

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikan koulutusohjelma/Korjausrakentaminen ja rakennusrestaurointi

Eemeli Koskelainen

PAALUJEN VAURIOKORJAUKSET VESIRAJAN ALUEELLA

Opinnäytetyö 2012

# TIIVISTELMÄ

## KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

### Rakennustekniikka

KOSKELAINEN, EEMELI	Paalujen vauriokorjaukset vesirajan alueella
Opinnäytetyö	50 sivua
Työn ohjaaja	lehtori Juha Karvonen, lehtori Sirpa Laakso
Toimeksiantaja	Kymenlaakson ammattikorkeakoulu
Toukokuu 2012	
Avainsanat	betoni, satamarakenteet, vedenalaiset paalut, korjausmenetelmät, manttelointi

Opinnäytetyö on tehty Kymenlaakson ammattikorkeakoulun VEBETER-hankkeelle. Työssä perehdyttiin vedenalaisten paalujen vaurioihin sekä tutkimus- ja korjausmenetelmiin, pääpainona teräsbetonipaalut ja niiden korjaus mantteloimalla. Tavoitteena oli ottaa selvää, mikä korjausvaihtoehto sopii parhaiten Suomen ilmastoon ja miksi.

Opinnäytetyössä tarkasteltiin paalutuksella tuettuja satamarakenteita, veden, jään ja muiden tekijöiden aiheuttamia vauriotyyppejä sekä käytettyjä korjaus- ja tutkimusmenetelmiä. Tarkastelut painottuivat Suomen ilmastoon parhaiten soveltuviin laituripaalujen manttelointitapoihin. Lisäksi tarkasteltiin myös lämpimiin ilmastoihin paremmin soveltuvia menetelmiä. Tietoja hankittiin paaluja korjaavilta rakennusalan yrityksiltä, kirjoista, internetistä sekä haastatteleamalla asiantuntijoita. Asiantuntijoiden tiedot saatiin joko sähköpostitse tai vieraillemalla satamissa tai alan insinööritoimistoissa.

Paalujen yleisimmäksi korjaustavaksi Suomessa osoittautui betonimantteli ja parhaiten paaluja suojaavaksi menetelmäksi teräsmantteli. Muualla maailmassa käytetyistä monista erilaisista korjaustavoista eniten oli käytössä lasikuitumuotti.

Nykyisillä tutkimus- ja korjausmenetelmillä pärjätään hyvin, mutta tulevaisuudessa lisää kehitystä vaatisi erityisesti vedenalaiset tutkimusmenetelmät. Myös manttelointiin olisi hyvä keksiä vieläkin helpompia ja kustannustehokkaampia ratkaisuja.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Construction Engineering

KOSKELAINEN, EEMELI

Bachelor's Thesis

Supervisor

Commissioned by

May 2012

Keywords

Repair methods for underwater piles

50 pages

Juha Karvonen, Senior Lecturer

Sirpa Laakso, Senior Lecturer

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

concrete, port structures, underwater piles,  
repair methods, pile jackets

The aim of this Bachelor's Thesis was to study the damages and the repairing systems of underwater concrete and steel piles. The work was commissioned by Kymenlaakso University of Applied Sciences for its project called VEBETER.

The thesis examines port structures, their possible damages, and different repair and research methods, focusing on what methods are commonly used in the Finnish climate. A secondary objective was to find out different damages prevention techniques when designing a new steel or concrete pile.

Information was searched from books, from the internet, by interviewing experts and by visiting ports or engineering offices.

The most common repair method in Finland was the fiberglass jacket filled with concrete and the best way to protect piles from the floes and other harmful things was the steel jacket. Current researching methods are useful but they need much more improvement in the future, especially underwater research tools.

# SISÄLLYS

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

1	TYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET	6
2	LAITURITYYPIT	6
	2.1 Paalulaituri	6
	2.2 Puoliavoimet ja avoimet laiturit	8
	2.3 Teräsponsittiseinälaiturit	9
3	TUTKITTAVAT MATERIAALIT JA RAKENTEET	10
	3.1 Betoni	10
	3.2 Teräs	11
	3.3 Paalujen yläosan rakenne	11
	3.3.1 Katodinen suojaus	12
	3.3.2 Ylimitoitus	13
4	VAURIOT JA NIIDEN SYYT	14
	4.1 Halkeamat	14
	4.2 Pakkasrapautuminen	14
	4.3 Betonin karbonatisoituminen	15
	4.4 Korroosio	16
	4.5 Veden vaikutus korroosioon	17
	4.6 Kloridit	18
	4.7 Muut rasitukset	20
5	KORJAUSMENETELMÄT	20
	5.1 Manttelointi	20
	5.2 Betonimantteli	22
	5.3 Teräsmantteli ja sen valmistustapa	22
	5.4 Lasikuitumuotti	28
	5.5 Voimalaasti	31
	5.6 Pussimuotti	33
	5.7 Hiilikuituvahvistus	34

5.8 Muovimuotti	36
6 KUNTOTUTKIMUSMENETELMÄT	37
6.1 Yleistä	37
6.2 Silmämääräinen tarkastus	38
6.3 Erikoistarkastus	38
6.4 Poranäyte	39
6.5 Ohuthietutkimus	39
6.6 Betonipeitemittari	39
6.7 Kimmovasara	39
6.8 Ultraäänimittaus	40
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	40
LÄHTEET	44
KUVALUETTELO	49

## 1 TYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET

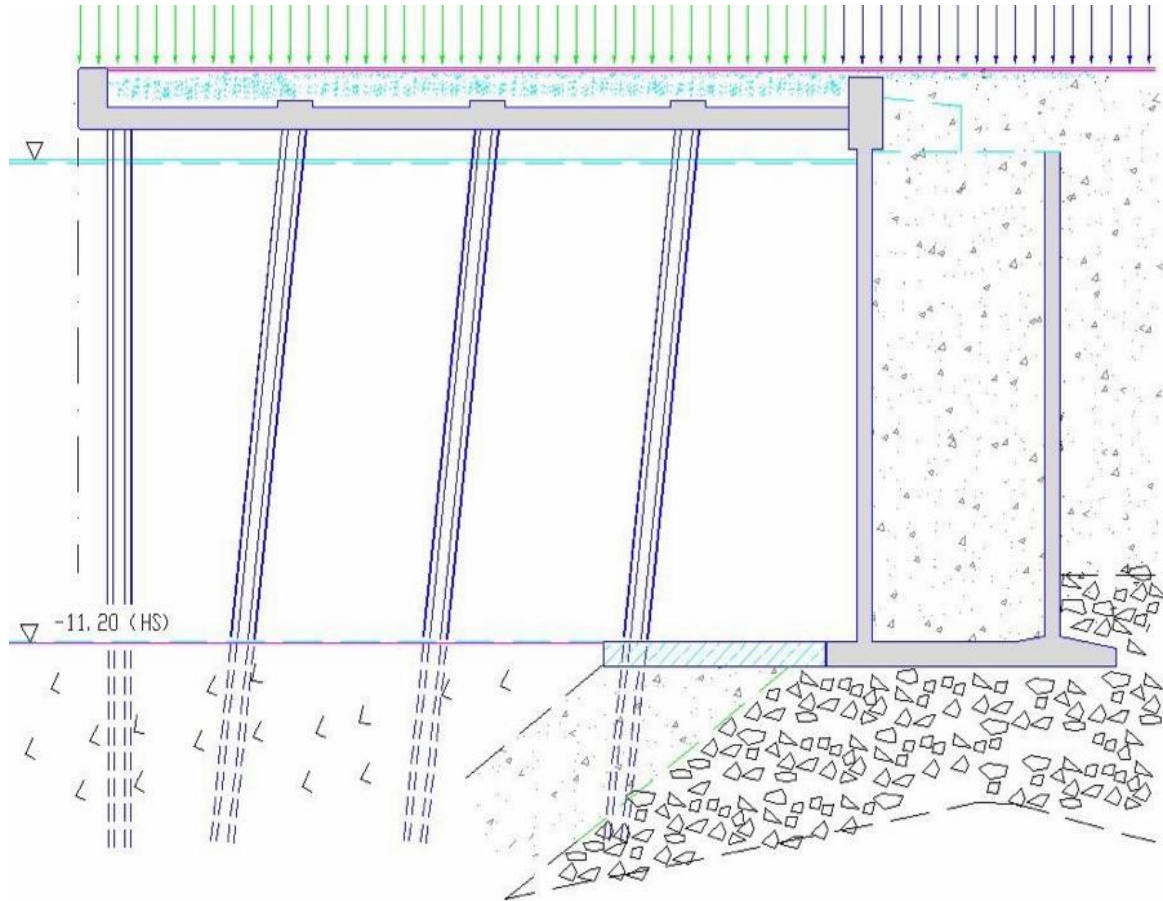
Suomessa useiden satamien ja siltojen paalurakenteet ovat päässeet vaurioitumaan erilaisten ympäristörasitusten vuoksi. Paaluja suojataan ja korjataan usealla eri tavalla, mutta selvää ja parasta menetelmää ei ole löydetty, varsinkaan vedenalaisten rakenteiden korjaamiseen. Vaurioiden korjaaminen saattaa vähäisten tai vääränlaisten tutkimuksien takia jäädä kokonaan tekemättä tai korjaukset voidaan tehdä väärällä tavalla, mikä johtaa rakenteen pikaiseen uudelleenkorjaamiseen ja siten kustannusten nousuun. Toisaalta kustannukset nousevat myös, jos rakenteita korjataan turhaan tai tarpeettoman paljon.

Opinnäytetyö on tehty VEBETER-hankkeelle. Hankkeen tavoitteena kehittää tutkimusmenetelmiä ja -laitteita vedenalaisten betoni- ja teräsrakenteiden kunnan seurantaan, testaukseen ja arviointiin. Lisäksi etsitään tietoa eri-ikäisten betonirakenteiden vaurioista, vaurioitumisesta ja kestävydestä sekä luodaan uusia toimintakonsepteja vedenalaisten betonirakenteiden tutkimiseen. Hankkeeseen osallistuu vesi- satama- ja siltarakenteiden omistajia, rakennusurakoitsijoita, sukellustarkastuksien ja vedenalaisten korjausrakennustöiden suorittajia, vedenalaisten korjaustuotteiden ja materiaalien valmistajia sekä tutkimuslaboratorioita. (Sidos 2012, 53.)

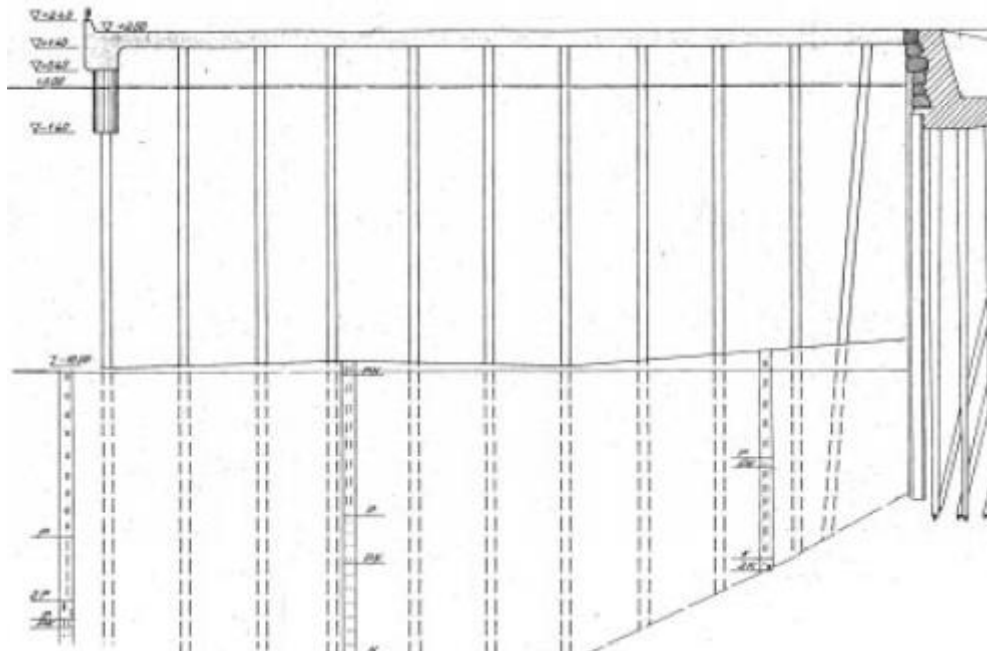
## 2 LAITURITYYPIT

### 2.1 Paalulaituri

Paalulaiturien kantavuus perustuu siihen, että pystykuormat viedään kansirakenteilta paaluilla alas maaperään. Vaakakuormien vaikutukset otetaan vastaan vinopaaluilla tai laiturin taustalla maatuilla ja/tai ankkureilla. Laiturin kansi tuetaan useilla pystyyn tai vinoon lyödyillä paaluilla (kuvat 1 ja 2). Tuet voivat olla lyöntipaaluja, tai ne on perustettu suoraan merenpohjaan, kallioon tai erityisiin arkkuihin. Suurimpien laiturien paalumateriaalina käytetään nykyään lähes aina betonilla täytettyjä teräsputkipaaluja, mutta vanhemmissa laitureissa paalut ovat usein teräsbetonia. Vanhimpien laitureiden paalut ovat usein puisia. (RIL 236-2006, 16.)



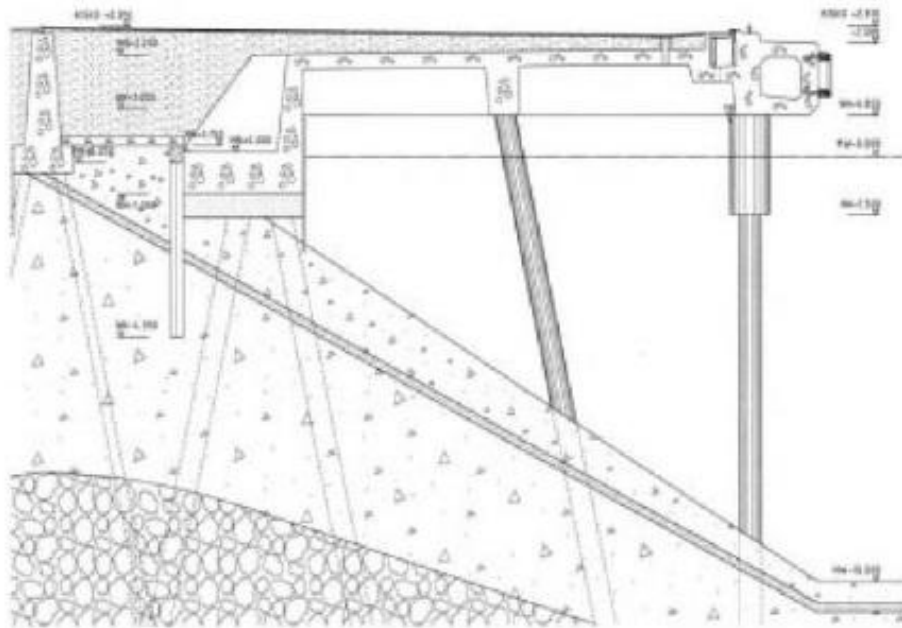
Kuva 1. Paalulaiturin rakenne (Böös 2010, 18.)



Kuva 2. Lyöntipaalulaituri (RIL 236-2006, 181.)

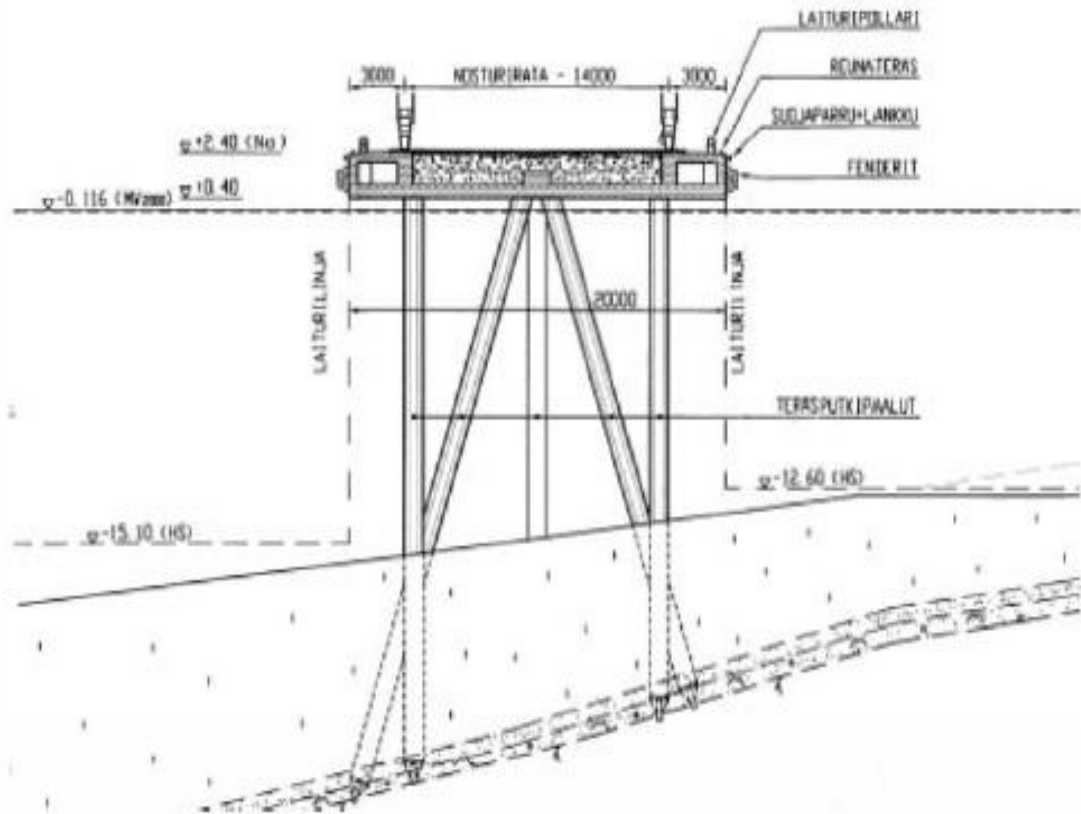
## 2.2 Puoliavoimet ja avoimet laiturit

Avoimissa ja puoliavoimissa paalu- ja pilarilaitureissa laiturikannen alusta on osittain tai kokonaan avoin (kuvat 3 ja 4). Puoliavoimissa laitureissa pohja nousee luiskana laiturin takareunaan kiinni. Laiturin kansi voi olla myös osittain maanvarainen. Avoimissa paalu- ja pilarilaitureissa veden syvyys on yleensä lähes sama laiturin molemmin puolin. Paalut tai pilarit tulee suojata yläpäistään korroosiolta, jään iskulta ja paa-lujen väliin jäävän jään kuormituksilta. (RIL 123-1979, 252.)



Kuva 3. Puoliavoimen paalulaiturin rakenne (RIL 236-2006, 179.)





Kuva 4. Avoimen paalulaiturin rakenne (RIL 236-2006, 179.)

### 2.3 Teräsponttiseinälaiturit

Tässä laiturityypissä laiturin etureunassa on teräsponttiseinä tai paaluista ja ponteista muodostettu kombiseinä, jota taustatäytöstä aiheutuva maanpaine kuormittaa. Laiturin taustalla laiturin kansirakenteen muodostaa paalutettu arinarakenne. Arinarakenteen alusta ja ponttiseinän tausta on täytetty kitkamaalla. Arinarakenteen päällä voi olla täytettä, tai arina voi muodostaa suoraan laiturin pintarakenteen. (RIL 236-2006, 16.)



suojaamaan betonirauhoitusta korroosiolta. Betonin lujuusluokan ja sementtimäärän tulee olla riittävän korkeita. (Esimerkiksi C40/50 ja 350 kg/m<sup>3</sup>). Kulutuksenkestävyyttä tarvitaan rakenteissa, joihin kohdistuu alusten työntämän jään aiheuttama rasitus. (RIL 236-2006, 78–79; Suomen Betoniyhdistys ry 2008, 33.)

### 3.2 Teräs

Teräs on tärkein rakennusteollisuudessa käytettävä raudan jatkojalostustuote. Sen tärkein ominaisuus on sen suuri lujuus, minkä takia se eroaa muista rakennusaineista kuten tiilestä, betonista ja puusta. Laiturirakenteissa terästä käytetään esimerkiksi uusissa teräsponttiseinien ponttilankuissa ja paalulaitureiden paaluissa, koska sillä on erittäin hyvä kulutuskestävyys ja korroosio eteneminen on melko hidasta, yleensä noin 0,1-0,2 mm vuodessa. Terästä voidaan myös käyttää korjaamaan ja suojaamaan teräsbetonipaalua tai muita betonirakenteita vesirajassa, missä korroosio on reilusti nopeampaa. Seostamalla teräkseen pieniä määriä kupari tai nikkeliä voidaan sen korroosionkestävyyttä parantaa huomattavasti. Teräsputkipaalun tiiviillä betonoinnilla varmistetaan, ettei korroosiota tapahdu putken sisäosassa. (Siikanen 2001, 180–182.)

### 3.3 Paalujen yläosan rakenne

Kunnollisella pintarakenteiden suojauksella voidaan lisätä paalujen käyttöikää ilman korjaustoimenpiteitä, ja usein sillä on myös mahdollista saada merkittävää taloudellista hyötyä. Aalto yliopiston opiskelijoiden tekemän harjoitustyön mukaan betonipaalun paikkauksella ja lasikuitu suojauksella on paalun ikää pidennetty ainakin 30 vuodella. Betoni- ja teräsrakenteissa suojaus kohdistuu yleensä paalurakenteen pintakerrokseen. (RIL 236-2006, 151.)

Vesirajassa teräksen korroosio ja pakkasrapautuminen ovat nopeampia ja jäiden aiheuttamat rasitukset suurempia. Siksi paalun yläosan rakenteen korroosionkestävyys täytyy olla muuta paalua parempi. Korroosionkestävyyttä voidaan parantaa pinnoituksella tai lisäämällä teräkseen esimerkiksi kromia tai nikkeliä. Korroosioon voidaan vaurautua myös sekä ylimitoituksella että erillisellä suojauksella. Suojana voi toimia myös laiturin kansi, josta tehdään niin paksu, että se ylettyy vesirajaan asti. Tällöin paalut jäävät piiloon vedenpinna alapuolelle eikä niihin kohdistu jäiden aiheuttamia kuormia. (Siikanen 2001, 190; RIL 236-2006, 153.)

Betonipaalun suojaus voidaan tehdä esimerkiksi pinnoitus suoja-aineella, betonipinnan koteloinnilla, suojakerroksen kasvattamisella, betoniterästen korroosionestoaineilla tai terästen katodisella suojauksella. Uuden betonipaalun raudoituksen kestävyyttä voidaan parantaa käyttämällä normaalia parempaa betonia tai tavallista betoniterästä kestävämpiä raudoitteita, kuten ruostumattomia betoniteräksiä. (RIL 236-2006, 152.)

Betonin halkeilua ennaltaehkäistään huolellisella suunnittelulla, lisähuokoistuksella, paremmalla jälkihoidolla tai vähentämällä lämpötilaeroja ja lämmönvaihteluita. Työtekniikalla on myös iso osa halkeilujen aiheutumisessa. Väärin asennettu raudoitus, väärä betonin laatu tai muottien liikkuminen voi johtaa erittäin nopeisiin korjaustoi-miin. (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 96.)

Helposti syntyvien ja vaikeasti havaittavien vaurioiden takia betonirakenteille tehdään jo suunnitteluvaiheessa käyttöikäsuunnittelu ja ylläpidon aikana jatketaan kunnonhal-linnan ennakoivaa suunnittelua. Tällä varmistetaan, että tarkastukset suoritetaan oi-keista kohdista ja niihin mahdollisesti tarvittavat korjaukset tehdään ajallaan. (RIL 236-2006, 152.)

Teräsbetoni- ja teräsputki-paalut suojataan usein teräksisellä jääsuojaalla. Siinä alkupe-räinen pysty- tai vinopaalu suojataan yläosasta teräksisellä holkillä. Holkin ja paalun välinen tyhjä osa raudoitetaan ja täytetään betonivalulla (silkobetoni C35/45). Holkki suojaa varsinaista paalua jäältä ja korroosiolta.

### 3.3.1 Katodinen suojaus

Katodista suojausta käytetään useasti suojaamaan maakaasu-, öljy-, vesi- sekä meri-vesiputkia sähkökemialliselta korroosiolta, mutta sillä voidaan myös ennaltaehkäistä betoniterästen ja teräsputki-paalun korroosiota. Katodinen suojaus vaatii sähköä hyvin johtavan ympäristön ja soveltuu siksi hyvin vedenalaisten teräsrakenteiden suojaa-mismenetelmäksi. Toteutustavasta riippumatta katodinen suojaus toimii periaatteessa siten, että suojattavan metallin potentiaalia lasketaan niin paljon, että korroosio saa-daan hidastumaan siedettävälle tasolle. Katodisen suojauksen edellytyksenä on, että rakenteen kaikki teräkset pystytään suojaamaan. (VTT 2008.) Katodisen suojauksen lisäksi raudoituksen sähkökemiallista korroosiota voidaan hidastaa kloridien poistolla tai uudelleen alkaloinnilla. Pääasiallisesti kuitenkin käytetään suojausmenetelmistä vanhinta, eli katodista suojausta. (Suomen Betoniyhdistys ry 1996, 34–35.)

Rakenteen korroosio uhrautuvan anodin avulla estetään yksinkertaisesti sijoittamalla suojattavan kohteen lähelle säännöllisin väliajoin vaihdettava terästä epäjalompi metalli, kuten esimerkiksi sinkkianodi, joka yhdistetään suojattavaan kohteeseen. Näin epäjalompi metalli syöpyy ja suojattava jalompi metalli säilyy vaurioitumattomana. (VTT 2008.)

Käyttämällä ulkoista virtalähdettä saadaan aikaiseksi tehokkaampi suojaus. Tällä menetelmällä voidaan suojata laajoja alueita ja tarvittavien anodien määrä on pieni. Sähköjohtokyky ja suojauskohteen pinnoitetyyppi määräävät pääasiassa käyttöjännitteen ylärajan. Virran säädeltävyyden ansiosta maalikalvoa rikkova, niin sanottu ylisuojaus saadaan poistettua kokonaan. Molemmissa tapauksissa elektronien korroosiovirta pakotetaan vastakkaiseen suuntaan, kuin teräksen syöpyessä tapahtuu. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, 796–799.)

### 3.3.2 Ylimitoitus

Korroosion vaikutus voidaan ottaa huomioon ylimitoituksella eli niin sanotulla korroosiovaralla. Korroosiovaraa käytettäessä kasvatetaan paalun seinämäpaksuutta siten, että se on arvioidun käyttöiän aikana tapahtuvan syöpymisen jälkeenkin vielä riittävä kantamaan rakenteelle suunnitellut kuormat. Tarvittava korroosiovara (Kuva 6) muodostuu rakenteen suunnittelukäyttöiästä ja paalua ympäröivistä korroosioominaisuuksista. Ylimitoitus on riittävä varautumiskeino jos korroosio-olosuhteet ovat tavanomaisia. Eli jos paaluihin kohdistuva veden virtaus ei ole voimakasta, vesi ei ole liian suolaista, pilaantunutta tai hapanta. Jos rakenne on alueella mihin kohdistuu suuria potkuri- tai suihkuvirtauksia, ei sen pinnalle pääse muodostumaan korroosiota hidastavaa pysyvää ruostepintaa. Tämä tulee ottaa huomioon ylimitoituksen yhteydessä. (RIL 236-2006, 153; Liikennevirasto 2007, 53–54.) Joissain tapauksissa betoniteräksset on voitu mitoittaa niin, että vaikka vesi on syövyttänyt paalun ympäriltä betonin lähes kokonaan, sen kantavuus ei silti ole kärsinyt.

Vesialue			Maa-alue	
Vyöhyke	Ylimitoitus [mm]		Vyöhyke	Ylimitoitus [mm]
	Meri	Sisävesi		
> HW+1,5	4	3	Maanpinta+1,0	3*
HW+1,5...NW-1,5	10	6	Maanpinta+1,0...HW+1,0	4*
NW-1,5...Pohja-1,5	4	3	HW+1,0...NW-1,0	4
< Vesistön pohja -1,5	2	2	< NW-1,0	2

Kuva 6. Teräsrakenteiden korroosiovarat (Hakulinen 2003.)

Paaluperustuksen suunnittelussa on käytetty yleensä varmuuskerrointa 1,5. Ennakoi-  
tua nopeampi korrosio pienentää siten aluksi rakenteen varmuutta, mikä voi lopulta  
johtaa teräsrakenteen sortumiseen.

## 4 VAURIOT JA NIIDEN SYYT

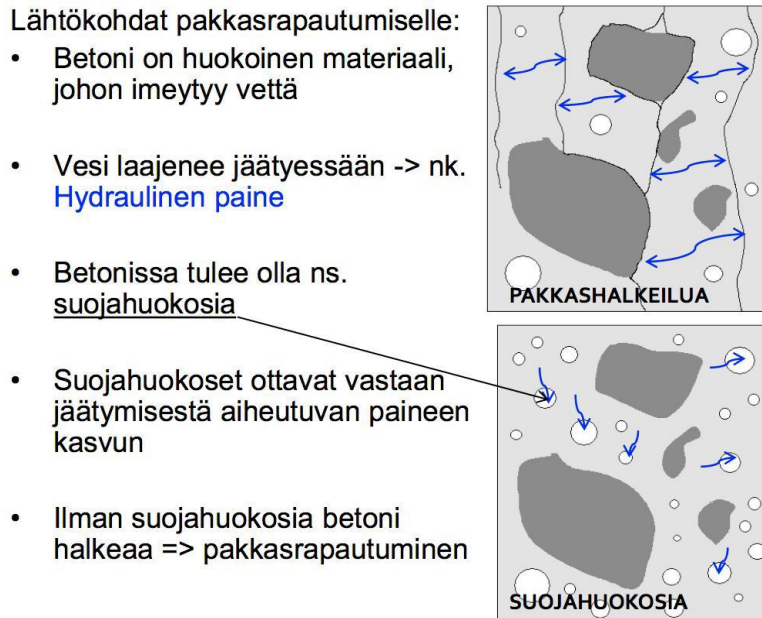
### 4.1 Halkeamat

Betonirakenteisiin syntyy halkeamia, kun betonin vetojännitykset ylittävät betonin ve-  
tolujuuden. Halkeamia aiheuttaa huono jälkihoito tai tiivistys, liian nopeasti jähmetty-  
nyt betoni tai kovettumisenaikaiset lämpötilaerot pintaosan ja sisäosan välillä. Hal-  
keamat vaikuttavat betonirakenteen toimintaa ja niiden vaikutusaste riippuu hal-  
keaman leveydestä. 0,3-0,5 mm leveät halkeamat vaurioittavat betonipintaa ja edistä-  
vät terästen ruostumista. 0,5-1,0 mm leveät halkeamat ulottuvat raudoitukseen asti ja  
edistävät jo huomattavasti terästen ruostumista. Korjauksen yhteydessä halkeamien  
kohdalta betoni tulisi poistaa aina raudoitukseen asti. (Suomen Betoniyhdistys ry  
2007, 92–94.)

### 4.2 Pakkasrapautuminen

Suomessa kaikkiin ulkobetonirakenteisiin kohdistuu voimakkuudeltaan vaihteleva  
pakkasrasitus. Betonin sisältämän veden toistuva jäätyminen aiheuttaa betoniin säröi-  
lyä, mikä heikentää betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia. Jäätyessään vesi  
laajenee 9 %, mikä aiheuttaa betonin sisälle hydraulisen paineen. Aluksi paine leviää  
betonin suojuhuokosiin, mutta sen nousu saa lopulta aikaan betonin lohkeilua ja rapau-  
tumista. Varsinkin merivedessä vedenpinnan vaihtelualueella betonin rapautuminen

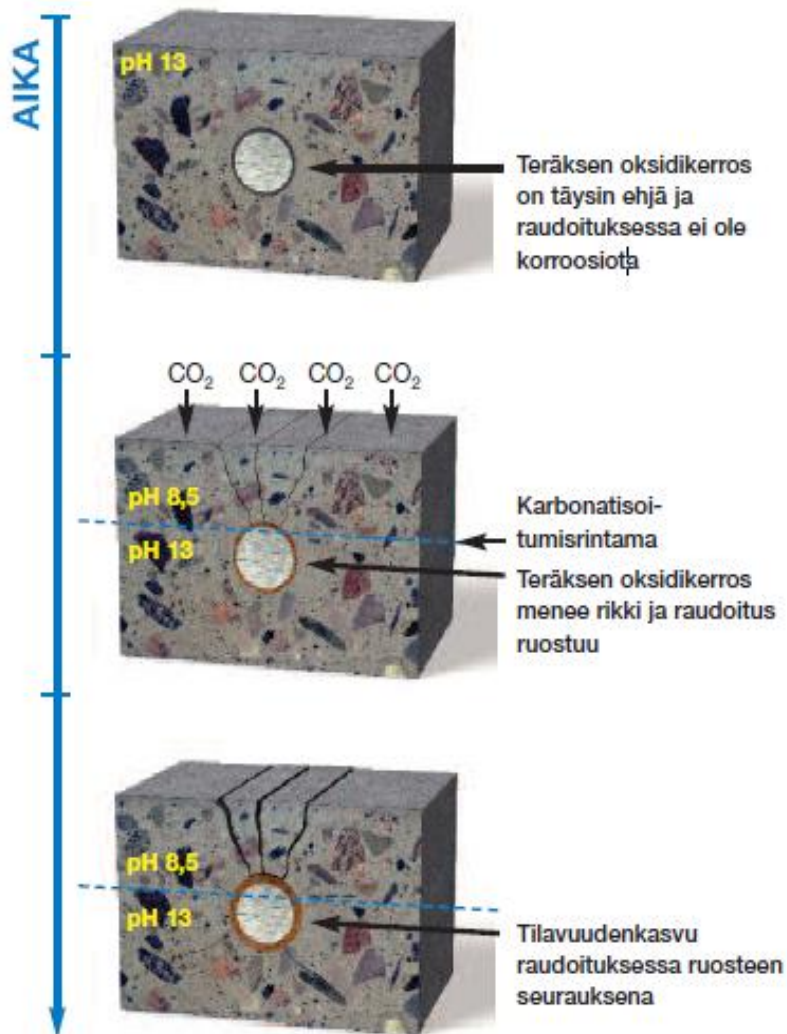
on nopeaa, koska betoni kerää jatkuvasti vettä ja suoloja huokosiinsa. Painetta lisää myös jääkiteiden kasvun aiheuttama paine, mikä tapahtuu veden jäätyessä, sekä myös silloin kun jää alkaa sulaa. Silloin jää laajenee hetkellisesti, mikä saattaa rikkoa betonia. (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 104; VTT 2000)



Kuva 7. Pakkasrapautumisen periaate (Weijo & Mehto 2009.)

#### 4.3 Betonin karbonatisoituminen

Betoni on valmistuttuaan emäksinen materiaali. Betonin neutraloitumisreaktio eli karbonatisoituminen on seurausta, kun hiilidioksidi tunkeutuu betoniin (kuva 8) ja reagoi kalsiumhydroksidin kanssa. Kalsiumhydroksidi muuttuu kalsiumkarbonaatiksi, mikä toisaalta lisää lujuutta, mutta laskee betonin pH arvoa. PH arvon laskeminen normaalista noin 13–14:stä alas 8:aan, aiheuttaa betonin huokosveden emäksisyyden (pH) alenemisen, sekä samalla teräksiä suojaava alkalisuus loppuu ja korroosio alkaa, jos olosuhteet muutoin ovat sopivat. Karbonatisoituminen alkaa vähitellen betonin pinnasta ja etenee hidastuvaa tahtia syvempään rakenteeseen. Karbonatisoitumissyvyys on tärkeä selvittää, koska sen avulla voidaan arvioida, kuinka teräkset ovat alttiita korroosiolle ja ennustaa terästen korroosionopeutta jatkossa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2002, 21–23.)



Kuva 8. Betonin karbonatisoituminen (Mapei Oy 2012.)

#### 4.4 Korroosio

Raudituksen korroosio eli syöpyminen on yleisimpiä teräsbetonirakenteiden korjaustoimenpiteitä aiheuttavia tekijöitä. Sanaa korroosio käytetään nykyään kuvaamaan kaikkien rakennusmateriaalien kemiallista ja sähkökemiallista tuhoutumista ympäristön vaikutuksesta. Useimmiten kuitenkin korroosiolla viitataan metallien kulumiseen eli ruostumiseen. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, 17.)

Raudoitteiden ympärillä oleva betonikerros muodostaa teräkselle suojaavan kerroksen, sekä korkeasta alkalisuudesta johtuen betoni muodostaa teräksen pinnalle ohuen oksidikalvon, joka estää sähkökemiallisen korroosion. Tiivis ja paksu betonikerros estää teräksille haitallisten aineiden, kuten kloridien, tunkeutumisen rakenteen sisälle. Jos



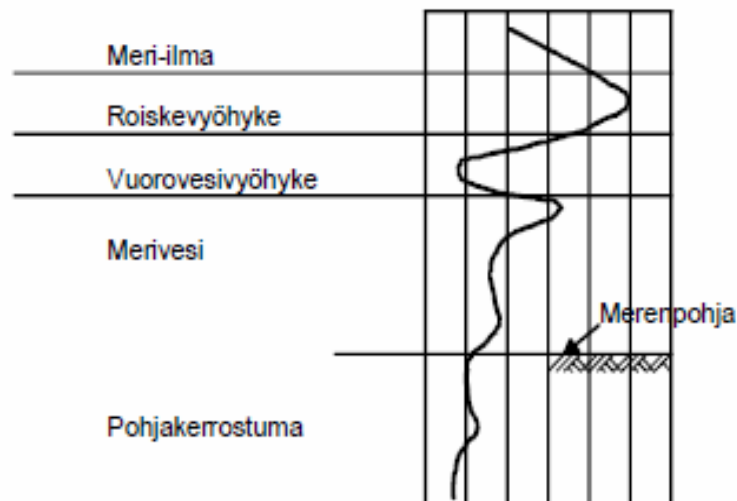
jokin näistä suojauksista heikkenee, alkaa teräkseen muodostua vaurioita. (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 100–101.)

#### 4.5 Veden vaikutus korroosioon

Vesi, joka sisältää liuenneita kaasuja tai suoloja aiheuttavat korroosiota. Korroosioon vaikuttaa merkittävästi, onko rakenne meressä vai sisävesistössä. Jos teräsrakenteen ainevahvuudessa ei ole otettu huomioon korroosiovaraa ylimitoituksella, on rakenne suojattava korroosiolta. Yleisesti veden vaihtelualueella olevat teräsrakenteet suojataan pinnoittamalla ja upotusvyöhykkeessä olevilla rakenteilla katodinen suojaus on tavanomainen suojausmenetelmä. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, 248–255.)

Korroosioon vaikuttaa myös rakennetyyppi. Umpinaisessa teräsputkipaalussa korroosiota esiintyy yleensä vain paalun ulkopinnalla. Avoimissa teräsputkipaaluissa täytyy huomioida myös paalun sisäpuolinen korroosio. Se on kuitenkin erittäin vähäistä, jos paalun kärki on pysyvästi pohjavedenpinnan alapuolella ja paalun yläpää on suljettu tiiviisti. (RIL 236-2006, 152; VTT 2004.)

Erityisesti meriveden roiskevyöhykkeessä ja veden pinnan vaihtelualueella korroosion edellytykset ovat hyvät. Happea, kosteutta ja suoloja on runsaasti saatavilla. Syvemmällä vedessä hapen puute hidastaa korroosiota (kuva 8). Muita korroosioon vaikuttavia veden ympäristötekijöitä ovat esimerkiksi lämpötila ja virtausolosuhteet. (Hakulinen 2003.)



Kuva 9. Korroosionopeus meriolosuhteissa (Hakulinen 2003.)

Korroosioon vaikuttaa myös veden virtausnopeus ja saostumien muodostuminen. Veden virtausnopeuden kasvaessa nopeutuu myös syövyttävien ja inhiboivien aineiden leviäminen metallin pinnalle. Seisova vesi edistää konsentraatioparien syntyä, jotka puolestaan aiheuttavat pistemäisiä syöpymiä, esimerkiksi ruostumaton teräs on herkkä pistekorroosiolle. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, 255.)

Suomalaisten pintavesien (makeiden vesien) suolapitoisuus on pieni ja ne ovat pehmeitä. Pintavesien pH-arvo on alhainen, mikä yhdessä pienen kovuuden kanssa saa aikaan sen, etteivät pintavetemme yleensä muodosta korroosiolta suojaavaa kalvoa metallin pinnalle. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, 248.)

Vaikka rannikkojemme merivesien suolapitoisuus onkin suurempi kuin pintavesien, siitä ei kuitenkaan missään olosuhteissa muodostu korroosiota estävää suojakalvoa metallin pinnalle. Veteen liukoiset suolat, kuten alkalikloridit, -sulfaatit, -nitraatit nopeuttavat korroosiota. Kloridi-ionit lisäävät korroosiota myös siten, että ne tunkeutuvat suojakalvon lävitse ja korvaavat inhiboivan aineen metallin pinnalla. (Kunnossapitoyhdistys ry 2004, 248.)

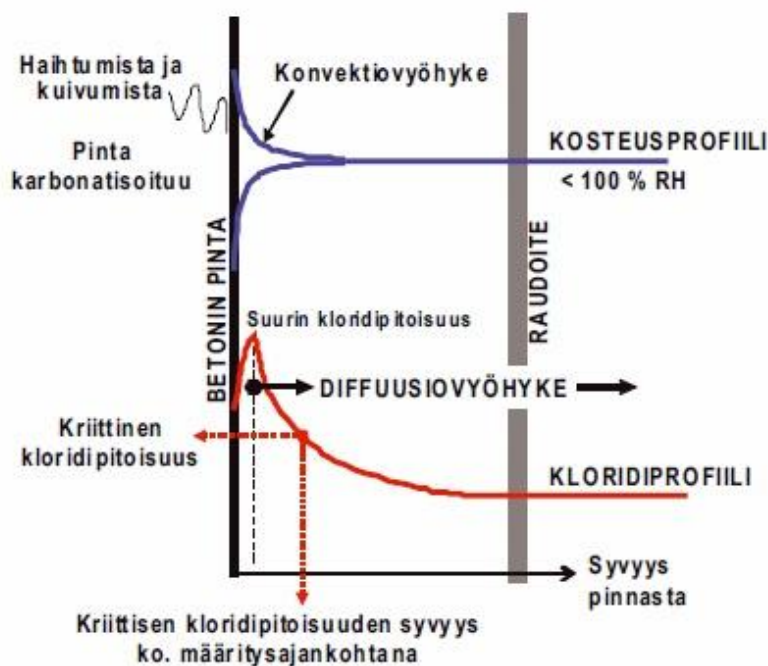
#### 4.6 Kloridit

Kloridit siirtyvät laiturien betonirakenteisiin sekä virtaavan veden, roiskeveden, että vesisumun mukana. Kloridit tunkeutuvat vähitellen betoniin. Betonin sisällä kloridit

siirtyvät väkevyyserojen tasoittumisen kautta eli diffuusiolla (kuva10). Vaikka betoni pääsisi ajoittain kuivumaan, kloridit voivat silti tunkeutua sen pintaosan kapillaarihuokosiin kloridipitoisen veden mukana. (Salparanta & Kuosa 2008.)

Kloridien tunkeutumista betoniin voidaan estää moni keinoin. Vedessä olevista betonirakenteista voidaan valmistaa sellaisia, joiden kapillaarishuokoisuus on alhainen. Betoniin voidaan tehdä veden imeytymistä estävä pinnoite tai voidaan käyttää kloridin tunkeutumista estävää impregnointia, jossa kapillaarihuokosten pinnat käsitellään kemiallisesti vettä hylkiviksi. Myös pintakerrosta tiivistävän valun yhteydessä käytettävän muottikankaan käyttö estää kloridien tunkeutumista. Muottikangas toimii eräänlaisena muotin salaojana, joka imee kapillaarisesti vettä betonin pinnasta ja näin pienentää pintakerroksen vesi-sementtisuhdetta. Ennen korjaustoimenpiteitä korkeasti kloridipitoinen betoni tulisi poistaa esimerkiksi vesipiikkaamalla. (Salparanta & Kuosa 2008.)

Kloridien tunkeutumiseen vaikuttaa suuresti betonin tiiveys ja tämän vuoksi suuri merkitys on erityisesti vesi-sideainesuhteella, joka vaikuttaa ensisijaisena muodostuvan kapillaarihuokosverkoston määrään ja yhtenäisyyteen. Betonin tiiveyteen voidaan vaikuttaa lisäämällä betoniin silikaa tai jotain muuta samalla periaatteella toimivaa materiaalia. Silika tekee sementtipastasta ja pasta-kiviainesrajapinnoista mahdollisimman tiiviitä. (Salparanta & Kuosa 2008; Suomen Betoniyhdistys 2004, 99.)



Kuva 10. Periaatekuva kloridien tunkeutumisesta betoniin (Salparanta & Kuosa 2008.)

#### 4.7 Muut rasitukset

Vaurioita syntyy rakenteisiin myös muiden ympäristön ja luonnon kuormien vuoksi. Näitä ovat esimerkiksi virtaava vesi, aallokko ja jäät. Satama-alueet pidetään talvisin lähestulkoon kokonaan jäältä auki, mutta silti siellä liikkuvat alukset työntävät jäälauttoja laiturerakenteita kohti aiheuttaen niihin suuria rasituksia. Alusten mukana tai niiden potkurivirtauksien voimasta liikkuvat jäälautat saattavat iskeytyä laiturin rakenteisiin, kuten paaluihin tai seinämiin. Jääkappaleiden törmäysnopeudet potkurivirtauksen suunnassa voivat olla noin 5 m/s. Kappaleiden massoista riippuen niiden aiheuttamat törmäysvoimat saattavat olla noin 200 - 500 kN. Ilman alusten apua jää ei satamissa pääse puristumaan suoraan rakenteita vasten. Aluksen ja laiturin väliin puristuvan jään aiheuttama vaakasuuntainen voima paaluihin on mitoitusohjeiden mukaan n. 0,2 - 0,5 MN. Jäiden vuoksi alukset saattavat aiheuttaa kuormia myös epäsuorasti muihin laituriin osiin. (RIL 123-1979, 242.)

### 5 KORJAUSMENETELMÄT

#### 5.1 Manttelointi

Mantteloinnilla voidaan suojata erittäin kustannustehokkaasti erilaisia vedessä olevia rakenteita ympäristön, aallokon ja jäiden aiheuttamilta rasituksilta. Manttelointi tulee kyseeseen silloin kun on riskinä, että rakenne menettää kantavuutensa joko materiaalin syöpmisen tai ulkoisten tekijöiden johdosta. Korjattavia rakenteita ovat yleensä laitureiden ja siltojen pahoin vaurioituneet paalut (kuva 11) tai maatuet sekä törmäyksestä vaurioituneet laiturimuurit.



Kuva 11. Vaurioitunut teräsbetonipaalu (Kotkan Satama 2012.)

Mantteloimalla voidaan korjata myös puupaaluja tai vanhoja silta-arkkuja. Siltojen hirsiarokujen yleisin korjausmenetelmä on uuden rakennetyypin asentaminen vanhan päälle. Silloin vanha rakenne jää osaksi uutta rakennetta tai kokonaan uuden rakenteen sisään.

Mantteli eli suojaholkki voi olla valmistettu eri materiaaleista, kuten teräksestä, lasikuidusta tai muovista tehty suoja, mikä asennetaan korjattavan rakenteen ympärille. Vanhan rakenteen ja manttelin välinen tyhjä osa täytetään betonilla tai juotosbetonilla niin, että sen läpimitta kasvaa alkuperäiseen verrattuna hieman suuremmaksi. Kaikissa tapauksissa holkkia ei jätetä suojaamaan rakennetta, vaan se toimii vain muottina uudelle valulle. Manttelointi voidaan tehdä teräsbetoni- tai teräsputkipaalulle jo asennusvaiheessa, mikä lisää rakenteen elinikää huomattavasti. Vaativimmat olosuhteet ovat veden vaihtelualueella, minne manttelointia yleensä tarvitaan.

## 5.2 Betonimantteli

Betonimantteloinnissa (kuva 12) suojaavaa holkkia ei jätetä paalun ympärille vaan suojaavana rakenteena toimii uusi betonivalu. Betonimantteli ottaa vastaan kaikki paaluun kohdistuvat rasitukset, joten sen täytyy olla ominaisuuksiltaan kestävä ja käyttökohteeseen soveltuva. Muottimateriaalina käytetään yleensä lasikuitua. Muotin täytyy olla sen verran kestävä, ettei se muuta muotoaan tuoreesta betonimassasta aiheutuvan valupaineen takia.



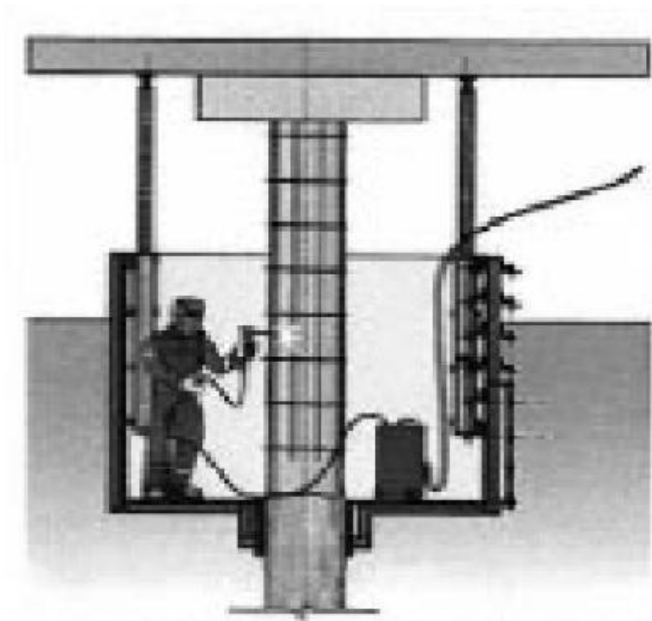
Kuva 12. Betonimantteloinnilla korjattu (Helsingin Satama 2012.)

## 5.3 Teräsmantteli ja sen valmistustapa

Teräsmantteli on järeä, kovaa kulutusta kestävä ja kaikenlaisiin muotoihin muotoiltavissa oleva suojaholkki. Mantteli asennetaan betoni- tai teräspaalujen yläosaan, laiturinkannesta noin kaksi metriä vesirajan alapuolelle. Manttelointi ainoastaan suojaa varsinaista paalurakennetta lisäkorroosiolta, se ei lisää sen kantavuutta. Päivittäin koivaan rasitukseen tai vaativiin olosuhteisiin joutuvissa kohteissa suojaholkin materiaa-

lina käytetään usein haponkestävää terästä, muuten se on yleensä S355 terästä. (Mustamaa 2012.)

Korjaustöissä ensimmäiseksi vaurioituneesta paalusta poistetaan irtonainen betoni suihkupuhdistuksella ja mahdolliset näkyvillä olevat teräkset puhdistetaan. Puhdistus tapahtuu painepesemällä tai harjaamalla. Paalujen ja muiden veteen kosketuksissa olevien korjauskohteiden manttelointi pyritään toteuttamaan, mikäli mahdollista, kuivatyönä. Silloin korjaustyöt on tehtävä joko työpadon suojuissa tai käyttöön on otettava erilliset siirrettävät ”kammiorakenteet”. (Kuva13.) Korjaukset voidaan kuitenkin tehdä myös veden alla sukeltajatyönä. (RIL 236-2006, 154–158.)

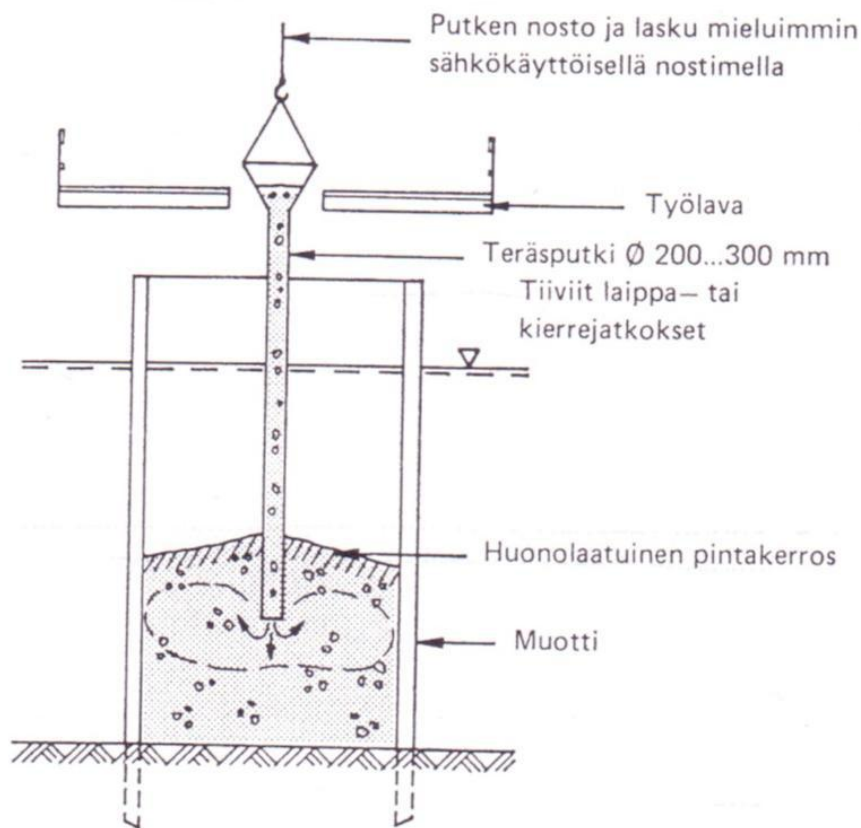


Kuva 13. Kammiorakenne (RIL 236-2006, 243.)

Vanhan vesirajasta vaurioituneen paalun ympärille asennetaan kaksiosainen pyöreä teräsmanttel eli teräsholkki. Paksuudeltaan mantteli on yleensä 10mm. Konepajalla tarkasti mitatut manttelin osat pultataan toisiinsa kiinni yläosasta ja tiivistetään hitsaamalla. Yhtenäinen teräsholkki pultataan kiinni vanhaan laiturirakenteeseen, ettei se valahda missään vaiheessa pois paikaltaan. (Kuva 17). Paalun ja suojaholkin pohjalevyyn välinen sauma tiivistetään kumisella matolla ja hitsaamalla, jonka jälkeen holkki on valmis täytettäväksi. Holkki on saatava täydellisen tiiviiksi, ettei sen sisällä tuleva juotosbetoni valu pois tai ettei manttelin sisälle pääse vettä, mikä nopeuttaisi betonin karbonatisoitumista ja terästen korroosiota. (Mustamaa 2012.)

Teräsmantteli toimii samalla muottina uudelle juotosvalulle. Valuna voidaan käyttää esimerkiksi vetonit K45 silkobetonia tai vaativimmissa olosuhteissa vieläkin kestävämpää juotosbetonia 1000/3 (K80). Tuotteet on suunniteltu erityisesti vesi- ja sata-  
marakenteisiin, missä on korkea kosteus-, pakkas-, ja suolarasitus. (RIL 236-2006, 247.)

Vedenalainen valu suoritetaan niin sanotulla contractorvaluna (kuva 14), jossa laasti tai betoni siirretään kohteeseen teräksisen valuputken avulla. Putken alapää pidetään koko ajan noin 0,5–1,0 metriä betonipinnan alapuolella, jolloin tuore betoni valetaan aikaisemmin valetun betonin sisään. Silloin veden haittavaikutukset kohdistuvat vain betonin pintakerrokseen.



Kuva 14. Contractor valun periaate (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 530.)

Toisin kuin kuvassa 14 paalujen korjauksessa suoritettava valu tehdään yleensä manttelin alaosassa olevasta täyttöaukosta. Ylöspäin kasvava uusi betonimassa työntää holkin sisällä olevan veden ja huonolaatuisen betonin pois laiturin kannen ja holkin välistä. Täyttöaukko voi sijaita myös manttelin yläosassa (kuva 17), jolloin betonilet-

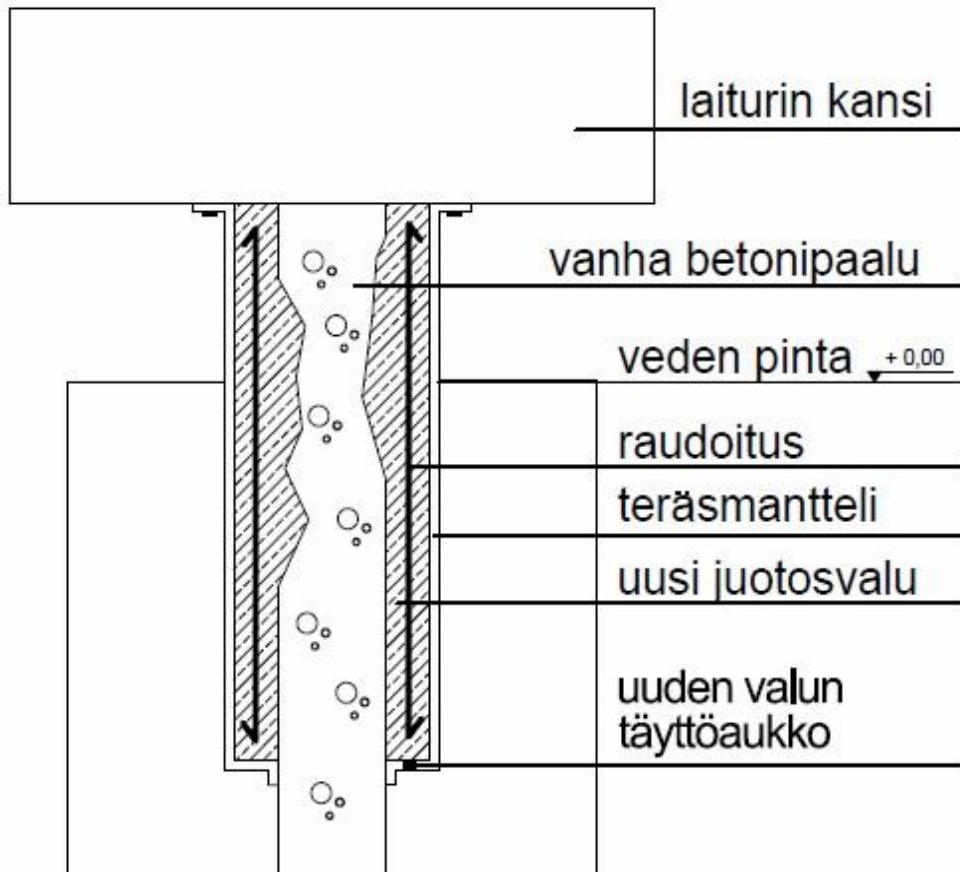


ku pudotetaan manttelin alaosaan ja myös silloin täyttö tapahtuu alhaalta ylöspäin. (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 529–531.)

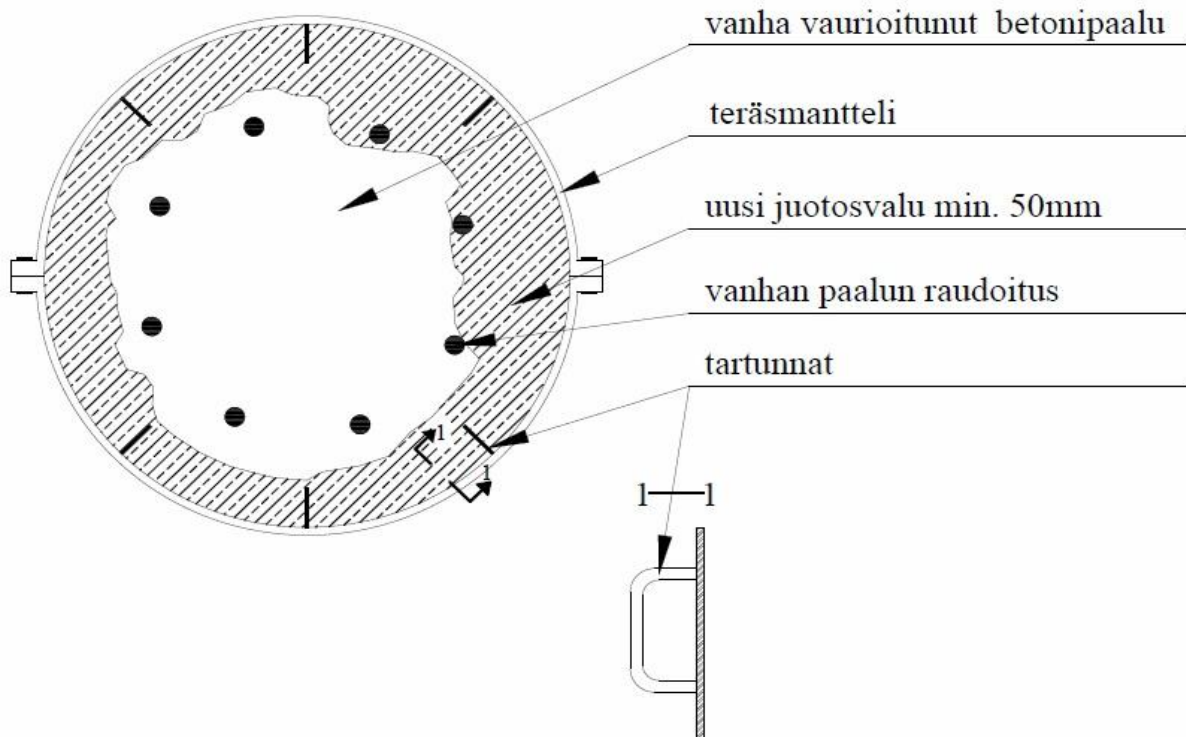
Vedenalaisia valuja ei saa tiivistää täryttämällä, koska se muuttaa betonin ominaisuuksia vahingollisesti. Tärytin puhkaisee suojaavan betonikerroksen ja sekoittaa betoniin ylimääräistä vettä. Tämän takia valun täytyy olla tarpeeksi juoksevaa, jotta kaikki mahdolliset aukot saataisiin täytettyä. Jos valu jähmettyy liian nopeasti, manttelin sisälle jää helposti suuria haitallisia aukkoja. Paksuudeltaan veden alle valetun uuden betonirakenteen olisi hyvä olla vähintään 50 mm. (Mustamaa 2012.)

Perinteisesti contractorvalussa betonin virtaus perustuu painovoiman vaikutukseen, mutta betonointi voidaan tehdä myös pumppaamalla (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 529). Ennen valua täytettävä aukko voidaan raudoittaa, mutta se ei ole välttämätöntä. Raudoituksena voidaan käyttää esimerkiksi  $\varnothing 20$  A500HW harjaterästankoja.

Monissa tapauksissa teräsmantteli jätetään paalun ympärille suojaamaan sitä kulumiselta. Ilman terässuojaa jäiden aiheuttama raskuus ja muut betonia vaurioittavat tekijät rikkoisivat korjatun betonipaalun käyttökelpottomaksi huomattavasti nopeammin. Useimmissa tapauksissa manttelin sisäpintaan on sen valmistusvaiheessa hitsattu kiinni tartuntaraudat, jotka varmistavat sen ettei teräsholkkia saa irrotettua valun jähmettymisen jälkeen. (Mustamaa 2012.)



Kuva 15. Periaatekuva mantteloinnista (Koskelainen 2012.)



Kuva 16. Periaatekuva mantteloinnista ylhäältä päin kuvattuna (Koskelainen 2012.)



Kuva 17. Valmis teräsmantteli (Kotkan Satama 2012.)

Joissakin korjausrakentamiskohteissa laiturin etureunaan voidaan rakentaa teräspontti-seinä tai niin sanottu kombiseinä, joka muodostuu paaluista ja ponteista. Tällöin ponttiseinä toimii virtaussuojana sen takana oleville paaluille, joten ne eivät välttämättä enää tarvitse teräsholkkia ympärilleen lisäsuojaksi. Paalut ovat suojassa kovilta virtauksilta eivätkä satamaan saapuvat alukset pääse puristamaan jäitä paaluja vasten. Tässä tapauksessa paalujen ympärillä oleva vesi vain jäätyy, mutta ei hankaa paaluja eikä siten myöskään vaurioita niitä.

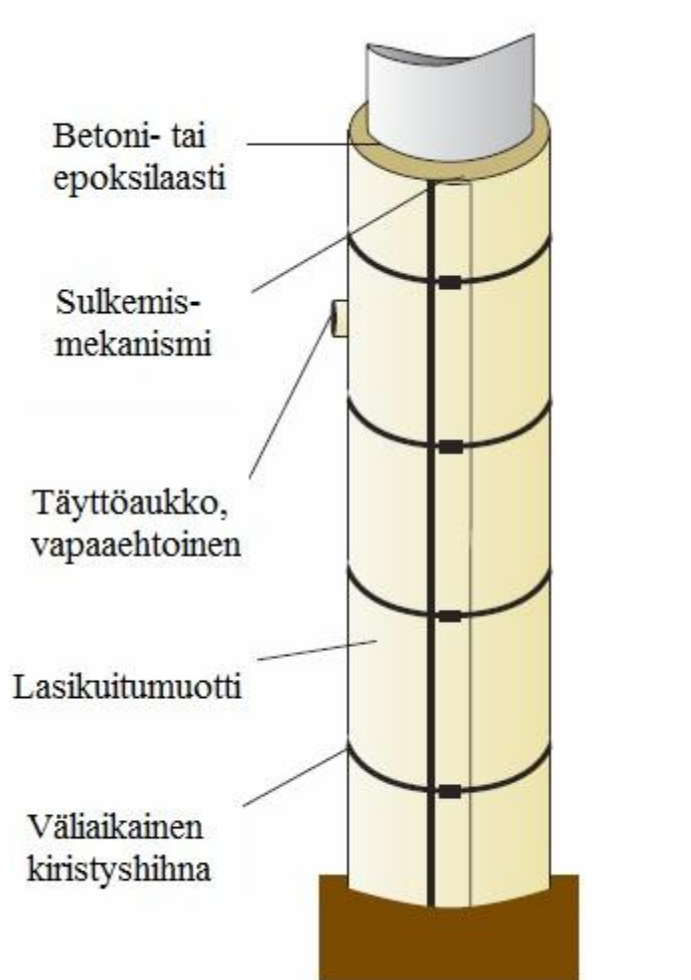
Usein paalujen vauriot ovat niin suuria, että uuden korvaavan paalun asentaminen olisi huomattavasti parempi ja halvempi vaihtoehto. Sitä ei kuitenkaan voida aina suorittaa, koska paalutus on yleensä tehty niin tiheään, ettei uutta paalua saada voi kohteeseen lyödä tai asentaa (Kuva 18). Jos korjaus on välttämätön laiturin kantavuudelle, täytyy koko paalu korjata, mikä nostaa korjauskustannuksia huomattavasti. (Jokimies 2012.)



Kuva 18. Tiheään asennetut paalut (Kotkan Satama 2012.)

#### 5.4 Lasikuitumuotti

Hyvin suolaisissa, makeissa ja murtovesissä kestävä lasikuitu soveltuu erinomaisesti pienten betoni- tai puupaalujen korjaamiseen, mutta sitä voidaan käyttää myös suurten teräsbetonipaalujen korjaamisessa. Muotteja on erimuotoisia, pyöreästä muotista kuu-sikulmaiseen muottiin. Perusidea on sama kuin teräsmanttelissa. Lasikuitumuottia ei kuitenkaan yleensä pultata kiinni, vaan se kiristetään pannoilla haluttuun muotoon (kuva 19). Puupaalujen mantteloinnissa juotosvalun sijasta aukko täytetään yleensä epoksimassalla, sillä se kiinnittyy hyvin puuhun ja sillä on hyvä kosteuden kesto. Jos täytettävä aukko on suuri, täyttömässana voidaan käyttää myös juotosvalua. (Fox Industries 2012; Denso 2012a.)



Kuva 19. Periaatekuva lasikuitumuotista (Denso 2012a.)

Lasikuitumuotin ja vanhan paalun väliin voidaan laittaa pienet keskittäjät pitämään muotti oikeassa asennossa (kuva 20). Massan jähmetyttyä, pelkillä pannoilla kiristetty lasikuitumuotti yleensä poistetaan. Ennen valua paalun pinta käsitellään erilaisilla korroosionestoaineilla.





Kuva 20. Lasikuitumuotin avulla korjattu teräsbetonipaalu (Denso 2012d.)

Alueilla missä talvet ovat leutoja, eikä paaluihin kohdistu jäiden aiheuttamaa räsitusta lasikuitua käytetään paljon mantteloinnissa. Kevyen painonsa ansiosta lasikuitumuotit on helppo asentaa hankalissa paikoissa oleviin paaluihin tai pilareihin (kuva 21). Lasikuidun korroosionkestävyys on hyvä, sen asentaminen on nopeaa ja materiaalina lasikuitu on edullista. Se on myös ympäristöystävällistä eikä tarvitse huoltamista. (Fox Industries 2012.)



Kuva 21. Lasikuitumuotti (Fox Industries 2012.)

Suomen olosuhteissa lasikuidun pakkassuolakestävyyttä ei ole kuitenkaan selvitetty riittävästi, joten sen käyttö suojamanttelina on vielä vähäistä. Contesta Oy:n tekemässä suppeassa laboratoriotutkimuksessa tutkittiin lasi- ja hiilikuitutankojen muutamien ominaisuuksien muutosta pakkas-suolarasituksessa. Kokeissa todettiin, että suola- ja pakkassuolarasitus pienensivät sekä lasikuitu- että hiilikuitutankojen vetolujuutta merkittävästi, kun tangot eivät olleet betonin sisässä. Pakkassuolarasituksen vaikutukset pienenevät huomattavasti jos tangot suojattiin betonipeitteellä. Tarpeeksi tiivis betoni, joka estää kloridien tunkeutumisen betoniin suojaa lasi- ja hiilikuitutankojen lujuutta pakkas-suolarasituksessa. Klorideja hyvin läpipäästävä betoni taas ei pitkällä aikavälillä pysty suojaamaan tankoja tarpeeksi vetolujuuden pienentymiseltä. (Contesta Oy 2006.)

## 5.5 Voimalaasti

Voimalaasti on kehitetty Suomessa erityisesti vedenalaisten rakenteiden korjaamiseen. Se on sitkeää, koossapysyvää ja veteen liukenematonta sementintyyppistä massaa. Voimalaasti tarttuu erittäin voimakkaasti betoni- ja teräsrakenteisiin ja kestää hyvin pakkasta, joten se sopii paalujen korjaamiseen loistavasti. Voimalaastin emäksisyys,

pieni vedenläpäisevyys ja olematon karbonatisoituminen estävät teräksiä korroosiolta. Voimalaasti on niin sanottu SILKO-hyväksytty tuote, joten sitä voidaan käyttää myös siltojen korjaamiseen.

Idea paalujen korjaamisessa voimalaastilla on sama kuin betonimantteloinnissa. Laasti valetaan muotin avulla, mikä valun jähmettymisen jälkeen poistetaan. Pienemmissä paikkauksissa muottia ei välttämättä edes tarvita. (Powermortar 2012a; Powermortar 2012b.)



Kuva 22. Vaurioitunut paalu (Powermortar 2012c.)



Kuva 23. Voimalaastilla korjattu paalu (Powermortar 2012c.)

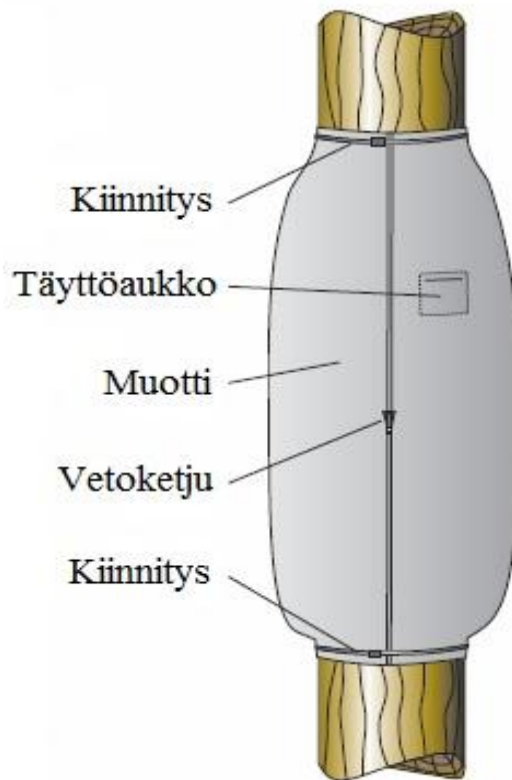


Voimalaastin kaltainen SILKO-hyväksytty tuote, sebera vesibetoni soveltuu myös erinomaisesti vesirakenteiden korjaamiseen. Se ei liukene veteen ja sitä voidaan käyttää ilman muottirakenteita. Seberan käytöllä on yli 10 vuoden kokemus eikä sillä korjattavia kohteita ole jouduttu uusimaan kertaakaan. (Sebera 2012.)

## 5.6 Pussimuotti

Muottina voidaan käyttää myös nailonista tehtyä vesitiivistä pussia. Menetelmä on helppo, nopea ja sen kustannukset ovat pieniä muottimateriaalin edullisuuden ja työvoiman vähäisyyden takia. Se soveltuu puu-, betoni- ja teräspaalujen korjaamiseen. (Denso 2012g)

Pussi kiristetään teräsvaijereilla ylä- ja alaosasta niin tiiviiksi, ettei betoni pääse valumaan pois. Ennen pussin asentamista on mahdollista laittaa raudoitus. Raudoitus kiinnitetään vanhaan paaluun, vain niin tiukasti ettei uusi valu pääse liikuttamaan sitä. Uuden valun aukko sijaitsee pussin yläosassa. Kun uusi betoni yltään täyttöaukkoon asti, aukko suljetaan tiiviiksi ja täyttöä jatketaan kunnes muotti on täysi. Täyttöputki poistetaan ja ylimääräinen betoni kerätään talteen. Betonin jähmetyttyä avataan kankaassa oleva vetoketju ja muotti poistetaan. Paalu on korjattu ja sen kantokyky on palautettu entiselleen. (Denso 2012g.)



Kuva 24. Periaatekuva pussimuotista (Denso 2012g.)

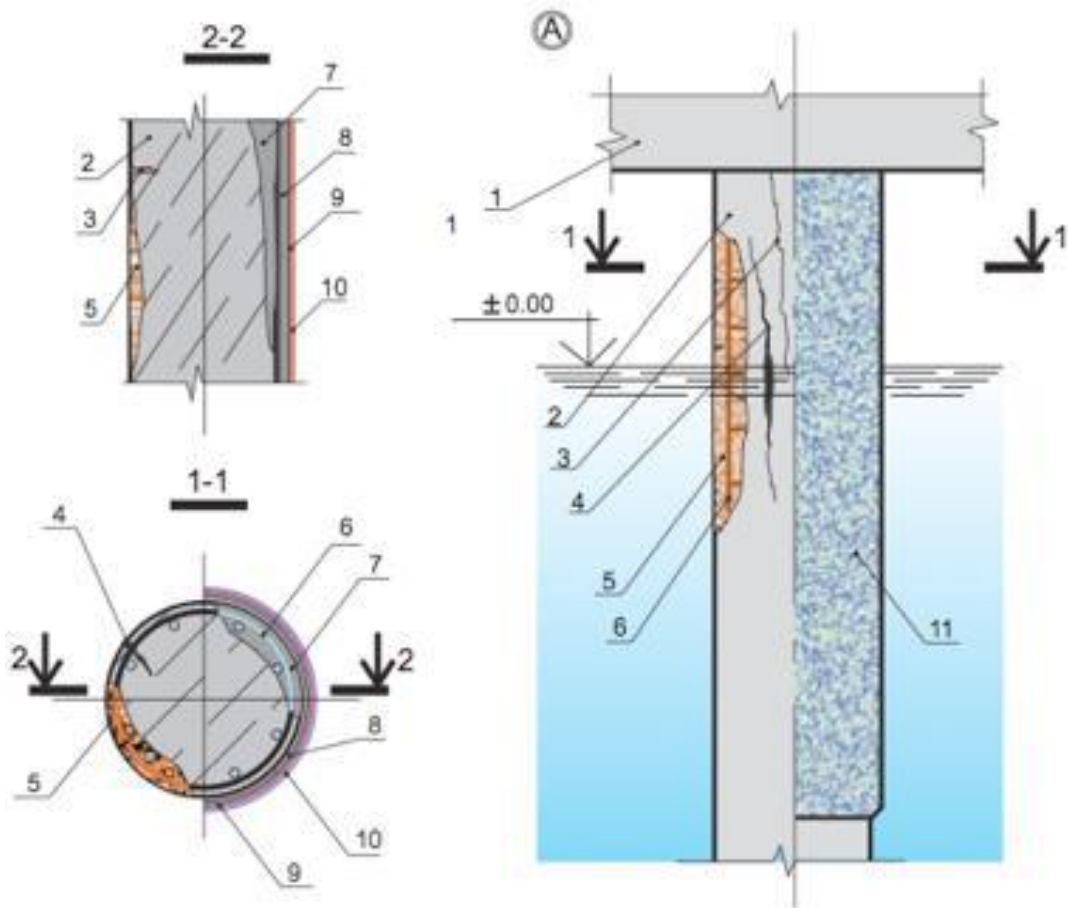
### 5.7 Hiilikuituvahvistus

Hiilikuituvahvistusta on käytetty siltojen ja laitureiden teräsbetonipaalujen korjauksessa. Etuna tässä menetelmässä ovat sen keveys ja hyvä korroosion- ja lämpötilankestä.

Vesitiiviin kammion avulla paalu voidaan joko mantteloida paikallaan tai ottaa kuiville. Paalu puhdistetaan epäpuhtauksilta korkeapainepesulla ja raudoitus käsitellään korroosionestoaineilla. Putsatun betonin kuopat paikataan ja lopuksi paalun ympärille asennetaan lasikuitu- tai hiilikuitumattoa vahvikkeeksi (kuva 25), joka suojataan auringon UV-säteilyltä vielä pinnoitteella. Nämä pintakerrokset lisätään jään kuluttavan vaikutuksen takia ja ne estävät myös pintabetonin irtoamista jäätyksen seurauksena. Paaluun ympäri kierrettävä hiilikuitumatto on riittävän vahva kestäämään mahdolliset betonipaikkausten jäätymisestä aiheutuvat halkaisuvoimat. (Saukkonen 2012.)



Kuva 25. Hiilikuitumaton levitys korjatun paalun ympärille (Helsingin satama 2012.)

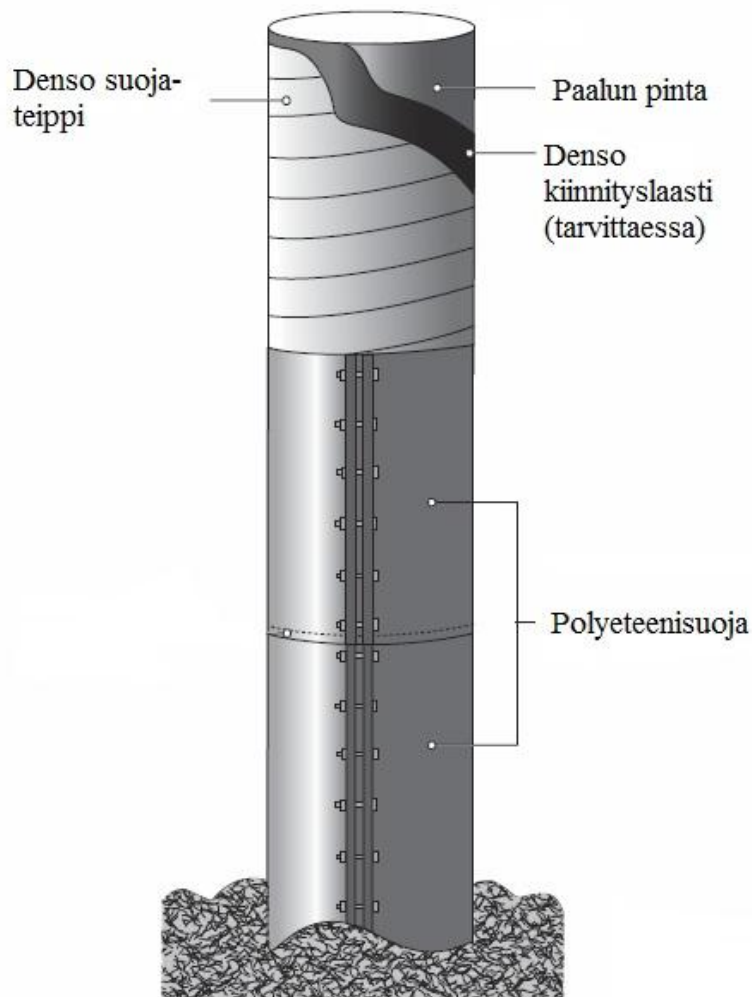


1 – teräsbetonilaatta; 2 – teräsbetonipaalu; 3 – hiushalkeama; 4 – kehittynyt halkeama; 5 – betonin suojakerroksen vaurio; 6 – korroosion vaurioittama paljastunut raudoitus; 7 – betonipaikkaus; 8 – hiilikuituvahvistus; 9 – tartuntapohjuste; 10 - suojapinnoite.

Kuva 26. Teräsbetonipaalujen korjauksen rakenne- ja tekninen ratkaisu (Ruotsalainen 2012.)

## 5.8 Muovimuotti

Denson muovinen muotti valmistetaan tiheästä polyeteenistä. Asennuksen ja toiminnan idea on lähes sama kuin teräsmanttelissa. Densolla on polyeteenin käytöstä korroosiosuojana yli 80 vuoden kokemus ja paaluja Denso on suojannut polyeteenillä jo yli 35 vuoden ajan. Polyeteeni kestää hyvin aggressiivisissa olosuhteissa ja sillä on erittäin hyvä vastustuskyky UV säteilyä vastaan. Se on todistettusti erittäin kestävä suoja, alueilla missä jäät eivät aiheuta rasitusta. (Denso 2012e; Denso 2012f.)



Kuva 27 Polyeteenillä suojattu paalu (Denso 2012e.)

Myös Suomessa esimerkiksi Helsingin sataman muutamissa kohteissa on korjattu paaluja polyeteeniputkesta tehdyllä muotilla.

## 6 KUNTOTUTKIMUSMENETELMÄT

### 6.1 Yleistä

Mitään korjaustoimenpidettä ei aloiteta, ennen kuin mahdolliselle korjauskohteelle on tehty kunnollinen ja asianmukainen kuntotarkastelu tai tutkimus. Satamarakenteita voidaan tarkastella joko yleis- tai erikoistarkastuksilla. Tarkastusten ajankohta määräytyy, jos sellainen on olennaista, kunnonhallintajärjestelmän mukaisesti yleensä määrävuositarkastuksena. Tarkastuksessa rakenteet voidaan moduloita eli jakaa osiin, joita tarkastellaan eri tavalla. (RIL 236-2006, 129.)

## 6.2 Silmämääräinen tarkastus

Silmämääräisellä tarkastuksella voidaan selvittää muun muassa betonin pinnan vaurioita, joita ovat esimerkiksi lohkeamat, irtoamassa olevat pintaosat tai raudoituksen korroosion aiheuttamat halkeamat (Liikennevirasto 2003, 20.)

Silmämääräiseen tarkasteluun perustuva yleistarkastus suoritetaan yleensä säännöllisesti noin 3-5 vuoden välein tai jos rakenteessa on havaittu vaurioita. Silloin tarkastus tehdään välittömästi vaurion havaitsemisen jälkeen tai muuna sopivana ajankohtana. (RIL 236-2006, 129–135.)

Vuositarkastuksissa suoritetaan myös silmämääräistä kuntotutkimusta. Tarkastus tehdään laiturirakenteen kannelta, maalta, veneestä tai sukeltajan avulla veden pinnan alapuolelta. Silmämääräisessä tarkastelussa havaitut vauriot kannattaa aina tallentaa ottamalla kohteesta paljon valokuvia tai videokuvaa. Ellei yleistarkastuksessa saada selville vaurion syytä tai vakavuutta, määritellään sillä saatujen tietojen perusteella, tarvitseeko rakenteelle suorittaa erikoistarkastuksia. Erikoistarkastuksissa usein vaadittava poranäyte rikkoo rakenteen, joten yleistarkastukset on syytä suorittaa huolella. (RIL 236-2006, 129–135.)

Betonia tarkasteltaessa silmämääräisesti riskinä on, että rakenteen vaurioituminen huomataan yleensä vasta sinä vaiheessa, kun vaurioaste on edennyt niin pitkälle, etteivät pelkät ennalta ehkäisevät suojaustoimenpiteet enää riitä. Suomen vesistöt ovat pääsäännöllisesti erittäin sameita, mikä vaikeuttaa veden alla tehtävää silmämääräistä kuntotarkastusta. Jos kohteesta otetaan valokuvia tai videoita täytyy käytössä olla tarpeeksi kirkas valaistus tai tarkastus on ajoitettava ajankohtaan, jolloin vesi ei ole liian sameaa esimerkiksi levän tai vesisateen takia. (RIL 236-2006, 136.)

Veden alaisia rakenteita on mahdollista tutkia kauko-ohjattavan Hercules (ROV) avulla. Sukellusrobotin kamerat tallentavat reaaliaikaista kuvaa, mikä voidaan siirtää saman tien tietoja tarvitseville ihmisille. (NOAA 2012.)

## 6.3 Erikoistarkastus

Erikoistarkastus tehdään silloin, kun tutkittavasta kohteesta tarvitaan tietoja, mitkä koskevat muun muassa ainepaksuutta, karbonatisoitumista, kloridien määrää, pakkas-

rapautumista, lujuutta, halkeamia, siirtymiä, painumia tai rakenteiden syöpymää ja kulumaa. Joitain tutkimuksia voidaan yrittää tehdä ainetta rikkomattomalla tavalla, mutta yleensä betonirakenteista joudutaan ottamaan poranäytteitä. Erikoistarkastukset kannattaa valmistella huolella, koska ne vaativat usein tutkimusmenetelmiä tai -laitteita, jotka nostavat tarkastusten kustannuksia. (TVH 1986, 35; RIL 236-2006, 134.)

#### 6.4 Poranäyte

Poranäytteessä tutkittavasta kohteesta porataan timanttiporalla koekappale, joka tutkitaan laboratoriossa. Koekappaleesta on mahdollista tutkia muun muassa puristuslujuus, vetolujuus, karbonatisoituminen ja pakkasenkestävyys. Kloridipitoisuus tutkitaan betonista poraamalla saadusta porajauheesta. (Liikennevirasto 2004.)

#### 6.5 Ohuthietutkimus

Ohuthietutkimuksella voidaan kunto- ja vauriotutkimusten lisäksi edesauttaa varsin laajasti muun muassa betonin tutkimus- ja kehitystyötä. Laiturin teräsbetonipaalusta otetun koepalan ohuthietutkimuksella voidaan selvittää muun muassa betonin tarkka karbonatisoitumissyvyys, betonin huokosrakenne, huokosten ja mikrosäröjen haitalliset kiteytymät, mikrosäröily ja -halkeilu ja pakkasrapautuneisuus. Pakkasrapautumisen ja halkeilun vaikutus saadaan selville myös vetokokeella. Pakkasvaurion aste voidaan päätellä mitatun vetolujuuden ja murtumispinnan perusteella. Vetokoe ei kuitenkaan ole yhtä tarkka kuin ohuthietutkimus. Veto- ja puristuskokeesta saatuja tietoja analysoidessa olisi hyvä tietää rakenteen suunnittelulujuus, mihin uusia tuloksia voitaisiin verrata. (Contesta Oy 2012; Huura Oy 2012.)

#### 6.6 Betonipeitemittari

Betonipeitemittarilla mitataan raudoitteita suojaavan betonipeitteen paksuus. Lisäksi voidaan selvittää raudoitusten sijainti jos ne ovat alle 100 mm:n syvyydessä. Mittaus voidaan tehdä hajottamatta betonirakennetta. (Liikennevirasto 2004.)

#### 6.7 Kimmovasara

Kimmovasaralla voidaan mitata betonin puristuslujuus hajottamatta sen pintaa. Menetelmää ei voida käyttää jos puristuslujuus ylittää arvon 45 MPa tai jos betonin pinta on

jäässä. Jotta mittaukset olisivat luotettavia, täytyy kimmovasara kalibroida. Kalibrointi kannattaa tehdä oikein liikenneviraston (2006) laatiman käyttöohjeen mukaisesti. Pelkästään valmistajan kalibrointiohjetta käyttämällä saadaan oikeiksi vain suurimmat kimmovasaralukemat. Pienet lukemat ovat silloin usein virheellisiä. (Liikennevirasto 2006.)

Kimmovasarasta on kehitetty myös veden alla toimiva versio. Pinnan alapuolella olevasta vedestä kyllästyneestä betonipinnan lujuudesta saadaan yleensä noin 5 pistettä pienempi kuin samasta betonista kuivana, joten mittaukset täytyy tehdä aina veden ylä- ja alapuolelta.

## 6.8 Ultraäänimittaus

Ultraäänellä voidaan mitata teräsmanttelin ainepaksuus ja mahdolliset säröt ja onkalot. Sitä pystytään käyttämään sekä vedenpinnan yläpuolella että alapuolella.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vaikka mantteloinnilla voidaan korjata paaluja nopeasti ja melko kustannustehokkaasti siinä on paljon myös ongelmakohtia. Kehitettävää on sekä materiaaleissa, rakennusratkaisuissa että työmenetelmissä.

Valettavan betonin suhteen täytyy olla erityisen huolellinen, varsinkin silloin kun se jätetään ilman suojausta. Esimerkiksi vähäinen huokostus lisää betonin pakkasenkestävyyttä, mutta Kymenlaakson ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion Mussalon satamasta tekemän laiturivaurioiden tutkimusraportin mukaan runsas huokostus, huokosten kasaumat ja huokosjonot kuitenkin edistävät meriveden suolojen imeytymistä syvemmälle betoniin, mikä lisää terästen paikallista korroosiovaaraa kloridien lisääntymisen ja epätasaisen karbonatisoitumisen kautta. Lisäksi mantteloinnissa käytettävän yli 100 mm paksuisen valun hydrataatiolämpö aiheuttaa rasituksia rakenteelle. Muissa tapauksissa, eli yleensä paalujen mantteloinnissa, missä 50 mm paksuinen valu on tarpeeksi paksu, hydrataatiolämpöä ei tarvitse huomioida. (Liikennevirasto 2011, 33.)

Suurten manttelien asentaminen liikennöidyissä satamissa voi olla varsin hankalaa ja hidasta työtä. Niiden kuljetukseen ja paikalle nostamiseen vaaditaan raskaampaa ka-



lustoa ja enemmän työvoimaa, verrattuna esimerkiksi kevyen lasikuitumanttelin käyttöön. Raskasta manttelia ei välttämättä tarvita, jos betonipinta on pinnoitettu hyvin. Kaikenlaisissa pinnoitteissa on silti vaarana niiden irtoaminen alle pääsevän veden jäätyessä. (Saukkonen 2012.)

Tutkimusmenetelmissä on runsaasti kehitystarpeita. Teräsmanttelin sisällä olevaa betonia ei voida tutkia hajottamatta teräsrakennetta. Betonista tarvitaan poranäyte, mikä tarkoittaa sitä, että suojaavaan teräsmantteliin joudutaan tekemään reikä. Myöskään ultraäänellä ei betonin vaurioita pystytä tutkimaan teräksen pistekorroosion (kuva 28) ja sen vaihtelevuuden vuoksi. Kovasti vaurioituneen teräksen tutkimisessa ultraäänilaitteen herkkyys ja pistekorroosio tekevät saadusta kuvasta epätarkan. Sekä laitetta liikuteltaessa, vain muutaman millin liike muuttaa näkymän täysin erilaiseksi kuin edellinen. Tämän takia yksi mittaus ei kerro mitään, vaan mittauksia joudutaan tekemään useampia, jotta saadaan arvio teräksen ainepaksuudesta. (Mustamaa 2012; Saukkonen 2012.)



Kuva 28. Erittäin pahasti pistemäisesti ruostunut teräsponttiseinä (Saukkonen 2012.)

Suomessa talvella esiintyvät jäät vaikuttavat paalujen suojausmenetelmien valintaan huomattavasti. Suojaus- tai korjausmenetelmän valinta on tapauskohtaista. Parhaan tai tarpeeksi riittävän suojaus- tai korjausmenetelmän valinta riippuu alueellisista olosuhteista. Kovaan rasitukseen joutuvilla alueilla tarvitaan runsasta suojausta, mikä voi toisessa kohteessa olla ylimitoitettu ja aiheuttaa turhia kustannuksia. Vähäinen suojaus taas riittää joihinkin kohteisiin, mutta voi olla toisessa alimitoitettu. Silloin paalu saatetaan joutua korjaamaan uudelleen esimerkiksi jo 5–10 vuoden jälkeen. Vähäistä suojaustakin vaativilla alueilla olisi etummainen paalurivi suojattava kunnolla, koska niihin kohdistuvat aina suurimmat, erityisesti jäiden aiheuttamat rasitukset.

Eri vauriotyypit aiheuttavat yhdessä tai erikseen betonirakenteiden turmeltumiseen. Osa haurastuttaa betonia, ja jatkossa jään törmäykset irrottavat irtonaisen betonin rakenteesta. Teräsrakenteiden korroosio nopeutuu, koska jäälautat vahingoittavat rakenteiden pintaosia irrottamalla ruostuneen pinnan, jonka alta paljastuu uutta puhdasta terästä. Kloridit taas vahingoittavat teräksiä jo ennen, kuin betoni on selvästi hajonnut..

Teräksisellä suojaholkilla voidaan parhaiten minimoida jäiden aiheuttamat ongelmat. Teräsmantteloinnin epäkohtina voidaan pitää sen suuria kustannuksia ja muihin manttelointitapoihin verrattuna vaikeampaa asennusta. Teräsmanttelin alapohjassa olevat hitsaussaumamat voivat huonosti tehtynä päästää lävitseen vettä, mikä on kuitenkin sen verran vähäistä, ettei ongelmia synny betoniin eikä varsinkaan betoniteräksiin. Betonin vaurioituminen teräsmanttelin sisällä ei myöskään ole muuten mahdollista ennen terässuojan lähes täydellistä läpiruostumista.

Vaikka jäät ovat suuri ongelma, voidaan monissa kohteissa käyttää lasikuitu- tai peltimuottia. Peltimuotti jätetään paikoilleen suojaamaan paalua, mutta lasikuitumuotti poistetaan yleensä valun jälkeen, mikä altistaa betonipaalun suoraan kaikille mahdollisille rasituksille. Valettava betoni on kuitenkin kestänyt jäiltä auki pidettävissä kohteissa normaaleissa olosuhteissa tarpeeksi hyvin, eikä rakenne tarvitse ruostumattomasta teräksestä tehtyä jääsuojaa ympärilleen.

Suomessa kehitetyillä vedenalaisilla korjaustuotteilla voidaan korjata paalurakenteita pienillä kustannuksilla, nopeasti ja joissain tilanteissa myös ilman muottia. Tuotteilla on korjattu veden vaihtelualueen rakenteita noin 10 vuoden ajan, eikä korjattuja rakenteita ole vielä jouduttu korjaamaan uudestaan. Pitkäikäiskokemukset vielä puuttuvat ja lopullinen kestävyys on vielä epäselvää.

Teräsrakenteissa ja teräsbetonirakenteissa voisi tutkimusmenetelmissä kehittää teräksen korroosion potentiaalimittausta käytännön tarpeita varten. Näistä olisi apua arvioitaessa teräksen korroosion tilaa korjausmenetelmän valintaa varten, näin selviäisi jatkuuko korroosio ja millä nopeudella. (Saukkonen 2012.) Muutenkin nykyiset tutkimusmenetelmät vaativat reilusti lisää kehittämistä. Vedenalaiset tutkimusmenetelmät eivät ole sillä tasolla, millä ne nykyhetkellä voisivat hyvinkin olla. Kehittämistarve koskee myös korjaustapoja. Korjausmenetelmiä tutkimalla voitaisiin löytää halvempia, kestävämpiä ja helpompia menetelmiä.

## LÄHTEET

Aalto-yliopisto 2010. Laiturien vaurioituminen, teräsbetonipaalulaituri. Saatavilla: [https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-43.3301/materiaali/Rak-43\\_3301\\_harj\\_3.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/rak-43.3301/materiaali/Rak-43_3301_harj_3.pdf) [viitattu 15.4.2012].

Betoniteollisuus ry 2012. Siltojen betonirakenteiden korjaaminen. Saatavilla: <http://www.betoni.com/download.aspx?intFileID=1320&intLinkedFromObjectID=7074> [viitattu 13.4.2012].

Böös, Joni 2010. Opinnäytetyö. Alusten aiheuttamat kuormitukset laiturirakenteisiin. Saatavilla: [https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/14145/Boos\\_Joni.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/14145/Boos_Joni.pdf?sequence=1) [viitattu 5.4.2012]

Contesta Oy 2006. Ei-metallisten tankojen pakkas-suolakestävyys. Saatavilla: [http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/ei\\_metallisten\\_tankojen\\_tutkimusselostus\\_20060.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/ei_metallisten_tankojen_tutkimusselostus_20060.pdf) [viitattu 11.4.2012].

Contesta Oy 2012. Ohuthietutkimus. Saatavilla: <http://www.contesta.fi/ohuthie.htm> [viitattu 19.4.2012]

Denso 2012a. Fiber-Form Pile jacket. Saatavilla: <http://www.densona.com/pdfs/DensoSeaShieldMarineSystems/Denso-SeaShield-Fiber-Form-Pile-Jacket-Full.pdf> [viitattu 20.4.2012]

Denso 2012b. Series 100. Saatavilla: <http://www.densona.com/pdfs/DensoSeaShieldMarineSystems/Denso-SeaShield-Series-100-Full.pdf> [viitattu 20.4.2012]

Denso 2012c. Series 400. Saatavilla: <http://www.densona.com/pdfs/DensoSeaShieldMarineSystems/Denso-SeaShield-Series-400-Full.pdf> [viitattu 20.4.2012]

Denso 2012d. Fiber-Form Pile Jacket, Series 500. Saatavilla:

<http://www.densona.com/pdfs/DensoSeaShieldMarineSystems/Denso-SeaShield-Series-500-Full.pdf> [viitattu 17.4.2012]

Denso 2012e. Series 2000FD. Saatavilla:

<http://www.densona.com/pdfs/DensoSeaShieldMarineSystems/Denso-SeaShield-Series-2000FD-Full.pdf> [viitattu 28.4.2012]

Denso 2012f. Series 2000HD. Saatavilla:

<http://www.densona.com/pdfs/DensoSeaShieldMarineSystems/Denso-SeaShield-Series-2000HD-Full.pdf> [viitattu 29.4.2012]

Denso 2012g. Fab-Form Pile Jacket. Saatavilla:

<http://www.densona.com/pdfs/DensoSeaShieldMarineSystems/Denso-SeaShield-Fab-Form-Pile-Jacket-Full.pdf> [viitattu 29.4.2012]

Fox Industries 2012. Presentation, underwater bridge repair techniques and products.

Saatavilla: [http://www.foxind.com/education/FX-70\\_TRB\\_Presentation.pdf](http://www.foxind.com/education/FX-70_TRB_Presentation.pdf) [viitattu 3.5.2012].

Hakulinen Matti 2003, Teräs pohja- ja maarakentamisessa Saatavilla:

[www.terasinfo.fi/julkaisut/mvr/mpr-oppik.pdf](http://www.terasinfo.fi/julkaisut/mvr/mpr-oppik.pdf) [viitattu 15.3.2012].

Huura Oy 2012. Saatavilla: [http://www.huura.fi/media/js\\_05.htm](http://www.huura.fi/media/js_05.htm) [viitattu 19.4.2012]

Jokimies, Teppo 2011. Tekninen johtaja, HaminaKotka Satama Oy. Haastattelu ja sähköpostiviestit

Koskelainen, Eemeli 2012. Kuvat

Kunnossapitoyhdistys ry 2004. Korroosiokäsikirja

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, rakennuslaboratorio. Lasse Kilpinen. tutkimusse-  
lostus 2005. Mussalon satama, laiturivauriot.

Liikennevirasto 2003. Siltapilareiden kuoret. Saatavilla:

<http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/siltapilari2003netti.pdf> [viitattu 25.4.2012].

Liikennevirasto 2004. Sillantarkastusohje. Saatavilla:

<http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/sillantarkastusohje2004.pdf> [viitattu 17.4.2012].

Liikennevirasto 2006. Kimmovasaran käyttäjän ohje. Saatavilla:

[http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/kimmovasaraohje\\_2006.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/kimmovasaraohje_2006.pdf) [viitattu 17.4.2012]

Liikennevirasto 2007. Sillan geotekniset suunnitteluperusteet. Saatavilla:

[http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100053-v-07sillan\\_geotekn\\_suunn.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100053-v-07sillan_geotekn_suunn.pdf) [viitattu 26.4.2012].

Liikennevirasto 2011. Betonisiltojen korjaussuunnitteluohje. Saatavilla:

[http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo\\_2011-17\\_betonisiltojen\\_korjaussuunnitteluohje\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2011-17_betonisiltojen_korjaussuunnitteluohje_web.pdf) [viitattu 5.4.2012].

Mapei Oy 2012. Betonin korjaus. Saatavilla: <http://goo.gl/Of0Tc> [viitattu 5.5.2012].

Mustamaa, Lasse 2011. Toimitusjohtaja, Insinööritoimisto Sukellus-Kotka Oy.  
Haastattelu ja sähköpostiviestit.

NOAA 2012. National Oceanic And Atmospheric Administration. Hercules (ROV) and Friends. Saatavilla:

<http://oceanexplorer.noaa.gov/technology/subs/hercules/welcome.html> [viitattu 5.5.2012].

Powermortar 2012a. Saatavilla:

[http://www.powermortar.fi/fi/data/files/voimalaasti\\_tekninen\\_erittely\\_fi\\_txt.pdf](http://www.powermortar.fi/fi/data/files/voimalaasti_tekninen_erittely_fi_txt.pdf) [viitattu 28.4.2012].

Powermortar 2012b. Saatavilla:

[http://www.powermortar.fi/fi/data/files/voimalaasti\\_medium.wmv](http://www.powermortar.fi/fi/data/files/voimalaasti_medium.wmv) [viitattu 28.4.2012].

Powermortar 2012c. Saatavilla:

<http://www.powermortar.fi/fi/index.php?action=showpage&pageid=9> [viitattu 28.4.2012]

RIL 236–2006. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry, 2006. Satamalaitureiden kunnonhallinta.

RIL 123–1979. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL Ry, 1979. Vesirakenteiden suunnittelu.

Ruotsalainen, Niina 2012. Opinnäytetyö. Vedenalaisten betonirakenteiden korjaus menetelmät ja käytettävät materiaalit. Saatavilla:

[https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/42473/Ruotsalainen\\_Niina.pdf?sequence=1](https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/42473/Ruotsalainen_Niina.pdf?sequence=1) [viitattu 22.5.2012]

Salparanta, Liisa & Kuosa, Hannele 2008. Kloridien tunkeutumisen pienentäminen betoniin. Saatavilla: <http://goo.gl/TJKZD> [viitattu 12.4.2012].

Sidos 2012. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Katsaus tekniikan ja liikenteen toimialan työelämäläheisyyteen. Saatavilla:

[http://www.kyamk.fi/folders/Files/Viestintapalvelut/Esitteit%C3%A4/Sidos2012\\_lowres.pdf](http://www.kyamk.fi/folders/Files/Viestintapalvelut/Esitteit%C3%A4/Sidos2012_lowres.pdf) [viitattu 8.4.2012]

Saukkonen, Veikko 2012. Jaospäällikkö, Helsingin satama. Sähköpostiviestit

Sebera 2012. Saatavilla:

[http://www.sebera.fi/doku.php?id=sebera#kulutusta\\_kestaevae](http://www.sebera.fi/doku.php?id=sebera#kulutusta_kestaevae) [viitattu 28.4.2012]

Siikanen Unto 2001. Rakennusaineoppi. Rakennustieto Oy. Helsinki

Suomen Betoniyhdistys ry 1996. BY 41 Betonirakenteiden korjausohjeet 1996.

Suomen Betoniyhdistys ry 2002. BY 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002.

Suomen Betoniyhdistys ry 2007. BY 201 Betonitekniikan oppikirja 2004.

Suomen Betoniyhdistys ry 2008. BY 201 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008.

TVH, Tie- ja vesirakennushallitus sillanrakennustoimisto 1986. Sillan tarkastusohje.

VTT 2000. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen, osa 2. Saatavilla:  
[www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2047.pdf](http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2047.pdf) [viitattu 15.4.2012].

VTT 2004. Rakennus- ja yhdystekniikka 2004. Teräsputkipaalujen korroosio. Saatavilla: <http://goo.gl/Gr43i> [viitattu 20.3.2012].

VTT 2008. Katodinen suojaus. Saatavilla:  
[http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/katodinen\\_suojaus\\_2008.pdf](http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/katodinen_suojaus_2008.pdf) [viitattu 27.4.2012].

Weijo, Inari & Mehto, Lauri 2009. Betoniparvekkeet suomalaisessa ilmastossa. Saatavilla <http://goo.gl/cwkVh> [viitattu 5.4.2012].



## KUVALUETTELO

Kuva 1. Paalulaiturin rakenne (Böös 2010, 18.)

Kuva 2. Lyöntipaalulaituri (RIL 236-2006, 181.)

Kuva 3. Puoliavoimen paalulaiturin rakenne (RIL 236-2006, 179.)

Kuva 4. Avoimen paalulaiturin rakenne (RIL 236-2006, 179.)

Kuva 5. Teräsponttiseinälaituri (RIL 236-2006, 180.)

Kuva 6. Teräsrakenteiden korroosiovarat (Hakulinen 2003.)

Kuva 7. Pakkasrapautumisen periaate (Weijo & Mehto 2009.)

Kuva 8. Betonin karbonatisoituminen (Mapei Oy 2012.)

Kuva 9. Korroosionopeus meriolosuhteissa (Hakulinen 2003.)

Kuva 10. Periaatekuva kloridien tunkeutumisesta betoniin (Salparanta & Kuosa 2008.)

Kuva 11. Vaurioitunut teräsbetonipaalu (Kotkan Satama 2012.)

Kuva 12. Betonimantteloinnilla korjattu (Helsingin Satama 2012.)

Kuva 13. Kammiorakenne (RIL 236-2006, 243.)

Kuva 14. Contractor valun periaate (Suomen Betoniyhdistys ry 2007, 530.)

Kuva 15. Periaatekuva mantteloinnista (Koskelainen 2012.)

Kuva 16. Periaatekuva mantteloinnista ylhäältä päin kuvattuna (Koskelainen 2012.)

Kuva 17. Valmis teräsmantteli (Kotkan Satama 2012.)

Kuva 18. Tiheään asennetut paalut (Kotkan Satama 2012.)

Kuva 19. Periaatekuva lasikuitumuotista (Denso 2012a.)

Kuva 20. Lasikuitumuotin avulla korjattu teräsbetonipaalu (Denso 2012d.)

Kuva 21. Lasikuitumuotti (Fox Industries 2012.)

Kuva 22. Vaurioitunut paalu (Powermortar 2012c.)

Kuva 23. Voimalaastilla korjattu paalu (Powermortar 2012c.)

Kuva 24. Periaatekuva pussimuotista (Denso 2012g.)

Kuva 25. Hiilikuitumaton levitys korjatun paalun ympärille (Helsingin satama 2012.)

Kuva 26. Teräsbetonipaalujen korjauksen rakenne- ja tekninen ratkaisu (Ruotsalainen 2012.)

Kuva 27 Polyeteenillä suojattu paalu (Denso 2012e.)

Kuva 28. Erittäin pahasti pistemäisesti ruostunut teräsponttiseinä (Saukkonen 2012.)