

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka

Paula Kangasmäki

**Standardin SFS-EN ISO 12944-5 mukaisten maalausyhdistelmien
ominaisuuksien vertailu C5-M- ja Im 2 -olosuhteissa**

Insinööriyö 19.5.2010

Ohjaaja: Yliopettaja emeritus Raimo Soininen

Ohjaava opettaja: Yliopettaja emeritus Raimo Soininen

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Paula Kangasmäki Standardin SFS-EN ISO 12944-5 mukaisten maalausyhdistelmien ominaisuuksien vertailu C5-M ja Im 2 -olosuhteissa 67 sivua 19.5.2010
Koulutusohjelma	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	Yliopettaja emeritus Raimo Soininen Yliopettaja emeritus Raimo Soininen
<p>Insinööriyössä tutkittiin EN ISO 12944-5 mukaisten maalausyhdistelmien ominaisuuksia, jotka ovat tarkoitettu C5-M- ja Im 2 -olosuhteisiin.</p> <p>Jokaiselle levyille tehtiin samanlainen esikäsittely ja puhallettiin Sa 2 ½. Levyt maalattiin optimiolosuhteissa. Jokaisesta levystä tehtiin myös vertailulevy.</p> <p>Upotusrasitukseen meneville levyille tehtiin testit, jossa ne upotettiin 0,5 % ja 5 % NaCl-liuokseen ja mereen. Ilmastorasitukseen meneville levyille tehtiin proheesio-, jatkuvasuolasumu- ja UV-kondensiotestit; lisäksi yksi levy asetettiin meren rantaan.</p> <p>Kaikille rasituksissa olleille levyille tehtiin vetonuppikoe, X-viiltotesti yli 250 µm ja hilaristikkotesti alle 250 µm sekä tabertesti.</p> <p>Tulosten perusteella voitiin päätellä PURin olevan kestävämpää rankoissa C5-M -olosuhteissa. Vesiupotuksessa olleille maaleille tulokset olivat samankaltaisia keskenään, mutta epoksilla ominaisuudet olivat kuitenkin hieman parempia ja murtumat tapahtuivat vetonuppikokeessa pääsääntöisesti liimassa. Foulingeliöiden takia ei epoksimastiaa voida kuitenkaan suositella lämpimiin olosuhteisiin.</p>	
Hakusanat	epoksi, antifouling, polyuretaani, akryyli, korroosio vedessä, adheesio, koheesio

Author Title	Paula Kangasmäki A comparison of painting systems of standard EN ISO 12944-5 in C5-M and Im2 circumstances.
Number of Pages Date	67 pages 19 May 2010
Degree Programme	Materials technology and surface engineering
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Raimo Soininen, Principal Lecturer emeritus Raimo Soininen, Principal Lecturer emeritus
<p>The attributes of the paints were inspected according to the EN ISO 12944-5 for protective paint systems which are suitable for atmosphere corrosion category C5-M and corrosion category immersion Im 2.</p> <p>Pretreatment was similar for each plate, and blast cleaning was done to the level of Sa 2½. The plates were painted in the laboratory and at room temperature. Reference plates were made for each paint system.</p> <p>The plates which were destined for immerse stress were imbedded in 0, 5 % and 5 % NaCl -liquids. For the plates which were destined for climate stress, tests such as prohesion, non-stop salt sprays and UV-condense tests were executed. One plate from both paint systems was imbedded in sea water.</p> <p>Pull-off- and taber abrasion -tests were carried out with each paint system. X-cutter test was done above paint thickness 250 µm and cross cut test below 250 µm.</p> <p>The results indicate that PUR is more resistant than acryl paint in the very high C5-M atmosphere category. The results from immersion stress tests with sea water were quite similar for both paint systems. The epoxy system got slightly better results because the type of the failure was adhesion between the glue and the dolly. Because of prevent fouling, epoxy paints cannot be recommended for use at seas that do not face ice.</p>	
Keywords	epoxy, antifouling, polyurethane, acryl, corrosion in water, adhesion, cohesion

Sisällys

1	Johdanto.....	6
2	Korroosioteoriaa.....	7
2.1	Korroosion esiintymismuodot.....	7
2.2	Yleinen syöpyminen.....	7
2.2.1	Galvaaninen eli kontaktikorroosio.....	8
2.2.2	Pintaan kohdistuvan mekaanisen rasituksen aiheuttama syöpyminen.....	9
2.2.3	Raerajakorroosio.....	9
2.2.4	Valikoiva syöpyminen.....	10
2.2.5	Jännitystilän ja korroosion yhteisvaikutuksesta aiheutuva murtuminen.....	10
2.2.6	Paikallinen syöpyminen.....	11
2.3	Korroosio merivedessä.....	12
2.4	Anodit korroosionestossa.....	13
2.5	Oikeiden materiaalien valinta korroosionestossa.....	15
3	Maalattavan alustan esikäsittely.....	16
3.1	Kuivajääpuhallus.....	17
4	Maalausjärjestelmän valinta.....	18
4.1	Pohjamaali.....	19
4.2	Välimaali.....	20
4.3	Pintamaali.....	20
5	Korroosionestomaalit.....	22
5.1	Epoksireaktiomaalit.....	22
5.1.1	Epoksihartsien koostumus.....	22
5.1.2	Epoksihartsien käyttö.....	24
5.1.3	Liuotinhenteiset epoksireaktiomaalit.....	24
5.1.4	Liuotteettomat ja niukkaliuotteiset epoksireaktiomaalit.....	24
5.1.5	Applikointi.....	26
5.1.6	Altistuminen.....	26
5.2	Vinyylimaalit.....	27
5.2.1	Ominaisuudet.....	27
5.2.2	Käyttö.....	28
5.3	Polyuretaanimaalit (PUR tai PU).....	29
5.3.1	Polyuretaanin koostumus.....	29
5.3.2	Ominaisuudet.....	30
5.3.3	Applikointi.....	32
5.3.4	Altistuminen.....	32
5.4	Antifouling.....	32
5.4.1	Antifoulingin kehitys.....	33
5.4.2	Antifoulingin käyttö.....	34
5.4.3	Haitat.....	35
5.4.4	Kustannukset.....	35
5.5	Akryyli.....	35
5.5.1	Ominaisuudet.....	35
5.5.2	Käyttö.....	36
5.6	VOC-Volatile Organic Compound eli Haihtuvat Orgaaniset Yhdisteet.....	36
5.7	Terveysvaikutukset.....	37
6	Työn vaiheet.....	37
6.1	Tutkiminen erilaisten testausmenetelmien avulla.....	38
6.1.1	Vetonuppikoe.....	38

6.1.2	Hilaristikko ja X-viiltotesti.....	39
6.1.3	Taber-testi.....	40
7	Maalipinnoitteen tarkastelu silmämääräisesti.....	41
7.1	Marathon IQ.....	41
7.2	Primastic Universal NM, Safeguard Universal ES ja Antifouling Sea Quantum.....	41
7.3	Primastic Universal NM ja Normadur.....	42
7.4	Vinyguard Silvergrey 88 ja Pioner Topcoat.....	43
8	Testaukset ja niiden tulokset.....	43
8.1	Upotusrasitukset.....	43
8.1.1	Upotusrasitusolosuhteet.....	43
8.1.2	Meriolosuhteet.....	46
8.2	Ilmastorasituskokeet.....	48
8.2.1	Proheesio.....	48
8.2.2	UV-kondensiokaappi.....	48
8.2.3	Jatkuva suolasumu.....	49
8.2.4	Meren rantaan sijoitetut levyt.....	49
8.2.5	Vertailulevyt.....	49
8.3	Tartuntalujuuskokeet.....	50
8.4	Hilaristikko ja X-viilto.....	52
8.5	Taber-testi.....	53
9	Tulosten analysointia.....	54
9.1	Vetonuppi.....	54
9.1.1	Epoksi.....	54
9.1.2	Antifouling.....	55
9.1.3	Polyuretaani.....	55
9.1.4	Akryyli.....	56
9.2	Hilaristikko ja X-viilto.....	57
9.2.1	Epoksi.....	57
9.2.2	Antifouling.....	58
9.2.3	Yhteenveto upotusrasituksessa olleille levyille.....	58
9.2.4	Polyuretaani.....	59
9.2.5	Akryyli.....	59
9.2.6	Yhteenveto ilmastorasituksissa olleille levyille.....	60
9.3	Taber-testi.....	60
9.3.1	Vinyyli/akryyli-maaliyhdistelmä.....	60
9.3.2	Epoksimastic/antifouling-maaliyhdistelmä.....	60
9.3.3	Epoksimastic ja epoksimastic/polyuretaani-maaliyhdistelmät.....	61
9.3.4	Yhteenveto.....	61
9.4	Rasitustestien vertailua.....	62
9.4.1	Upotusrasitus.....	62
9.4.2	Ilmastorasitus C5-M.....	62
9.5	Jatkotutkimustarve.....	63
10	Yhteenveto.....	64
	LIITE 1.....	67

1 Johdanto

Kehitettäessä korroosionestomaalauksessa maaliyhdistelmiä eri alustamateriaaleille ja erilaisiin olosuhteisiin on standardissa SFS-EN ISO 12944-6 määritetty maaliyhdistelmille käytettävät testausmenetelmät. Tavanomaisimmat lyhytaikaiset koemenetelmät ovat suolasumutestaus ja kosteuskammio-koee. Näiden lyhytaikaisten rasiustestien soveltuvuus eri sideaineisille maaliyhdistelmille on alan kirjallisuudessa asetettu kyseenalaiseksi. Erityisesti on kritisoitu suolasumutestin soveltuvuutta vesiohenteisten korroosionestomaaliyhdistelmien testaukseen. Vesiohenteisilla maaleilla on usein esiintynyt suolasumutestauksessa rakkuloitumista, mitä ei kuitenkaan ole esiintynyt pitkäaikaisissa testeissä eikä normaaleissa rasiustulosuhteissa. Joitakin vertailevia tutkimuksia on tehty muilla lyhytaikaisilla rasiustestimenetelmillä toivoen, että ne paremmin vastaisivat todellisia rasiustulosuhteita. Tällaisia testausmenetelmiä ovat mm. proheesio-testi sekä syklinen testi, jossa vuorottelevat UV-rasitus, kosteusrasitus sekä suolasumurasitus. Toistaiseksi ei ole kuitenkaan syntynyt yhdenmukaisuutta näiden testausmenetelmien mukaanottamisesta standardin SFS-EN ISO 12944-6 maaliyhdistelmien testausohjelmaan, vaan edellytetään maailmanlaajuisesti lisää vertailevia testaustutkimuksia.

Työn tavoitteena on vertailla muutamien lähinnä laivanrakennusteollisuudessa käytettyjen suojamaaliyhdistelmien ominaisuuksia hyvin ankarissa ilmasto- ja upotusrasitusolosuhteissa erilaisilla lyhytaikaisilla testausmenetelmillä.

Työssä esitetään yleisiä suojamaalausyhdistelmiä ja tutkitaan niiden ominaisuuksia erilaisten testausmenetelmien avulla. Tavoitteena oli selvittää maalien käyttäytyminen erilaisissa olosuhteissa. Työssä esiteltävät maalausyhdistelmät ovat tarkoitettu erittäin raskaisiin C5-M ja Im 2 olosuhteisiin. Kaikki testit ovat rankkoja ja tarkoitettu teollisuusmaaleille. Työssä tutkitaan ja vertaillaan suojamaaliyhdistelmiä, joita käytetään laivan vedenalaiseen runkoon ja meri-ilmastorasitukseen. Tutkitaan telakoilla jo käytössä olevia maaliyhdistelmiä. Samoissa testausolosuhteissa olivat keskenään rasiustulosuhteisiin C5-M ja Im 2 menevät levyt, joten tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

2 Korroosioteoraa

Märkäkorrosio edellyttää, että metallin pinta on sähköä johtava tai sen pinnalla on sähköä johtava neste (elektrolyytti) sekä happea. Korrosio tarvitsee kehittyäkseen happea ja vettä. Ruoste syntyy rautaionien reagoidessa hydroksyyliyhymän kanssa.

Esimerkiksi laivan ollessa vedessä vesi toimii elektrolyytinä. Laivan runko on terästä ja katodiseen suojaukseen käytettävät anodit ovat usein sinkkiä. Koska metallit ovat kontaktissa toisiinsa, alkaa epäjalompi metalli syöpyä. Tässä on kyseessä korroosipari. Alla olevassa taulukossa 1 näkyy metallien syöpymisnopeuksia. Kuitenkin korroosionopeuteen vaikuttavat monet eri tekijät, joten aina vertailtavien kappaleiden on oltava samoissa olosuhteissa, että ne säilyttävät vertailukelpoisuutensa. Korroosionopeuteen vaikuttavat ympäristön olosuhteet ja käytetyt materiaalit. Ympäristön olosuhteet voivat vaihdella kevyestä sisärasituksesta mekaaniseen upotusrasitukseen. Pintakäsittelyä suunniteltaessa on aina huomioitava kohteen käyttöpaikan rasitusolosuhteet. Eri rasituksiin tehdään huomattavasti erilainen pintakäsittely. /1; s.17-20/

Taulukko 1. Korroosionopeus erimetalleissa C5-M -olosuhteissa /1 s:18/

Korroosionopeus eri metalleissa ($\mu\text{m}/\text{vuosi}$)	2 vuotta	5 vuotta	10 vuotta
Teräs	51,1	32,8	20,7
Alumiini	0,48	0,76	0,35
Kupari	1,8	1,1	0,71
Sinkki	3,6	2,6	1,7

2.1 Korroosion esiintymismuodot

Sähkökemiallinen korrosio esiintyy useissa eri muodoissa. Sen esiintymismuoto voi vaihdella materiaalin ominaisuuksien, kemiallisten ja mekaanisten ympäristötekijöiden sekä rakenteiden ja toimintamekanismien mukaan.

2.2 Yleinen syöpyminen

Metallin koko pinta syöpyy tasaisella nopeudella, koska pinnalle ei muodostu pysyvää anodista tai katodista aluetta. Yleinen syöpyminen on suojaamattomille ja useissa

tapauksissa myös kemikaaleille altistetuille metallipinnoille tyypillinen korroosionmuoto. Korroosiotuote voi muodostaa metallin pinnalle hyvän korroosiosuojan tai sitten sillä voi olla päinvastaiset vaikutukset eli kiihdyttää korroosion etenemistä. Yleisen syöpymisen seuraaminen on yleensä helppoa painohäviö- tai seinämäpaksuusmittausten avulla. /30: s.193/

2.2.1 Galvaaninen eli kontaktikorroosio

Galvaanista korroosiota esiintyy, kun samassa elektrolyytissä on kaksi eri jännitetason omaavaa metallia sähköisessä kontaktissa toisiinsa. Alhaisemman elektrodipotentiaaloin omaava eli epäjalompi metalli muodostuu anodiksi ja syöpyy. Jalomman metallin syöpyminen puolestaan pysähtyy lähes täysin. Epäjalompi metalli syöpyy nopeammin kuin tilanteessa, jossa se olisi yksinään kyseisessä liuoksessa. Galvaanisen korroosion nopeus on paikallaan olevassa elektrolyytissä vähäistä, mutta nopeus kasvaa elektrolyytin virtausten kasvaessa.

/30: s.168/

Galvaanisia pareja on vältettävä, etenkin suuria potentiaalieroja. Jos galvaanisia pareja syntyy, on varmistettava täydellinen sähköinen eristys niiden välillä. Potentiaaliero ei kuitenkaan sinänsä määrää korroosionopeutta, vaan sen määrää lähinnä katodisen reaktion kinetiikka jalomman metallin pinnalla. On myös oltava erityisen tarkka, ettei anodipinta jää liian pieneksi verrattuna katodin pinta-alaan. /30: s.168/

Galvaanisen parin syöpymiskäyttäytymistä voidaan arvioida merivedessä määritellyn potentiaalisarjan avulla. Mitä kauempana sarjassa kontaktissa olevat metallit sijaitsevat, sitä todennäköisempää on galvaanisen parin muodostuminen. Galvaaninen korroosio pari voi muodostua myös silloin, kun metalli on kosketuksissa jalomman ei-metallisen sähköä johtavan materiaalin kanssa. Korroosio paria hyödynnetään katodisessa suojauksessa. Epäjalompi metalli kytketään suojattavaan metalliin, kuten vedenalaisessa laivan rungossa teräksen pintaan kiinnitetään sinkki- tai magnesiumanodeja. /30: s.168-169/

2.2.2 Pintaan kohdistuvan mekaanisen rasituksen aiheuttama syöpyminen

2.2.2.1 Eroosiokorroosio

Rakennemateriaali syöpyy sähkökemiallisen reaktion takia, jolloin liuoksessa liikenopeus kasvaa liian suureksi ja liuoksen liikkeen johdosta metallista irtoaa pintaa suojaava passiivikerros. Eroosiokorroosiota tavataan virtauksen epäjatkuvuuskohtissa. Putkien mutkat, haarat ja suuaukot ovat erityisen alttiita. Virtausnopeuden suuruus vaikuttaa kriittisesti korroosion etenemiseen. Eroosiokorroosio nopeutuu, jos virtauksessa on kiinteitä partikkeleita. Ne voivat rikkoa pinnan jo pienemmillä virtausnopeuksilla. Suurilla nopeuksilla partikkelierosiota aiheuttaa mekaanista kulumista, jolloin materiaalin korroosionkestävyydellä ei ole enää merkitystä. /30: s.167/

2.2.2.2 Kavitaatiokorroosio

Kavitaatiossa nestevirtauksessa syntyneet kaasukuplat luhistuvat räjähdysmäisesti, nesteen paineen äkkiäisestä kasvusta. Toistuvasti kaasukuplien luhistumisesta syntyvä paineaalto metallin pinnalla voi rikkoa metallin pintaa suojaavan kalvon, jolloin korroosio pääsee etenemään paljaalla pinnalla nopeasti. Kavitaatiokorroosiota on havaittavissa paikoissa, jossa paine laskee alle nesteen höyrystymispaineen. Se johtuu virtauksen epäjatkuvuustekijöistä. Kavitaatiokorroosiota esiintyy hydraulilaitteissa, laivojen potkureissa, pumppujen siipipyörissä, putkistoissa sekä laitteissa, joissa nesteen virtausnopeus on suuri ja joissa esiintyy paineen vaihteluja. /30: s.176/

2.2.3 Raerajakorroosio

Raerajoilla alkaa tapahtua nopeampaa syöpymistä kuin perusaineessa. Tämä johtuu raerajoille päässeistä epäpuhtauksista, jonkin ainesosan rikastumisesta tai seosainesosan vähentymisestä raerajalla. Raerajoille muodostuu siten epäjalompia vyöhykkeitä aiheuttaen galvaanisen korroosioparin.

Metalliseosten jähmettymisen, lämpökäsittelyn, hitsauksen tai korkean lämpötilan käytön yhteydessä raerajoille voi muodostua korroosionkestävyyttä heikentäviä yhdisteitä, jolloin syövyttävissä olosuhteissa metalliseos syöpyy voimakkaasti raerajoja pitkin.

Raerajakorroosiota voivat aiheuttaa raerajoille suotautuvat epäpuhtaudet ja tietyn seosaineen rikastuminen raerajoille tai köyhtyminen matriisista raerajojen läheisyydessä raerajaerkaumien vuoksi. Esimerkiksi jos alumiini sisältää epäpuhtautena rautaa, jonka liukoisuus matriisiin on pieni, se suotautuu raerajoille ja aiheuttaa raerajakorroosiota. /30/

2.2.4 Valikoiva syöpyminen

Valikoivassa eli selektiivisessä liukenemisessä tapahtuu metalliseoksen seosaineen tai mikrorakenneosan muita seosaineita nopeampaa liukenemistä. Tunnetuin on messingin sinkkikato, mutta myös alumiinipronssissa voi tapahtua alumiinin syöpymistä happoliuoksissa.

Alumiinipronssia käytetään mm. laivan potkureissa. Selektiivistä liukenemistä voidaan välttää katodisella suojauksella. /30: s.189/

2.2.5 Jännitystilän ja korroosion yhteisvaikutuksesta aiheutuva murtuminen

2.2.5.1 Jännityskorroosio

Pinnassa vaikuttavan vetojännityksen ja korroosion vuoksi metallin pinnalle muodostuu murtumia. Jokaiselle materiaalin rakenneaineelle jännityskorroosiota aiheuttavat vain tietyt olosuhteet, esimerkiksi kemikaalit. Tällöin murtuminen materiaalissa tapahtuu aineen murto- ja myötölujuutta alhaisimmassa vetojännitystilassa. Jännityskorroosiota voi aiheutua sisäisen tai ulkoisen kuormituksen takia. Sisäiset jännitykset, kuten hitsauksen aiheuttamat jäännösjännitykset, ovat erityisen vaarallisia, koska niiden kokoa on vaikea ennustaa ja ne usein ovat hyvin suuria, lähes metallin myötölujuuden suuruisia. Erittäin vaaralliseksi tilanne muodostuu, kun sekä ulkoiset että sisäiset jännitykset vaikuttavat samanaikaisesti. Jännityskorroosion aiheuttama murtopinta muistuttaa hauraan murtuman murtopintaa, vaikkakin sen aiheuttaja itse asiassa on paikallinen korroosio. /30: s.172/

2.2.5.2 Korroosioväsyminen

Vaihtosuuntainen kuormitus ja syövyttävän ympäristön yhteisvaikutus voi aikaansaada korroosioväsymistä. Korroosioväsymismurtuma voi tapahtua materiaalille väsymislujuutta alhaisemmalla jännityksellä. Syöpymistila keskittyy jännitysten takia tiettyihin kohtiin ja nopeuttaa väsymismurtumaa. Ilmiö on todennäköistä sellaisissa tilanteissa, jossa materiaali on altis muille paikallisen korroosion muodoille. Siinä tilanteessa korroosioauriot toimivat jännityksen keskittäjinä. Korroosioväsymistä voi esiintyä myös erittäin lievissä korroosioympäristöissä, joissa syöpyminen on tasaista. Jännitysvaihtelut aiheuttavat paikallisia muodonmuutoksia, jotka voivat näin rikkoa passiivikerroksen tai jotka muodostavat pintaan epäjalomman syöpyvän anodisen kohdan. Kaikkein yleisimpiä korroosioväsymismurtumat ovat kuitenkin erilaisissa pyörivissä koneenosissa, kuten akseleissa. /30: s.179-180/

2.2.6 Paikallinen syöpyminen

2.2.6.1 Pistesyöpyminen

Metallin syöpyminen voi keskittyä pienille alueille pinnassa ja näin synnyttää paikallisia kuoppamaisia syvänteitä. Syöpymät voivat olla syviä ja niiden havaittavuus voi olla huono. Sen alkamista on vaikea huomata ja sen syntyyn voi mennä pitkiä aikoja, kuten useita kuukausia. Pistesyöpyminen voi saada alkunsa esimerkiksi pinnan kemiallisen koostumuksen epähomogeenisuudesta (heterogeenisuuksista) tai kloridi-ionien vaikutuksesta. Pistesyöpymistä tapahtuu sellaisissa metalleissa, joissa korroosionkestävyys perustuu pintaa suojaavaan passiivikerrokseen. Useimmiten pistesyöpyminen tapahtuu kloridien tunkeutuessa passiivikalvon heikoimpiin kohtiin ja alkaessa tuhota passiivikerrosta siitä kohdasta. Korroosion edetessä kloridit hakeutuvat syöpyneeseen kohtaan. Korroosionopeus kiihtyy, koska pinnalle on tullut epäedullinen anodi-katodipinta. Syöpymäkohtaan syntyy sähkökenttä. Tällöin metallien reagoidessa veden kanssa metallikloridit hajoavat metallihydroksideiksi, jotka hapettuvat ruosteeksi. Ruostumattomilla teräksillä pistesyöpymisnopeus riippuu liuoksen kloridipitoisuuden lisäksi pH:sta, teräksen elektrodipotentiaalista, liuoksen virtausnopeudesta ja lämpötilasta. Happamissa liuoksissa syöpymisvaara on suurin. /30: s. 182-183/

2.2.6.2 Rako- eli piilokorroosio

Rakokorroosiota tapahtuu ahtaissa raoissa, joihin liuos pääsee tunkeutumaan, mutta joihin hapen puutteen takia ei pysty muodostumaan passiivikalvoa. Suojaamaton pinta on yleensä niin pieni, että sinne syntyy epäedullinen anodi-katodisuhde. Yleisimpänä syynä ovat happipitoisuuserot liuoksessa, jolloin happiköyhempi alue muodostuu anodiksi. Korroosionopeus kasvaa entisestään, jos sinne pääsee klorideja. Rakoon syntyy sähkökenttä, jolloin korroosion reaktioketju on samanlainen kuin pistesyöpymisessä. Rakokorroosiota voi välttää tiivistämällä rakoja tai siinä tapauksessa että raon tekemisen vuoksi on välttämätöntä suurentaa rakoja niin, että hapella on mahdollisuus päästä rakoon kunnolla ja passiivikalvo voi syntyä. Rakokorroosiota voi esiintyä kaikilla metalleilla, joiden korroosionkestävyys perustuu passiivikerrokseen. Vaikka kloridipitoinen vesi kiihdyttää rakokorroosiota, voi rakokorroosiota esiintyä myös makeassa vedessä. /30: s.185-187/

2.3 Korroosio merivedessä

Merivesien suolapitoisuus vaihtelee huomattavasti riippuen paikasta. Meren suolapitoisuus keskimäärin on noin 3,5 %, mutta se voi yltää lähes 5 %:iin. pH on keskimäärin 8,1. Korroosionopeus on huomattavan suuri näissä olosuhteissa. Tästä johtuen merivesirasitukseen menevillä kohteilla on tarkat ja korkeat korroosionestovaatimukset. Kalsium- ja magnesiumsuolat voivat kuitenkin vähentää korroosion vaikutusta. Tätä käytetäänkin hyväksi katodisessa suojauksessa. Vedenalainen runko on alttiina monelle erilaiselle korroosiolle. Ollessaan liian suuri, veden virtausnopeus voi aiheuttaa eroosiorakokorroosiota, kun taas virtausnopeuden ollessa liian hidas runko on alttiina rakokorroosiolle.

Veden lämpötilan vaikutus korroosioon ja sen luonteeseen on merkittävä. Seurauksena lämpötilan korotuksesta korroosioreaktioiden nopeus kasvaa, hapen diffuusionopeus suurenee ja vetyioniaktiivisuuden kasvaessa pH-arvo pienenee, jolloin metallin potentiaalit muuttuvat ja suojakalvon muodostumismekanismit ja sen ominaisuudet muuttuvat. Kuitenkin vasta 80 °C lämpötilassa korroosionopeus saavuttaa maksimin.

Lämpötilan nousun vaikutuksia ei tarvitse huomioida laivan ulkolaitoja suunniteltaessa, mutta sen sijaan laivan lämminvesi- ja höyryputkistoissa, joissa lämpötila voi nousta edellä esitettyihin lukemiin, on otettava huomioon nesteen lämpötila korroosionestossa. /1; s.34, 30: s.225/

2.4 Anodit korroosionestossa

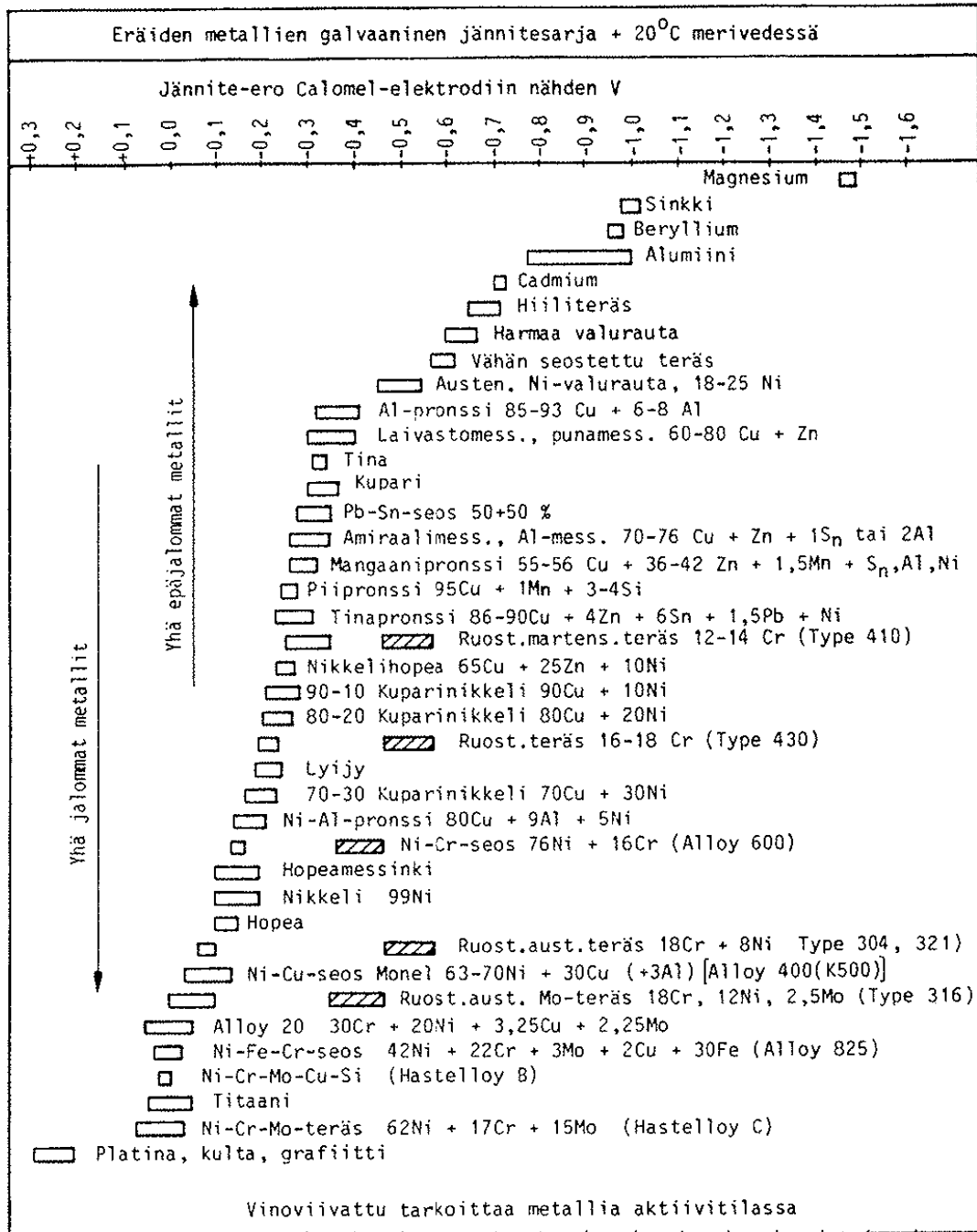
Metalleissa voi tapahtua joko kuiva- tai märkäkorroosiota, riippuen ympäröivästä väliaineesta. Metallin korroosio vesiliuoksessa on pääasiassa sähkökemiallinen reaktio. Vesiliuoksessa olevan metallin eli elektrodin ja liuoksen välille muodostuu sähköinen rajapinta. Tällöin elektrodin ja liuoksen välille syntyy sähköinen potentiaaliero. Potentiaaliero on riippuvainen metallin atomien taipumuksesta luovuttaa elektroneja. Korroosiota ei ala tapahtua ennen korroosioparin muodostumista. Pari muodostuu niin, että kaksi elektrodia on eri potentiaalissa elektrolyyttiin nähden. Näillä metalleilla on lisäksi oltava sähköinen yhteys elektrolyyttiin. Näin ollen korroosiopari muodostaa suljetun virtapiirin. Metallin liukenemisen yhteydessä anodista vapautuu elektroneja, ja ne kulkeutuvat katodille johdinta pitkin. Katodin ja liuoksen rajapinnassa ne reagoivat liuoksen positiivisten ionien kanssa. /28, 30: s.29, 35/

Potentiaalieroja voivat aiheuttaa tilanteet, jossa eri materiaalien välillä on jalousaste-eroja. Upotusrasituksen menevien teräksien koostumus on tiedettävä erittäin tarkkaan. Teräksen seostamisessa muutetaan mikrorakennetta ja metallin sisään voi syntyä faaseja, joiden jalousaste voi poiketa huomattavasti alkuperäisestä, jolloin haitallinen korroosiopari syntyy metallin sisälle. /30: s.29-31/

Lohkoja hitsattaessa on oltava tarkkana, ettei hitsausaumaan synny sisäisiä jännityksiä, jolloin syntyy vapaaenergiaeroja. Metallin lämpökäsittely voi myös synnyttää faaseja ja eroja rakenteen sisäisissä jännitystiloissa. /30: s. 31/

Laivoja suojaattaessa anodeilla on kiinnitettävä erityistä huomiota anodin ja katodin keskinäiseen kokoeroon. Erittäin syöpymisaltis tilanne on silloin, kun anodin pinta-ala on hyvin pieni verrattuna katodiin. Kyseinen tilanne johtaa nopeasti rakennetta syövyttävään paikalliseen korroosioon. Taulukosta 2 voidaan katsoa eri metallien jännite-erot + 20 °C merivedessä. /30: s.31/

Taulukko 2.3. Galvaaninen potentiaalisarja SCE-elektrodiin nähden eri metalleille ja metalliseoksille merivedessä /3/.



2.5 Oikeiden materiaalien valinta korroosionestossa

Rakenneaineen valinta on korroosioestossa erityisen tärkeää. Ympäröivät olosuhteet vaikuttavat olennaisesti materiaalin valintaan, koska saman perusaineen, kuten teräksen, eri seosaineilla pystytään korroosionopeutta hidastamaan. Tärkein asia on tietää, mitkä seosaineet sopivat mihinkin olosuhteisiin. /30: s.162/

Materiaalin valinnassa on myös otettava huomioon rakenneaineiden fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet, ja korroosionkestävyyttä arvioitaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota rakenteiden valmistusmenetelmiin ja rakenneratkaisuihin. Jos nämä tekijät jätetään huomioon ottamatta, ne voivat aiheuttaa ylimääräisiä korroosiokustannuksia ja myös turvallisuusriskejä. /30: s.162/

Rakenneaineen koostumus on erittäin kriittinen. Standardit antavat raja-arvoja ja niiden väliset arvot voivat poiketa jonkin verran toisistaan. Tästä syystä on oltava erityisen tietoinen materiaalien koostumuksista. Erityistä huomiota on myös kiinnitettävä siihen millaista rasiusta materiaali joutuu kestäväksi. /30: s.162/

Erittäin vaikeassa korroosioympäristössä voidaan suojapinnoitteiden avulla käyttää sellaisia materiaaleja, jotka eivät muuten kestäisi kyseisiä olosuhteita. Suojapinnoitteiden avulla saadaan materiaalien kustannuksia edullisemmiksi kuin samoissa olosuhteissa luotettavasti toimivien kalliiden materiaalien kanssa. Jossain tilanteissa vaatimukset ovat niin suuret, ettei ilman suojapinnoitteita saataisi aikaan yhtä turvallista sovellusta. Pinnoitteen on kuitenkin kestävä haluttuja olosuhteita, ja sen on sovittava perusmateriaalin kanssa yhteen alentamatta sen ominaisuuksia. Suojapinnoitteesta on tiedettävä sen kemialliset, fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet. On myös tiedettävä, miten pinnoite pysyy perusmateriaalissa. /30: s.163/

3 Maalattavan alustan esikäsitteleminen

Korroosioestomaalauksen kiinnipysyvyyteen ja kestävyysvaikutukseen vaikuttaa kappaleen tila juuri ennen maalauksen menoa. Maalaamattoman teräspinnan tilaa arvioidaan ennen esikäsitteilyä pinnan ruostumisasteena A, B, C ja D. Ruostumisaste A vastaa uutta kuumavalssattua ruosteetonta teräspintaa. Ruostumisaste B vastaa noin 3-6 kk ulkoilmassa ollutta teräspintaa, jossa valssihilsekerros on alkanut halkeilla ja pintaan on ilmestynyt ruostetta. Ruostumisaste C vastaa noin vuoden ulkona ollutta teräspintaa, joka on lähes täysin ruosteen peittämä. Ruostumisaste D vastaa noin 3 vuotta ulkorasituksessa ollutta teräspintaa, joka on ruosteessa ja jossa esiintyy kuoppakorroosiota.

Vastaavasti maalatun pinnan ruostumisastetta arvioidaan ruostumisasteena, joka on välillä Ri0-Ri5. Mitä pienempi Ri-arvo, sitä vähemmän maalatussa pinnassa on ruostetta. Ri0 vastaa täysin ehyttä ruosteetonta maalipintaa. Muissa ruostumisasteluokissa ovat maalatun pinnan ruostusmäärät Ri1 0,05 %, Ri2 0,5%, Ri3 1 %, Ri4 8 % ja Ri5 yli 40 %.

Tärkeimmät pinnan epäpuhtaudet, jotka vaikuttavat maalauksen onnistumiseen, ovat pinnan ruosteisuus, valssihilse sekä suolat ja rasvat. Maalauksspesifikaatiossa on aina viittaus standardiin ISO 8503-1, jossa on määritelty haluttu pinnan puhdistusaste ja pintaprofiilin karheus. Tämä tutkimus tehdään visuaalisin havainnoin, ja pintaprofiilia verrataan standardin ISO 8503-2 puhallusnäytteisiin. Pinnan karheutta voidaan tutkia myös mittaamalla profiilien ”huippu- ja laaksokohtia”, mutta on todettu riittäväksi ilmoittaa karheus puhallettavan rakeen muodossa shot (S) tai grit (G) ja pinnan karheutena hieno, keskikarhea tai karhea pintaprofiilikappaleeseen varrattuna. / 2; s.11-12/

Työssä kaikki puhallukset on tehty esikäsitteilyasteeseen Sa 2½ ja puhallusraetta grit 40 (keskikarhea) käyttäen. Esikäsitteilyaste Sa 2½ tarkoittaa hyvin huolellista suihkupuhdistusta. Paljain silmin tarkastellessa pinnalla ei saa olla näkyvää öljyä, rasvaa tai likaa eikä valssihilsettä, ruostetta, maalia tai vieraita aineita. Pinnalle jäävien epäpuhtauksien tulee olla hyvin kiinni alustassa.

Esikäsitteilyasteet laivojen ulkopinnoissa ovat välillä Sa 2 ja Sa 3. Käytetyin on kuitenkin Sa 2½.

Testimenetelmät vaativat seuraavia täydentäviä tietoja, joita saadaan standardeista ISO 8501, SFS-ISO 8503 ja ISO 8504. Raesuihkupuhdistuksesta on ilmoitettava rakeiden muoto, pinnan laatuvaatimukset ja pinnan lähtötilan ruostumisaste sekä raesuihkupuhdistuksessa saavutettu pinnan puhdistus- ja pinnankarheusaste. Lisäksi tulee ilmoittaa ilmoittaa raesuihkupuhdistuksessa vallinneet olosuhteet, kuten teräspinnan lämpötila, ilman lämpötila ja kastepiste. Jos vertailukappaleita käytetään, on sen tyyppi G tai S. /27/

Vertailukappaleita käytetään vain puhdistusasteille Sa 2½ ja Sa3, jolloin koko koekappaleen vertailupinta on oltava suihkupuhdistettu. Menetelmää voidaan soveltaa metalli- tai ei-metallirakeilla suihkupuhdistettuun pintaan. Silmämääräisen arvioinnin tuottaessa vaikeuksia voidaan pinnan laatu arvioida kuljettamalla kynnen selkää tai peukalon ja etusormen välissä olevaa puutikkua vuorotellen koepinnan ja vertailukappaleen osa-alueiden yli. On kuitenkin ehdottoman tärkeää muistaa, ettei kosketa puhallettua pintaa paljain käsin. Kädessä oleva rasva ja suolat tarttuvat puhallettuun pintaan ja voivat aiheuttaa huonomman adheesion pinnan ja maalin välille. /27/

3.1 Kuivajääpuhallus

Kuivajääpuhallus on peruseriaateiltaan sama kuin hiekka- tai raesuihkupuhallus. Toimenpide vaatii kuudesta kahteentoista bar paineen. Etuina on sen pölyttömyys. Eräs telakka on säästänyt 80 % siivouksen määrässä siirryttyään raepuhalluksesta ja laikkauksesta kuivajääpuhallukseen. Tätä on helppo käyttää esimerkiksi korjausmaalauksessa paikkapuhdistukseen, kun maalattuun kappaleeseen on tehty hitsauksia tai lohkojen asentamisen jälkeisiä lohkosaumojen hitsauksia. Tankeissa CO₂-pitoisuus voi nousta hyvin korkealle, joten on muistettava riittävä ilmastointi. Tällä menetelmällä voidaan poistaa ilmasta leijuva pöly sekä hyvin haitallinen hitsaussavu. Puhalluksella päästään standardin vaatimiin puhdistusasteisiin, jolloin esimerkiksi polttojäljen jälkeen se voidaan puhaltaa ja maalata. Se ei sotke hiekkapuhalluksen tavoin. Uusiin kohteisiin kuivajääpuhallusta ei suositella, koska kuivajääpuhalluksessa ei metallin pintaan synny tarvittavaa pintaprofiilia.

Kuivajäää on säilytettävä -79 °C lämpötilassa sen omassa kuljetuslaatikossaan. Pienissä erissä rakeen hinta tulee kalliiksi, mutta sen kulutuksen nousun myötä myös hinnan uskotaan laskevan.

Nykyisin hinta on vielä korkea. Kokemus on kuitenkin osoittanut, että kuivajääpuhallus ei ole käytännössä ottanut paikkaansa työmailla. Kuivajääpuhdistusta käytetään mm. sinkopuhallettujen valurautakappaleiden loppupuhdistuksessa.

Puhalluksessa on käytettävä suojarusteita ja on syytä käyttää CO₂-mittaria, jolloin tiedetään milloin pitoisuudet ovat liian korkealla. /3; s.68-69/

4 Maalausjärjestelmän valinta

Korroosioneston päätarkoituksena on suojata terästä niissä olosuhteissa, mihin maalattava kohde tulee. Telakoilla on kohtuulliset mahdollisuudet järjestää optimiolosuhteet maalaukselle. Kuitenkin Turussa on vain yksi allas suurille aluksille ja yksi sisähalli pienemmille aluksille. Helsingissä sekä Raumalla on kummassakin yksi allas. Olosuhteet pyritään aina järjestämään korroosionestomaalausprosessin kannalta optimaaliseksi, vaikka käytännössä näin ei aina tapahdu.

Korroosionestomaalausta käsittelevä standardi SFS-EN ISO 12944 on jaoteltu kahdeksaan osaan, joten standardi on apuna koko maalausprosessin aikana. Ennen maalausrittelyn tekemistä on oltava tietoisia, minne maalattava kohde menee. Maalien valintaan vaikuttaa se, seilaako laiva kylmissä vai lämpimissä vesissä, ympäröivä ilmasto, veden suolapitoisuus ja jäätilanne sekä monia muita rasitustekijöitä. Maalien kestävyys vaihtelee tyyteittäin, ja maalien kestävyys voidaan luokitella kolmeen kestävyysaikaluokkaan kussakin ilmasto- (C2-C5) tai upotusrasitusluokassa (Im 1-3). Alhainen kestävyysaikaluokka on L, jossa maalin kestävyudeksi arvioidaan kahdesta viiteen vuoteen suunnitellussa rakenteen ilmasto- tai upotusrasitusluokassa. Maaliyhdistelmän kohtalaisessa kestoajaluokassa (M) pinnan odotetaan kestävän viidestä viiteentoista vuoteen suunnitellussa rasitusluokassa. Korkeassa (H) kestoajaluokassa maaliyhdistelmän odotetaan kestävän yli viisitoista vuotta aiotussa rasitusluokassa. On muistettava kuitenkin, että edellämainitut kestoajat eivät ole takuuajokoja maaliyhdistelmälle tai korjausmaalaukselle, vaan ne ovat arvioita maaliyhdistelmän elinajaksi, jona aikana maaliyhdistelmä huononee yleensä ruostumisasteeseen Ri3. Takuureklamaatiot on esitettävä pääsääntöisesti vuoden kuluessa, riippuen sopimuksesta. Taulukosta 3 voidaan katsoa kullekin maaleille tyyppilliset ominaisuudet. /1: s.207-208, 26/

Standardin SFS-EN ISO 12944-5 mukaisessa suojamaalausjärjestelmässä esitetään vaatimusaste pinnan esikäsitteilyyn ja käytetyt maalit sekä halutut kuivakalvon paksuudet. Maalien tuoteselosteet ja käyttöturvatiedot ovat yleisesti maalin valmistajien internetsivuilla, ja niitä on noudatettava. Maalausjärjestelmässä käytetään yleensä useampia maaleja, kuten pohja-, väli-, tartunta- ja pintamaaleja. Kaikilla maaleilla on erilainen tehtävä, ja maalikerroksilla pyritäänkin täydentävään suojavaikutukseen. Pohjamaalin korroosiosuojausmekanismi perustuu vastusinhibointiin, anodiseen ja katodiseen inhibointiin tai katodiseen suojaukseen. Muilla maalikerroksilla pyritään lisäämään veden, hapen, kloridien ja muiden korroosiota aiheuttavien aineiden tunkeutumisvastusta alustan ja maalin rajapintaan. /1: s.208, 30: s.685/

4.1 Pohjamaali

Pohjamaalin tehtävä on tarttua kiinni alustaan. Siksi esikäsitteily on erityisen tärkeä ja maalattavan pinnan on oltava puhdas, että maali pääsee kiinnittymään mahdollisimman vapaasti siihen, koska pinnalla olevat epäpuhtaudet pienentävät tartuntapinnan alaa ja huonontavat tartuntaa sekä lyhentävät kestoikää. Tartunta maalin ja maalattavan pinnan välillä voi olla fyysikaalinen tai kemiallinen. Maalipinnan hyvä kostuttaminen on tärkeää, sen tekevät sideaineen polaariset ryhmät. Maalin pintajännitystä alentamalla pyritään parantamaan maalin kostutusominaisuuksia, jolloin varmistetaan maalin tasainen leviäminen ja tartunta metallipintaan. /30: s.685/

Kemiallisesti kuivuva maali kovettuu mahdollisten liuotteiden haihtuessa pois, minkä jälkeen maalin perusosa ja koveteosa reagoivat keskenään ja muodostavat kemiallinen sidoksen eli atomit jakavat yhteisen elektroniparin, jolloin syntyy erittäin luja sidos. Maali ei liukene kuivumisen jälkeen omaan liuottimeensa. Kemiallisesti kovettuvilla maaleilla maalattaessa on oltava tietoisia maalin käyttöiästä eli sen potlife- ajasta, joka alkaa komponenttien sekoittamisesta siihen, kun se on viimeistään käytettävä. Potlife- aikaa on noudatettava, koska maali voi näyttää viskositeetiltaan levityskelpoiselta, mutta maalissa on voinut jo tapahtua reaktio ja sen jälkeen maalien ominaisuudet eivät ole samat kuin luvatus. /31/

Fysikaalisesti kuivuva maali alkaa kovettua ilman kemiallista reaktiota. Maalissa oleva liuotin haihtuu pois ja maali kuivuu. Maalin kuivuminen riippuu liuotteiden haihtumisnopeudesta ja kalvonpaksuudesta. Fysikaalisesti kuivuvat maalit liukenevat kovettumisen jälkeen liuottimeensa ja pehmenevät lämmössä pois lukien vesiohenteiset dispersiomaalit. /31/

Orgaaniset maalikalvot muodostavat sähkövastuksen korroosiovirralle. Maalikalvot läpäisevät vettä ja happea sen verran, etteivät ne voi eristää katodireaktiota ja näin ollen korroosioreaktiota.

Sähkövastus kuitenkin pysyy korkeana ja korroosiovirta pienenä. Jos epäpuhtauksia on jäänyt alusmateriaaliin, niin sähkövastus alentuu ja korroosiovirta kasvaa. Näin ollen korrosio pääsee nopeammin etenemään. /30: s.686/

Pohjamaaleissa on korroosionestopigmenttejä, joiden pyrkimys on hidastaa tai estää alusmateriaalin korrosio. Korroosioestopigmentit inhiboivat korroosioreaktioita. Korroosioestopigmentit passivoivat ja suojaavat katodisesti. Korroosioestopigmenttejä kehitellään jatkuvasti terveydelle vähemmän haitallisiksi. Yleisimmin käytettyjä pohjamaalien korroosionestopigmenttejä ovat esimerkiksi sinkkifosfaatti, sinkkikromaatti, bariummetaboraatti, sinkkimolybdaatti ja sinkkipöly. Sinkkikromaattia on vähennetty pohjamaalin pigmenttinä 6-arvoisen kromin takia. /30: s.678-679/

4.2 Välimaali

Välimaalin tarkoituksena on pääsääntöisesti kasvattaa eristävän maalikalvon paksuutta. Välimaalina voidaan käyttää samaa maalia kuin pohjamaalina. Tällöin saadaan kasvatettua korroosionestopigmentoitua kalvonpaksuutta. Välimaalina voidaan käyttää myös välimaaleiksi tehtyjä maaleja, kuten parantamaan tarttuvuutta ja hiottavuutta. Kaikissa tilanteissa pintamaali ei pysy pohjamaalin päällä tai voi aiheuttaa lisäksi huokoisuutta päälletuleviin maalikerroksiin, jolloin välimaali on välttämätön. Tällainen tilanne syntyy maalattaessa kosteuskovettuvalla sinkkisilikaattimaalilla pohjamaalikerros. Tartunnan ja huokosmuodostuksen välttämiseksi on tehtävä ohut harsotuskerros ennen paksumpia väli- ja pintamaalikerroksia. Välimaalissa voi olla korroosioestopigmenttejä ja kalvoa tiivistäviä pigmenttejä. Vinyylimaaaleja voidaan käyttää välimaaleissa niiden hyvien ominaisuuksien vuoksi. Synteettisesti tuotettu vinyylisideaine kestää hyvin rankoissakin olosuhteissa. /1: s.189, 30: s.687/

4.3 Pintamaali

Pintamaali antaa pinnalle halutun värin, kiillon ja halutun keston. Ilmastorasitukseen menevän korroosionestomaalin tärkeä ominaisuus on ultraviolettisäteilyn kesto. Pintamaali estää haitallisia aineita pääsemästä alempiin maalikerroksiin sekä alusmateriaaliin. Sen on kestettävä kemikaaleja ja

ympäristörasituksia, kuten ilmasto- ja upotusrasituksia. Pintamaalin tehtävä on uhrata ensimmäisenä ympäröiviä olosuhteita vastaan. Pintamaaleja on eri sideainetyyppejä, joten erilaisiin rasituksiin on erilaisia pintamaaleja. /30: s.687/

Taulukko 3 Eri maalityyppien yleiset ominaisuudet (SFS-EN ISO 12944-5) /26/

Liite C
(opastava)
Yleiset ominaisuudet

Taulukko C.1 Tyypillisten maalityyppien yleisominaisuudet

Soveltuvuus	Poly(vinyylilokloridi) (PVC)	Kloorikautsu (CR)	Akryyli (AY)	Alkydi (AK)	Polyuretaani, aromaattinen (PUR, aromaattinen)	Polyuretaani, alifaattinen (PUR, alifaattinen)	Etyylisinkkisilikaatti (ESI)	Epoksi (EP)	Epoksiyhdistelmä (EPC)
■ Hyvä ▲ Rajoitettu ● Huono – Merkityksetön									
Kiillon pysyvyys	▲	▲	▲	▲	●	■	–	●	●
Värisävyn pysyvyys	▲	▲	■	▲	●	■	–	●	●
Kemikaalienkestävyys									
Vesiupotus	▲	■	▲	●	▲	●	▲	■	■
Sade/kondensoituminen	■	■	■	▲	■	▲	■	■	■
Liutotteet	●	●	●	▲	■	▲	■	■	▲
Liutotteet (roiskeet)	●	●	●	■	■	■	■	■	■
Hapot	▲	■	▲	▲	■	▲	●	▲	■
Hapot (roiskeet)	■	■	▲	▲	■	■	●	■	■
Emäkset	▲	▲	▲	▲	▲	▲	●	■	■
Emäkset (roiskeet)	■	■	▲	▲	■	■	●	■	■
Kuivan kuumuuden kestävyys									
70 °C:seen saakka	●	●	▲	■	■	■	■	■	■
70 °C...120 °C	–	–	▲	■	■	■	■	■	▲
120 °C...150 °C	–	–	▲	●	▲	–	■	▲	▲
> 150 °C mutta ≤ 400 °C	–	–	–	–	–	–	■	–	–
Fysikaaliset ominaisuudet									
Kulutuskestävyys	●	●	●	▲	■	▲	■	■	▲
Iskun kestävyys	▲	▲	▲	▲	■	▲	▲	■	▲
Joustavuus	■	■	■	▲	▲	■	●	▲	▲
Kovuus	▲	▲	▲	■	■	▲	■	■	■

HUOM. Taulukossa C.1 esitetyt tiedot on koottu useista eri lähteistä. Sen tarkoitus on antaa yleisiä viitteitä erityyppisten saatavilla olevien maalien ominaisuuksista. Hartsiryhmien sisällä esiintyy vaihtelua ja jotkin tuotteet on erityisesti koostettu kestävämpään poikkeuksellisen hyvin tiettyjä kemikaaleja tai olosuhteita. On aina syytä neuvotella maalin valmistajan kanssa, kun tietty maali valitaan tiettyyn sovellukseen.

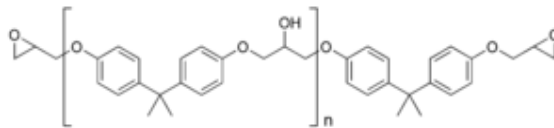
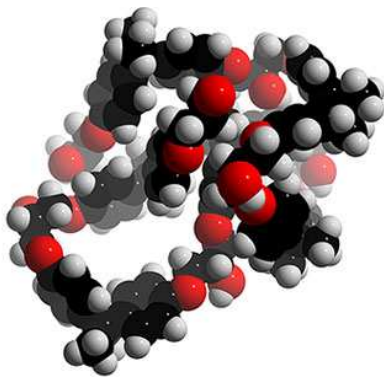
5 Korroosionestomaalit

5.1 Epoksireaktiomaalit

5.1.1 Epoksihartsien koostumus

Epoksireaktiomaaleissa, jotka kovettuvat kemiallisesti huoneen lämpötilassa, käytetyt epoksihartsit ovat valtaosaltaan aromaattisia epoksihartsseja. Epoksihartsin molekyyliketjun molemmissa päässä on epoksiryhmä ja pitkin ketjua hydroksyyliiryhmiä. Epoksiryhmä avautuu liikkuvan vetyatomin vaikutuksesta, joka saadaan toisesta reaktiokomponentista, kovetteesta. Se sisältää aminoryhmiä tai hydroksyyli- ja eetteriryhmiä. /4; s.18/

Epoksimaalien muoviosat sisältävät bisfenolin A-epoksihartsseja, jotka ovat suurimolekyyllisiä ja korkeaviskositeettisina usein ohennettavia hartseja. Kehitetympiä epoksimolekyyylejä ovat bisfenoli F-epoksihartsit, jotka ovat molekyylikooltaan pienempiä sekä viskositeetiltään notkeampia kuin A-tyyppiin. Bisfenolin reagoidessa epikloorihydridin kanssa reaktiotuotteena tulee lineaarisia epoksihartsseja. Hartsin molekyylipaino ja fysikaaliset ominaisuudet ovat peräisin reaktioon osallistuvien aineiden massasuhteesta (kuvat 1 ja 2). /5; s.16-17, 6; s.31, 7/



Kuvat 1 ja 2. Epoksihartsien rakennekaavat /8,9/

Epoksihartsien molekyyeissä on tavallisesti kaksi reaktiivista epoksiryhmää. Hartsimolekyylit sidotaan yhteen kovettajan avulla, jolloin muodostuu liukenematonta kovaa epoksimuovia. Kaksikomponenttituotteissa erillinen kovetinosa lisätään hartsin joukkoon vasta vähän ennen käyttöä. Hartsiosaan sisältyvät reaktiiviset ohenteet ovat myös epoksiyhdisteitä. Ne osallistuvat kovettumisreaktioon samalla tavalla kuin itse hartsi ja muuttavat hartsin ominaisuuksia. Ne esimerkiksi alentavat viskositeettia ja lisäävät tarttuvuutta. Epoksihartsipitoiset tuotteet saattavat sisältää myös mm. orgaanisia liuottimia. /4; s.31/

Epoksimaalit sisältävät aina sideaineita eli hartseja, orgaanisia liuottimia, ohenteita (liuotin tai vesi), pigmenttejä (korroosionesto ym.) sekä apu- ja lisäaineita. Liuotinmaaleihin lisätään aina kolmas komponentti (liuotin tai vesi). Epoksimaalit ovat yleensä kaksikomponenttisiä, niissä on aina muoviosa ja kovetinosa. Epoksihartsin kovettuminen perustuu kemialliseen verkkoutumiseen, missä hartsin epoksiryhmät reagoivat kovetteen aminoryhmien kanssa, esimerkiksi joko polyamiinin, amiiniadduktin tai polyamidin. Tässä reaktiossa muodostuu kertamuovia, joka on mekaanista kuormitusta kestävä luja pinnoite. Reaktiiviset ohenteet ovat epoksiyhdisteitä ja sisältyvät myös hartsiosaan. Ne osallistuvat hartsin lailla kovettumisreaktioon, joten ominaisuuksia voidaan näin modifioida halutuksi, esimerkiksi alentamalla viskositeettia ja parantamalla tarttuvuutta.

Komponenttien oikealla seostussuhteella saadaan epoksimaali kestävä erittäin voimakkaita kemikaaleja. Maalikalvo voi olla joustava tai kova, läpinäkyvä, läpinäkymätön tai värillinen, nopeasti kovettuva tai erittäin hitaasti kovettuva. Maalien ominaisuuksia voidaan säädellä, valitsemalla oikeanlainen kovetin tai modifioida muoviosaa. /7, 8, 10; s84, 11,12/

Maalikalvon applikointi vaatii vähintään +10 °C lämpötilaa, mutta oikealla kovettajan valinnalla voidaan maalata jopa -5 °C:n lämpötilassa. Nämä ovat ns. talvikovettajia./6; s.84, 10/

5.1.2 Epoksihartsien käyttö

Epoksimaalia on vesi- ja liuotinhenteista, liuotinvaraavaa, niukkaliuotteista ja epoksijauhemaaleja. Maalityypit eroavat ominaisuuksiltaan vain applikoinniltaan, käyttöalueeltaan ja epoksihartseiltaan. /5; s.16/

Suomessa ei valmisteta epoksihartseja. Epoksihartsit ovat epoksimuovien lähtöaineita. Epoksihartseja käytetään pääasiassa kaksikomponenttisissä maaleissa, lakoissa ja muissa lattiatpinnoitteissa sekä liimoissa. Niitä käytetään myös mm. sähköeristyshartseina, pulverimaaleissa, muovikomposiiteissa sekä lujitemuovien valmistuksessa. /12/

Epoksimaaleja käytetään lähes pääsääntöisesti teollisuudessa. Niitä käytetään rasitusluokassa C5-M laivojen vedenalaisissa rungoissa, ulkolaidoissa pohjamaalina, koska sillä on huono UV-säteilyn kesto. Ulkolaidoissa pintamaalina kuitenkin pyritään käyttämään polyuretaania tai akryylimaaleja, koska se suojaa UV-säteilyltä eikä maalipinnassa tapahdu liituuntumista. Liuotteettomille epoksimaaleille ei suositella yli 60 °C käyttölämpötiloja. /5 s.15/

5.1.3 Liuotinhenteiset epoksireaktiomaalit

Liuotinhenteiset epoksireaktiomaalit toimitetaan muoviosana ja koveteosena erillään. Muoviosana sisältää kiinteän tai puolikiinteän epoksihartsin, joka on liuotettu sopivaan liuoteseokseen. Koveteosana sisältää polyamiinia, polyamiiniadduktia tai polyamidihartsia. /4 s.18/

Maalin käyttötarkoitus vaikuttaa muoviosan pigmentointiin. Pohja- ja välimaalit sekä paksukalvomaalit sisältävät paljon pigmenttejä, 30–45 tilavuusprosenttia. Kiiltävissä pintamaaleissa niitä on taas vähemmän. /4 s.18/

5.1.4 Liuotteettomat ja niukkaliuotteiset epoksireaktiomaalit

Kaikkien sideaineiden tulee olla nestemäisiä hartseja, jotta maalia voidaan levittää ja käsitellä lisäämättä liuotteita. Pigmenttejä ja täyteaineita ei näissä maaleissa voida käyttää samassa määrin kuin liuotemaaleissa, koska ne eivät mahdu joukkoon ilman, että maalista tulee liian sakeaa. Tämä tekee varsinaisten pohjamaalien tekemisen mahdottomaksi. Kalvonpaksuus on yleensä 150-300 µm,

tietyillä maaleilla jopa 500 µm levityskertaa kohti. Liuotteiden haittavaikutukset on näissä maaleissa lähes kokonaan eliminoitu. /4 s.19/

Liuotteettomien epoksimaalien haittapuoli on niiden lyhyt käyttöikä ja sakeus alemmissa lämpötiloissa. Näistä syistä niiden levittämiseen tarvitaan kaksikomponenttiruiskua.

Liuotteettomissa maaleissa käytetään kovettimina aromaattisia, sykloalifaattisia ja alifaattisia polyamiineja, joita on usein muunneltu erilaisilla fenoleilla tai happamilla aineilla. Paras kemikaalin kestävyys saadaan aromaattisilla amiineilla, mutta ne eivät ole värisävyltään pysyviä vaan ruskistuvat ja vihertyvät voimakkaasti. Tästä syystä ne soveltuvat vain säiliövuorauksiin. /4 s.19/

Värisävyltään vakaita nestemäisiä tuotteita saadaan alifaattisilla ja sykloalifaattisilla polyamiineilla. Ne kestävät myös melko hyvin kemikaaleja, paitsi happamalla pH-alueella. Näitä käytetään lattiamassoissa ja liuotteettomissa maaleissa. Myös polyamideilla saadaan samaan käyttötarkoitukseen hyvät levitysominaisuudet ja värin säilyvyys. /5; s.19,13/

Niukkaliuotteisia ja liuotinvapaita epoksimaaleja käytetään laivojen vedenalaisissa rungoissa ja jäänmurtajien pohjissa, tankeissa, voideissa ja säiliöiden maalauksissa, joissa vaaditaan erittäin hyvää mekaanista kestävyyttä. Niukkaliuotteisten ja liuotinvapaiden epoksimaalien korroosion kestävyys on huonompi kuin liuotinhenteisen epoksimaalin. /5 s.16/

Kovettumisreaktio yksikomponenttisissä epokseissa saadaan aikaan kuumentamalla.

Kovettumisreaktion käynnistää kovetinaineena oleva karboksyylihapoanhydridi, joka alkaa reagoida lämpötilan noustessa. Yksikomponenttiset epoksit ovat lähinnä jauhemaaleja, jolloin maali kovetetaan uunissa. /12/

Eräille markkinoille kehitetyille liuotinvapaille epokseille on saatu aikaan entistä joustavampia kalvoja. Pigmentit (pigmenttivolyymikonsentraation PVC:n ollessa vähintään 35 %) ja täyteaineet tekevät liuotinpohjaisista epokseista hyvin kovia ja rasituksessa helposti halkeilevia. Joustavuutta on parannettu liuotinvapailla maaliyhdistelmillä. Paras joustavuus saavutetaan PVC-osuuden ollessa alle 2 % pohjamaalissa ja pintamaalissa alle 12 %. Alhainen PVC-pitoisuus tarkoittaa, että maali on läpinäkyvää ennen kuin saavutetaan 15 µm kalvonpaksuus. Värin saaminen pintaan ei ole vaikea, koska vaadittu kalvonpaksuus näissä olosuhteissa on aina suurempi. Maalinvalmistajasta riippuen maaliin on voitu lisätä hydrofiilisiä lisäaineita, joilla saadaan pinta kostutettua. /14; s.10-11/

5.1.5 Applikointi

Epoksimaalin applikointi tapahtuu korkeapaineruiskulla ja maalin levitykseen onkin kehitetty kaksikomponenttiruiskuja, jolloin maalin käyttöikäongelma on ratkaistu. Epoksihartsit ja aminoryhmät reagoivat nopeasti keskenään ja niiden käyttöikä eli pot-life- aika on 15 - 60 minuuttia riippuen siitä onko kyseessä niukkaliuotteinen, liuotin vapaa tai liuotinpitoinen epoksimaali. Kaksikomponenttiruiskussa muoviosa ja kovetinosa sekoitetaan keskenään vasta hieman ennen suutinta, jolloin maali ja kovete alkavat reagoida vasta hieman ennen maalin pääsyä pinnalle. Liuotinvapaille paksukalvomaaleille on myös tarkoitettu 2-komponenttikuumakorkeapaineruisku, jolla maalia lämmitetään ja komponentit sekoittuvat toisiinsa vasta hieman ennen maalin osumista pintaan. Liuotin vapaan maalin ohentaminen hidastaa kuivumisaikaa, mutta jääolosuhteisiin menevissä kohteissa ohennusta ei suositella. Paras ruiskutusviskositeetti saavutetaan 50-60 °C:n lämpötilassa liuotin vapaalla masticmaalilla. Tällä toimenpiteellä saadaan aikaan tiiviimpi ja enemmän kulutusta kestävä maalipinta. /7/

5.1.6 Altistuminen

Suomessa altistuu voimakkaasti epoksihartseille ja niiden kovettimille ainakin 3 000 työntekijää vuodessa. Epoksihartsit eivät ole haihtuvia, joten niistä voi muodostua mitattavia pitoisuuksia ilmaan vain sumua tai pölyä synnyttävissä prosesseissa, kuten ruiskumaalauksessa tai pulverimaalauksessa sekä lämpöä edellyttävissä valmistusprosesseissa. Muuten epoksihartseille altistutaan pääasiassa ihon kautta. Epoksipölyä syntyy myös kovettuneiden tuotteiden viimeistelyssä, kuten hionnassa. /12/

Käytetyt polyaminoamidi- ja epoksiadduktikovettimet eivät ole haihtuvia. Ne sisältävät yleensä pieniä määriä raaka-aineina käytettyjä polyamiineja. Epoksimuovien lämpöhajoamistuotteille, kuten bisfenoli-A:lle ja akroleiinille, voi altistua telakoilla sekä uudisrakennuksen varusteluvaiheessa että korjaustoiminnassa. /11,12/

5.2 Vinyylimaalit

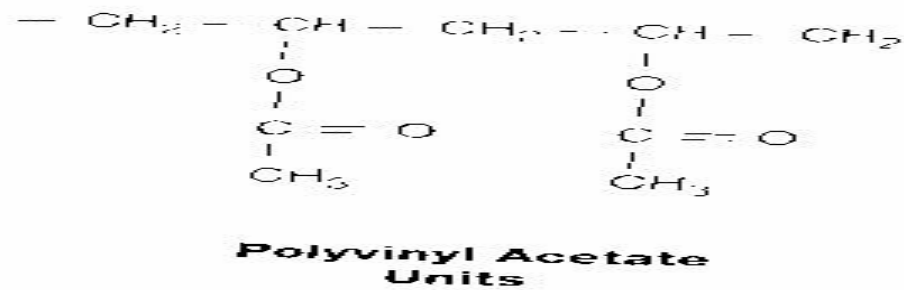
5.2.1 Ominaisuudet

Maaliteollisuudessa vinyylillä tarkoitetaan ryhmää, jossa polymeerit ovat tehty vinyylidikloridista, vinyyliasetaatista, vinyyliasetaalista, vinyyliformaalipolymeereistä ja vinyylialkoholista. /33:s.84/
/33: s.84/

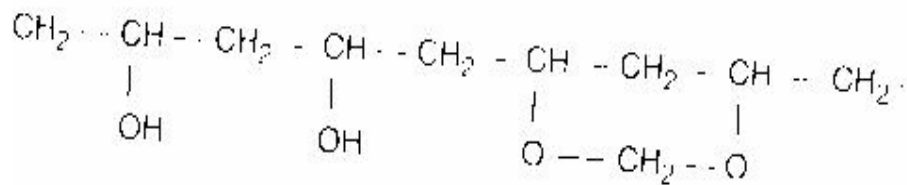
Vinyylimaalien sideaineena käytetään pehmitettyä PVC:tä eli polyvinyylidikloridia, jonka liuottimena käytetään aromaattisia hiilivetyjä. PVC on kovaa kemikaalin kestävästä kestopuovista. PVC:n kiteisyyden vuoksi sillä on tapana hajota ennen sulamista. Sen liuottimien kestävyys on heikko. Vinyylidikloridi ja vinyyliasetaatti ovat eniten käytettyjä polymeerejä maaleissa ja pinnoitteissa. Lisättäessä vinyylidikloridiin 15 % vinyyliasetaattia kiteisyys alentuu huomattavasti. Tällöin vinyylihartsit ovat huomattavasti joustavampia ja sitä on helpompi käyttää maalin raaka-aineena. Sen luontainen korroosionkestävyyden ja muiden ominaisuuksien heikentyminen ovat suoraan verrannollisia vinyyliasetaatin lisäämiseen. Asetaatin pitoisuuden ollessa alle 15 % sillä on silti hyvä kestävyys epäorgaanisia happoja, alkaleja, suolahappoja, alkoholeja, öljyä ja vettä vastaan. Se liukenee aromaattisiin hiilivetyihin, ketoneihin ja estereihin. /33:s. 83/

Polymeerien ketjujen molekyylipainot voivat olla huomattavasti erilaisia, koska painavimmat ketjut ovat pitkiä ja sidokset ovat sekundaarisia. Pitkäketjuiset polymeerit antavat parhaimman koheesiokestävyyden, vetolujuuden sekä kemiallisen ja fysikaalisen kestävyden. Vinyylidikloridiasetaattikalvot ovat kovia ja hankauksen kestäviä. /33:s.84/

Sama polymeeri (kuvat 3 ja 4), joka saa maalin joustavaksi, alentaa samalla sen kiiltoa. Kuitenkin polymeerin tärkein tehtävä on saada maalille sopiva viskositeetti, jolloin sitä on helppo levittää.



Kuva 3. Polyvinyliasetatin molekyylikaava



Kuva 4. Polyvinylialkoholin molekyylikaava

5.2.2 Käyttö

Vinyylimaalit ovat kestopuoveja ja kuivuvat fysikaalisesti liuotteen haihduttua pois. Vinylin matalan kuiva-ainepitoisuuden takia kertaruiskutuksella ei saavuteta paksuja kalvonpaksuuksia. Siksi suositeltava kertaruiskutuksen kalvonpaksuus on noin 50 µm. Vinyylimaaaleja on pohja-, väli- ja pintamaaleina. Vinyylimaaaleja käytetään monissa maaliteollisuuden osa-alueissa, kuten meriteollisuudessa. Vaativissa olosuhteissa, esimerkiksi upotusrasituksessa, käytetään kivihiilitervavinyylimaaaleja (CTV). /33:s.84/

5.3 Polyuretaanimaalit (PUR tai PU)

5.3.1 Polyuretaanin koostumus

Polyuretaanin valmistuksessa käytetyt raaka-aineet voidaan lajitella neljään pääryhmään: isosyanaatteihin, polyoleihin, verkkouttajiin eli ketjunjatkajiin ja lisäaineisiin. /22/

Polyuretaaneissa aromaattinen polyesteri reagoi aromaattisen isosyanaatin kanssa tai akryylipolyoli reagoi alifaattisen isosyanaatin kanssa. Polyuretaanien erittäin hyvät säänkesto-ominaisuudet perustuvat akryylipolyolin ja alifaattisen isosyanaatin reaktioon. /25/

Polyuretaanissa isosyanaatin modifioinnin takia maalin ominaisuudet ovat heikentyneet. Isosyanaatin haittavaikutukset ympäristölle ja maalin käsittelijälle ovat osoittautuneet suuriksi.

Isosyanaatit ovat yleensä di-isosyanaatteja sekä niiden eriarvoisia seoksia. Polyolit ovat polyesteri-, polyakryyli- tai polykarbonaattipolyoleja. Polyesterit ja -akryylit kattavat lähes kokonaan maalipuolen tuotteet. Polyolit voivat olla eripituisia hiilivetyketjuja, joissa hydroksyyli-ryhmät ovat ketjun päässä. Nämä vaihtoehtoiset ryhmät polyoliketjussa vaikuttavat uretaanin ominaisuuksiin. Polyesteripolyolilla on hyvä lämmönkestävyys. Huonona puolena on hydrolyysireaktio. Hydrolyysillä tarkoitetaan veden ja jonkin yhdisteen välistä reaktiota, jossa syntyy uusi sidos happiatomin ja jonkin toisen alkuaineen välille. Hydrolyysireaktio on hyvin tyypillinen estereille. /21,24/

Lisäaineita käytetään moniin eri tarkoituksiin, kuten esimerkiksi hydrolyysin ja mikrobien keston sekä kitkakertoimen parantamiseen. Lisäaineilla saattaa olla myös negatiivisia sivuvaikutuksia. Siksi lisäaineiden pitoisuudet ovat pieniä. Täyteaineiden on oltava inerttejä reaktio-olosuhteissa. /22/

Teollisuudessa korroosionestoon käytettävät polyuretaanimaalit ovat pääsääntöisesti kaksikomponenttisia, mutta niitä voi olla myös yksikomponenttisia. Isosyanaattiryhmä reagoi hydroksyyli-ryhmän kanssa. Kovettuminen tapahtuu kemiallisesti isosyanaatin ja polyolin reagoidessa keskenään, jolloin muodostuu liukenematon kolmiulotteinen verkko. Polyuretaanissa ei ole amiineita polymeerien sidosaineena. /1; s.201, 25/

Pohja- ja välimaaaleissa koveteosa sisältää aromaattista polyisosyanaattia, kun taas pintamaaleissa koveteosassa käytetään alifaattista polyisosyanaattia. Isosyanaatti reagoi ilmassa nopeammin veden kuin liuottimen kanssa. Yksikomponenttisissä uretaaneissa isosyanaatti alkaa reagoida ilman kosteuden kanssa ja näin kovettua. Yksikomponenttiuretaanilla maalattaessa on varmistettava riittävä vallitseva kosteus. /1; s.201/

5.3.2 Ominaisuudet

Polyuretaanimaaleilla on parempi sään ja UV:n kesto kuin epoksimaaleilla, eikä se epoksin tavoin liituunnu UV-säteilyn vaikutuksesta (taulukko 4). Auringonvalon UV-säteily ei hajota alifaattisen kovettajan verkkouttavaa pintaa. Tästä johtuen polyuretaania käytetään pintamaaleina kohteissa, jossa ei tapahdu jatkuvaa upotusrasitusta, sekä maalausjärjestelmässä epoksin pintamaalina. Oikein valitut pigmentit ja täyteaineet parantavat myös uretaanin ominaisuuksia. Käyttölämpötila on matalampi uretaaneilla kuin epoksilla. Uretaanin pinta ei läpäise vettä, mutta vesihöyryä se läpäisee jonkin verran. /1; s.201, 15, 22/

PUR:n käyttöikä voi olla korkea lämpötila (yli 80 °C) ja kosteus yhdessä lyhentää huomattavasti hydrolyysin vaikutuksesta. Kuitenkin on olemassa PUR-laatuja, jotka kestävät hyvin kosteutta ja korkeaa lämpötilaa. Ominaisuuksien modifiointi on hyvin laajaa. /21,22/

Sähkön eristävyys on kohtalainen. Lämpötilan muutokset vaikuttavat siihen. Lämpötilan laskiessa –20...-40 °C:seen kimmoisuus pienenee ja jäykkyys kasvaa. Jäykkyys ei lisääntynyt enää –40 - -60 °C:n jälkeen, eivätkä uretaanielastomeerit haurastu matalissakaan lämpötiloissa. Kimmoisuus kuumana on hyvä. /22/

Teräkseen PUR-maalin tarttuvuus on erinomainen /22/.

Polyuretaani kestää hyvin erilaisia heikkoja liuotteita, ja sillä on korkea kemikaalinkestävyys etenkin alifaattisia ja aromaattisia hiilivetyjä vastaan, ei kuitenkaan epoksin tasoista kestävyyttä. Se ei kestä estereitä, eettereitä eikä ketoneja, mutta sillä on erinomainen öljyjen, voiteluaineiden ja rasvojen kestävyys. Kloorattuja liuottimia ja laimeita sekä heikkoja happoja se kestää kohtuullisesti. Sillä on hyvä elastisuus eikä maalikalvo halkeile helposti lämpötilojen vaihtelujen takia. Osa

polyuretaaneista kestää alkoholia ja hapettajia. Niitä käytettäessä on tarkistettava, kestääkö kyseinen PUR-maali niitä. /22/

Paksukalvouretaanin kiiltoaste on pienempi kuin polyuretaanien, joita käytetään pintamaaleina. Polyuretaanimastic on kuiva-aine pitoisuudeltaan samaa luokkaa epoksimasticin kanssa. /1; s.203, 15/

Polyuretaanit kestävät suhteellisen hyvin mikrobeja. Se ei lisää mikrobien kasvua eikä edes auta sitä. Polyuretaania modifioimalla saadaan kitkakertoimeenkin haluttu muutos. /21/

Taulukko 4. Polyuretaanien ominaisuuksien vertailu erityyppittäinen standardin SFS-EN ISO 12944-5 mukaisesti/26/

Polyuretaanien ominaisuuksien vertailu standardin SFS-EN ISO 12944-5 mukaisesti

	Polyesterityyppi aromaattinen	Akryylityyppi alifaattinen
Kiillon pysyvyys	Huono	<u>Erinomainen</u>
Värisävyn pysyvyys	Huono	<u>Erinomainen</u>
Vesiupotus	Huono	Kohtalainen
Sade/kondensio	<u>Erinomainen</u>	<u>Erinomainen</u>
Liuotteet	Hyvä	Huono
Liuotteet (roiskeet)	<u>Erinomainen</u>	<u>Erittäin hyvä</u>
Hapot	Hyvä	Huono
Hapot (roiskeet)	Hyvä	Kohtalainen
Emäkset	Huono	Huono
Emäkset (roiskeet)	Huono	<u>Erinomainen</u>
Kuivan kuumuuden kesto		
60-70 °C	<u>Erinomainen</u>	<u>Erinomainen</u>
70-120 °C	<u>Erinomainen</u>	<u>Erinomainen</u>
120-150 °C	Hyvä	Hyvä
>150 °C	Huono	Huono
Kulutuskestävyys	<u>Erinomainen</u>	Hyvä
Iskun kestävyys	<u>Erinomainen</u>	<u>Erinomainen</u>
Joustavuus	Hyvä	<u>Erinomainen</u>
Kovuus	<u>Erinomainen</u>	Hyvä

5.3.3 Applikointi

Polyuretaanin levitys tapahtuu samalla tavalla epoksimasticin kanssa. Niitä voi levittää ruiskulla, pensselillä ja telalla. Tärkeintä on saavuttaa oikea kalvonpaksuus. Pot life on 1,5 – 2 tuntia uretaanityypistä riippuen. Maalia voidaan levittää jopa -10°C :n lämpötilassa, kun kovettajaksi on valittu talvikovettaja. Paksukalvoureetaani voidaan maalata kalvonpaksuudella 100-300 μm . /1; s.203/

5.3.4 Altistuminen

Polyuretaani on stabiili polymeeri, josta ei normaalilämpötilassa vapaudu jäännösmonomeerejä ilmaan. Lämmön nousun myötä polymeeri hajoaa muodostaen uudestaan lähtöaineina käyettä diisosyanaattia ja pienempimolekyylisiä monoisosyanaatteja. Ollessaan reaktiivisia kemikaaleja isosyanaatit aiheuttavat mittavia terveyshaittoja. Jopa pienet pitoisuudet voivat johtaa altistumiselle. Isosyanaateille altistuneen henkilön voi olla jopa mahdoton työskennellä polyuretaanien kanssa. /23/

5.4 Antifouling

Pintaenergia antifoulingmaaleissa on matala, jottei vedessä oleva kasvusto jäisi runkoon kiinni. Runkoon takertuneet eliöt hidastavat laivan liikkumista ja samalla polttoainekulut nousevat. Eliöt eivät tartu runkoon vauhdin ollessa 4-5 solmun yläpuolella, jolloin virtaava vesi pyyhkäisee eliöt pois. Pääsääntöisesti eliöt tarttuvatkin runkoon satamissa, jolloin laivojen etenemisnopeudet ovat alhaisia. Lämpimät vedet, saliniteetti, pH ja virtausnopeudet vaikuttavat eliöiden määrään ja kiinnipysyvyyteen. Takertuneiden eliöiden vaikutusta polttoainekustannuksiin on tutkittu ja todettu sen nostavan kulutusta jopa 45 % 25 solmun vauhdissa, kun verrataan fouling-vapaisiin aluksiin. On itsestään selvää, että polttoaineen kulutus on suoraan verrattavissa CO_2 - päästöihin. /16; s.21, 17; s.39-40/

5.4.1 Antifoulingin kehitys

Antifouling on hyvin myrkyllistä meressä eläville organismeille, etenkin orgaaninen tributyyliitina (TBT), jonka käytön IMO (International Maritime Organization) on täysin kieltänyt. Tributyyliitina on hyvin haitallinen sekä myrkyllinen myös laivaan takertumattomalle kasvustolle, ja sillä on hyvin suuria terveyshaittoja sen kanssa työskenteleville. Ei-biosiidiset yhdisteet, kuten polymeerijäämät, ovat veteen liukenevia hydrolyysin jälkeen. Biosidit liukenevat veteen, mutta muut pinnoitteiden osat kuluvat hitaasti, johtuen myrkyllisistä polymeereistä uudistuneessa hydrolyysissä. Nykyisin antifouling-maalit ovat kuparipohjaisia. Ne ovat edelliseen antifoulingiin verrattuna vähemmän myrkyllisiä. Kupari kuitenkin liukenee hitaasti kerroksittain mereen ja aiheuttaa näin tuhoa meriorganismeissa. /16; s.21, 17; s.40-41/

Markkinoille on myös kehitetty kaksikerroksinen silikonipohjainen antifouling-pintamaali. Se toimii samanlaisella maalausyhdistelmällä, kun tässä työssäkin esitetty antifouling-maalausjärjestelmä. Pohja- ja välimaalina toimii epoksi ja pintaan tulee foulingvapaamaali. Silikonipohjainen foulingvapaa pintamaali on todettu olevan hyvin helposti levitettävissä. Sillä on hyvä adheesio alustaansa ja se on kulutuksen kestävä. Myös mereneliöt ovat helposti poistettavissa. Vedenalaiseen rasitukseen menevien maalien vertailussa on saatu tuloksia, jossa silikonipohjainen maali kestäisi samat rasitukset ja telakointiväli olisi sama kuin myrkyllisillä kuparipohjaisilla. Uudelleen maalaus ja korjausmaalaus ovat osalla antifoulingeilla helpompia. Silikonipohjainen maali kestäisi paremmin iskuja, ja sen väitetään olevan 20-50 kertaa kilpailevia antifoulingeja kestävämpi. Silikonimaalin on todettu myös vähentävän polttoainekustannuksissa ja siten myös päästöjen määrää. Itsestään puhdistuvan, pitkäkestoisen ja luontoystävällisemmän maalin läpimurto voisi olla ratkaisu, jolla voidaan saastuttaa vähemmän merta ja ilmastoa, mutta silti suojella alustaa korroosiolta. Kokemukset myös lasihiukkasia sisältävistä epoksimaaleista korroosionestossa ovat olleet hyviä. /16; s.22-23, 17; s.44/

Foulingvapaat maalit ovat myös biosidivapaita maaleja, joiden pintojen ominaisuudet ovat samantapaisia kuin teflonilla. Foulingvapailta maaleilla on erittäin matala pintaenergia, kuten myrkyllisemmillä antifoulingeilla. Tästä johtuen pinta on erittäin liukas, eivätkä siihen eliöt tartu helposti. Veden liikevoimaa hyödyntäen pintaan ei pysty tarttumaan aluksella haitallisia eliöitä. /17; s.42-43/

Tutkija ÓLeary on kehittänyt maalin vedenalaisiin rasiin, joka perustuu fluoropolymeeriin. Fluoropolymeerimaalit ovat korkeavalmisteisen hartsin ja fluoropolymeerin voiteluaineen sekoitus. Ohut kalvo antaa erittäin hyvän suojan korroosiota vastaan, ja sillä on loistava kemikaalin kestävyys. Hydrofobisen fluoropolymeerin etuja ovat kitkan vähentyminen, liukas pinta, hankauksen kestävyys, abrasion kestävyys sekä sähköneristävyys. Fluoropolymeeripinnoitteisiin voidaan lisätä erilaisia komponentteja, joilla voidaan merkittävästi pidentää korjauksentarvetta. /18/

5.4.2 Antifoulingin käyttö

Kemikaalilain (744/1989) muuttamisesta annetun lain (1198/1999) siirtymäsäännöksen 3. momentin mukaisesti Suomessa on vuoden 2002 alusta lähtien saanut markkinoida ainoastaan sellaisia antifouling-valmisteita, joista on vuonna 2001 tehty hyväksymishakemus SYKELLE tai jotka on hyväksytty biosidivalmisteeksi kemikaalilain muutoksen 28 §:n mukaisesti. SYKE julkaisi luettelon sallituista antifouling-valmisteista.

Suomen markkinoilla uuden valmisteen hyväksymismenettely vaihtelee sen mukaan, sisältääkö valmiste vain vanhoja eli ennen 14.5.2000 EY-alueella antifouling-valmisteissa olleita tehoaineita vai onko siinä uusi tehoaine.

Hyväksymismenettely koskee vain kemiallisesti tai biologisesti (eli biosidisesti) vaikuttavia antifouling-valmisteita, joita käytetään torjumaan mikrobien ja kehittyneempien kasvi- ja eläinlajien muodostaman kasvuston tarttumista aluksiin, vesiviljelylaitteistoihin tai muihin vedessä käytettäviin rakenteisiin. Fysikaaliseen vaikutukseen perustuvat valmisteet eivät kuulu hyväksyttävyyden piiriin. Esimerkkinä tällaisista valmisteista ovat valmisteet, joiden teho perustuu niiden muodostamaan eliöiden tarttumista vähentävään liukkaaseen pintaan.

Antifouling-valmisteita koskevat biosidivalmisteiden mainostamisen erityismääräykset /19/.

5.4.3 Haitat

Kupariyhdisteet liukenevat kupari-ioneina, ja nämä aiheuttavat jo pieninä pitoisuuksina merenelävien kuolleisuutta. Kupari kertyy eräisiin eliöihin. Esimerkiksi silakan mitattu maksan kuparipitoisuus oli kohonnut kolmanneksella. Ruotsissa satama-altaan pohjasta mitatuista kuparipitoisuuksista johtuen on voitu tutkimuksissa osoittaa eliöstön lajimäärän vähenemistä.

Vesikasveille ja leville myrkyllisiä ovat antifoulingin sisältämät orgaaniset tehoaineet. Erittäin pienet pitoisuudet saattavat aiheuttaa levämäärien ja –lajien vähenemistä, millä on todettu olevan vaikutusta meren ravintoketjuun. /19/

5.4.4 Kustannukset

Maalauksen levityskustannukset ovat korkeammat silikoni- kuin kuparipohjaisella antifoulingilla. Maalien hävityskustannukset menevät päinvastoin, kun taas kunnossapitokustannukset molemmilla maaleilla on samansuuruiset. /16; s.23/

Eräässä testissä verrattiin Persianlahdella identtisiä laivoja, joissa toisessa oli antifoulingia ja toisessa foulingvapaata maalia. Vuoden aikana antifoulingpinnoitettu laiva voitti ajassa kahdella viikolla. Tuloksissa ei ollut vielä otettu huomioon polttoainekustannuksia. Aika on huomattavan suuri kun kyseessä ovat identtiset laivat.

5.5 Akryyli

5.5.1 Ominaisuudet

Akryylihartsia voidaan modifioida useisiin eri tarkoituksiin. Esimerkiksi polyuretaaniin sitä on voitu lisätä ominaisuuksien modifiointiin ja alentamaan myrkyllisten ainesosien osuutta. Polyakryyliesterit pehmentävät ja ovat erittäin joustavia. Yleisesti akryylit kestävät polyuretaania vähemmän ultraviolettisäteilyä, vaikkakin akryyli- ja meta-akryylipolymeereille UV-valon kesto on luonteenomaista. Akryylit ovat hyviä ulkorasituksissa UV-rasituksen alaisina. Kiilto ja väri pysyvät erittäin hyvin muuttumattomina pitkään. /33: s.95/

5.5.2 Käyttö

Alkalinkestävyys on parempi meta-akrylaateilla, kuin akryylillä, johtuen metyyliiryhmän suuremmasta suojausvaikutuksesta. Akryyliä ei ole tarkoitettu upotusrasitukseen ja sillä on myös huono liuotteiden kesto. Akryyli maali on tarkoitettu pääsääntöisesti pintamaaliksi ja sitä voidaan käyttää vinyylin päällä. Akrylaatin sideainetta voidaan modifioida moniin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Vesiohenteiset akrylaattimaalit ovat yleistymässä korrosionestomaaleina. Akryyli ei sovi kuumiin olosuhteisiin, koska se on helposti muovattavissa. /1: s.190, 33: s.95/

5.6 VOC-Volatile Organic Compound

Maalien toimittajat ovat kehittäneet markkinoille maaleja, joissa on erityisen korkea kuiva-ainepitoisuus. Näissä maaleissa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuus eli VOC on hyvin pieni. Useissa paksukalvomaaleissa kuiva-ainepitoisuus on yli 90 %, joissain tapauksissa se on lähemmäs 100 %. Kuiva-ainetta pystytään säätämään aina 100 %:iin asti. Nämä maalit eivät kaipaa ohennusta, ja siitä syystä niille on kehitetty kaksikomponenttiruiskuja. Kuiva-aineprosentin ollessa korkea viskositeetti on myös korkea. Normaalit korkeapaineruiskut eivät saa hajotettua maalia sopivaksi viuhkaksi, kuten omakohtaisesti sain kokea työtä tehdessä. /20;s.31/

Vesiohenteiset ja pulverimaalit aiheuttavat vain vähän VOC-päästöjä. Vesiohenteiset maalit ovat vallanneet markkinat. Teollisuudessa vesiohenteiset ja pulverimaalit eivät vielä ole saavuttaneet suurta suosiota, mutta maalien kehityksen myötä tulevaisuudessa niitä voidaan käyttää enemmän. Lisäaineiden kehityksen myötä uskotaan tapahtuvan siirtymistä liuotinohenteisistä maaleista vesiohenteisiin. Vesiohenteisiä maaleja pyritään kehittämään niin, etteivät ominaisuudet kuten kiilto ja korroosionkestävyys juurikaan eroa liuotinohenteisistä. /20; s.31-32/

Kehitysprosessi liuotinohenteisestä vesiliukoiseen on suhteellisen kallis. Kysymyksessä on kuitenkin pitkän tähtäimen prosessi, jolla pyritään parantamaan maailman tilaa. Suhteuttaen ongelman hintaan se ei ole ylivoimainen. Kehitysprosessissa materiaalien toimittajien olisi syytä jättää pinnoitteista raskasmetallit ja keskittyä kehittämään vastaavia tilalle. Korrosionestoon voidaan kyseisten materiaalien tilalle toimittaa raskasmetallivapaita vaihtoehtoja. /20s.34/

Standardissa SFS EN ISO 12944-5 liite D (liite 1) on VOC-päästöihin liittyviä tietoja, joita on otettava huomioon maalausta suunniteltaessa ja toteutettaessa. Auditoidulla maalausyrityksellä on oltava jokaisesta laivasta laskettuna maalin menekki ja niistä aiheutuvat VOC-päästöt. Telakoilla seurantaväli on kolmen kuukauden ajanjaksoissa.

5.7 Terveysvaikutukset

Liuottimet kulkeutuvat aivoihin ja muualle kehoon hengitysteiden ja ihon kautta. Lyhytaikainen altistuminen liuotteille voi aiheuttaa hengitysteiden ja ihon ärsytysoireita. Pitkään jatkunut altistuminen aiheuttaa kroonisia haittoja, kuten hermostovaurioita, maksa- ja munuaisvaurioita sekä kardiovaskulaarisia sairauksia eli sydän- ja verisuonisairauksia.

6 Työn vaiheet

Teräskoelevyt leikattiin erimittaisiksi koekappaleiksi ja niiden kulmat sekä reunat pyöristettiin. Pinnan kunto ennen suihkupuhdistamisen alkamista tutkittiin, joka todettiin yhtenäiseksi ja tasaiseksi. Teräslevyt oli säilytetty hyvissä olosuhteissa laboratoriossa, eikä pinnalla ollut havaittavissa ollenkaan korroosiota. Tällöin teräspinnan ruostumisasteen todettiin olevan A.

Kappaleet pestiin vesi-saippualliuoksella ja epoksiliuottimella. Pinta raesuihkupuhallettiin karheuteen Sa 2½ keskikarhealla G- teräsrakeella. Puhallusrakeena käytettiin särmäraetta GH40. Esikäsitelty pinta tarkastettiin standardin SFS-EN ISO 8504-1 mukaisesti ja pinnan ulkonäkö todettiin hyväksi ja se hyväksyttiin. Raesuihkupuhdistetuista pinnoista mitattiin pinnan karheusarvot R_t ja R_y arvot.

Työssä käytetyt maalausyhdistelmät olivat seuraavat:

Vedenalainen runko

1. Marathon IQ 500 µm (jääräsitukseen) on paksukalvo epoksimastic
2. Primastic 200µm on paksukalvo epoksimastic, Safeguard Universal ES 100 µm on vinyylipohjainen epoksimaali, Antifouling Sea Quantum 150 µm on tinavapaa antifouling-maali, jonka sideaineena on organosilosyyliipolymeeri (lämpimiin olosuhteisiin)

Muu runko

1. Primastic NM 2 *125 on paksukalvo epoksimastic, Normadur 65 HS on polyuretaanimaali 80 µm
2. Vinyguard Silvergrey 88 (2*80) µm on vinyylipohjamaali, Pioneer Topcoat on liuoteohenteinen akryylipintamaali 50µm

Koekappaleet maalattiin yllä olevilla maalausyhdistelmillä. Olosuhteet olivat jokaisella maalauskerralla ihanteelliset, koska raesuihkupuhdistus ja maalaus tapahtuivat Metropolian laboratoriossa sisätiloissa, joissa oli kohtalainen ilmasto.

Maalatut pinnat tarkastettiin ja kuivakalvonpaksuudet mitattiin. Maaliruisku oli vääränlainen maalattaessa paksukalvomaalia. Tehot pumpussa eivät riittäneet, joten maalia jouduttiin ohentamaan liian paljon ennen ruiskuttamista.

Maalatut koelevyt laitettiin proheesiotestiin, jatkuvaan suolasumuun, UV- kondensiokaappiin, meren rantaan ilmastorasitukseen, 0,5 % ja 5 % suolavesiin tai meriupotukseen. Kaikille koelevyille tehtiin vetonuppi- ja hilaristikko- sekä silmämääräisiä tarkastuksia. Kaikille maaliyhdistelmille tehtiin kulutuskestävyyttä mittaava taber-testi. Silmämääräisiä tarkastuksia tehtiin jokaisen kokeen yhteydessä testauksen eri vaiheissa. Meriupotukseen menneiden kappaleiden kunto tarkastettiin ennen meren jäätymistä ja heti jäiden sulamisen jälkeen.

6.1 Tutkiminen erilaisten testausmenetelmien avulla





6.1.1 Vetonuppikoe

Vetonuppikoe tehtiin standardin SFS-EN ISO 4624 mukaan. Koe suoritettiin laboratoriossa huoneenlämmössä. Jokaiselle tutkittavalle levyille liimattiin kolmesta viiteen vetonuppia, joiden halkaisija oli kaksi senttimetriä. Liima oli kaksikomponenttista (1:1) epoksiliimaa. Liiman annettiin kuivua vähintään 15 tuntia. Vetonuppitesti suoritettiin Hate-testilaitteistolla. Jokaisesta levystä otettiin kolmesta viiteen vetokertaa, jolloin tuloksiin saatiin enemmän varmuutta. Jokaisesta eri levystä on tehty oma pöytäkirja. Pöytäkirjassa on maalausjärjestys ja se olosuhteissa kappale on ollut, sekä tulokset.

6.1.2 Hilaristikko- ja X-viiltotesti

Hilaristikko- ja X-viiltotestit tehtiin noudattaen standardin SFS-EN ISO 16276-2. X-viiltotestit on tehtävä kappaleille, jossa kalvon paksuus ylittää 250 µm. Viiltokokeessa tutkitaan kappaleesta murtuvaa maalipintaa, jossa tulokset ilmoitetaan nollassa viiteen pienemmästä suurimpaan vaurioon. Kovilla pinnoitteilla tulisi käyttää X-viiltokoetta. Hiutalemaisia pigmenttejä sisältävät pinnoitteet voivat antaa vääriä tuloksia kyseisessä testissä, joten pinnoitteen valmistajan kanssa olisi syytä keskustella toimintatavoista. /32/

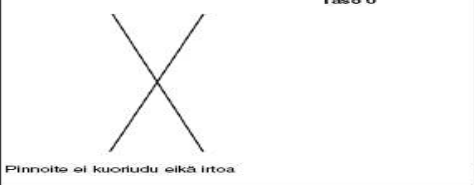


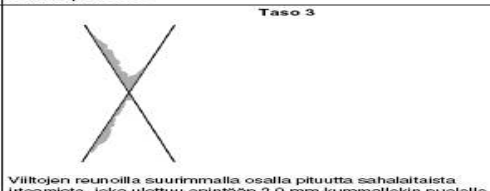

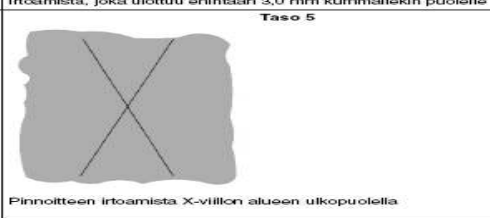
Testissä tehdään kalvon läpi ulottuva viiltokuva ja arvioidaan tapahtuneet vauriot. Viillot tehtiin hilaristikossa moniteräleikkurilla ja X-viiltotestissä puukolla. Viillon päälle painettiin teippi, minkä jälkeen se vedettiin pois. Viiltokohta harjattiin pehmeällä harjalla. Tämän jälkeen viiltojälki analysoitiin nollassa viiteen maalin irtoamisen mukaan (kuvat 5 ja 6).

Luokitus	Kuvaus	Ulkonäkö leikkausalueella, josta hilseilyä on tapahtunut (Esimerkki kuudelle rinnakkaisleikkaukselle)
0	Leikkausurien reunat ovat täysin sileät, yksikään ristikon ruuduista ei ole irronnut	–
1	Pientä hilseilyä urien leikkauspisteissä. Leikkausristikon alueesta korkeintaan 5 % on vaurioitunut	
2	Pinnoite on hilseillyt urien reunoilta tai urien leikkauspisteissä. Leikkausristikon alueesta on vaurioitunut enemmän kuin 5 % mutta ei enempää kuin 15 %	
3	Pinnoite on hilseillyt urien reunoilta osittain tai kokonaan suurina kaistaleina tai on hilseillyt osittain tai kokonaan ruutujen eri osista. Leikkausristikon alueesta on vaurioitunut enemmän kuin 15 % mutta ei enempää kuin 35 %	
4	Pinnoite on hilseillyt urien reunoilta osittain tai kokonaan suurina kaistaleina tai joitain ruutuja on irronnut osittain tai kokonaan. Leikkausristikon alueesta on vaurioitunut enemmän kuin 35 % mutta ei enempää kuin 65 %	
5	Mikä tahansa hilseily, jota ei voida luokitella edes luokitteluasteen 4 mukaisesti	–

Kuva 5. Hilaristikko tulosten luokitus, kuvaus ja leikkausalueen ulkonäkö /32/

Liite A
(velvoittava)
X-viiltokokeen tulosten luokittelu

HUOM. Tässä liitteessä esitettyjen luokittusten järjestys on päinvastainen kuin standardissa ASTM D 3359-02.

 <p>Pinnoite ei kauriudu eikä irtoa</p>	 <p>Vähäistä kauriutumista tai irtoamista viiltojen reunalla tai niiden leikkauspisteessä</p>
 <p>Viiltojen reunalla sahalaitaista irtoamista, joka ulottuu enintään 1,5 mm kummallekin puolelle</p>	 <p>Viiltojen reunalla suurimmalla osalla pituutta sahalaitaista irtoamista, joka ulottuu enintään 3,0 mm kummallekin puolelle</p>
 <p>Irtoamista suurimmalta osalta teipin alla olevaa X-villion aluetta</p>	 <p>Pinnoitteen irtoamista X-villion alueen ulkopuolella</p>

Kuva 6. X-viiltokokeiden luokittelu, kuvaus ja leikkausaleen ulkonäkö /32/

6.1.3 Taber-testi

Taber-testillä tutkitaan pinnoitteen kulumis- ja hankauskestävyyttä. Tutkimusmenetelminä ovat puhkikulutusmenetelmä ja painon häviöön perustuva menetelmä. Työssä käytettiin painon häviöön perustuvaa menetelmää. Kappaleet olivat (100*100) mm, ja kokeet tehtiin jokaiselle maaliyhdistelmälle kerran. Levyihin tehtiin silmämääräisiä tarkastuksia ja ne punnittiin 200, 500, 750, 1000, 1500 ja 2000 kierroksen jälkeen.

7 Maalipinnoitteen tarkastelu silmämääräisesti

7.1 Marathon IQ

Levitettäessä pohja- ja pintamaalia, jouduttiin maalia ohentamaan reilusti yli sallitun. Sallittu ohennus olisi 10 %, mutta maalia jouduttiin ohentamaan useita kertoja enemmän. Maali ei hajonnut pisaroiksi vaan viuhka piirsi. Maalipumppu oli täysin sopimaton paksukalvomaalille. Maali levitettiin kappaleisiin kaksi kertaa, pohja- ja pintamaaliksi.

Maalatussa pinnoitteessa oli neulanreikiä, valumia oli hieman ja mitatuissa kalvonpaksuuksissa oli poikkeamia. Pinnoitteen paksuus siis poikkesi eri kohdista. Huokoisuudesta tehtiin yli 250 µm kalvon paksuuksille ja vedenalaiseen upotukseen meneville. Kappaleissa todettiin olevan huokosia. Tilanteen ollessa todellinen maalipinta olisi jouduttu korjaamaan eikä työssä käytettyä suurpainepumppua olisi saanut missään tapauksessa käyttää.

Marathon IQ:n tuoteselosteessa sanotaan, että ”Puhdistusprofiilin tulee olla Coarse G (85-130 µm, R_{y5}) (ISO 8503-2) mukainen”. Pintaprofiiliksi saatiin R_{y5} 58,6 µm, joten haluttuun karheuteen ei päästy käytetyllä puhdistusrakeella.

Maalipinnalta mitattiin kalvonpaksuudet maksimi, minimi ja keskiarvo. Mittaustulokset olivat samassa järjestyksessä 285,5 µm, 237 µm ja 264,5 µm. Jokaisesta levystä tehtiin kymmenen mittausta. Haluttu kuivakalvonpaksuus oli 500 µm, joten kokonismaalikerros jäi selvästi alikalvoiseksi.

7.2 Primastic Universal NM, Safeguard Universal ES ja Antifouling Sea Quantum

Maalattaessa Primasticia koettiin samat ongelmat pumpun kanssa kuin Marathonilla. Maali oli liian paksua, joten maalia jouduttiin ohentamaan hyvin paljon. Pinnalla oli valumia ja appelsiinipintaa. Valumat johtuivat pääsääntöisesti viuhkan piirtämisestä. Pääsääntöisesti pinta näytti kuitenkin kohtuullisen hyvältä.

Maalattaessa Safeguard Universal ES:llä pinnasta tuli tasainen eikä maalia jouduttu niin paljoa ohentamaan.

Antifoulingia levitettäessä maalipinnasta tuli yllättävän hyvä ja tasainen. R_{15} -arvo oli 56 μm .

Jokaisesta kerroksesta mitattiin kalvonpaksuuksien maksimi-, minimi- ja keskiarvo. Pohjamaalista mitattiin kalvonpaksuudet samassa järjestyksessä 211,5 μm , 135 μm ja 170,9 μm . Välimalauksen jälkeen mitatut kokonaiskalvonpaksuudet olivat 365,5 μm , 217 μm ja 298 μm . Pintamaalauksen jälkeen mitatut kokonaiskalvonpaksuudet olivat 482 μm , 399 μm ja 412 μm . Haluttu kokonaiskalvon paksuus oli 450 μm , joten kokonaisluivakalvonpaksuus jäi jonkin verran alle tavoitepaksuuden.

7.3 Primastic Universal NM ja Normadur

Epoksimastic Primasticilla esiintyi samat ongelmat kuin aikaisemmin on todettu Marathonin kanssa. Maalin viskositeetti oli liian suuri, ja maalia jouduttiin ohentamaan hyvin paljon. Silmämääräisesti maalipinnalla havaittiin neulanreikämäisyyttä, johtuen ohentamisesta, hieman valumia ja appelsiinipintaa. Neulanreikämäisyyttä oli havaittavissa koko pinnalla, mutta valumat ja appelsiinipinta eivät olleet hallitsevia virheitä.

Polyuretaanipintamaalin Normadurin levityksen jälkeen pinta näytti siistiltä. Maali oli levinnyt tasaisesti, ei huokosia, valumia tai muita pintavirheitä. Pumppu sopi maalin levitykseen erinomaisesti.

Maalatun pinnan R_{15} -arvo oli 56 μm . Molemmista pohja- ja pintamaalista mitattiin kuivakalvonpaksuuksien maksimi-, minimi- ja keskiarvot. Pohjamaalin maksimipaksuus oli 280 μm , minimi 144 μm ja keskiarvo 196 μm . Pintamaalauksen jälkeen kalvonpaksuuden maksimiarvo oli 390 μm , minimi 320,5 μm ja keskiarvo oli 347 μm . Haluttu kalvonpaksuus oli 330 μm , joten tällä maaliyhdistelmällä saavutettiin tavoitekuivakalvonpaksuus.

7.4 Vinyguard Silvergrey 88 ja Pioner Topcoat

Vinyylipohjamaalilla Vinyguard Silvergrey 88:lla maalattu pinta oli yhtäläinen ja tasainen. Maalin väri kuitenkin ei ollut tasainen, hyvästä sekoittamisesta huolimatta. Valumia, huokoisia tai muita virheitä ei ollut. Akryylipintamaalin Pioner Topcoatien levityksen jälkeen maalipinta oli yhtäläinen ja siisti, ja värikin oli tasainen.

Maalattun pinnan pinnankarheus R_{y5} -arvo oli 56 μm . Pohjamaalattun pinnoitteen paksuudet olivat: maksimi 145 μm , minimi 100,8 μm ja keskiarvo oli 136,3 μm . Pintamaalauksen jälkeen mitatut kalvonpaksuudet olivat samassa järjestyksessä 234,5 μm , 144 μm ja 188 μm . Haluttu kokonaiskalvonpaksuus oli 210 μm , joten tälläkin maaliyhdistelmällä kokonaiskuivakalvonpaksuus jäi jonkin verran alle tavoitepaksuuden.

8 Testaukset ja niiden tulokset

8.1 Upotusrasitukset

8.1.1 Upotusrasitusolosuhteet

Maalausjärjestelmistä 1 ja 2 laitettiin levyt upotusrasitukseen 0,5 % ja 5 % NaCl-liuoksiin, jossa ne olivat 6 viikkoa, jonka jälkeen niistä tutkittiin maalin kiinnipysyvyys. Kuuden viikon upotusrasitus 40 °C:n lämpöisessä vedessä vastaa viittä vuotta meriolosuhteissa. Ennen upotusrasitukseen laittamista kappaleet tutkittiin huokosmittarilla ja havaittiin kappaleissa olevan huokosia, toisissa kappaleissa enemmän toisissa vähemmän. Huokokset johtuvat liiallisesta maalin ohenuksesta. Maalia oli pakko ohentaa, koska koulun ruisku ei ollut tarkoitettu paksukalvomaaleille eikä maalia saatu hajotettua halutuksi viuhkaksi vaan maali ”piirsi”.

8.1.1.1 Tarkastukset 0,5 % NaCl-liuoksessa olleille kappaleille

8.1.1.1.1 Maalausjärjestelmä 1

Visuaalinen tarkastus tehtiin kerran viikossa. Ensimmäisellä viikolla levyt olivat menettäneet kiiltoa ja väri oli tummemman sininen. Värin ja kiillon muutos ei ollut merkittävä seuraavalla viikolla. Ruostetta oli hieman reiän kohdalla, muttei muuta muutosta ollut. Väri haalistui tasaisesti joka viikko hieman. Levyt otettiin viiden viikon jälkeen pois liuoksista ja pinnoista mitattiin värisävyt. Pinta oli hieman karhea. Kiiltoa ei mitattu tarkastuskerroilla, vaan ne tarkastettiin aina visuaalisesti. Testien jälkeen tehtiin vetonuppi- ja hilaristikkokokeet. Hilaristikkotesti tehtiin rasiustestauksen jälkeen, ei sen mennessä rasiuksiin.

8.1.1.1.2 Maalausjärjestelmä 2

Maalausjärjestelmällä 2 pinnan väri ei ollut silminnähävästi muuttunut kummassakaan liuoksessa. Toisen viikon jälkeen ei havaittu muutoksia edelliseen. Kolmannella viikolla reikien kohdalla näkyi hieman ruostetta ja pinnan väri oli hieman vaaleamman punainen kuin alkuperäinen. Kiillon menetys viiteen viikkoon asti oli hyvin vähäistä. Lopputarkastuksessa havaittiin maalikalvolla olevan pieniä mikrohalkeamia. Hilaristikkotestaus tehtiin rasiustestien jälkeen, ei sen mennessä rasiuksiin.

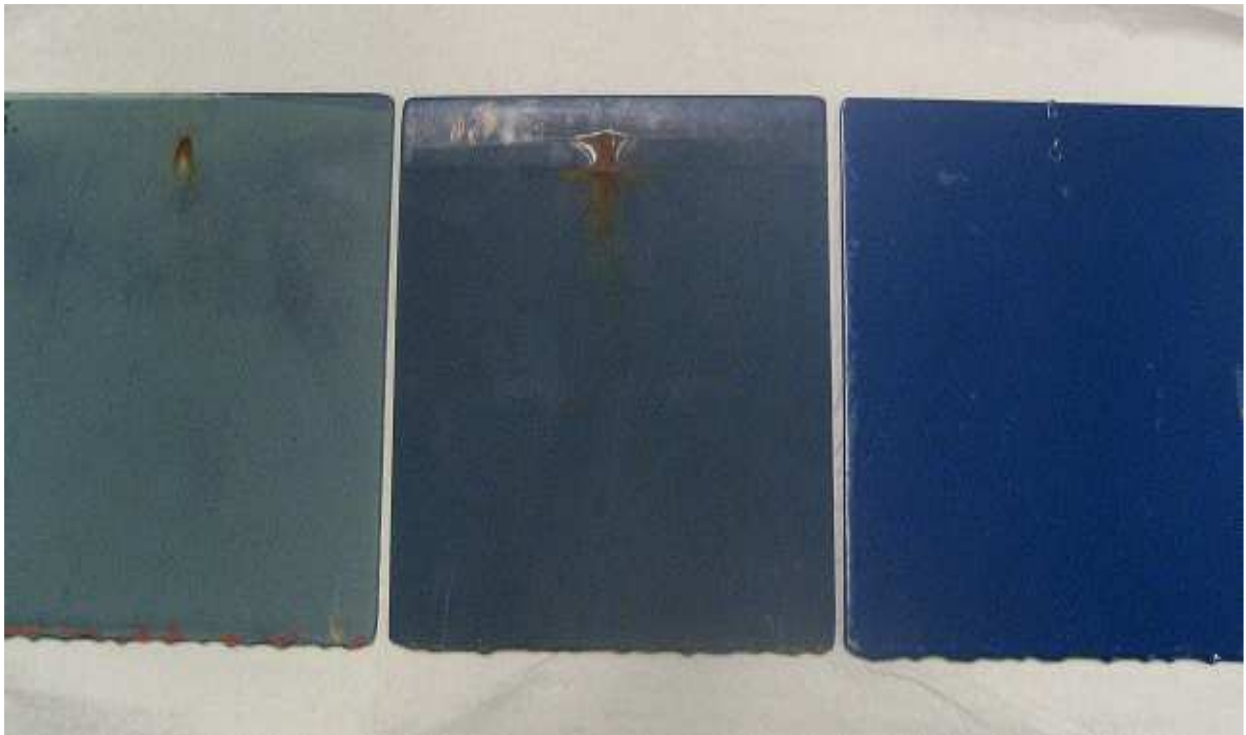
8.1.1.2 Tarkastukset 5 % NaCl-liuoksessa olleille kappaleille

8.1.1.2.1 Maalausjärjestelmä 1

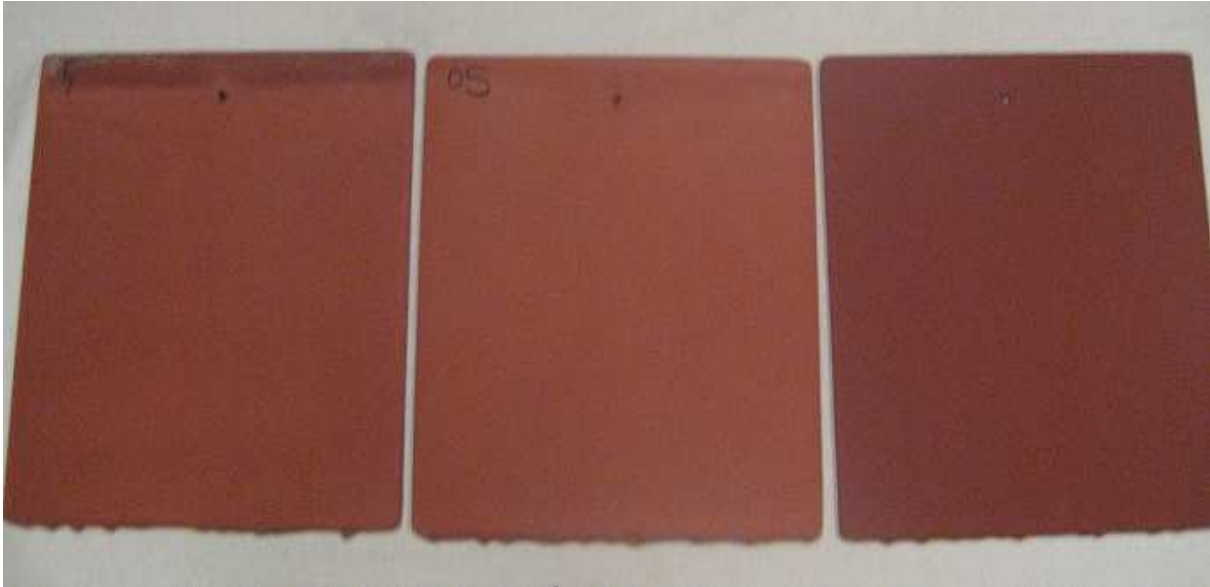
Maali menetti tasaisen paljon kiiltoa joka viikko. Maalin värisävy oli huomattavasti vaaleampi kuin 0,5 % NaCl-liuoksessa olleissa maalipinnoissa. Kolmannella viikolla reiän kohdalla oleva ruosteen määrä oli lisääntynyt, ehjällä pinnalla ei ollut kuitenkaan muutoksia havaittavissa. Ehyellä pinnalla ei havaittu missään vaiheessa kappaleessa olevan ruostetta (kuva 7). Kappale haalistui tasaisesti neljä viikkoa, tämän jälkeen pinnalla ei havaittu haalistumista.

8.1.1.2.2 Maalausjärjestelmä 2

Pinta menetti väriä suhteellisen tasaisesti, muttei kuitenkaan merkittävästi. Pinnassa oli huokosmaisia kuoppia, jotka huomattiin vasta upotusrasituksen jälkeen (kuva 8). Värisävy ei poikennut suuresti levyistä, jotka ovat olleet 0,5 % NaCl-liuoksessa. Hilaristikkotestaus tehtiin raitustestien jälkeen, ei sen mennessä rasitukseen.



Kuva 7. Epoksi pinnan vertailua vasemmalta oikealle, 5 % NaCl-upotus, 0,5 % NaCl-upotus ja vertailulevy



Kuva 8. Antifoulingin pinnan vertailua vasemmalta oikealle, 5 % NaCl-upotus, 0,5 % NaCl-upotus ja vertailulevy

8.1.2 Meriolosuhteet

Levyt (1 ja 2) upotettiin 19 °C meriveteen 18.8.2009 Rauman edustalle ja otettiin pois 25.4.2010. Levyt asetettiin puhtaisiin kalaverkkoihin. Kalaverkko kierrettiin levyjen ympärille niin, että eliöillä oli mahdollisuus päästä takertumaan maalipintaan kiinni. Levyt eivät olleet kiinni pohjassa, mutta niillä on mahdollisuus osua pohjaan. Levyt upotettiin noin kahteen metriin, jolloin ne eivät rikkoonnu jäätyamisen aikaan. Testilevyt tarkistettiin ennen jäiden tuloa, ja niissä todettiin olevan foulingeliöitä. Pinnan kiillossa ei ollut tapahtunut suuria muutoksia.

Kun levyt otettiin pois merestä, ne olivat mustat mudasta (kuva 9). Mudasta puhdistuksen ja pesun jälkeen jäi epoksin ja antifoulingin pinnalle mustaa väriä. Maalin kiillossa ja värissä oli tapahtunut suuria muutoksia (kuva 10). Molemmille levyille tehtiin X-viiltotesti ja vetonuppikokeet.



Kuva 9. Koelevyt juuri nostettuna merestä. Vasemmalla epoksinnoite ja oikealla AF-pinnoite



Kuva 10. Epoksin maalipinta meri upotuksen jälkeen

8.2 Ilmastorasituskokeet

8.2.1 Proheesio

Proheesiotestausmenetelmällä tutkittiin veden yläpuolisen rungon maalien kiinnipysyvyyttä alustassa, jossa olosuhteet ovat hyvin ankarat (C5-M). Syklisessä proheesiotestauksessa ensimmäinen tunti sumutetaan 0,05 p-%NaCl- ja 0,35 p-%(NH₄)₂SO₄ -liuosta ja toinen tunti kuivaa ilmaa. Proheesiotestistä tekee erityisen raskaan syklien määrä (1000 tuntia) ja rajut olosuhteet. Sumutusjakson aikana kaappiin sumutetaan ammoniumsulfaattia (0,35 % w) ja natriumkloridia (0,05 % w) sisältävää liuosta 25 °C:n lämpötilassa. Kuivausjakson aikana kammioon puhalletaan 35-asteista ilmaa. Testauskulma on 45 astetta. Näytteet pestään testin jälkeen ja tarkastellaan visuaalisesti sekä tehdään tartuntatestaukset vetonuppi- ja hilaristikkotesteillä.

Maalausjärjestelmässä 3 visuaalisessa tarkastuksessa ensimmäisellä viikolla ei havaittu minkäänlaisia muutoksia. Toisella viikolla ei myöskään havaittu muutoksia. Kolmannella viikolla reunoissa ja reiän kohdalla oli hieman ruostetta. Kokeen loputtua pinnalla oli ruostetta maalikalvon reiässä ja klorideja, mutta ne oli poistettavissa vedellä, saippualla ja mekaanisella liikkeellä.

Maalausjärjestelmässä 4 visuaalisessa tarkastuksessa ensimmäisellä viikolla ei havaittu minkäänlaisia muutoksia. Toisella viikolla reikien kohdalla ja reunoissa oli maalikalvossa ohuita ruostepilkkuja. Kolmannella viikolla ruosteen määrä oli lisääntynyt. Kokeen loputtua oli pinnalle kertynyt hieman ruostetta ja klorideja. Ne poistettiin pesemällä.

Molempien maalausjärjestelmien pinnoilla havaittiin klorideja ja hieman ruostetta, mutta pesun jälkeen molempien pinnat olivat erinomaisen hyviä ja pinnan laatu oli kohtalainen. Kloridit eivät olleet vaikuttaneet pintaan niin selvästi, ettei sitä voitu huomata silmämääräisesti tarkastaen.

8.2.2 UV-kondensiokaappi

Auringonvalon vaikutus saadaan fluoresoivien UV-lamppujen avulla. UV-lamppuja voidaan luokitella niiden emittoiman säteilyn aallonpituuden mukaan UV-A:ksi ja UV-B:ksi. UV-säteily aiheuttaa suurimman osan orgaanisten aineiden eli tässä tapauksessa maalien, fotokemiallisesta hajoamisesta. Testeissä käytettiin UV-A-aallonpituuden säteilyä.

Testi on kiihdytetty säätesti. Kokeessa simuloidaan auringonvalon ja kasteen vaikutuksia kappaleissa. Testin pituus oli yhteensä 1000 tuntia, ja syklien pituudet olivat kahdeksan tunnin UV-jakso 60 °C:n lämpötilassa ja neljän tunnin kondensiojakso 40°C:n lämpötilassa.

Lopuksi tehtiin vetonuppitesti sekä sen jälkeen hilaristikko- ja X-viiltotesti. Viimeksi mainittujen testien tuloksia ei voida pitää täysin varmana, koska pinta, jolle testit tehtiin, oli (8*13) cm, joten kunnon pituisia viiltoja ei saatu aikaan. Testilevyjen oli oltava (8*13) cm, jotta ne mahtuivat UV-kaappiin.

8.2.3 Jatkuva suolasumu

Näytteitä sumutetaan vesiliuoksella, joka sisältää 5 % natriumkloridia, yhtäjaksoisesti 1000 tunnin ajan. Suolasumukaapissa testilämpötila on koko ajan 35 °C. Näytteille tehtiin silmämääräisiä tarkastuksia 250 tunnin välein.

Näytteiden pinnasta pestiin ennen tarkastusta pois kertyneet suolat. Lopuksi pinnoitteelle tehtiin vetonuppi-, hilaristikko- sekä X-viiltotestit.

8.2.4 Meren rantaan sijoitetut levyt

Levyt asetettiin meren rantaan. Ne kiinnitettiin narulla puuhun maalattu pinta merelle päin. Testausjakso oli yhtä pitkä mereen upotettavien levyjen kanssa. Maalin pinta ei ollut muuttunut kummassakaan pinnassa kovinkaan paljoa. Levyille tehtiin vetonuppikokeet ja lisäksi polyuretaanimaaliyhdistelmälle x-viiltotesti ja vinyyli-/akryylimaaliyhdistelmälle hilaristikkotesti.

8.2.5 Vertailulevyt

Vertailulevyille tehtiin samat testit kuin rasituksissa olleille. Esikäsitteilyt ja maalauskaasittely sekä maalausajan olosuhteet olivat samat kuin rasitukseen menneille. Vertailulevyjä säilytettiin laboratorio-olosuhteissa huoneenlämpötilassa.

8.3 Tartuntalujuuskokeet

Vetolujuuskokeet tehtiin kaikille maalausjärjestelmille, jokaiseen levyyn tehtiin kolmesta viiteen vetoa ja lopuksi laskettiin tulosten keskiarvo. Testi tehtiin eri rasiuksissa olleille levyille.

Taulukossa 5 on esitetty tartuntalujuustestauksen tulokset eri tavoin rasitetuille maaliyhdistelmille, ja taulukossa 6 on vastaavasti esitetty vetonuppikokeessa tapahtunut maaliyhdistelmän murtumistapa.

Taulukko 5. Vetonuppikokeiden tulokset ja keskiarvot

Maali / olosuhteet	Vetonuppikokeen tulokset (MPa)					
	1 veto	2 veto	3 veto	4 veto	5 veto	keskiarvo
Epoksi Vertailu	5,1	5,4	5,5	4,9	5	5,2
Epoksi 0,5 % NaCl upotus	4,1	5	4,3	4	6,1	4,7
Epoksi 5 % NaCl upotus	8,5	7,2	7,1	8,1	6	7,4
Epoksi Pakastin	4	10,5	5			6,5
Epoksi mereen upotus	9,7	5	7,1			7,2
Antifouling Vertailu	7,4	4,9	6	4,5	6,1	5,8
Antifouling 0,5 % upotus	4,9	4	9	3,9	4	5,2
Antifouling 5 % upotus	3	4	4,2	1,7	5,1	3,6
Antifouling Pakastin	6	5	6			5,7
Antifouling Mereen upotus	4	3	3,9			3,6
PUR Vertailu	8,5	13,2	11,5	10,5	11	10,9
PUR Proheesio	7,5	5,5	9,7	12,6	13	9,7
PUR UV	11	10,5	6	3,5	3,5	6,9
PUR Pakastin	10	14	6			10,0
PUR Jatkuva suolasumu	7,5	6	8	6	6	6,7
PUR Meren rannassa ilmastorasitus	6,8	12,5	10,2			9,8
Akryyli Vertailu	5	4	3	2	2,5	3,3
Akryyli Proheesio	2,7	1,2	1	3	3	2,2
Akryyli UV	4	6,5	2,5	2	2,5	3,5
Akryyli Pakastin	3,5	3	3			3,2
Akryyli Jatkuva suolasumu	3	2,1	2,7	3	3	2,8
Akryyli Meren rannassa ilmastorasitus	3,1	2	0,5			1,9

Taulukko 6 Vetonuppien murtumistavat

Maali / olosuhteet	Vetonuppikokeiden murtumiskohdat				
	1 veto	2 veto	3 veto	4 veto	5 veto
Epoksi Vertailu	C 10 % D/Y 90 %	C 20 % D/Y 80 %	C 20 % D/Y 80 %	C 10 % D/Y 90 %	C 55 % D/Y 45 %
Epoksi 0,5 % NaCl upotus	D/Y 100 %	D/Y 100 %	D/Y 100 %	A/B 45 % D/Y 55 %	D/Y 100 %
Epoksi 5 % NaCl upotus	C 5 % D/Y 95 %	C 10 % D/Y 90 %	C 2 % D/Y 98 %	A/B 10 % D/Y 90 %	C 5 % D/Y 95 %
Epoksi Pakastin	D/Y 100 %	D/Y 100 %	D/Y 100 % D/Y 3 %		
Epoksi Mereen upotus	B 20 % B/C 80 %	D/Y 97 % B/C 3 %	B/C 90 % B 7 %		
Antifouling Vertailu	D 100 %	D 10 %	C/D 2 % D 98 %	C/D 2 % D/Y 98 %	B/C 10 % C/D 90 %
Antifouling 0,5 % NaCl upotus	C/D 75 % D/Y 25 %	C/D 75 % D/Y 25 %	C/D 20 % D/Y 80 %	A/B 10 % C/D 20 % D/Y 80 %	C/D 75 % D/Y 25 %
Antifouling 5 % NaCl upotus	C/D 15 % D/Y 85 %	C/D 5 % D/Y 95 %	C/D 45 % D/Y 55 %	C/D 2 % D 98 %	D 100 %
Antifouling Pakastin	D 100 % D/Y 3 %, D 97 %	D 100 % D/Y 3 %, D 97 %	D 100 % D/Y 2 %, D 98 %		
Antifouling Mereen upotus					
PUR Vertailu	B/C 50 % D/Y 50 %	B/C 60 % D/Y 40 %	B/C 60 % D/Y 40 %	B/C 50 % D/Y 50 %	C 100 %
PUR Proheesio	B/C 25 % D/Y 75 %	C 5 % D/Y 95 %	B/C 100 %	A/B 10 % B/C 50 % C 25 % D/Y 15 %	B/C 100 %
PUR UV	A/B 10 % B/C 90 %	B/C 25 % D 75 %	B/C 5 % D/Y 95 %	D/Y 100 %	D/Y 100 %
PUR Pakastin	C 100 %	B/C 25 % C 75 %	Y 100 %		
PUR Jatkuva suolasumu	B/C 90 % D/Y 10 %	B/C 25 % C 55 % D/Y 20 %	C 5 % D/Y 95 %	D/Y 100 %	B/C 100 %
PUR Meren rannassa ilmastorasitus	D/Y 80 %, B/C 20 %	D/Y 50 %, B/C 50 %	D/Y 95 %, B/C 5 %		
Akryyli Vertailu	C 100 %	C 100 %	C 100 %	C 100 %	C 100 %
Akryyli Proheesio	C 100 %	C 100 %	C 100 %	C 100 %	C 100 %
Akryyli UV	B/C 90 % D/Y 10 %	B/C 80 % D/Y 20 %	C 100 %		
Akryyli Pakastin	B/C 100 %	B/C 100 %	B/C 100 %		
Akryyli Jatkuva suolasumu	B/C 75 % D/Y 25 % D/Y 7 %, B/C 3 %, B 90 %	B/C 100 %	B/C 55 % D/Y 45 %	D/Y 100 %	D/Y 100 %
Akryyli Meren rannassa ilmastorasitus		D/Y 3 %, B 97 %	D/Y 2 %, B 98 %		

Selitykset murtokohdasta ja murtumatyyppi:

A =	Teräs
A / B =	Adheesio Teräs ja 1. maalikerros
B =	Koheesio 1. maalikerros
B / C =	Adheesio 1. maalikerros ja 2. maalikerros
C =	Koheesio 2. maalikerros
C / D =	Adheesio 2. maalikerros ja 3. maalikerros
D =	Koheesio 3. maalikerros
D / Y =	Adheesio liimassa
Y =	Vetonuppi

8.4 Hilaristikko ja X-viilto

Akryylimaalille vain voitiin tehdä hilaristikkotesti standardin antamissa puitteissa. X-viiltotesti tehtiin kaikille muille maaliyhdistelmille paitsi siis akryylille. Kalvonpaksuus ylitti muissa yhdistelmissä 250 µm, eikä hilaristikkotesti välttämättä antaisi luotettavia tuloksia.

Taulukko 6. Tulokset hilaristikko ja X-viiltotesteistä

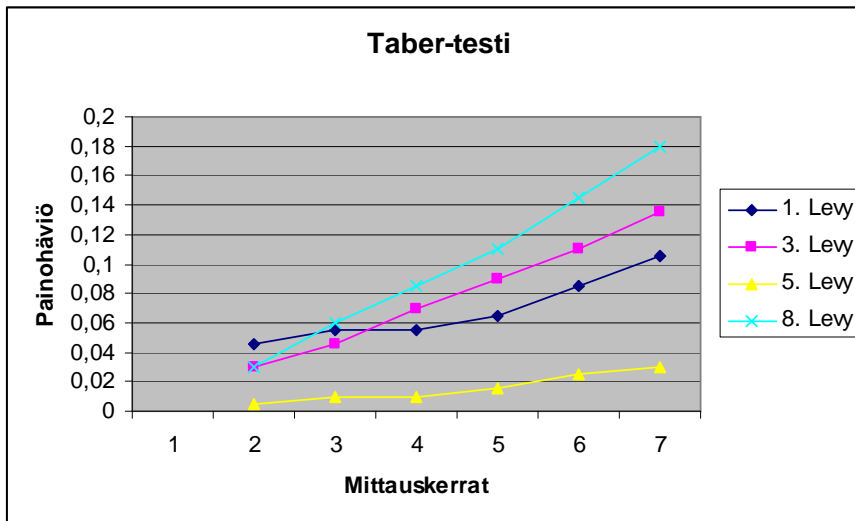
Maali / olosuhteet	Hilaristikon/X-viillon tulosten luokittelu (Taso 0-5)
Epoksi Vertailu	0
Epoksi 0,5 % NaCl upotus	0
Epoksi 5 % NaCl upotus	0
Epoksi Mereen upotus	1
Antifouling Vertailu	0
Antifouling 0,5 % NaCl upotus	2
Antifouling 5 % NaCl upotus	2
Antifouling Mereen upotus	2
PUR Vertailu	0
PUR Proheesio	1
PUR UV	2
PUR Jatkuva suolasumu	3
PUR Meren rannassa ilmastorasitus	1
Akryyli Vertailu	3
Akryyli Proheesio	2
Akryyli UV	3
Akryyli Jatkuva suolasumu	3
Akryyli Meren rannassa ilmastorasitus	2

8.5 Taber-testi

Taulukossa 8 ja kuvassa 11 on esitetty maalipinnoitteiden kulutuskestävyyttä mittaavan Taber-testin tulokset eri maaliyhdistelmillä. Tulokset on tehty rasittamattomille koekappaleille. Levy 1 oli maalattu maaliyhdistelmällä 1 (Marathon IQ epoksimastic), levy 3 maaliyhdistelmällä 2 (Primastic epoksimastic/Safeguard /Antifouling Sea Quantum), levy 5 maaliyhdistelmällä 3 (Primastic epoksimastic/Normadur polyuretaani) ja levy 8 maaliyhdistelmällä 4 (Vinyguard vinyyli/Pioner Topcoat akryyli).

Taulukko 7. Taber-testin tulokset

	Alku paino	Painohäviö (g)					
		200	500	750	1000	1500	2000
1. Levy	240,62	0,045	0,055	0,055	0,065	0,085	0,105
3. Levy	243,99	0,03	0,045	0,07	0,09	0,11	0,135
5. Levy	235,71	0,005	0,01	0,01	0,015	0,025	0,03
8. Levy	239,04	0,03	0,06	0,085	0,11	0,145	0,18



Kuva 11. Taber-testin tulokset

9 Tulosten analysointia

9.1 Vetonuppi

9.1.1 Epoksi

Epoksin kaikkien testien keskiarvojen keskiarvo oli hieman yli 6 MPa. Keskiarvon alapuolelle jäivät vertailulevy ja 0,5 % NaCl-liuoksessa ollut levy, mutta näissä tilanteissa murtuma tapahtui liimassa suurimmalta osalta.

Kohtalaisen hyviä tuloksia saivat meriupotuksessa ollut levy ja 5 % NaCl-upotuksessa ollut levy, joiden tartuntalujuudet olivat yli 7 MPa.

Epoksissa vedetyissä nupeissa heikoin kohta oli liima. Kuten tuloksista nähdään lähes kaikissa oli tapahtunut liiman adheesiomurtuma, $\frac{3}{4}$ vedoissa adheesiomurtumaa oli yli 90 % nupin pinta-alasta. 5 % NaCl-liuoksessa olleille ja vertalulevyille oli tapahtunut melkein jokaisessa vedossa myöskin koheesiomurtumaa ”pintamaalissa” eli toisessa maalauskerrossa. Lisäksi yhdessä tuloksessa huomattiin osittaista adheesiomurtuma teräksen ja pohjamaalin välillä. Edellä mainittu tulos oli ristiriitainen, koska nupin toisella puolella havaittiin murtumisen tapahtuneen liimassa ja toinen puoli murtui teräksen ja ensimmäisen maalikalvon välistä. Tämä oli ainoa huono tulos epoksille. Muuten murtumat tapahtuivat pääsääntöisesti pintamaalissa. Poikkeuksen myös tekee mereen upotettu kappale, jossa oli tapahtunut adheesiomurtumaa ensimmäisen ja toisen maalikalvon välillä sekä pohjamaalin koheesiomurtumaa.

Koetulosten perusteella voidaan sanoa, että epoksimastic-maalin tartunta alustaan on erinomainen, koska varsinaisesti puhdasta alustan ja pohjamaalin välistä adheesiomurtumaa ei esiintynyt rasi-tetuissakaan koelevyissä. Niissä tapauksissa, joissa murtuminen tapahtui liiman ja pintamaalin rajapinnassa, on todellinen maalikalvon tartunta- ja/tai koheesiolujuus suurempi kuin taulukossa 5 annettu.

9.1.2 Antifouling

Antifoulingissa oli tapahtunut koheesiomurtumia mereen upotusrasituksessa, vertailulevyssä ja hieman 5 % NaCl-upotuksessa. Antifoulingin ja välimaalin välissä on tapahtunut myös adheesiomurtumaa erityisesti 0,5 % NaCl-upotusrasituksessa olleilla levyillä, hieman 5 % NaCl-upotuksessa olleille levyille. 0,5 NaCl-upotuksessa olleille levyille murtumakohta oli adheesio-liimassa. Huonoimmat vetonuppitulokset tulivat levyille, joka oli upotettuna mereen ja 5 % NaCl-upotuksessa olleille levyille. Tulos oli molemmilla 3,6 MPa, vertailulevyllä tulos oli lähes kaksi kertaa korkeampi 5,8 MPa.

Keskimäärin antifoulingin tulos oli kaikissa kokeissa 4,8 MPa. Kuten tuloksista huomataan, olivat murtumat pääsääntöisesti tapahtuneet koheesiomurtumina antifoulingissa ja myös adheesiomurtumina pinta- ja välimaalin välissä. Myös osassa vedoissa tapahtui nupin ja liiman välistä adheesiomurtumaa.

Myös tällä kolmen maalikerroksen epoksi/antifouling-maaliyhdistelmällä olivat tartuntalujuusarvot suhteellisen korkeita, eikä alustan ja pohjamaalikerroksen välistä adhesiivista tartuntalujuuden heikkenemistä rasiuskokeissa tullut esille.

9.1.3 Polyuretaani

Epoksimastic/polyuretaanimaaliyhdistelmä sai parhaimmat tulokset vetonuppikokeesta, keskiarvo oli kaikissa yli 6 MPa. Vertailulevyssä keskiarvo oli lähes 11 MPa, joka oli erittäin korkea ja hyvä tulos. Proheesiotestissä ollut levy ja meren rannassa ollut levy antoivat yli 9,5 MPa tuloksia. Jatkuvassa suolasumussa olleen levyn tulokset olivat keskimäärin 6,7 MPa. Nämä tulokset olivat huonoimpia PURilla, mutta tulos oli silti varsin hyvä, verrattaessa tuloksiin esimerkiksi epoksissa ja antifoulingissa.

Vertailulevyssä murtumat tapahtuivat puoliiksi adheesiomurtumina pohja- ja pintamaalin välillä ja adheesiomurtumana liiman ja nupin välissä, yhdessä levyssä murtuma oli täysin koheesiomurtuma pintamaalissa. Proheesio- ja UV-rasituksessa olleiden levyjen murtumatyypit olivat samanlaisia kuin vertailulevyssä. Muutamissa murtumissa havaittiin olevan pintamaalin koheesiomurtumaa. Jatkuvassa suolasumussa ollut levyjen heikoin kohta oli liima monessa vedossa, mutta myös

adheesiomurtumaa pohja- ja pintamaalissa oli havaittavissa, samoin vähän koheesiomurtumaa. Meren rannassa olleiden levyjen murtumat tapahtuivat liimasta, mutta jokaisessa vedossa oli tapahtunut sen lisäksi adheesiomurtumaa pohja- ja pintamaalin välissä. Myöskään tällä maaliyhdistelmällä ei tullut esille tapauksia, joissa murtuminen olisi tapahtunut adheesiomurtumana alustan ja pohjamaalin rajapinnassa. On huomattava, että kaikissa edellä olevissa kolmessa maaliyhdistelmässä pohjamaalina on epoksimastic-maali, joten hyvä tartunta alustaan oli myös odotettavissa.

PUR:illa on erittäin hyvät ominaisuudet sade ja kondenssirasiituksissa. Happoja, liuotteita ja kuumuutta se kestää erityisen hyvin. Se on myös erittäin kova ja joustava sekä kestää erittäin hyvin iskuja ja kulutusta.

9.1.4 Akryyli

Vinyyli/akryyli-maaliyhdistelmän vetokoetulokset näissä testeissä olivat huonoimmat. Epoksi-polyuretaaniyhdistelmällä vetotulokset olivat kolme kertaa paremmat kuin vinyyli/akryyliyhdistelmällä. Akryylin keskiarvo oli 3,4 MPa. Parhaimman tuloksen sai levy, joka oli ollut UV-rasituksessa. Myös vertailulevyn tulos oli erittäin lähellä keskiarvoa. Huonoimmat tulokset saatiin levyltä, joka oli ollut meren rannassa, ja jonka murtumat olivat tapahtuneet suurelta osin koheesiomurtumana pintamaalissa.

Vertailu- ja proheesiotestilevyissä murtumatyyppi oli kokonaan tapahtunut pintamaalissa. UV-rasituksessa ja suolasumussa olleissa levyissä murtumatyyppit olivat pääsääntöisesti adheesiomurtumaa pohja- ja pintamaalin välissä. Oli tapahtunut myös adheesiomurtumaa liiman ja nupin välillä. Proheesiotestauksessa vinyyli/akryyli-maaliyhdistelmän vetolujuusominaisuudet olivat merkittävästi heikentyneet jopa kriittiselle tasolle. Rasitustestauksen jälkeen yleensä edellytetään tartuntalujuuden vetonuppikokeessa olevan yli 2 MPa. Tosin tälläkään maaliyhdistelmällä ei esiintynyt alustan ja pohjamaalin välistä adheesiomurtumaa, mitä on pidettävä positiivisena tekijänä.

Akryylin ja PURin välillä oli valtavat erot tuloksissa.

9.2 Hilaristikko ja X-viilto

9.2.1 Epoksi

Marathon IQ epoksimaali oli kiinnittynyt alusmateriaaliin erittäin hyvin, vaikka maalia levittäessä tilanne vaikutti huonolta, koska epoksia jouduttiin ohentamaan erittäin paljon. Kaikissa testeissä X-viillon tulos oli 0, paitsi mereen upotetussa levyssä oli 1. 0 tarkoittaa, ettei muutoksia tapahtunut, ja 1 tarkoittaa, että on tapahtunut vähäistä kuoriutumista tai halkeilua viillon kohdalta.

Kaikkien levyjen tulos oli hyvä. Epoksi tarttuu hyvin alusmateriaaliin ja sen murtumislujuus on korkea. Tulos oli odotettu ja todettiin epoksimasticin soveltuvan erittäin hyvin upotusrasituksiin. Maalia sai ohentaa maksimissaan 10 %, ja vaikka ohennus oli useita kertoja yli sallitun ohennusmäärän, testitulokset olivat silti hyviä.

Voidaan todeta, että väärinkäytettynäkin epoksi antaa hyvä suojan alusmateriaalille ankarissakin olosuhteissa. Meriupotuksessa olleen levyn tulos oli positiivisesti yllätys, koska ennen kokeen tekemistä visuaalisesti tarkastellusta pinnasta voitiin havaita pinnan kuluneen ja menettäneen väriä, saaneen kolhuja ja olevan aivan mudan peitossa. Siitä huolimatta epoksimastic kesti erittäin hyvin rasituksen ja tulos oli loistava.

Epoksimastic on tarkoitettu kylmiin vesiin, esimerkiksi juuri Itämereen. Epoksimasticia käytetään myös hinaajissa ja jäänmurtajissa, joten se kestää myös mekaanista rasitusta. Hinaajien ja jäänmurtajien vedenalaisen rungon maalauksen korjaustelakointiväli on noin viisi vuotta, joten maalin on kestettävä erittäin ankarissa olosuhteissa sen aikaa. Ruotsin ja Suomen jäänmurtajissa on käytetty epoksia vedenalaisessa rungossa yli millimetrin kalvonpaksuudella, ja sillä on saatu erittäin hyviä kokemuksia, joissa on saatu laivan nopeus ja polttoaineen kulutus kohdalleen. Kyseisessä epoksissa on erittäin korkea maalin sisäinen koheesiolujuus, jolloin maalin sisällä ei tapahdu murtumista. 0,5 % NaCl-upotus rasituksen tulos on juuri epoksille tärkeä tulos, koska Itämeren suolapitoisuus on keskimäärin 0,7 %.

9.2.2 Antifouling

Antifoulingia saa käyttää vain laivoissa, jotka seilaavat Atlantilla tai muissa suurissa merivesissä. Vaikka antifoulingista pyritään modifioimaan vähemmän myrkyllisiä pinnoitteita, haluttiin tutkia antifoulingin käyttäytyminen samoissa olosuhteissa epoksin kanssa. X-viiltotestissä saatiin tulokseksi 2 kaikissa muissa levyissä paitsi vertailulevyssä. Taso 2 tarkoittaa, että viiltojen reunoilla on havaittavissa sahalaitaista irtoamista, joka ulottuu kuitenkin enintään 1,5 mm viillon kummallekin puolelle.

Tulos antifouleillekin oli hyvä, vaikka antifoulingin levityksessä tai etenkin pohjamaalin kanssa oli samoja ohennusongelmia. Meriupotuksesta tullut levy oli pesun jälkeen musta, ja näkyvä maali oli erittäin haalistunutta ja pinta oli saanut iskuja. Jää eivät kuitenkaan ollut jättänyt levyihin mitään merkkejä, kuten esimerkiksi vääntymisiä. Ruostetta pinnalla ei ollut. Minkään rasituksen jälkeen levyissä ei näkynyt ruostetta, vaan maali oli pysynyt hyvin pinnassa ja suojannut alusmateriaalia erittäin hyvin.

9.2.3 Yhteenveto upotusrasituksessa olleille levyille

Epoksinnoitteella saavutettiin tässä testissä parhaimmat testausarvot. Kuitenkaan tuloksissa ei ollut huomattavaa eroa, joten voidaan todeta molempien maaliyhdistelmien sopivan hyvin erilaisiin upotusrasituksiin. Molemmissa maaliyhdistelmissä epoksinpohjamaalin levitys oli ongelma väärän maalipumpun ja liiallisen ohennustarpeen takia. Antifouling oli ainoa, joka voitiin levittää suhteellisen oikeaoppisesti. Tulokset olivat kuitenkin todella hyviä, vaikka tällaisia ongelmia löytyi. Maalin hyvät ominaisuudet kompensoivat tässä tapauksessa väärän pumpun ja liian ohentamisen. Tilanteen ollessa todellinen en usko maalin kestävän yhtä hyvin kuin se näissä levyissä kesti. Esimerkiksi viuhkan piirto pystyttiin välttämään ohiruiskutuksella. Todellisessa tilanteessa maalipinnassa olisi varmasti näillä varusteilla maalattaessa huomattavasti enemmän maalausvirheitä.

9.2.4 Polyuretaani

Polyuretaanin testitulokset vaihtelevat välillä 0-3. Taso 0 saavutettiin vain vertailulevyllä. Proheesiotestissä ja meren rannalla olleet levyjen tulokset olivat 1. UV-rasituksessa olleiden levyjen tulokset olivat tasoa 2 ja huonoimman tuloksen antoi jatkuvassa suolasumussa ollut levy. Taso 3 tarkoittaa, että viiltojen reunalla suurimmalla osalla oli sahalaitaista irtoamista, mutta se ei ulottunut 2,0 mm pidemmälle viillosta.

Yllättävää oli proheesiotestin jälkeen saatu tulos. Proheesio- ja jatkuvan suolasumutestin tulokset olisivat voineet olla lähempänä toisiaan, mutta maalaustyö on voinut olla parempi proheesioon menneessä levyssä. Tuloksista katsottuna PUR sopii erityisesti vaihtelevaan rasitukseen.

UV-testin tulos oli odotettavissa. PURilla on erittäin hyvä UV:n kesto. 1000 tuntia UV-testissä on erittäin rankka testi maalipinnalle.

9.2.5 Akryyli

Akryylin testitulokset olivat välillä 2-3. Tason 3 saavuttivat levyt, jotka olivat olleet jatkuvassa suolasumussa, UV-valossa ja myös rasittamaton vertailulevy. Proheesio ja merenrantarasitustulokset olivat tasoa 2. Erikoisen tilanteesta tekee vertailulevyn tulos, koska rankoissa rasituksissakin olleet levyt saivat parempia tuloksia, kuin vertailulevy. Vertailulevyn huono tulos voi johtua esimerkiksi maalarin virheestä. Levyt on kuitenkin maalattu samaan aikaan, samalla ruiskulla, samoissa olosuhteissa, maalari oli sama sekä testit oli suoritettu samalla tavalla.

Testit olivat erityisen rankkoja ja tulokset olivat tasaisia. Akryyli oli kestänyt kohtuullisesti jokaisessa rasituksessa.

9.2.6 Yhteenveto ilmastorasituksissa olleille levyille

Polyuretaani kesti akryyliä paremmin melkein kaikki testit. Jatkuvassa suolasumussa tulokset olivat samoja. Testitulokset olivat keskinertaisia ja testit todella rankkoja. Kuitenkin on otettava huomioon, että maalien on kestävä raskaissa olosuhteissa telakointiväli, vaikkakin huoltomaalausta laivoille tehdään mahdollisimman usein.

Polyuretaani kestää lämpöä ja lämpötilan vaihteluita huomattavasti paremmin kuin akryyli. Proheesiossa, UV:ssä ja suolasumussa lämpötilat olivat jatkuvasti yli huoneen lämpötilan. Etenkin UV-testissä lämpötila vaihteli kahdeksan tunnin välein 40 celsiusasteesta 60 celsiusasteeseen. Akryylin lämmönkestävyys ei ole yhtä hyvä kuin polyuretaanin. Kulutus- ja iskunkestävyys ovat akryyllillä huonommat kuin polyuretaanilla, kun taas joustavuus ja kovuus ovat kohtalaisen hyvät molemmilla. Värisävyn säilyvyys on molemmilla sama. Tulokset olivat odotetut, koska ne olivat teorian kanssa yhtäpitävät, paitsi akryylin vertailulevy oli täysin poikkeus.

9.3 Taber-testi

9.3.1 Vinyyli/akryylimaaliyhdistelmä

Eniten kului levy numero 8, jossa oli vinyyli/akryylimaaliyhdistelmä. Ensimmäisessä silmämääräisessä tarkastuksessa (200 kierroksen jälkeen) todettiin pintamaalia kuluneen niin paljon pois, että pohjamaalia voitiin hieman jo havaita. Lopuksi pintamaalia ei juurikaan ollut kulutuskohdassa. Pioneer Topcoat in tuoteselosteessa kerrotaan kulutuksen kestävyuden olevan hyvä. Tulos oli testin huonoin, mutta huomioon on otettava, ettei maalia ole edes tarkoitettu jatkuvaan hankausrasitukseen. Akryyli kestää hyvin UV-säteilyä ja säilyttää kiillon sekä värin erittäin hyvin. Vedenalaisiin rasituksiin maali ei sovellu.

9.3.2 Epoksimastic/antifouling-maaliyhdistelmä

Toiseksi eniten painohäviötä tapahtui epoksimastic/antifouling-maaliyhdistelmässä. Työssä käytettävä antifouling on itsestään kiillottuva tinavapaa maali, jonka sideaineena toimii organosilosyyliipolymeeri. Sideaine liukenee hitaasti meriveteen. Antifoulingia käytetäänkin siksi lämpimissä merissä, joissa laivan pohjaan ei kerry niin suurta hankausrasitusta, mitä esimerkiksi

jäissä kulkevilla aluksilla on. Korroosionesto antifoulingilla perustuu maalin liukenemiseen eikä kulutuskestävyyteen. Maalin vaikutus perustuu viimeiseen mikrometriin asti. /29/

9.3.3 Epoksimastic ja epoksimastic/polyuretaani-maaliyhdistelmät

Epoksin ja polyuretaanin kulutuksen kestävyudet olivat erinomaisia. Epoksi sai testissä toiseksi parhaimmat tulokset. Näiden testien perusteella polyuretaani vastusti parhaiten kulumista. Vedenalaiseen kulutukseen on kuitenkin ehdottomasti epoksi parempi. Polyuretaani ei kestä emäsrasituksia muuten kuin roiskeina, meriveden pH on noin 8.

Epoksin tuloksiin vaikuttanee myös maalin viskositeetti. Epoksia jouduttiin laimentamaan huomattavasti yli sallitun määrän, että maali tulisi haluttuna viuhkana. Tästä syystä epoksin tuloksiin ei voida täysin luottaa.

9.3.4 Yhteenveto

Taber-kulutuskestävyydestä onnistui hyvin. Suurempia eroja olisi saatu, jos olisi laitettu punnukset antamaan lisäpainoa. Testin tulokset olivat odotetut, joten voidaan päätyä lopputulokseen, että polyuretaani ja epoksi kestävät erittäin hyvin kulutusta. Antifouling ja akryyli eivät anna yhtä hyvää suojaa kuluttavaan rasitukseen meneville pinnoille. Tässä testissä on kappaleet testattu normaaleissa laboratorio-olosuhteissa, joten testissä ei ole ollut mukana muita tekijöitä. Kuitenkaan akryyliä ei ole tarkoitettu erittäin kulutuskestävyyttä edellyttäviin kohteisiin. On myös huomioitava, että akryylin kalvonpaksuus on puolet pienempi kuin antifoulingin ja epoksin, mutta tulokset ovat kuitenkin vertailukelpoisia, koska niissä perustetaan painohäviöön ei paksuuteen.

9.4 Rasitustestien vertailua

9.4.1 Upotusrasitus

Standardi SFS-EN ISO 12944-6 edellyttää upotusrasitukseen kehitettävien korroosionestomaaliyhdistelmien testaamista rasitusluokassa Im 2 (merivesiupotus) upotusta 5 % NaCl-liuoksessa (ISO 2812-2) sekä neutraalia suolasumutestausta (ISO 7253). Testausajat riippuvat maaliyhdistelmälle asetettavista kestävyysaikaodotuksista. Tässä työssä tehtiin vesiupotustestaukset sekä 0,5 % NaCl- että 5 % NaCl-liuoksissa. Lisäksi tehtiin yhden talvikauden mittainen merivesiupotustestaus.

Koetulosten perusteella molemmat upotusrasitukseen tarkoitetut maaliyhdistelmät toimivat hyvin näissä testeissä, eikä havaittavaa maalipinnan vaurioitumista, kuten kuplimista, ruostumista, halkeilua tai hilseilyä, tapahtunut. Myös maaliyhdistelmien tartuntaominaisuudet säilyivät rasitustestauksissa riittävän hyvinä. Vetolujuusvaatimus rasituksen jälkeen on vähintään 2 MPa, eikä kiinnipysyvyyden pettämistä alustasta sallita (A/B-murtuminen), ellei vetolujuusarvo ole vähintään 5 MPa. Rasitustestauksessa haluttiin selvittää, tuoko upotusrasitustestaus 0,5 % NaCl-liuoksessa lisätietoa maaliyhdistelmien toimivuudesta. Näiden rasituskokeiden perusteella tulokset menevät ristiin, joten upotusrasitukseen tarkoitetun maaliyhdistelmän testaukseen riittäisi testaus 5 % NaCl-liuoksessa.

9.4.2 Ilmastorasitus C5-M

Standardi SFS-EN ISO 12944-6 edellyttää ankaraan meri-ilmastorasitukseen suunniteltujen maaliyhdistelmien lyhytaikaista testausta seuraavilla menetelmillä:

- veden kondensoituminen (ISO 6270), testausaika 240 – 720 h ja
- neutraali suolasumu (ISO 7253), testausaika 480 – 1440 h

Testausaika riippuu maaliyhdistelmälle suunnitellusta kestoajasta. Suolasumutestin osalta testausaika jäi lyhyemmäksi, mutta täyttää reilusti kohtalaisen kestoajan 5 – 15 vuotta vaatimuksen ilmastorasitusluokassa C5-M. Varsinaista ISO 6270 mukaista veden kondensoitumistestistä ei koelevyille tehty, vaan lisäinformaatiota tässä työssä ilmastorasituksen kestävyysaikaan haettiin

syklisillä proheesio- ja UV-kondensiorasitustesteillä. Lisäksi koelevyjä oli meri-ilmastorasituksessa yhden talvikauden ajan meren rannassa.

Maaliyhdistelmän kiinnipysyvyyksivaatimus on ilmastorasitukseen meneville yleensä rasittamattomille maalipinnoitteille 4 MPa ja rasituksessa olleille maalipinnoitteille vähintään 2 MPa. Maalikalvon murtuminen ei saa tapahtua alustasta (A/B) korroosiorasituksen jälkeenkään, ellei se ole vähintään 5 MPa. Korroosiorasituksen jälkeen maalipinnassa ei saa esiintyä kuplimista, ruostumista, halkeilua eikä hilseilyä.

Koetulosten perusteella ilmastorasitukseen tarkoitetuista maaliyhdistelmistä epoksi/polyuretaani täytti selvästi nämä vaatimukset. Sen sijaan maaliyhdistelmä vinyyli/akryyli ei täyttänyt lähtötilan tartuntalujuusvaatimuksia (tartuntavetokoe, hilaristikkotesti) eikä myöskään muutamien rasitustestien jälkeen. Lähtötilan heikohko tartuntalujuus saattaa johtua siitä, että maali ei ole täysin kovettunut, koska murtuminen tapahtui pintamaalin koheesiomurtumana ja UV-kondensiorasituksen jälkeen maaliyhdistelmän tartuntalujuus oli korkeampi kuin lähtötilassa.

Korroosiorasitetun pinnan ulkonäkövaatimukset molemmat maalityypit täyttivät.

Erilaiset lyhytaikaiset rasitustestausmenetelmät antavat koetulosten perusteella toisiaan täydentäviä tuloksia. Voisi olla siten tarpeen lisätä maaliyhdistelmien testausvaatimuksiin syklisiä testejä, joilla simuloidaan paremmin todellisuudessa vallitsevia olosuhteita.

9.5 Jatkotutkimustarve

Tässä työssä keskityttiin laivanrakennusteollisuudessa käytettävien suojamaaliyhdistelmien korroosionkestävyysominaisuuksien testaukseen erilaisilla lyhytaikaisilla testausmenetelmillä. Tutkimuksessa saatiin paljon tietoa maalien käyttäytymisestä, mutta syntyi myös lisätutkimusta kaipaavia kohteita. Lisätutkimusta olisi hyvä tehdä

- antifouling – ja foulingvapaiden maalien ominaisuuksista
- vesiohenteisten korroosionestomaaliyhdistelmien toimivuudesta eri rasitusolosuhteissa

- syklisten testausmenetelmien soveltuvuudesta korroosionestomaaliyhdistelmien kehittämiseen, esimerkiksi UV-kondensiorasitus, proheesiotesti, suolasumu, kuivaus, UV-rasitus ym.

10 Yhteenveto

Työssä tutkittiin maaliyhdistelmien ominaisuuksia ja vertailtiin niiden käyttäytymistä erilaisissa olosuhteissa. Työhön oli valittu neljä EN ISO 12944-5 mukaista maalausjärjestelmää. Kaksi upotusrasitukseen ja kaksi ilmastorasitukseen sopivaa yhdistelmää.

Koelevyt olivat kaikki samasta teräslevystä. Jokaiselle levyille tehtiin sama esikäsitely, jossa epäpuhtaudet poistettiin saippuavedellä ja liuottimella mahdolliset rasvat ja muut liat. Kappaleet puhallettiin karheusasteeseen Sa 2 ½ ja maalattiin välittömästi puhalluksen jälkeen. Kaikki tapahtui sisätiloissa optimiolosuhteissa. Kalvonpaksuudet mitattiin ja upotusrasituksen meneviltä tutkittiin maalin huokoisuus.

Jokaisesta maaliyhdistelmästä tehtiin vertailukappale. Epoksi- ja antifoulinglevyille tehtiin testit, joissa ne upotettiin 0,5 % ja 5 % NaCl- liuokseen ja mereen. Polyuretaanille ja akryylille tehtiin UV-kondensiorasitus-, proheesio-, jatkuvasuolasumutestit ja yksi levyistä sijoitettiin meren rantaan.

Kaikille tehtiin vetonuppikokeet, hilaristikkokoe tehtiin alle 250 µm kalvonpaksuuksille eli pelkästään akryylille, X-viiltotestit muille yhdistelmille ja Taber-testi tehtiin jokaiselle maaliyhdistelmälle.

Tutkimusten tulosten perusteella saatiin selville polyuretaanin olevan selvästi akryyliä parempi rankoissa ilmasto-olosuhteissa. Epoksin ja antifoulingin koetulokset olivat eri rasiustesteissä kohtuullisen samoja. Kuitenkin vetonuppitestissä epoksilla oli hieman parempia tuloksia. Antifoulingin käyttökohteista johtuen ja epoksin ominaisuudet tuntien ei voida suositella epoksia samoihin olosuhteisiin, missä antifoulingia käytetään.

Foulingeliöiden takia ei epoksimasticia voida suositella lämpimiin olosuhteisiin. Tästä johtuen olisi erittäin mielenkiintoista tutkia ja kehittää itsestään puhdistuvaa foulingvapaata olosuhteisiin, joissa jäät eivät pääse puhdistamaan aluksen pohjaa.

Lähteet

1. Kjærnsmo, Dag- Kleven, Kjell- Scheie, Jan: Corrosion protection, Inspector's book of reference. 1st edition 2003.
2. Korroosionestomaalaus, Teknos. Esite.1/95
3. Dry Ice Cleaning as Secondary Surface Prep in Ships, Journal of Protective coatings & linings, November 2008
4. Alén Holger: Maalit ja niiden käyttö. Helsinki. Painatuskeskus Oy 1994
5. Nevala Kari: Liuotinvapaaan ja niukkaliuotteisten epoksimaalien tarttuvuus ja korroosionestokyky. Teknikkotyö. EVTEK-ammattikorkeakoulu. Materiaali- ja pintakäsittelyn koulutusohjelma.1993
6. Huovinen, Niina: Fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien vaikutus pinnoitetyyppien valintaan. Niina Huovinen. Insinööriyö. EVTEK-ammattikorkeakoulu. Materiaali- ja pintakäsittelyn koulutusohjelma.2004
7. Nor-maali. Tuoteseloste. <http://www.nor-maali.fi/?s=4>, luettu 25.9.2008
8. Epoksihartsi. <http://www.3dchem.com/molecules.asp?ID=326>, luettu 25.9.2008
9. Epoksin rakennekaava.
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Epoxy_prepolymer_chemical_structure.png, luettu 27.9.2008
10. Tunturi, Pirjo&Tunturi Pekka. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt. Tammer-Paino Oy, Tampere 1999
11. Epoksimaalien terveyshaitat.
<http://www.ttl.fi/Internet/Suomi/Aihesivut/Rakennusterveys/Turvapakki/Epoksimaalit.htm>, luettu 27.9.2008
12. Epoksihartsit. http://www.ttl.fi/NR/rdonlyres/9880B23B-9F7B-472C-B6B5-A0C57207CF1E/0/4_12_3_Epoksihartsi.pdf, luettu 25.8.2009
13. Hempel.<http://www.hempel.fi/internet/ineencyclopedia.nsf/fENCYCLOPEDIANEW?ReadForm&ref=internet/inedkc.nsf>, luettu 28.9.2008
14. Goldie, Brian. Ballast Tank Test Yields Long-Service Epoxy. JPCL, Journal Of Protective Coatings & Linings, November 2008
15. Polyuretaani. http://www.pintasuojaus.com/Polyuretaani/body_polyuretaani.html, luettu 25.8.2009

16. Morris, Joseph P. Tohtori. New Duplex Fouling Release Coating System Works without Toxins. FUJIFILM Hunt Smart Surfaces, LLC, Journal of Protective coatings & linings, February 2007
17. Hull Performance, Fouling, and Coatings. Staff, Journal of Protective coatings & linings, November 2008
18. Fluoropolymer. <http://www.metcoat.com/fluoropolymer.htm>, luettu 19.8.2009
19. Antifoulingin käyttö ja rajoitukset. <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=3505&lan=fi>, luettu 19.8.2009
20. Huffman, Lori. Going Green: Raw Suppliers Weigh in on Low VOC and High-Solids Coatings for Industrial Maintenance. JPCL, Journal of Protective coatings & linings, April 2007
21. Rapra, Rupper & Plastic, Introduction to polyurethan elastomers
22. Polyuretaanin käyttö. <http://www.finn-valve.com/pu-tieto.html>, luettu 26.8.2009
23. Isosyanaatit. <http://www.tsr.fi/tutkimus/uuttatutkittua/hanke.html?id=98379>, luettu 26.8.2009
24. Hydrolyysi.
http://www.uku.fi/valinta/valintakokeet/2007/Fakiintio_mallivastaukset2005.pdf, luettu 26.8.2009
25. Kangasmäki Paulalle. Panka, Kalevi. Teknos. Sähköpostiviesti. Elokuussa 2009.
26. SFS-EN ISO 12944-5. Suomen Standardisoimisliitto. 2. Painos 2008.
27. SFS-EN ISO 8503-2. Suomen Standardisoimisliitto. 1996.
28. Metallit eri olosuhteissa. <http://www.rautavaara.fi/koulut/oppima/metallit/fecumetallit.html>, luettu 11.3.2010
29. Nor-maali tuoteselosteet. <http://www.nor-maali.fi/index.php?s=4&id=140>, luettu 13.3.2010
30. Korroosiokäsikirja, KP-Media Oy, Oy Kotkan Kirjapaino Ab, Hamina. 3.Painos 2006.
31. Tiehallinto. <http://alk.tiehallinto.fi/sillat/silko/kansio1/s1351e.pdf>, luettu 2.4.2010
32. SFS-EN ISO 16276-2. Suomen Standisoimisliitto. 2007.
33. Hare. Clive H. Protective coatings, Fundamentals of chemistry and composition, 1994

LIITE 1

Liite D

(opastava)

Haihtuvat orgaaniset aineet (VOC)

VOC tarkoittaa mitä tahansa haihtuvaa orgaanista ainetta, jota esiintyy tietyssä tilavuudessa maalia tai vastaavaa materiaalia ja joka haihtuu määritellyissä olosuhteissa ilmaan levityksen aikana ja sen jälkeen. Haihtuvan orgaanisen aineen pitoisuus ilmoitetaan yksikössä g/litra.

HUOM. 1 Euroopassa orgaanisen yhdisteen katsotaan olevan haihtuva orgaaninen aine, jos sen höyrynpaine on 0,01 kPa tai enemmän lämpötilassa 293,15 K. Yhdysvalloissa olosuhteita ei ole määritelty, mutta haihtuviksi orgaanisiksi aineiksi katsotut aineet on yksilöity.

Haihtuvat orgaaniset aineet katsotaan ilmansaasteiksi ja useimmat niistä ottavat osaa valokemiallisiin reaktioihin. Tämän vuoksi valmistajilla on velvoite vähentää haihtuvan orgaanisen aineen määrää maaleissa hyväksyttävälle tasolle tarkoitukseen vähentää ilman pilaantumisen mahdollisimman alhaiselle tasolle.

Pinnoiteyhdistelmäerittelyn laatijoiden ja käyttäjien tulisi olla tietoisia näistä seikoista ja siitä, että monissa osissa maailmaa on voimassa tiukat VOC-päästöjä koskevat määräykset. Heitä pyydetään hankkimaan tietoja voimassaolevista säännöistä siinä maassa, jossa pinnoiteyhdistelmiä on tarkoitus käyttää.

Jos VOC-määräyksiä on voimassa, ne yleensä viittaavat haihtuvan orgaanisen aineen kokonaispäästöihin rakennuspaikalla, maalin VOC-tasoon tai molempiin.

VOC-päästöjä pinnoitteista ympäristöön voidaan vähentää kahdella pääasiallisella keinolla:

- a) valitsemalla sopivia pinnoiteyhdistelmiä (valitsemalla tuotteita, joiden VOC-pitoisuus on alhainen)
- b) levitettäessä pinnoiteyhdistelmiä suljetussa tilassa (työpajalla) kuljettamalla poistoilma maalauspaikan ilmanvaihdon erityisiin suodattimiin, jotka adsorboivat haihtuvat orgaaniset aineet, tai polttimiin, jotka hapettavat haihtuvat orgaaniset aineet hiilidioksidiksi ja vedeksi.

Haihtuvan orgaanisen aineen vähentäminen valitsemalla sopivia tuotteita on usein ainoa käytännöllinen ja taloudellinen vaihtoehto. Tällöin on olemassa periaatteessa kolme vaihtoehtoa: liuoteohenteinen high solid -tuote (HS), liuotteeton tuote (SF) tai vesiohenteinen tuote (WB). On myös mahdollista käyttää näiden kolmen yhdistelmiä.

Jos valitaan high solid -maaliin tai liuotteettomaan maaliin pohjautuva pinnoiteyhdistelmä, tuotteita levitettäessä tulisi olla huolellinen, koska niiden levittäminen voi olla vaikeaa liitteessä A suositelluilla kuivakalvon nimellispaksuuksilla (NDFT). Nämä maalit joudutaan usein levittämään ruiskulla suositeltua suurempaan kuivakalvonpaksuuteen, jotta varmistetaan yhtenäinen jatkuva kalvo.

Vaikka vastaava kuivakalvon kokonaispaksuus saavutetaan pienemmällä kalvojen lukumäärällä, tämä ei välttämättä tarjoa samaa suojaustasoa, koska levitettyjen kalvojen lukumäärä vaikuttaa suojaustasoon - enemmän kalvoja tarkoittaa parempaa suojausta. Tämän vuoksi on suositeltavaa kompensoida kerrosten lukumäärää lisäämällä kalvon kokonaispaksuutta, jos käytetään high solid -tuotteita tai liuotteettomia tuotteita.

Jos valitaan vesiohenteisiin maaleihin pohjautuvat pinnoiteyhdistelmä, levityksen onnistuminen riippuu suurelta osin ilmanvaihdosta ja ilmasto-olosuhteista, mahdollisesti jopa enemmän kuin liuotteettomilla tuotteilla (ks. myös 4.2, 4.3.2 ja 4.3.3).

Taulukossa D.1 ilmoitetaan eri maalityyppien VOC-pitoisuudet ja mahdollisuudet vähentää niitä.