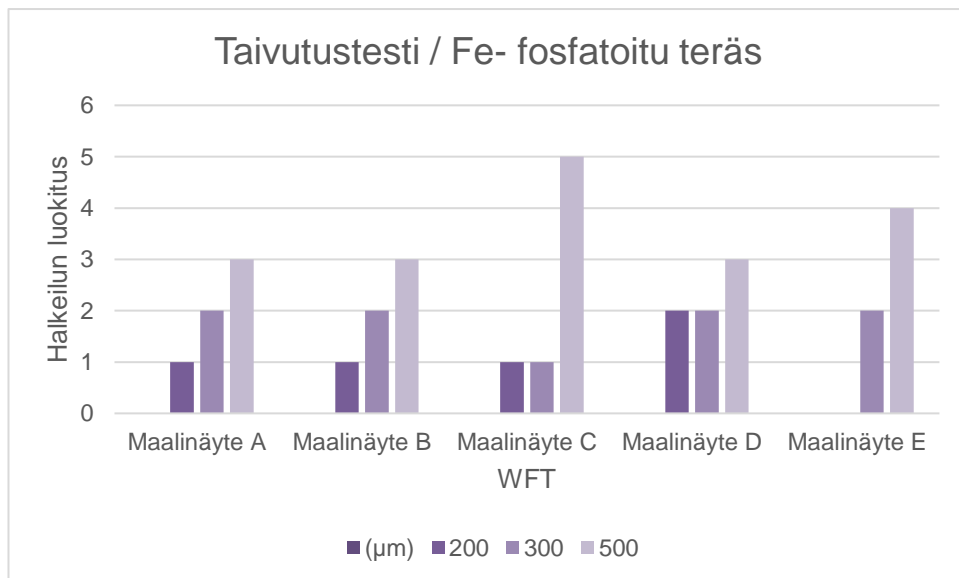


Kuva 27. Taivutustesti kylmävalssatuilla teräksillä.



Kuva 28. Taivutustesti kylmävalssatuilla harjatuilla teräksillä.

Tarkistettua kuvista 27–29 tuloksia, selvitettiin, että 500 μm:n märkäkalvonpaksuus ei onnistunut missään, koska on liian paksu kalvo taivutustestille, eikä maalien ole tarkoitus olla niin joustavia. KV-harjattu teräs antoi parhaat tulokset, mikä johtui teräksen pinnasta, joka antoi hyvän tartunnan maaleille.



Kuva 29. Taivutustesti rautafosfatoituilla teräksillä.

Taivutustestissä kuvista 27–29 halkeilun luokitus arvioidaan siten, että mitä pienempi luku, sitä vähemmän on näkyvissä halkeamia.

Paras alusta tälle testille oli KV-harjattu teräs ja paras lujuuden testauksessa oli versio A, jonka taivutustuloksissa oli näkyvissä pieniä halkeamia (Kuvat 27–29). [Liite 5]

7.6 Korroosiotestauksien tulokset

Maaliyhdistelmien kestävyuden arvioimiseksi valmistettiin koelevyt ja testattiin laboratoriokokeilla. Kaikki alla olevat testaukset suoritettiin koestuslaboratoriossa. Testien hyväksyminen tehtiin standardin ISO 4628 mukaisella testausmenetelmällä.

Pinnan laadun kriteerillä tarkoitetaan siitä, että maalatuilla teräspinnoilla ja maalatuilla ruiskupinnoilla ei sallita rakkuloitumista, halkeilua, ruostumista eikä hilseilyä ilmoitettuja arvoja enempää (Taulukko 10). Irtoama naarmusta sekä korrosio saa olla korkeintaan taulukossa 10 annettujen arvojen suuruisen.

Taulukko 10. Vaatimukset maalattujen teräspintojen koestustestauksissa.

Ominaisuus	Standardi	Vaatimisarvo
Rakkuloituminen	ISO 4628-2	0
Ruostuminen	ISO 4628-3	Ri0
Halkeileminen	ISO 4629-4	0
Hilseileminen	ISO 4628-5	0
Ruostuminen naarmusta	ISO 20340	korroosion eteneminen naarmusta ≤1,5 mm

Kaikki nämä koestustestien ominaisuuksien vaatimisarvot tarkastettiin ja arvioitiin välittömästi testin lopetettua.

Rasitustesteissä testattiin maalinäyte A talkkitäyteaineella ja pienemmällä kuiva-ainepitoisuudella. Referenssinä oli maalinäyte F wollastoniittitäyteaineella ja korkealla kuiva-ainepitoisuudella.

Kondenssitesteissä maalinäytteen F ja maalinäytteen A:n eri rasitusluokissa ei ollut havaittavissa muutoksia, eikä kummankaan maalinäytteen välisessä vertailussa ollut

poikkeamia. Kaikki vaaditut ominaisuudet olivat täyttäneet vaatimuservoja eli olivat nolla.[Liite 2]

Suolasumutesteissä maalinäyte A luokiteltiin vaan rasisitusluokkaan C5-M, tällöin paneelien suolasumurasituksen aika on 1 440 tuntia. Vertailuna maalinäyte F, joka oli C4-H- ja C5-M-rasisitusluokissa. Tuloksista nähtiin, että parhaiten oli kestänyt maalinäyte A, jossa ruostumisen eteneminen naarmusta olivat kaikki alle 1,5 mm:ä. Osittain tähän selitykseen olisivat voineet vaikuttaa kalvonpaksuudet, jotka olivat suuremmat kuin referenssimaalissa. Referenssinä maalinäytettä F ei olisi pysty maalaamaan samanlaisilla kalvonpaksuuksilla. [Liite 3]

Vesiupotustesti, rasisitusluokka Im1 on standardin ISO 2812-2 mukainen ja sen kesto aika 3 000 tuntia. Molemmat täyttyivät vaatimuservoja rakkuloitumisessa, ruostumisessa, halkeilemisessa ja hilseilemisessä. Testitulokset kaikilla näillä ominaisuudella oli nolla.[Liite 4]

7.7 Korroosiotestauksien vetokokeiden tulokset

Maalipinnoitteiden vetolujuus testattiin vetokokeella standardin SFS-EN ISO 4624 mukaisesti. Koestuksen jälkeen vetolujuusvaatimus on vähintään 50 % alkuperäisestä lujuudesta, kuitenkin vähintään 2 MPa. Jos rasisituksen jälkeen vetolujuusarvo on ≥ 4 MPa, vetolujuus on hyväksytty. Alustasta kiinnitarttuvuuden pettämistä ja adheesiomurtumaa ei hyväksytä, elleivät vetolujuusarvot ole vähintään 5 MPa. Vetolujuus tulos lasketaan ja ilmoitetaan standardin SFS-EN ISO 4624 mukaisesti.

7.7.1 Kondenssitestin vetokokeiden tulokset

Kondenssitestin adheesiotestin tulosten perusteella voitiin päättää, että vetolujuudessa oli eroa (Taulukot 11–14). Referenssinä ollut maalinäyte F kolmesta levyistä C4-H-rasisitusluokassa vetokokeessa antoi keskiarvoksi 6,0 MPa, kun vastaavasti parhaaksi valittu maalinäyte A antoi samassa rasisitusluokassa vetokokeessa keskiarvoksi jo 8 MPa (Taulukko 13). Myös ankarassa rasisitusluokassa C5-M maalinäyte A näytti vetokokeessa keskiarvon 9,3 MPa (Taulukko 14).

Taulukko 11. Maalinäyte F, kondenssitesti 480 tuntia, C4-M.

Maalinäyte F	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	7,74 7,10	100 % B 90 % B, 10 % -/Y
Levy 2	7,07 6,21	100 % B 60 % B, 40 % -/Y
Levy 3	7,55 5,57	90 % B, 10 % -/Y 80 % B, 20 % -/Y

Taulukko 12. Maalinäyte F, kondenssitesti 720 tuntia, C4-H.

Maalinäyte F	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	6,37	10 % A/B, 90 % B
Levy 2	4,84 5,25	10 % A/B, 90 % B 10 % A/B, 90 % B
Levy 3	7,32 6,18	10 % A/B, 90 % B 10 % A/B, 90 % B

Taulukko 13. Maalinäyte A, kondenssitesti 720 tuntia, C4-H.

Maalinäyte A	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	7,86 8,19	50 % A/B, 50 % B 50 % A/B, 30 % B, 10 % C, 10 % -/Y
Levy 2	8,19 8,96	50 % A/B, 50 % B 50 % A/B, 50 % B
Levy 3	6,15 8,86	30 % A/B, 30 % B, 40 % Y/Z 50 % A/B, 50 % B

Taulukko 14. Maalinäyte A, kondenssitesti 1 440 tuntia, C5-M.

Maalinäyte A	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	7,59 8,60	20 % A/B, 80 % B 20 % A/B, 80 % B
Levy 2	9,97 9,97	20 % A/B, 80 % B 20 % A/B, 80 % B
Levy 3	9,74 9,68	20 % A/B, 70 % B, 10 % B/C 20 % A/B, 70 % B, 10 % B/C

Silmämääräisesti määrättyyn murtumatyyppi kaikissa kondenssitestin vetolujuustestin tuloksissa suurimmalta osalta oli koheesiomurtuma ensimmäisessä pinnoite kerroksessa lukuun ottamatta maalinäytettä A, rasiusluokassa C4-H, joka oli 50 % adheesiomurtuma alustan ja ensimmäisen maalikerroksen välissä ja loput koheesiomurtumia. Referenssillä (maalinäyte F) testiajassa 480 tuntia osittain esiintyi adheesiomurtuma pintakerroksen ja liiman välillä (Taulukot 11–14).

7.7.2 Suolasumutestin vetokokeiden tulokset

Suolasumutestissä maalinäytettä A laitettiin heti testattavaksi 1 440 tunniksi, koska odotettiin maalin kestävän sitä rasiusta. Vetolujuudessa referenssin (maalinäyte F) ja maalinäyte A:n välillä on ollut eroavaisuutta. Taulukoista 15–17 havaittiin, että referenssin 720 h ja 1 440 h vetolujuustulos keskiarvona oli 7 MPa. Vastaavasti maalinäyte A:n adheesio antoi paremman tuloksen, keskiarvona noin 10 MPa.

Taulukko 15. Maalinäyte F, suolasumutesti 720 tuntia, C4-H.

Maalinäyte F	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	5,13 6,72	100 % C 100 % C
Levy 2	7,42 7,23	100 % C 100 % C
Levy 3	6,94 6,18	100 % C 100 % C

Taulukko 16. Maalinäyte F, suolasumutesti 1 440 tuntia, C5-M.

Maalinäyte F	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	5,38	100 % B
Levy 2	7,83	100 % B
Levy 3	7,74	30 % A/B, 70 % B

Taulukko 17. Maalinäyte A, suolasumutesti 1 440 tuntia, C5-M.

Maalinäyte A	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	10,51 9,80	50 % B, 50 % B/C 50 % B, 50 % B/C
Levy 2	10,54 11,32	60 % B, 40 % B/C 80 % B, 20 % B/C
Levy 3	8,81 9,97	90 % B, 10 % B/C 60 % B, 40 % B/C

Murtumatyypiltään referenssillä molemmissa rasitusluokissa oli 100 %:n koheesiomurtumia. Verrattuna maalinäyte A:han, joka oli karkeasti puolet koheesiomurtumia ensimmäisessä maalikerroksessa ja loput adheesiomurtumia 1. ja 2. maalikerrosten välillä (Taulukot 15–17).

7.7.3 Vesiupotustestin vetokokeiden tulokset

Vesiupotustestin tulosten perusteella maalinäyte A on menestynyt paremmin murtolujuudessa, missä oli saatu noin 11 MPa keskiarvona (Taulukot 18–19).

Taulukko 18. Maalinäyte F, veteen upotustesti 3 000 tuntia, Im1.

Maalinäyte F	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	5,8 6,6	10 % A/B, 50 % B, 35 % B/C 10 % A/B, 50 % B, 35 % B/C
Levy 2	7,6 6,1	10% A/B, 55 % B, 35 % B/C 50 % B, 50 % B/C
Levy 3	6,5 6,5	10 % A/B, 60 % B, 30 % B/C 10 % A/B, 50 % B, 40 % B/C

Taulukko 19. Maalinäyte A, veteen upotustesti 3 000 tuntia, Im1.

Maalinäyte A	Adheesio (MPa)	Murtumatyyppi
Levy 1	11,67 10,50	90 % A/B, 10 % B 100 % A/B
Levy 2	9,8 10,88	90 % A/B, 10 % B 90 % A/B, 10 % B
Levy 3	11,75 10,20	50 % A/B, 10 % B, 30 % Y/Z 85 % A/B, 10 % B, 25 % Y/Z

Referenssi oli murtumatyypiltä 60 %:n koheesiomurtumia ensimmäisessä maalipinnassa, loput ensimmäisen ja toisen maalipinnan välisiä adheesiomurtumia ja jonkun verran esiintyi adheesiomurtumia teräksestä. Maalinäyte A:n suurilta osiin murtumatyypiltään olivat adheesiomurtumia teräksestä, loput koheesiomurtumia ja muutama tulos liiman ja vetonappulan adheesiomurtumia (Taulukko 19).

Yleensä nämä -/Y ja Y/Z eivät kuva maalin tartunnasta eivätkä murtolujuudesta, johtuen liiman heikosta tartunnasta. Pettäminen alustasta sallitaan ja hyväksytään (A/B murtumatyyppi), jos vetolujuusarvo on vähintään 5 MPa.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä työssä tutkittiin wollastoniitin käyttöä täyteaineena epoksimaalissa talkin sijasta. Työn tarkoituksena oli tutkia, voiko wollastoniitilla saada suuremman kuiva-ainepitoisuuden menettämättä maalin muita tärkeitä ominaisuuksia. Lisäksi työssä tutkittiin kulutuskestävyyttä, maalattavuutta ja käyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa.

Vertailua varten valmistettiin neljä eri epoksimaalia, neljällä eri wollastoniittinäytteillä sekä epoksimaali talkki täyteaineella. Kaikilla näillä maaleilla kuiva-ainepitoisuutta nostettiin 86 %:iin. Alkuun tarkasteltiin maalien valmistettavuus ja reologiaa. Mekaanisia testejä varten valittiin kolme teräsalustaa: kylmävalssattu teräs, kylmävalssattu harjattu teräs ja rautafosfatoitu teräs. Pinnoitteista ja alustoista tarkasteltiin iskunkestävyyttä, joustavuutta sekä kiiltoa.

Työn kokeellisessa osuudessa testattiin laboratoriossa valmistettuja maaliversioita. Kaikilla eri neljällä wollastoniittinäytteillä oli erilainen partikkelikoko, mikä taas vaikutti maalin valmistettavuuteen sekä viskositeettiin. Pinnoitteiden joustavuutta ja kiiltoa tarkistettiin kolmella eri märkäkalvonpaksuudella sekä kolmella eri alustoilla. Eri alustoilla oli merkitystä kaikissa testeissä, eroavaisuutta löytyi, mutta joustavuusominaisuudet säilyvät samalla tasolla. Kylmävalssattu harjattu teräs alustana antoi parhaan mahdollisen tuloksen 200 µm:n märkäkalvonpaksuudella maalatuilla pinnoitteilla. Märkämaalina sekä valmiin pinnoitteen ominaisuuksien perusteella parhaaksi osoittautui maaliversio A, jota otettiin mukaan erilaisiin rasiustesteihin.

Rasiustesteissä alustana oli toiminut hiekkapuhalletut kuumavalssatut teräslevyt. Referenssinä testeissä oli alkuperäinen maali eli maalinäyte F, talkki täyteaineena ja kuiva-ainepitoisuudella 82 %:a. Kondenssiteisteissä pinnan laadun kriteereissä ei ollut mitään eroa näiden kahden maalin välillä, mutta adheesiotestitulosten perusteella nähtiin, että testattava maalinäyte A osoitti paremmat arvot.

Suolasumutestitulosten perusteella pystyttiin tekemään päättely, että korroosion eteneminen oli hitaampi maalinäyte A:lla rasiusluokassa C5-M, 1 440 tuntia kun vastaavasti referenssimaali näytti huonommat tulokset. Sama koski vetokokeita, missä lujuusominaisuudet säilyivät parhaiten wollastoniitilla jauhetulla maalilla. Mahdollinen

selitys tähän lopputulokseen oli märkämaalien kalvonpaksuudet, jotka vaikuttivat myös adheesiotuloksiin.

Vedenupotustesteissä testi maalinäyte petti alustasta vetokokeissa, mutta lujuudeltaan antoi melkein kaksi kerta suuremman arvon referenssiin verrattuna.

Koestustestien tulosten perusteella todettiin, että wollastoniitilla maalinäyte A antoi korroosiorasituksessa hyvän tartuntakyvyn sekä säilytti korroosiosuojan kuten oli tavoiteltu. Wollastoniitti neulamaisen rakenteen vuoksi näytti antavan suuremman kestävyuden verrattuna talkkiin menettämättä laatua.

Tulosten perusteella näytti siltä, että wollastoniitin neulamaisen rakenteen ansiosta on mahdollista saavuttaa maalin korkeampi kuiva-aine nostamatta ruiskutusviskositeettia, säilyttäen muut maaliominaisuudet. Tavoite tässä työssä oli saavutettiin, ja näin ollen uutta hyödyllistä tietoa wollastoniittitäyteaineiden ominaisuuksista epoksimaalissa voi käyttää jatkokehityksen tukena.

Lähteet

- 1 Talbert, Rodger, 2008, Paint Technology handbook, Taylor & Francis Group, LLC.
- 2 Kallioinen, Ilkka; Sarvimäki Ilkka; Takala, Antti & Ådahl, Robert, 1981, Maalialan materiaalioppi käsikirja, Ammattikasvatusthallitus, Valtion painatuskeskus, 2.painos.
- 3 Brock, T.; Groteklaes, M.; Mischke, P. 2010. European Coatings Handbook. Hannover: Vincentz Network.
- 4 Korroosiokäsikirja, Kunnossapidon julkaisusarja, n:o 12, 2008, 4 painos, KP-Media OY.
- 5 Aromaa, Jari, 2013, Korroosion ja korroosioneston historia, Aalto-yliopiston julkaisusarja, Unigrafia Oy, Helsinki.
- 6 Ahonen, Taisto, 1991, Maalaustyöt, Pintakäsittelyn perusteet, Gummerus Kirjapaino Oy.
- 7 Prof. Dr. Goldschmidt Artur; Dr. Streitberger Hans-Joachim, 2007, BASF Handbook on Basics of Coating Technology, 2nd Edition, BASF Coatings AG, Munster.
- 8 Tracton, A. Arthur, 2007, Coatings Technology, Fundamentals, Testing and Processing Techniques, Taylor & Francis Group, LLC.
- 9 SFS-EN ISO 8044. Corrosion of metals and alloys. Basic terms and definitions. 2015. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 10 SFS-EN ISO 9227. Korroosiokokeet keinotekoisissa kaasuympäristöissä. Suolasumukokeet. 2. painos. 2012. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 11 SFS-EN ISO 4628-1. Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 1: Yleistä ja merkintäjärjestelmä. 2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 12 SFS-EN ISO 4628-2. Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 2: Rakkuloitumisasteen arviointi. 2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

- 13 SFS-EN ISO 4628-3. Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 3: Ruostumisasteen arviointi. 2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 14 SFS-EN ISO 4628-4. Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 4: Halkeilemisasteen arviointi. 2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 15 SFS-EN ISO 4628-5. Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 5: Hilseilyasteen arviointi. 2004. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 16 SFS-EN ISO 4628-8. Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten vaurioiden esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 8: Viiltoa tai muuta pinnoitteeseen tehtyä vauriota ympäröivän irtoamisen ja korroosion arviointi. 2. painos. 2013. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 17 SFS ISO 20340. Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Suojamaaliyhdistelmien toimivuusvaatimukset offshore-rakenteissa ja vastaavissa rakenteissa. 2006. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 18 SFS-EN ISO 12944-6. Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. osa 6: Laboratoriomenetelmät toimivuuden testaamiseksi. 1998. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.
- 19 Low Oil Absorption Talc for High Solids Coatings. Verkkoaineisto. http://www.mondominerals.com/uploads/media/Mondo_TB1206.pdf. Luettu 4.10.2017
- 20 Wollastonite a versatile functional filler. Verkkodokumentti. <https://www.pcimag.com/articles/83563-wollastonite-a-versatile-functional-filler> Luettu 11.9.2017
- 21 Волластонит - универсальный функциональный наполнитель. Verkkodokumentti. <http://www.impexinvest.com.ua/en/main.php?page=article3> Luettu 20.9.2017
- 22 Heilurikovuuden määrittäminen. Teknos Method 1095.2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Teknos Oy.
- 23 Maalikalvon iskunkestävyyskoestus (Impact resistance). Teknos Method 1094. 2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Teknos Oy.
- 24 Taivutustesti kartiomainen tuurna. Teknos Method 1097.2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Teknos Oy.

- 25 Tiheyden määrittäminen pallomenetelmällä. Teknos Method 1112.2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Teknos Oy.
- 26 Viskositeetin mittaaminen Brookfield viskosimetrillä. Teknos Method 1050.2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Teknos Oy.
- 27 A study of the effect of pigments and fillers on the properties of anticorrosive paints. 2015. Verkkodokumentti. Emeraldinsight. <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/03699420610652377>. Päivitetty 15.10.2015. Luettu 5.9.2017
- 28 Teknos Oy. Korroosionestomaalauksen käsikirja. 2012. Teknos Oy. Offsetpaino L. Tuovinen Ky.
- 29 Reinforcing the future with Nordkalk W-Series. Verkkodokumentti. http://www.nordkalk.com/document/3/307/36bf9a8/637b_upload_f86c755_nordkalk_w_series_2015.pdf. Luettu 27.7.2017
- 30 Siltojen korjaus. Teräsrakenteet. Pintakäsittely. Liikennevirasto.2015. Verkkodokumentti. <https://julkaisut.liikennevirasto.fi/sillat/silko/kansio1/s1351.pdf>. Luettu 4.11.2017
- 31 Ciullo, Peter A, Industrial minerals and their uses. A handbook & formulary. 1996. Noyes Publication. Verkkodokumentti <http://rushim.ru/books/geochemie/industrial-minerals-and-their-uses.pdf> Luettu 10.11.2017
- 32 Viskositeetin määrittäminen Brookfield-viskosimetrillä. Verkkodokumentti. http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/laboratorio/elintarvikeanalyysit_viskositeetti_brookfield.html .Luettu 10.11.2017
- 33 SFS-EN ISO 4624. Maalit ja lakat. Tarttuvuuden arviointi vetokokeella.2016. Kemesta Ry.
- 34 Epoksihartsin polymerointi. Verkkodokumentti <http://pslc.ws/macrog/eposyn.htm> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 35 Epoksihartsinreaktio amiinin kanssa. Verkkodokumentti <http://pslc.ws/macrog/eposyn.htm> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 36 Mikroskooppikuva talkin partikkeleiden eri muodoista. Verkkodokumentti http://www.nippon-talc.co.jp/old/lab_c.html , <http://www.claysandminerals.com/knowledgetransfer/spraydrier/examples> , Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018

- 37 Talkin rakenne.
Verkkodokumentti <http://butane.chem.uiuc.edu/pshapley/Environmental/L28/1.html> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 38 Mikroskooppikuva wollastoniitin partikkeleista. Verkkodokumentti
<http://www.imerys-additivesformetallurgy.com/our-products/nylite-wollastonite-blend-and-additive/> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 39 Laboratorion dissolverilaite.
Verkkodokumentti <http://www.karkimya.com.tr/tr/urunler/dispersiyon/laboratuvar-pilot-olcekli/yukse-keviri-laboratuvar-mikseri-dissolver> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 40 Brookfield-viskosimetri.
Verkkodokumentti <http://www.huntercaprez.com/Viskosimeter-BROOKFIELD.htm> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 41 Brookfield KU-2 -viskosimetri.
Verkkodokumentti <http://www.labequip.com/brookfield-ku2-krebs-viscometer.html> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 42 Cone&Plate -viskosimetri.
Verkkodokumentti <http://www.jankiimpex.com/brookfield/viscometer/high-shear-cap-1000/> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 43 BYK-Gardner pendulum hardness tester-heiluri.
Verkkodokumentti <https://www.gardco.com/pages/hardness/pendulumhardness.cfm> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 44 Gardner SPI Impact tester. Verkkodokumentti-
<http://www.worldoftest.com/gardner-impact-tester> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 45 PosiTest AT-A vetokoelaitte.
Verkkodokumentti <https://www.defelsko.com/positest-at> Päivitetty 4.5.2018. Luettu 4.5.2018
- 46 Viskositeetin mittaus Brookfield KU viskosimetrillä. Teknos Method 1062.2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Teknos Oy.
- 47 Kiiltomittari BYK-Gardner Micro-Tri-Gloss. Teknos Method 1064.2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Teknos Oy.
- 48 Maalin valumisen määrittäminen. PLABT027. Yrityksen sisäinen dokumentti. Teknos Oy.
- 49 Flink, Raimo; Killström, Tiina; Kilpinen, Juha; Kotilainen, Pekka; Tuisku, Leena, 5 painos, 2009, Metallipintojen teollinen maalaus, Tikkurila

Oyj.Vekkodokumenttihttps://www.tikkurila.fi/files/5017/Metallipintojen_teollinen_maalaus_2009.pdf. Päivitetty 24.5.2018. Luettu 24.5.2018

LIITE 1

Iskunkestävyydestin tulokset

Taulukko 1. Maalinäyte A, iskunkestävyydestin tulokset.

Maalinäyte A	Levy	WFT (μm)	Iskunkestävyys (kg/cm)
Kylmävalssattu teräs			
	1	200	65
	2	300	55
	3	500	45
Kylmävalssattu harjattu teräs			
	1	200	100
	2	300	85
	3	500	65
Rautafosfattoitu teräs			
	1	200	65
	2	300	55
	3	500	40

Taulukko 2. Maalinäyte B, iskunkestävyydestin tulokset.

Maalinäyte B	Levy	WFT (μm)	Iskunkestävyys (kg/cm)
Kylmävalssattu teräs			
	1	200	55
	2	300	50
	3	500	40
Kylmävalssattu harjattu teräs			
	1	200	75
	2	300	75
	3	500	50
Rautafosfattoitu teräs			
	1	200	55
	2	300	55
	3	500	45

Taulukko 3. Maalinäyte C, iskunkestävyydestin tulokset.

Maalinäyte C	Levy	WFT (μm)	Iskunkestävyys (kg/cm)
Kylmävalssattu teräs			
	1	200	45
	2	300	45
	3	500	45
Kylmävalssattu harjattu teräs			
	1	200	95
	2	300	85
	3	500	60
Rautafosfattoitu teräs			
	1	200	60
	2	300	50
	3	500	45

Taulukko 4. Maalinäyte D, iskunkestävyydestin tulokset.

Maalinäyte D	Levy	WFT (μm)	Iskunkestävyys (kg/cm)
Kylmävalssattu teräs			
	1	200	45
	2	300	45
	3	500	40
Kylmävalssattu harjattu teräs			
	1	200	90
	2	300	60
	3	500	55
Rautafosfattoitu teräs			
	1	200	45
	2	300	45
	3	500	45

Taulukko 5. Maalinäyte E, iskunkestävyydestin tulokset.

Maalinäyte E	Levy	WFT (μm)	Iskunkestävyys (kg/cm)
Kylmävalssattu teräs			
	1	200	75
	2	300	60
	3	500	45
Kylmävalssattu harjattu teräs			
	1	200	100
	2	300	80
	3	500	55
Rautafosfatoitu teräs			
	1	200	80
	2	300	55
	3	500	40

LIITE 2

Kondenssitestin tulokset

Taulukko 6. Kondenssitesti 480 tuntia, rasitusluokka C4-M.

Maalinäyte F	CT13F314	CT13F315	CT13F316
Rakkuloituminen, ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6			
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340			
Adheesio, ISO 4624	7,74 7,10	7,07 6,21	7,55 5,57

Taulukko 7. Kondenssitesti 720 tuntia, rasitusluokka C4-H.

Maalinäyte F	CT13F317	CT13F318	CT13F319
Rakkuloituminen, ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6			
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340			
Adheesio, ISO 4624	6,37	4,84 5,25	7,32 6,18

Taulukko 8. Kondenssitesti 720 tuntia, rasiusluokka C4-H.

Maalinäyte A	CT15F328	CT15F329	CT15F330
Rakkuloituminen, ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6			
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340			
Adheesio, ISO 4624	7,86 8,19	8,19 8,96	6,15 8,86

Taulukko 9. Kondenssitesti 1 440 tuntia, rasiusluokka C5-M.

Maalinäyte A	CT15F331	CT15F332	CT15F333
Rakkuloituminen, ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6			
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340			
Adheesio, ISO 4624	7,59 8,60	9,97 9,97	9,74 9,68

LIITE 3

Suolasumutestin tulokset

Taulukko 10. Suolasumutesti 720 tuntia, rasisusluokka C4-H.

Maalinäyte F	SS13F557	SS13F558	SS13F559
Rakkuloituminen, ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6	2	1	2
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340			
Adheesio, ISO 4624	5,13 6,72	7,42 7,23	6,94 6,18

Taulukko 11. Suolasumutesti 1 440 tuntia, rasisusluokka C5-M.

Maalinäyte F	SS13F560	SS13F561	SS13F562
Rakkuloituminen ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6	3	2,5	1,5
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340	2,4	1,2	0,7
Adheesio, ISO 4624	5,38	7,83	7,74

Taulukko 12. Suolasumutesti 1 440 tuntia, rasitusluokka C5-M.

Maalinäyte A	SS15F572	SS15F573	SS15F574
Rakkuloituminen, ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6	2,5	2,5	2,5
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340	1,1	1,1	0,8
Adheesio, ISO 4624	10,51 9,80	10,54 11,32	8,81 9,97

LIITE 4

Vesiupotustestin tulokset

Vesiupotustesti tehtiin standardin ISO 2812-2 mukaisesti ja vesiupotustestin kestoaika oli 3 000 tuntia.

Taulukko 13. Veteen upotustesti 3 000 tuntia, rasitusluokka Im1.

Maalinäyte F	IM13F083	IM13F084	IM13F085
Rakkuloituminen, ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6			
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340			
Adheesio, ISO 4624	5,8 6,6	7,6 6,1	6,5 6,5

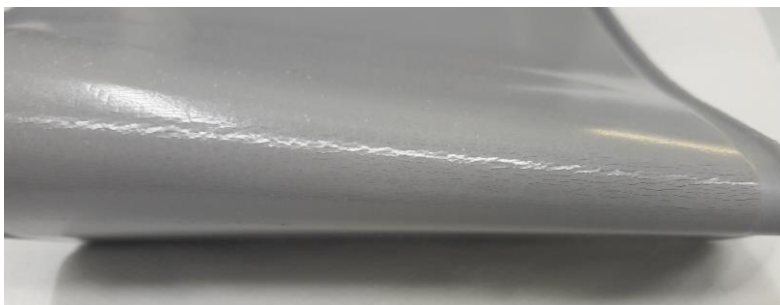
Taulukko 14. Veteen upotustesti 3 000 tuntia, rasitusluokka Im1.

Maalinäyte A	IM15F065	IM13F066	IM13F067
Rakkuloituminen, ISO 4628-2	0	0	0
Ruostuminen, ISO 4628-3	Ri 0	Ri 0	Ri 0
Halkeileminen, ISO 4629-4	0	0	0
Hilseileminen, ISO 4628-5	0	0	0
Ruostuminen naarmusta, ISO 12944-6			
Ruostuminen naarmusta ka, ISO 20340			
Adheesio, ISO 4624	11,67 10,50	9,8 10,88	11,75 10,20

LIITE 5

Taivutustesti kartiomainen tuurna

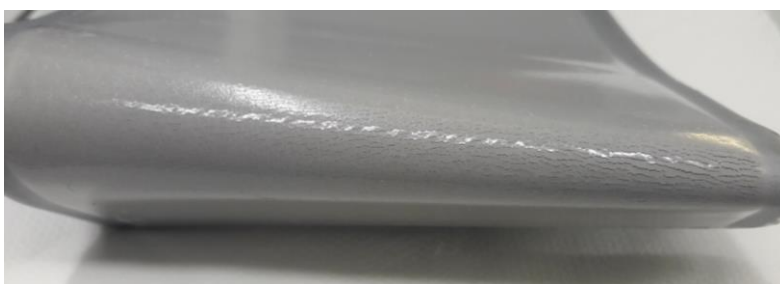
Halkeamien esimerkkikuvat



Kuva 1. Taivutustesti, maalikalvossa on vähäistä halkeilua.



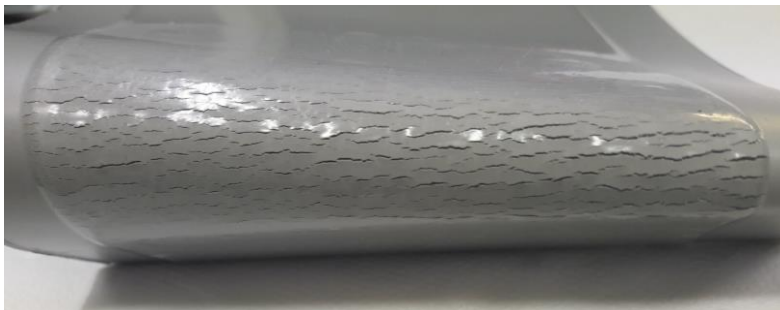
Kuva 2. Taivutustesti, maalikalvossa on pieniä halkeamia.



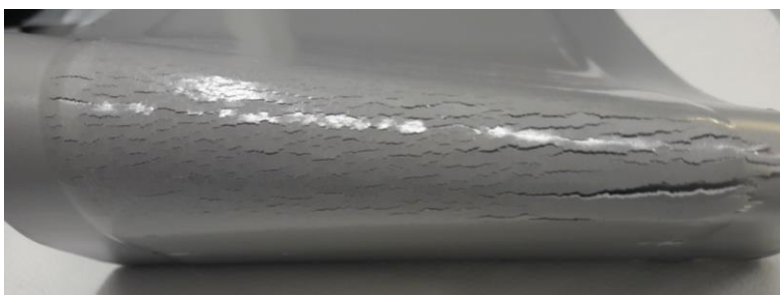
Kuva 3. Taivutustesti, maalikalvossa on keskikokoisia halkeamia.

Taivutustesti kartiomainen tuurna

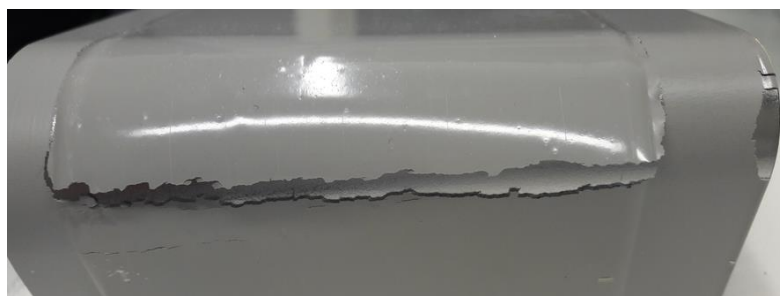
Halkeamien esimerkkikuvat



Kuva 4. Taivutustesti, maalikalvossa on isoja halkeamia.



Kuva 5. Taivutustesti, maalikalvo on osittain irronnut, isompi halkeama.



Kuva 6. Taivutustesti, maalikalvo on irronnut alustasta.

LIITE 6

Taivutustestin tulokset

Taulukko 15. Taivutustesti, KV-teräs.

WFT (μm)	Maalinäyte A	Maalinäyte B	Maalinäyte C	Maalinäyte D	Maalinäyte E
200	1	2	5	3	1
300	2	3	5	3	1
500	3	4	5	6	3

Taulukko 16. Taivutustesti, KV-harjattu teräs.

WFT (μm)	Maalinäyte A	Maalinäyte B	Maalinäyte C	Maalinäyte D	Maalinäyte E
200	0	0	0	1	0
300	0	0	0	2	0
500	2	2	2	2	2

Taulukko 17. Taivutustesti, Fe-fosfatoitu teräs.

WFT (μm)	Maalinäyte A	Maalinäyte B	Maalinäyte C	Maalinäyte D	Maalinäyte E
200	1	1	1	2	0
300	2	2	1	2	2
500	3	3	5	3	4

LIITE 7

Eri alustojen kuivakalvonpaksuudet

Kalvonpaksuusmittaukset mitattiin Elcometer 456 mittalaitteella. Kalvonpaksuudet täyttivät asetettuja niille toleranssiarvoja. Tulos on viiden mittauksen keskiarvo (\bar{x}).

Taulukko 18. DFT-kuivakalvonpaksuudet, KV-teräs.

WFT (μm)	DFT (μm) A	DFT (μm) B	DFT (μm) C	DFT (μm) D	DFT (μm) E
200	134	176	135	130	136
300	207	231	191	190	194
500	399	428	365	366	348

Taulukko 19. DFT-kuivakalvonpaksuudet, KV-harjattu teräs.

WFT (μm)	DFT (μm) A	DFT (μm) B	DFT (μm) C	DFT (μm) D	DFT (μm) E
200	97	167	115	97	105
300	155	176	147	217	156
500	298	317	298	314	301

Taulukko 20. DFT-kuivakalvonpaksuudet, Fe-fosfatoitu teräs.

WFT (μm)	DFT (μm) A	DFT (μm) B	DFT (μm) C	DFT (μm) D	DFT (μm) E
200	136	160	131	154	130
300	204	227	195	196	188
500	367	419	374	376	379

LIITE 8

Kiilto 60° ja König-heilurin kovuudet

Taulukko 21. Maalikalvojen kiilto 60°.

Versiot	WFT	KV- harjattu teräs	KV-teräs	Fe-fosfatoitu teräs
	(µm)	60°	60°	60°
A	200	38,2	70,7	69,4
	300	38,3	73,3	76,0
	500	51,9	70,8	72,7
B	200	43,7	86,0	87,1
	300	56,3	85,8	87,0
	500	60,5	84,7	85,9
C	200	57,7	78,2	77,9
	300	65,1	81,4	82,6
	500	66,0	73,0	77,3
D	200	17,4	57,4	77,7
	300	47,6	84,6	85,1
	500	73,0	88,9	90,4
E	200	26,4	44,0	44,7
	300	31,5	63,6	66,8
	500	47,5	77,6	77,8

Taulukko 22. König-heilurin kovuudet, 120 µm WFT.

Aika	Maalinäyte	Maalinäyte	Maalinäyte	Maalinäyte	Maalinäyte
	A	B	C	D	E
1d	77	75	67	66	88
7d	95	100	91	90	85