

Eetu Moilanen

# Lujitemuovisäiliöiden ja -putkistojen kunnonvalvonta Terrafamen metallitehtaalla



Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Kevät 2020



**KAMK • University  
of Applied Sciences**

## Tiivistelmä

**Tekijä(t):** Eetu Moilanen

**Työn nimi:** Lujitemuovisäiliöiden ja -putkistojen kunnonvalvonta Terrafamen metallitehtaalla

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), kone- ja tuotantotekniikka

**Asiasanat:** lujitemuovi, kunnonvalvonta, Terrafame, säiliöt, putkisto, NDT-menetelmät

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kartoittaa ja testata erilaisia ainetta rikkomattomia menetelmiä eli NDT-menetelmiä ja niiden soveltuvuutta lujitemuovisäiliöiden ja putkistojen kunnonvalvontaan Terrafamen metallitehtaalla. Työssä on kuvattu Terrafamen tuotantoprosessit ja näistä tärkeimpänä metallitehtaan tuotantoprosessi. Pääosa työn teoriaosuudesta käsittelee lujitemuovin valmistusta, vikaantumista sekä erilaisia kunnonvalvontamenetelmiä. Työn teoriaosuudessa on esitelty myös erilaisia lainsäädännöllisiä seikkoja, jotka kemikaaliputkistojen kunnonvalvonnassa tulee ottaa huomioon. Toiminnallisessa osassa opinnäytetyötä on testattu eri NDT-menetelmiä vaihtelevissa olosuhteissa sekä käsitelty näistä saatuja tuloksia.

Materiaalina lujitemuovi poikkeaa paljon teräksistä ja valettavista muoveista. Lisäksi lujitemuovien ominaisuudet poikkeavat toisistaan kohtalaisen paljon myös sen mukaan, mitä materiaaleja muovimatriisina tai lujitteena on käytetty ja millä valmistusmenetelmällä kappale on luotu. Esimerkiksi kuitukelatuissa rakenteissa lujuusominaisuudet ovat käsin- tai ruiskulaminoituja tuotteita paremmat johtuen suuremmasta lujitepitoisuudesta. Hiilikuitulujitettujen tuotteiden ominaisuuksiin taas kuuluu tyypillisesti keveys ja erinomaiset lujuus- ja jäykkyysominaisuudet. Pääosin työssä käsiteltävänä lujitemuovina on kuitenkin lasikuitulujitettu muovi, jonka matriisina toimii vinyyliesteripohjainen hartsi.

Kemikaaliputkistojen kunnonvalvontaan liittyy lainsäädännössä tiettyjä ohjeita ja määräyksiä. Kemikaaliputkistoja koskeva lainsäädäntö määrää toiminnanharjoittajan muun muassa laatimaan kunnonvalvontasuunnitelman ja tarkastavan kemikaaliputkistot kyseisen suunnitelman mukaisesti. Osa metallien talteenoton alueella sijaitsevista lujitemuovisäiliöistä ja putkistoista on räjähdysvaarallisissa eli Ex-luokitelluissa tiloissa ja osa NDT-menetelmistä perustuu säteilyyn, ultraääneen tai aiheuttavat muutoin syttymislähteen, joten opinnäytetyössä käytiin lyhyesti läpi myös ATEX-lainsäädäntöä eli Ex-luokiteltujen tilojen ja laitteiden lainsäädäntöä.

Yksi teoriaosuuden keskeisimmistä osista oli kartoittaa eri NDT-menetelmiä ja näiden soveltuvuutta lujitemuoville. Vaikka lujitemuovin kunnonvalvontaan käytettävät NDT-menetelmät ovat perusperiaatteiltaan samoja kuin esimerkiksi teräksille käytettävät menetelmät, täytyy mittalaitteiston, mittausparametrien sekä mittausohjeiden olla tarkoitettu juuri lujitemuoville materiaalin huomattavasti erilaisten ominaisuuksien vuoksi.

Toiminnallisessa osassa opinnäytetyötä valittiin neljä erilaista tarkasteltavaa kohdetta. Testikohteista kaksi sijoittuu aitoon prosessiympäristöön ja kaksi on eri menetelmien testausta varten luotuja kappaleita. Testeillä pyrittiin tuomaan esiin, kuinka tarkasti esimerkiksi seinämän vahvuutta tai rakenteen poikkeamia eri NDT-menetelmillä voidaan mitata. Ultraäänellä voidaan päästä seinämänvahvuuden mittauksissa tarkkoihin tuloksiin, mikäli laminaatin sisässä ei ole suuria poikkeamia. Barcol-kovuusmittaukset antavat hyvän kuvan laminaatin pehmenemisestä. Digitaaliradiografialla voidaan havaita laminaatin suuntaiset poikkeamat tarkasti, mikäli röntgenin keila on suunnattu vaurion suuntaisesti. Lämpökuvaus osoittaa isommat poikkeamat, mikäli kuvaolosuhteet saadaan tasattua.

## **Abstract**

**Author(s):** Eetu Moilanen

**Title of the Publication:** Condition Monitoring of Fiberglass Reinforced Pipelines and Tanks in Metals Production at Terrafame

**Degree Title:** Engineering, Mechanical Engineering

**Keywords:** fiber reinforced plastic, condition monitoring, Terrafame, tanks, pipelines, NDT-methods

The aim of this thesis was to chart and test different sort of nondestructive testing methods, i.e. NDT-methods and their suitability for condition monitoring of fiber reinforced tanks and pipelines in metals production plant at Terrafame. The thesis includes a brief overview of Terrafame's production processes, particularly the process of metals production. The theoretical part deals mainly with manufacturing, material failure and different kind of condition monitoring methods of reinforced plastics. The theoretical part also reviews some legislation issues which should be considered in the condition monitoring of chemical pipelines. The functional part of the thesis deals with the testing of different sorts of NDT-methods in variable circumstances and the results of those tests.

As a material, fiber reinforced plastic differs a lot from steels and molded plastics. In addition, the properties of fiber reinforced plastics vary quite lot depending on which materials has been used as a resin or reinforcement and which manufacturing method has been used. For example, in filament wound structures the tensile properties are better than structures which are made by hand or spray lay-up methods. Properties of carbon fiber reinforced products typically include lightness and superior tensile and stiffness properties. The material discussed in this thesis, however, is mainly fiberglass reinforced plastic wherein the matrix is a vinyl ester based resin.

The legislation concerning chemical pipelines condition monitoring includes certain instructions and regulations. The chemical pipelines legislation requires the operator to draw up a condition monitoring plan and inspect the chemical pipelines according to that plan. Some of the FRP pipelines and tanks in the metals production are located in Ex-classified, i.e. explosion hazardous classified, premises and some of the NDT-methods are based on radiation, ultrasonic, or could otherwise cause a source of ignition, so the thesis also briefly reviewed the ATEX-legislation, i.e. legislation of Ex-classified premises and devices .

The thesis deals with the basic principles of NDT-methods in general. One of the main sections of the thesis was to chart different sort of NDT-methods and their suitability for fiber reinforced plastic. Even though the NDT-methods for the inspection of fiber reinforced plastics are functionally the same as the methods used for steels, the measuring equipment, measuring parameters and instructions need to be precisely directed for fiber reinforced plastic due to the significantly different properties of the material.

For the functional section of the thesis four different test subjects were chosen. Two of these test subjects are in a genuine process environment and the rest two are specially made objects for the testing of different sort of NDT-methods. The aim of the tests was to indicate how accurately, for example, the wall thickness or deviations in the structure could be measured by different sort of NDT-methods. With ultrasonic measurements very accurate results can be achieved, if there are no major deviations inside the laminate. Barcol hardness measurements give a good view of the deterioration of the laminate. With digital radiography it is possible to detect accurately the deviations parallel to laminate, if the X-ray beam is directed parallel to the deviation. The thermal imaging detects major deviations, if the shooting conditions can be made stable.

## **Alkusanat**

Opinnäytetyö tehtiin Terrafame Oy:n metallien talteenoton kunnossapidon tarpeisiin. Opinnäytetyön yhteyshenkilönä ja ohjaajana Terrafamella toimi kunnossapitoinsinööri Tuomo Tornberg. Lisäksi työn suorittamiseen sain tukea ohjauksen muodossa metallien talteenoton kunnossapidon työnsuunnittelijana toimineelta Kaisa Kumpulaiselta. Kajaanin ammattikorkeakoulun ohjaavana opettajana toimi Sanna Leinonen.

Haluan kiittää osastopäällikkö Sampo Jauhiaista ja kunnossapitoinsinööri Joni Seilosta kiinnostavasta ja haastavasta opinnäytetyön aiheesta ja mahdollisuudesta suorittaa opinnäytetyö Terrafame Oy:ssä. Lisäksi haluan kiittää opinnäytetyöni ohjaajina toimineita Tuomo Tornbergiä, Kaisa Kumpulaista ja Sanna Leinosta tuesta, jota heiltä opinnäytetyön aikana sain. Haluaisin myös kiittää erityisesti Sulmu Oy:n Timo Anderssonia, jolta sain apua lujitemuovien teknisiin ominaisuuksiin liittyvissä haasteissa. Kiitokset myös kaikille muille Terrafamen alueella ja sen ulkopuolella toimineille henkilöille, jotka auttoivat opinnäytetyön valmistumisessa.

Lopuksi haluaisin kiittää avopuolisoani, perhettäni ja ystäviäni tuesta opinnäytetyön suorittamisen aikana.

Kajaani 15.4.2020

Eetu Moilanen

## Sisällys

1	Johdanto .....	1
2	Terrafame Oy .....	2
2.1	Yleistä Terrafamesta .....	2
2.2	Terrafamen tuotantomenetelmät .....	2
2.2.1	Louhinta .....	3
2.2.2	Malmin käsittely .....	3
2.2.3	Biokasaliuotus .....	4
2.2.4	Metallien talteenotto .....	4
3	Muovikomposiitit .....	7
3.1	Kertamuovit .....	7
3.2	Kestomuovit .....	8
3.3	Lujitteet .....	9
3.4	Lujitemuovien valmistus .....	10
3.5	Lujitemuovirakenteiden vikaantuminen .....	15
4	Kunnossapito ja kunnonvalvonta .....	19
5	Lainsäädäntö .....	21
5.1	Kemikaaliputkistojen kunnonvalvontaan liittyvät säädökset .....	21
5.2	ATEX-lainsäädäntö .....	21
6	Lujitemuovien kunnonvalvonta .....	23
6.1	Visuaalinen tarkastus .....	25
6.2	Kovuusmittaus .....	25
6.3	Akustinen emissio .....	26
6.4	Ultraäänitarkastus .....	27
6.5	Teollinen radiografia .....	28
6.6	Lämpökuvaus .....	29
6.7	Jatkuva kunnonvalvonta .....	30
6.8	Kalvonpaksuusmittarit .....	31
7	Mitattavat kohteet .....	32
7.1	Rikkivedyn imeytysreaktori 1 .....	32
7.2	Pumpun paineyhde esineutraloinnin saostuksessa .....	35

7.3	Erillinen koepala 1 .....	35
7.4	Erillinen koepala 2 .....	42
8	Tulokset ja pohdinta .....	47
9	Yhteenveto .....	49
	Lähteet .....	51
	Liitteet	

## Symboliluettelo

ATEX	Atmosphères explosibles. Euroopan yhteisön laite- ja työolosuhde direktiivit räjähdysvaarallisille tiloille ja niissä käytettäville laitteille
Ex	Explosive. Räjähävä.
Flokkulantti	Kemikaali, joka tehostaa selkeytys- tai saostusprosessia edistämällä sakan hiutaloitumista
NDT-tarkastus	Nondestructive testing. Ainetta rikkomaton tarkastus.
p%	Painoprosentti, komponentin osuus massan kokonaismassasta.
PLS-liuos	Pregnant Leach Solutions eli bioliuotuksen tuoteluos
Raffinaatti	Metallien talteenoton palautusliuos
RFID	Radio Frequency Identification. Radiotaajuuteen perustuva tunnistusteknologia, jota on mahdollisuus lukea etänä.

## 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä on käsitelty lasikuitulujitetusta muovista valmistettujen säiliöiden ja putkistojen kunnonvalvontaa. Opinnäytetyössä pyritään tuomaan esiin erilaisia menetelmiä kyseisten lujitemuovirakenteiden kunnonvalvontaan liittyen sekä analysoimaan näiden menetelmien hyödynnettävyyttä erilaisissa kohteissa ja kohteiden eri elinkaaren vaiheissa. Näiden tietojen ja huoltohistorian perusteella voidaan tulevaisuudessa kehittää lujitemuovirakenteiden ennakkohuoltoja ja tätä kautta oppia arvioimaan eri kohteiden vikaantumista ja elinkaarta.

Lujitemuovirakenteiden kunnossapidon ymmärtäminen ja erilaisten kunnonvalvontamenetelmien tarkoituksenmukainen hyödyntäminen auttaa tuomaan ennustettavuutta kyseisten rakenteiden vikaantumiseen. Tätä kautta voidaan tulevaisuudessa luoda säästöjä isompien huoltointiestointien kohdalla ja suunnitelmallisuuden ansiosta pitää huoltoseisokkien pituus siedettävällä tasolla. Ennakoivan kunnossapidon onnistuminen myöskin lisää säiliöiden ja putkistojen käyttövarmuutta, minkä ansiosta voidaan välttää yllättävät tuotannonmenetykset ja työ- tai ympäristöturvallisuutta vaarantavat tekijät.

Toimeksianto tähän opinnäytetyöhön tuli Terrafame Oy:n metallien talteenoton organisaatiosta, jonka alueella erilaisten putkistojen ja säiliöiden kautta pumpataan vuosittain miljoonia kuutioita kemiallisesti kuormittavia tai mekaanisesti kuluttavia liuoksia. Suuri liuosten käsittelymäärä yhdistettynä kohtalaisen yksipuoliseen lujitemuovirakenteiden ennakoivaan kunnonvalvontaan aiheuttaa huolta kyseisten rakenteiden kunnosta ja erityisesti vikaantumisen ennustamisesta. Toimeksiantajan tavoitteena olisi saada käyttöönsä monipuolisemmin lujitemuovin kunnonvalvontaan soveltuvia menetelmiä, jolloin mitattavan datan määrä voisi lisääntyä ja kunnonvalvonnan tulosten subjektiivisuus pienentyä.

Keskustellessamme opinnäytetyön aiheesta Terrafamen kunnossapitopäällikön kanssa olimme molemmat sitä mieltä, että opinnäytetyön tulisi liittyä olennaisella tavalla metallitehtaan kunnossapitoon ja opinnäytetyön tavoitteena olisi tuoda aidosti lisäarvoa henkilökohtaiseen osaamiseen sekä lujitemuovisäiliöiden kunnonvalvonnan kehittämiseen Terrafamen metallien talteenottolaitoksella.



## 2 Terrafame Oy

### 2.1 Yleistä Terrafamesta

Terrafame on suomalainen monimetalliyhtiö, jonka tuotteita ovat kupari-, sinkki- ja nikkeli-kobolttisulfidi, joita tuotetaan Terrafamen Sotkamossa sijaitsevalla kaivoksella louhitusta malmista kaivoksen vieressä sijaitsevalla metallien talteenottolaitoksella [1].

Terrafame Oy perustettiin vuonna 2015 sen ostaessa Talvivaara Sotkamo Oy:n konkurssipesän liiketoiminnan ja omaisuuserät ja saman vuoden loppupuolella Terrafame Oy teki ensimmäiset nikkelin ja sinkin asiakastoimitukset. [2]. Tämän jälkeen Terrafame on onnistunut kasvattamaan vuosittain tuotantoaan ja investoimaan uuteen akkukemikaalitehtaaseen jalostaakseen nykyisestä päätuotteestaan sähköautojen akuissa käytettäviä nikkeli- ja kobolttisulfaatteja, minkä ansiosta Terrafamen vuotuisen liikevaihdon arvioidaan kasvavan noin 200 miljoonalla eurolla. [3, s. 4.]

Nykyisellään Terrafame Oy:n pääomistaja on valtion omistama Suomen malmijalostus Oy, jonka omistusosuus Terrafamesta on noin 77 %. Vähemmistöomistajia ovat Trafigura Groupiin kuuluvat Galena-rahastot 22,6 prosentin osuudella ja Sampo Oyj 0,3 prosentin osuudella. Vuonna 2019 Terrafame työllisti alueellansa noin 1500 henkilöä, joista noin puolet oli kumppaniyritysten henkilöstöä. [4, s. 2, 14.]

### 2.2 Terrafamen tuotantomenetelmät

Terrafamen tuotantoprosessi koostuu neljästä eri vaiheesta. Näitä ovat louhinta, malminkäsittely, biokasaliuotus ja metallien talteenotto. Kukin neljästä eri päävaiheesta sisältää useita eri prosessin osia, joita olen tässä opinnäytetyössä avannut.

### 2.2.1 Louhinta

Louhintamenetelmänä kaivoksella käytetään laajamittaista avolouhintaa, joka on kallion teknisten ominaisuuksien ja louhinnan kustannuksien vuoksi taloudellisin ja tehokkain louhintamenetelmä alueella. Nikkelipitoisuus louhittavassa mustaliuskekivistä on keskimäärin 0,13–0,15 % ja sinkkiä mustaliuske sisältää 0,25–0,27 %. Louhinta tapahtuu poraamalla räjäytettävään kenttään noin 16–17 metriä syviä reikiä, jolloin pengerkorkeus saadaan halutulle tasolle noin 15 metriä korkeaksi. Räjäytysten jälkeen malmi kerätään kiviautojen kyytiin, jotka kuljettavat malmin louhoksen lähellä sijaitsevalle primäärimurskaamolle, joka on käytännössä ensimmäinen malminkäsittelyyn kuuluva vaihe. [5, s. 44–45.]

### 2.2.2 Malmin käsittely

Malminkäsittelyssä räjäytetty malmi prosessoidaan bioliuotukseen sopivaksi läpimitaltaan alle 8 millimetrin kokoiseksi ja mahdollisimman tasalaatuiseksi rakeeksi. Malmin käsittelyn ensimmäinen vaihe on primäärimurskaus, jossa primäärimurskaimeen syötettävä alle 1 m<sup>3</sup> kokoiset kivet murskataan läpimitaltaan alle 250 millimetrin kokoiseksi murskaksi. Primäärimurskausvaiheessa malmi murskataan karamurskaimella ja tarvittaessa hydraulivasaralla. Primäärimurskaamon läpi kulkenut malmi kuljetetaan katetulla sähkötoimisella hihnakuljetinjärjestelmällä lähempänä tehdasaluetta ja kasoja sijaitsevaa katettua välivarastoa. Välivarastosta malmi kulkee hienomurskaukseen, jossa malmi kiertää kolmivaiheisessa murska- ja seulajärjestelmässä siten, että 80 % malmirakeesta on alle 8 millimetrin kokoista ja voidaan ohjata agglomerointiin. Jokainen murskaamo on katettu ja hienomurskaamot on varusteltu erillisellä pölynkeruujärjestelmällä, joka ehkäisee malmihiukkasten leviämisen ympäristöön. Hienomurskaamojen pölynkeruujärjestelmään kertynyt malmipöly ohjataan myöskin takaisin prosessiin agglomerointivaiheessa. [5, s. 46–47.]

Agglomeroinnissa hienomurskaamosta tuleva hienojakoinen kiviaines käsitellään pyörivissä rummuissa PLS-liuoksella eli kylläisellä prosessiliuoksella ja laimealla rikkihapolla, jolloin hienojakoinen kiviaines kiinnittyy isompiin partikkeleihin. Agglomerointihallin, kuten hienomurskaamon ja välivarastonkin, pohjarakenteet on valettu siten, että valuma- ja suodosvedet voidaan ohjata takaisin liuoskiertoon. [5, s. 46–47.]

### 2.2.3 Biokasaliuotus

Biokasaliuotuksessa agglomeroitu malmi kasataan satoja metrejä pitkällä tela-alustaisella silta-kuljettimella 7–10 metriä korkeaksi kasaksi 400 x 1200 metrin kokoiselle bioliuotuskentälle. Koko primäärioliuotusvaihe on jaettu neljään lohkokoon, joista jatkuvasti yksi lohko on purussa ja yksi kasauskasuvaiheessa. Kyseinen kierto on jatkuva ja yhtä kasaa liuotetaan 13–18 kuukautta. Purettua primäärikasaa aletaan kasata toisen vaiheen 5–30 metriä korkeaan bioliuotuskasaan, jossa sekundäärikasaa liuotetaan vielä 3–4 vuotta. Sekundäärikasaa ei enää pureta vaan kasan liuotuksen jälkeen sekundäärikasa jää niille sijoilleen ja lopulta se maisemoidaan. [5, s. 48–9.]

Kasojäät kastellaan happamalla PLS-liuoksella, joka sisältää vettä, mikrobeja, liuennut metalleja ja rikkihappoa, lisäksi kasoihin puhalletaan alhaisella paineella ilmaa. PLS-liuos ja kasojen ilmastaminen mahdollistavat malmisissa luonnostaan esiintyvien mikrobien kasvamisen, jolloin ne katalysoivat malmin sisältämän raudan ja rikin hapettumista saadakseen energiaa haltuunsa. Tämän ansiosta malmin sisältämät metallisulfidit muuntuvat vesiliukoisiksi metallisulfaateiksi. Liuoskierto on suljettu ja kasaa kastellaan, kunnes metallipitoisuus liuoksessa on kasvanut tarpeeksi korkeaksi, jolloin liuos ohjataan metallien talteenottoon. Bioliuotuskierto on suljettu ja jatkuva-toiminen, bioliuotusprosessi on kuitenkin itsessään lämpöä tuottava, jolloin osa PLS-liuoksesta haihtuu prosessin aikana. Metallien talteenoton palautusliuoksella eli raffinaatilla sekä järvivedellä kuitenkin ylläpidetään liuostilannetta. [5, s. 50–52.]

### 2.2.4 Metallien talteenotto

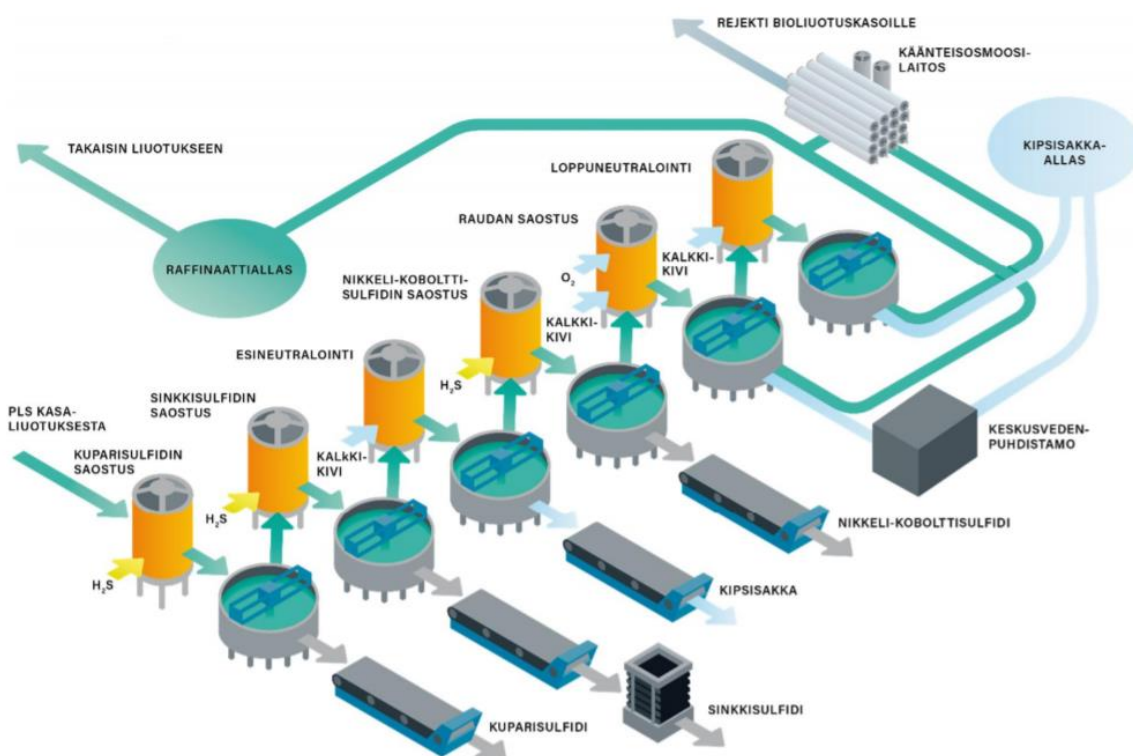
Metallien talteenotto-prosessissa bioliuotuksesta tuleva metallipitoinen PLS-liuos ohjataan saostusreaktoreihin, joissa metallisulfaatit saostetaan rikkivetyä apuna käyttäen sakkamaisiksi metallisulfideiksi. Rikkivedyn lisäämisellä saavutetaan kaavassa 1 esitetty metallien talteenoton pääreaktio, jossa lyhenne Me viittaa haluttuun metalliin. [5, s. 54.]

Metallisulfaatti ( $\text{MeSO}_4$ ) + rikkivety ( $\text{H}_2\text{S}$ ) → Rikkihappo ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) + Metallisulfidi ( $\text{MeS}$ ) (1) [5, s. 55].

Metallitehtaalle tuleva liuosvirtaama on nykyisellä ajomallilla 1600–1900 m<sup>3</sup>/h ja tulevan PLS-liuoksen pH on välillä 2...3,2. PLS-liuos sisältää nikkeliä 1–4 g/l ja sinkkiä 2–10 g/l, joiden lisäksi liuos sisältää myös muita metalleja ja alkuaineita kuten kuparia, kobolttia, uraania, rautaa, mangaania, magnesiumia, kalsiumia ja natriumia. PLS-liuoksessa pH sekä eri aineiden pitoisuudet vaihtelevat

louhitun malmin, liuotuksen vaiheen sekä biokasaliuotuksen kastelun onnistumisen mukaan. [5, s. 54–55.]

Metallien talteenotto koostuu kahdesta toistensa kanssa lähes identtisestä tuotantolinjasta, jossa metallit ja muut alkuaineet erotellaan yksi kerrallaan toteuttamisjärjestyksessä kuparisulfidin saostus, sinkkisulfidin saostus, esineutralointi, nikkeli-kobolttisulfidien saostus sekä mahdollinen prosessiliuoksen loppusaostus kuvan 1 mukaisesti. Tuotteiden prosessiliuoksesta sakkamaiseen muotoon erottaminen koostuu kolmesta eri päävaiheesta, jotka ovat saostus, sakeutus ja suodatus. Saostuksen jälkeen sulfidipitoinen liuos jatkaa matkaansa sakeutukseen, jossa prosessiliuosta selkeytetään lisäämällä siihen hiutaloitumista edistäviä kemikaaleja eli flokkulanteja, jolloin kiintoaine saadaan erotettua sakeana alitteena suodatukseen ja ylite johdettua seuraavaan vaiheeseen. Suodatuksessa sulfidisakasta erotetaan ylimääräinen kosteus ja sakka voidaan tämän jälkeen ohjata tuotevarastoon odottamaan lastausta ja asiakkaille toimitusta, joka hoituu Terraफलmelta rauta- ja meriteitse. [5, s. 55–56.]



Kuva 1. Yksinkertaistettu metallien talteenoton prosessikuvaus. [5 s. 55].

Tuotemetallien saostuksen lisäksi metallitehtaan prosessiin kuuluvat esineutralointi sekä ajotavasta ja liuostilanteesta riippuen myös raudansaostus ja loppuneutralointi. Esineutraloinnissa kalkkikivilietettä apuna käyttäen neutraloidaan kuparin ja sinkin saostuksessa syntynyttä happoa,

jolloin syntyy kipsisakkaa. Nikkeli-koboltin saostuksesta ylite voidaan ohjata suoraan raffinaattialtaalle, josta se pumpataan takaisin liuoskiertoon tai johtaa raudansaostukseen sekä loppuneutralointiin, jonka jälkeen raudansaostuksen jälkeinen liuos ohjataan raffinaattialtaille ja loppuneutraloinnin kautta kulkeva liuos tehdasvedeksi tai puhtaiden vesien käsittelyyn. [5, s. 55–56.]

Metallien talteenotossa kertyy myös hönkäkaasuja, joissa esiintyy epäpuhtautena rikkivetyä. Saostusreaktoreiden hönkäkaasut ohjataan lipeäliuoksella täytettyyn imeytysreaktoriin, jolloin kaasuton epäpuhtautena esiintyvä rikkivety liukenee tehokkaasti lipeäliuokseen. Lisäksi varastosäiliöissä, kupari-, sinkki- ja nikkelivaiheen sakeuttimissa sekä suodatuksessa esiintyy liuoksesta hönkivää rikkivetytipoista kaasua. Kyseisten alueiden hönkäkaasut pestään niille tarkoitetuilla lipeäpesureilla, joiden avulla kaasutosta pestään rikkivety ja puhdistetut kaasut johdetaan ulkoilmaan. [5, s. 57–58.]

### 3 Muovikomposiitit

Muovikomposiitilla tarkoitetaan komposiittien alaryhmää, jossa muovi toimii komposiitin matriisina eli lujittavan materiaalin sitovana elementtinä. Muovikomposiitteja kutsutaan yleisesti kuitulujitetuiksi muoveiksi tai lujitemuoveiksi. Tässä opinnäytetyössä keskityn kuitenkin pääasiassa käsittelemään prosessiteollisuuden sovelluksissa esiintyviä lujitemuovirakenteita. Muovikomposiittien eduiksi voidaan lukea yleisesti ottaen hyvä kemian kestävyys, hyvät lujuus- ja jäykkyysominaisuudet rakenteen tiheyteen nähden. Näiden ominaisuuksien vuoksi muovikomposiittirakenteet ovatkin suosittuja prosessi- ja kemianteollisuudessa, ilmailuvälineissä sekä urheilutuotteissa. [6, s. 17.]

Komposiittien erilaiset valmistusmenetelmät sekä se, että lujitemuovimateriaaleja ei ole standardisoitu laajasti tuo lujitemuovituotteisiin variaatioita eri valmistajien välillä. Tärkeimpiä lujitemuovituotteiden ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat raaka-aineet ja niiden sekoitussuhteet. Lujitekuitujen sekä matriisimuovien erilaiset lujuusominaisuudet sekä lujitepitoisuuden kasvaminen tiettyyn pisteeseen asti vaikuttavat komposiitin lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin. Matriisimuovin sekä lujitteiden täytyy olla myös sopivia keskenään, eli käytännössä lujitteilla täytyy olla matriisia suurempi kimmomoduuli ja lujitteiden murtovenymän tulee olla matriisia pienempi, jolloin kuormat välittyvät pääasiassa lujitteisiin. Lisäksi matriisin ja lujitteen toisiinsa kiinnittymisen on onnistuttava lujuusominaisuuksien takaamiseksi. Komposiitin valmistuksen onnistuminen vaikuttaa myöskin kappaleen lujuusominaisuuksiin. Esimerkiksi lujitteet tulee suunnata kappaleeseen niin, että lujitteet vastaanottavat kappaleeseen kohdistuvat kuormat. Tämän lisäksi rakenteeseen jäävä huokoisuus tulee minimoida, jolloin rakenteen epähomogeenisuus saadaan minimoitua. [7, s. 143–146.]

#### 3.1 Kertamuovit

Kertamuoveiksi kutsuttuja muoveja ovat synteettiset orgaaniset polymeerit, jotka kovettuvat nestemäisestä hartsista kiinteään muotoon kemiallisessa silloittumisreaktiossa eli kovettumisreaktiossa. Silloittumisreaktio on eksoterminen eli itsestään lämpöä tuottava reaktio. Ennen kovettumistaan kertamuovit ovat yleensä oligomeerejä eli alhaisen moolimassan omaavia molekyylejä ja varsinainen polymeeri muodostuu vasta silloittumisreaktiossa, jonka aikana molekyylit silloittuvat toisiinsa esimerkiksi styreenin avulla luoden ristosilloittuneen rakenteen. Koska polymeeri

muodostuu vasta silloittumisreaktiossa, kertamuovit silloitetaan aina lopputuotetta valmistettaessa. Kovetuttuaan kertamuoveja ei voi enää muokata eikä niitä saa myöskään alkuperäiseen hartsimaiseen muotoonsa, minkä johdosta kertamuovit eivät ole kestopuovien tapaan helposti kierrätettävissä tai muokattavissa esimerkiksi lämmön avulla. Kertamuoveilla yksinään ei ole erityisen hyvät lujuus- ja jäykkyysominaisuudet, mutta lujitekuitujen ansiosta kertamuoveista voidaan valmistaa ulkopuolista rasitusta hyvin kestäviä rakenteita. Kertamuoveista valmistetuissa lujitemuovituotteissa lujitteiden osuus on tyypillisesti 30–70 p% eli painoprosenttia tuotteesta. Kertamuovien huonoiksi puoliksi voidaan lukea kohtalaisen hauras murtumismekanismi sekä heikko iskunkestävyys. Suurin osa lujitetuista kertamuoveista on myös helposti palavia, joskin tätä ominaisuutta voidaan hillitä erilaisilla lisäaineilla. Kertamuovien vahvuuksiin voidaan kuitenkin lukea helppo työstettävyys ja soveltuvuus lujitetuksi tuotteeksi, minkä lisäksi niiden kemikaalin ja lämmön kesto ovat pääsääntöisesti paremmat kuin kestopuoveilla. Lujitetut kertamuovituotteet ovat myöskin mekaanisilta ominaisuuksiltaan huomattavasti kestopuoveja vahvempia. [6, s. 35–36.]

Eniten käytettyjä kertamuoveja lujitemuovisovelluksissa ovat polyesterit, vinyyliesterit ja epoksit, joista erityisesti polyesterit ja vinyyliesterit ovat laajalti käytettyjä myös prosessiteollisuuden lujitemuovituotteissa. Esimerkiksi valtaosassa prosessiteollisuuden kuitukelatuissa lujitemuovirakenteissa käytetään polyestereitä ja vinyyliestereitä, jotka omaavat hyvän kemian keston. Tyypillisiä kelaamalla valmistettuja lujitemuoviosia ovat mm. putket, säiliöt ja pesurit. [6, s. 35.]

### 3.2 Kestomuovit

Toisin kuin kertamuoveja kestopuoveja voidaan muokata lämmön avulla vielä jälkeenkäinkin ilman, että muovin rakenne muuttuu. Pääasiassa kestopuovit koostuvat yhdestä polymeeristä sekä eri lisäaineista, joilla tavoitellaan parempia työstö ja lujuusominaisuuksia. Tyypillisiä kestopuoveja ovat PE-muovi eli polyeteeni, PP eli polypropeeni sekä PVC eli polyvinyylidikloridi. Kestopuovien lämmönkesto ei ole erityisen hyvä, vaikkakin on olemassa tiettyjä erityismuoveja, jotka kestävät hyvinkin korkeita lämpötiloja. Vaikka valtaosassa kestopuovisovelluksia muovi on lujitamatonta, soveltuu kestopuovi myös lujitemuovin matriisiksi. Tärkeimpiä matriisimuovina käytettäviä kestopuoveja ovat polypropeeni ja polyamidi. Kestopuovilla lujittaessa lujitteet tavallisesti esi-impregnoidaan eli kastellaan kestopuovilla, jolloin lopullinen tuote valmistetaan eräänlaisesta esivalmisteesta eli prepregistä. Kestopuovien työstäminen ja ominaisuudet ennen lopul-

lisen tuotteen valmistusta eroavat myöskin kertamuoveista. Kertamuoveista poiketen kesto-  
muovit toimitetaan loppukäyttäjälle jo valmiiksi polymeroituneena. Kestomuovien viskositeetti  
nestemäisenä on myöskin yleensä huomattavasti korkeampi kuin kertamuoveilla, mikä voi ai-  
heuttaa haasteita erityisesti impregnoinnin osalta. [6, s. 53.]

Kestomuoveja lujitetaan pääasiassa lyhyillä lujitekuiduilla ja muovit ruiskuvaletaan. Kestumuo-  
veja voidaan kuitenkin lujittaa myös pitkillä kuiduilla tai matoilla, jolloin kyseiset komposiitit ovat  
merkittävämpiä rakenteellisissa sovelluksissa. Tyypillisiä lujitettuja kesto-  
muoveja käytetään mm. auto- ja kuljetusvälineiteollisuudessa sekä sähköteollisuuden muoviosissa. Kestomuovista valmis-  
tettuja lujitemuovisovelluksia ovat esimerkiksi moottorin tuuletajat, jarru- ja kytkinnestesäiliöt  
sekä erilaiset kotelot. [6, s. 35.]

### 3.3 Lujitteet

Lujitteita käytetään nimensä mukaisesti komposiittimuovien mekaanisten ominaisuuksien paran-  
tamiseen. Vaikka joitain muovien teknisiä ominaisuuksia voidaan täyte- ja lisäaineilla parantaa,  
tarkoitetaan lujitteilla erityisesti matriisimuovilla sidottuja lujitekuituja tai mattoja, joiden on tar-  
koitus kestää lopputuotteeseen kohdistuvat kuormat. Lujitekuiduista voidaan valmistaa erityyp-  
piä lujitteita, joita ovat mm. lyhyet katkokuidut, jatkuvat kuidut eli filamentit, kuitukimput eli  
langat tai kierteettömät kimput eli rovingit, matot, pintahuovat sekä kudokset. [6, s. 19–20, 74.]

Lasikuitu on vielä ylivoimaisesti merkittävin lujitemateriaali muovikomposiittien valmistuksessa.  
Sen prosentuaalinen osuus kaikesta lujitekäytöstä onkin noin 95 %. Lujitemuoviteollisuus on lasi-  
kuidun merkittävin käyttäjä, minkä lisäksi lasikuitua käytetään kantavana rakenteena mm. bitu-  
missa kateaineissa lasikuituhuovan muodossa sekä PVC-matoissa ja tapeteissa. Lasikuituja on ole-  
massa mm. A-, C-, E- ja S-laseina, joista teollisuuden sovelluksissa hyödynnetään käytännössä C-  
ja E-laseja. A-laseja eli alkalilaseja ei nykyään valmisteta enää lainkaan sen huonon veden kestä-  
vyyden vuoksi ja S-lasin (high strength glass) käyttö kohdistuu pääasiassa lentokoneteollisuuteen  
sen hyvien lujuusominaisuuksien, korkean kimmokertoimen ja erittäin hyvän lämmönkestävyy-  
den vuoksi. S-lasin käyttöä muussa teollisuudessa on rajoittanut lähinnä sen korkea hinta. Kai-  
kesta valmistetusta lasikuidusta 99 % on eli E-lasia (electrical glass), jonka suosion syynä ovat sen  
hyvien mekaanisten ominaisuuksien lisäksi sen sähköiset ominaisuudet ja hyvä kemian kesto, joka  
johtuu sen pienestä alkalipitoisuudesta. Voimakkaasti happamissa ja hyvää korroosionkestoaa vaa-

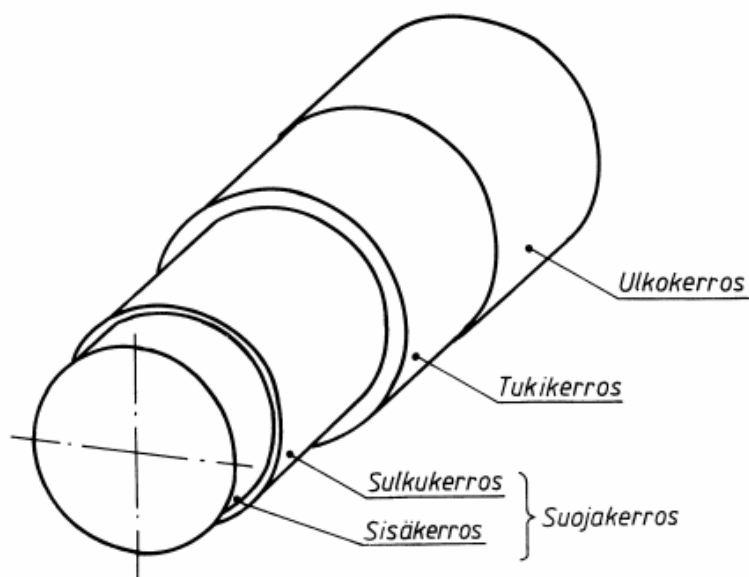


dittavissa olosuhteissa, esimerkiksi kemikaalisäiliöiden hartsirikkaissa sisäpinnoissa käytetään kemiallisesti kestävä lasista eli C-lasista (Chemically resistant glass) valmistettua pintahuopaa. [6, s. 75.]

Seuraavaksi yleisimpiä lujitemateriaaleja ovat hiilikuidut, joilla on erinomaiset lujuus- ja jäykkyyssominaisuudet yhdistettynä keveyteen, sekä aramidikuidut, jotka ovat keveitä ja omaavat suuren vetolujuuden lisäksi myös hyvät iskulujuus- ja sitkeysominaisuudet. Hiilikuitujen hyvän sähköjohtavuuden ja kemiallisen reagoimattomuuden takia hiilikuituja käytetään prosessiteollisuudessa pintahuopina kohteissa, joissa vaaditaan joko hyvää sähköjohtavuutta tai kemiallisen korroosion kestävyyttä rakenteen sisäpinnoilla. Hiilikuidun mekaanisten ominaisuuksien vuoksi hiilikuitua kuitenkin pääasiassa käytetään kohteissa, joissa vaaditaan hyviä lujuus- ja jäykkyyssominaisuuksia yhdistettynä keveyteen. Tällaisia kohteita ovat mm. ilmailu-, avaruus, ja autoteollisuus sekä nykyään kovaa vauhtia kasvava tuulienergiateollisuus. Suurin rajoittava tekijä hiilikuiduilla on niiden korkea hinta. Aramidikuidut omaavat hyvien mekaanisten ominaisuuksien lisäksi muutamia vahvoja happeja ja emäksiä lukuun ottamatta hyvän kemiallisen kestävyuden. Lisäksi kyseiset kuidut ovat huonosti palavia ja itsestään sammuvia. Näiden ominaisuuksien vuoksi aramidikuituja käytetäänkin pääosin ilmailu- avaruus-, ja veneteollisuudessa sekä urheiluvälineissä ja ballistisia ominaisuuksia vaativissa kohteissa. Yksi tunnetuimmista aramidikuitujen tuotenimistä onkin **Kevlar®**. Prosessiteollisuudessa aramidikuituja käytetään pääasiassa kumien lujitteina mm. letkuissa ja hihnoissa. Aramidikuitujen käyttöä rajoittavia tekijöitä lujitemuoveissa ovat hiili- ja lasikuituja heikompi tartunta matriisimuoveihin sekä sitkeydestä johtuva työstön vaikeus, joka nostaa rakenteen valmistus- ja kunnossapitokustannuksia. [6, s. 80–92.]

### 3.4 Lujitemuovien valmistus

Korroosionkestäviin kohteisiin valmistetut lujitemuovirakenteet koostuvat eri kerroksista, jotka eroavat toisistaan valmistuksen ja materiaalien osalta. Yleensä korroosionkestävissä laminaateissa on ainakin suojakerros ja tukikerros. [8, s. 11.] Lisäksi laminaatin ulkopintaan voi olla tehty UV-valolta tai ulkopuolisilta roiskeilta suojaava ulkokerros. Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen korroosionkestävän laminaatin rakenne. [9].

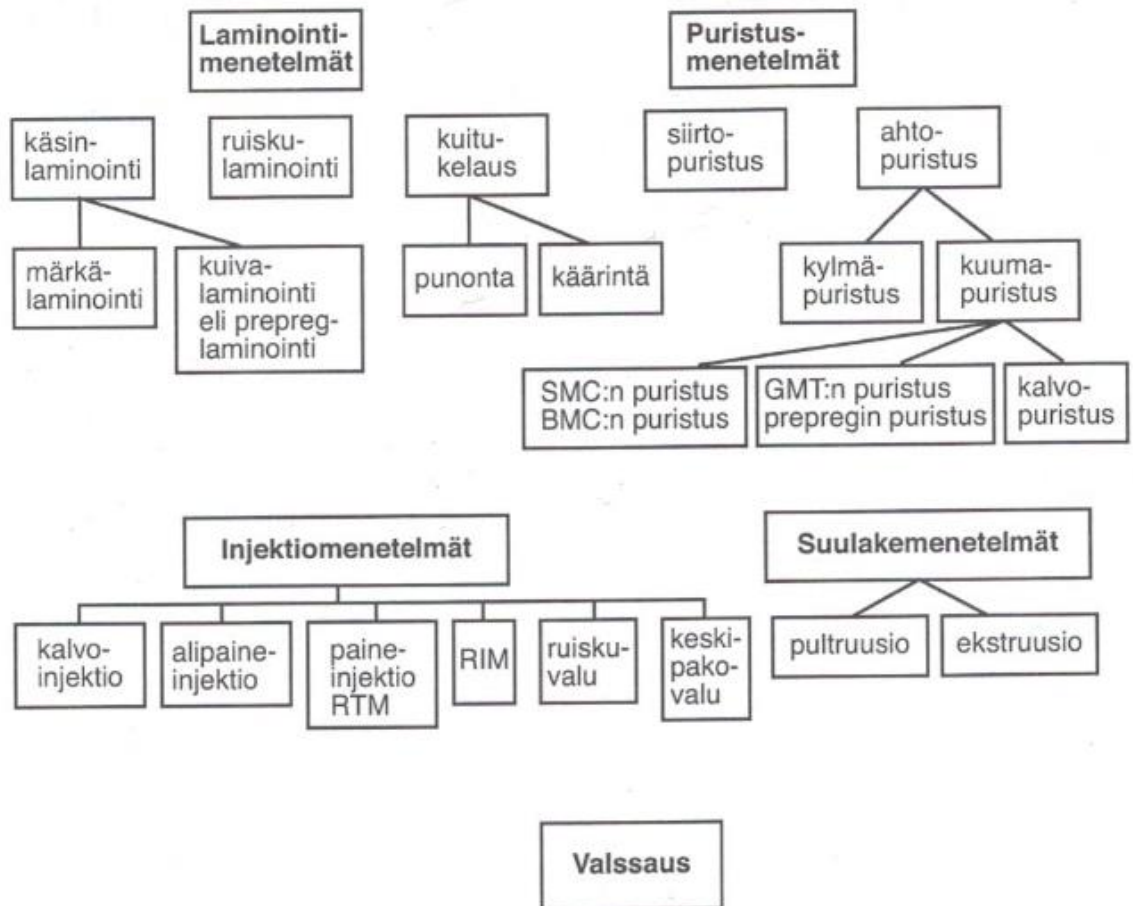


Kuva 2. Korroosionkestävän laminaatin rakenne [9].

Laminaatin suojakerros on tarkoitettu nimensä mukaisesti suojaamaan laminaatin pintaa korroosion vaikutuksilta ja estämään prosessin osien tunkeutuminen tukikerrokseen. Suojakerros koostuu yleensä kahdesta osasta, jotka ovat sisäkerros ja sulkukerros. Sisäkerroksen tulee olla 0,25–0,5 mm paksu, hyvin hartsirikas kerros ja sisältää yli 80 p% hartsia. Lujitteena sisäkerroksessa käytetään tyypillisesti C-lasia. [8, s. 11; 9, s. 3.] Seuraava kerros on sulkukerros, joka koostuu vähintään kahdesta laminointikerroksesta pulverisidottua katkokuitumattoa. Kyseisen kerroksen lujitepitoisuus on 20–30 p% ja myös sulkukerros toimii suojaavana kerroksena kemikaalien läpäisyä vastaan. [9, s. 3.]

Tukikerros antaa rakenteelle sen mekaaniset ominaisuudet ulkopuolisia ja lämpötiloista aiheutuvia rasituksia vastaan, jolloin yleensä mahdollisimman suuri lujitepitoisuus olisi suotavaa. Tukikerros valmistetaan jatkuvakuituisesta laminaatista ja kuidut voidaan suunnata mekaanisia rasituksia vastaan rakenteen lujuuden maksimoimiseksi. Lujitepitoisuus sulkukerroksessa voi vaihdella valmistusmenetelmän mukaan välillä 35–75 p%. [9, s. 3.]

Lujitemuovien valmistukseen voidaan käyttää useita eri perusmenetelmiä, jotka voidaan jakaa muutamaankin eri pääryhmään, joita ovat laminointimenetelmät, puristusmenetelmät, injektio menetelmät, suolakemenetelmät ja valssaus. Eri ryhmiin kuuluvat valmistustekniikat voidaan jakaa kuvan 3 mukaisesti. [6, s. 153.] Keskityn tässä opinnäytetyössä kuitenkin prosessiteollisuuden säiliöiden ja putkistojen sekä niiden osien valmistukseen käytettäviin menetelmiin, joita ovat pääasiassa laminointi- ja injektio menetelmät.

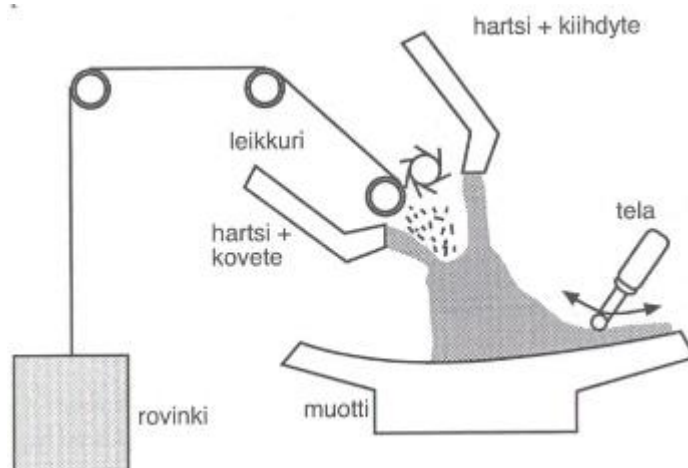


Kuva 3 Lujitemuovituotteiden valmistustekniikat [6, s. 153].

Käsinlaminointimenetelmiin kuuluvat märkälaminointi ja prepreg-laminointi. Käsinlaminoinnissa on otettava huomioon työturvallisuus mm. asianmukaisella ilmanvaihdoilla ja suojaimeilla, jotta terveydelle haitallinen pöly ja kaasut eivät aiheuta vaaratilanteita. Märkälaminoinnissa lujitteet asetetaan kerroksittain avoimeen muottiin ja kostutetaan joka kerroksen välissä hartsilla. Parhaan työtuloksen aikaansaamiseksi tulisi jokaisen kastellun kerroksen välissä kerrokset telata tasaisiksi ja ilmattomiksi. Märkälaminointiin sopivat useimmat lujitetyypit ja tuotteen tyypillinen lujitesisältö on 20-40 p%. Vaativiin olosuhteisiin valmistettavien kappaleiden valmistuksessa kuitenkin käytetään yleensä lujitteena ohuita lasi-, aramidi- tai hiilikuitukudoksia ja hartsina vinyyliesteriä tai epoksia, joiden lämmön- ja kemiankesto ovat kohtalaisen hyviä ja muottikutistuma pieni. Märkälaminoidut tuotteet voidaan kovettaa vapaasti muotissa ja jälkikovuksen tehostamiseksi voidaan tuote kovettaa korkeammassa lämpötilassa, joka on tyypillisesti noin 80 °C. Lisäksi laminaatin tiivyyttä voidaan tehostaa kovettamalla tuote paineen avulla, johon käytetään tyypillisesti alipainesäkitystä. Alipainesäkkikovuusta suositellaan lähinnä epoksipohjaisilla lami-

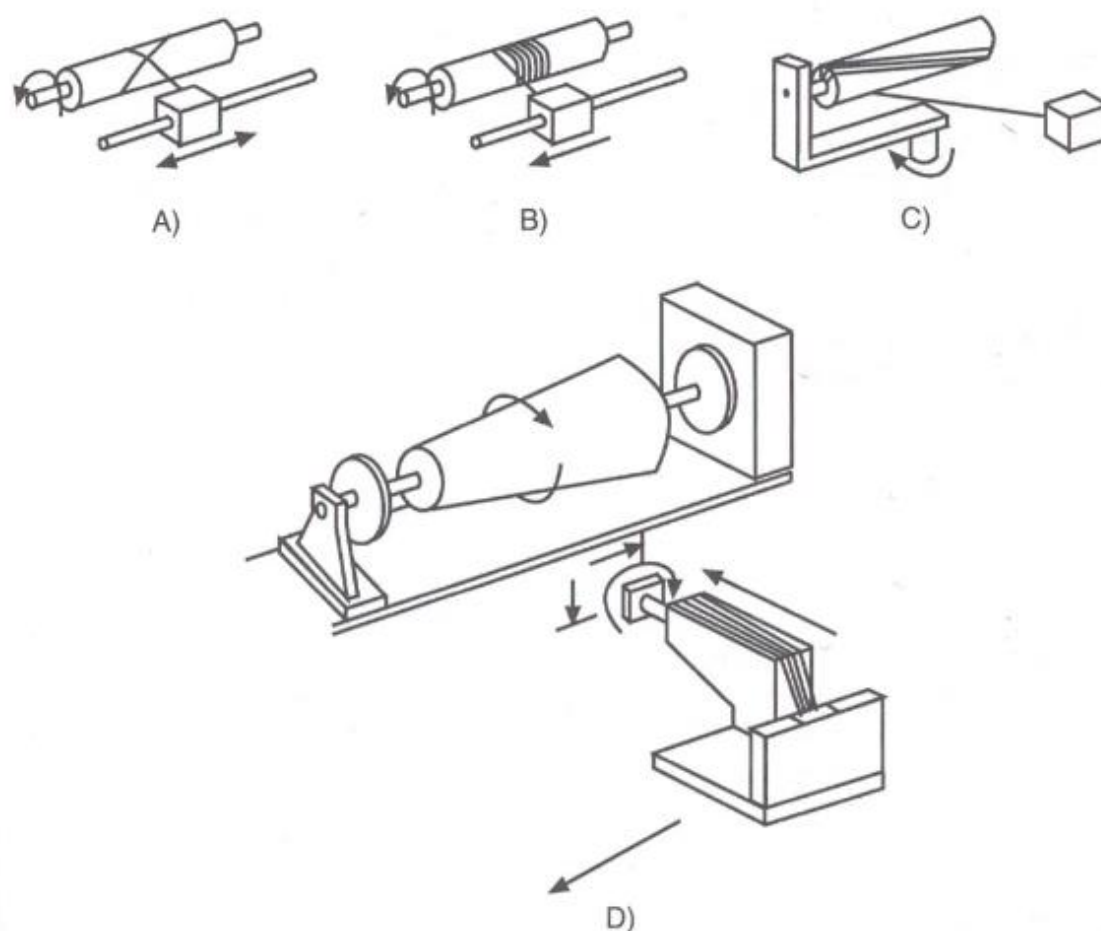
naateilla, sillä polyesterin sisältämä styreeni voi alkaa kiehua laminaatissa ja aiheuttaa lopputuotteen virheitä. Märkälaminoinnin suurimpia etuja ovat alhaiset muotti- ja laiteinvestoinnit sekä valmistettavien kappaleiden monipuolisuus. Suurimpina haittoina voidaan taas nähdä suuri työn osuus ja valmistuksen hitaus. Prepreg-laminoinnissa valmiiksi hartsilla kyllästetyt esivalmisteet asetellaan muottiin halutussa järjestyksessä ja tiivistetään alipainesäkillä noin viiden kerroksen välein. Prepreg-laminaatti kovetetaan tyypillisesti autoklaavissa eli lämmitettävässä paineastiassa. [6, s. 154–159.]

Ruiskulaminoinnissa lujitteet ja hartsit ruiskutetaan yhtäaikaista muottipinnalle kerroksittain. Ensimmäinen kerros on yleensä Gelcoat kerros, kuten märkälaminoinnissakin. Gelcoat kuivumisen jälkeen laminaatti ruiskutetaan kerroksittain muottiin. Ensimmäinen laminaattikerros on yleensä 1–2 mm paksu, jonka jälkeen suoritetaan ilmanpoistotelaus. Tämän jälkeen laminaattikerrokset ruiskutetaan 2–3 mm paksuisina kerroksina, joiden jälkeen telaukset suoritetaan. Ruiskulaminointipistooliin syötetään hartsia sekä rovinkia eli kierteetöntä kuitukimppua, joka katkotaan 20–50 mm:n pituisiksi kuiduiksi, jotka sekoittuvat ruiskun suulakeosassa hartsiin, jonka jälkeen hartsit kuljettaa kuidut laminoitavalle pinnalle, kuten kuvassa 4 esitetään. [7, s. 154.] Vaikka ruiskulaminointia onkin nykyisin saatu automatisoitua, on se edelleen pääosin manuaalista työtä, jossa tuotteen laatu on riippuvainen tekijän ammattitaidosta. Kuten muussakin käsinlaminoinnissa ilmanvaihdoista ja suojaamisesta on syytä huolehtia. Ruiskulaminoiduissa tuotteissa lujuusominaisuudet ovat katkokuitujen vuoksi vaatimattomammat kuin jatkuvakuituisissa tuotteissa, mistä syystä tuotteet rajautuvatkin pieniin säiliöihin ja muotokappaleisiin. [6, s. 162.]



Kuva 4. Periaatekuva ruiskulaminoinnista. [6, s. 161].

Kuitukelaus ja sen muunnokset on tyypillinen teollisuusputkistojen ja säiliöiden valmistukseen käytetty menetelmä. Kuten märkälaminointi ja ruiskulaminointi myös kelaus on avomuottimenetelmä. Kuitukelauksessa lujitteet johdetaan kuitujen kasteluun tarkoitetun altaan tai prässin läpi ja kelataan lieriön muotoisen muotin ympärille. Kelauskoneiden kehittymisen myötä menetelmä soveltuu nykyisin monimutkaisempienkin kappaleiden valmistukseen, kun kelausgeometrioita voidaan suunnitella ja konetta ohjelmoida tietokoneavusteisesti. Kuvassa 5 on esitetty yleisimmät kuitukelaustavat. [6, s. 162-163.]



Kuva 5. Kuitukelaustapoja; A) kulmakelaus, B) poikittaiskelaus, C) polaarikelaus, D) kuusiakselinen kelaus. [6, s. 163].

Hartsina kuitukelauksessa käytetään tyypillisesti polyestereitä, epokseja ja vinyyliestereitä, joilla tulisi olla pitkä työstöaika. Kuitukelatun tuotteen kovettuminen on tämän takia hidasta ja sitä tehostetaan kelaus kappaleen koosta riippuen, joko lämpölamppujen tai kovetusuunin avulla. Lujitteena kuitukelauksessa käytetään yleensä lasikuituvinkia, mutta kelaukseen soveltuvia lujitteita ovat myös pintahuovat, katkokuitumatot ja kudokset. Kelattujen tuotteiden lujitepitoisuus

on tyypillisesti korkea 60–90 p% minkä lisäksi lujitteiden jatkuvuuden ja suunnattavuuden ansiosta kelatuilla tuotteilla on yleensä hyvät mekaaniset ominaisuudet. Tuote voidaan kelata myös prepregeistä, jolloin työ on siistimpää ja tuotteiden laatua saadaan märkäkelaukseen nähden vieläkin paremmaksi. [6, s. 163, 164, 192.]

Paineinjektiossa lujitteet tai lujiteaihiot asetellaan suljettuun muottiin mihin hartsi injektoidaan ylipaineen avulla. Injektointivaiheen jälkeen tuote kovetetaan ennen muotista poistamista, minkä jälkeen valmis kappale vaatii yleensä vielä viimeistelyn. Paineinjektioilla valmistetuissa tuotteissa on tyypillisesti melko matala lujitepitoisuus ja injektioprosessi on nopea. Vaativiin sovelluksiin valmistettavissa tuotteissa lujitepitoisuutta voidaan nostaa, mutta tällöin injektionopeus hidastuu. Alipaineinjektiossa muotti on avoin ja se suljetaan alipainesäkin tai joustavan muottipuoliskon avulla. Lujitteet kyllästetään imemällä hartsi lujiteaihioiden läpi. Paine- ja alipaineinjektion etuja käsinlaminointiin verrattuna ovat tuotteiden nopeampi valmistaminen, niiden toistettavuus sekä suljettu prosessi, jolloin haihtuvat aineet eivät leviä ympäristöön. Paine- tai alipaineinjektioilla valmistettujen tuotteiden lujitesisältö on tyypillisesti 15–35 p%, minkä takia lujuusominaisuudet jäävät yleensä hiukan heikommiksi kuin käsinlaminoidulla tai kelatuilla tuotteilla. [6, s. 167, 192.]

### 3.5 Lujitemuovirakenteiden vikaantuminen

Lujitemuovirakenteilla on useita erilaisia vikaantumistyppejä, jotka aiheutuvat ja näkyvät usein eri tavoin. Osa rakenteen poikkeamista voi olla olemassa jo laadunvalvonnan aikana, mutta poikkeamat saattavat olla niin pieniä, että ne voidaan huomata vasta niiden kehittyessä. Lujitemuovin vikaantuminen onkin usein progressiivista, jolloin suojakerroksesta alkanut rakenteen heikkeneminen voi edetä asteittain tukikerrokseen, jolloin laminaatin mekaaniset ominaisuudet voivat heiketä voimakkaasti ja kohde vaatii yleensä välittömiä huoltotoimenpiteitä. [8, s. 24.] Liitteen 1 taulukossa olen koonnut yleisimpiä vikoja, niiden toimenpiderajoja ja sfs-standardien ja Norjan öljy- ja kaasuyhdistysten suosituksia korjausten laajuuteen. Liitteeseen 2 taas on koostettu esimerkkikuvia lujitemuovirakenteiden vaurioista.

Laminaatin pinnan kuormittuminen ja heikkeneminen johtuu kemiallisen, korkeiden lämpötilojen, eroosion tai kaikkien näiden yhteisvaikutuksesta aiheutuvan kuormituksen yhdistelmästä. Pinnan kuormitus on yleensä ankarinta käyttöönottojen yhteydessä, koska prosessi voi olla tässä vaiheessa epästabiili eikä laminaatin pinnalle ole vielä tässä vaiheessa muodostunut mahdollista

suojaavaa kerrosta, mikä on esimerkiksi tietyissä saostusprosesseissa mahdollista. Mikäli havaitaan viitteitä pinnan heikkenemisestä, on tärkeää mitata ja arvioida niin sanotun rappeuman vakavuus. Usein pinnan heikkeneminen on odotettavissa eikä aiheuta toimenpiteitä, mikäli se rajoittuu suojakerrokseen eikä ole etenemässä tukikerrokseen. Mikäli suojakerroksessa on havaittavissa selkeää kulumista tai pehmenemää, on suojakerrosta syytä huoltaa. [8, s. 24]

Joissain tapauksissa esiintyy hartsin irtoamista laminaatin pinnasta. Tämä voi johtua lämmöstä, kemiallisesta korroosiosta, eroosiosta tai näiden yhteisvaikutuksesta. Mikäli pinta, jossa havaitaan hartsin vähenemää samea ja pintamatosta on jäämiä jäljellä, on hartsi todennäköisesti hajonnut lämmön, kemiallisen korroosion tai näiden yhteisvaikutuksesta prosessinesteen sekaan. Liitteen 2 kuvissa 1 ja 2 voidaan huomata tyypillinen kemiallisen korroosion ja korkean lämpötilan aiheuttama suojakerroksen vaurio. Mikäli riisuutunut pinta on kiiltävä, johtuu hartsin irtoaminen todennäköisesti eroosiosta. Eroosion aiheuttamista vaurioista esimerkit on nähtävissä liitteen 2 kuvissa 3 ja 4. Laminaatin sisäpinta tulisi tarkastaa riittävän usein, jotta eroosio tai korroosio ei pääse etenemään tukikerrokseen asti. Mikäli vaurion huomataan ulottuvan tukikerrokseen asti, on syytä aloittaa korjaavat toimenpiteet välittömästi. [8, s. 24, 30.]

Laminaattiin voi myös muodostua ajan myötä halkeilua ja murtumia, joiden juurisyy johtuu yleensä lujitemuovirakenteeseen kohdistuvan liiallisen lämmön tai mekaanisen rasituksen aiheuttamasta ylikuormituksesta. Yleensä rakenteen ikääntymisestä tai korkeista lämpötiloista johtuvat halkeilut ovat tunnistettavissa kuvionsa puolesta hämähäkinseittimäisenä. Kyseisen kaltainen halkeilu yleensä rajoittuu suojakerrokseen, jolloin halkeilu ei välttämättä tarkoita välittömiä korjaustoimenpiteitä. Tällöin vikaantunutta kohtaa on syytä seurata tiiviimmin. Erityisesti kohteissa, joissa komposiitti kuormittuu korkeiden lämpötilojen vaikutuksesta voi halkeilu johtaa tavallista nopeampaan suojakerroksen heikkenemiseen. Mikäli halkeamat ovat syviä tai ne sijaitsevat tukien tai jäykisteiden kohdalla tai niiden suuntaisesti, voi kyseessä olla rakenteellinen halkeama, joka johtuu mekaanisesta ylikuormituksesta. Tällöin komposiittirakenne on syytä tarkastaa lujitemuoveihin ja rakenteen lujuuteen erikoistuneen asiantuntijan toimesta. [8, s. 26.] Norjan öljy- ja kaasuyhdistyksen oppaassa sekä PSK- ja SFS-standardeissa suhtaudutaan vakavasti rakenteen läpäiseviin halkeamiin ja kyseiset viat olisikin syytä korjata välittömästi ja asianmukaisesti. [10, 11, 12]. Näiden seikkojen takia prosessi tulisikin pitää mahdollisimman stabiilina niin lämpötilojen, happamuuden kuin myös prosessiin liittyvän mekaanisen kuormituksen, kuten esimerkiksi paineiskujen suhteen. Vaikka äkkinäisiä venttiilien sulkemisia tulisikin välttää voi mm. prosessin ylös- ja alasajoissa aiheutua järjestelmään paineiskuja, jotka aiheuttavat erityisesti putkistoille suurta mekaanista rasitusta. [13.]

Liian korkeat lämpötilat erityisesti yhdessä vahvojen kemikaalien kanssa aiheuttavat myös laminaatin pehmenemistä ja jäykkyyden alenemaa. Mikäli lämpötila kohoaa lyhyeksi aikaa liian korkeaksi eikä laminaatti altistu kemialliselle kuormitukselle, voivat rakenteen entiset ominaisuudet palautua. Mikäli rakenteen huomataan tai epäillään pehmenneen pysyvästi, olisi hyvä tarkastella rakennetta syvemmin esimerkiksi akustisen emission tai kovuusmittauksen avulla. Jos laminaatin huomataan olevan pehmennyt liikaa, korjaavana toimenpiteenä voidaan hioa pehmennyt kerros pois ja tehdä korjauslaminointi vaurioituneeseen kohtaan. [14, 8, s. 26]

Tietyissä prosesseissa säiliön tai reaktorin pintaan voi muodostua tasainen kerros esimerkiksi sakkaa. Mikäli tämä kerros muodostuu tasaisesti eikä kasva liian paksuksi, alkaa kyseinen kerros toimia korkeilta lämpötiloilta ja prosessinesteen kiintoaineen aiheuttamalta mekaaniselta kuormitukselta suojaavana kerroksena. [14, 8, s. 24.] Jos kerroksessa ei siis huomata liiallista paksuutta tai suurta epätasaisuutta ei kyseistä kerrosta kannata turhaan pestä pois esimerkiksi seisokkien aikana. Mikäli säiliön sisäpinta kuitenkin halutaan tarkastaa silmämääräisesti, täytyy pinta pestä paljaaksi. Kuvan 6 reunoilla havaittavissa saostusreaktoreiden seiniin muodostuvaa suojaavaa kerrostumaa.





Kuva 6. Ehjä kiiltopintainen laminaatti. Kuvan reunoilla reaktorin sisäpintaan muodostunutta suo-  
jaavaa kerrosta.

#### 4 Kunnossapito ja kunnonvalvonta

Kunnossapidolle löytyy useita eri määritelmiä riippuen julkaisun ajankohdasta, kunnossapitolajista sekä määritelmän tekijän kokemuksesta kunnossapidon osa-alueilla. [15, s. 21]. Tässä työssä rajaamme kunnossapidon määritelmän kuitenkin Suomessa laajalti tunnettujen PSK- ja SFS-standardien mukaan.

PSK 6201 -standardin määritelmä kunnossapidosta on: ”Kunnossapito on kaikkien niiden teknisten, hallinnollisten ja johtamiseen liittyvien toimenpiteiden kokonaisuus, joiden tarkoituksena on säilyttää kohde tilassa tai palauttaa se tilaan, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon sen koko elinjakson aikana.”

Eurooppalaisen SFS-EN 13306 -standardin mukainen määritelmä kunnossapidolle taas kuuluu: ”Kunnossapito koostuu kaikista kohteen eliniän aikaisista teknisistä, hallinnollisista ja liikejohdollisista toimenpiteistä, joiden tarkoituksena on ylläpitää tai palauttaa kohteen toimintakyky sellaiseksi, että kohde pystyy suorittamaan vaaditun tehtävänannon.”

Käytännössä nämä määritelmät ovat lähes identtisiä toistensa kanssa ja määritelmissä tähdätään kohteen toimintaan sillä tasolla, kun sen olisi tarkoitus toimia. Kyseisten standardien puutteeksi voidaan kuitenkin mieltää, etteivät ne määrittele tarkkaan kuka tai mikä määrittelee kohteen toimintakyvyn vaadittavalla tasolla. Kun yrityksessä ja laitteen käyttäjillä on selkeä näkemys kohteen toimintakyvyn vaatimuksista, voidaan asettaa myös kunnossapidolle selkeät tavoitteet ja tämän perusteella määrittää millaista kunnossapidollista toimintaa kohde vaatii, jolloin yrityksen kunnossapitostrategiaakin on mahdollista kehittää. [15, s. 26.]

Kunnossapito sisältää siis muutakin kuin vikojen korjausta. Kokonaisvaltainen kunnossapito pitää sisällään parantavan kunnossapidon, ennakkoivan kunnossapidon tai kunnonvalvonnan, ehkäisevän kunnossapidon sekä korjaavan kunnossapidon. Kunnossapidon kannattavuuden kannalta olisi syytä panostaa siihen, että häiriökorjausten ja odottamattomien seisokkien osuus saataisiin pidettyä mahdollisimman pienenä, johon voidaan vaikuttaa suunnitellun kunnossapidon onnistumisella. [15, s. 22, 41.]

Kunnonvalvonta taas on yksi PSK-standardeissa määritellyn ehkäisevän kunnossapidon osa-alue. Standardin PSK 6201 mukaan kunnonvalvonnalla pyritään määrittelemään tarkasteltavan koh-

teen toimintakuntaa tarkasteluhetkellä ja sen kehittymistä tulevaisuudessa, jotta voitaisiin määrittää kohteen vikaantumis- huolto- ja korjausajankohtaa. Kunnonvalvonnassa voidaan hyödyntää mitä tahansa toimenpiteitä aistinvaraisista ja mittalaittein hyödynnettävistä tekniikoista, mikäli kyseisellä toimenpiteellä voidaan valvoa ja tuottaa informaatiota kohteen vikaantumisesta. Kun tarvittavat lähtötiedot on kerätty, pyritään aineistoa analysoimaan, jotta kunnossapitoon ja korjaussuunnitteluun saadaan ennustettavuutta. [15, s. 97.]

Jotta kunnonvalvonnalla olisi edellytykset menestyä, vaatii se vikaantuvien kohteiden osien, vikaantumismekanismien, eri kunnonvalvontatekniikoiden, ja valvottavien suureiden ymmärtämistä. Kun kunnonvalvontaan halutaan kokonaisvaltaisuutta, olisi syytä hyödyntää eri kunnonvalvontamenetelmiä monipuolisesti. Kun eri kunnonvalvontatekniikat tunnetaan, voidaan asettaa menetelmäkohtaiset raja-arvot ja kohteeseen sopivat menetelmät. Valvottavat kohteet tulee rajata ja tämän jälkeen voidaan alkaa rakentamaan kunnonvalvontasuunnitelmaa, jossa määritellään käytettävät menetelmät ja raja-arvot, mittausvälit, käytettävät mittausjärjestelmät ja mitausten dokumentointi sekä analysointi. [15, s. 167.]

Kunnonvalvonnan haasteiksi voidaan lukea selvästi pitkäjänteisyyden puute kunnonvalvonnan käynnistämisessä, asiantuntemuksen puute, resurssien vähäisyys sekä dokumentaation puutteellisuus kunnonvalvonnassa, korjaavissa töissä, kuin myös laitehankinnoissa. Tyypillisesti tuloksia aletaan saada noin vuoden päästä kunnonvalvonnan aloittamisesta, jolloin dataa on saatu kerättyä ja analysoitua tarpeellinen määrä. Henkilöstön koulutus tai itsenäinen ammattitaidon kehittäminen kunnonvalvontaan liittyen on myöskin tärkeää. Mikäli henkilöstö ei ymmärrä kohteen vikaantumista, tai sillä ei ole aikaa mitata tai tulkita mittauksissa tai korjaavassa kunnossapidossa esiin tulleita havaintoja, on hyvin haasteellista alkaa kehittää enakkohuoltoja järkevästi. Myöskin dokumentaatio on tärkeää kohteen koko elinkaaren ajalta. Mikäli valvottavan kohteen tarkat ominaisuudet eivät ole tiedossa jo valmistushetkestä lähtien, vaikeutuu kerättävän datan analysointi sekä vikojen tunnistaminen huomattavan paljon. [15, s. 175.]

## 5 Lainsäädäntö

### 5.1 Kemikaaliputkistojen kunnonvalvontaan liittyvät säädökset

Lainsäädäntö määrittää myöskin kemikaaliputkistojen kunnonvalvontaan liittyviä asioita. Toiminnanharjoittajan tulee kemikaaliturvallisuuslain (390/2005) 12§ mukaan suorittaa tarvittavia kunnossapidollisia toimenpiteitä laitteiston ja laitteistojen turvallisuuden ja toimintavarmuuden varmistamiseksi. Myöskin asetus (856/2012) 63§ edellyttää toiminnanharjoittajan laativan kunnonvalvontasuunnitelman, jolla varmistetaan putkistojen toimivuus ja asianmukainen toimintakunto. Menetelmiä, joita kunnonvalvontasuunnitelman noudattamisessa kemikaaliputkistoille voidaan hyödyntää ovat ennakko- huollot, testaukset ja tarkastukset. Käytännössä tämä tarkoittaa putkiston materiaalista ja vaatimusluokasta riippuen vähintäänkin silmämääräistä tarkastusta sekä ultraäänellä, radiografialla tai tunkeumanesteellä suoritettavia tarkastuksia kunnossapito- ja tarkastussuunnitelmaan mukaisesti. [16, s. 23–24.]

Lujitemuoviputkistojen kunnonvalvontaan Tukesin kemikaaliopas suosittaa kerta- ja kestopuovista valmistetuille kemikaaliputkistoille sovellettavan samoja kunnonvalvontaohjeita kuin metalliputkillekin. Tärkeimpinä tarkastusmenetelminä suositellaan silmämääräistä tarkastusta sekä paine- ja tiiveyskokeita. [16, s. 22–23.]

### 5.2 ATEX-lainsäädäntö

ATEX-lainsäädännöllä tarkoitetaan vuonna 2003 voimaan astunutta Euroopan yhteisön 94/9/EY ja 1999/92/EY laite- ja työolosuhdedirektiiveihin pohjautuvaa lainsäädäntöä. Kyseisellä lainsäädännöllä pyritään turvaamaan räjähdysvaarallisten tilojen turvallisuus. Räjähdysvaara voi aiheutua mm. syttyivistä nesteistä, pölyistä tai kaasuista. Tällaiset räjähdysvaaralliset tilat ovat Ex-tiloja, joissa tulisi käyttää kyseisiin tiloihin tarkoitettuja laitteita eli Ex-laitteita. Lujitemuovin kunnonvalvontaan soveltuvat laitteet ovat pääasiassa Ex-luokittelemattomia laitteita, jotka jo itsessään luokitellaan syttymislähteiksi. Lisäksi eri mittaustavat voivat perustua menetelmiin, jotka luokitellaan ATEX-lainsäädännössä syttymislähteiksi. Tyypillisiä esimerkkejä syttymislähteistä ovat sähkömagneettinen säteily, ionisoiva säteily ja ultraääni. [17, s. 3, 4, 10.]

Terrafamen alueella iso osa kriittisistä lujitemuovirakenteista sijaitsee Ex-tiloissa, mikä aiheuttaa osaltaan haasteita kunnonvalvonnalle. Jatkuvasti toimivat Ex-luokittelemattomat kunnonvalvontajärjestelmät ovat käytännössä poissuljettuja. Kunnonvalvontakierroksia on kuitenkin mahdollista suorittaa, vaikka kunnonvalvontaan käytettävät laitteet eivät olisikaan Ex-luokiteltuja. Tämä vaatii kuitenkin erillisen riskienarvioinnin, jossa käydään läpi vaarojen tunnistaminen, riskille alttiina olevien työntekijöiden henkilöllisyys ja pätevyys, riskin määrällinen ja laadullinen arviointi, arvio riskin poistamisen mahdollisuudesta sekä mahdollisuudet riskien pienentämiseen tai hallintaan, mikäli kaikkia riskejä ei voida poistaa. Tyypillisiä menetelmiä riskien hallintaan tai pienentämiseen on räjähdysvaarallisten ilmaseosten syntymisen estäminen vähentämällä palavien aineiden käyttöä tai alentamalla laitteiden sisäisen räjähdyskelpoisen kaasuseoksen happipitoisuutta. Mikäli räjähdysvaarallisten ilmaseosten syntymistä ei voida estää, on syttymislähteitä vältettävä tai niiden esiintymisen todennäköisyyttä pienennettävä esimerkiksi laitevalinnoilla. [17, s. 6, 10.]

## 6 Lujitemuovien kunnonvalvonta

Verrattuna teräksestä valmistettujen rakenteiden kunnonvalvonnan laajuuteen lujitemuovirakenteiden kunnonvalvonta Suomessa on melko pienimuotoista ja kemikaalinkestävien komposiittien kunnonvalvonnan tuntemus rajoittuu kohtalaisen pienelle ryhmälle. Tästä osoituksena voidaan huomata, että esimerkiksi Tukesin kemikaaliputkistojen turvallisuusvaatimukset -oppaassa muovi- ja lujitemuoviputkien osuus on melko typistetty. [16, s. 22].

Ensimmäinen vaihe lujitemuovirakenteiden järjestelmällisen kunnonvalvonnan suhteen on ymmärtää millaisten rakenteiden ja järjestelmien kanssa ollaan tekemisissä. Tätä varten tulisi kerätä niin paljon taustatietoa kohteista kuin mahdollista. Hyödyllistä informaatiota saadaan mm. kohteen päämittapiirroksista, aikaisemmista tarkastus- tai korjausraporteista, seinämävahvuuspöytäkirjoista sekä kelaus, tai laminointipöytäkirjoista. Joskus voidaan huomata kuitenkin, että dokumentointi voi olla jäänyt puutteelliselle tasolle tai tiedonkeruujärjestelmä ei ole toiminut tavoitellulla tasolla ja tarpeellista informaatiota on huomattavasti vähemmän kuin sitä tulisi olla. [8, s. 27.]

Tarkasteltavasta järjestelmästä olisi hyvä kerätä myös lisätietoja tai havaintoja, joita ei välttämättä ole kirjattu erikseen. Tämän tyyppisiä tietoja saadaan yleensä esimerkiksi prosessilaitteiden käyttäjiltä tai kunnossapitäjiltä. Lisätiedon keruuseen kuuluu myös prosessissa tapahtuneet muutokset, joille laite on altistunut. Esimerkiksi millaiselle kemialliselle kuormitukselle kohde on suunniteltu, vastaako prosessi tätä ja onko prosessia muutettu esimerkiksi lämpötilan, pH-arvon tai virtaamien suhteen. Selvitetyt tiedot tulisi kerätä raportiksi ja liittää laitteen tai ennakkohuollon tietoihin. [8, s. 27.]

Kun alustavat tiedot tarkasteltavista komposiittirakenteista on kerätty ja tarkasteltu mahdollisimman laajalti, voidaan kohteiden kunnonvalvontaa alkaa järjestelmällisesti toteuttaa. Aluksi määritellään kohteiden lähtötaso, johon kaikkia tulevia tarkastuksia tullaan vertaamaan. Tällä tapaa päästään selville mahdollisten vikojen tai havaintojen kehittymisestä tarkasteltavissa kohteissa. Mikäli järjestelmällistä kunnonvalvontaa aletaan suorittamaan jo tuotannon käytössä olleille komposiittirakenteille, voi kyseisissä kohteissa olla jo havaittavissa merkkejä kuormituksesta tai laminaatin vikaantumisen alkamisesta. Tämän ei kuitenkaan tulisi vaikuttaa lähtötason määrittämiseen muulla tavoin kuin havaintojen oikeaoppisena dokumentointina. Tulevissa tarkastuksissa uusia laminaatin kunnossa tapahtuneita poikkeamia verrataan lähtötasotarkastuksesta tehtyyn dokumentaatioon. [8, s. 27–28.]

Lujitemuovisäiliöiden kunnonvalvontaohjelmaan tulisi kuulua tarpeeksi kattavat käynnin aikaiset ja seisokkien aikana tapahtuvat tarkastukset. Säiliöiden ja putkistojen käynnin aikana tapahtuviin tarkastuksiin kuuluvat pääasiassa silmämääräiset tarkastukset, joissa pyritään löytämään merkkejä laminaatin pettämisestä. Halkeamat putkiyhteiden, jäykisteiden tai tukien kohdalla voivat viitata laminaatin tukikerroksen kohdistuvaan liialliseen kuormitukseen, kiteymät vuotoihin ja värimuutokset laminaatin vikaantumiseen esimerkiksi kemiallisen korroosion tai delaminaation muodossa. [8. s. 28] Ulkopuolisessa tarkastuksessa voidaan hyödyntää myös muita ainetta rikkomattomia tarkastusmenetelmiä eli ndt-menetelmiä, kuten esimerkiksi lämpökuvausta, jos mitattavan kohteen ja ympäristön välinen lämpötilaero on tarpeeksi suuri tai ultraäänimittauksia, mikäli ultraäänen takaseinäkaiku saadaan tarpeeksi voimakkaana esiin. Molemmilla menetelmillä voidaan mitata seinämävahvuuden muutoksia ja esimerkiksi delaminaation kaltaista vikaantumaa laminaatissa. [16, 17.] Käynnin aikaisia tarkastuksia voitaisiin myöskin tehostaa laminoimalla lujitemuoviin erilaisia indikaattoreita, kuten esimerkiksi anturein seurattavia tageja, joilla voidaan seurata esimerkiksi suojakerrokseen kohdistuvaa eroosiota. [6, s. 318.]

Seisokitarkastuksen yhteydessä saadaan tyypillisesti konkreettisempia tuloksia. Tällöin visuaalisessa tarkastuksessa päästään havainnoimaan tarkasti eroosion ja korroosion aiheuttamat poikkeamat. [8, s. 29–30.] Lisäksi voidaan mitata seinämän pinnan kunto kovuusmittauksilla ja käyttää seinämävahvuuden mittaukseen magneettista tai ultraäänimittalaitetta, kun säiliössä oleva neste ei aiheuta häiriöitä mittauksiin.

Haasteita lujitemuovien kunnonvalvonnan suhteen asettaa materiaalin heterogeenisyys, jolloin laminaatin rakenne ei ole täysin yhdenmukaista eri kohdissa kappaletta tai eri valmistuserien kesken. [6, s. 312.] Myöskään tämän vuoksi lujitemuovin NDT-tarkastuksilla ei päästä yhtä tarkkoihin tuloksiin kuin esimerkiksi terästen kanssa. Mittausepä tarkkuudesta johtuvaa ongelmaa voidaan kuitenkin ehkäistä tekemällä mittaukset tietyistä pisteistä kohdetta ja vertaamalla tulevia mittauksia ensimmäiseen mitattuun arvoon. Tätä kutustaan referenssipisteen ottamiseksi ja referenssimittausten suorittamiseksi. Vaikka ensimmäisellä kerralla ei saataisikaan tarkkaa kuvaa esimerkiksi kohteen seinämävahvuudesta, voidaan mitata kohteessa tapahtuvia muutoksia. Teräksillä, jotka ovat homogeenisiä aineita, voidaan esimerkiksi ultraäänitarkastuksessa laitteisto säätää yksinkertaisimmillaan tunnetun terästyypin äänennopeuden mukaan kaavalla 2 ja mittaus-tarkkuudeksi saavutetaan jopa 0,01 mm. [15, s. 450; 20, s. 20.]

$$\text{äänitie} = \frac{\text{äänenopeus} \cdot \text{aika}}{2} \quad (2) \text{ [20, s. 20].}$$

Lujitemuovin kunnonvalvonnan haasteeksi voidaan lukea myös eri vikojen todentaminen. Esimerkiksi laminaatin visuaalisessa tarkastuksessa useammat eri vauriot kuten kemialliset vauriot, delaminaatio tai osmoosiokuplat voivat näkyä värimuunnoksina erityisesti ulkoisessa tarkastuksessa. [11, s. 3].

Lujitemuovin kunnonvalvonnan subjektiivisen luonteen takia tarkastajan onkin kyettävä panostamaan kunnonvalvonnassa mittauksen määrittämiseen. Mittauksiin tulisikin kuulua kohteen muodonmuutoksien dokumentointi, seinämävahvuuden mittaus ja suojakerroksen paksuuden määrittely, laminaatin kovuusmittaukset ja kuvat poikkeamista mielellään siten, että poikkeaman koko on hahmotettavissa. Lisäksi poikkeamat tulisi merkitä esimerkiksi päämittapiirrokseen, jolloin saadaan dokumentoitua, mikäli kohde vikaantuu jostain tietyistä kohtaa muuta rakennetta useammin. [8, s. 28.]

## 6.1 Visuaalinen tarkastus

Visuaalinen tarkastus on edelleen käytetyin menetelmä lujitemuovirakenteiden kunnonvalvonnassa ja sen etuina onkin menetelmän yksinkertaisuus ja tehokkuus. [6, s. 312]. Menetelmän haittana nähdään usein sen subjektiivinen luonne, mutta mikäli tarkastaja on lujitemuovin rakenteen ja sen vikaantumisen hyvin tunteva henkilö ja dokumentaatio niin kirjalliselta osalta kuin kuvienkin osalta on riittävällä tasolla, voidaan lujitemuovin vikaantumisen taso määritellä hyvinkin tarkasti. Visuaalisessa tarkastuksessa lujitemuovista pyritään etsimään rakenteessa havaittavat poikkeamat, joita ovat mm. eroosion tai korroosion jättämät jäljet, pullistumat, delaminaatiot, halkeamat, rakkulat, lohkeamat, isku- tai raapaisujäljet, muodonmuutokset tai värimuutokset. [12.] Erityisen tehokas silmämääräinen tarkastus on kohteissa, joissa laminaatti on valoa läpäisevää ja värjäämätöntä, jolloin valoa apuna käyttäen voidaan havaita myös syvemmillä laminaatissa olevia vaurioita. [6, s. 312].

## 6.2 Kovuusmittaus

Lasikuitulujitettujen muovien ja laminaattien kovuuden mittaamiseen käytetään likimääräistä Barcol-kovuuden mittausta. Barcol-kovuusmittauksen suorittaminen tapahtuu siten, että Barcol-mittalaitteen kartiomainen tylppä piikki painetaan mitattavan kappaleen pintaan, jolloin piikki



uppoaa mitattavaan kappaleeseen ja laitteen antama lukema määrittää Barcol-kovuusarvon. Kyseinen kovuusarvo on verrannollinen piikin tunkeutumisyyvyyteen mitattavan kappaleen pinnassa. Kovuusasteikko on 0–100 ja 1 barcol-kovuuden yksikkö merkitsee 0,0076 mm eroa painauman syvyydessä. Barcol-kovuusarvo 100 merkitsee siis 0,00 mm painauma ja kovuusarvo 0 taas 0,760 mm painauma, joka on myös piikin maksimipainauma. [6, s. 292; 20.] Uusia kappaleita mitatessa kovuuden tulee olla 90 % hartsin valmistajan antamasta kovuusarvosta. [22, s. 2]. Lämpötilassa 25 °C Barcol-lukema 30 on kuitenkin yleisesti ottaen sallittu arvo. [8, s. 15].

Mitattavan alueen tulisi olla vapaa selkeästi erottuvista mekaanisista vaurioista kuten koloista ja naarmuista. Mitattavan kappaleen seinämävahvuus ei saa olla alle 1,5 mm ohut, eikä mittauspiste saa olla alle 3 mm:n etäisyydellä mitattavan kappaleen reunoista tai edellisistä mittauspisteistä. Mittalaite tulee myöskin asettaa tukevasti mitattavaa pintaa vasten, eikä mittauksissa saa esiintyä mittalaitteen luistamista kappaleen pinnalla. [21, s. 6–8.] Kohteeseen suoritetaan 12 mittausta, joista korkein ja matalin mittaustulos hylätään ja jäljelle jääneiden 10:n mittauksen tuloksista lasketaan keskiarvo. [8, s. 15].

Erilaisille kuormituksille altistuneen ja ehkä jo osittain heikentyneen kohteen kovuusarvot eivät ole enää samalla tasolla kuin uudessa laminaatissa. Vaikka heikentyneen laminaatin pintaa olisi korjattu voi mittaustulosten kesken esiintyä voimakasta vaihtelua, joka on mittauksissa otettava huomioon. [21, s. 8]. Vanhaa laminaattia mitatessa tulisikin arvioida lujitemuovin vikaantumisen tuntevan asiantuntijan näkemysten sekä muiden kunnonvalvontatarkastusten perusteella vaurion etenemisaste.

### 6.3 Akustinen emissio

Akustinen emissio perustuu kappaletta kuormittaessa kohteen rakenteeseen sitoutuneen energian purkautumisen mittaamiseen. Kohdetta kuormittaessa esimerkiksi säiliön painekokeen aikana säiliön matriisiin voi syntyä mikroskooppisia säröjä, kuitu-/matriisisidokset voivat pettää tai yksittäiset kuidut katketa, joista aiheutuu korkeataajuisia yli 20 kHz värähtelyä, jota mitataan akustisen emission mittaamiseen tarkoitetuilla pietsokideantureilla. Kun mitattavaan säiliöön asennetaan useita eri paikkoihin sijoitettuja antureita, voidaan paikantaa aluetta, jossa vaurioita syntyy ja joka on altis vaurioitumiselle tulevaisuudessa. [23, 6, s. 316–317.] Akustisella emissiolla tunnistettavia vaurioita lujitemuovissa ovat juurikin matriisin halkeamat, kuitujen pettämiset,

matriisiin ja kuitujen irtoaminen toisistaan ja tätä kautta rakenteen sisäinen delaminaatio. [24, s. 8].

Akustisen emission mittaamista kenttäolosuhteissa vaikeuttavat ympäröivän alueen häiriölähteet, joita ovat esimerkiksi operatiivinen ja mekaaninen melu käynnissä olevasta prosessista, elektroninen kohina sähkömagneettisista- tai radiotaajuushäiriöistä ja muut ympäristötekijät kuten sääolosuhteet ulkotiloissa sijaitsevilla kohteilla. [23, s. 6].

#### 6.4 Ultraäänitarkastus

Ultraäänitarkastus perustuu hyvään äänenjohtavuuskykyyn kiinteissä materiaaleissa. Kappaleen rajapinnat ja sisäiset epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat äänen heijastumista, jota ultraäänimittalaitteella tarkastellaan. [20, s. 4].

Ultraäänitarkastuksessa äänen kulkua voidaan mitata joko pulssikaikumenetelmällä tai läpäisymenetelmällä. Pulssikaikumenetelmässä mitataan lähettimen ja vastaanottimen yhdistelmäluotaimella kohteen takaseinästä palaavaa kaikua tai useampia kerrannaiskaikuja. Läpäisymenetelmällä äänipulssi lähetetään erillisellä luotaimella ja mitataan seinämän toiselta puolelta siihen tarkoitetulla vastaanottimella. [6, s. 312–314]. Yleisin ultraäänimittaustapa on pulssikaikumenetelmä, jossa mittaus perustuu äänipulssin mittausaikaan. Kun tiedetään äänen nopeus mitattavassa kappaleessa, voidaan äänen kulkuajan perusteella laskea takaseinämän etäisyys, josta pulssi palautuu luotaimeen. Tätä laskukaavaa kuitenkin ultraäänimittaja ei tarvitse, vaan mittalaitte säädetään kalibrointipalalla. [20, s. 20.]

Ultraäänen paksuusmittauksen varsinainen työkalu on luotain, joka lähettää ja vastaanottaa kappaleeseen lähetettävän sähköpulsin. [20, s. 5]. Kappaleen paksuuden mittaukseen on saatavilla laaja valikoima erilaisia luotaimia, jotka vaihtelevat kokonsa, kotelotyyppin tai taajuuksien mukaan. Tyypillisesti luotaimen sisältämä aktiivinen elementti on kuitenkin pietsosähköinen muunnin, joka muuntaa sähköpulsin mekaaniseksi energiaksi eli ultraäänivärähtelyksi. Elementti on suojattu tyypillisesti kulutus- tai iskulevyllä ja tuettu vaimennusmateriaalilla. Vaimennusmateriaalin tehtävä on vaimentaa anturi, kun vastaanotettu äänipulssi on generoitu ja täten ehkäistä mittaushäiriötä. Yleensä kaikki seinämänpaksuuden mittaamiseen käytettävät normaaliluotaimet sisältävät luotaimen peruskomponentit eli aktiivielementin, suojauksen ja vaimennuksen. Lisäksi on olemassa kaksoiselementtiluotaimia, jotka eroavat normaaliluotaimista siten, että niissä on erilliset lähetys- ja vastaanottoelementit, jotka ovat erotettu akustisella eristeellä toisistaan. [25.] Lisäksi

kaskoiskideluotaimissa elementtien eteen on asennettu integroitu viive, jonka takia lähtöpulssi ei ole näkyvissä kuvapinnalla. Tämä mahdollistaa lähellä pintaa olevien epäjatkuvuuksien sekä hyvin ohutseinämäisten kappaleiden mittaamisen. [20, s. 19].

Ultraäänimittauksen onnistumisen edellytyksenä on luotaimen ja mitattavan kappaleen välinen akustinen kytkentä. KytKentä voidaan luoda suoralla kontaktilla, vedellä tai geelimäisellä aineella. [6, s. 313]. Lujitemuovin ultraäänimittauksessa suurimmat ongelmat syntyvät materiaalin epähomogeenisyydestä sekä ultraäänien voimakkaasta vaimentumisesta lujitemuovirakenteessa. Tämä aiheuttaa sen, ettei tarkkaa mittaustulosta saada, mikäli kalibrointikappale ei ole juuri samasta erästä valmistettu kuin itse mitattava rakenne. Lujitemuovin voimakkaan äänenvaimennuksen takia suositellaan käytettävän matalataajuuksisia 0,25–4 MHz luotaimia. [26, s. 75; 19, s. 3.] Mikäli mitattava kohde on nestetäytteinen saattaa materiaalin äänenvaimennuksen sekä lujitemuovimateriaalien ja nesteiden akustisten impedanssien pienen eron takaseinäkaiku jäädä liian heikoksi luotettavan mittaustuloksen saamiseksi. [19, s. 3]. Äänenvaimenemista voidaan ehkäistä matalammalla taajuudella sekä isommalla luotaimella. Tämä kuitenkin vähentää epäjatkuvuuskohdista aiheutuvaa pulssinhajontaa, jolloin myös luotaimen erottelukyky heikkenee ja rakenteessa olevat pienet viat voivat jäädä huomaamatta. [26, s. 75.]

Ultraäänien avulla mitataan tyypillisesti lujitemuovirakenteen seinämävahvuutta tai sen muutoksia. Menetelmällä voidaan mitata myös vikoja, jotka aiheuttavat rakenteeseen laminaatin suuntaisia epäjatkuvuuskohtia, kuten esimerkiksi delaminaatiot, onkalot, liiman puute muhvilii-toksissa [6, s. 314; 26, s. 75.] Vaikka tarkkaan seinämävahvuuden määrittämiseen vaaditaan tutkittavan materiaalin kanssa samaa erää oleva kalibrointipala, voidaan lujitemuovirakenteen kuntoa valvoa luomalla ensimmäisestä mittauksesta referenssimittaus ja valitsemalla referenssimittauspisteet. Referenssimittauksesta tehdään pöytäkirja, jossa kerrotaan laitteen tyyppi, valmistusnumero, laitteen asetukset ja käytetty kalibrointipala. Tämän pöytäkirjan perusteella tehdään tulevat kunnonvalvontamittaukset, jolloin tehdyt tarkastukset ovat keskenään vertailukelpoisia. [19, s. 2–3.]

## 6.5 Teollinen radiografia

Digitaaliröntgenissä tutkittava kappale asetetaan röntgensäteilylähteen ja vastaanottimen väliin. Röntgensäteily kohdistetaan kappaleeseen ja vastapuolelta mitataan röntgensäteilyn läpäisy eri kohdissa kappaletta. Filmille tai sähköisellä vastaanottimella näytölle piirtyvän mustavalkokuvan

avulla voidaan havaita paksuuden ja tiheyden muutokset eri kohdissa kappaletta ja tätä kautta materiaalin epäjatkuvuuskohdat. [27.]

Mitattavan kappaleen pinnan laatu ei juurikaan vaikuta röntgentarkastuksen onnistumiseen, mutta röntgenin keila tulee olla suunnattu kappaleeseen nähden oikein, jotta laminaattirakenteen viat voidaan selkeästi havaita. [26, s. 75]. Röntgentarkastuksella voidaan havaita seinämävahvuuden muutoksien lisäksi erityisesti rakenteen paksuussuunnassa olevat viat kuten huokokset, onkalot, liimattujen muhviilitosten väärä asemointi ja säröt. [6, s. 316].

Lujitemuovi materiaalina tuo omat haasteensa röntgentarkasteluun. Matriisit ja lujitteet ovat melko läpinäkyviä säteilyn suhteen, joten esimerkiksi pienet tai laminaatin suuntaiset vauriot kuten delaminaatiot ovat vaikeasti havaittavia, ellei röntgenin keilaa onnistuta asettamaan laminaatin ja vaurion suuntaisesti. [6, s. 316]. Vaikeastikin havaittavat vauriot ovat kuitenkin selkeästi havaittavissa siinä vaiheessa, kun vauriot alkavat täyttyä esimerkiksi nesteellä vaikei tätä ulkoisesti vielä voitaisikaan havaita. [26, s. 75]. Röntgenin käytettävyyteen vaikuttaa myöskin mittaus-ten esivalmistelut. Pienten kappaleiden röntgenkuvauksia voidaan rajata sitä varten suunniteltuun huoneeseen, joka on varustettu säteilyhälyttimellä, merkkivalolla ja turvakytkimellä, mutta suurien kappaleiden tarkastuksissa säteilylähteiden käyttö vaatii tarkat alue-eristykset. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että muiden kuin kuvaukseen osallistuvien henkilöiden alueella oleskelu on kielletty. [28, s. 258.]

## 6.6 Lämpökuvaus

Lämpökuvauksella pyritään löytämään vaurioita havainnoimalla paikallisia lämpötilaeroja lujitemuovikappaleen pinnalla. Lämpökameratarkastuksessa kappaleen toista pintaa lämmitetään tasaisesti lämpölähteellä, kuten esimerkiksi lämpimällä nesteellä. Mitattavan kappaleen ollessa tasalaatuinen myös lämmönjohtavuusominaisuudet ovat paikasta riippumattomia. Mikäli rakenteessa on kuitenkin vaurioita, kuten huokosia tai kerrosirtoamaa, huonontavat nämä lämmönjohtavuutta. [6, s. 318.] Vastaavasti taas esimerkiksi onkalot ja seinämän ohenemat voivat näkyä lämpökameran kuvassa muuta aluetta lämpimämpänä alueena. Vaikka lämpökameralla voidaan havaita tiettyjä muutoksia rakenteessa, vaatii lämpökameralla havaitun poikkeaman syyn tarkempi selvitys yleensä muita tarkentavia mittauksia tai tutkimuksia. Lämpökuvaus on kuitenkin olosuhteiden salliessa hyvä keino esimerkiksi kuntokartoitusten tekemiseen, jolloin voidaan sel-

vittää kohteet, joita olisi syytä tarkastella muilla tarkemmilla, mutta mahdollisesti paikallisemmilla menetelmillä. Lämpökameralla suoritettavassa kunnonvalvonnassa täytyy kuitenkin ottaa huomioon mittausolosuhteiden vakioiminen. [18, s. 2-5.]

Lämpökameralla kunnonvalvontaa suoritettaessa huomioon otettavia asioita ovat:

- Kuvauskohta tulee merkitä ja kuvauskohdan tulee olla aina sama.
- Kameran asetuksien tulee olla joka kuvauskerralla samat.
- Kuvattavan pinnan tulee olla puhdas.
- Ympäristöolosuhteet ja ympäristön olosuhteiden muutokset tulee ottaa huomioon.
- Prosessiolosuhteet mitattavan kohteen sisällä tulisi pyrkiä pitämään mahdollisimman samanlaisina joka kuvauskerralla.
- Mittaustulokset ja olosuhteet on dokumentoitava asianmukaisesti, jotta prosessin tai ympäröivien tilojen muutoksia ei tulkita poikkeamiksi tarkasteltavassa kohteessa.

[18 s. 5.]

PSK6316-standardi suositaa lämpökuvauksessa tarkasteltavina kohteina otettavan huomioon erityisesti putkistoissa käyrät, T-haarat, liitokset ja yhteen. Säiliöissä ja reaktoreissa huomioon otettavia kohteita ovat erityisesti liitokset sekä sekoittimien aiheuttamat voimakkaammat virtausalueet. Mitattavan kohteen ja ympäristön lämpötilaeron tulisi olla vähintään  $\pm 10$  °C. [18, s. 3.]

Kameran lämpöerotuskyvyn tulee olla vähintään 0,1 °C ja kameran resoluution tulisi olla minimissään 120 x 120 pikseliä. Lujitemuovituotteita kuvatessa kameran emissiokertoimeksi asetetaan tyypillisesti 0,95 ja lämpötilan mittausalue asetetaan siten, että ympäristön lämpötila jää mittausalueen ulkopuolelle. [18, s. 4.]

## 6.7 Jatkuva kunnonvalvonta

Jatkuvaan kunnonvalvontaan kuuluvat erilaiset kiinteästi laminaattiin asennetut kunnonvalvontaratkaisut. Tällaisia voivat olla esimerkiksi rakenteen valmistusvaiheessa kerrosten sisään lamioidut tunnistimet tai anturit, joiden avulla voidaan havaita esimerkiksi sulkukerroksen kulumaa

tai komposiittiin vaikuttavia kuormituksia. Yksinkertaisimmillaan tunnistimet voivat olla esimerkiksi sulkukerroksen sisään laminoitavia indikaattoreita, joiden tilan muutoksia voidaan mitata. [6, s. 318.] Tällaisia ovat esimerkiksi induktioon perustuvat ilmaisimet kuten sopiva metallikapale tai radiotaajuuteen perustuvat ilmaisimet kuten RFID-tunnisteet [29]. Korroosion mittauksessa voidaan hyödyntää myöskin matalajännitteisen sähköpiirin mittausta, jolloin sulkukerroksen kuluessa tarpeeksi sähköpiiri keskeytyy prosessinesteen vaurioittaessa sähköpiiriä [30]. Vastuslangan sisällyttäminen komposiittiin voi olla kuitenkin haasteellista johtuen komposiitin kerroksittaisesta rakenteesta. Kaikkien laminaatin kuntoon vaikuttavien älykkäiden ratkaisujen ei tarvitse olla välttämättä laminaatin sisäisiä vaan myös laminaatin pinnan kuormitustilaa voidaan mitata esimerkiksi pinnan lämpötilaa tai värähtelyä mittaamalla. [6, s. 318].

Pelkän kunnonvalvonnan lisäksi älykkäiden komposiittien avulla voidaan pyrkiä myös aktiivisiin toimintoihin, jolloin komposiitista mitattu data siirretään ohjauskeskukseen, joka tarvittaessa itse säätää prosessia, mikäli kuormitustilat vaikuttavat nousevan liian suuriksi [6, s. 318].

## 6.8 Kalvonpaksuusmittarit

Joissain tapauksissa muovikomposiittien seinämävahvuuden mittaamiseen voidaan käyttää kalvonpaksuusmittareita, mikäli vastakkaiselle seinämälle voidaan asettaa sähköä johtavaa materiaalia. Erittäin paksujen kalvojen mittauksissa virhemarginaali alkaa kuitenkin kasvaa sen mukaan mitä paksumpi mitattava kalvo on. Myöskin paksujen kalvojen mittauksiin käytettävien luotainten suuri halkaisija vaikeuttaa jyrkästi kaareutuvien pintojen mittausta johtuen luotaimen huonosta istuvuudesta pinnalle. Erikoisluotaimilla varustelluilla kalvonpaksuusmittareiden mittausetäisyys ulottuu tyypillisesti maksimissaan 25–31 mm saakka. Joissain tapauksissa voidaan päästä jopa 70 mm vahvuuksiin asti. [31, s. 19; 32, s. 2.] Kyseiset kalvonpaksuusmittarit voivat perustua joko magneettisen induktion tai pyörrevirran lähtösignaalin ja pinnoitteen paksuuden väliseen funktionaaliseen korrelaatioon. [33, 34]. Nämä mittarit sopivat kuitenkin ainoastaan suuntaa antaviksi välineiksi seinämän vahvuuden mittaamiseen. Itse lujitemuovin vauriota näillä ei voida havaita.

## 7 Mitattavat kohteet

Opinnäytetyön mielekkään työmäärän ja pituuden säilyttämiseksi ei vielä tässä vaiheessa ollut tarkoitus lähteä toteuttamaan kaikkia EH-suunnitelman tai kriittisyysarvion mukaisia kohteita, vaan mitattavat kohteet pidettiin melko tiiviinä pakettina.

Kun opinnäytetyön aihe oli saatu pääpiirteittäin selvitettyä, kävimme liuoslinjan kunnossapidon työsuunnittelijan ja kunnossapitoinsinöörin kanssa läpi vaihtoehtoja, jotka olisivat mitattavissa kohtuullisella vaivalla normaalien huoltoseisokkien yhteydessä. Tarkasteltaviksi kohteiksi valikoitui rikkivedyn imeytysreaktori, esineutraloinnin 1-linjan ylitepumpun painepuolen yhde ja yhteistyökumppanimme valmistamat koepalat.

### 7.1 Rikkivedyn imeytysreaktori

Suurimmaksi yksittäiseksi tarkasteltavaksi kohteeksi valikoitui rikkivedyn imeytysreaktori. Kyseinen reaktori on valmistettu kuitukelaamalla ja matriisina on käytetty kahta erityyppistä vinyylies-terihartsia, joista tukikerroksen hartsi on palosuojattua. Imeytysreaktorin on huomattu aiempien tarkastusten perusteella olevan yksi ongelmallisimmista kohteista kemiallisen korroosion suhteen. Imeytysreaktorin seinämissä on raporttien mukaan havaittu melko voimakasta pehmenemää laminaatin korroosiokerroksessa. Suurimmaksi pehmenemän aiheuttajaksi epäillään korkean lämpötilan ja voimakkaan kemiallisen kuormituksen aiheuttamaa yhteisvaikutusta.

Ennen imeytysreaktorin tarkastelua laadittiin suunnitelma tarkastuksen aikataulullisesta etenemisestä ja tarkastusta edeltävistä toimenpiteistä. Tässä vaiheessa myös informoitiin silmämääräisen tarkastuksen ja reaktorin mahdollisen huollon suorittavan yrityksen avainhenkilöitä aikatauluista ja tarkastuksessa vaadittavasta laitteistosta. Silmämääräisen tarkastuksen lisäksi reaktorin sisäpinnasta otettiin Barcol-kovuusmittauslukemat sekä seinämänvahvuuden mittaus Ficher Isoscope -pinnoitteenpaksuusmittarilla. Ennen silmämääräistä tarkastusta kohteessa testattiin Olympus 38DL -seinämänvahvuusmittaria.

Ultraäänimittauksen tavoitteena oli testata Olympus 38DL -seinämänvahvuusmittarin luotettavuutta, kun kohde on nestetäytteinen ja mittarin kalibrointiin käytettiin erillistä koepalaa. Ylimääräistä haastetta kohteen mittauksiin ja mittaustulosten luotettavuuden selvitykseen aiheutti se, ettei kyseisestä kohteesta ole saatavilla muita dokumentteja kuin päämittapiirros, josta ei selviä

esimerkiksi seinämävahvuutta. Kunnonvalvonnan osalta hyödyllisiä dokumentteja, kuten keulauspöytäkirjaa tai alkuperäistä seinämävahvuuspöytäkirjaa ei löytynyt Terrafamen, reaktorin valmistajan tai toimittajan arkistoista. Ultraäänimittauksen tulokset olivat kuitenkin rohkaisevia mittausmenetelmän luotettavuuden osalta. Vaikka reaktori oli nestetäytteinen ja säiliön sisäpinnassa uskottiin olevan korkean lämpötilan ja kemiallisen kuormituksen aiheuttamaa pehmenemää, saatiin ensimmäisestä mittauspisteestä kohtalaisen selkeä takaseinäkaiku seinämävahvuuden arvoksi 32,85 mm. Selkeän kaiun vieressä havaittiin toinen heikompi, mutta erottuva kaiku, jonka arveltiin olevan peräisin heikentyneestä säiliön pinnasta. Ympäristön lämpötila mittauksen aikana oli 18 °C ja reaktorin sisäinen lämpötila noin 50 °C. Vaikkakaan reaktorin tarkkaa seinämävahvuutta ei tiedetty, saatiin ultraäänimittalaitteella havaittua kuitenkin selkeä takaseinäkaiku, mikäli mittauspiste oli selvästi kaasutilan tai nestepinnan puolella. Tämä viittaisi siihen, että mitattavan kohteen seinämävahvuuden muutosta voitaisiin seurata luotettavasti referenssimittauspisteen ja hyvin dokumentoitujen referenssimittauksen perusteella. Kunnonvalvontamittaukset olisi hyvä aloittaa siinä vaiheessa, kun reaktori on huollettu perusteellisesti.

Reaktorin silmämääräisessä tarkastelussa havaittiin reaktorin vaipan sekä virtaushaittojen sulkukerroksen vaurioituneen voimakkaasti koko nestepinnan alapuolisella osuudella. Säiliön seinämän pesujen jälkeen huomattiin vaurioiden ulottuvan joissain osissa vaippaa selkeästi kuidutukseen asti. Virtaushaittojen tukien päissä sekä satunnaisissa kohdissa vaippaa sulkukerros ei ollut kulunut yhtä voimakkaasti. Vaipassa olevien vaurioiden välillä ei voinut havaita selkeää kuviota, eikä tätä kautta voinut päätellä esimerkiksi selkeitä kohtia, joissa säiliön sisäiset virtaukset lisäisivät kuormituksen voimakkuutta. Niissä kohdin, jossa sulkukerroksen hartsia oli vielä selkeästi havaittavissa, oli hartsin väri muuttunut kuitenkin kauttaaltaan kellertävämmäksi sekä osin rusehtavaksi. Myöskin kaasutilassa olevan hartsin väri oli tumman kellertävä vaikkei kaasutilassa muuta poikkeavaa havaittukaan.

Kovuusmittauksessa tavoitteena oli havainnoida, voidaanko kyseisellä menetelmällä varmistua silmämääräisessä tarkastuksessa epäselväksi jääneiden kohteiden kovuudesta ja löydetäänkö kovuusmittarin avulla yllättäviä pehmeitä kohtia, jotka silmämääräisessä tarkastuksessa on mahdollisesti todettu hyvässä kunnossa oleviksi. Kovuusmittaukset suoritettiin koko vaipan alueelle ja mittauspisteitä oli useita. Nestepinnan alapuolisella osuudella hartsi oli kauttaaltaan pehmeää ja muutamaa yksittäistä mittausta lukuun ottamatta Barcol -kovuuslukema oli <10. Korkeimmillaan lukema nestepinnan alapuolisissa osuuksissa oli 24. Kaasutilassa kovuusmittaukset osoittivat suojakerroksen olevan värimuutoksista huolimatta hyvässä kunnossa ja mittauksen keskiarvo oli 33,8,



joka on hyvä kovuusarvo vinyyliesteri- ja polyesterityyppisille hartseille. Lujitemuovin pinnankovuuden mittaamiseen käytettiin Sulmu Oy:lta lainattua Barcol-mittalaitetta. Kuvassa 7 kyseisellä Barcol-mittalaitteella suoritettava kovuusmittaus



Kuva 7. Barcol-kovuus vaurioituneesta sulkukerroksesta. Kovuuslukema 9.

## 7.2 Pumpun paineyhde esineutraloinnin saostuksessa

Toiseksi tarkasteltavaksi kohteeksi valittiin lujitemuovinen pumpun painepuolen yhde esineutraloinnin saostusreaktorien jälkeisellä syöttöpumpulla. Kyseisessä kohteessa Terrafame Oy:n yhteistyökumppanin tarkastuksissa on havaittu voimakasta kulumaa, jonka aiheuttajana pidetään kemiallista kuormitusta sekä kiintoaineen aiheuttamaa voimakasta mekaanista kuormitusta. Pumpun painepuolelle asennetaan lujitemuovista valmistettu kaulus, jonka tehtävänä on helpottaa pumpun asennusta sekä vastaanottaa pumpun painepuolelle syntyvästä pyörteilystä aiheutuva mekaaninen kuormitus. Testin tarkoituksena oli laminoida kauluksen sulkukerroksen alle seostamattomasta metallifoliosta valmistettu indikaattori eli tagi, jota olisi seurattu induktioon perustuvilla mittauksilla. Siinä vaiheessa, kun sulkukerros on kulunut niin, että prosessineste pääsee vaikuttamaan indikaattoriin, tämä korroosiolle altis indikaattori liukenisi prosessinesteeseen ja korroosion eteneminen voitaisiin havaita, kun induktiivinen anturi ei enää tunnista tagia. Itse koe epäonnistui kuitenkin heti alkumetreillä, kun huomattiin, ettei induktiivinen anturi kykene havaitsemaan teräsfoliosta tehtyä tunnistetta liian pitkän tunnistusetaisyysajan takia ja esimerkiksi metallinpaljastin ottaa liikaa häiriötä yhteen metallisista laipoista, jotta voitaisiin varmuudella tunnistaa signaali indikaattorin aiheuttamaksi.

Koska prosessi ei aina ole tasalaatuinen, indikaattorin korroosion kestävyyttä kyseistä prosessinestettä vastaan testattiin ennen kokeen suorittamista 3:lla eri kerralla otetulla näytteellä ja kyseinen teräsfolio liukeni nesteen sekaan jokaisella toistokerralla alle 4:ssä päivässä. Mikäli prosessineste pääsee siis vaikuttamaan indikaattoriin, pitäisi tämä huomata kohtalaisen lyhyellä aikavälillä.

## 7.3 Erillinen koepala 1

Ultraäänimittausmenetelmän tutkimisen, toimivuuden tarkastamisen ja välittömien tulosten saavuttamiseksi tilasin Terrafamen yhteistyökumppanilta lujitemuovisen koepalan, jolla voitaisiin simuloida yleisiä laminaatissa esiintyviä vikoja ja vertailla näitä tuloksia ehjään laminaattiin. Koepalaan tehtiin neljä erilaista mitattavaa osaa, joita olivat ylikostutettu laminaatti, osittain kuivaksi jätetty laminaatti, ehjä laminaatti ja mekaanisesti ohennettu kohta muutoin ehjässä laminaatissa. Kuvassa 8 koepala ja siihen tehdyt merkinnät.

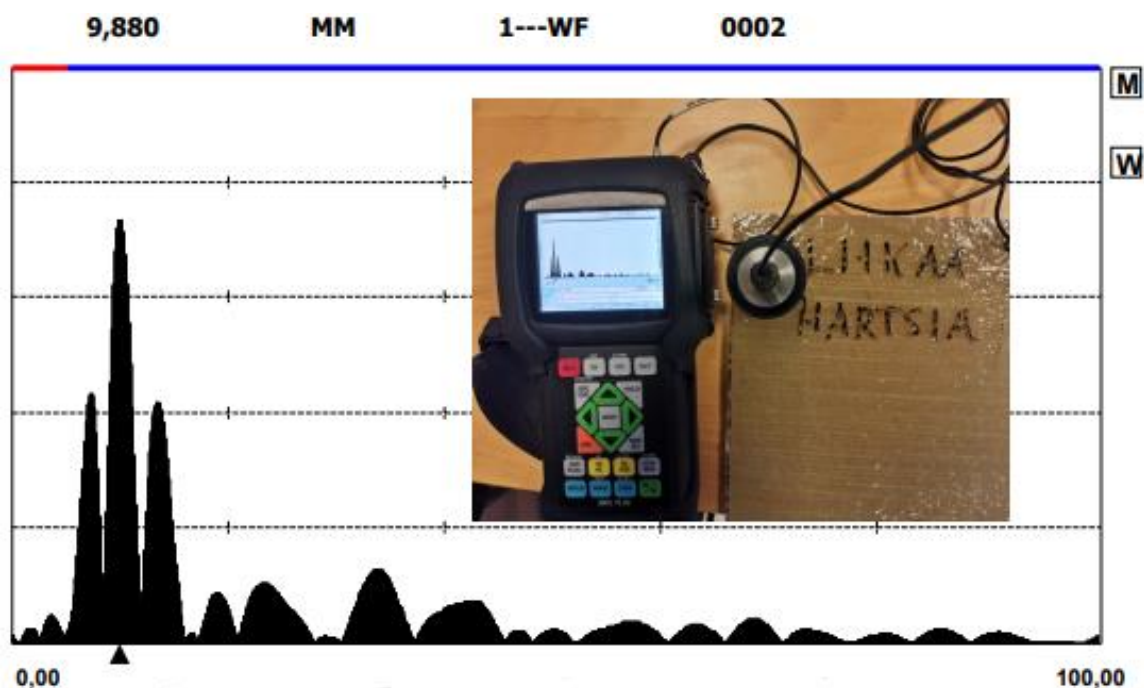


Kuva 8. Koepala ultraäänen paksuusmittauksia varten. Ylikostutettu lohko on muuta palaa paksumpi. Kyseisessä kohdassa havaittavissa myös laminaatin värissä eroa

**Liiallinen hartsin määrä:** Aika-ajoin putkiston osissa huomataan lujitteen ylikostuttamista. Tämä merkitsee sitä, että hartsia on lisätty kappaleeseen tarpeettoman suuri määrä. Tyypillisimmin tätä ongelmaa esiintyy kappaleissa, joissa lujitteen kostutus laminointivaiheessa on tehokasta. Liiallinen hartsin käyttö harvoin on itsessään vaarallista, mutta lisää hartsivalumiinien ja paksuusvaihtelujen määrää, jolloin laminaatti ei ole erityisen tasalaatuista. Lisäksi liiallinen hartsin käyttö näkyy valmistuskustannuksissa. [6, s. 157] Pitkään alalla työskennelleen lujitemuoveihin perehtyneen henkilön haastattelujen perusteella liiallinen hartsin käyttö lisää myöskin ilmakuplien määrää, mikä osaltaan heikentää laminaattia. [14].

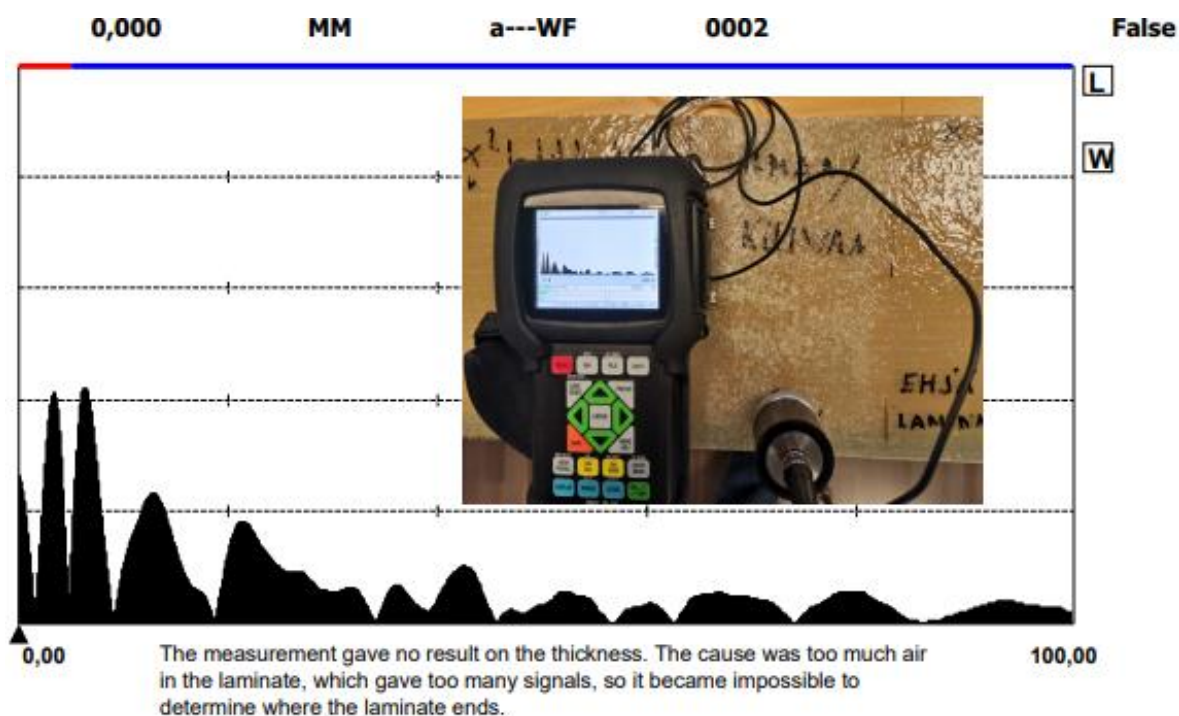
Ultraäänellä mitattaessa liiallinen hartsin määrä näkyy mittaustuloksissa epäselvänä kaikuna, mikäli matriisiin on jäänyt ilmakuplia. Hyvin ilmatussa kohdassa ultraäänen mittaustulos voi näyttää todellisuutta ohuempaa seinämävahvuutta, mikäli luotain on kalibroitu korkean lujitepitoisuuden omaavan kappaleen kuten, esimerkiksi kuitukelatun laminaatin perusteella. Testimittauksissa ylikastellusta kohdasta saatiin mitattua kuitenkin hyvin totuudenmukainen seinämävahvuus.

Kuten kuvasta 9 voidaan huomata, kaikukuvassa on havaittavissa selkeästi erottuva takaseinäkaiku, jonka molemmin puolin on kaksi muuta selkeästi erottuvaa pulssia. Selkeimmin erottuva kaiku kertoo laminaatin seinämän vahvuuden ja mittaustarkkuus vaikuttaisi olevan hyvä ainakin testiolosuhteissa, joissa laminaatin toisella puolen ei ole nestepatjaa.



Kuva 9. Ylikostutettu laminaatti.

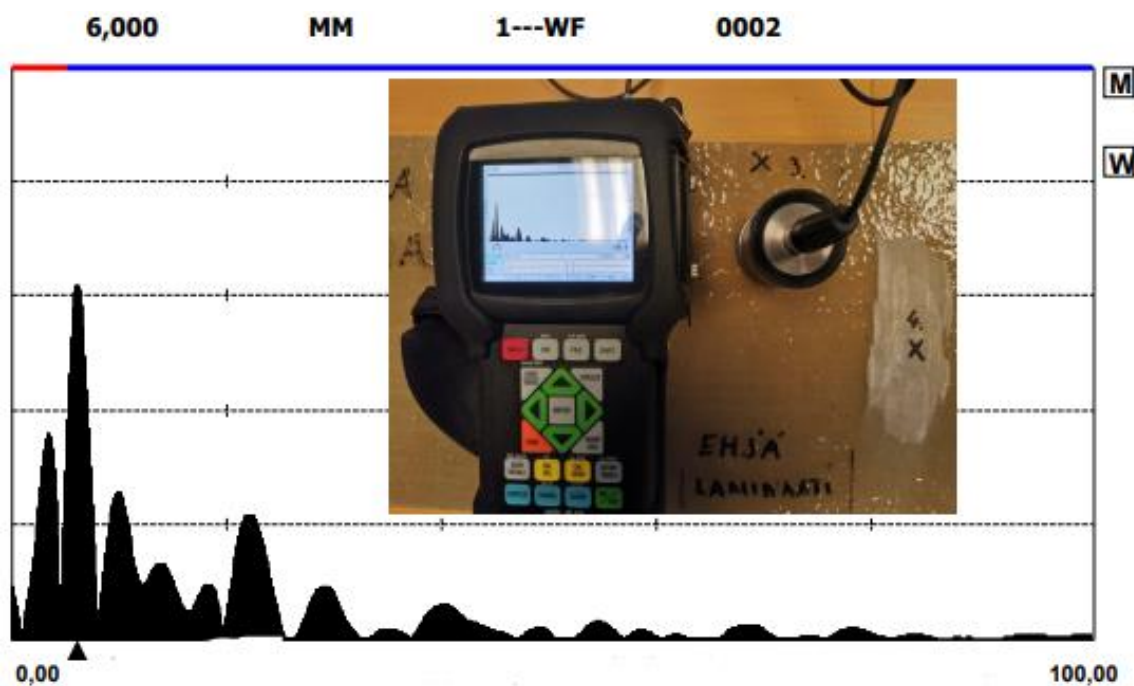
**Kuiva laminaatti:** Kuivaksi jätetyllä laminaatilla pyritään simuloimaan huokoista ja huonosti kostutettua laminaattia. Ultraäänimittauksissa voimakas huokoisuus ja suuret ilmakuplat aiheuttavat sen, että ultraäänipulssi pirstoutuu eikä takaseinäkaikua saada luotaimeen, jolloin mittalaite ei kykene antamaan luotettavaa lukemaa seinämän vahvuudesta. Selkeiden ilmakuplien tai delaminaatioiden kohdalla voidaan havaita takaseinäkaikun lisäksi laminaatin sisällä oleva kaiku tai mittalaite voi näyttää tarkasteltavan materiaalin todellisuutta ohuemmaksi, mikäli ultraäänipulssi heijastuu tarpeeksi voimakkaasti vaurioalueesta. Kuvassa 10 näkyy kuinka erittäin huokoisesta ja hartsiköyhästä alueesta ei saada kohinasta erottuvaa kaikua, joten seinämänvahvuuden mittaaminen on mahdotonta.



Kuva 10. Huokoinen ja kuiva laminaatti.

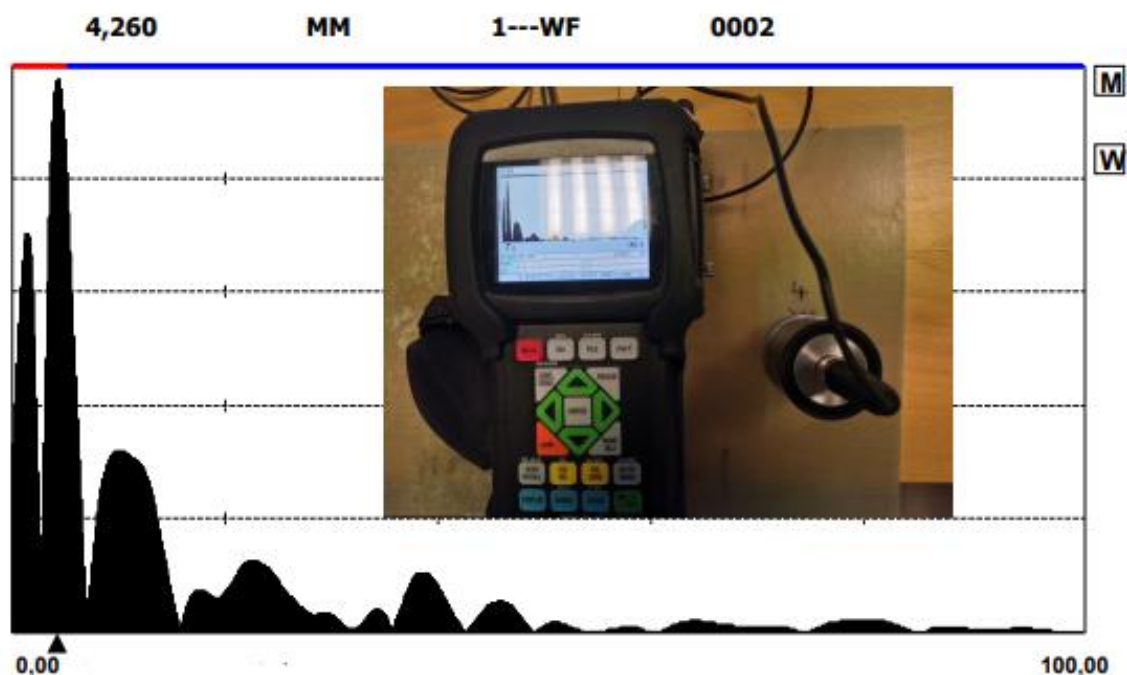
**Ehjä laminaatti:** Lujitemuovin poikkeamien mittaamisen lisäksi tulee mitata myöskin uusi, hyväkuntoinen laminaattirakenne ja tutkia, millaisia tuloksia virheettömästä laminaatista saadaan, jotta voidaan ymmärtää erikuntoisista laminaattirakenteista saatuja mittaustuloksia. Testipalaa mitatessa mittalaitteen näytöllä voidaan taas havaita selkeä takaseinäkaiku, jonka mittaustulos vastaa hyvin laminaatin todellista seinämänvahvuutta. Kuvassa 11 on havaittavissa taas takaseinäkaikun molemmat puoleiset pulssit. Näistä etummainen on kuitenkin terävämpi.





Kuva 11. Huolellisesti ilmattu, materiaaliltaan tasalaatuinen laminaatti.

**Mekaanisesti ohennettu osa:** Tässä osassa pyrittiin havainnoimaan, kuinka äkillinen ohenema laminaattirakenteessa esiintyy ultraäänimittausten tuloksissa. Ultraäänimittalaitetestissä kyseinen kohta esiintyi odotetulla tavalla ja mittalaite näytti seinämän vahvuuden olevan kyseisessä kohtaa pienempi. Kuvan 12 kaikukäyrässä voidaan huomata kaksi selkeämmin erottuvaa pulssia. Mekaanisesti kulutetussa kohdassa kolmas pulssipiikki jää torsoksi.



Kuva 12. Toiselta puolelta mekaanisesti kulutettu laminaatti.

Testien perusteella lujitemuovin seinämänvahvuuden mittaamiseen ultraäänipaksuusmittari vaikuttaisi sopivan kohtalaisen hyvin, kunhan mittauslaitteisto on tarkoituksenmukainen ja mittaja perehtynyt lujitemuovin vikaantumiseen. Testissä huomattiin jonkin verran vaihtelua kaiku-käyrässä. Mitä terävämpi ja voimakkaampi takaseinästä palautuva pulssi on, sitä kovempi laminaatin pinta vaikuttaisi olevan. Takaseinäkaulun molemmin puolin esiintyvät pulssit vaikuttaisivat taas olevan verrannollisia laminaatin pinnan hartsikerroksen vahvuuteen. Ylikastellussa kohdassa sivupulssit olivat melko terävät ja voimakkaat, kun taas normaalisti laminoidussa osassa nämä olivat jo jonkin verran pyöreämmät. Mekaanisesti kuluneesta kohdasta, jossa kuluneelta puolelta laminaattia hartsikerros on kulunut kokonaan pois, ei samanlaista terävää pulssia ole myöskään mittalaitteen näytöllä havaittavissa. Testikappaleessa ei havaittu selkeää kohtaa, jossa kerrosirtoamaa olisi voitu havaita. Jälkikäteen ajateltuna testikappaleeseen olisi voitu tehdä delaminaatiota simuloivia osia esimerkiksi laminoimalla kerrosten sisään teflonpaloja. Toinen vaihtoehto paikalliselle kerrosirtoaman varmentamiselle olisi ollut laminoinnin aikana rakenteeseen jätettävät ohuet levyt, jotka kovetusvaiheessa vedetään irti laminaatista, jolloin kyseisiin kohtiin laminaattia jäisi onkalot.

Ultraäänimittaukset tehtiin yhdessä FR Valve Productsin Per Sundbergin kanssa, joka omaa pitkän kokemuksen lujitemuovirakenteiden valmistamisesta ja kunnossapidosta. Mittausten pohjalta saatiin myös FR Valvesin analyysi mittauksista, joka löytyy liitteestä 3. Kyseistä mittauspöytäkirjaa

hyödynnettiin tätä opinnäytetyön vaihetta tehtäessä. Mittalaite kalibroitiin saman yrityksen valmistamalla koepalalla, joka on esillä kuvassa 13. Koepala on valmistettu kuitukelatusta putkesta, jonka matriisina on käytetty vinyyliesteri-tyyppistä hartsia.



Kuva 13. Kalibrointipala

Ultraäänimittalaitteena käytettiin kuvan 14 mukaista Olympus 38 DL -seinämänpaksuusmittalaitetta, jota esimerkiksi Sintrol Suomessa suosittelee lujitemuovin seinämänvahvuuden mittaamiseen. Kyseiseen mittalaitteeseen on asennettu suurteho-ohjelmistomuutos, joka mahdollistaa erittäin matalataajuisen, kuten esimerkiksi 0,5 MHz yksielementtiluotaimen käytön. Luotaimena mittalaitteessa käytettiin lujitemuovin paksuusmittauksiin kehitettyä 0,5 MHz taajuudella toimivaa m2008 -luotainta, joka on varustettu pitkällä vaimennuselementillä. Tämä mahdollistaa voimakkaasti vaimentavien materiaalien kuten lujitemuovin mittauksen noin 75 millimetriin saakka.





Kuva 14. 38DL Plus -ultraäänimittalaite ja m2008 -luotain

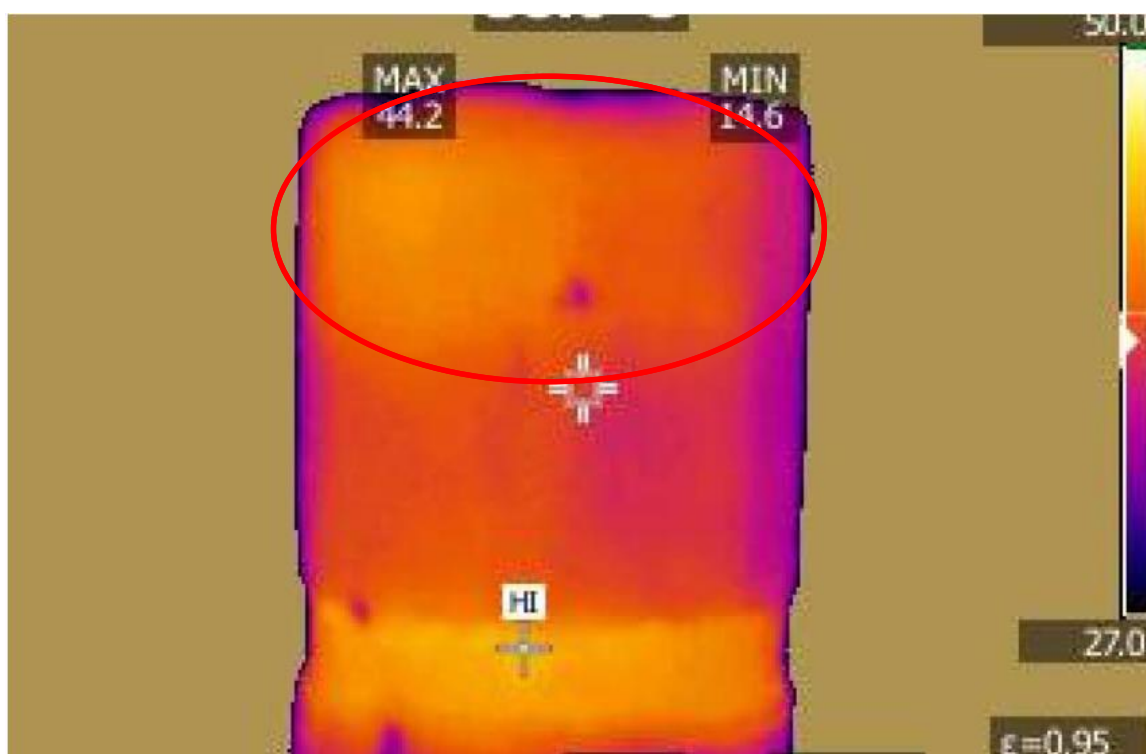
#### 7.4 Erillinen koepala 2

Toisesta koepalasta tehtiin kuvan 15 mukainen putki, jonka päälle on laminoitu toisistaan eroavia laminaattikerroksia. Kussakin kohtaa simuloidaan erilaista poikkeamaa. Tämän koepalan avulla oli tarkoitus testata lämpökuvauksesta sekä digitaaliröntgenistä saatavia tuloksia lujitemuovin kunnonvalvonnan hyödyntämisessä. Putkeen oli tehty kolme erilaista saumaa, joissa laminaatin laatuun vaikutettiin eri muuttujilla. Putken tutkittavat kohdat olivat mekaanisesti kulutettu osa, delaminaatiota simuloiva osa ja vajavaisesti telattu eli huokoinen sauma. Lisäksi näiden saumojen lisäksi putkessa oli normaalia tasalaatuista laminaattirakennetta. Putki täytettiin noin +50 °C vedellä ja ilman lämpötila kyseisessä tilassa oli +17 °C.



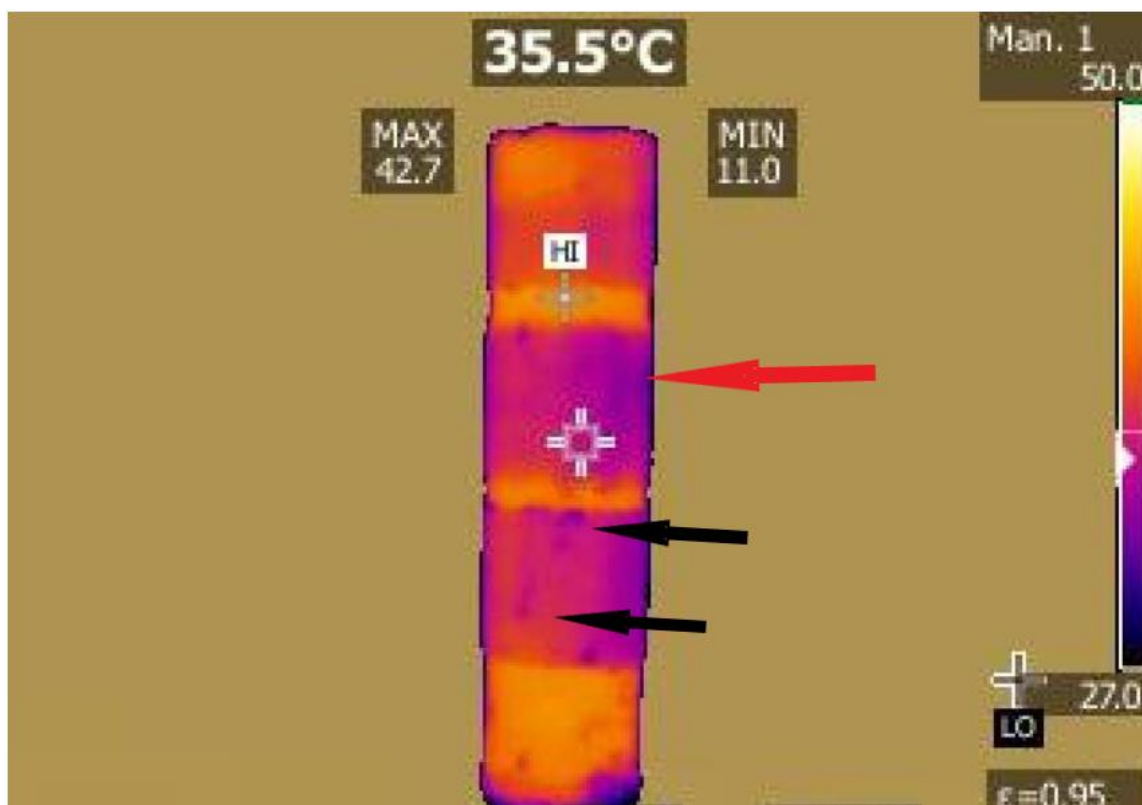
Kuva 15. Koepala 2. Ylimmässä kohdassa putken sisäistä mekaanista kulumaa, keskimmaisessä kohdassa kerrosirtoaman simulointi teipin avulla ja alimmassa saumassa ilmanpoistotelaus on jätetty vajavaiseksi.

Mekaanisesti kulutettu osa näkyy lämpökameran kuvassa muuta materiaalia lämpimämpänä kohtana, erityisesti jos vikaantunutta kohtaa voidaan kuvata lähietäisyydeltä. Kuvasta 15 voidaan huomata lämpökameran kuvassa vaaleampana eli lämpimämpänä näkyvä kohta ympyröitynä. Samassa kuvassa on myöskin havaittavissa laminaatin pintakerroksessa havaittujen hartsivalumien kohdat tummina pisteinä. Myös rakkulat ja ilmakuplat näkyvät samalla tapaa tummina pisteinä lämpökameran kuvassa. Kentällä tapahtuva lämpökameralla suoritettava seinämän ohenemien tarkastelu on luonnollisesti huomattavasti haastavampaa, koska kuluneiden kohtien paikka ei ole valmiiksi tiedossa eikä ohenema ole välttämättä rajautunut yhteen kohtaan yhtä selvästi.



Kuva 16. Tasalaatuudessa saumassa mekaanisesti kulutettu kohta näkyy aavistuksen muuta laminaattia lämpimämpänä renkaana. Tummat pisteet varmistettiin hartsivalumiksi.

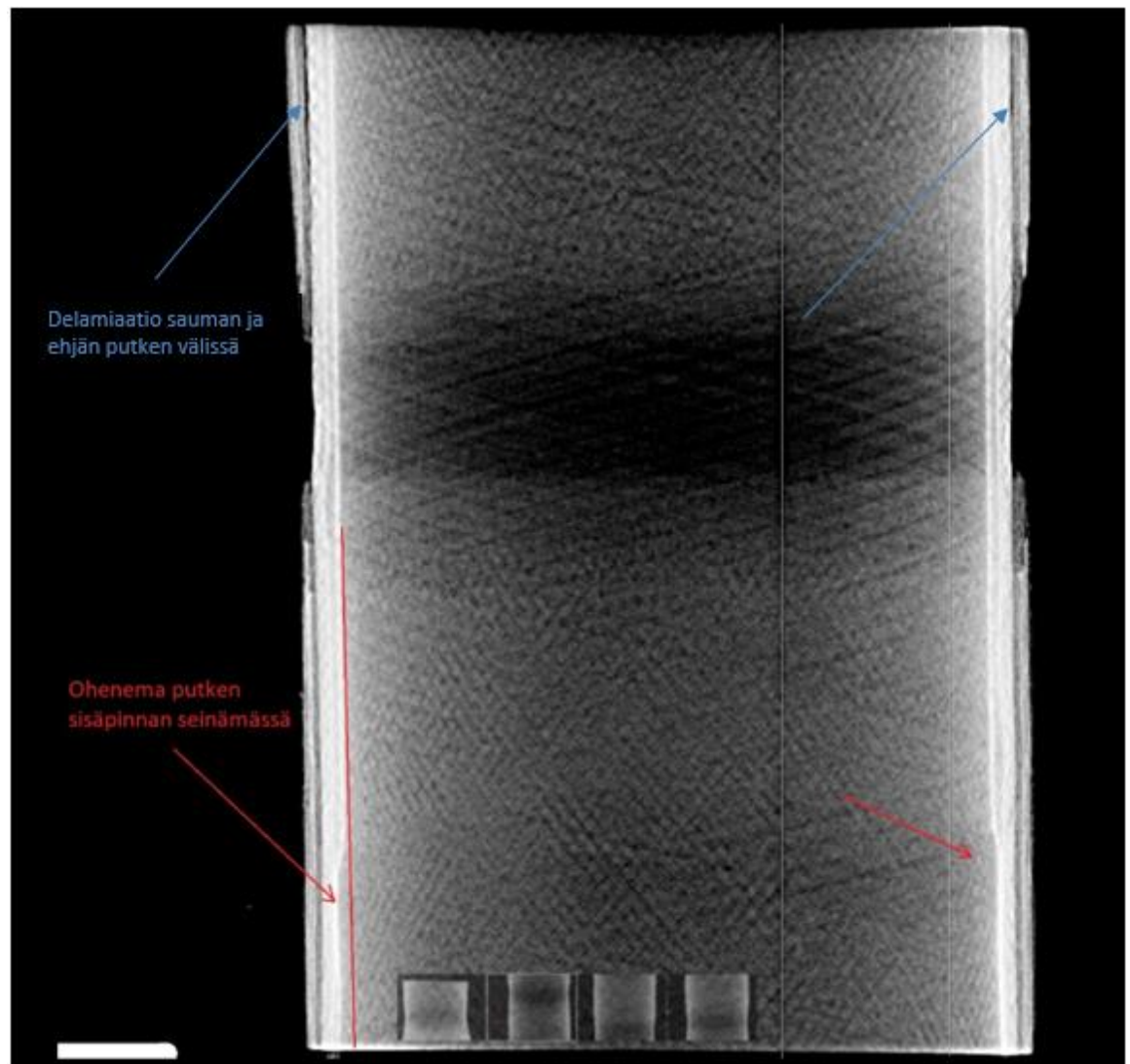
Saumassa, jossa teflonteipin avulla pyrittiin simuloimaan delaminaatiota, ei lämpökameralla havaita poikkeamaa lämpötilaeroissa. Tämä kertoo lämmönjohtavuuden olevan kyseisessä saumassa tasalaatuista. Tämä voi johtua siitä, että teflonteippi on niin ohutta, ettei se vaikuta laminaatin ominaisuuksiin lämpökameran kuvassa tai lujitemuovirakenteen ja teflonteipin lämmönjohtavuusarvot ovat lähellä toisiaan. Alemmassa, huokoiseksi jätetyssä saumassa taas on suuria ilmakuplia, joihin neste voisi kertyä ja aiheuttaa laajempaa kerrosirtoamaa. Nämä ilmakuplat ovat havaittavissa kuvassa 16 mustilla nuolilla osoitetussa kohdassa. Punainen nuoli osoittaa kohdan, jossa teflonteipin avulla pyrittiin havainnoimaan kerrosirtoamaa.



Kuva 17. Mustat nuolet osoittavat laminaatin huokoisuuden aiheuttamia ilmakuplia. Punaisen nuolen kohdalla on rakenteen sisään laminoitu putken vaipan kiertävä kaistale teflonteippiä, jolla ei kuitenkaan havaittu vaikutusta lämmönjohtavuuteen.

Lämpökuvaukseen käytettiin Fluke TiS60 -infrapunalämpökameraa. Kameran erottelukyky on 260 x 195 pikseliä ja lämpöherkkyys  $\leq 0,08$  °C, kun kohdelämpötila on 30 °C.

Digitaaliröntgenkuvaukset suoritettiin Dekra Oy:n sertifioitujen NDT-mittaajien toimesta Oulun toimipisteessä sijaitsevalla digitaaliröntgenlaitteistolla. Sisäpinnan ohenema saatiin digitaaliröntgenlaitteistolla todettua erittäin tehokkaasti. Testikappaleen sisäpinta oli testiä varten tehtyä kulumaa lukuun ottamatta koskematon. Tämä vaikutti varmasti osaltaan mittauksen selkeyteen. Digitaaliröntgenillä voidaan havaita myöskin delaminaatio, mikäli kuvauskeila on kohdistettu vaurion suuntaisesti. Kohtisuoraan kuvatessa delaminaatiota ei voida huomata, ellei kerrosten väliin ole päässyt esimerkiksi nestettä. Kuvassa 18 digitaaliröntgenillä luotu kuva delaminaatiosta ja seinämän ohenemasta. Lisää digitaaliröntgentestiin liittyviä kuvia on liitteessä 4, jossa voidaan havaita putken sisäseinämän pinnan erottuvan selkeästi, vaikka putki on altistunut prosessineesteelle yli vuoden.



Kuva 18. Punaisella merkityissä kohdissa on havaittavissa putken sisäseinämän ohenemaa ja sinisellä merkityissä kohdissa kerrosirtoamaa.

Digitaaliröntgenkuvauksiin käytettiin Dekra Oy:n Oulun toimitiloissa sijaitsevaa Vidisco Rayzor X pro laitteistoa ja ICM CP225D -röntgengeneraattoria.

## 8 Tulokset ja pohdinta

Opinnäytetyön aikana pääsin testaamaan tunnetuimpia lujitemuovirakenteiden kunnonvalvontamenetelmiä häiriöttömissä olosuhteissa sekä kenttäolosuhteissa. Opinnäytetyöhön raportoitavaksi näistä päätyivät silmämääräinen tarkastelu, kovuusmittaus, jatkuva kunnonvalvonta, ultraäänimittaus, lämpökameramittaus ja digitaaliradiografia. Onnistuneimpana näistä tarkasteluista pidän silmämääräistä tarkastelua ja kovuusmittausten testausta. Näiden onnistumisen takasi rikivedyn imeytysreaktorin sisäpuolinen tutkiminen yhdessä silmämääräisiin tarkastuksiin perehtyneen asiantuntijan kanssa. Samalla saatiin testattua Barcol-kovuusmittaria ehjään laminaattiin, pehmenneeseen sulkukerrokseen sekä sulkukerroksesta paljastuneeseen kovaan kuidutukseen. Tulosten perusteella kovuusmittaria voidaan hyödyntää kunnonvalvontaan. Tyypillisesti kuitenkin siinä vaiheessa, kun sulkukerroksen kovuus ei ole enää riittävä, on vaurioita havaittavissa myös silmämääräisesti.

Testit ultraääni- ja lämpökameramittausten soveltuvuudesta lujitemuovirakenteiden kunnonvalvontaan onnistuivat kohtalaisesti. Mikäli näistä tekniikoista halutaan saada täysi hyöty irti, vaativat tekniikat vielä jatkotutkimuksia. Ultraäänimittauksista kunnonvalvonnan hyödyn saaminen vaatii useampia mittauksia tulevaisuudessa, jotta esimerkiksi seinämän heikkenemisestä tai seinämänvahvuuden ohenemasta saataisiin riittävästi dataa esimerkiksi vikaantumisen ennustettavuuden parantamiseen. Testien perusteella ultraäänipaksuusmittaukset osoittautuivat kohtalaisen tarkoiksi ja testipalasta tehdyissä mittauksissa mittaustuloksissa oli alle 5 % ero todelliseen seinämänvahvuuteen nähden. Tulevissa ultraäänimittauksissa olisi myös arvioitava, onko järkevää mitata ultraäänellä nestetäytteisiä putkia ja säiliöitä. Esimerkiksi PSK-standardit eivät tätä suosittele, mutta imeytysreaktoriin tehtävien ultraäänimittausten perusteella nestetäytteisestä säiliöstä saatiin selkeä takaseinäkaiku. Ainoastaan neste- ja kaasutilan rajalla huomattiin kohinan häiritsevän mittausten luotettavuutta.

Lämpökameratarkastelusta voitaisiin saada lisäarvoa lujitemuovin kunnonvalvontaan, jos mittausolosuhteisiin saataisiin tasaisuutta ja kameran asetuksiin selkeät ohjeavot kutakin mittauskohdetta varten. Tämä vaatii huolellisen kunnonvalvontareitin suunnittelun sekä aikataulutuksen, jolloin ulkopuolisten tekijöiden vaikutusta mittausolosuhteisiin voidaan minimoida. Mitä pienempi rooli muuttuvilla olosuhteilla mittauksissa on, sitä luotettavampia mittaustulokset ovat.

Digitaalisesta radiografiasta saatiin lupaavia tuloksia. Putken seinämän rajapinnat näkyvät putkissa selkeästi ja tämän ansiosta myös poikkeamat ovat helposti havaittavissa. Säiliöiden tarkastelussa digiröntgen ei välttämättä ole yhtä käyttökelpoinen menetelmä, sillä seinämän vaurioiden tunnistamiseen kuvaus tulisi tehdä laminaatin suuntaisesti. Digitaalisen radiografian suurin ongelma on mittausten aiheuttamat varo- ja suojaustoimenpiteet, joiden takia käynnin aikaisten mittausten suorittaminen vaikeutuu.

Jatkuvan kunnonvalvonnan ensimmäinen testikappale ja sen mittaus epäonnistuivat, mutta menetelmän testaus jatkuu opinnäytetytön palautuksen jälkeenkin testeillä, joissa selvitetään esimerkiksi RFID-tunnisteiden soveltuvuutta lujitemuovin kunnonvalvontaan. Mikäli RFID-testistä saadaan toivottuja tuloksia, voidaan menetelmää hyödyntää sulkukerroksen korroosion tunnistamiseen koko metallitehtaan alueella kustannustehokkaasti. Menetelmän etu olisi myöskin se, että RFID-tunnisteen luku ei vaadi erityisosaamista ja mittaukset voitaisiin sisällyttää jo olemassa oleville laitosmieskierroksille.

## 9 Yhteenveto

Lujitemuovirakenteiden kunnonvalvontaan liittyvä opinnäytetyö oli itselleni henkilökohtaisella tasolla erittäin opettavainen. Työn aihetta valitessa kokemukseni tai tietotaitoni lujitemuovirakenteista tai niiden kunnossapidosta oli hyvin vähäistä. Kirjallisuuteen ja erilaisiin lähteisiin perehtyessäni olen kuitenkin onnistunut kartuttamaan teorian tietoa opinnäytetyön aikana kohtalaisen paljon. Tämän lisäksi lujitemuoviosaaajien haastattelut ja työskentelyyn tutustuminen Sulmu Oy:n, NCE Oy:n ja FR Valve Productsin kautta ovat kartuttaneet niin sanottua hiljaista tietoa alaan liittyen ja näiden seikkojen avulla lujitemuoviteollisuuden ja kunnonvalvonnan käytännön prosessit ovat tulleet tutummaksi. Lisäksi opinnäytetyö Terrafamella lisäsi tietämystäni Terrafamen muista osaprosesseista, joihin ei välttämättä olisi oman työn ohessa metallitehtaalla tullut perehdyttyä.

Uskoisin kerätyn teorian tiedon ja kunnonvalvontamenetelmien testauksen olevan hyödyksi Terrafame Oy:lle. Pyrin käsittelemään ja nostamaan esille opinnäytetyössä lujitemuoveihin liittyvää yleistä teorian tietoa, joka olisi hyödyllistä myös kunnossapidollisten seikkojen ymmärtämistä varten. Lisäksi pyrin tuomaan selkeästi esille lujitemuovin vikaantumismalleja, jotta erityisesti Terrafamen oman henkilökunnan silmämääräisiä tarkastuksia voitaisiin tehostaa. Juurikin selkeyden ja ymmärrettävyyden vuoksi en nähnyt erityisen mielekkäänä listata näitä tekstiseinäksi opinnäytetyöhön, vaan tein taulukon, jossa on listattu vain ja ainoastaan kunnonvalvojan näkökulmasta tarvittavat tiedot. Myös kuvat tyypillisistä lujitemuovin vaurioista on listattu liitteisiin opinnäytetyön selkeyden vuoksi. Eri kunnonvalvontamenetelmien avaaminen taas auttaa ymmärtämään niihin liittyviä huomioon otettavia seikkoja sekä millaiseen tarkasteluun kyseisissä menetelmiä olisi järkevää hyödyntää. Mitattavien kohteiden osiossa taas testataan osaa näistä menetelmistä puhtaasti testiympäristössä sekä prosessiympäristössä. Testiosion tavoitteena oli tuoda esille, miten mittaukset poikkeavat käytännön suoritteissa verrattuna tunnettuun teorian tietoon. Tämän osion tulokset olivat pääasiassa odotetun kaltaisia, eikä mittaukset ole yhtä mustavalkoisia ja selkeästi suoritettavia, saati tulkittavissa olevia kuin teorian tieto antaa ymmärtää. Poikkeuksena tässä Barcol -kovuusmittaus ja digitaaliröntgen, jotka antoivat hyvin selkeitä tuloksia, joissa ei juurikaan ollut tulkinnanvaraa.



Oma työskentelyni opinnäytetyön parissa on mielestäni ollut kokonaisuudessa onnistunutta, vaikakaan esimerkiksi jatkuvan kunnonvalvonnan ensimmäiset testitulokset eivät itseäni tyydyttäneet. Työn aikana sain kerättyä kuitenkin arvokasta tietoa lujitemuoviputkistojen ja säiliöiden kunnonvalvonnasta ja dokumentoitua kyseistä tietoa opinnäytetyöhöni. Opinnäytetyössä kerättyjen tietojen ja testien pohjalta lujitemuovirakenteiden kunnonvalvontaa voidaan lähteä kehittämään haluttuun suuntaan ja tätä myötä myös kriittisten laitekokonaisuuksien jäljellä olevaan käyttöikään voidaan saada valistuneita arvioita, kun mittaustuloksista saadaan kerättyä tarpeeksi dataa.

## Lähteet

- (1) Kotisivut. Terrafame OY. Terrafame OY yritysesittely. <https://www.terrafame.fi/terrafame-oy.html> Haettu 23.1.2020
- (2) Terrafame OY. Terrafamen vuosikertomus 2015. <http://vuosikertomus2015.terrafame.fi/>. Haettu 23.1.2020
- (3) Terrafame OY. Terrafamen vuosikertomus 2018. <https://vuosikertomus2018.terrafame.fi/media/pdf-paketit/terrafame-vuosiraportti-2018.pdf> Haettu 24.1.2020
- (4) Terrafame OY. Terrafamen Taloudellinen katsaus 2019. [https://www.terrafame.fi/media/tulosjulkistukset/financial-review/2019/terrafame\\_taloudellinen\\_katsaus\\_2019.pdf](https://www.terrafame.fi/media/tulosjulkistukset/financial-review/2019/terrafame_taloudellinen_katsaus_2019.pdf) Haettu 7.4.2020
- (5) Terrafame OY. Terrafame tuotanto-YVA selostus. 2017. [https://www.terrafame.fi/media/mediapankki/kaivostoimintaa-koskeva-yva/yva-selostus/aa-terrafame\\_tuotanto\\_yva\\_selostus\\_180817\\_web.pdf%20](https://www.terrafame.fi/media/mediapankki/kaivostoimintaa-koskeva-yva/yva-selostus/aa-terrafame_tuotanto_yva_selostus_180817_web.pdf%20) Haettu 24.1.2020
- (6) Saarela O, Airasmaa I, Kokko J, Skrifvars M, Komppa V, Komposiittirakenteet. Muoviyhdistys ry. 2007.
- (7) Kurri V, Malén T, Sandell R, Virtanen M. Muovitekniikan perusteet. Opetushallitus; 6. painos 2018
- (8) Reichhold, Inc. FRP Inspection Guide. 2009. <http://www.reichhold.com/corrosion/docs/Inspection%20Selection%20Guide%20Final%20Version.pdf> Haettu 29.1.2020
- (9) Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi SFS 5162. Muoviputket, LM-putket ja putkenosat. Raaka-aineet ja rakenne. 2000.
- (10) Norwegian oil and gas association. Norwegian oil and gas recommended guidelines for NDT of GRP pipe systems and tanks. 1997. <https://www.norskoljeoggass.no/contentassets/14f65390159846e7aa94711e3d4695ec/055---guidelines-for-ndt-of-grp-pipe-systems-and-tanks.pdf%20%20> Haettu 26.1.2020
- (11) PSK Standardisointiyhdistys ry. Standardi PSK 6312. Teollisuuden lujitemuovituotteet. Kunnonvalvonta. Aistivarainen tarkastus. 2011.

- (12) Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi SFS 3910. Lujitemuovit. Korroosion kestävien laminaattien ja niiden liitoksien silmämääräinen tarkastus ja luokitus. 1993.
- (13) Britt F. Design of FRP Piping Systems. 1993. <https://brittengineering.com/whitepapers/Design-of-FRP-Piping-Systems.pdf>. Haettu 30.1.2020
- (14) Haastattelu. Timo Anderson. Sulmu Oy. 13.1.2020
- (15) Mikkonen H, Miettinen J, Leinonen P Jantunen E Kokko V, Riutta E, Sulo P, Komonen, K, Lumme V, Kautto J, Heinonen K, Lakka S, Mäkeläinen R. Kuntoon perustuva kunnossapito. KP-Media Oy; 1. painos 2009
- (16) Tukes. Kemikaaliputkistojen turvallisuusvaatimukset -opas. 2017. [https://tukes.fi/documents/5470659/6372605/Kemikaaliputkistojen\\_turvallisuusvaatimukset.pdf/b2bc9865-b89c-4231-9a36-38c90f60814c/Kemikaaliputkistojen\\_turvallisuusvaatimukset.pdf](https://tukes.fi/documents/5470659/6372605/Kemikaaliputkistojen_turvallisuusvaatimukset.pdf/b2bc9865-b89c-4231-9a36-38c90f60814c/Kemikaaliputkistojen_turvallisuusvaatimukset.pdf) Haettu 2.2.2020
- (17) Tukes. ATEX räjähdysvaarallisten tilojen turvallisuusopas. 2015 <https://tukes.fi/documents/5470659/6406815/ATEX+r%C3%A4j%C3%A4hdysvaarallisten+tilojen+turvallisuus/310d29f5-57bc-431a-90e5-27bf0b6e0f8d/ATEX+r%C3%A4j%C3%A4hdysvaarallisten+tilojen+turvallisuus.pdf?version=1.0> Haettu 3.2.2020
- (18) PSK Standardisointiyhdistys ry. Standardi PSK 6316. Teollisuuden lujitemuovituotteet. Kunnonvalvonta. Lämpökameratarkastus. 2009.
- (19) PSK Standardisointiyhdistys ry. Standardi PSK 6314. Teollisuuden lujitemuovituotteet. Kunnonvalvonta. Ultraäänitarkastus. 2011.
- (20) Sonar. Ainettarikkomaton ultraäänitarkastus. Johdatus perusteisiin. <https://www.sonar.fi/wp-content/themes/sonarfi/theme/ohjeet/ultraaanitarkastus.pdf>. Haettu 10.2.2020
- (21) Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi SFS-EN 59. Glass reinforced plastics. Determination of indentation hardness by means of a Barcol hardness tester. 2016.
- (22) Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi SFS 5163. Muoviputket, LM-putket ja putkenosat. Suunnittelu ja mitoitusperiaatteet, laatuvaatimukset, tarkastus ja merkinnät. 1998.
- (23) Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. Akustinen emissio. <http://www.shy-hitsaus.net/LinkClick.aspx?fileticket=La2eSW7tdg%3D&tabid=4768> Haettu 12.2.2020

- (24) Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi SFS-EN 15857. Non-destructive testing. Acoustic emission. Testing of fibre reinforced polymers. Specific methodology and general evaluation criteria. 2010.
- (25) Olympus. Transducers construction. [https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness\\_gage/transducers/construction/](https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/thickness_gage/transducers/construction/) Haettu 15.2.2020
- (26) Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi SFS-EN ISO 14692-4:2017. Petroleum and natural gas industries. Glass reinforced plastics (GRP) piping. Part 4: Fabrication, installation and operation. 2017.
- (27) TWI-Global. RADIOGRAPHY TESTING - NDT INSPECTION. <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/radiography-testing> Haettu 16.2.2020
- (28) Väisälä S, Korpela H, Kaituri M. SÄTEILYN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA JATUTKIMUKSESSA. STUK. 2004. [https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja3\\_4.pdf/3a0476ed-4bbd-47fb-b27c-9a403a965cda](https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/kirja3_4.pdf/3a0476ed-4bbd-47fb-b27c-9a403a965cda). Haettu 17.2.2020
- (29) Roberti M. RFID Sensors Detect Corrosion. RFID Journal. 2010. <https://www.rfidjournal.com/purchase-access?type=Article&id=7344&r=%2Farticles%2Fview%3F7344> Haettu 3.3.2020
- (30) Kalenborn. Wear monitoring for industrial equipment – KALDETECT. <https://www.kalenborn.com/en-us/applications/wear-monitoring/> Haettu 22.2.2020
- (31) Elcometer. Elcometer 456 Separate Coating Thickness Gauge. <https://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/Datasheets/English/456.pdf>. Haettu 26.2.2020
- (32) Fischer technology. The Smart Way to Measure Coating Thickness. <https://www.yumpu.com/en/document/read/3967128/the-smart-way-to-measure-coating-thickness-helmut-fischer> Haettu 24.1.2020
- (33) Fischer technology. Eddy Current Method. <https://www.fischer-technology.com/en/united-states/knowledge/methods/coating-thickness-measurement/eddy-current-method-amplitude-sensitive/> Haettu 24.2.2020

(34) Fischer technology. Magnetic Induction Process. <https://www.fischer-technology.com/en/united-states/knowledge/methods/coating-thickness-measurement/magnetic-induction-process/> Haettu 24.2.2020

(35) Lux R. 20 years of experience with FRP at desulfurization plants. Christen & Laudon GmbH. 2007. <http://www.christen-laudon.de/files/62/20-years-of-experience-with-frp-at-desulfurization-plants-english.pdf> Haettu 17.3.2020

## Liitteet

## Liite 1 Lujitemuovin vikojen tunnistaminen

Vika	Kuvaus	Suosittelut NDT-menetelmät *Mahdollinen NDT-menetelmä	Toimenpiderajat	Toimenpiteet
Ilmakuplat	Laminaatin seassa olevat kaasulla täyttyneet tyhjät kohdat	Visuaalinen tarkastus Radiografia* Ultraäänitarkastus*	Halkaisija >3 mm Max. 40 kpl/m <sup>2</sup>	Seuranta/ Pintapuolinen korjaus
Rakkula	Pyöreä kohouma laminaatissa.	Visuaalinen tarkastus Radiografia* Ultraäänitarkastus*	Ei saa aiheuttaa vuotoa	Hionta ja uudeleen laminointi/osan vaihtaminen
Palojälki/väripoikkeama	Korkean lämpötilan aiheuttama väripoikkema tai vääristymä laminaatin pinnassa	Visuaalinen tarkastus	Pinnan vääristymä Kerrokset ylittävä vaurio	Hionta ja uudeleen laminointi/osan vaihtaminen
			Pintakerrokseen rajoittunut vaurio	Seuranta pintapuolinen korjaus
UV-säteilystä johtuva poikkeama ja irtokuidut	UV-säteilyn aiheuttama värimuutos Irtokuidut	Visuaalinen tarkastus	Irtokuitujen esiintyminen	Pintapuolinen korjaus
Kemiallinen korrosio	Hartsipinnan irtoaminen	Visuaalinen tarkastus Tunnisteet* Ultraääni* Radiografia*	Ei sallittu	Hionta ja uudeleen laminointi/osan vaihtaminen
Kemiakaalivalumat	Valumat ja pienet vauriot laminaatin pinnassa	Visuaalinen tarkastus	Mikäli havaitaan	Puhdistus ja laminaatin tarkastus
Lohkeama	Pieni pala irronnut laminaatin pinnasta	Visuaalinen tarkastus	> 40 mm <sup>2</sup> vaurio. Kuitujen paljastuminen	Pintapuolinen korjaus
Halkeama	Kerrosten läpi ulottuva halkeama	Visuaalinen tarkastus Ultraääni* Radiografia*	Maksimisyvyys ulottuu kerroksesta toiseen	Hionta ja uudeleen laminointi/osan vaihtaminen

Säröily	Hiushalkeamat laminaatin pinnassa	Visuaalinen tarkastus	Särön pituus yli 25 mm	Pintapuolinen korjaus
Muodonmuutokset	Pitkän ajan kuluessa syntynyt mittojen muuttuminen	Visuaalinen tarkastus	Ei saa aiheuttaa vuotoa	Seuranta Vuodon ilmaantuaessa laajempi korjaus
Delaminaatio	Värimuutos (kirkas kohta) Ontto kohta	Visuaalinen tarkastus/koputtelu Ultraääni Lämpökuvaus Radiografia	Ei sallittu	Hionta ja uudelleen lamiointi/osan vaihtaminen
Kuiva kohta	Alue, jossa havaittavissa hartsin puutetta ja paljaita kuituja	Visuaalinen tarkastus. Lämpökamera* Ultraääni*	Ei sallittu	Hionta ja uudelleen lamiointi/osan vaihtaminen
Erosio	Seinämävahvuuden oheneminen	Ultraääni Radiografia Visuaalinen tarkastus* Lämpökamera* Tunnisteet*	Ei sallittu	Hionta ja uudelleen lamiointi/osan vaihtaminen
Laippahalkeamat	Vaaleat kohdat laipoissa	Visuaalinen tarkastus Ultraääni* Radiografia	Ei sallittu	Hionta ja uudelleen lamiointi/osan vaihtaminen
Murtuma	Koko laminaatin läpäisevä murtuma Suurin osa kuituista poikki Kerrokset irti toisistaan	Visuaalinen tarkastus Akustinen emissio*	Ei sallittu	Osan vaihtaminen
Lievä iskuvaurio	Vaaleampi kohta laminaatissa Mahdollisesti katkenneita kuituja	Visuaalinen tarkastus Ultraääni* Lämpökamera*	Halkaisijaltaan >25 mm pyöreät ja vaaleat vauriot ei sallittuja	Seuranta/pintapuolinen korjaus Hionta ja uudelleen lamiointi/osan vaihtaminen jos havaittu vuotoa
Riittämätön sidos (muhviliitos)	Liiman määrä riittämätön. Toisistaan irtotokset	Radiografia Ultraääni*	Puutteellisen liitoksen ala >30 % Puutteellisen liitoksen ala aksiaalisesti >20 %	Liitoksen uusiminen.
Kuoppa	Pieni kolo laminaatin pinnassa	Visuaalinen tarkastus Radiografia*	Halkaisija yli 12,5 mm tai syvyys yli 10 % seinämävahvuudesta	Hionta ja uudelleen lamiointi/osan vaihtaminen

Kuoppa	Pieni kolo lami- naatin pinnassa	Visuaalinen tar- kastus Radiografia*	Halkaisija 3...12,5mm tai sy- vyys yli puolet ker- roksen paksuu- desta	Pintapuolinen korjaus
Laminaatin peh- meneminen	Hauraus, pehme- neminen, turpoa- minen tai peh- meys hartsissa	Visuaalinen tar- kastus Ultraääni Barcol-kovuusmit- taus	Vuodot ei hyväk- syttyjä	Seuranta/pin- nan uusiminen
Virtaushaitta	Liiallisesta hart- sista, liimasta tai muusta ulkopuoli- sesta seikasta joh- tuva virtaushaitta	Radiografia Visuaalinen tar- kastus (endo- skooppi)	Yli 5% rajoitus vir- taukseen tai 10mm korkea vir- taushaitta	Virtaushaitan hi- onta/poisto
Raapaisu	Ulkoisen tekijän aiheuttama ma- tala jälki tai ura	Visuaalinen tar- kastus Lämpökamera* Ultraääni*	Kerroksen lä- päisy/kuitujen pal- jastuminen	Pintapuolinen korjaus
Tihkuminen	Nesteen läpäisy putken tai sauman läpi	Visuaalinen tar- kastus Ultraääni* Radiografia* Tunnisteet*	Ei sallittu	Hionta ja uudel- leen lami- nointi/osan vaihtaminen



Liite 2 Kuvia tyypillisistä lujitemuovirakenteiden vioista

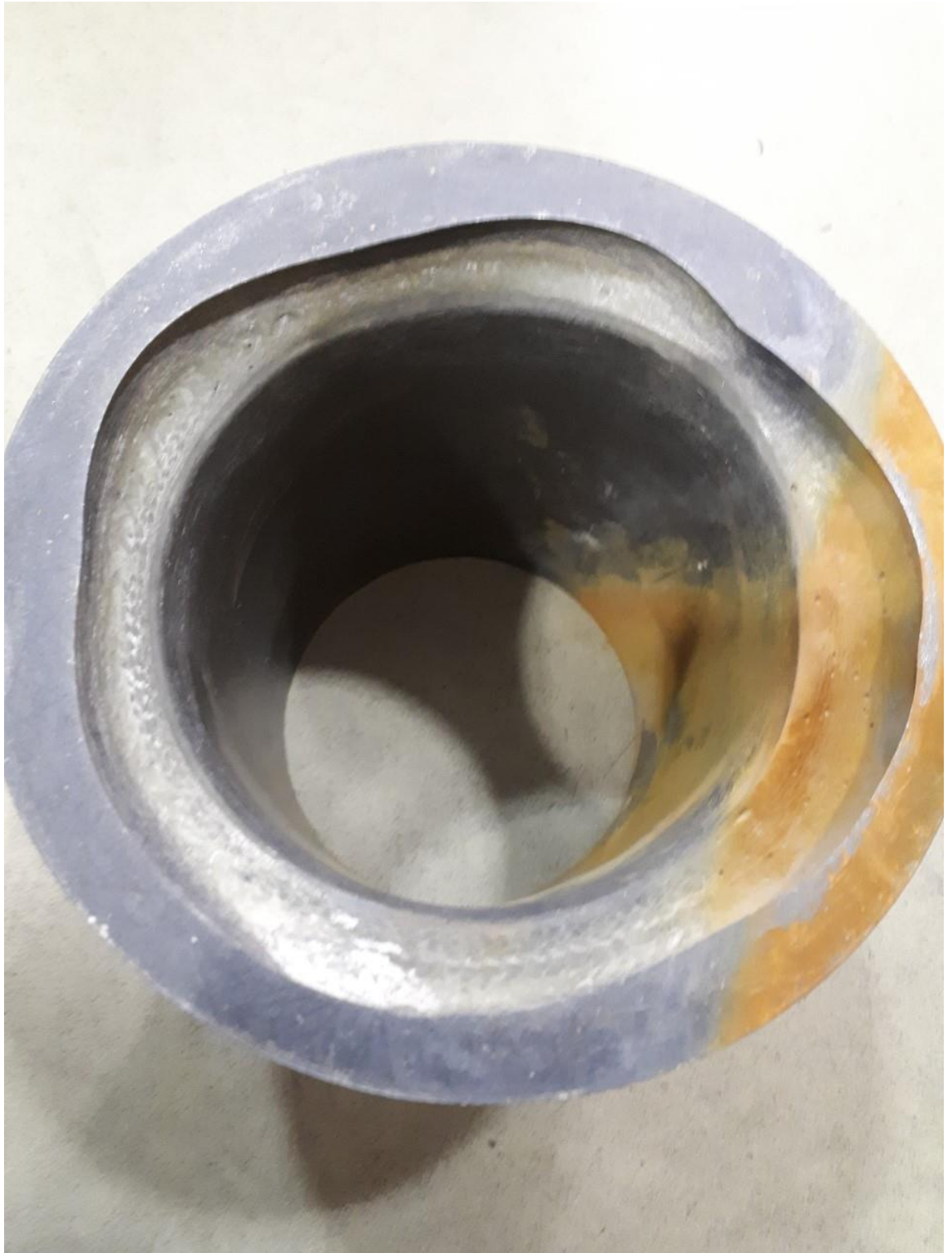


Kuva 1. Korkean lämpötilan ja kemiallisen korroosion aiheuttama suojakerroksen vaurio.



Kuva 2. Korkean lämpötilan ja kemiallisen korroosion aiheuttama suojakerroksen vaurio.





Kuva 3. Voimakas eroosio pumpun imuyhteessä. (Pyörteilyn aiheuttamaa).



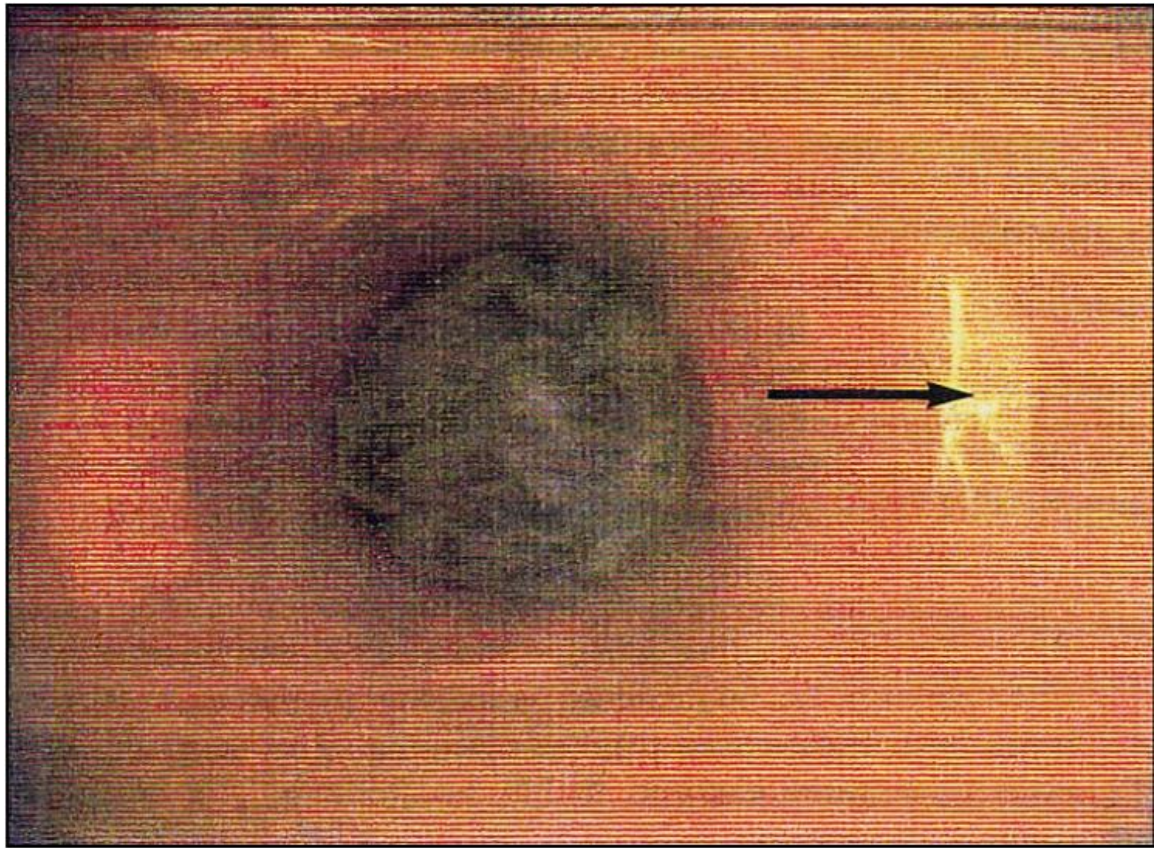
Kuva 4. Eroosion aiheuttamaa kulumaa.



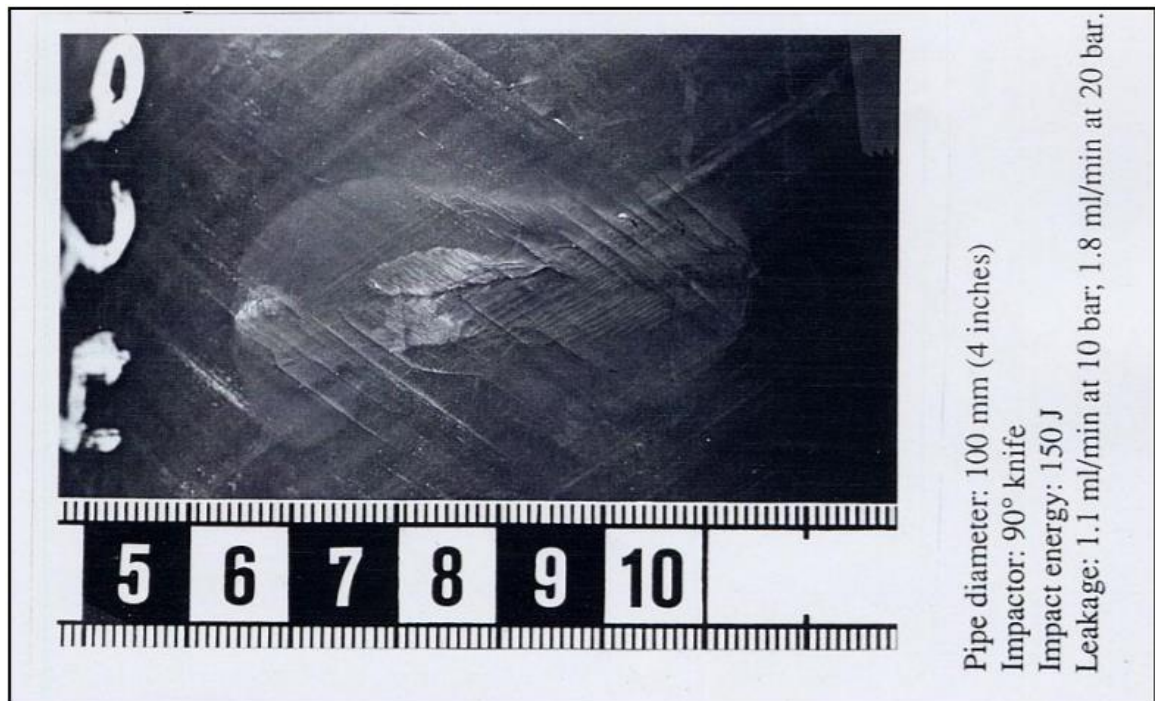


Kuva 5. Halkeama laipan juuressa. Syy todennäköisesti pulttien ylikiristys tai putkistoon vaikuttanut ulkopuolinen mekaaninen kuormitus, kuten värähtely tai paineisku.

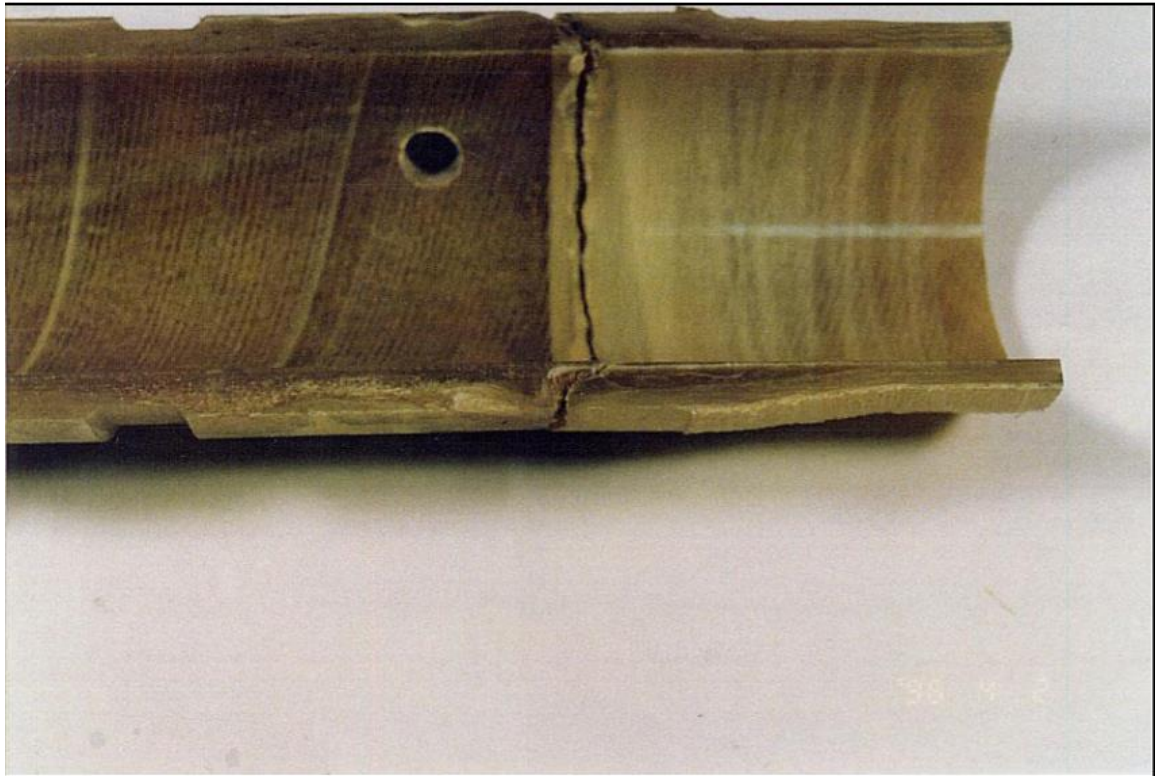




Kuva 6. Iskuvaurio [10].



Kuva 7. Iskuvaurion aiheuttamia halkeamia ja delaminaatiota. [10].

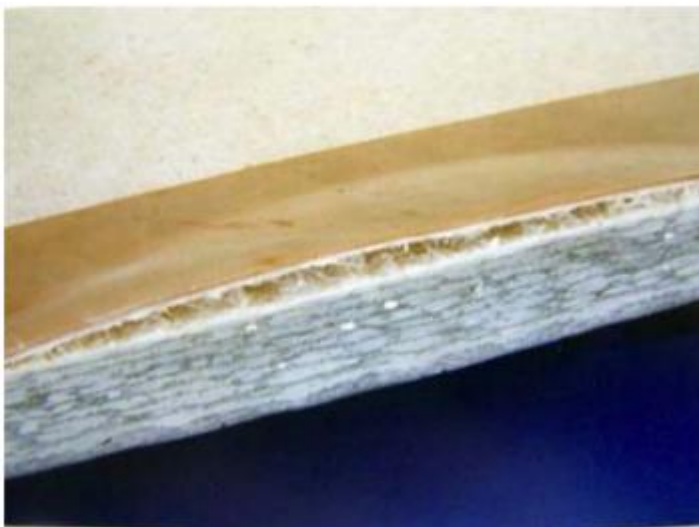


Kuva 8. Murtuma. Valmistusviollinen osa, josta puuttuu riittävä määrä aksiaalisia kuituja. [10.]





Kuva 9. Osmoosion aiheuttamia rakkuloita säiliön pinnassa [35, s. 4].



Kuva 10. Poikkileikkauskuva rakkulasta [35, s. 5].



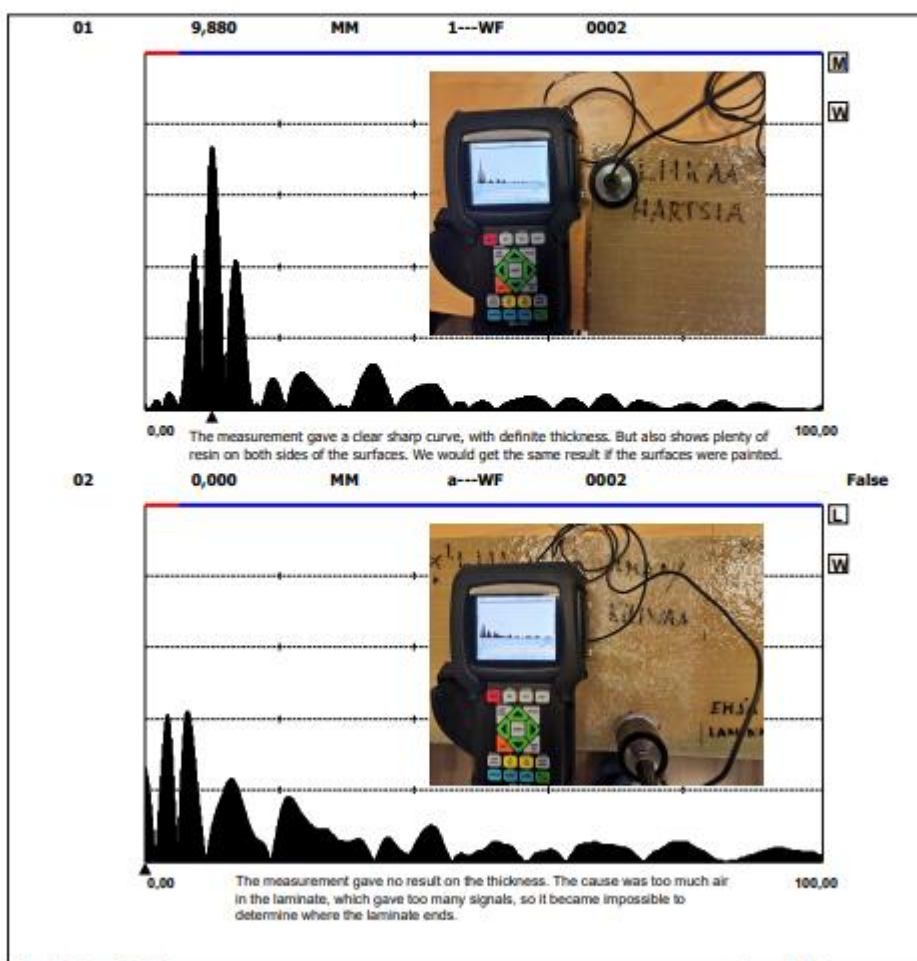


Kuva 11. Tyypillinen esimerkki lohkeamasta. [10.]

## Liite 3 FR Valve Products

## SURVEY MEASUREMENTS AND WAVEFORMS

The Survey Name:	TEST1 1		
Survey Type:	INCREMENTAL	Survey Mode:	THICKNESS
Survey Date:	2.3.2020-15.27	Erase Protection:	OFF
Survey Description:	LAMINAATIN KUNTO		
Location Note:	PIETARSARI		
Inspector ID:	PS		
OlympusNDT Thickness			

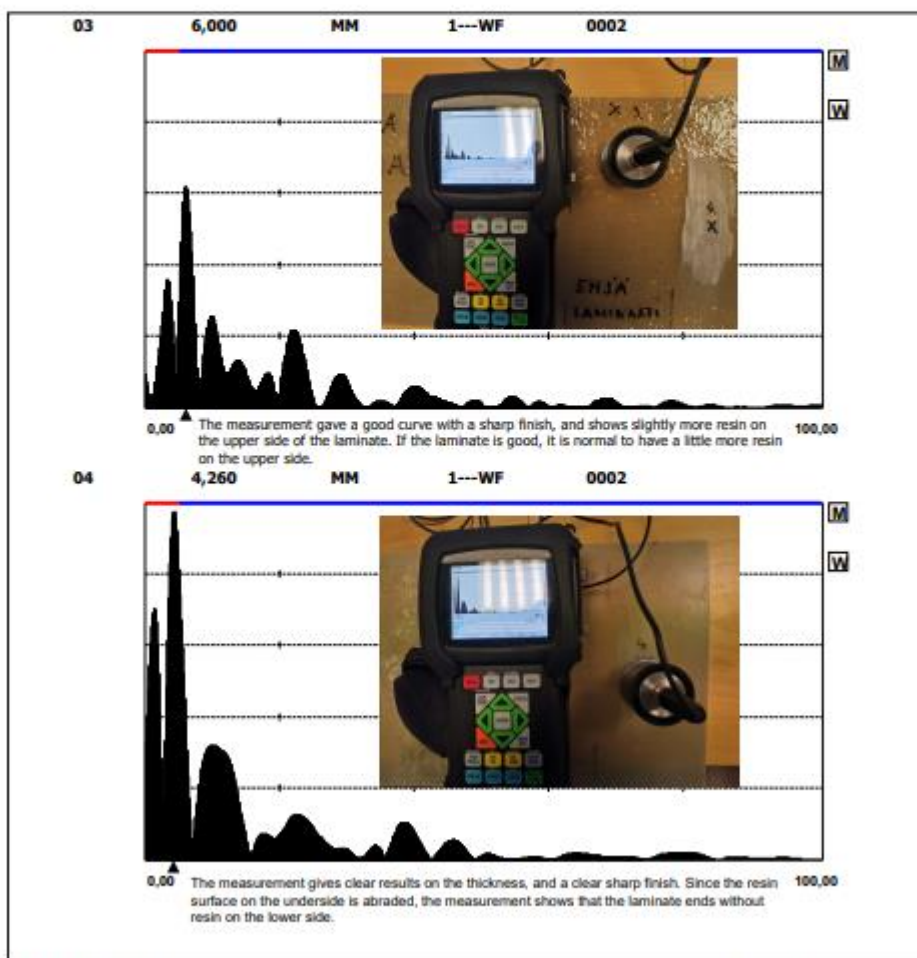


Report Date: 2.3.2020

Page: 1 of 2

### SURVEY MEASUREMENTS AND WAVEFORMS

The Survey Name:	TEST1 1		
Survey Type:	INCREMENTAL	Survey Mode:	THICKNESS
Survey Date:	2.3.2020-15.27	Erase Protection:	OFF
Survey Description:	LAMINAATTIN KUNTO		
Location Note:	PIETARSARI		
Inspector ID:	PS		
OlpmpusNDT Thickness			



Report Date: 2.3.2020

Page: 2 of 2

Liite 4 Digiröntgen mittaukset

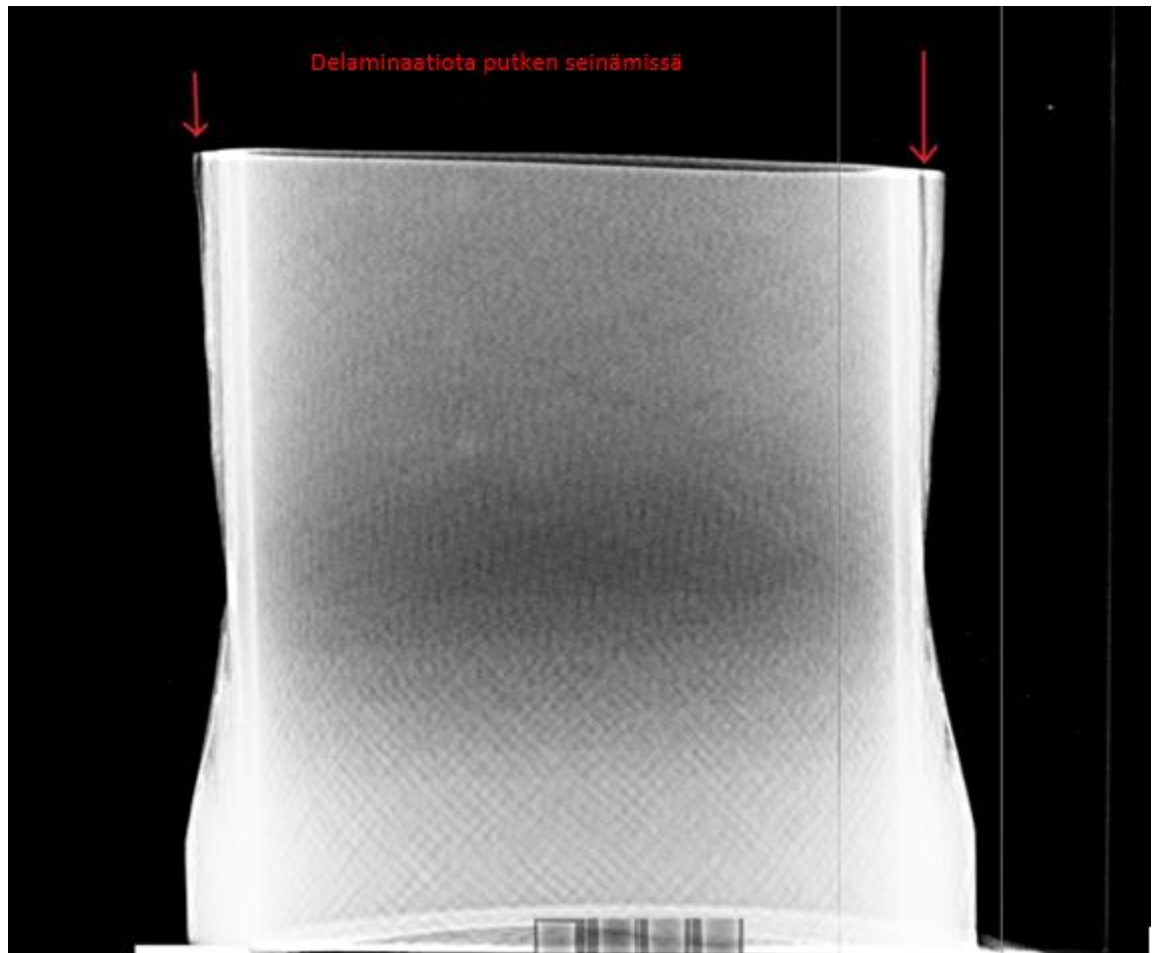


Kuva 1. Delaminaatio putken seinämässä.



Kuva 2. Mekaanisesti isketty vaurio ja kerrosirtoama putken seinämässä.





Kuva 3. Digitaaliröntgenillä otettu kuva liitteessä 4 esitettyjen kuvien 1 ja 2 vaurioista. Vasemman puoleisen nuolen kohdalla kuvan 1 vaurio ja oikean puoleisen nuolen kohdalla kuvan 2 vaurio.



Kuva 4. Prosessista irrotettu putki, jossa todellinen delaminaatio. Kappale kuvattu digitaaliröntgenillä, minkä tulos kuvassa 3.