



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIRO SAARI
SULATUSKULJETTIMIEN KULUVIEN KOHTEIDEN KUNNOSSAPI-
TOKUSTANNUSTEN OPTIMOINTI

Diplomityö

Tarkastajat: professori Asko Ellman
professori Arto Lehtovaara

Tarkastajat ja aihe hyväksytty
2. toukokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

MIRO SAARI: Sulatuskuljettimien kuluvien kohteiden kunnossapitokustannusten optimointi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 131 sivua, 22 liitesivua

Elokuu 2018

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tuotantotekniikka

Tarkastajat: professori Asko Ellman ja professori Arto Lehtovaara

Avainsanat: sulatuskuljetin, kunnossapitokustannukset, korroosio, mekaaninen kuluminen

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää mahdollisuuksia sulatuskuljettimien kunnossapitokustannusten optimointiin. Optimoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä myös kustannusten ennakoitavuutta. Tavoitteena oli selvittää eri tekijöiden vaikutusta kuljettimien kulumiseen ja sitä myöten aiheutuviin kustannuksiin sekä selvittää keinoja niiden hillitsemiseksi.

Työn toteuttamiseksi UPM:n Pietarsaaren, Kymin ja Kaukaan sellutehtaiden sulatuskuljettimista kerättiin tietoja toiminnanohjausjärjestelmästä, henkilöstön kanssa keskustelemalla sekä paikan päällä havainnoimalla. Laitetoimittajiin ja -valmistajiin oltiin yhteydessä parempien ratkaisujen löytämiseksi sekä kulumismekanismeja pyrittiin selvittämään Tampereen teknillisellä yliopistolla tehdyssä analyysissä kuljettimesta otetusta näytepalasta.

Tällä hetkellä saatavissa olevilla tiedoilla ei pystytty tekemään varsinaista kustannusten optimointia. Tämän diplomityön tulosten avulla sulatuskuljettimien kulumista pystytään seuraamaan entistä paremmin ja tunnistamaan muuttuneet olosuhteet, jotka saattavat johtaa nopeaan kulumiseen. Sulatuskuljettimille luotiin ennakkohuoltosuunnitelma, joka koostuu mm. visuaalisista tarkastuksista, paksuusmittauksista sekä sulatusvedelle tehtävistä analyyseistä.

Hardoxia voidaan pitää tällä hetkellä sopivimpana materiaalina kuljettimen kulutusmateriaaliksi. Nykyisin käytettävän Hardox 400:n sijasta voitaisiin käyttää hieman kovempaa Hardox 450 tai 500. Tällä hetkellä ketjujen sivulevyt kuluvat hitaasti ja niillä olisi varaa kulua nopeamminkin. Kovemmalla pohjamateriaalilla ketjujen sivulevyjen kuluminen oletettavasti hieman nopeutuisi ja pohjan kuluminen hidastuisi.

Korroosiolla on suuri merkitys kulumiseen sulatuskuljettimissa. Kymillä sulatusveden pH:n säätöön on aiemmin käytetty valkaisusta saatavaa alkalisuodosta. Alkalisuodoksen sisältämien kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien on syytä epäillä aiheuttaneen voimakasta korroosiota Kymin kuljettimissa johtaen nopeaan kulumiseen. Sulatusvedestä pitäisi säännöllisesti analysoida, korroosion ehkäisemiseksi, ainakin kloridi- ja sulfaattipitoisuudet, pH, alkaliteetti, johtokyky sekä haihdutus- ja hehkutusjäännökset.

ABSTRACT

MIRO SAARI: Optimizing maintenance costs of wearing parts of de-icing conveyors

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 131 pages, 22 Appendix pages

August 2018

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Production Engineering

Examiners: Professor Asko Ellman and Professor Arto Lehtovaara

Keywords: de-icing conveyor, maintenance costs, corrosion, mechanical wear

The objective of this M.Sc. thesis was to find out the possibilities of optimizing maintenance costs of de-icing conveyors. In this context, optimization also means the foreseeability of costs. The aim was to investigate the impact of various factors on the wear of de-icing conveyors and to find ways to mitigate them.

To carry out the thesis initial information was gathered from all de-icing conveyors of UPM's three pulp mills which are in Pietarsaari, Kymi and Kaukas. Information was collected from company's ERP system, via discussions with staff and via on-site observations. Equipment suppliers and manufacturers were contacted to figure out better solutions. A material analysis was also carried out to figure out the main wearing mechanisms of a sample piece taken from one of the conveyors.

The actual cost optimization was not possible with the information available currently. With the results of this thesis, it is possible to monitor the wear of de-icing conveyors better than before and recognise changed conditions that can lead to rapid wear. A preventive maintenance program was created to de-icing conveyors. It consists of visual inspections, thickness measurements and chemical analyses of de-icing water.

Hardox can be assumed to be the most suitable material for wearing material in de-icing conveyors at the moment. Instead of the current material (Hardox 400), harder Hardox (450 or 500) could be considered. At the moment wear rate of chain's side plates can be considered too slow. By using harder material at the bottom of a conveyor, side plates would wear a little bit faster and the bottom would wear slower.

Corrosion has a great effect on wearing in de-icing conveyors. In Kymi's mill, alkaline filtrate from bleaching was used to control pH of de-icing water. Alkaline filtrate contains high chloride- and sulphate concentrations which could have led to rapid corrosion and furthermore to the rapid wear of conveyors. It is advised that a chemical analysis is done regularly to de-icing water and monitor the contents of chloride, sulphate, pH, alkalinity and conductivity as well as evaporation and incineration residues.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty UPM:n Pietarsaaren sellutehtaalla. Haluan kiittää kaikkia, jotka ovat omalta osaltaan osallistuneet tämän projektin läpiviemiseen. Kiitokset Pietarsaaren, Kymin ja Kaukaan tehtaiden henkilöille, joilta olen saanut tarvitsemiani tietoja. Erityiskiitokset esimiehelleni ja työn ohjaajalle kunnossapidonkehitysinsinööri Samuli Räsäselle sekä muille työn ohjaajille kunnossapitopäällikkö Markus Aleniukselle ja puunkäsittelyn käyttöinsinööri Kenneth Passellille projektin aikaisista neuvoista.

Haluan kiittää myös työni tarkastaneita professoreita Asko Ellmania ja Arto Lehtovaaraa.

Erityisen kunniamaininnan ansaitsevat avopuolisoni Tiia, jonka tuen ansiosta saan vihdoin opiskelu-urakkani kunnialla päätökseen sekä äidille ja isälle, jotka ovat majoittaneet ja ruokkineet minut tämän projektin aikana sekä tukeneet minua läpi elämäni.

Pietarsaassa, 6.8.2018

Miro Saari

SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO	1
1.1 Työn tutkimuskysymys, tutkimusmenetelmät ja rakenne	1
2. YRITYSESITTELY JA SELLUN VALMISTUSPROSESSI.....	3
2.1 Sellunkeitto.....	3
2.2 Puunkäsittely	5
2.3 Sulatuskuljettimen toiminta ja rakenne	7
3. KUNNOSSAPITO	9
3.1 Tuotannon kokonaistehokkuus, KNL	10
3.2 Vikaantuminen	11
3.3 Kunnossapitolajit.....	12
3.4 Kunnossapitokustannukset	14
3.5 Reliability Centered Maintenance, RCM	15
3.6 Kunnossapito UPM:llä	17
4. KULUMINEN	21
4.1 Adhesiivinen kuluminen	26
4.2 Abrasiivinen kuluminen	26
4.3 Väsymiskuluminen.....	31
5. KORROOSIO	32
5.1 Korroosion perusteet	32
5.1.1 Elektrodipotentiaali.....	35
5.1.2 Passivaatio.....	37
5.1.3 Polarisatio.....	39
5.2 Korroosion ilmenemismuodot.....	43
5.2.1 Yleinen syöpyminen	43
5.2.2 Pistesyöpyminen	44
5.2.3 Rakokorroosio.....	46
5.2.4 Galvaaninen korroosio	46
5.2.5 Raerajakorroosio	47
5.2.6 Valikoiva liukeneminen	48
5.2.7 Biologinen korroosio.....	48
5.3 Ympäristön vaikutus korroosioon	49
5.3.1 Veden ominaisuudet.....	49
5.3.2 Veteen liuenneet suolat	52
6. TRIBOKEMIALLINEN KULUMINEN.....	56
6.1 Värähtelykuluminen	57
6.2 Eroosiokuluminen	58
6.3 Kulumisen ja korroosion synergia.....	59
7. KORROOSION JA KULUMISEN ESTO	61
7.1 Materiaalin valinta.....	61
7.2 Inhibiitit.....	64

7.3	Sähkökemiallinen suojaus	66
7.4	Pinnoitteet.....	67
8.	SULATUSKULJETTIMIEN NYKYTILA-ANALYYSI.....	69
8.1	Sulatuskuljettimien kunnossapito.....	71
8.2	Kunnossapitotyöt ja syntyvät kustannukset	72
8.3	Sulatuskuljettimien konstruktio	76
8.4	Käytetyt materiaalit	81
8.4.1	Pietarsaaressa käytetyt materiaalit	81
8.4.2	Kaukaalla ja Kymillä käytetyt materiaalit	83
8.4.3	Yhteenveto tällä hetkellä käytössä olevista materiaaleista	84
8.4.4	Hardox 400:n soveltuvuuden arviointi.....	86
8.5	Prosessitekniset asiat	88
8.6	Vesikemia.....	94
8.7	Kulumisen sulatuskuljettimissa ja kulumisen mittaaminen.....	99
8.7.1	Kulumismekanismien arviointi	100
8.7.2	Kulumisen mittaaminen	106
9.	VALMISTAJIEN JA MAHDOLLISUUKSIEN KARTOITUS.....	109
9.1	Ketjut.....	109
9.2	Materiaalit	111
9.3	Huoltotoimenpiteet.....	112
9.4	Pinnoitus kulumisalueilla	112
9.5	Sulatusvesi.....	113
10.	KEHITYSIDEAT JA TULOKSET	114
10.1	Ennakkohuoltotoimenpiteet	115
10.1.1	Säännölliset mittaukset	117
10.1.2	Säännölliset vesianalyysit ja pH:n kalibrointi.....	119
10.2	Materiaalivalinnat.....	120
10.3	Yhteenveto kehitysideoista	122
11.	YHTEENVETO	124
	LÄHTEET.....	126

LIITE 1: VEDEN INDEKSIEN LASKENTA

LIITE 2: LÄHTÖTIETOLOMAKKEET

LIITE 3: OHJE KETJUN JA POHJAN MITTAUKSESTA

LIITE 4: OHJE SULATUSVEDEN KEMIALLISESTA ANALYYSISTA

LYHENTEET JA MERKINNÄT

[i]	aineen pitoisuus (mg/l)
%i	aineen seostusosuus
c(i)	aineen pitoisuus (mol/m ³)
C ₀	korroosion aiheuttama materiaalihäviö
CET/CEV	hiilielkvivalentti, joka kuvaa teräksen hitsattavuutta
E	korroosioparin välinen potentiaaliero (V)
E ₀	elektrodien välinen potentiaaliero
ERP	toiminnanohjausjärjestelmä
E ^θ	kennon standardipotentiaali
F	Faradayn vakio
F _N	normaalivoima
H	materiaalin kovuus
H _a	kuluttavan pinnan kovuus täysin muokkauslujittuneena
Hardox	SSAB:n valmistama kulutusteräslaatu
HB	materiaalin kovuus Brinellin asteikolla, HBW jos kovuus on mitattu volframikarbidista valmistetulla kuulalla
H _m	kuluvan metallin kovuus täysin muokkauslujittuneena
I	korroosiovirta (A)
i	virrantiheys
i _L	maksimivirrantiheys
JHA	jälleenhankinta-arvo
K	kuormitusindeksi
k-m ³	kiintokuutiometri — puumäärän mittayksikkö, jossa puiden välistä ilmaa ei oteta huomioon
KNL	tuotannon kokonaistehokkuus, engl. OEE. Käytettävyyden (K), toiminta-asteen (N) ja laatukertoimen (L) tulo, joka kuvaa laitteen tai järjestelmän tehokkuutta ja yksi tärkeimmistä kunnossapidon mittareista
La	Larsonin indeksi. Kuvaa veden syövyttävyyttä kloridi- ja sulfaatti-ioninen sekä alkaliteetin suhteen avulla
LSI	Langelierin kyllästysindeksi. Kuvaa veden syövyttävyyttä kalkki-hiili-dioksidi tasapainon avulla

m	liuenneen materiaalin massa sekunnissa (g/s)
M	anodin moolimassa (g/mol)
n	korroosioon osallistuvien elektronien lukumäärä
P	kuljettimella ajettu puumäärä ($k\text{-m}^3$)
pH	liuoksen happamuutta kuvaava luku
pH _s	laskennallinen pH-arvo, kun vesi on tasapainossa kalsiumkarbonaatin kanssa
PRE	Pitting Resistance Equivalent. Kuvaa teräksen kestoa paikallisia korroosionmuotoja vastaan
PSK	PSK Standardisointiyhdistys Ry, teollisuuden ja sitä palvelevien yritysten yhteinen kehitysyksikkö
R	korroosiopiirin sisäinen resistanssi (Ω)
RCM	Reliability Centered Maintenance, suom. luotettavuuskeskeinen kunnossapito
RI	Ryznarin stabiliteetti-indeksi. Kuvaa veden syövyttävyyttä kalkki-hiilidioksidi tasapainon avulla
RTF	engl. run-to-failure. Laitteelle ei määritetä ennakko- huoltotoimenpiteitä, vaan sitä käytetään niin kauan kunnes se rikkoutuu
s	liukumatka, sulatuskuljettimien tapauksessa käyntiajan ja keskimääräisen nopeuden tulo
S	DIN 50930-standardin mukainen todennäköisyys piste- ja rakokorroosion esiintymiselle
SAP	UPM:llä käytettävä ERP-ohjelmisto, jolla hoidetaan kaikki kunnossapitoon liittyvät toiminnot
SFS	Suomen standardisoimisliitto
SHE	Saturated Hydrogen Electrode. Standardielektrodi, johon vertaamalla muodostetaan aineiden sähkökemiallinen jännitesarja
S _i	sulatuskuljetinindeksi
SRCM	kevennetty versio RCM:stä
S _y	korroosion ja mekaanisen kulumisen välinen synerginen vaikutus
T	kokonaismateriaalihäviö
T _h	kuljettimen käyntiaika (h)
v	keskimääräinen mitattu nopeus (m/h)
V	kulunut tilavuus
V _a	keskimääräinen kulumisnopeus vuodessa (mm^3/a)

W_0	mekaanisen kulumisen aiheuttama materiaalihäviö
Z	kulumiskerroin Holmin kulumisyhtälössä
ΔC_w	mekaanisen kulumisen nopeuttama korroosio
ΔW_c	korroosion nopeuttama mekaaninen kuluminen
η	polarisaation määrä

JOHDANTO

Metsäteollisuus on muuttunut valtavasti viime vuosikymmeninä. Kannattamattomia tuotantolaitoksia on suljettu ja jäljelle jääneiden laitosten kustannustehokkuutta on pyritty kasvattamaan. Tästä syystä eri toimintojen kustannuksiin on alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota. Sellutehtailla kunnossapitokustannukset ovat yksi suurimmista kustannuseristä.

Tämän diplomityön aihe syntyi, kun huomattiin, että sulatuskuljettimien kunnossapitokustannukset ovat olleet suuria ja ennakoimattomia. Sulatuskuljettimien havaittiin kuluvan odotettua, ja valmistajien lupauksia, nopeammin. Lisäksi sulatuskuljettimien kulumisnopeudessa oli suuria eroja UPM:n Suomen sellutehtaiden välillä.

Tämä diplomityö on tehty UPM:n Pietarsaaren sellutehtaalla, mutta siinä on huomioitu myös Kymin ja Kaukaan tehtailla olevat sulatuskuljettimet.

1.1 Työn tutkimuskysymys, tutkimusmenetelmät ja rakenne

Työn tutkimuskysymyksenä oli, voidaanko sulatuskuljettimien kunnossapitokustannuksia optimoida. Optimoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä myös kustannusten ennakoitavuuden parantamista. Tavoitteena oli selvittää eri tekijöiden, kuten ajoparametrien, sulatusveden koostumuksen ja materiaalien vaikutusta kuljettimien kulumiseen ja sitä myöten aiheutuviin kunnossapitokustannuksiin. Tavoitteena oli myös parantaa suurten korjauskustannusten ennakoitavuutta, jotta UPM:n laajuisesti suuret kustannukset jakautuvat tasaisesti ja suuret korjaukset ovat paremmin budjetoitavissa.

Diplomityö aloitettiin keräämällä lähtötietoja kaikista kolmen tehtaan sulatuskuljettimista. Lähtötietoja kerättiin SAP-toiminnanohjausjärjestelmästä, pitämällä palaverieita tehtaiden henkilöstön kanssa, joissa keskusteltiin sulatuskuljettimiin liittyvistä tekijöistä ja ongelmista sekä tutustumalla paikan päällä sulatuskuljettimiin.

Lähtötietojen perustella voitiin tehdä sulatuskuljettimien nykytila-analyysi, jossa pohditaan eri tekijöiden vaikutusta sulatuskuljettimien kulumiseen ja syntyviin kustannuksiin. Diplomityön aikana otettiin yhteyttä useisiin laitetoimittajiin ja -valmistajiin, jonka avulla kartoitettiin mahdollisuuksia nykytilanteen parantamiseksi. Näiden aiemmin mainittujen ohella samanaikaisesti tehtiin kirjallisuustutkimusta, jossa tutkittiin kulumiseen johtavia tekijöitä ja keinoja niiden ehkäisyyn.

Tämän diplomityön rakenne kuvastaa työn kulkua. Kappaleessa 2 esitellään kohdeyritys sekä sulatuskuljettimen toimintaa ja rakennetta. Kappaleissa 3 – 7 käsitellään työn kannalta tärkeimmät teoreettiset taustatiedot sekä esitetään tutkimustuloksia eri tekijöiden vaikutuksesta kulumiseen. Kappaleessa 8 sovelletaan teoriaa käytäntöön sulatuskuljettimien nykytila-analyysin kautta. Kappaleissa 9 ja 10 käydään läpi mahdollisuuksia sulatuskuljettimien kunnossapitokustannusten optimointiin sekä annetaan lopulliset suositukset parannuskeinoista.

Tämä diplomityö on luonteeltaan toimintatutkimus. Toimintatutkimukselle tyypillinen nykytilan selvitys rakentui toiminnanohjausjärjestelmästä kerättyihin tietoihin, epävirallisiin keskusteluihin tehtaiden henkilöstöjen kanssa sekä omiin havaintoihin. Työn tuloksena syntyi kehitysideoita nykytilanteen parantamiseksi. Johtuen syntyvien kustannuksien pitkästä syklistä, kehitysideoiden toimivuus käytännössä jää näkemättä tämän diplomityön yhteydessä.

2. YRITYSESITTELY JA SELLUN VALMISTUS-PROSESSI

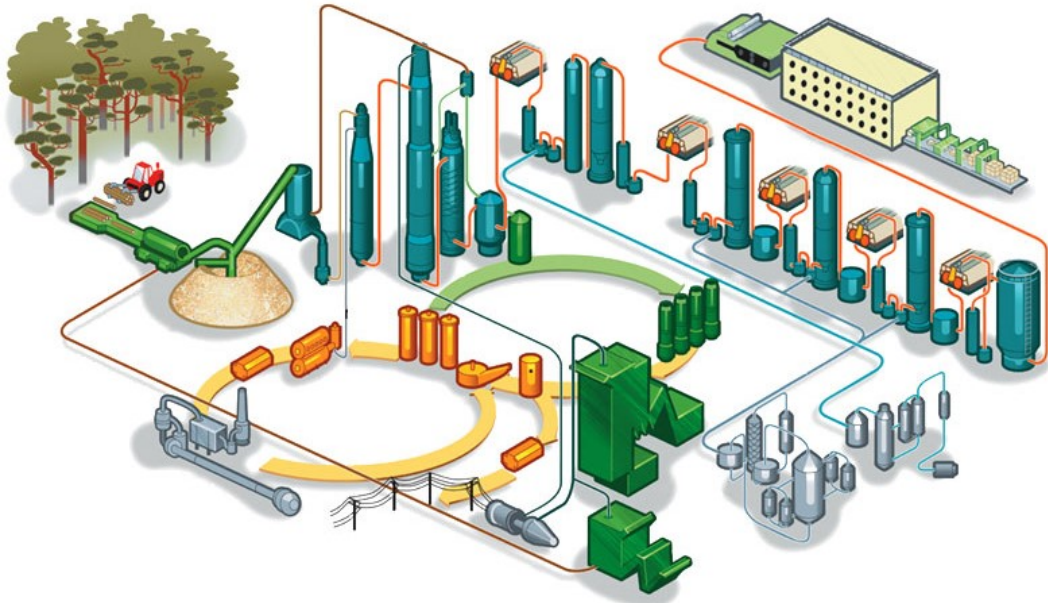
UPM-Kymmene on yksi maailman johtavista pohjoisen havu- ja koivusellun sekä eukalyptussellun tuottajista (UPM 2016). UPM-Kymmene syntyi vuonna 1995, kun Kymmene Oy ja Repola Oy sekä sen tytäryhtiö Yhtyneet Paperitehtaat Oy yhdistyivät. Nykyinen UPM-konserni on muodostunut kaikkiaan noin sadasta itsenäisesti toimineesta yrityksestä. Konsernilla on Suomessa pitkät perinteet metsäteollisuudesta, sillä sen ensimmäiset puuhiomot, paperitehtaat ja sahalaitokset aloittivat toimintansa 1870-luvun alkupuolella. Sellun valmistus aloitettiin hieman myöhemmin 1880-luvulla ja paperinjalostus 1920-luvulla. (UPM 2015)

Tänä päivänä UPM:n liiketoiminta koostuu kuudesta eri liiketoiminta-alueesta, jotka ovat Biorefining, Energy, Raflatac, Speciality Papers, Communication Papers ja Plywood. Yhtiössä työskentelee noin 19 100 henkilöä ja tuotantolaitoksia on 13 eri maassa. Vuonna 2017 yhtiön liikevaihto oli noin 10 miljardia euroa. UPM Biorefining liiketoiminta-alue koostuu sellu-, saha- ja biopolttoaineliiketoiminnasta. UPM:llä on Suomessa kolme sellutehdasta ja yksi Uruguayssa. Suomen sellutehtaat sijaitsevat Pietarsaareissa, Kymillä ja Kaukaalla. Sellun vuosituotantokapasiteetti on 3,5 miljoonaa tonnia. UPM on myös merkittävä toimija sähkömarkkinoilla ja 1494 MW:n tuotantokapasiteetilla UPM on Suomen toiseksi suurin sähköntuottaja. (UPM 2016)

2.1 Sellunkeitto

Sulfaattisellutehdas koostuu pääasiassa kahdesta erillisestä kokonaisuudesta: kuitulinjasta ja kemikaalikierrosta. Kuvassa 1 on esitettyä yleiskuva sellutehtaasta, jossa yläoi-kealla näkyy kuitulinja ja alempana vasemmalla kemikaalikierto. Yksinkertaistetusti kemikaalikierron tehtävänä on parantaa sellun valmistuksen hyötysuhdetta kierrättämällä sellunkeitossa käytettyjä kemikaaleja. Kemikaalikierto koostuu haihduttamosta, soodakattilasta sekä kaustistamosta. Haihduttamossa kuitulinjalta tulevasta mustalipeästä haihdutetaan vettä pois, jotta se voidaan syöttää soodakattilaan poltettavaksi. Haihduttamossa mustalipeästä kerätään myös talteen sellunkeitossa syntyvät sivutuotteet, joista tärkeimmät ovat metanoli, tärpähti ja suopa. (Prowledge Oy 2016)

Soodakattilassa mustalipeän sisältämä rikki pelkistetään sekä orgaaniset aineet poltetaan ja siitä syntyvä lämpö kerätään talteen. Syntyvällä lämpöenergialla tuotetaan höyryä, jolla tuotetaan sähköä. Soodakattilan alaosasta valuva kemikaalisula liuotetaan laihavalkolipeään, jolloin syntyy viherlipeää. Viherlipeä johdetaan kaustistamoon, jossa se muutetaan valkolipeäksi kalkin avulla. (Prowledge Oy 2016)



Kuva 1. Yleiskuva sellun valmistusprosessista. (Prowledge Oy 2016)

Sellutehtaan kuitulinjaan kuuluvat kaikki mitä kemiallisen massan, eli sellun, valmistamiseen ja jatkokäsittelyyn kuuluu. Kuitulinja koostuu puunkäsittelystä, keittämöstä, pesusta ja lajittelusta, happidelignifoinnista, valkaisuusta sekä kuivatuksesta ja jälkikäsittelystä. (Prowledge Oy 2016)

Puunkäsittelyyn kuuluvat kaikki puille tehtävät toiminnot ennen haketusta, haketus sekä haketuksen jälkeinen välivarastointi hakekasoille. Puunkäsittely esitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. Hakekasoilta puuhake kuljetetaan hihnakuljettimilla keittämölle, jossa siitä liuotetaan selluloosakuituja sitovaa ligniiniä valkolipeän avulla. Keittimiä on pääasiassa kahdenlaisia: eräkeittimiä ja vuokeittimiä. Eräkeittimissä keiton eri vaiheet tehdään koko erälle samanaikaisesti, joiden jälkeen keitin tyhjenetään ja täytetään taas uudella tuoreella hakkeella. Vuokeittimessä, eli jatkuvatoimisessa keittimessä, keiton eri vaiheet tapahtuvat keittimen eri osioissa. Keittimen yläpäähän syötetään koko ajan uutta haketta ja keitettyä massaa poistetaan keittimen alapäästä. (Prowledge Oy 2016)

Keiton jälkeen keitetty massa ohjataan pesuun ja lajitteluun. Pesun tarkoituksena on poistaa keitetystä massasta keittokemikaalit ja liuennut ligniini. Lajittelun tarkoituksena on poistaa massan seasta epäpuhtauksia (keittymättömät hakepalat, kuori, hiekka, kivet ja metallit), jotka ovat päässeet hakkeen mukana keittimeen. (Prowledge Oy 2016)

Happidelignifoinnissa massasta poistetaan keitosta jäljelle jäänyttä ligniiniä hapen ja alkalien avulla. Happidelignifointi hapettaa ligniinin, jolloin se liukenee alkaliin ja tuhoaa ligniinin massaa värjääviä yhdisteitä sekä poistaa epäpuhtauksia. Happidelignifoinnin avulla massan valkaisuun tarvitaan vähemmän kemikaaleja ja tehtaan päästöt alenevat. Valkaisuussa parannetaan massan vaaleutta ja puhtautta. Sellut valkaistaan yleensä ligniiniä poistavalla valkaisualla. Valkaisu tapahtuu monessa eri osassa, joissa käytetään sekä happamia, että emäksisiä kemikaaleja ja näiden välillä massa pestään. Näin sellun kuidut

eivät tuhoudu ligniinin poiston yhteydessä ja sellun ominaisuudet paranevat. (Prowledge Oy 2016)

Valkaistu sellu pumpataan joko suoraan paperikoneelle, josta siitä tehdään paperia, tai kuivatuskoneelle, josta siitä poistetaan suurin osa vedestä. Sellun kuivatukseen käytetään joko kuumaa ilmaa tai kuumia sylintereitä. Sellun lämmitys heikentää sen ominaisuuksia jonkin verran, mutta märkä sellu pilaantuu nopeasti, jolloin sitä ei voida kuljettaa pitkiä matkoja. (Prowledge Oy 2016)

2.2 Puunkäsittely

Sellutehtaan puunkäsittely alkaa puun vastaanotolla. UPM:n Suomen sellutehtaille puut toimitetaan pääasiassa rekalla tai junalla. Pietarsaaren ja Kaukaan tehtaille toimitetaan puuta jonkin verran vesiteitse. Ideaalilanteessa puut voisi syöttää suoraan prosessiin, mutta koska tämä ei ole mahdollista puut varastoidaan puukentälle, joka näkyy kuvassa 2. Puun ominaisuudet alkavat heikentyä sen kuivuessa varastoinnin aikana. Kesällä tätä voidaan hidastaa kastelemalla puukentällä olevia puita. (Prowledge Oy 2016) Vuonna 2017 Pietarsaaren, Kymin ja Kaukaan sellutehtaat käsittelivät n. 8,2 miljoonaa kiintokuutiota mäntyä, kuusta ja koivua.



Kuva 2. Puita varastoituna puukentälle. (Prowledge Oy 2016)

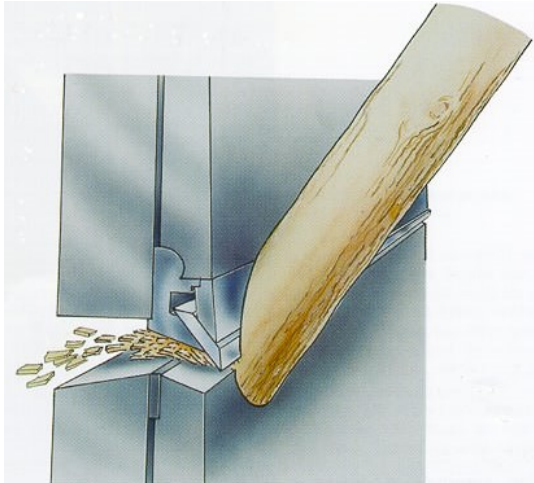
Puiden syöttäminen prosessiin tapahtuu sulatuskuljettimen kautta. Sulatuskuljettimella jäiset puut sulatetaan lämpimällä vedellä, jotta niiden kuoriminen olisi mahdollista. Kesällä puiden sulattaminen ei ole tarpeellista, mutta vesi huuhtoo puun pinnalta epäpuhtauksia (kivet, hiekka yms.) pois. Sulatuskuljetin toimii samalla kuorimarummun syöttökuljettimena. Kuorimarummussa puut kuoritaan jatko-prosessin vaatimaan puhtausasteeseen. UPM:n sellutehtaille käytetään kuivakuorimarumpuja, joissa kuorinta tapahtuu puiden pyöriessä toisiaan ja rummun seinämiä vasten. (Prowledge Oy 2016)



Kuva 3. *Kuorimarumpu sisältä.* (Prowledge Oy 2016)

Kuvassa 3 on kuvattuna kuorimarumpu sisältä. Rummun seinämissä näkyvät kuorimaraudat sekä kuoriaukot. Kuorimarummussa kuorimaraudat saavat puut pyörimään rummun mukana. Puut nousevat rummun seinämää pitkin ylöspäin, kunnes ne tippuvat puukasaa pitkin takaisin alas. Tästä syntyvät iskut ja paine irrottavat kuoren puun pinnalta ja irronnut kuori tippuu rummun seinämässä olevista kuoriaukoista rummun alla olevalle kuorikuljettimelle. Kuori on sellun valmistusprosessin kannalta jätettä, mutta sitä voidaan esimerkiksi polttaa voimalaitoksissa. (Prowledge Oy 2016)

Kuorittu puu ohjataan kuljettimilla kohti hakkua. Tässä vaiheessa puut vielä pestään ja puiden seasta erotetaan epäpuhtaudet (mm. kivet ja metallit) pois. Epäpuhtauksien joutuminen hakkuun vaurioittaa hakun teriä. Sellunkeiton kannalta hakkeen tasalaatuisuus on tärkeää. Nykyään yleisin hakkutyyppe on kiekkohakku, jossa hakun terät ovat kiinni pyörivässä kiekossa, jota kohti haketettavat puut ohjataan. Kuvassa 4 on esitetty kiekkohakun toimintaperiaate. (Prowledge Oy 2016)

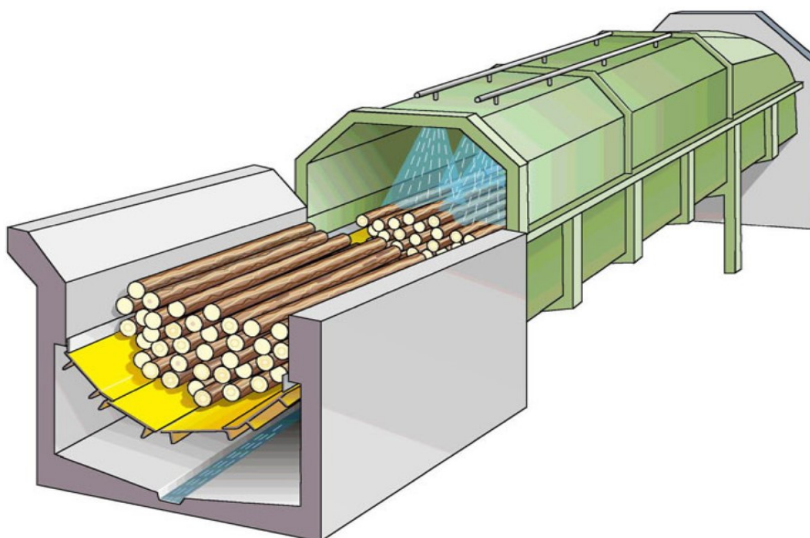


Kuva 4. Hakun terän toiminta. (Prowledge Oy 2016)

Hakun terä leikkaa puista ellipsin muotoisia kiekkoja, jotka halkeavat leikkausvoiman seurauksena hakkeeksi. Valmis hake kuljetetaan hihnakuljettimilla hakekasalle varastoitavaksi. Ennen keittoa hakkeesta on seulottava liian pienet ja liian suuret puukappaleet pois. Liian suuret kappaleet voidaan jälkikäsitellä pienemmäksi, jolloin ne voidaan syöttää keittoon normaalin hakkeen mukana. (Prowledge Oy 2016)

2.3 Sulatuskuljettimen toiminta ja rakenne

Sulatuskuljetin on siis ensimmäinen prosessilaite, jonka kautta puut kulkevat. Sulatuskuljettimen tehtävänä on kuljettaa puut kuorimarumpuun ja kuljetuksen aikana jäiset puut sulatetaan lämpimällä vedellä. UPM:n sulatuskuljettimet ovat ketjukuljettimia, joissa kolaketju liikuttaa puita kohti kuorimarumpua. Ketjun käyttövoima saadaan joko sähkömoottorilta tai hydraulimoottorilta. Kuvassa 5 on esitetty periaatekuva sulatuskuljettimesta, jossa sulatus tapahtuu vesisuihkun avulla.

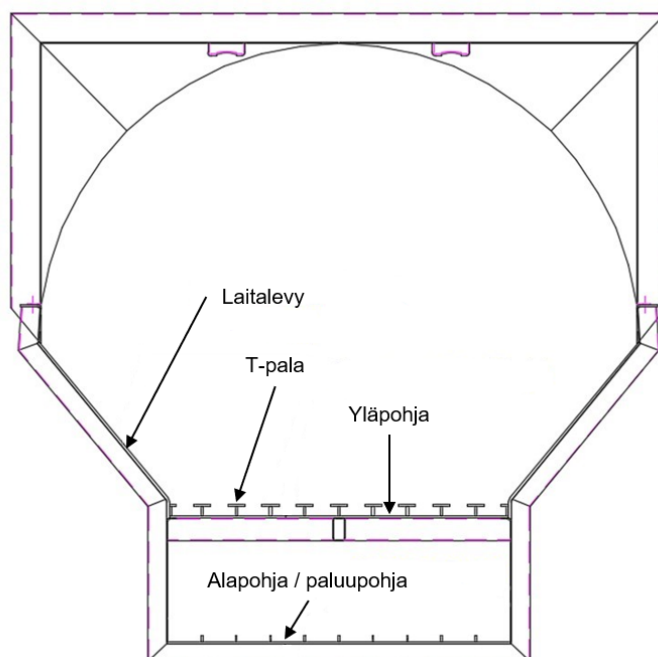


Kuva 5. Yleiskuva sulatuskuljettimesta. (Prowledge Oy 2016)

UPM:n sulatuskuljettimissa on 10 kpl rinnakkaisia ketjuja (kuva 6). Kuljettimien pituus on n. 50 – 70 m, leveys n. 3 m ja sulatusosuuden korkeus n. 4 m. Sulatusaika havupuulle on n. 20 min ja koivulle n. 30 min, joten kuljettimet liikkuvat melko hitaasti n. 2 – 3 m/min. Kuvassa 7 on nimetty sulatuskuljettimen komponentit, joihin viitataan läpi tämän työn.



Kuva 6. Sulatuskuljetin sisältä.



Kuva 7. Sulatuskuljettimen komponentit.

3. KUNNOSSAPITO

Kunnossapito on perinteisesti käsitetty vikojen korjaamisena. Nykyisin kunnossapito nähdään laajempuna kokonaisuutena, jolla ylläpidetään, säädetään ja säilytetään käyttöomaisuuden tuottokyky. Liiketoiminnan tuloksellisuuden kannalta optimaalisinta on, kun käyttöomaisuus on oikein mitoitettu ja sen käyttö on optimaalista ja hallittua. (Järviö et al. 2007, s. 12)

Käyttöomaisuus on mitoitettu oikein ja sen käyttö optimaalista silloin, kun laitteita käytetään mahdollisimman tehokkaasti ja näin ollen saadaan investoinnille mahdollisimman suuri tuotto. Toiminta on hallittua silloin, kun laitteet toimivat luotettavasti. (Järviö et al. 2007, s. 12) Tähän juuri kunnossapidolla pyritään.

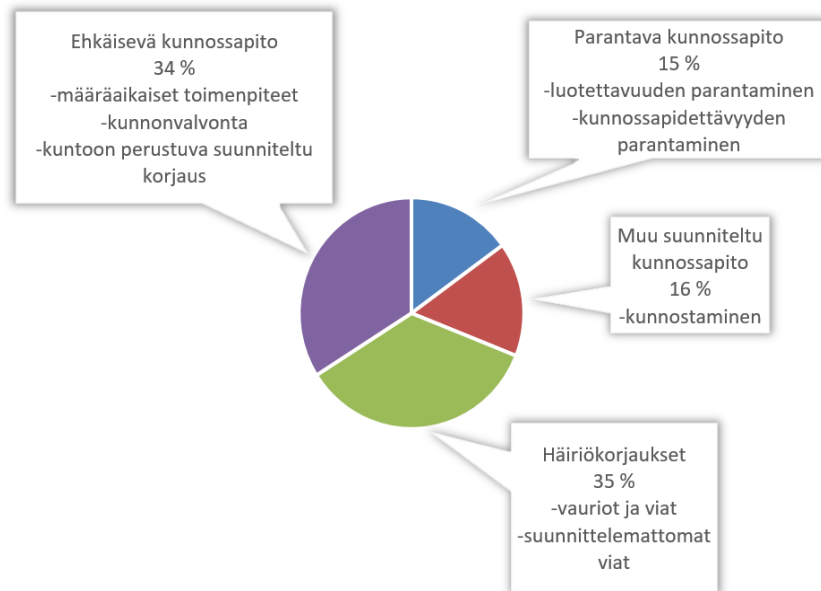
SFS-EN 13306 -standardissa (2017) kunnossapito on määritelty seuraavasti: ”yhdistelmä kaikista teknisistä, hallinnollisista ja liikejohdollisista toimista laitteen elinkaaren aikana, joiden tavoitteena on ylläpitää tai palauttaa laite tilaan, jossa se pystyy suorittamaan halutun toiminnon”. Standardissa teknisillä kunnossapitotoimilla tarkoitetaan aktiivisia kunnossapitotoimia, kuten vian korjaamista tai laitteen kunnostamista, mutta myös passiivisia kunnossapitotoimia, kuten tarkastuksia ja kunnonvalvontaa.

Kunnossapito on muuttunut valtavasti viime vuosikymmeninä. Aiemmin kunnossapito olikin juuri vikojen korjausta. Myöhemmin vikaantumisia alettiin ennakoida ja tehtiin säännöllisiä huoltotoimenpiteitä. Nykyisin tekniikan ja teknologian kehittyessä kunnossapito siirtyy yhä enemmän laitteen kunnonvalvontaan ja käytettävyyteen perustuvaan huoltamiseen. Kunnon- ja käynninvalvonnalla pystytään tunnistamaan laitteessa alkavat viat ennen kuin ne aiheuttavat muutoksia laitteen toiminnassa ja korjaavat toimenpiteet voidaan suunnitella siten, että ne vaikuttavat mahdollisimman vähän tuotantoon. (Järviö et al. 2007, s. 17-20; Aromaa & Klarin 1999, s. 360)

Kunnossapito on yritysten suurin kontrolloimaton kustannuserä. Hyvin johdetuissa yrityksissä on panostettu siihen, että kunnossapito saadaan hallintaan ja kustannukset kontrolliin. Kunnossapidon vaikutukset yrityksen tulokseen ovat välillisiä ja tämän yhteyden ymmärtäminen vaatii ammattitaitoa ja kokemusta. Kunnossapitäjien on laadittava toiminnalleen toimintasuunnitelmat ja budjetit, sekä seurattava niiden toteutumista myös tuottojen suhteen. Kunnossapitokustannusten yhteydessä vähempi ei ole aina parempi, vaan kunnossapitoon tulee käyttää sen verran resursseja, että laitteet pysyvät optimaalisessa toimintakunnossa. (Järviö et al. 2007, s. 22; Aromaa & Klarin 1999, s. 365)

Suomessa koko kansantaloudessa kunnossapitokustannukset ovat n. 24 mrd. euron luokkaa, josta teollisuuden osuus on n. 3,5 mrd. euroa. Teollisuuden kunnossapitokustannus-

ten jakautuminen kunnossapidon lajien mukaan on esitetty kuvassa 8. Aasian talouskasvun myötä kasvaneeseen kysyntään ei voida vastata Suomesta käsin, vaan vientiteollisuus on alkanut suunnata investointejaan lähemmäs loppuasiakasta. Tämä tarkoittaa sitä, että uusinvestointien määrä vähenee Suomessa, jonka johdosta Suomen laitekanta vanhenee ja kunnossapidon rooli yritysten pärjäämisessä kasvaa. (Järviö et al. 2007, s. 30-31)



Kuva 8. Teollisuuden kunnossapitokustannusten jakautuminen kunnossapitolajin mukaan. (Mukaiillen Järviö et al. 2007, s. 28)

3.1 Tuotannon kokonaistehokkuus, KNL

PSK 7501 -standardissa (2010) on lueteltuna lukuisia erilaisia kunnossapidon mittareita. Näistä yksi tärkeimmistä on tuotannon kokonaistehokkuus (KNL, engl. OEE = overall equipment effectiveness). Kokonaistehokkuus muodostuu käytettävyydestä (K), toiminta-asteesta (N) ja laatukertoimesta (L) ja se on laskettavissa kaavassa 1 esitetyllä tavalla. (Järviö et al. 2007, s. 40)

$$KNL = \text{Käytettävyys} * \text{Toiminta-aste} * \text{Laatukerroin} \quad (1)$$

Käytettävyys (K) on määritelty PSK 6201 -standardissa (2011) seuraavasti: ”kohteen kyky olla tilassa, jossa se kykenee tarvittaessa suorittamaan vaaditun toiminnon tietyissä olosuhteissa olettaen, että vaadittavat ulkoiset resurssit ovat saatavilla”. Käytettävyys lasketaan kaavassa 2 esitetyllä tavalla. (PSK Standardisointiyhdistys ry 2010)

$$K = \frac{\textit{Käyntiaika}}{\textit{Käyntiaika} + \textit{Seisokkiaika}} \quad (2)$$

Toiminta-aste (N) on toteutuneen tuotantomäärän suhde maksimituotantomäärään käyntiaikana. Toiminta-aste voidaan laskea kaavassa 3 esitetyllä tavalla. (PSK Standardisointiyhdistys ry 2011)

$$N = \frac{\textit{Tuotanto}}{\textit{Nimellistuotantokyky} * \textit{Käyntiaika}} \quad (3)$$

Laatukerroin (L) määrittää myynti- ja jatkojalostuskelpoisen tuotannon osuuden kokonaistuotantomäärästä. Laatukerroin voidaan laskea kaavassa 4 esitetyllä tavalla. (PSK Standardisointiyhdistys ry 2011)

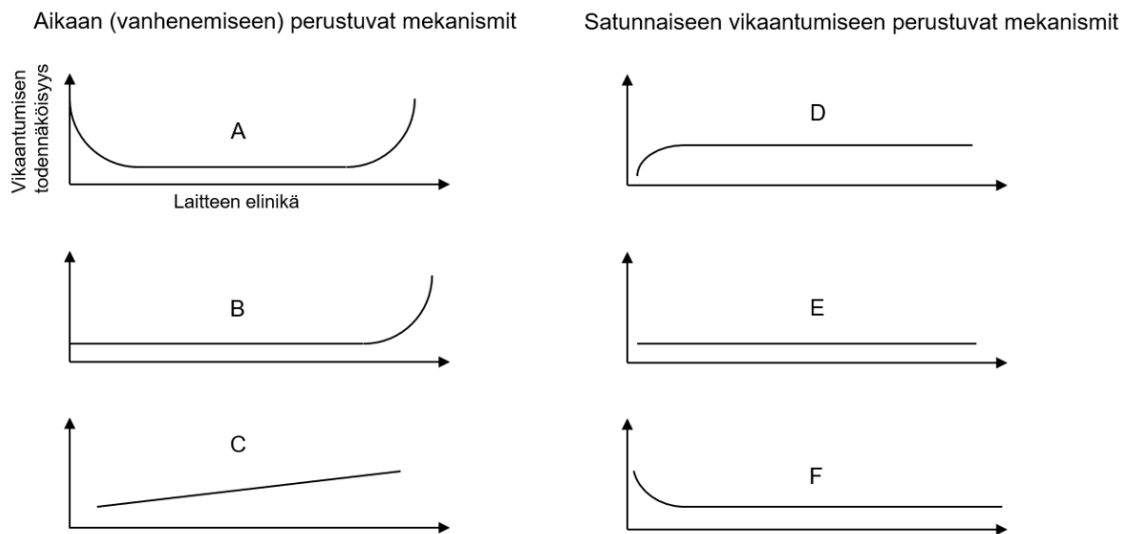
$$L = \frac{\textit{Tuotanto} - \textit{Hylätty tuotanto}}{\textit{Tuotanto}} \quad (4)$$

KNL-luku on hyvä kunnossapidon mittari siitä syystä, että kunnossapidollisilla toimilla voidaan vaikuttaa kaikkien komponenttien arvoihin. KNL-lukua vertaamalla nimelliseen suorituskykyyn voidaan havaita, jos jokin ei ole kohdallaan. Piilevät viat tyypillisesti eivät pysäytä laitteen toimintaa, mutta aiheuttavat joko heikkolaatuista tuotantoa tai pienentävät toiminta-astetta. Aina heikentynyt KNL-luku ei johdu laitteesta itsestään, vaan kokonaistehokkuuden parantamiseksi voidaan joutua myös tekemään muutoksia prosessiin. (Järviö et al. 2007, s. 103) KNL-luku on yksi UPM:llä aktiivisesti seurattavista kunnossapidonmittareista.

3.2 Vikaantuminen

PSK 6201 -standardissa (2011) vika on määritelty tilaksi, ”jossa kohde ei kykene suorittamaan vaadittua toimintoa täydellisesti pois lukien ehkäisevän kunnossapidon, jonkin muun suunnitellun toimenpiteen tai ulkoisten resurssien puutteesta johtuvan toimintakyvyttömyyden takia.”. Standardissa huomautetaan, että normaalin kulumisen ja vikaantumisen raja on usein epämääräinen. Kulumisen aiheuttamista vioista standardissa puhutaan vähittäisvikaantumisina, jotka aiheutuvat kohteiden kyseessä olevien ominaisuuksien ajan myötä tapahtuvista asteittaisista muutoksista. Vähittäisvikaantumisia voidaan ennakoita etukäteen tapahtuvilla tarkastuksilla tai valvonnalla ja ne voidaan joskus välttää ehkäisevällä kunnossapidolla.

Perinteisesti vikaantumisen on ajateltu tapahtuvan kuvassa 9 esitetyn mallin A mukaisesti. Alussa laitteessa esiintyy ”uudenkarheutta” ja ”lastentauteja”, jotka saattavat aiheuttaa äkillisen vikaantumisen. Näiden jälkeen vikaantumisen todennäköisyys laskee vakiotasolle, kunnes laitteen eliniän loppupuolella vikaantumisen todennäköisyys kasvaa jälleen ja laite lopulta rikkoutuu. Myöhemmissä tutkimuksissa on löydetty kuusi erilaista vikaantumismallia, jotka ovat esitetty kuvassa 9. Näistä kolmessa ensimmäisessä (A, B ja C) vikaantumisen todennäköisyys kasvaa ajan funktiona, mutta muissa kolmessa (D, E ja F) vikaantuminen on alun ”lastentautein” jälkeen täysin satunnaista. (Järviö et al. 2007, s. 57-58)



Kuva 9. Vikaantumismallit. (Mukaillen Järviö et al. 2007, s. 58)

Monimutkaisissa laitteissa eri komponenttien vikaantumismallit hukkuvat laitteen monimutkaisuuden massaan, jolloin vikaantumisen suhteellinen todennäköisyys on vakio. Joka kerta laitetta korjattaessa, avattaessa ja suljettaessa laite altistetaan ”lastentaudeille” eli malleille A ja F. Tähän perustuu vanha sanonta ”älä kajoa toimivaan laitteeseen”. Aikaan perustuvia vikaantumismalleja esiintyy yksinkertaisilla laitteilla, joissa vikaantuminen perustuu rakenteen väsymiseen, korroosioon tai mekaaniseen kulumiseen. (Järviö et al. 2007, s. 59-60)

Sulatuskuljettimissa vikaantuminen on suurimmaksi osaksi seurausta korroosiosta ja mekaanisesta kulumisesta. Tällöin vikaantumismalli muistuttaa mallia C. Ketjujen holkeissa saattaa esiintyä ”lastentauteja” esimerkiksi epäonnistuneen tai muulla tavoin huonon lämpökäsittelyn johdosta, jolloin holkit rikkoutuvat nopeasti.

3.3 Kunnossapitolajit

PSK 7501 -standardissa (2010) kunnossapitotyöt lajitellaan suunniteltuun kunnossapitoon ja häiriökorjauksiin (kuva 10). Suunniteltuun kunnossapitoon sisältyvät ehkäisevä

kunnossapito, kunnostaminen ja parantava kunnossapito. Häiriökorjauksissa häiriö korjataan sen vaatimalla tavalla.



Kuva 10. Kunnossapitolajit. (PSK Standardisointiyhdistys ry 2011)

Suunniteltua kunnossapitoa tehdään ennen vikaa ja sillä pyritään välttämään vikaantumisen muodostuminen. Ehkäisevään kunnossapitoon kuuluvat jaksotettu kunnossapito ja kunnonvalvonta, jolla hankitaan tietoa kunnostustarpeesta. Kunnostamisella laite palautetaan korjaamalla toimintakuntoon prosessin toiminnan häiriintymättä. Kunnostaminen suoritetaan yleensä korjaamalla. Parantava kunnossapito koostuu toimenpiteistä, joilla muutetaan laitteen rakennetta toimintavarmuuden ja kunnossapidettävyyden parantamiseksi. (PSK Standardisointiyhdistys ry 2010)

Ehkäisevä kunnossapito sisältää toimet, joilla seurataan laitteen suorituskykyä tai sen parametreja. Ehkäisevä kunnossapito on säännöllistä tai sitä tehdään vaadittaessa ja sen tulosten perusteella voidaan suunnitella ja aikatauluttaa kunnossapidon tehtäviä. Tavoitteena on vähentää rikkoutumisen mahdollisuutta tai toimintakyvyn heikkenemistä. Ehkäisevän kunnossapidon toimia ovat mm. tarkastaminen, kunnonvalvonta ja testaaminen. (Järviö et al. 2007, s. 50)

Ehkäisevän kunnossapidon toimenpiteillä voidaan havainnoida ja tarkkailla vikaantumista aiheuttavien syiden tai olosuhteiden muutoksia. Ehkäisevään kunnossapitoon kuuluu myös ennustava kunnossapito, jossa erilaisten mittausten avulla pyritään selvittämään laitteen osien kuntoa. Ehkäisevän kunnossapidon tehokkuus määrittelee sen, kuinka hyvin kunnossapitotöitä voidaan suunnitella etukäteen. Hyvän kunnossapidon tunnistaa siitä, että 80 % suoritettavista töistä on tiedossa viikkoja etukäteen. (Järviö et al. 2007, s. 73)

Korjaavaan kunnossapitoon luetaan toimenpiteet, joilla todettu vika korjataan ja täten palautetaan laite käyttökuntoon. Korjaavan kunnossapidon suoritusaikojen perusteella voidaan määrittää laitteen tai sen komponentin elinaika. Korjaava kunnossapito voi olla suunniteltua, jolloin puhutaan kunnostamisesta, tai suunnittelematonta, jolloin puhutaan häiriökorjauksesta. Häiriökorjaukset voivat olla joko välittömiä toimenpiteitä vaativia tai, toimenpide voidaan tehdä sopivana ajankohtana, esim. osastoseisokin aikana, jos vikaantunut laite ei vaikuta muiden laitteiden suorituskykyyn tai aiheuta vaaraa ympäristölle.

3.4 Kunnossapitokustannukset

Kunnossapidosta aiheutuu välittömiä ja välillisiä kustannuksia. Välittömiä kustannuksia on tyypillisesti helppo mitata, mutta niiden vaikutus koko yrityksen toiminnan tulokseen on usein luultua pienempi. Välillisiä kustannuksia on hankalampi kohdistaa tiettyihin toimintoihin ja ne ovat tyypillisesti suurempia kuin välittömät kustannukset, jolloin niiden vaikutus koko toiminnan tulokseenkin on suurempi. Pientämällä välillisiä kustannuksia voidaan usein saada suurempia säästöjä, kuin säästötoimien kohdistamisella välittömiin kustannuksiin. (Järviö et al. 2007, s. 135-136)

Kunnossapidon välittömiä kustannuksia ovat:

- kunnossapito-organisaation palkat yms. työkustannukset
- varaosat, joita on käytetty
- hankintakustannukset
- varastointikustannukset
- materiaalit, tarvikkeet
- alihankinta, ulkopuolisten työt
- kunnossapidon yleiskustannukset, joista tavanomaisimmat ovat hallintokulut, kiinteistökulut, vuokrat, varastointikulut, jne.

Kunnossapidon välillisiä kustannuksia taas ovat:

- hylky (huono laatu)
- uusiminen, uudelleen tekeminen
- epäsuhtaiset varastot (esimerkiksi ylisuuret puskurivarastot)
- ylimitoitettu käyttöomaisuus kuten koneet rakennukset ja maa-alueet
- epäsuhtainen rahoitusomaisuus
- hallitsematon resurssien käyttö
- ylityökustannukset
- tuotannosuunnittelun lisäkustannukset
- tuotantovakuutukset
- kasvaneet elinaikakustannukset
- menetetty uustuotantomahdollisuus

- epäkäytettävyyuskustannukset

(Järviö et al. 2007, s. 135-136)

Laitteiden elinaikana niistä aiheutuu muitakin kustannuksia, kuin käyttökustannukset ja kunnossapitokustannukset. Perinteisesti, ja vielä nykyäänkin valitettavan usein, investointipäätökset on tehty laitteen hankintahinnan ja laadun perusteella. Tällöin on vaarana, että halpa ja laadukas laite osoittautuu yllättävän kalliiksi käyttää. Tästä syystä hankintojen kustannuksia tulisi verrata koko niiden elinjakson ajalta elinjakson kustannusanalyysin (engl. LCC, life cycle costs) avulla. (Järviö et al. 2007, s. 136)

LCC-menetelmällä hankinnan kokonaiskustannuksia laskettaessa tarvitaan seuraavat tiedot (Järviö et al. 2007, s. 138):

- hankintakustannukset
- kulut, joita ei voida aktivoida
- vuotuiset kunnossapitokustannukset
- vuotuiset käyttökustannukset
- vuotuiset kiinteät kustannukset
- jäännösarvo
- vuotuiset tuotot

Laskennassa käytetyt arvot perustuvat yleensä omakohtaisiin kokemuksiin, joita voidaan kerätä kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmästä tai kunnossapitäjiltä tai käyttäjiltä. Toinen mahdollisuus kerätä tietoja perustuu ulkopuolisten kokemuksiin, joista voidaan saada tietoja yritysvierailuiden tai vertailukehittämisen (engl. benchmarking) avulla. Tietoja voidaan saada myös laitevalmistajilta tai jos laite on täysin uusi eikä tarvittavia tietoja ole saatavilla, voidaan rakentaa prototyyppi, jota testaamalla saadaan tarvittavat tiedot. (Järviö et al. 2007, s. 139)

Sulatuskuljettimet ovat yritysten sisäisiä laitteita, joilta ei odoteta varsinaisesti tuottoja. Tällöin on järkevintä valita ratkaisut, joiden elinjakso-kustannukset ovat pienimmät.

3.5 Reliability Centered Maintenance, RCM

Luotettavuuskeskeisen kunnossapidon (engl. reliability centered maintenance, RCM) päämääränä on kohdistaa kunnossapito toimet sinne missä niitä tarvitaan. On esitetty, että jopa 40% suunnitellusta/ehkäisevästä kunnossapidosta on tarpeetonta. RCM-projektin päämääränä on selvittää prosessin kannalta kriittisimmät kohteet, joiden kunnossapitoon tulisi kohdistaa eniten resursseja. Onnistuneen RCM:n käyttöönoton tuloksena voidaan luoda kunnossapito-ohjelma, jonka avulla tuotantolaitoksen käytettävyyttä saadaan ylläpidettyä halutulla tasolla pienimmillä mahdollisilla resursseilla. (Järviö et al. 2007, s. 124; NASA 2008, s. 3-1)

RCM on saanut alkunsa Yhdysvaltain siviili-ilmailusta, kun huomattiin, että perinteisellä jaksotetulla ennakoivalla kunnossapidolla ei ollut juurikaan vaikutusta lentokoneen luotettavuuteen. Alkuperäisessä RCM-metodissa ei oleteta mitään, vaan jokaisen laitteen vikaantumismallit ja -taajuudet jne. tulisi tutkia tapauskohtaisesti. Teollisuudessa suuren laitemäärän vuoksi tämä on erittäin työläs ja kallis tapa. Siitä syystä RCM:stä on kehitetty kevennettyjä versioita, kuten Streamlined RCM (SRCM), jossa voidaan päätöksen teon tukena käyttää muista samankaltaisista prosesseista ja laitteista saatuja tietoja. (Järviö et al. 2007, s. 125)

SRCM:ssä pyritään tunnistamaan ja ottamaan käyttöön ilmeiset kuntoon perustuvat kunnossapitotoimet vähäisellä analysoinnilla. Vähäpätöiset kunnossapitotyöt eliminoidaan historiadatan tai kunnossapitohenkilöstöltä saatujen tietojen perusteella. Päämääränä on minimoida analysointiin käytettyä aikaa. (NASA 2008, s. 3-3)

RCM-prosessissa määritetään mitä on tarpeellista tehdä, jotta laite kykenee tekemään siltä vaaditun toiminnon sen hetkisessä toimintaympäristössään. Tämän selvittämiseksi tulee jokaisen arvioitavan laitteen kohdalla kysyä seuraavat seitsemän kysymystä (Järviö et al. 2007, s. 127):

- Mitkä ovat laitteen toiminnot ja suorituskykystandardit sen tämänhetkisessä toimintaympäristössä?
- Mitä tapahtuu, kun laite rikkoutuu (mitkä toiminnot jäävät tapahtumatta)?
- Mikä aiheuttaa kunkin laitteen toiminnon puuttumisen / vajaatoiminnan?
- Mitä tapahtuu kunkin vikaantumisen yhteydessä?
- Mitä vahinkoja kukin vikaantuminen aiheuttaa?
- Mitä voidaan tehdä kunkin vikaantumismallin havaitsemiseksi riittävän ajoissa tai vikaantumisen estämiseksi?
- Mitä tehdään, jos sopivaa ehkäisevää toimenpidettä ei löydy?

Arvioinnin perusteella laitteelle voidaan määritellä tarvittavat kunnossapitotyöt, joilla saavutetaan haluttu luotettavuus- ja turvallisuustaso sekä ympäristö- ja taloudelliset tavoitteet. Tuloksena syntyy laitteen kunnossapitosuunnitelma, joka voi sisältää ennakoivaa kunnossapittoa, kunnonvalvontaa tai testauksia tai voidaan päättää, että laitteelle ei ole järkevää suorittaa ennakoivia kunnossapitotöitä (run to failure). (IAEA 2008, s. 4)

RCM:n tavoitteena ei ole suoranaisesti vähentää kunnossapitokustannuksia vaan parantaa laitteiden käytettävyyttä ja toimintaa. Kunnossapitotöiden priorisoinnin avulla kunnossapidosta tulee kuitenkin kustannustehokkaampaa ja oikein tehdyn RCM-projektin johdosta rutiininomaisten työtehtävien on todettu vähentyvän 40 – 70 %. (IAEA 2008, s. 24; Järviö et al. 2007, s. 131)

3.6 Kunnossapito UPM:llä

UPM:n kunnossapitostrategian mukaan kunnossapito kuuluu UPM:n ydintoimintoihin. Ydintoimintoihin keskittymällä ja kehittämällä niitä kustannustehokkaasti UPM voi erottautua kilpailijoistaan ja ylittää kilpailijoiden ja palvelutoimittajien tason. Kunnossapidon tärkeimmät roolit ovat varmistaa UPM:n tuotteiden ja palveluiden laatu, parantaa turvallisuutta, sekä lisätä kustannus- ja tuotantotehokkuutta. Näihin tuloksiin päästään pitämällä tehtaiden tuotantoprosessit ja -laitteet hyvässä kunnossa, ammattitaitoisella ja tehokkaalla kunnossapidon suunnittelulla sekä yhdessä tekemisen periaatteella. Yhdessä tekemisen periaate tarkoittaa, että työtehtävien tekeminen kuuluu kaikille työntekijöille. Käyttöhenkilöstö tekee kunnossapitotöitä ja kunnossapitohenkilöstö käyttötehtäviä. (UPM 2012)

UPM:n Suomen sellutehtailla on alettu viime vuosina suunnittelemaan ennakkohuoltoa RCM-menetelmän avulla. Kanninen muokkasi diplomityössään (2013) PSK 6800 -standardin mukaista kriittisyysluokittelun mallia paremmin UPM:lle sopivaksi. Kriittisyysluokittelussa käytetyt komponentit on esitetty kuvassa 11. Laitteen kriittisyys määräytyy kuvassa näkyvien komponenttien painotettuna keskiarvona. Turvallisuus- ja ympäristöriskejä on painotettu muita komponentteja korkeammalle.

A	Pysäyttää osaprosessin tai osaston pitkäksi ajaksi, yli 24h	Laatukustannukset vastaavat pitkäaikaista tuotannonmenetystä, yli 8h	Erittäin korkeat, Yli 50 000e	Lyhyt, 0 - 0,5 vuotta	Vakava, voi aiheuttaa kuolonuhriin/-uhreja ja vakavan vaaratilanteen tehtaan ympäristössä	Vakava, voi aiheuttaa ympäristön ja lähialueiden saastumisen, palautuminen voi kestää vuosia
B	Pysäyttää osaprosessin tai osaston merkittäväksi ajaksi, 10 - 24h	Laatukustannukset vastaavat merkittävää tuotannonmenetystä, 3 - 8h	Korkeat, 25 000 - 50 000e	Lyhyehkö, 0,5 - 2 vuotta	Merkittävä, voi aiheuttaa kuolonuhriin/-uhreja	Merkittävä, voi aiheuttaa ympäristön sekä lähialueiden saastumista
C	Pysäyttää osaprosessin tai osaston lyhyeksi ajaksi, 3 - 10h	Laatukustannukset vastaavat lyhytaikaista tuotannonmenetystä, 1 - 3h	Keskinkertaiset, 5 000 - 25 000e	Pitkähkö, 2 - 5 vuotta	Kohtalainen, esim. vakava loukkaantuminen, josta jää pysyvä vamma	Kohtalainen, voi aiheuttaa ympäristön saastumista tehdasalueella, esim. suuri öljyvuo
D	Pysäyttää osaprosessin tai osaston hetkeksi, alle 3h	Laatukustannukset vastaavat hetkellistä tuotannonmenetystä, alle 1h	Vähäiset, 0 - 5 000e	Pitkä, yli 5 vuotta	Vähäinen, esim. lievä loukkaantuminen/sairastuminen	Vähäinen, voi aiheuttaa ympäristön likaantumisen tehdasalueella, esim. pieni öljyvuo
E	Laitteen toimimattomuudella ei merkitystä osaprosessille tai osastolle	Laitteen toimimattomuus ei aiheuta lopputuotteen laatukustannuksia	Ei ole merkitystä suhteessa muihin menetyksiin		Ei turvallisuusriskejä	Ei ympäristöriskejä
	Tuotannon menetys	Laatukustannukset	Korjauskustannukset	Vikaantumisväli	Turvallisuusriski	Ympäristöriskejä

Kuva 11. Laitteiden kriittisyysluokittelussa määräävät komponentit. (UPM, n.d.)

Ylläolevien komponenttien keskiarvon perusteella laitteelle määritetään kriittisyysluokka A, B, C, tai D, joista A on kaikkein kriittisin. Kriittisyysluokka määrittelee laitteelle tehtävät ennakkohuolto toimenpiteet sekä laitteen varaosatarpeen. Kaikkia vikoja ei pystytä ennaltaehkäisemään, joten kriittisille laitteille tulee olla varaosia nopeasti saatavilla, jotta rikkoutumisen aiheuttamat vahingot jäävät vähäisiksi.

Ennakkohuoltotoimenpiteiden suunnittelussa voidaan käyttää apuna toimenpidematriisia (kuva 12). Toimenpidematriisin perusteella ennakkohuoltotoimenpiteet määräytyvät laitteen kriittisyyden sekä mahdollisten aiheutuvien epäkäytettävyyskustannusten perusteella ottaen myös huomioon ympäristö- ja turvallisuusriskit. JHA tarkoittaa jälleenhankinta-arvoa ja RTF (run to failure) tarkoittaa laitteen käyttöä vikaantumiseen asti.

Kriittisyysluokka tai JHA	A	B	C	D
Seisokin aiheuttama menetys	YLI 100k€	10 – 100k€	0,5 – 10k€	Alle 0,5k€
SUURI Epäkäytettävyyuskustannus yli 50k€ Tai merkittävä turvallisuus- / ympäristöriski	Jatkuva seuranta Kunnonvalvonta Jäljellä olevan toiminta-ajan arviointi Huolto Monitorointi	Kunnonvalvonta Tarkastus Huolto Jäljellä olevan toiminta- ajan arviointi	Huolto Tarkastus Aikataulutettu vaihto	Huolto Tarkastus
KESKINKERTAINEN Epäkäytettävyyuskustannus 25 - 50k€	Kunnonvalvonta Jäljellä olevan toiminta-ajan arviointi Huolto	Kunnonvalvonta Tarkastus Huolto	Tarkastus Huolto	Käyttö huoltaa RTF
MATALA Epäkäytettävyyuskustannus 5 – 25 k€	Kunnonvalvonta Huolto Tarkastus Suunniteltu korjaaminen	Kunnonvalvonta Huolto Tarkastus	Käyttö huoltaa RTF	Käyttö huoltaa RTF
ERITTÄIN VÄHÄINEN Epäkäytettävyyuskustannus alle 5 k€	Kunnonvalvonta Huolto Tarkastus Aikataulutettu korjaus	Kunnonvalvonta Huolto Tarkastus	Käyttö huoltaa RTF	Käyttö huoltaa RTF

Kuva 12. Kunnossapidon toimenpidematriisi perustuen laitteen kriittisyysluokitteluun ja seisokista aiheutuviin kustannuksiin. (Kanninen 2013, s. 59)

Taulukosta 1 nähdään sulatuskuljettimille annetut kriittisyysluokat ja kriittisyysluokkaan vaikuttavien komponenttien luokat. Taulukosta nähdään, että sulatuskuljettimien vikaantumisella ei ole juurikaan vaikutusta laatutekijöihin eikä niistä nähdä syntyvän merkittäviä turvallisuus- tai ympäristö riskejä, kaikilla kuljettimilla nämä luokat ovat E. Sen sijaan sulatuskuljettimen vikaantuminen aiheuttaa tuotannon menetyksiä, sen korjauskustannukset ovat suuria ja vikaantumistaajuus on kohtalaisen suuri.

Taulukko 1. Sulatuskuljettimien kriittisyysluokat komponenteittain.

	Kriittisyys- luokka	Tuotannon menetykset	Laatukus- tannukset	Korjauskus- tannukset	Vikaantu- misväli	Turvalli- suusriski	Ympäristö- riski
Pietarsaaren 1. kuljetin	B	B	E	B	C	E	E
Pietarsaaren 2. kuljetin	B	B	E	B	C	E	E
Kymin 1. kul- jetin	B	A	E	C	B	E	E
Kymin 2. kul- jetin	A	A	E	B	B	E	E
Kaukaan 1. kuljetin	A	A	E	A	B	E	E
Kaukaan 2. kuljetin	A	A	E	A	B	E	E

Kuljettimien kriittisyyden ja epäkäytettävyyuskustannusten arvioinnin perusteella sulatuskuljettimet sijoittuvat toimenpidematriisissa vasempaan yläneljännekseen. Tämä tarkoittaa, että ennakkohuoltotoimenpiteiden tulisi sisältää ainakin kunnonvalvontaa, huoltoa sekä jäljellä olevan toiminta-ajan arvioimista.

Kuten aiemmin mainituista kriittisyysluokittelun tekijöiden painotuksista voidaan päätellä, turvallisuus on suuressa osassa UPM:n kunnossapitoa, kuten myös muussakin toiminnassa. Tavoitteena on, että UPM:n tehdasalueilla ei satu ainuttakaan poissaoloon johtavaa työtaturmaa.

UPM:llä käytetään SAP-toiminnanohjausjärjestelmää. SAP:n avulla hoidetaan kaikki kunnossapitoon liittyvät tehtävät, kuten kunnossapitotöiden suunnittelu, vikailmoitusten teko, työtilausten teko, varaosien tilaus jne. Järjestelmään tehdyt vikailmoitukset ja työtilaukset toimivat historiadatana laitteiden kunnossapidon suunnittelussa. Järjestelmästä kerättyjä tietoja sulatuskuljettimien osalta käydään tarkemmin läpi luvussa 8.2. Historiadan luotettavuus perustuu järjestelmän käyttäjien aktiivisuuteen tietojen syöttämisessä. SAP-järjestelmä on ollut UPM:llä käytössä jo vuosia. Silti sen käytössä on suuria eroja tehtaiden ja osastojen välillä. Viime aikoina järjestelmän käyttöä on pyritty tehostamaan kouluttamalla henkilöstöä järjestelmän tehokkaampaan käyttöön.

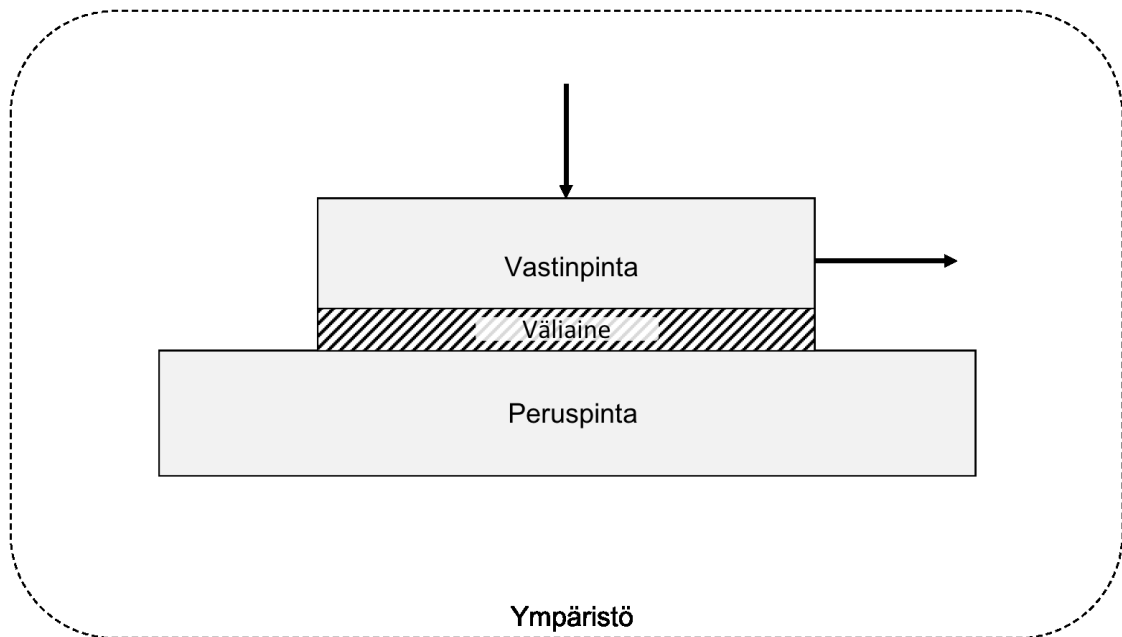
RCM-projektin yhtenä tärkeimpänä tuloksena on luoda laitteille ennakkohuoltosuunnitelma. SAP:sta löytyy tähän ominaisuus, jolla voidaan luoda huoltosuunnitelmia toimintopaikkakohtaisesti. Toimintopaikalle luotu huoltosuunnitelma koostuu huoltoriveistä, joissa on tarkemmin eroteltu suoritettavia toimenpiteitä. Huoltorivin alle määritellään vielä vaiheluettelo, jossa on lueteltuna tarkasti kaikki työn suorittamiseen liittyvät vaiheet sekä niihin tarvittavat resurssit.

Huoltosuunnitelmalle määritetään sykli, jonka perusteella järjestelmään tulee työtilaus. Huoltosuunnitelmien laukaisemat työtilaukset helpottavat osastojen työnjohtajien työtaakkaa, sillä töihin tarvittava suunnittelu-aika pienenee huomattavasti. Lisäksi automaattisesti laukeavat työtilaukset muistuttavat säännöllisesti tehtävien töiden suorittamisesta.

4. KULUMINEN

”Kulumisen on seurausta toisiaan vastaan liikkuvien pintojen keskinäisestä vuorovaikutuksesta.” Kulumisen ilmenee ainehäviönä materiaalin pinnasta. Kulumiseen vaikuttavia parametreja on lukuisia ja niiden yhtäaikainen hallinta on hankalaa. Kulumisen tarkkaa fysikaalista ja matemaattista mallia ei ole onnistuttu laatimaan ja kulumistapausten selvittäminen on lähes kokonaan kokemuseräisen tiedon varassa. (Kivioja et al. 2004, s. 97)

Kulumisen tutkiminen on yksi tribologian osa-alueista. Tribologia on tieteenala, jossa yhdistyvät fysiikka, kemia, materiaalitekniikka, koneelinoppi ja tuotekehitys omaksi insinööritieteeksi. Tribologian tutkimuksella pyritään löytämään vastauksia kitkaan, kulumiseen ja voiteluun liittyviin ilmiöihin. (Kivioja et al. 2004, s. 11)



Kuva 13. Tribologinen systeemi. (Mukaillen Kivioja, Kivivuori, and Salonen 2004, s. 18)

Ongelmien ratkaisussa kokonaisuongelma voidaan jakaa osakokonaisuuksiin, joista kaikista löytyy oma tribologinen systeemi. Tribologinen systeemi (kuva 13) koostuu vastinpinnasta, väliaineesta, peruspinnasta ja ympäristöstä. Kulumista aiheuttavan tribologisen systeemin osien fysikaaliset, kemialliset ja muut tekniset ominaisuudet määräävät tribologisen tapahtuman luonteen, kitkan ja kulumisen olemuksen. (Kivioja et al. 2004, s. 20)

Kitka on voima, joka pyrkii vastustamaan liikettä. Kitka erotetaan yleensä lepokitkaan ja liikekitkaan sekä ulkoiseen ja sisäiseen kitkaan. Ulkoinen kitka vaikuttaa kahden toisiaan vasten liukuvan pinnan välillä. Sisäinen kitka vastustaa materiaalin sisällä molekyylien liikettä tasapainoasemasta. Nesteillä ja kaasuilla sisäisestä kitkasta käytetään nimitystä

viskositeetti. Kitkan vuoksi osa systeemin energiasta muuttuu lämmöksi ja muodonmuutoksiksi. (Kivioja et al. 2004, s. 63)

Liukuvassa kosketuksessa toisiaan vasten liukuvien pintojen välissä vaikuttaa kitkavoima. Lepokitka vastustaa pintojen liikkeelle lähdössä ja liikekitka vastustaa pintojen liikkeen aikana. Kitkavoiman suuruus riippuu kitkakertoimesta μ , joka on kitkavoiman ja normaalivoiman suhde F_{μ}/F_N . Kitkakertoimen määritelmä on yksi klassisista kitkalaista. Klassiset kitkalait ovat kokonaisuudessaan seuraavat:

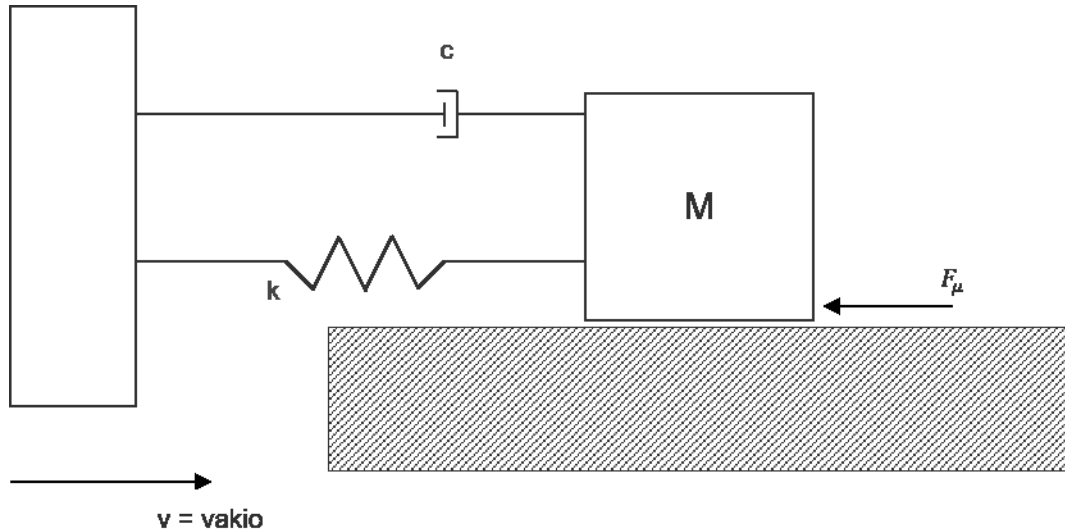
- Kitka ei riipu näennäisestä kosketusalasta
- Kitkavoima on suoraan verrannollinen normaalivoimaan
- Liikekitka ei riipu liukumisnopeudesta
- Lepokitka on suurempi kuin liukukitka

Kitkakertoimen suuruuteen voidaan vaikuttaa materiaaliparin valinnalla, pinnoitteilla tai käyttämällä voiteluaineita. Liikelajia muuttamalla voidaan myös vaikuttaa kitkavoiman suuruuteen. Vierivässä liikkeessä vierimiskitka on pienempi kuin liukumiskitka. Liukuvassa liikkeessä kitka aiheuttaa energiahäviöitä ja kulumista. (Kivioja et al. 2004, s. 63)

Klassisista kitkalaista kaksi ensimmäistä pitävät paikkaansa useimmissa tapauksissa. Kolmas laki, jonka mukaan liikekitka ei riipu liukumisnopeudesta, pitää paikkaansa vain tietyissä tapauksissa. Nykyisissä kitkalaissa onkin lähdetty liikkeelle kahdesta ensimmäisestä klassisesta laista. Adheesioon perustuvan teorian mukaan kitkavoima on syntyneiden adhesiivisten kosketusliitosten irti repeytymiseen tarvittavan voiman ja todellisen kosketusalan tulo. Kokonaiskitkavoimassa on mukana myös kyntötermi, joka aiheutuu, kun pinnankarheuden ulokkeet kyntävät uran vastapintaan. (Kivioja et al. 2004, s. 63-64)

Osoitus lepo- ja liukukitkan erosta on ns. tihkomisvärähtely (stick-slip) -ilmiö. Tihkomisvärähtelyn periaate on kuvattu kuvassa 14. Tihkomisvärähtelyä syntyy, kun voimanlähde välittää voiman kappaleeseen M jousen ja vaimentimen kautta. Kappale lähtee liikkeelle, kun jousen ja vaimentimen voimien summa vastaa lepokitkavoimaa. Kappale lähtee liikkeelle kiihtyvällä nopeudella, koska lepokitkavoima on suurempi kuin liikekitkavoima. Kappaleen saavuttaessa suuremman nopeuden, kuin voimanlähteen nopeus v , alkaa jousivoima hidastaa kappaletta ja se saattaa pysähtyä kokonaan, jos vaimennus ei ole tar-

peeksi tehokas. Voimanlähteen liikkeessa edelleen vakionopeudella v , alkaa sykli uudelleen ja kappale M liikkuu nykäyksittäin eteenpäin. (Kivioja et al. 2004, s. 74)



Kuva 14. Tihkomisvärähtelyn periaate. (Mukaihen Kivioja, Kivivuori, and Salonen 2004, s. 75)

Tihkomisvärähtely on tunnettu ongelma ketjukuljettimissa. Ketjukuljettimissa pitkä kuljetinketju ja hidas nopeus aiheuttavat tihkomisvärähtelyn mukaista epätasaista liikettä. Tihkomisvärähtelyä esiintyy yleisesti kuljettimissa, jotka ovat yli 10m pitkiä ja joiden nopeus on alle 15m/min. Tihkomisvärähtely aiheuttaa kuljettimen ennenaikaista kulumista. Sitä voidaan estää nostamalla kuljettimen nopeutta ja välttämällä epätasaista kuormitusta. Ketjukuljettimen epätasaista liikettä aiheutuu myös ketjupyörän ja -jaon välisestä geometriasta, jossa ketjun lineaarinen nopeus ei pysy vakiona. (Szuba 1995; Renold Plc n.d.; Ammeraal Beltech 2018)

Kulumistapahtuma voidaan ajatella edellä mainittujen kitkaliitosten irtautumisena. Erään lähteen (Blau 2014) mukaan kuluneen tilavuuden voidaan olettaa olevan verrannollinen tehtyyn kitkatyöhön. Käyttäen hyväksi adhesiivisen kitkaliitoksen vahvuuteen vaikuttavia tietoja voidaan johtaa yhtälö kuvaamaan kulumisnopeutta. (Kivioja et al. 2004, s. 99-100)

$$\frac{V}{s} = Z \frac{F_N}{H} \quad (5)$$

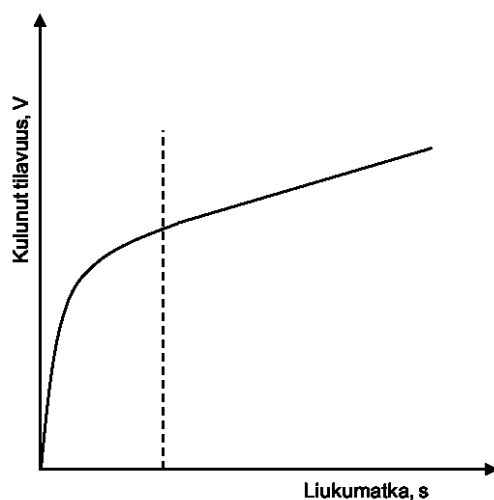
jossa

- V on kulunut tilavuus
- s on liukumatka
- Z on verrannollisuuskerroin (yleisimmin kulumiskerroin)
- F_N on normaalivoima
- H on materiaalin kovuus

Kaavaa 5 kutsutaan Holmin kulumisyhtälöksi kehittäjänsä mukaan. Yhtälö on muodostettu yksinkertaistamalla monimutkaisia funktioita ja käyttämällä keskimääräisiä arvoja, mutta siitä voidaan tunnistaa kolme kulumisen peruslakia. Kulumisen peruslait ovat seuraavat (Kivioja et al. 2004, s. 100):

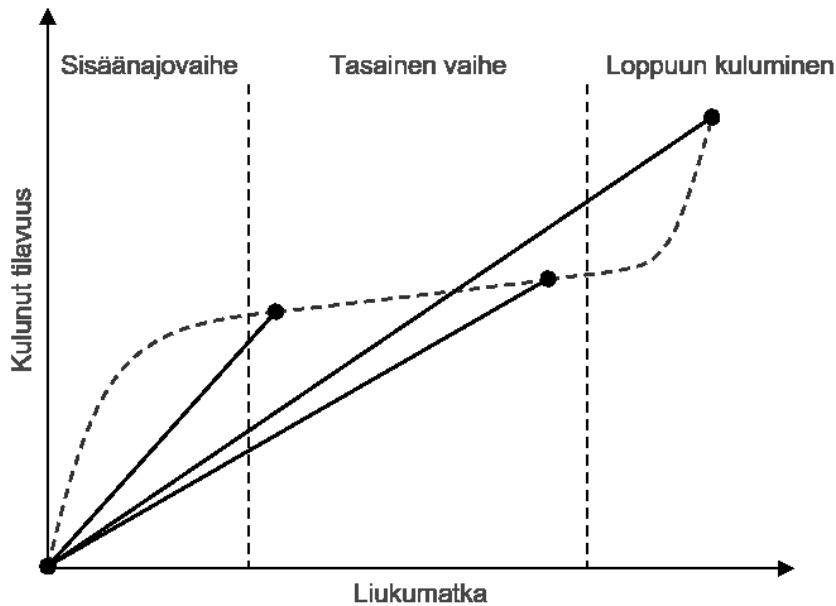
- Kulunut tilavuus on suoraan verrannollinen liukumismatkaan
- Kulunut tilavuus on suoraan verrannollinen kuormaan
- Kulunut tilavuus on kääntäen verrannollinen materiaalin kovuuteen

Kulumista mitataan yleensä suhteuttaen kulunut tilavuus liukumismatkaan, kuten Holmin kulumisyhtälössäkin. Kulumisen alussa on yleensä sisäänajokulumisen vaihe, jolloin kuluminen on voimakasta. Sisäänajokulumisen aikana pintojen suurimmat pinnan karheuden huiput kuluvat pois ja pinnat hioutuvat paremmin toisiinsa sopiviksi. Sisäänajokulumisen jälkeen kuluminen on lineaarista ja noudattaa Holmin kulumisyhtälöä, jos kulumisen tribologiset olosuhteet ja kulumismekanismi pysyvät ennallaan. (Kivioja et al. 2004, s. 103-104)



Kuva 15. Kulumisen liukumismatkan funktio. (Mukaillen Kivioja, Kivivuori, and Salonen 2004, s. 103)

Tutkimusten mukaan kulumisessa saattaa tapahtua useita siirtymävaiheita, jolloin kulumisen ei ole lineaarista. Siirtymä voi tapahtua joko ulkoisten olosuhteiden muutoksesta tai materiaalin sisäisten ominaisuuksien muutoksesta. Ulkoisten olosuhteiden muutoksen aiheuttavat kuormituksen, nopeuden, ympäristön lämpötilan, abrasiivien lukumäärän jne. muutos. Materiaalin sisäiset ominaisuudet voivat muuttua mm. sisäänajokulumisen, oksidi- tai pinnoitekerroksen kulumisen sekä kitkan aiheuttaman lämmön seurauksena. (Blau 2014)



Kuva 16. Järjestelmäkohtaisen kulumisnopeuden riippuvuus määräyshetkestä. (Mukaillen Blau 2014)

Kuvassa 16 katkoviivalla esitetty käyrä kuvaa tyypillistä metalliparin kulumiskäyttäytymistä liukuvassa kosketuksessa. Kulumisnopeus voidaan ilmoittaa, joko hetkellisenä kulumisnopeutena tai systeemikohtaisena kulumisnopeutena. Hetkellinen kulumisnopeus, joka voidaan ajatella kuvan 15 käyrän tangenttina, vaihtelee suuresti eri kulumisen vaiheissa. Se kuvaa hyvin systeemin kulumista, mutta sen määrittäminen on hankalaa, koska se vaatii tiheitä mittauksia tai jatkuvaa seuranta. Systeemikohtainen kulumisnopeus määritetään mittaamalla kulunut tilavuus tietyn ajanjakson jälkeen ja normalisoimalla se. Systeemikohtaisella kulumisnopeudella ei saada tietoa kulumisen siirtymävaiheista, mutta sen määrittäminen on yksinkertaista ja sitä voidaan käyttää hyväksi eri parametrien vertailussa. Esimerkiksi eri materiaalien vertailu on yksinkertaista pitämällä muut parametrit vakioina ja vertailemalla materiaalien systeemikohtaisia kulumisnopeuksia. (Blau 2014)

4.1 Adhesiivinen kuluminen

Adhesiivinen kuluminen on seurausta adhesiivisten kitkaliitosten leikkautumisesta. Adhesiivisen kulumisen kulumisnopeus riippuu siitä mistä kohtaa syntynyt kitkaliitos leikkautuu irti. Kitkaliitoksen repeytyessä alkuperäisten pinnankarheushuippujen liitoskohdasta, ei materiaalia siirry pinnalta toiselle tai synny irtonaisia kulumispartikkeleita. Jos liitos repeytyy jostain muusta kohdasta, siirtyy materiaalia pinnalta toiselle ja lopulta syntyy myös irtonaisia kulumispartikkeleita. (Kivioja et al. 2004, s. 105)

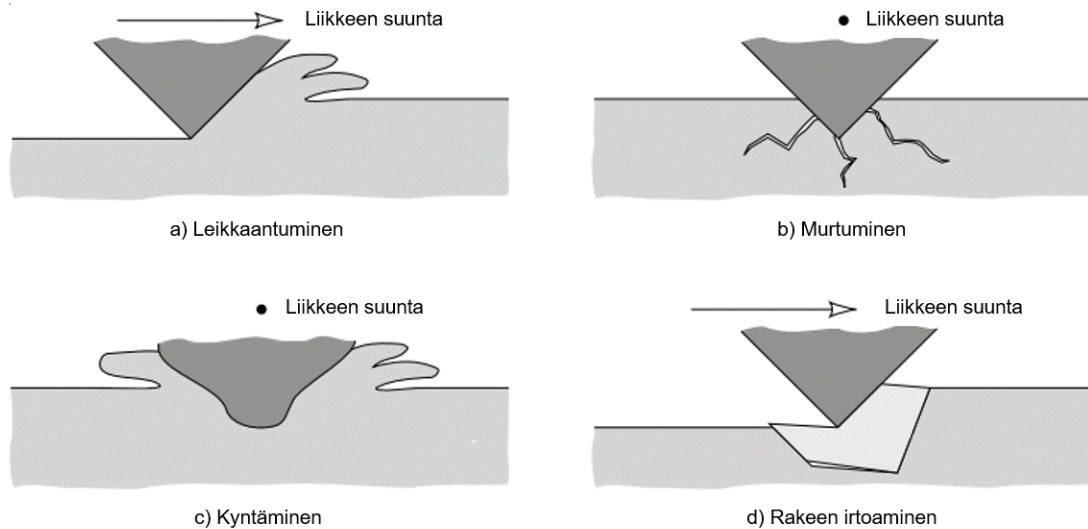
Täysin puhtaat metallipinnat muodostavat helposti adhesiivisiä liitoksia ollessaan kosketuksessa toiseen kiinteään kappaleeseen. Käytännön tilanteissa metallin pinnalle muodostuu ohut oksidikerros, joka estää metallin todellisen pinnan kosketuksen toiseen kappaleeseen. Oksidikerros muodostuu hyvin nopeasti, tyypillisesti mikrosekunneissa. Joten vaikka oksidikerros rikkoutuisi, esimerkiksi abrasiivisen kulumisen seurauksena, se korjaantuu nopeasti ja hidastaa adhesiivista kulumista. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 578-594)

Adhesiivista kulumista esiintyy tilanteissa, joissa happea ei ole riittävästi muodostamaan oksidikerrosta metallin pinnalle, esimerkiksi paksun öljykerroksen alla, tai pinnan kuormitus on tarpeeksi suuri rikkomaan oksidikerroksen. Tyypillisiä kohteita adhesiiviselle kulumiselle ovat vaihteistot ja laakerit, joissa voitelukalvo ei riitä pitämään pintoja erillään. Adhesiivisen kulumisen seurauksena metallin pinta kuluu voimakkaasti ja muodostuvien kulumispartikkelien vuoksi kulumismekanismi saattaa muuttua abrasiiviseksi. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 578-594)

Kulumisen tapahtuessa oksidikalvojen välityksellä puhutaan lievistä kulumisesta. Jos kuormitusta kasvatetaan tai oksidikalvo ohenee, alkaa syntyä metalli/metalli -kosketuksia ja kuluminen siirtyy voimakkaan kulumisen alueelle. Kuormitusta kasvatettaessa entisestään kasvaa myös kontaktikohtien lukumäärä ja kitkakerroin kasvaa jyrkästi. Tällöin metallipinnat tarttuvat kiinni toisiinsa, eli kiinnileikkautuvat. (Kivioja et al. 2004, s. 108)

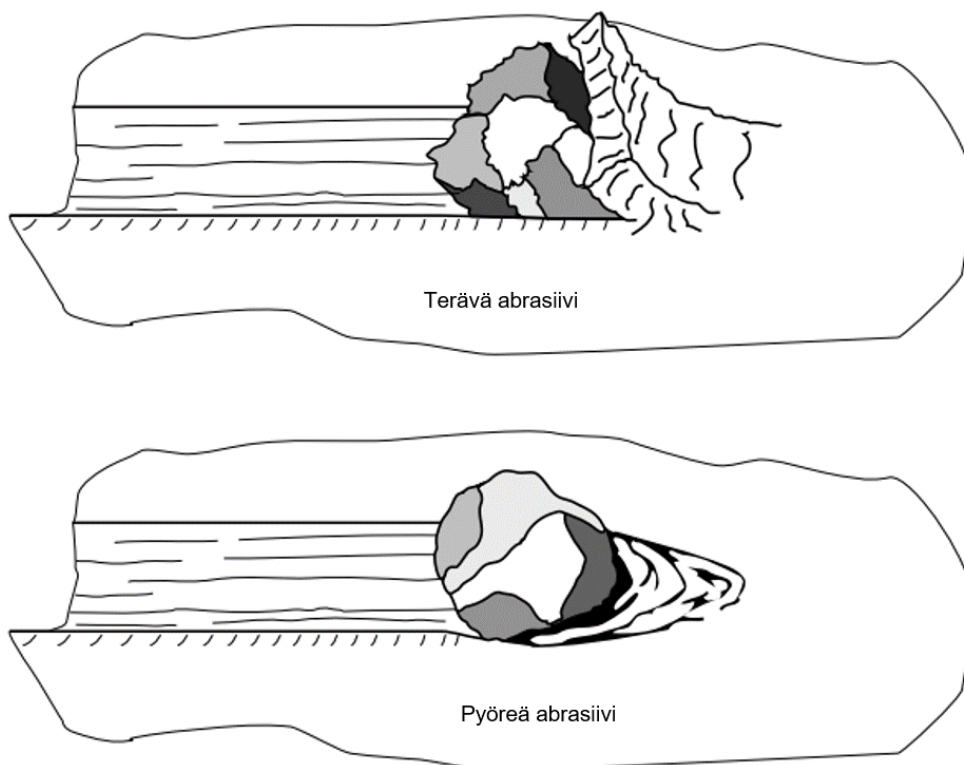
4.2 Abrasiivinen kuluminen

Abrasiivista kulumista aiheutuu, kun irtonaiset partikkelit tai toisen pinnan pinnankarheuden huiput tai materiaalissa kiinni olevat kovat partikkelit tunkeutuvat pehmeämpään materiaaliin. Jälkimmäisessä tapauksessa puhutaan kahden kappaleen abraasiosta. Kolmen kappaleen abraasiassa pintojen välissä on molempia materiaaleja kovempia irtonaisia partikkeleita, jotka kuluttavat kumpaakin pintaa. Irtonaisia kulumispartikkeleita (abrasiiveja) voi syntyä, kun toisesta pinnasta irronneet partikkelit kovettuvat muokkauslujittumisen seurauksena. Näin ollen kahden kappaleen abraasiona alkanut kuluminen voi muuttua kolmen kappaleen abraasioksi. Myös kovat oksidipartikkelit ja ympäristöstä tulleet epäpuhtaudet (mm. hiekka) voivat toimia abrasiiveina. (Kivioja et al. 2004, s. 109)



Kuva 17. Abrasiivisen kulumisen mekanismit. (Muokattu Stachowiak and Batchelor 2013, s. 526)

Abrasiivinen kuluminen voi tapahtua neljällä eri mekanismilla (kuva 17): leikkaantamalla, murtumalla, kyntämällä ja rakeen irtoamisena. Kuluminen tapahtuu yleensä usealla eri mekanismilla. Leikkaantumista tapahtuu, kun terävä abrasiivi leikkaa pehmeämmästä materiaalista materiaalia irti samaan tapaan, kuin lastuava terä esim. sorvauksessa. Hauraista materiaaleista kulumispartikkelit irtoavat murtumalla. Abrasiivin kuluttaessa kovaa ja haurasta materiaalia, siihen syntyy pinnanlaisia säröjä, joiden ydintyessä irtoaa kulumispartikkeleita. Kyntämällä tapahtuvassa kulumisessa materiaalista ei heti irtoa kulumispartikkeleita, vaan abrasiivin vaikutuksesta materiaalin pintaan syntyy ura, ja uran materiaali siirtyy uran reunoille. Jos kyntämistä tapahtuu toistuvasti voi uran reunoilta irrota partikkeleita väsymisen seurauksena. Uran reunoille siirtyvä materiaali on myös muokkauslujittunutta, joten se on kovaa ja haurasta ja se voi murtua hauraasti. Rakeen irtoaminen on yleisintä keraameilla, joissa rakekoko on suuri ja rakeiden väliset sidosvoimat heikkoja. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 526-528)



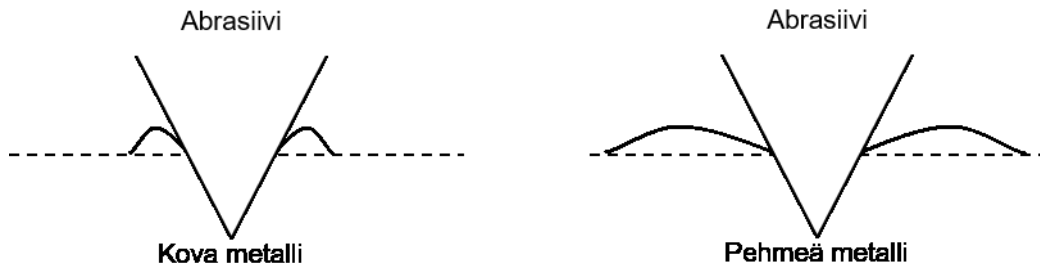
Kuva 18. Abrasiivin terävyyden vaikutus kulumismekanismiin. (Muokattu Stachowiak and Batchelor 2013, s. 534)

Abrasiivin muoto vaikuttaa syntyvään kulumismekanismiin (kuva 18). Kulumisen tapahtuu todennäköisimmin leikkaantumalla, jos abrasiivissa on teräviä reunoja tai kuluttavan pinnan pinnankarheuden huiput ovat jyrkkiä. Jos abrasiivit ovat muodoltaan pyöreitä tai kuluttavan pinnan pinnankarheuden huiput ovat loivia, tapahtuu kulumisen todennäköisimmin kyntämällä. Kyntämisen yhteydessä tapahtuva metallin muokkauslujittuminen tekee materiaalista kovempaa, mutta samalla heikentää sen sitkeyttä. Tästä syystä metalli voi kestää hyvin pyöreiden abrasiivien kulutusta, mutta kulua nopeasti terävien abrasiivien läsnä ollessa. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 527; Kivioja et al. 2004, s. 110)

Materiaaliparin kulumisen riippuu niiden kovuuksien H_m / H_a -suhteesta, jossa H_a on kuluttavan pinnan kovuus ja H_m on kuluvan metallin kovuus täysin muokkauslujittuneena. Abraasiokulumisen on voimakasta, jos $H_m / H_a < 0,8$. Suhteen ollessa suurempi kuin 0,8 on abraasiokulumisen lievää ja jos suhde on suurempi kuin 1 loppuu metallin kulumisen kokonaan. (Kivioja et al. 2004, s. 111)

Metallin kovuuden kasvattaminen esim. karkaisemalla ei kuitenkaan takaa hyvää abraasion kestoa. Kuten jo aiemmin todettiin, metallin lujittamisen yhteydessä sen sitkeys heikkenee. Haurailta materiaaleilla kulumispartikkeleita saattaa irrota kulumaauraa suuremmalta alueelta. Pehmeällä metallilla kyntäessä plastisoituva osuus on suurempi kuin

kovemmalla metallilla, kuten kuvasta 19 nähdään. Tällöin jännitykset jäävät alhaisemmiksi pehmeämmällä metallilla, eikä kulumaauran laidoilta irtoa partikkeleita väsymismurtuman seurauksena yhtä herkästi, kuin kovemmalla metallilla. Kovemmalla metallilla abraasiokuluminen tapahtuu todennäköisemmin leikkautumalla, kuin pehmeämmällä metallilla. (Rabinowicz et al. 1961)



Kuva 19. Metallin kovuuden vaikutus kyntäessä tapahtuvaan plastisoitumiseen. (Mukaillen Rabinowicz, Dunn, and Russell 1961)

Voimakkaassa abraasiassa kulumiskeston kannalta metallin tärkeimmät ominaisuudet ovat kyky muovautua plastisesti ja muokkauslujittua riittävästi. Muokkauslujittumista voidaan pitää metallien luontaisena suojautumiskeinona kulumista vastaan. Tutkimuksissa paras kulumiskestävyys on todettu olevan metalleilla, joilla muodonmuutokset tapahtuvat pehmeästi ja muokkauslujittuminen ulottuu metallin pinnan alle. Metalleilla joilla muodonmuutokset tapahtuvat terävästi kulumisnopeus kasvaa suureksi. Muokkauslujittuneen pinnan ja muokkaantumattoman metallin välille muodostuu terävä raja, jonka johdosta pinta kuluu nopeasti. Metallin alkuperäisen kovuuden ja muokkauslujittuneen pinnan ei ole todettu olevan kovinkaan merkittäviä tekijöitä kulumiskestävyuden kannalta voimakkaassa abraasiassa. (Ojala 2017)

Abrasiivisen kulumisen jaotteluun ei ole olemassa yhtenäistä tapaa, joka hankaloittaa tutkimustulosten vertailua. Perinteisesti abrasiivinen kulumisen on jaettu kahden ja kolmen kappaleen abraasiota. Erään jaottelun mukaan kahden kappaleen abraasiassa abrasiivit (kuluttavan pinnan pinnankarheuden huiput tai pintaan takertuneet partikkelit) ovat tiukasti kiinni kuluttavassa pinnassa ja kolmen kappaleen abraasiassa abrasiivit ovat irtonaisia partikkeleita kahden pinnan välissä. J.D. Gatesin (1998) mukaan tämä on huono tapa jaotella abraasiota, koska eri tilanteiden jaottelu vastaavalla tavalla on haastavaa. Esimerkiksi tyypillinen tilanne kolmen kappaleen abraasiolle on kiven murskain, jossa kahden metallipinnan välissä on murskattavaa kiviainesta. Kovan puristuksen alla kivet saattavat takertua kiinni toiseen metallipintaan, jolloin tilanteesta tuleekin yllä olevan jaottelun perusteella kahden kappaleen abraasiota.

Sillä pääseekö abrasiivit pyörimään pintojen välissä vai ei on suuri merkitys kulumismekanismiin ja -nopeuteen. Rabinowicz et al. (1961) saivat tutkimustuloksen, jonka mukaan kulumisnopeus on 10 kertaa pienempi, kun abrasiivit ovat irtonaisia, verrattuna tilanteeseen

seen, jossa abrasiivit ovat tiukasti kiinni kuluttavassa pinnassa. Kahden kappaleen abraasiassa kulumisjäljet ovat tyypillisesti suoria liukumissuunnan mukaisia uria ja kulumisen voidaan ajatella tapahtuvan samaan tapaan kuin lastuavalla terällä metallia työstettäessä. Kolmen kappaleen abraasiassa kulumisjäljet ovat enemmän päällekkäisiä satunnaissuuntaisia lyhyitä uria ja pinnasta muodostuu ”verkkomainen”. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 529)

Gates ja Gore (1997) tutkivat kovuuden vaikutusta kulumisnopeuteen kahdella erilaisella testilaitteistolla. Toisessa vastapintana oli kumipyörä (Dry Sand Rubber Wheel, DSRbrW) ja toisessa teräspyörä (Dry Sand Steel Wheel, DSStlW). Yllä olevan jaottelun mukaan kumipyörätestiä voidaan pitää kahden kappaleen abraasiona, kun abrasiivina käytetty hiekka takertuu kiinni kumipyörään. Teräspyörätestissä abrasiivien käyttäytymisen riippuu pintojen kovuudesta.

Tutkimuksessa havaittiin, että kumipyörätestissä yksifaasisen metallin kulumisnopeus riippuu lineaarisesti sen kovuudesta, kovempi metalli kuluu hitaammin. Kovia karbideja sisältävät metallit kuluvat yksifaasisia metalleja hitaammin. Teräspyörätestissä yksifaasiset metallit käyttäytyivät samalla tavalla, kuin kumipyörätestissä, mutta karbideja sisältävät metallit kuuluivat huomattavasti nopeammin. Tutkijat selittävät tätä sillä, että abrasiivit eivät pääse tunkeutumaan koviin metalleihin, jolloin ne liukuvat pintojen välissä kovalla nopeudella. Pehmeämmillä metalleilla, kuten alumiinilla, abrasiivit tunkeutuvat syvemmälle metalliin ja abrasiivien nopeus on täten hitaampi. Kovien metallien tapauksessa abrasiivin suuri nopeus pintojen välissä johtaa suureen kulumisnopeuteen. Teräspyörätestissä kovempi tutkittava metalli aiheuttaa myös abrasiivien murskautumisen, jolloin terävät abrasiivit kuluttavat pintaa nopeammin.

Abrasiivien ominaisuuksien vaikutusta kulumisnopeuteen ovat tutkineet mm. G.B. ja G.W. Stachowiak (2001) sekä Woldman et al. (2012). Molemmissa tutkimuksissa havaittiin kulumisnopeuden olevan riippuvainen abrasiivien muodosta. Terävillä abrasiiveilla kulumisnopeus on suurempi ja kuluminen tapahtuu suurimmaksi osaksi leikkautumalla. Pyöreillä abrasiiveilla kuluminen tapahtuu pääosin kyntämällä. Woldman et al. totesivat abrasiivien koolla olevan suurin vaikutus kulumisnopeuteen, suuremmat abrasiivit aiheuttavat suuremman kulumisnopeuden.

Liukuvassa kosketuksessa pintojen keskinäinen liukumisnopeus vaikuttaa kulumisnopeuteen. Liukumisnopeus vaikuttaa kulumiseen pääasiassa vaikuttamalla kosketuskohdan lämpötilaan. Lämpötilan muutos vaikuttaa molempien pintojen ominaisuuksiin sekä mm. oksidikalvojen muodostumiseen. Liukumisnopeuden kasvattaminen tiettyyn pisteeseen asti saattaa vähentää kulumisnopeutta, sillä kohonneen venymisnopeuden myötä materiaali muokkauslujittuu enemmän. (Kivioja et al. 2004, s. 123-124)

4.3 Väsymiskuluminen

Kaikissa kosketuksissa kulumispartikkeli ei irtoa heti vaan se vaatii toistuvaa kuormitusta. Väsymiskuluminen on seurausta toistuvista vaihtelevan suuntaisista tai suuruisista kuormituksista. Hertzin kosketusjännitys teorian mukaan leikkausvoiman maksimi on hieman pinnan alapuolella. Näin ollen pinnan alapuolelle syntyy kuormituksen seurauksena pieniä säröjä, jotka kasvavat joka kuormanvaihtokerralla ja niiden ydintyessä irtoaa pinnasta kulumispartikkeli. (Kivioja et al. 2004, s. 114, s. 39)

Väsymiskulumista esiintyy tyypillisesti kone-elimissä, joissa on suuri Hertzin pintapaine. Tällaisia kohteita ovat mm. vierintä- ja kuulalaakerit sekä raskaasti kuormitetut hammaspyörät. Väsymiskulumisen irrottamien kulumispartikkelien myötä kuluminen saattaa muuttua abrasiiviseksi kulumiseksi. Huomattavaa on, että väsymiskulumista saattaa tapahtua, vaikka pinnat eivät kosketa toisiaan. Nestevoitelutilanteessa pinnat ovat erotettuna toisistaan voitelukalvolla, mutta kuormitus välittyy voitelukalvon kautta pintaan, jolloin väsymiskuluminen on mahdollista. (Kivioja et al. 2004, s. 114)

5. KORROOSIO

Korroosiolla tarkoitetaan yleisesti materiaalien tuhoutumista kemiallisesti tai sähkökemiallisesti ympäristön vaikutuksesta. Korroosion ilmenemismuodot riippuvat suuresti materiaalista ja ympäristöstä. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.17) Tässä työssä keskitytään metallien yleisimpiin korroosionmuotoihin.

Luonnossa metallit esiintyvät erilaisina yhdisteinä malmeissa. Malmeja rikastamalla, eli nostamalla malmin halutun alkuaineen pitoisuutta saadaan metalleista käyttökelpoisia materiaaleja. Lopputuloksena syntyvä metallinen olomuoto sisältää runsaasti energiaa, eikä se ole termodynaamisesti pysyvä. Metallien luonnonlakien mukaisena taipumuksena onkin palata takaisin vähäenergiseksi yhdisteeksi. Korroosiota voidaan näin ajatella käänteisenä prosessina metallin jalostukselle. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.17; Koivisto et al. 2006, s.239)

Korroosio on yhteiskunnallisestikin merkittävä ilmiö, koska Yhdysvalloissa tehdyn tutkimuksen mukaan korroosion aiheuttamat suorat ja epäsuorat kustannukset Yhdysvalloissa ovat yhteensä n. 6 % Yhdysvaltojen BKT:stä ja Suomessakin yli 4 % Suomen BKT:stä. Sellun tuotannossa Skandinaviassa korroosio-kustannukset ovat arviolta 25–30 US\$ sellutonnin kohden. Kirjallisuudessa yleisesti hyväksytyn arvion mukaan noin neljännes vuosittain tuotetusta teräksestä tuhoutuu korroosion vuoksi, joten korroosion vuoksi kulutetaan suuria määriä luonnonvaroja. (Koch et al. 2002; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.18, s.160; Aromaa & Klarin 1999, s.12)

5.1 Korroosion perusteet

Korroosion perustana toimii termodynamiikan toinen pääsääntö, jonka mukaan entropia pyrkii kasvamaan suljetussa systeemissä. Entropian kasvu tässä yhteydessä tarkoittaa, että metallin järjestäytynyt kolmiulotteinen hilarakenne pyrkii hajoamaan ja vapauttamaan valmistuksessa siihen sitoutunutta energiaa. Korroosioilmiöt tapahtuvat metallin pinnalla, jossa atomien energiataso on suurempi kuin metallin sisässä. Materiaalin sisässä viereiset atomit sitovat toisiaan yhteen, mutta pinnalla atomit ovat alttiita korroosioympäristölle. Tämän vuoksi metallin pinta ei pysy käytännössä koskaan täysin puhtaana, vaan sen pintaan absorboituu ioneja ja molekyylejä ympäristöstä. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.21)

Korroosiota voi tapahtua pääpiirteittäin kahdella eri tavalla. Kemiallisessa korroosiossa metalli reagoi suoraan ympäristönsä kanssa, mutta käytännön kannalta huomattavasti yleisempi ja tärkeämpi ilmiö on sähkökemiallinen korroosio. Sähkökemiallinen korroosio perustuu sähkövarausten liikkeeseen ja tarvitsee täten sähköä johtavan yhteyden korroo-

sioalueiden välille. Yleisimmin sähköä johtavana yhteytenä, eli elektrolyyttinä, toimii vesiliuos. Korroosioaluetta, jossa metalli luovuttaa elektroneja kutsutaan anodiseksi alueeksi ja reaktiota anodiseksi reaktioksi. Vastaavasti taas korroosioaluetta, jossa vapautuneet elektronit kulutetaan, kutsutaan katodiseksi alueeksi ja reaktiota katodiseksi reaktioksi. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.26; McCafferty 2010, s.15)

Anodisessa reaktiossa metalli liukenee liukeseen ionina luovuttaen samalla elektroneja. Raudan anodinen reaktio on kuvattu kaavassa 6. Anodista reaktiota kutsutaan myös haptumisreaktioksi. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.28; McCafferty 2010, s.15)



Katodisessa reaktiossa anodisen reaktion seurauksena luovutetut elektronit reagoivat ympäristön aineiden kanssa. Kuten kaavassa 7 esitettyssä reaktiossa elektronit sitoutuvat vetyioneihin muodostaen vetykaasua. Liuoksissa on liuenneena H^{+} - ja OH^{-} -ioneja liuoksen pH:n määräämässä suhteessa. Katodista reaktiota kutsutaan myös pelkistysreaktioksi. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.28; McCafferty 2010, s.16)



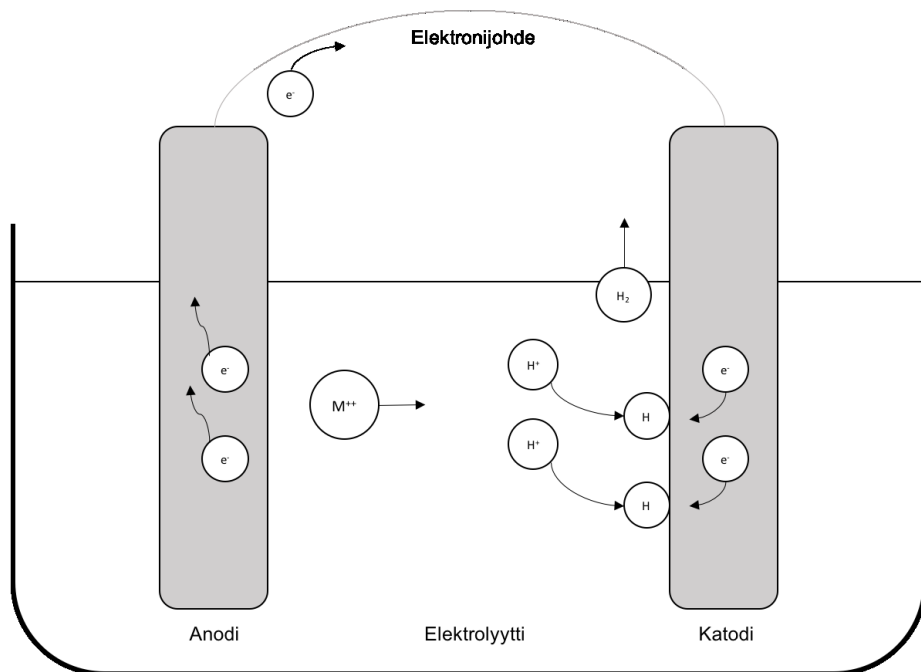
Kuten aiemmin jo todettiin, sähkökemiallinen korroosio perustuu anodisen- ja katodisen alueen, eli korroosioparin, väliseen sähkövarausten liikkeeseen. Korroosiopari voi muodostua eri metalleista, jolloin puhutaan galvaanisesta korroosiosta, tai korroosiopari voi muodostua metallin pinnan eri osien välille. Korroosioparista se, jolla on suurempi potentiaali, muodostuu anodiksi ja alkaa syöpyä. Korroosioparin muodostuminen metallin pinnan eri osien välille perustuu metallin homogeeniseen rakenteeseen. Valmistusvaiheessa metallin pinnalle jää epäpuhtauksia ja rakenteellisia virheitä, joissa energiatiheys on eri, kuin ympäröivässä metallin pinnassa. Ionit liukenevat helpommin alueilta, joissa on suurempi energiatiheys, joten näistä alueista muodostuu anodisia alueita. Korroosio voi saada alkunsa myös metallin muokkauksessa syntyneistä muutoksista metallin pinnalla, jolloin energiantiheyskin muuttuu eri alueilla. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.22; McCafferty 2010, s.18)

Korroosioparin ollessa upotettuna elektrolyyttiin anodin liukenemisessä ionina vapautuneet elektronit kulkeutuvat elektronijohdetta pitkin katodille, jossa ne reagoivat katodin pinnan ja elektrolyytin rajapinnalla oleviin elektrolyytin positiivisiin ioneihin (kuva 20). Teoreettisesti kaikki anodisessa reaktiossa vapautuneet elektronit käytetään katodisessa reaktiossa, jolloin reaktioparin välille syntyy suljettu virtapiiri. Virtapiirissä kulkeva virta riippuu Ohmin lain (kaava 8) mukaisesti korroosioparin välisestä potentiaalierosta sekä sähköisestä vastuksesta, resistanssista. (Aromaa & Klarin 1999, s.67; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.29)

$$I = \frac{E}{R} \quad (8)$$

jossa

- I on korroosiovirta (A)
 E on korroosioparin välinen potentiaaliero (V)
 R on piirin sisäinen vastus (Ω)



Kuva 20. Korroosiovirtapiiri, jossa katodisessa reaktiossa syntyy vetykaasua. (Mukaiillen Kunnossapitoyhdistys 2008, s.30)

Korroosiovirran avulla voidaan arvioida anodilta liuenneen materiaalin määrää (Aromaa & Klarin 1999, s.106). Anodilta liukenevan materiaalin liukenemisnopeus voidaan määrittää Faradayn lain mukaisesti (kaava 9).

$$m = \frac{IM}{nF} \quad (9)$$

jossa

m on liuenneen materiaalin massa sekunnissa (g/s)

I on korroosiovirta (A)

M on anodin moolimassa (g/mol)

n on korroosioon osallistuvien elektronien lukumäärä

F on Faradayn vakio

(Kunnossapitoyhdistys 2008, s.26; McCafferty 2010, s.23)

Käytännön tilanteissa korroosioparin muodostumiseen johtavia potentiaalieroja voi syntyä hyvin monilla eri tavoilla. Näitä tapoja ovat mm. seuraavat: (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.31)

- Eri materiaalien väliset vapaaenergiaerot
- Seostamisesta aiheutuneet faasierot materiaalin sisällä
- Metallin muokkauksesta aiheutuneet vapaaenergiaerot
- Jännityksen aiheuttamat vapaaenergiaerot. Esim. hitsauksessa syntyneet sisäiset jännitykset tai ulkoisen jännityksen aiheuttamat
- Lämpökäsittelyn aiheuttamat faasimuutokset ja muutokset materiaalin sisäisissä jännityksissä
- Korroosioympäristön erot metallin pinnalla. Esim. elektrolyytin happamuuserot metallin pinnalla
- Lämpötilaerot elektrolyytin kanssa kosketuksessa olevan pinnan ja muun materiaalin välillä
- Maassa tai rakenteessa kulkevat hajavirrat

5.1.1 Elektrodipotentiaali

Anodin ja katodin välillä tulee olla potentiaaliero, jotta korroosiopari voi muodostua ja sähkökemiallinen korrosio käynnistyä. Potentiaali kuvaa elektrodin taipumusta luovuttaa ioneja elektrolyyttiin. Esimerkiksi sinkkielektrodi pyrkii luovuttamaan voimakkaasti positiivisia ioneja veteen, jolloin elektrodiin muodostuu negatiivinen varaus. Negatiivinen varaus pitää liuenneet positiiviset sinkki-ionit elektrodin pinnan läheisyydessä. Tällöin elektrodi on negatiivisesti varautunut liuoksen suhteen ja sinkin elektrodipotentiaali on negatiivinen veden suhteen. Kuparin tapauksessa ioneja liukenee veteen vain hyvin pieni määrä. Tällöin elektrodin pinnan läheisyyteen muodostuu negatiivisesti varautunut alue ja kuparin elektrodipotentiaali on positiivinen veden suhteen. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.35)

Elektrodin potentiaali voidaan mitata jännitemittarilla suhteessa toiseen elektrodiin, mutta potentiaalın mittaaminen suhteessa elektrolyyttiin ei onnistu suoraan. Tämän vuoksi on määritetty standardipotentiaali, jossa elektrodin potentiaalia mitataan suhteessa standardielektrodiin standardiolosuhteissa. Standardielektrodi koostuu platinaelektrodista, jonka pintaan kuplitetaan vetyä. Standardielektrodista käytetään yleisesti nimitystä normaalivetyelektrodi (saturated hydrogen electrode, SHE). (Kunnossapitoyhdistys 2008; Cicek 2014)

Elektrodien välinen potentiaali voidaan laskea myös ns. Nernstin yhtälön avulla:

$$E_O = E^\theta - \frac{0,059}{n} * \log \frac{[C_C]^c}{[C_B]^b} \quad (10)$$

jossa

E_O on elektrodien välinen potentiaaliero

E^θ on kennon standardipotentiaali

n on reaktioon osallistuvien elektronien lukumäärä

$[C_i]^i$ on i :n komponentin konsentraatio elektrolyytissä

(Kunnossapitoyhdistys 2008, s.44)

Nernstin yhtälön avulla kennopotentiaali voidaan laskea mielivaltaisissa olosuhteissa käyttämällä hyväksi määritettyjä standardipotentiaaleja. Kaavassa 10 esitettyä yksinkertaistettua Nernstin yhtälöä voidaan käyttää tilanteissa, joissa elektrodeilla tapahtuu metallin liukenemistä ja saostumista. Lämpötilan oletetaan olevan 298 K. Laimeissa liuoksissa voidaan katsoa ionien aktiivisuuden olevan yhtä suuri kuin niiden konsentraatio. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.44)

Metallit joiden standardipotentiaali on positiivinen luovuttavat heikosti ioneja ja ne muodostuvat katodeiksi korroosiopareissa. Vastaavasti negatiivinen standardipotentiaali tarkoittaa, että metalli luovuttaa ioneja helposti ja muodostuu anodiksi korroosioparissa. Metalleja joiden standardipotentiaali on positiivinen, kutsutaan jaloiksi ja metalleja joiden standardipotentiaali on negatiivinen epäjaloiksi. Jaloja metalleja ovat mm. kulta ja platina ja epäjaloja mm. litium ja kalium. Metallit voidaan järjestää jalousteen mukaisesti ns. metallien sähkökemialliseksi jännitesarjaksi. (Kunnossapitoyhdistys 2008; Cicek 2014)

Sähkökemiallisen jännitesarjan avulla voidaan ennustaa, muodostuuko kahden metallin välille korroosioparia sekä kummasta muodostuu anodi ja kummasta katodi. Sähkökemiallinen jännitesarja perustuu kuitenkin kokeellisessa ympäristössä määritettyihin standardipotentiaaleihin eikä sen perusteella voida tehdä kovinkaan pitkälle meneviä johtopäätöksiä. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.41) Käytännön tilanteissa korroosioympäristössä

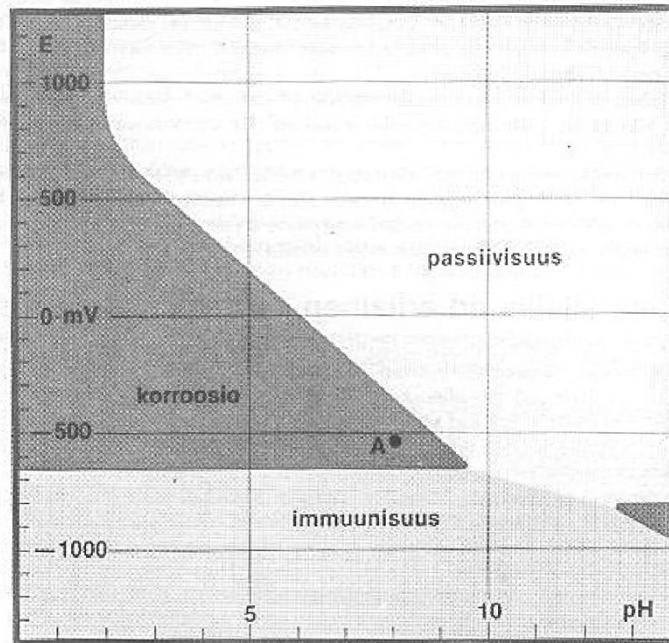
on hyvin monta muuttujaa, jotka vaikuttavat korroosion ilmenemismuotoihin ja korroosionopeuteen. Ympäristön vaikutusta korroosioon käsitellään tarkemmin luvussa 5.3.

5.1.2 Passivaatio

Passivaation ansiosta eräiden metallien korroosiokestävyys on huomattavasti parempi kuin sähkökemiallisen jännitesarjan perusteella voisi päätellä. Passivaatiossa metallin pinnalle syntyy korroosion seurauksena tiivis kerros tai kalvo, joka estää metallin liukenemisen ja käytännössä pysäyttää korroosion etenemisen. Passivaatiokerros voi syntyä silloin kun metallin potentiaali nousee suuremmaksi kuin jonkin sen korroosiotuotteen potentiaali. Tällöin tätä tuotetta alkaa muodostua metallin pinnalle. Näin ollen syntyvällä passiivikerroksella on suurempi potentiaali kuin sen alla olevalla metallilla, joten metalli muuttuu ikään kuin jalommaksi. Tähän perustuu mm. ruostumattoman teräksen ja monien muiden käyttömetallien käyttökelpoisuus korrodoivissa ympäristöissä. (Kunnossapitoyhdistys 2008; Cicek 2014)

Passivaatiokerroksen muodostumiseksi tarvitaan tietty kriittinen sähkövirta, jotta passiivaatiokerros voi muodostua metallin pinnalle korroosioreaktion seurauksena. Passivaation seurauksena elektrodin sähkövirta putoaa tyypillisesti 100-1000 kertaa pienemmäksi kuin kriittinen virta. Passivaatioalueella elektrodin sähkövirta ei muutu potentiaalinn muutoksen seurauksena vaan elektrodissa kulkee passivaatiovirta, joka ylläpitää syntynyttä passivaatiokerrosta. (Aromaa & Klarin 1999, s.84) Passivaation aiheuttamat virran muutokset käyvät hyvin ilmi polarisaatiokäyristä, joita tarkastellaan luvussa 5.1.3.

Passiivikerroksen syntymiseksi korroosioympäristön tulee olla sopiva kyseiselle metallille. Rikkoutunut passiivikerros, esim. mekaanisen kulutuksen seurauksena, korjaantuu eli passivoituu uudelleen nopeasti, jos ympäristö pysyy suotuisana passivaation kannalta. Ympäristön muuttuessa epäsuotuisaksi passivaation kannalta saattaa rikkoutunut passiivaatiokerros aiheuttaa suurta korroosionopeutta anodisen ja katodisen alueen kokoeron vuoksi. Metallin passivoitumista voidaan ennustaa potentiaali-pH-piirroksella eli Pourbaix-diagrammilla tai polarisaatiokäyrien avulla. (Kunnossapitoyhdistys 2008; Aromaa & Klarin 1999; Cicek 2014) Polarisaatiota tarkastellaan luvussa 5.1.3



Kuva 21. Raudan yksinkertaistettu Pourbaix-diagrammi. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.20)

Pourbaix-diagrammi esittää sähkökemiallisten tasapainoyhtälöiden avulla metallin mahdollisia korroosioikäytymisiä elektrolyytissä. Kuvassa 21 esitetystä raudan Pourbaix-diagrammista nähdään yksinkertaistetusti raudan korroosiomahdollisuudet. Piste A vastaa tilannetta tavallisessa käyttövedessä ja koska piste on korroosioalueella, niin rauta pyrkii syöpymään niissä olosuhteissa. Immuunialueella rauta on metallisessa muodossaan termodynaamisesti pysyvä eikä se pyri hajoamaan. Passiivialueella raudan pintaan pyrkii muodostumaan korroosiolta suojaava passiivikerros. Pourbaix-diagrammista voidaan lukea vain mihin suuntaan korroosioreaktio pyrkii etenemään, mutta se ei kerro mitään korroosioreaktion nopeudesta. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.20)

Pourbaix-diagrammit kuvaavat tilannetta vain tarkasti määritetyssä ympäristössä ja niiden teoreettisen luonteen vuoksi ei voida tehdä liian pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Diagrammin avulla voidaan kuitenkin selvittää eri mahdollisuuksia korroosiotilanteen muuttamiseksi. Kuvassa 21 pisteen A tilanteesta voidaan metallin potentiaalia nostaa, jolloin siirrytään passiivialueelle ja metallin korroosio hidastuu. Käytännössä potentiaalın nostaminen onnistuu esim. seostamalla metallin joukkoon jalompaa metallia, kuten kromia. Potentiaalia voidaan nostaa myös käyttämällä ulkoista virtalähdettä tai lisäämällä elektrolyytin joukkoon hapettavaa komponenttia, ns. passivoivaa inhibiittoria. Toinen mahdollisuus on pienentää metallin potentiaalia, jolloin päästään immuunialueelle ja metallin korroosio pysähtyy. Potentiaalın pienentäminen voidaan tehdä käyttämällä ulkoista virtalähdettä tai lisäämällä epäjalompi metalli kosketuksiin suojeltavan metallin kanssa. Korroosio voidaan pysäyttää myös nostamalla liuoksen pH-arvoa. Pourbaix-diagrammien muoto riippuu paljon tarkasteltavasta metallista. Esimerkiksi kromilla passivaatioalue on suurempi kuin raudalla. Teräksen passivoitumista ja korroosionkestoa voidaan

parantaa seostamalla raudan joukkoon kromia, joka onkin yksi tärkeimmistä seosaineista ruostumattomissa teräksissä. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.61; McCafferty 2010, s.104-106; Aromaa & Klarin 1999, s.84)

Passivaatiokerroksen rakenne riippuu korroosioympäristöstä ja metallista. Passivaation arvioimiseen käytetään yleensä oksidien tasapainotilaa, mutta käytännössä passiivikerros muodostuu monista eri tekijöistä, kuten mm. kiteisistä tai amorfisista oksideista, hydroksyyli-ioneista ja vesimolekyyleistä. Veden läsnäolo saattaa tehdä passiivikerroksesta geelimäisen. Ruostumattomien teräksien passiivikerroksen paksuus on tyypillisesti 1-5nm. Passiivikerros ei välttämättä ole homogeeninen koko paksuudeltaan. Ruostumattomilla teräksillä passiivikerroksessa on enemmän rautaioneja metallin puolella ja enemmän kromi-ioneja elektrolyytin puolella. (Aromaa & Klarin 1999, s.84; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.98)

5.1.3 Polarisaatio

Luonnonilmiöille on tyypillistä, että muutoksesta syntyy muutosta vastustava reaktio. Korroosion tapauksessa tätä vastustavaa reaktiota kutsutaan polarisaatioksi. Polarisaatio vastustaa korroosion aikaansaamaa metallin syöpymistä ja se onkin välttämätön metallien käytön kannalta. Ilman polarisaatiota metallit hajoaisivat välittömästi valmistuksen jälkeen käyttökelvottomiksi. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.23)

Tasapainotilassa elektrodin ja elektrolyytin välillä on tietty potentiaaliero. Korroosioparin muodostuessa alkaa kennossa kulkemaan sähkövirta, joka poikkeuttaa elektrodien potentiaalia. Potentiaali asettuu tietylle tasolle, E_{kor} , joka kuvaa korroosioparin korroosiopotentiaalia ja tällöin piirissä kulkee korroosiovirta, I_{kor} . Tätä potentiaalın muutosta kutsutaan polarisaatioksi. (Kunnossapitoyhdistys 2008; Cicek 2014)

Polarisaation määrä voidaan määrittää seuraavan kaavan avulla:

$$\eta = E - E_0 \quad (11)$$

jossa

η on polarisaation määrä (V)

E on elektrodipotentiaali sähkövirran aikana (V)

E_0 on elektrodipotentiaali ilman sähkövirtaa (V)

(McCafferty 2010, s.127)

Kaavasta 11 nähdään siis, että polarisaatio määritellään ylijännitteenä tasapainotilanteen potentiaaliin nähden. Anodilla polarisaation muutos on positiivinen eli polarisaatio pyrkii vastustamaan laskevaa potentiaalia. Katodilla polarisaatio on päinvastainen eli polarisaatio pyrkii laskemaan kasvavaa potentiaalia. (McCafferty 2010, s.127)

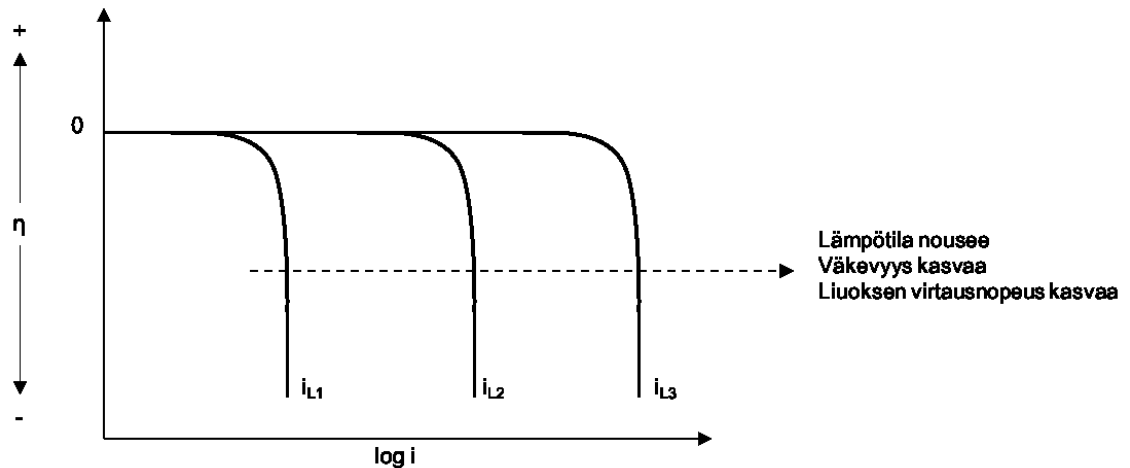
Korroosioreaktioissa tapahtuu monia osaprosesseja, jotka muodostavat varsinaisen korroosioreaktion. Esimerkiksi elektrolyytin vapaiden ionien on siirryttävä metallin pinnalle, absorboitettava metalliin, vastaanotettava tarvittava määrä elektroneja, irrottauduttava metallin pinnasta ja siirryttävä pelkistyneenä takaisin elektrolyyttiin tai muodostuttava metallin pinnalle reaktiotuotteen mukaiseen hilamuotoon. Kemiallisissa reaktioissa kokonaisreaktion nopeutta säätelee aina hitain osaprosessi. Sähkökemiallisessa korroosiossa yleisimmin hitain prosessi on varausten liikkuminen metallin pinnan läheisyydessä olevassa sähköisessä kaksoiskerroksessa. Tällöin puhutaan varauksensiirtopolarisaatiosta. Joissain tapauksissa aineen siirtyminen liuoksesta sähköisen kaksoiskerroksen läheisyyteen tai päinvastoin voi olla nopeutta säätelevä prosessi. Tästä käytetään nimitystä diffuusiopolarisaatio. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.65)

Varauksensiirtopolarisaatiossa elektroneja tulee katodille nopeammin kuin niitä ehtii reagoimaan katodin pinnalla vetyionien kanssa (kts. Kuva 20). Tällöin katodille kertyy enemmän elektroneja ja sen varaus muuttuu negatiivisemmaksi. Varauksensiirtopolarisaatio siis vastustaa katodin varauksen muuttumista positiivisemmaksi, joka seuraa, kun elektronit reagoivat vetyionien kanssa ja siirtyvät pois katodilta. (McCafferty 2010, s.128)

Varauksensiirtopolarisaatiota voi tapahtua myös anodilla. Metallin liuetessa ionina elektrolyyttiin saattavat vapaat elektronit kulkeutua nopeammin pois elektrodilta kuin ionit irtautuvat metallihilasta. Näin ollen elektrodin potentiaali muuttuu positiivisemmaksi elektronien vajauksen vuoksi. (McCafferty 2010, s.128)

Diffuusiopolarisaatiossa reaktion pullonkaulaksi muodostuu aineen siirtyminen elektrodin pinnalle ja takaisin elektrolyyttiin, kun varauksensiirtoprosessi on nopea. Elektrolyytin ionit ja molekyylit voivat siirtyä elektrodin pinnalle pääasiassa kolmella tavalla. Nämä ovat: sähkökentän vaikutuksesta, konvektion seurauksena ja konsentraatiogradientin aiheuttama diffuusio. Suurinta virrantiheyttä, joka voi kulkea korroosiokennossa diffuusiopolarisaation ollessa suurin rajoittava tekijä kutsutaan maksimivirrantiheydeksi, i_L . (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.69)

Käytännön tilanteissa sähkökentän vaikutus voidaan yleensä jättää huomioimatta, koska sähköisen kaksoiskerroksen läheisyydessä on yleensä ylimäärä elektrolyytin ioneja, jotka eivät osallistu korroosioreaktioon. Konvektio lisää liuoksen homogeenisyyttä, mutta liuoksen nopeudesta ja elektrodin geometriasta johtuen diffuusiovyöhykkeellä, josta ionit ja molekyylit siirtyvät elektrodin pinnalle, saattaa esiintyä konsentraatioeroja. Liuoksen virtausnopeuden kasvu pienentää diffuusiovyöhykkeen paksuutta, mikä kasvattaa maksimivirrantiheyttä. Lämpötilan kasvu nopeuttaa diffuusiota, mikä sekin kasvattaa maksimivirrantiheyttä. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.70)



Kuva 22. Ympäristöolosuhteiden vaikutus diffuusiopolarisaatioon. (Mukaiillen Kunnossapitoyhdistys 2008, s.70)

Kuvassa 22 on havainnollistettu eri ympäristötekijöiden vaikutusta diffuusiopolarisaatioon. Pystyakselilla kuvataan polarisaation määrää ja vaaka-akselilla virrantiheyttä logaritmisella asteikolla. Kuten ylempänä todettiin lämpötilan ja liuoksen virtausnopeuden kasvu kasvattavat virrantiheyttä ja täten diffuusionopeus kasvaa, joka lisää korroosionopeutta.

Kolmas diffuusiopolarisaatioon vaikuttava tekijä on liuoksen väkevyys. ”Fickin ensimmäisen lain mukaan materiaalivirta elektrodille on verrannollinen väkevyysgradienttiin diffuusiovakion toimiessa verrannollisuuskertoimena. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.69)” Korroosioreaktiot kuluttavat ioneja elektrodin pinnalla, joka johtaa konsentraatioeroihin liuoksessa. Konsentraatioerojen vuoksi ioneja alkaa siirtyä muualta liuoksesta elektrodin pinnalle.

Yhdistämällä Fickin ensimmäinen laki, Nernstin yhtälö (kaava 10) ja Faradayn laki (kaava 9), saadaan polarisaatiolle lauseke:

$$\eta = \frac{0,059}{n} * \log\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (12)$$

jossa

η on polarisaation määrä

n on korroosioon osallistuvien elektronien lukumäärä

i on kennossa kulkeva virrantiheys

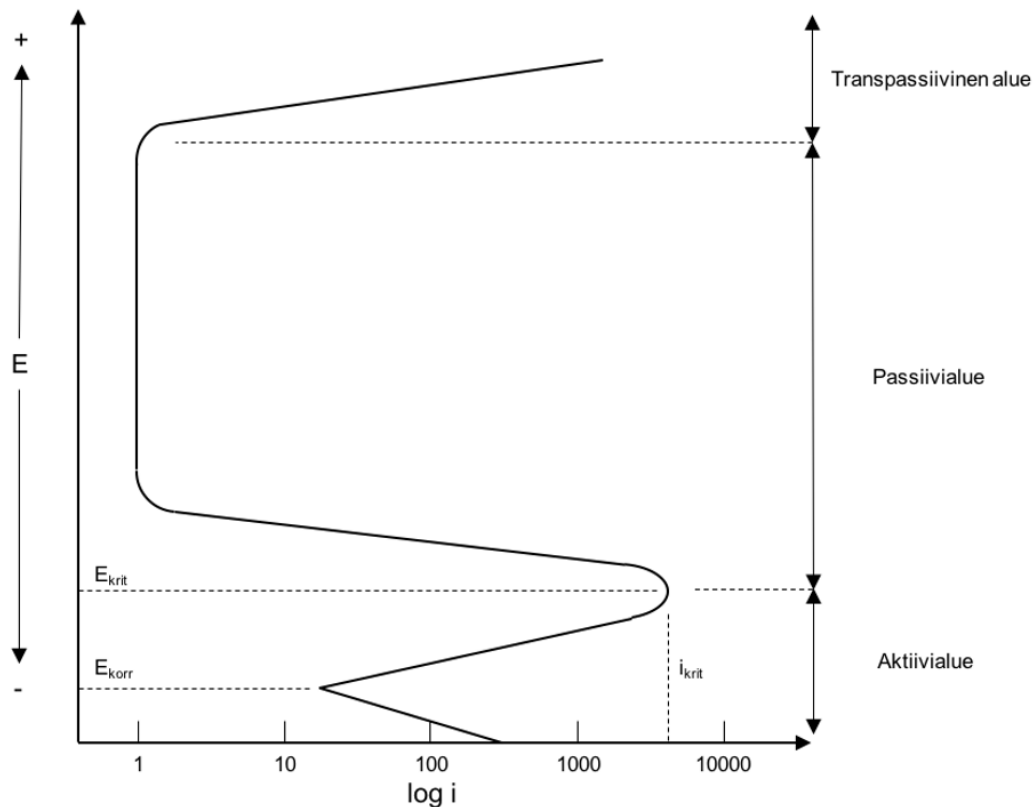
i_L on maksimivirrantiheys

(Kunnossapitoyhdistys 2008, s.69)

Kaavasta 12 nähdään, että kun reaktionopeus riippuu aineen liikkeestä, niin polarisaation arvo kasvaa nopeasti, kun lähestytään maksimivirrantiheyttä (kts. kuva 22)

Sähkökemiallisen reaktion nopeutta mitataan mittaamalla kennossa kulkevaa sähkövirtaa. Sähkövirta ilmaistaan yleensä virrantiheytenä, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia. Kuvaajaa, jossa kuvataan elektrodipotentiaalin suhdetta virrantiheyteen, kutsutaan polarisaatiokäyräksi. Polarisaatiokäyrät voidaan määrittää käyttämällä ns. potentiostaattilaitteistoa. (Kunnossapitoyhdistys 2008; Aromaa & Klarin 1999, s.75)

Polarisaatiokäyriä määritettäessä elektrodin annetaan asettua tasapainotilaan, jolloin sen potentiaali vastaa korroosiopotentiaalia. Potentiostaattilaitteistolla voidaan muuttaa elektrodin ja elektrolyytin välistä potentiaalia halutulla tavalla. Mittaamalla korroosiokennossa kulkevaa virtaa potentiaalin muuttuessa saadaan määritettyä korroosiosysteemin polarisaatiokäyrä. (Aromaa & Klarin 1999, s.94)



Kuva 23. Skemaattinen polarisaatiokäyrä passiivoituvalle metallille. (Mukaillen Kunnossapitoyhdistys 2008, s.72)

Kuvassa 23 on esitetty skemaattinen anodinen passiivaatiokäyrä passiivoituvalle metallille. Kuvasta nähdään, kuinka potentiaali asettuu tasapainotilassa korroosiopotentiaaliin, E_{korr} . Potentiaalia nostetaan potentiostaatilla, jolloin virrantiheys kasvaa potentiaalin mukana kriittiseen virrantiheyteen asti, i_{krit} . Kriittisellä virrantiheydellä metalli passiivoituu ja virrantiheys putoaa murto-osaan kriittisestä virrantiheydestä. Passiivialueella virrantiheys ei

enää kasva potentiaalin mukana vaan se pysyy likimain samana. Kun potentiaalia kasvatetaan tarpeeksi, siirtyy potentiaali transpassiiviselle alueelle ja virrantiheys alkaa taas kasvaa potentiaalin mukana.

Kuvan 23 mukainen polarisaatiokäyrä kuvaa tilannetta, kun potentiaalia nostetaan positiiviseen, eli anodiseen, suuntaan. Polarisaatiokäyrien avulla voidaan myös tutkia paikallisten korroosionmuotojen syntymistä transpassiivisella alueella. Transpassiivisella alueella metallin pintaa suojaava passiivikerros rikkoutuu ja paikalliset korroosionmuodot pääsevät syövyttämään metallia. Laskemalla elektrodin potentiaalia takaisin passiivialueelle ja määrittämällä anodisen ja katodisen polarisaatiokäyrän leikkauskohta saadaan selville uudelleenpassivoitumispotentiaali. Uudelleenpassivoitumispotentiaalin tulee olla suurempi kuin liuoksen redox-potentiaalin, jotta metalli pystyy passivoitumaan uudelleen. (Aromaa & Klarin 1999, s.98)

5.2 Korroosion ilmenemismuodot

Kirjallisuudessa korroosionmuotojen luokittelu vaihtelee suuresti eikä vakiintunutta luokittelua tai terminologiaa ole. Tässä työssä käytetään Korroosiokäsikirjaan (2008, s.100) perustuvaa luokittelua, joka perustuu pääosin korroosion ilmenemispaikkoihin.

Useimmiten korroosionmuodon tunnistaminen on mahdollista silmämääräisesti, mutta korroosionmuodon tunnistaminen ei vielä kerro mitään korroosioon johtaneesta syystä. Esimerkiksi korroosionmuoto saattaa olla paikallinen pistesyöpymä, mutta korroosion aiheuttava syy on elektrolyytin kloridipitoisuus. Korroosionmuodon tunnistaminen antaa kuitenkin arvokkaita vihjeitä korroosion syyn selvittämiseksi. (Aromaa & Klarin 1999, s.123)

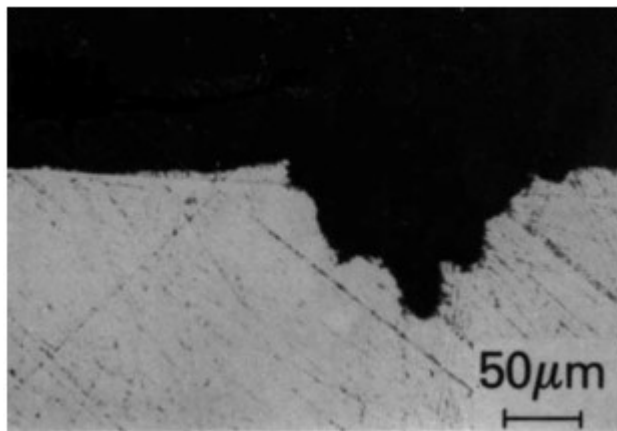
5.2.1 Yleinen syöpyminen

Yleistä syöpymistä tapahtuu silloin, kun metallin koko pinta altistuu homogeeniselle korroosioympäristölle. Yleisessä syöpymisessä metallin pinnan anodiset ja katodiset alueet vaihtavat jatkuvasti sijaintiaan, joka johtaa koko pinnan tasaiseen syöpymiseen. Tyypillinen tapaus yleisestä syöpymisestä on ns. mustan raudan ruostuminen tavallisissa ilmasto-olosuhteissa. Joissain tapauksissa myös kemikaalit voivat tuhota metallia suojaavan pinnoitteen ja syövyttää metallia kauttaaltaan. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.102; Aromaa & Klarin 1999, s.124)

Yleisen syöpymisen havaitseminen ja seuraaminen on yleensä helppoa esim. painonhäviämismittauksilla tai seinämän paksuusmittauksilla. Yleinen syöpyminen saattaa aiheuttaa laiterikkoja, jos korroosionopeus on oletettua suurempi. Hiiliteräkselle yleinen korroosionopeus on n. 0,2-0,3 mm/vuodessa. (Aromaa & Klarin 1999, s.125)

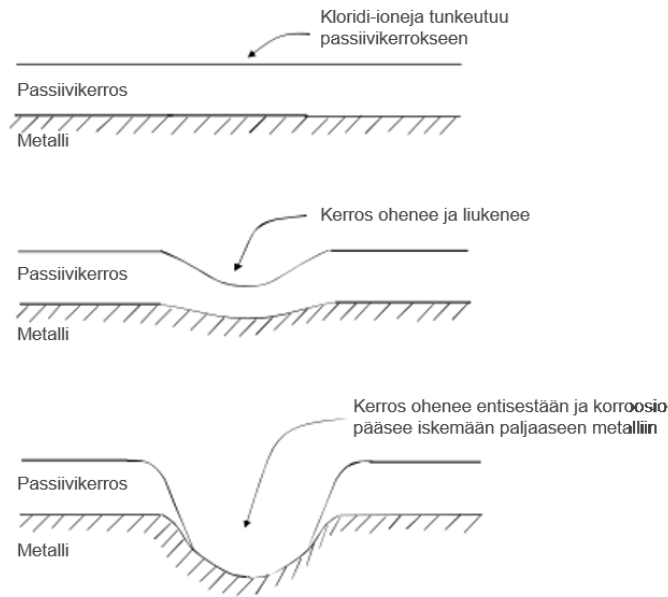
5.2.2 Pistesyöpyminen

Pistesyöpymä syövyttää metallinpintaan paikallisia kuoppamaisia syvänteitä (kuva 24). Pistesyöpymä voi saada alkunsa mm. pinnan rakennevirheistä (esim. pinnankarheuden urat ja naarmut), pintaa suojaavan kalvon rakennevirheistä, pinnalla olevista elektrolyyttipisaroista sekä liuoksen voimakkaasta törmäyksestä seinämään. Liuoksessa olevat aggressiiviset ionit voivat myös aiheuttaa pistesyöpymää. Aggressiivisia ioneja ovat mm. kloridi-, bromidi-, hypokloriitti-, sekä tiosulfaatti-ionit. Pistesyöpymän aiheuttamat kuopat etenevät normaalisti tietylle syvyydelle, jonka jälkeen syöpymä hidastuu merkittävästi tai pysähtyy kokonaan. Ohut seinämäisissä putkissa ja säiliöissä kuopat saattavat kuitenkin yltää koko materiaalin läpi aiheuttaen vuotoja. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.103)

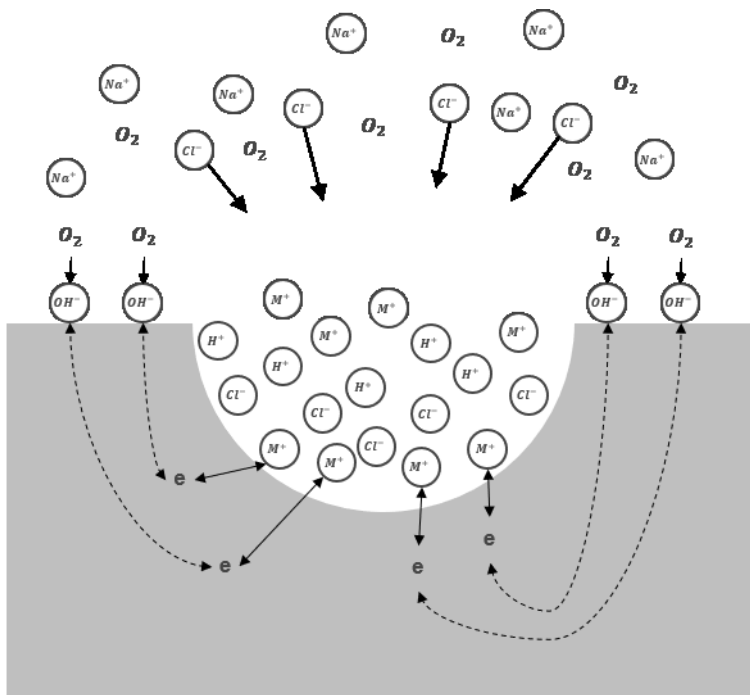


Kuva 24. Poikkileikkauskuva korroosion syövyttämästä kuopasta. (McCafferty 2010, s.278)

Pistesyöpyminen on tyypillistä passivoituvilla metalleilla, kuten ruostumattomalla teräksellä. Esimerkkinä tästä on ruostumattoman teräksen syöpyminen pistemäisesti merivedessä. Meriveden kloridi-ionit heikentävät ja lopulta tuhoavat terästä suojaavan passiivikerroksen tietyltä alueelta (kts. kuva 25). Teräs alkaa liukenemaan ioneina elektrolyyttiin ja positiiviset ionit aiheuttavat positiivisen varauksen syöpymä alueelle, joka vetää puoleensa lisää negatiivisia kloridi-ioneja (kts. kuva 26). Kloridi-ionit muodostavat metallihydroksidin ja metallihydroksidin reagoiessa veden kanssa vapautuu vety- ja kloridi-ioneja. Näin ollen elektrolyytin pH laskee syöpyneen kuopan sisällä ja korroosioreaktio kiihtyy. (Aromaa & Klarin 1999, s.137; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.103)



Kuva 25. Passiivikerroksen tuhoutuminen kloridi-ionien läsnä ollessa. (Muokattu McCafferty 2010, s.282)



Kuva 26. Pistesyöpymän mekanismi. (Mukaillen Kunnossapitoyhdistys 2008, s.105)

Kuvan 26 mukaisessa tilanteessa hapen liukoisuus kuopassa olevaan väkevöityneeseen elektrolyyttiin pienenee. Syöpymäkuopan reunoilla tapahtuu katodisena reaktiona hapen pelkistyminen, joka suojaa kuoppaa ympäröivää metallipintaa. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.103) Näin ollen korrosio ei leviä kuopasta ympäröivään metalliin, vaan jää syövyttämään kuoppaa metallin pinnan alapuolelle.

5.2.3 Rakokorroosio

Rakokorroosio noudattaa hyvin pitkälti samankaltaista mekanismia kuin pistesyöpyminen ja yleensä kirjallisuudessa ne käsitelläänkin yhdessä. Rakokorroosiota esiintyy ahtaissa, tyypillisesti alle 1mm, raoissa, joihin liuos pääsee tunkeutumaan, mutta joista se ei pääse vaihtumaan samaan tahtiin muun metallipinnan kanssa. Liuos alkaa väkevöitymään raossa samaan tapaan kuin pistekorrosion syöpymäkuopassa, joka nopeuttaa korrosioreaktiota. Rako toimii ikään kuin alkukuoppa pistekorrosiolle. (Aromaa & Klarin 1999, s.138; Kunnossapitoyhdistys 2008; McCafferty 2010)

Tyypillinen tilanne rakokorroosion syntymiselle on hapen pelkistymisestä syntyvä potentiaaliero raon ja muun metallipinnan välille. Hapen pelkistysreaktiota tapahtuu koko metallipinnalla, mutta ragoon ei pääse uutta happea samalla nopeudella muuhun metallipintaan nähden. Raosta muodostuu siten anodinen alue ja korrosioreaktio happamoittaa raossa olevaa liuosta. Lisääntyneet positiiviset vety-ionit raossa vetävät puoleensa negatiivisia ioneja muualta liuoksesta jonka jälkeen korrosio etenee samaa mekanismia noudattaen, kuin pistesyöpymässä. (Aromaa & Klarin 1999, s.141)

Tyypillisiä rakokorroosion esiintymispaikkoja ovat mm. rakenteen geometriassa olevat ahtaat raot, pultti- ja hitsausliitokset sekä metallin pinnalla olevien saostumien alla. Rakokorroosion havaitseminen saattaa olla hankalaa, koska korrosio etenee piilossa metallin pinnan alla. Metallin pinta saattaa näyttää täysin korroosiottomalta, mutta esim. kahden limittäin olevan levyn välissä korrosio syövyttää metallia ja aiheuttaa liitoksen rikkoutumisen. (Aromaa & Klarin 1999, s.138)

5.2.4 Galvaaninen korrosio

Galvaanista korroosiota esiintyy kahden eri metallin välillä, jotka ovat samassa elektrolyytissä ja sähköisessä kontaktissa toisiinsa. Metalleista jalompi muodostuu katodiksi ja epäjalompi muodostuu anodiksi ja alkaa syöpyä. Galvaanista korroosiota voi esiintyä myös tietyissä tilanteissa sähköä johtavan epämetallin ja metallin välillä, esimerkiksi hiiltä sisältävän tiivistemateriaalin kanssa. (Aromaa & Klarin 1999, s.128; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.109)

Galvaanisen parin muodostuessa anodin korrosionopeus kasvaa verrattuna tilanteeseen, jossa anodiksi muodostuva metalli olisi yksinään elektrolyytissä. Vastaavasti katodiksi muodostuvan metallin korrosionopeus laskee huomattavasti tai pysähtyy kokonaan. (Aromaa & Klarin 1999, s.128; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.109) Tätä ilmiötä voidaan käyttää hyväksi galvaanisessa suojauksessa, jota käsitellään tarkemmin korroosionestomenetelmien yhteydessä luvussa 7.3.

Galvaanisen korroosion mekanismi muistuttaa yleistä syöpymistä, jossa metallin pinta syöpyy tasaisesti. Galvaanisen korroosion todennäköisyyteen ja nopeuteen vaikuttavat

metallien elektrodipotentiaalit korroosio-olosuhteissa, suhteelliset pinta-alat sekä elektrolyytin sähkönjohtavuus. (Aromaa & Klarin 1999, s.129; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.110)

Elektrodipotentiaaleja voidaan arvioida sähkökemiallisen jännitesarjan avulla, mutta kuten luvussa 5.1.1 todettiin jännitesarjat perustuvat tietyissä olosuhteissa määritettyihin potentiaaleihin, eikä näin ollen vastaa välttämättä todellisia käyttöolosuhteita. Esimerkiksi raudan ja sinkin tapauksessa korroosioparin jalousjärjestys vaihtuu talousvedessä, kun lämpötila nousee yli 60 °C: n. Elektrodipotentiaalien ero ei vaikuta korroosionopeuteen, vaan potentiaaliero kuvaa vain todennäköisyyttä galvaanisen parin muodostumiselle. (Aromaa & Klarin 1999, s.129; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.110)

Korroosionopeuteen vaikuttaa yleisen korroosioreaktion kinetiikan lisäksi galvaanisen korroosioparin metallien pinta-alojen suhde. Nopeinta korroosio on silloin, kun anodinen metalli on pienempi kuin katodinen metalli. Tyypillinen esimerkki tästä on niittiliitos, jossa niitin materiaali on epäjalompaa, kuin liitettävä materiaali ja niitti alkaa syöpyä. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.110)

Elektrolyytin sähkönjohtavuus vaikuttaa korroosionopeuteen ja syntyvään korroosiovaurioon. Sähkönjohtavuuden ollessa korkea, anodiin syöpyvä vaurio on laaja ja matala. Sähkönjohtavuuden ollessa heikko, korroosio keskittyy lähelle metallien rajapintaa ja syövyttää syvemmän vaurion, joka saattaa aiheuttaa rikkoutumisia herkemmin kuin matala korroosiovaurio. (Aromaa & Klarin 1999, s.130)

5.2.5 Raerajakorroosio

Raerajakorroosiota esiintyy tilanteissa, joissa metallin rakeiden rajoilla oleva materiaali kestää heikommin korroosiota, kuin metallin rakeet. Sulan metallin jähmettyessä sen mikrorakenne muodostuu pienistä rakeista. Metallin valmistuksen ja muiden lämpökäsittelyiden yhteydessä seosaineet tai muut epäpuhtaudet, jotka liukenevat heikosti metallin hilarakenteeseen, saostuvat raerajoille. Raerajakorroosio syövyttää rakeiden välistä materiaalia, mutta rakeiden materiaali säilyy ennallaan. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.115)

Raerajakorroosion mekanismi voidaan käsittää galvaanisena korroosiona mikroskoopissa mittakaavassa. Raerajoille saostunut materiaali muodostuu anodiksi ja rakeiden materiaali katodiksi. Tästä seuraa tilanne, jossa katodinen alue on paljon suurempi kuin anodinen alue ja raerajakorroosio pääsee etenemään nopeasti. Vaarallisimmillaan raerajakorroosio voi edetä koko materiaalin läpi ilman havaittavaa painohäviötä tai muutoksia metallin pinnalla. (Aromaa & Klarin 1999, s.149)

Käytännön tilanteissa raerajakorroosiota esiintyy yleisimmin metallien lämpökäsittelyiden yhteydessä. Materiaalille ominaisella lämpötila-alueella seosaineet ja epäpuhtaudet

alkavat kerääntyä raerajoille. Tyypillinen esimerkki raerajakorroosiosta on ruostumatton teräksen ns. herkistymisilmiö. Hitsatessa ruostumatonta terästä kromi muodostaa kromikarbideja, joihin sitoutuu paljon kromia. Karbidien ympäristöön syntyy näin alue, jossa kromia on vähemmän kuin muussa materiaalissa. Tällöin olosuhteissa, joissa ruostumatton teräs normaalisti passivoituisi, kromiköyhät alueet eivät pääse passivoitumaan ja ne alkavat syöpyä. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.116; Aromaa & Klarin 1999, s.149)

5.2.6 Valikoiva liukeneminen

Valikoivalla liukenemisella tarkoitetaan jonkin metallin seosaineen muita nopeampaa liukenemistä korroosioympäristössä. Valikoivan liukenemisen johdosta metallin pinnasta ja rakenteesta tulee sienimäinen, jolla ei ole enää rakenteellista lujuutta. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.117)

Valikoivaa liukenemistä esiintyy erityisesti metalliseoksissa, joissa seosaineiden jaloustaste-ero on suuri. Tyypillinen esimerkki on messingin sinkkikato. Valikoivaa liukenemistä voi esiintyä myös metalleissa, joissa on monia eri faaseja, kuten esimerkiksi duplex-teräksissä. (Aromaa & Klarin 1999, s.160; Kunnossapitoyhdistys 2008, s.117)

5.2.7 Biologinen korroosio

Biologinen korroosio on korroosiota joka saa alkunsa tai jonka nopeus kasvaa mikrobien (mm. bakteerit, sienet ja levät) toiminnan seurauksena. Mikrobit viihtyvät lämpimissä vesissä ja niitä voi esiintyä jopa 75 °C lämpötilassa. Suotuisin pH-alue mikrobeille on n. 5 – 9. Mikrobit aiheuttavat tyypillisesti paikallisia korroosiomuotoja. (Aromaa & Klarin 1999, s. 225)

Mikrobit muodostavat metallin pinnalle biofilmin, jonka alla pH saattaa olla useita yksiköitä alhaisempi kuin ympäröivän veden. Biofilmi muodostuu, kun yksittäiset bakteerit tarttuvat kiinni esim. metallin hitsisaumaan, virtauksen kuolleeseen kohtaan tai metallin pinnalla olevaan tahmeaan aineeseen, kuten pihkaan. Bakteerit lisääntyvät jakautumalla, jolloin biofilmi alkaa muodostua. Biofilmin alla metallin pinta on lähes täysin hapettomassa tilassa. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s. 432)

Eräs merkittävä biologista korroosiota aiheuttava mikrobiryhmä on sulfaattia pelkistävät bakteerit. Sulfaatin pelkistäjä bakteerit ovat anaerobisia bakteereja eli ne toimivat biofilmin alla hapettomissa oloissa. Ne kiihdyttävät korroosiota kuluttamalla katodisessa reaktiossa syntyvää vetyä. Rikin hapettaja bakteerit edistävät korroosiota myös aineenvaihduntansa kautta. Bakteerien aineenvaihduntatuotteena sulfaatista syntyy rikkivetyä ja sulfideja. Rikkivety syövyttää rautaa happamissa oloissa ja kohonnut sulfidipitoisuus houkuttelee paikalle rikkiä hapettavia bakteereja, jotka voivat hapettaa sulfidit ja alkuainerikin rikkihapoksi. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s. 434; Aromaa & Klarin 1999, s. 228)

5.3 Ympäristön vaikutus korroosioon

Materiaalin ohella korroosioympäristöllä on suuri merkitys korroosion todennäköisyyteen ja nopeuteen. Aromaan mukaan (Aromaa & Klarin 1999, s.176) korroosioympäristön merkittävimmät tunnusmerkit ovat:

- väliaine
- pH
- redox-potentiaali
- lämpötila
- liuenneet suolat ja kaasut
- virtausnopeus

Väliaineena sulatinkuljettimen ympäristössä toimii vesi. Puusta liukenevat suolat ja orgaaniset aineet vaikuttavat veden pH-arvoon sekä redox-potentiaaliin. Redox-potentiaali kuvaa liuoksen hapetus- ja pelkistyspotentiaalia ja se vaikuttaa korroosiomekanismiin ja -nopeuteen (Aromaa & Klarin 1999, s.176). Sulatuskuljettimissa puiden päälle suihkutettavan veden lämpötila on n. 50 – 60 °C.

5.3.1 Veden ominaisuudet

Veden pH-arvo vaikuttaa korroosionopeuteen ja -mekanismiin. Teräksellä tyypillisesti korroosionopeus kasvaa pH:n pienentyessä. pH:n ollessa alle 5 teräs syöpyy vetyä kehittäen, pH:n ollessa välillä 5 – 10 on hapen diffuusio korroosionopeutta määräävä tekijä ja pH:n ollessa yli 10 korroosionopeus pienenee pH:n funktiona. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.250; Aromaa & Klarin 1999, s.180)

Pekingin yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa (Tang et al. 2015) tutkittiin pH:n ja vaihtovirran vaikutusta hiiliteräksen korroosionopeuteen. Tutkimus suoritettiin natriumsulfaatti (Na_2SO_4)-liuoksessa ja pH:n säätöön käytettiin natriumhydroksidia (NaOH) eli lipeää. Tulokseksi saatiin, että korroosionopeus pienenee pH:n kasvaessa, kun vaihtovirrantiheys on 0. pH-arvolla 6,4 korroosionopeus oli 0,35mm/vuodessa ja pH-arvolla 11 korroosionopeus oli 0,26mm/vuodessa. Korroosionopeus laski hyvin pieneksi (alle 0,025 mm/vuodessa), kun pH-arvo nousi yli 12 ja 13.

Katja Rouvarin diplomityössä mitattiin kuoriveden vaikutusta kuorimarummun korroosionopeuteen LPR (Linear Polarization Resistance) -mittauksella. Diplomityössä esitetään, että pH:n laskiessa alle kuuden, korroosionopeus kaksinkertaistuu pH:n laskiessa yhden yksikön. (Rouvari 2005, s.102)

Alkaliteetti kuvaa veden puskurointikykyä, eli kykyä neutraloida veteen lisätyt hapot (Oram 2014). Veden alkaliteetti määräytyy sen vetykarbonaatti-, karbonaatti sekä hydroksyyli-ioneista. Vetykarbonaattimäärän ollessa suurempi kuin vapaan hiilidioksidin

määrä, saostuu osa vetykarbonaatista kalsiumkarbonaattina metallin pinnalle suojaavaksi kerrokseksi. Jos vapaan hiilidioksidin määrä on suurempi kuin vetykarbonaatin määrä, suojaavaa kerrosta ei pääse syntymään ja vesi on syövyttävää. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.251)

Veden kovuus kertoo siihen liuenneiden kalsium- ja magnesiumsuolojen määrän. Metallin pinnalle muodostuu korroosiolta suojaava kerros, kun veden kovuus on yli 0,36 mmol/l, vedessä on riittävästi happea ja vedessä ei ole suojaavan kerroksen muodostumisen kannalta haitallisia aineita. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.251)

Veden syövyttävyyttä ja saostamisominaisuuksia voidaan arvioida Langelierin kyllästysindeksillä ja Ryznarin stabiliteetti-indeksillä. Langelierin kyllästysindeksi lasketaan seuraavalla kaavalla (Langelier 1936):

$$LSI = pH - pH_s \quad (13)$$

jossa

LSI on Langelierin kyllästysindeksin arvo

pH on mitattu pH-arvo

pH_s on laskennallinen pH-arvo, kun vesi on tasapainossa kalsiumkarbonaatin kanssa

Langelierin kyllästysindeksi kuvaa veden kalkki-hiilidioksiditasapainoa. Positiivisella LSI-arvolla metallin pinnalle saostuu kalsiumkarbonaattikerrostuma, joka hidastaa hapen diffundoitumista metallin pinnalle. Negatiivisella LSI-arvolla suojaavaa kerrostumaa ei synny metallin pinnalle. (Langelier 1936)

Ryznarin stabiliteetti-indeksi on mittauksiin perustuva menetelmä veden saostumisominaisuuksien arvioimiseen. Ryznarin stabiliteetti-indeksi lasketaan seuraavalla kaavalla (Aromaa & Klarin 1999, s.187):

$$RI = 2 * pH_s - pH \quad (14)$$

jossa

RI on Ryznarin stabiliteetti-indeksin arvo

pH_s ja pH ovat samoja arvoja, kuin kaavassa 13

Larsonin indeksi kuvaa veden syövyttävyyttä hiiliteräksille. Larson ja Skold huomasivat tutkimuksessaan (Larson & Skold 1958), että kloridi- ja sulfaatti-ionien suhde alkaliteettiin vaikuttaa korroosionopeuteen. Larsonin indeksi lasketaan kaavalla:

$$La = \frac{[Cl^-] + [SO_4^{2-}]}{\text{Alkaliteetti}} \quad (15)$$

jossa

La on Larsonin indeksin arvo

$[i]$ on $[i]$:n aineen pitoisuus (mg/l)

Standardin DIN 50930 mukaan piste- ja rakokorroosion todennäköisyyttä voidaan arvioida seuraavalla kaavalla (Kääriäinen 2001 mukaan):

$$S = \frac{c(Cl^-) + 2 * c(SO_4^{2-})}{\text{Alkaliteetti}} \quad (16)$$

jossa

S on todennäköisyys piste- ja rakokorroosion esiintymiselle

$c(i)$ on liuenneiden ionien pitoisuus (mol/m^3)

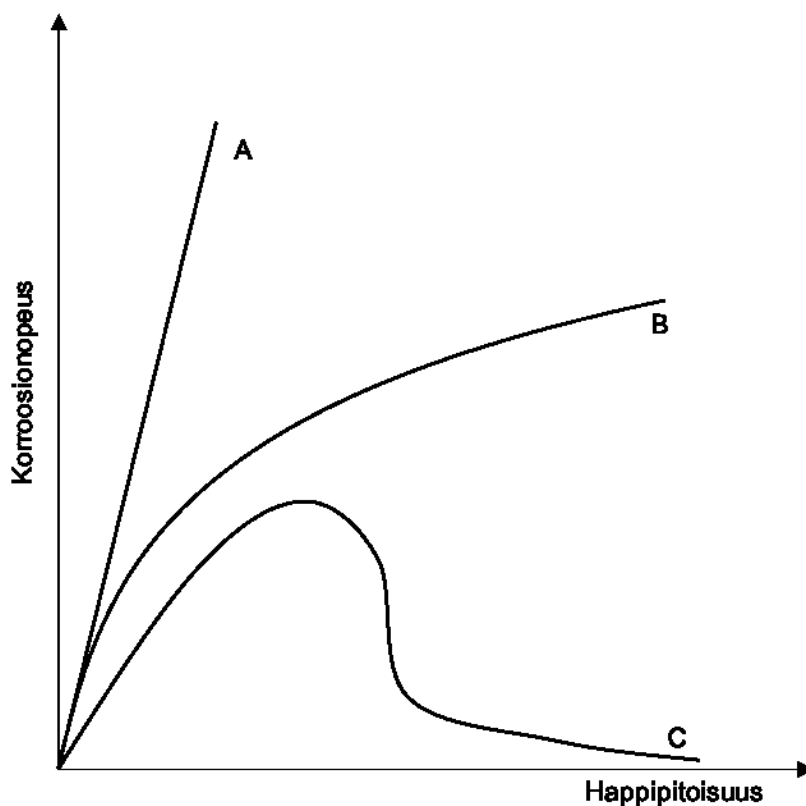
Indeksien laskenta ja raja-arvot ovat esitetty liitteessä 1. Langelierin kyllästysindeksi ja Ryznarin stabiliteetti-indeksit perustuvat kemialliseen tasapainotilaan, joten ne kertovat vain reaktion suunnan, mutta ei sen nopeutta. Larsonin indeksi ja DIN 50930:n mukainen indeksi kuvaavat korroosion mahdollisuutta. Kaikki neljä indeksiä ovat kehitetty arvioidaan korroosion riskiä vesiputkissa tavallisella vesijohtovedellä, joten niiden soveltuvuus teolliseen ympäristöön on kyseenalaista.

Veden lämpötila vaikuttaa monin eri tavoin korroosioreaktioon. Lämpötilan kasvu nopeuttaa korroosioreaktioita, kasvattaa hapen diffuusionopeutta, pienentää hapen liukoisuutta veteen, kasvattaa veden sähkönjohtavuutta, pienentää veden pH:ta, muuttaa suojakalvon muodostumismekanismeja ja ominaisuuksia sekä muuttaa metallien elektrodipotentiaalia. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.255) Aromaa esittää muistisäännön (Aromaa & Klarin 1999, s.191), jonka mukaan veden lämpötilan nousu 30 °C:lla kaksinkertaistaa korroosionopeuden, kun hapen diffuusio on nopeutta määräävä tekijä korroosioreaktiossa. Katja Rouvarin diplomityössä tutkitun kuorimarummun korroosionopeus kasvoi mittauksien mukaan veden lämpötilan noustessa. ”Kun lämpötila nousee, myös korroosionopeus nousee.” (Rouvari 2005, s.102)

Avoimessa systeemissä korroosionopeus kasvaa lämpötilan funktiona n. 80 °C:een asti, jonka jälkeen se alkaa pienetä. Tätä alemmilla lämpötiloilla hapen diffuusionopeuden nousu kompensoi alentunutta liukoisuutta, mutta yli 80 °C:n lämpötiloissa hapen puute

tulee määrääväksi. Veden sähkönjohtavuus kasvaa n. 2% / °C, joka nopeuttaa korroosio-reaktiota ja auttaa paikallisia korroosimuotoja leviämään laajemmalle. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.255)

Veden happipitoisuuden vaikutus korroosionopeuteen riippuu metallin korroosiotuotteiden luonteesta. Passivoituvilla metalleilla veteen liennut happi saa aikaan passivoitumisen ja hidastaa korroosiota, kuten kuvasta 27 käy ilmi. Kuvan 27 metallin A pinnalle ei muodostu suojaavaa kerrosta ja korroosionopeus kasvaa lineaarisesti happipitoisuuden kasvun myötä. Metallin B pinnalle muodostuu huokoinen korroosiota hidastava kerros, joka hidastaa korroosiota. Metallin C pinnalle muodostuu tiivis kerros, joka saa aikaan metallin passivoitumisen. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.251)



Kuva 27. *Happipitoisuuden vaikutus korroosionopeuteen.* (Mukaiillen Kunnossapitoyhdistys 2008, s.252)

5.3.2 Veteen lienneet suolat

Veden suolapitoisuuden kasvu kasvattaa veden sähkönjohtavuutta. Kasvanut sähkönjohtavuus kiihdyttää korroosio-reaktioita ja muuttaa korroosion ilmenemismuotoa. Korroosioalueet ovat lähellä toisiaan ja korroosio muistuttaa yleistä syöpymistä, kun sähkönjohtavuus on heikko. Sähkönjohtavuuden kasvaessa korroosioalueet voivat olla kauempana toisistaan ja korroosio muuttuu paikallisemmaksi. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.252)

Veteen liuenneiden suolojen määrän kasvu nopeuttaa korroosiota tiettyyn pitoisuuteen asti. Esimerkiksi natriumkloridille ($NaCl$) kriittinen väkevyys on n. 3 m⁻%. Liuenneet suolat muodostavat kolme ryhmää. Ensimmäisen ryhmän suolat eivät muodosta veteen liukenemattomia yhdisteitä. Näitä suoloja ovat mm. sulfaattit ja alkalikloridit, kuten natriumkloridi. Toisen ja kolmannen ryhmän suolat muodostavat heikosti liukenevia yhdisteitä anodisille ja katodisille alueille ja toimivat inhibiitteinä niillä alueilla. Anodisen alueen inhibiitteinä toimivat mm. silikaatit ja kromaatit. Katodisen alueen inhibiitteinä toimivat mm. monet sinkin, nikkelin ja kromin suolat. (Aromaa & Klarin 1999, s.185)

Erään tutkimuksen (C. Fatah et al. 2014) mukaan X52-teräksen korroosionopeus vesiliuoksessa, jonka $NaCl$ -pitoisuus on 3 m⁻%, kasvaa sulfiitti (SO_3^{2-}) -pitoisuuden kasvaessa. Tutkimuksessa havaittiin sulfiitin kriittiseksi pitoisuudeksi 400 mg/l, jonka jälkeen sulfiittipitoisuuden kasvu ei enää juurikaan kasvattanut korroosionopeutta. Sulfittipitoisuuden nosto nolasta 200 mg litrassa kasvatti korroosionopeutta 0,4 mm:stä 0,9mm:iin vuodessa.

Rikkiyhdisteet ovat yleisiä sellunvalmistusprosesseissa. Vesiliuoksissa rikillä on monta hapetusastetta. Rikkiyhdisteistä sulfaattilla (SO_4^{2-}) on korkein hapetusaste. Sulfaatti on stabiili yhdiste eikä se ole hapettava tai vaikuta korroosionopeuteen vesiliuoksissa. Sulfitti (SO_3^{2-}) on toiseksi stabiilein rikkiyhdiste ja se on heikko hapetin. Sulfitti (SO_3^{2-}), vetysulfitti (HSO_3^-) ja rikkihapoke (H_2SO_3) ovat sulfittisuolojen hydrolyysituotteita ja vesiliuoksissa ne esiintyvät pH:n määräämällä tavalla. Happamassa liuoksessa rikkihapoketta esiintyy eniten, kun taas emäksisessä liuoksessa sulfittipitoisuus on korkein. (Aromaa & Klarin 1999, s.187)

Vaikka sulfaatti ei suoraan vaikuta korroosionopeuteen, niin sen reaktiotuotteet voivat kiihdyttää korroosiota. Esimerkiksi bakteerien sulfaatista kehittämä rikkivety (H_2S) ja sen hapetus tuote tiosulfaatti ($S_2O_3^{2-}$) aiheuttavat korroosiota. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.313) Rikkivety on reaktiivisin rikkiyhdiste ja korroosiossa se kiihdyttää anodista reaktiota muodostaen metallisulfideja. Tiosulfaatti muodostaa liukoisia metallikomplekseja ja näin heikentää metallin pinnalle muodostuvaa suojaavaa kerrosta. Erityisen vaarallista tiosulfaatti on passivoituville teräksille, kun pienetkin määrät tiosulfaattia ja kloridi-ioneja saavat aikaan paikallisen passivaatiokerroksen rikkoutumisen aiheuttaen pistesyöpymää. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.411)

Ezuber et al. tekemän tutkimuksen (2017) mukaan tiosulfaatin ja kloridin suhteella on suuri vaikutus AISI 316L ruostumattoman teräksen pistesyöpymiseen. Tutkimuksessa teräs upotettiin hiilihapotettuun 3,5 m⁻% $NaCl$ -liuokseen ja mitattiin pistesyöpymäpotentiaalia eri lämpötila- ja tiosulfaattiarvoilla. Tuloksena saatiin, että eniten pistesyöpymää aiheuttava $S_2O_3^{2-} / Cl^-$ -suhde riippuu lämpötilasta. 25 °C:n ja 60 °C:n lämpötilassa suurin vaikutus syntyi, kun suhde oli n. 0,08. 80 °C:n lämpötilassa vastaava suhde oli 0,017.

Tiosulfaatti vaikuttaa myös hiiliteräksen korroosionopeuteen. Tutkimuksen (Kappes et al. 2012) mukaan tiosulfaatti kasvattaa X65 teräksen korroosionopeutta enemmän kuin rikkivety. Tutkimuksessa teräs altistettiin liuokselle, johon oli liotettu natriumkloridia ja jääetikkaa. Liuoksen pH oli 2,7 eli hiiliteräs syöpyy vetyä kehittäen. Tiosulfaattipitoisuuden nosto kiihdytti sekä anodista reaktiota (metallin syöpyminen) että katodista reaktiota (vedyn kehitys). Katodinen reaktio nopeutuu, koska syntyvä rautasulfidi kerrostuma johdattaa hyvin sähköä.

Toisen tutkimuksen (Quan et al. 2016) mukaan Q235 hiiliteräksen korroosionopeus kasvaa huomattavasti sulfidi (S^{2-})- ja tiosulfaatti ($S_2O_3^{2-}$)-ionien läsnä ollessa. Sulfidi ja tiosulfaatti kiihdyttävät korroosiota yksinäänkin, mutta niillä on myös synerginen vaikutus korroosionopeuteen. Tutkimuksessa teräksen korroosionopeutta tutkittiin 55 °C asteisessa NaOH-liuoksessa, jossa mitattu korroosionopeus oli 0,01 mm vuodessa ilman sulfidia tai tiosulfaattia. Sulfidipitoisuuden ollessa yksinään 5 g/l oli korroosionopeus 0,08 mm/v. Tiosulfaattipitoisuuden ollessa yksinään 4 g/l oli korroosionopeus 0,03 mm/v. Kun nämä pitoisuudet yhdistettiin, oli korroosionopeus 0,18 mm vuodessa. Molempien pitoisuuksien ollessa 5 g/l oli korroosionopeus 0,10 mm vuodessa, eli sulfidin ja tiosulfaatin keskinäisellä suhteella on merkitystä korroosionopeuteen ja synergiseen vaikutukseen.

Kloridit ovat suolahapon suoloja ja ne laskevat liuetessaan liuoksen pH:ta. Kloridit itse suoranaisesti osallistuu korroosioreaktioon, mutta ne heikentävät metallia suojaavaa kerrosta. Kloridi-ionit nopeuttavat yleistä syöpymistäkin kasvattamalla liuoksen sähkönjohtavuutta. Passivoituvilla metalleilla kloridi-ionit tunkeutuvat suojakerrokseen korvaten siinä olevan veden ja muodostavat liukenevan metallikompleksin. Näin passiivikerrokseen syntyy aukkoja, joista pistesyöpyminen alkaa. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.408)

Kiinassa tehdyssä tutkimuksessa (Song et al. 2017) tutkittiin kloridipitoisuuden vaikutusta Q235 hiiliteräksen korroosionopeuteen. Tutkimuksessa teräsnäytteet altistettiin kloridipitoiselle kostealle maa-ainekselle yhteensä 12 viikon ajan. Tuloksena saatiin, että 0,015 m-% kloridipitoisuudella keskimääräinen syöpymäkuopan syvyys oli 0,39 mm. 1,015 m-% pitoisuudella keskimääräinen syöpymäkuopan syvyys oli 0,83 mm. Hiiliteräksellä korroosio alkaa pistesyöpymisenä, mutta kloridipitoisuuden noustessa ja altistuksen jatkuessa korroosio leviää koko metallin pintaan alkaen muistuttaa yleistä syöpymistä.

Klorideja ja sulfaatteja on yleensä runsaasti luonnonvesissä. Maailman terveysjärjestö (WHO) on määritellyt juomaveden sulfaatti- ja kloridipitoisuuksien ylärajaksi 200 mg/l (Ranne 2000). UPM:n Pietarsaaren tehtaalle otettavan raakaveden kloridipitoisuus on n. 5 – 10 mg/l ja sulfaattipitoisuus n. 20 – 40 mg/l. Tavoitearvo raakaveden kloridipitoisuudelle on alle 10 mg/l ja sulfaattipitoisuudelle alle 40 mg/l. (Mäntynen & Kalliolinna 2013) Lisää klorideja kuorimon kiertoveteen saattaa kulkeutua puiden mukana teiden suolauksen seurauksena. Talvella teille levitetään natriumkloridia (NaCl) sulattamaan lunta ja

jääta ja kesällä kalsiumkloridia ($CaCl_2$) vähentämään teiden pölyämistä (Koskinen 2014).

Subir Paul (2011) tutki kloridi- ja sulfaattipitoisuuden, pH:n, lämpötilan ja liuenteen hapen vaikutusta niukkahiilisen teräksen korroosionopeuteen simuloitussa merivedessä, luodakseen mallin, jolla voidaan ennustaa korroosionopeutta. Simuloitu merivesi valmistettiin lisäämällä KCl, $CaCl_2$, $NaHCO_3$ ja $MgSO_4$ suoloja tislattuun veteen. Tutkimuksessa onnistuttiin luomaan malli, jolla voidaan ennustaa korroosionopeutta $\pm 10\%$:n tarkkuudella.

Paulin tutkimuksen tuloksista nähdään myös, että kloridipitoisuuden kasvattaminen kasvattaa korroosionopeutta lineaarisesti. Sulfaatti-ionien vaikutus riippuu liuoksen pH:sta. Happamassa liuoksessa sulfaatti-ionit nopeuttavat korroosiota, mutta emäksisessä liuoksessa sulfaatti-ionit hidastavat korroosiota. Liuenteen hapen määrä vaikuttaa myös suuresti korroosionopeuteen. Happipitoisuuden ollessa 1 ppm, korroosionopeus on pientä eikä lämpötilan ja kloridipitoisuuden nousu juurikaan vaikuta korroosionopeuteen. Happipitoisuuden ollessa 10 ppm, korroosionopeus kasvaa voimakkaasti lämpötilan ja kloridipitoisuuden nousun myötä. Lämpötila vaikuttaa kloridipitoisuuden vaikutukseen korroosionopeuteen. Viileämmässä lämpötilassa kloridipitoisuuden nousu vaikuttaa vähemmän korroosionopeuden kasvuun, kuin lämpimämmässä lämpötilassa.

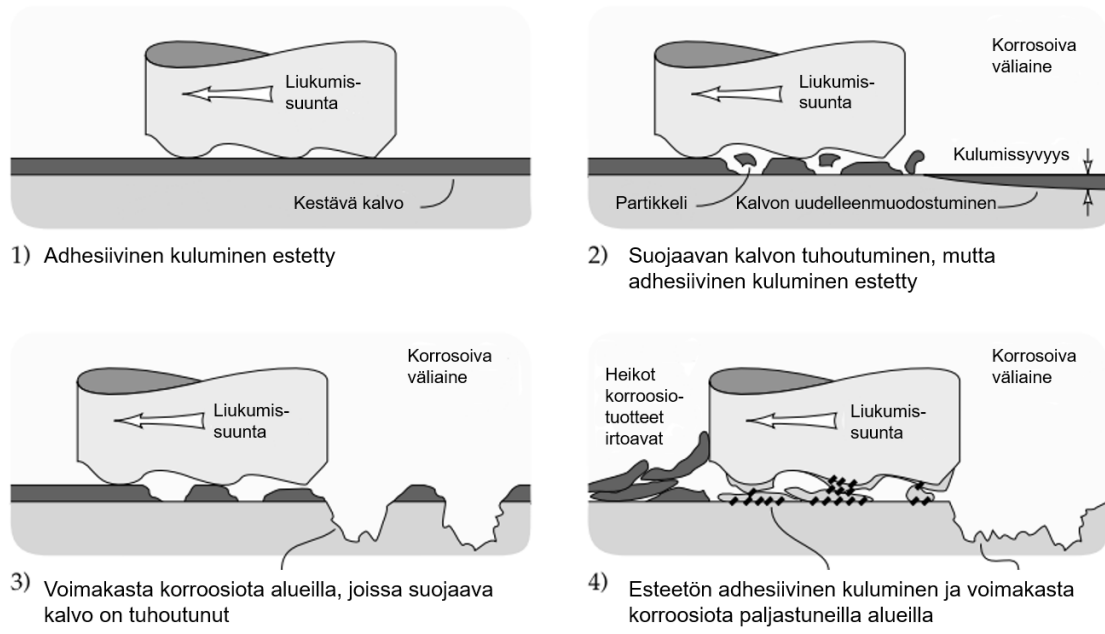
Eri parametrien vaikutus korroosionopeuteen on hyvin monimutkainen ilmiö. Jotkin aineet vaikuttavat keskenään synergisesti, kun taas toiset vaikuttavat keskenään korroosiota hidastaen. Joillain aineilla pitoisuuksien suhteella on suuri merkitys korroosionopeuteen. Lämpötilan ja pH:n vaikutukset monimutkaistavat tilannetta vielä entisestään.

6. TRIBOKEMIALLINEN KULUMINEN

Aiemmissä kappaleissa kulumista ja korroosiota on käsitelty yksittäisinä ilmiöinä irrallaan toisistaan. Käytännön tilanteissa ilmenee yleensä molempia kulumismuotoja ja niiden yhteisvaikutukset monimutkaistavat kulumistilanteen tarkastelua. Mekaanisella kulumisella ja korroosioilla on havaittu olevan synergistisiä vaikutuksia, jolloin mekaaninen kuluminen kiihdyttää korroosiota ja korroosio kiihdyttää mekaanista kulumista.

Kappaleessa 4.1 käsiteltyä adhesiivista kulumista voidaan pitää tribokemiallisena kulumisena, kun kuluminen tapahtuu oksidikalvojen kautta. Tällöin perusmateriaalin kulumisen tapahtuu jatkuvan oksidikalvon muodostuksen kautta, joka on yksi neljästä tribokemiallisen kulumisen muodoista (kuva 28). Muut tribokemiallisen kulumisen muodot ovat (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 598):

- suojaavan ja liukastavan kalvon muodostuminen
- suojakalvon rikkoutuminen mekaanisen kulumisen seurauksena ja nopea korroosio anodisen- ja katodisen alueen pinta-alue-erojen vuoksi
- mekaaninen kuluminen ja korroosio tapahtuvat riippumattomina toisistaan, jolloin kokonaiskuluminen on näiden summa

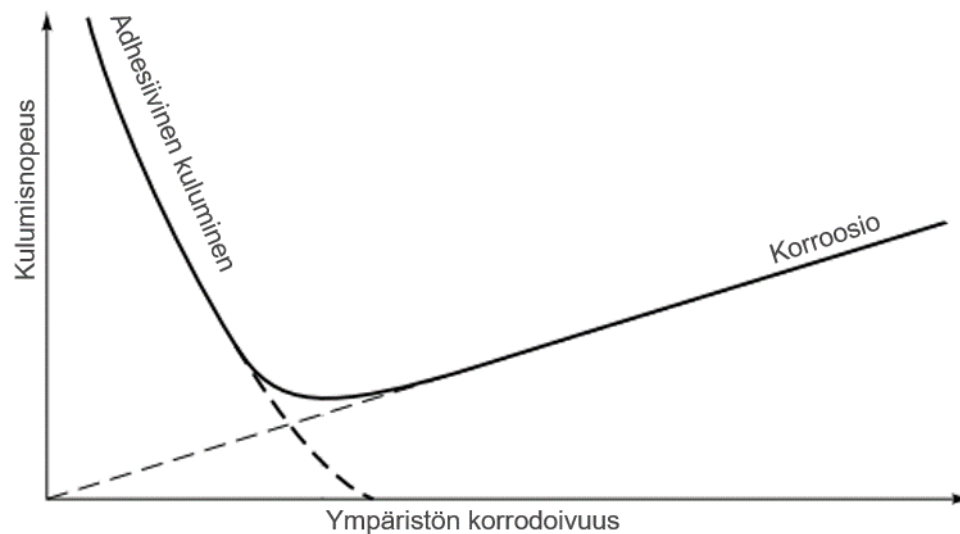


Kuva 28. Tribokemiallisen kulumisen mekanismit. (Muokattu G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 598)

Kuvan 28 ensimmäisessä tapauksessa muodostunut kalvo on tarpeeksi kestävä, jotta se ei rikkoonnu mekaanisen kulutuksen seurauksena eikä tribokemiallista kulumista pääse tapahtumaan. Käytännön tilanteissa tämä on kuitenkin harvinaista. Yleisin tilanne on kuvan

2. tapaus, jossa pinnalle muodostunut kalvo rikkoutuu osittain kulumisen seurauksena. Rikkoutuneille alueille muodostuu uusi suojaava kalvo ja materiaalin kulumisen tapahtuu näin ollen oksidikalvon uudelleenmuodostumisen kautta. Kalvosta irronneet kovat oksidipartikkelit saattavat muuttaa kulumismekanismiin abrasiiviseksi, jolloin kulumisnopeus kasvaa. 3. tapauksessa pinnan kalvo on heikentynyt paikallisen korroosion seurauksena. Mekaaninen kulutus ja paikalliset korroosionmuodot estävät uuden kalvon muodostumisen syntyneisiin kuoppiin ja kulumisnopeus niillä alueilla nousee suureksi. 4. tapaus käsittää erittäin korrosoivat ympäristöt, joissa metallin pinnalle ei muodostu tarpeeksi kestävä kalvoa suojaamaan adhesiiviselta kulumiselta. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 599)

Suojaavan kalvon muodostumiseksi ympäristön tulee olla hieman korrosoiva (vrt. metallin passivoituminen). Ilman suojaavaa kalvoa adhesiivinen kulumisen kuluttaa pintoja nopeasti ja ympäristön aiheuttaessa liian nopeaa korroosiota kasvaa myös kokonaiskulumisnopeus (kts. kuva 29). (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 603) Voiteluaineeseen voidaan lisätä ns. EP-lisäaineita, jotka muodostavat metallin pinnalle korroosiotuotteena suojaavan kalvon ja hidastavat näin adhesiivista kulumista. Tätä käytetään mm. hitaasti pyörivissä vaihdelaatikoissa, joissa nopeus ei riitä täydellisen nestevoitelukalvon muodostumiseen.



Kuva 29. Ympäristön korrodoivuuden vaikutus kokonaiskulumisnopeuteen. (Muokattu G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 603)

6.1 Värähtelykuluminen

Värähtelykulumista (hiertymiskorroosiota, engl. fretting) tapahtuu kahden pinnan värähdellessä toistensa suhteen. ”Värähtelykulumisen mekanismi sisältää kemiallisen tekijän sekä mekaanisen tekijän ja syntyvä vaurio on yleensä molempien tulosta” (Uhlig 1954,

katso Igual Muoz & Espallargas 2011, s. 124). Värähtelykulumista esiintyy yleisesti erilaisten liitosten välissä ja muissa kohteissa joita ei ole tarkoitettu liikkuvaksi, mutta jotka pääsevät esim. löysän kiristyksen vuoksi liikkumaan hieman toistensa suhteen. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s. 114)

Värähtelykulumisen mekanismi muodostuu neljästä eri vaiheesta (Kivioja et al. 2004, s. 117-118):

1. Kuormitettujen pintojen pinnankarheuden huippujen välille syntyy adhesiivisia liitoksia, joiden irti repeytyessä syntyy kulumispartikkeleita
2. Kulumispartikkelit ovat muokkauslujittuneita ja hapettuneita, joten ne toimivat abrasiiveina pintojen välissä
3. Alueet joihin syntyy kulumispartikkeleita kuluvat muita alueita nopeammin
4. Kulumisen alkukohta muodostuu abrasiivisen kulumisen seurauksena puolipallon muotoiseksi ja kulumispartikkelit leviävät laajemmalle alueelle muodostaen uusia kulumiskohtia

Värähtelykulumisen saattaa saada alkunsa myös pintojen oksidikalvojen rikkoutuessa tai väsymiskulumisen seurauksena värähtelevän kuormituksen vuoksi. Tällöin muodostuu irtonaisia kulumispartikkeleita ja kulumismekanismi noudattaa edellä kuvattua. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s. 114)

6.2 Eroosiokuluminen

Eroosiokuluminen on seurausta nesteen tai kiinteiden partikkelien törmäyksestä metallin pintaan. Tyypillisiä kohteita eroosiokulumiselle ovat putkistojen epäjatkuvuuskohteet ja pumppujen juoksupyörät. Nesteen tai partikkelien iskeytymiskulmalla ja nopeudella on suuri merkitys eroosion aiheuttamaan kulumisnopeuteen. Optimaalisin iskeytymiskulma riippuu kuluvan materiaalin ominaisuuksista. (Kivioja et al. 2004, s. 120)

Yleisesti voidaan sanoa, että partikkelien aiheuttama eroosiokuluminen on haurailta materiaaleilla suurinta silloin, kun iskeytymiskulma on kohtisuorassa pintaa vasten. Hauraat materiaalit kuluvat murtumalla ja kohtisuoralla iskeytymiskulmalla partikkeli kohdistaa suurimman iskun kuluvaan pintaan. Sitkeillä materiaaleilla kuluminen on suurinta n. 20 – 30 asteen iskeytymiskulmalla. Tällöin kulumismekanismi muistuttaa abrasiivista kulumista. Kohtisuoralla iskeytymiskulmalla sitkeät materiaalit muovautuvat plastisesti ja muokkauslujittuvat. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 552; Kivioja et al. 2004, s. 120)

Eroosiokulumisen kulumismekanismi riippuu myös kuluttavien partikkelien koosta sekä muodosta. Pienet ja terävät partikkelit leikkaavat materiaalia pois pinnasta, kun taas suuret ja pyöreät partikkelit aiheuttavat pinnan murtumista. Tämän vuoksi materiaalien eroosiivinen kulumiskestävyys riippuu partikkelien koosta ja muodosta (vrt. abrasiivien ominaisuuksien vaikutus abraasiokulumiseen). Esim. karkaistu teräs kestää huonosti pienten

partikkelien eroosiota, mutta hyvin suurten partikkelien eroosiota. Nesteetkin voivat aiheuttaa eroosiokulumista kohdistamalla suuren paineen materiaalin pinnalle. Erittäin suurella törmäysnopeudella nesteen aiheuttama paine ylittää materiaalin myötörajan, joka johtaa kulumiseen. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 555)

Erosio vaikuttaa myös korroosion esiintymiseen. Eroosion aiheuttama kulumisen heikentää tai tuhoaa korroosiolta suojaavan kerroksen metallin pinnalta, jolloin korrosio pääsee syövyttämään metallia tai metalli kuluu kerroksen uudelleenmuodostuksen kautta. Tyypillisiä kohteita eroosiokorroosiolle ovat putkistojen epäjatkuvuuskohdat, kuten mutkat ja haarat, joissa virtausnopeus kasvaa tarpeeksi suureksi. Nesteen joukossa olevat kiinteät partikkelit nopeuttavat eroosiokorroosion muodostumista. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s. 110)

6.3 Kulumisen ja korroosion synergia

Mekaaninen kulumisen saattaa nopeuttaa korroosiota poistamalla metallin pinnalta korroosiolta suojaavan kerroksen, kuten edellä on havainnollistettu. Myös korrosio saattaa nopeuttaa mekaanista kulumista muodostamalla kovia partikkeleita ja muuttamalla metallipinnan ominaisuuksia. Tällöin kokonaiskulumisnopeudesta muodostuu suurempi kuin mekaanisen kulumisen ja korroosion aiheuttamien kulumisnopeuksien summa. Tätä mekaanisen kulumisen ja korroosion välistä synergistä vaikutusta voidaan havainnollistaa seuraavilla kaavoilla (Igual Muoz & Espallargas 2011, s. 122):

$$T = W_0 + C_0 + S_y \quad (17)$$

$$S_y = \Delta C_W + \Delta W_C \quad (18)$$

joissa

T on kokonaismateriaalihäviö

W_0 on pelkästään mekaanisen kulumisen aiheuttama materiaalihäviö

C_0 on pelkästään korroosion aiheuttama materiaalihäviö

S_y on korroosion ja mekaanisen kulumisen välinen synerginen vaikutus

ΔC_W on mekaanisen kulumisen nopeuttama korrosio

ΔW_C on korroosion nopeuttama mekaaninen kulumisen

Synergisen vaikutuksen on todettu vaikuttavan suuresti kokonaismateriaalihäviöön. Eräässä tutkimuksessa (Watson et al. 1995) todettiin synergisen vaikutuksen olevan 24 – 36 % kokonaismateriaalihäviöstä, kun puhtaan korroosion osuuden todettiin olevan 0,1 – 0,5 %. Suurin synerginen vaikutus havaittiin passivoituvalla ruostumattomalla teräksellä.

Korroosio saattaa myös vähentää kokonaismateriaalihäviötä. Eräässä tutkimuksessa (Liu et al. 2015) havaittiin, että rakenneteräksen kokonaiskulumisnopeus on pienempi suolavedessä kuin tislatussa vedessä, vaikka korroosionopeus on suurempi suolavedessä. Tutkijat selittivät ilmiötä korroosion aiheuttamalla muutoksilla metallin pinnalle. Tutkimuksessa mitattu kitkakerroin oli suurin suolavedessä. Toisessa tutkimuksessa (Trausmuth et al. 2015) havaittiin, että pinnalle muodostuvat korroosiotuotteet pienentävät kitkakerointa. Korroosion vaikutus kokonaiskulumisnopeuteen vaikuttaa siis riippuvan muodostuvista korroosiotuotteista.

Mekaanisen kulumisen kulumismekanismeilla on vaikutusta korroosion muodostumiseen. Metallin pintaa suojaava passiivikalvo alkaa heiketä jo kevyelläkin abrasiivisella kuluksella. Kahden kappaleen abraasio heikentää passiivikalvoa nopeammin kuin kolmen kappaleen abraasio. Liukunopeus vaikuttaa korroosioon siten, että suurilla nopeuksilla metalli ei ehdi passivoitua uudelleen kulutuskertojen välillä. Nopealla kulutuksella korroosio on nopeampaa, kuin hitaalla kulutuksella. Eroosiokulumisessa loiva iskeytymiskulma heikentää passiivikalvoa nopeammin kuin kohtisuora. (Salasi et al. 2015)

Tribokemiallisen kulumisen vallitseva kulumismekanismi riippuu mekaanisen kulumisen ja korroosion yksittäisistä kulumisnopeuksista. Kulumisen voidaan ajatella tapahtuvan korroosiotuotekerroksen uudelleenmuodostumisen kautta, jos puhtaan mekaanisen kulumisen aiheuttama kulumisnopeus on pienempi kuin puhtaan korroosion aiheuttama kulumisnopeus. Tällöin materiaalin korroosionkestävyys kyseisessä ympäristössä on määräävä tekijä kokonaiskulumisnopeuden kannalta. Voimakkaasti abrasiivisissa ympäristöissä korroosion vaikutus on merkityksetön. (G. Stachowiak & Batchelor 2013, s. 605)

Myös Ojala totesi väitöskirjassaan ja siihen liittyvässä tutkimuksessa, että voimakkaasti abrasiivisissa ympäristöissä korroosion vaikutus on vähäistä. Tutkimuksessa he tutkivat karkaistujen kulutusterästen eroosiokulutuskkestävyyttä määrässä sorassa. Tutkimuksessa havaittiin, että abrasiivien partikkelikoon ollessa yli 1 – 2 mm oli voimakas abraasio vallitseva kulumismekanismi. Tällöin kulumiskestävyys riippuu lähes lineaarisesti materiaalin kovuudesta eikä testikappaleissa havaittu merkkejä korroosiosta. (Ojala 2017, s. 45; Ojala et al. 2016)

7. KORROOSION JA KULUMISEN ESTO

Auvo Nikulan mukaan (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.160) korroosion torjunta perustuu pitkälti käytännön kokemuksesta saatuun tietoon. Korroosiotapausten ratkaisussa on kuitenkin hyvä tietää korroosion teoreettinen perusta, jotta osataan valita oikea ja taloudellisesti kannattava korroosionestomenetelmä kuhunkin tapaukseen.

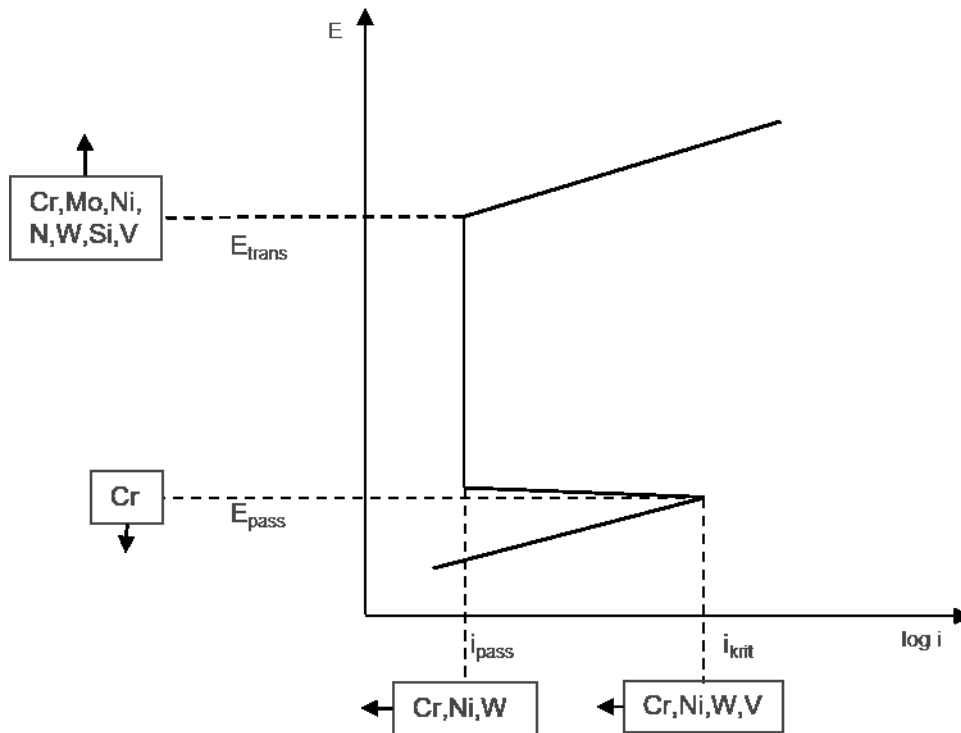
Korroosioreaktiota voidaan hidastaa tai pysäyttää kokonaan vaikuttamalla korroosion perusedellytyksiin. Nämä perusedellytykset ovat (Aromaa & Klarin 1999, s.249):

- Katodinen reaktio
- Anodinen reaktio
- Elektrolyytti
- Elektrodien välinen sähköinen yhteys

Kulumista voidaan ehkäistä valitsemalla käyttökohteeseen olosuhteisiin soveltuva materiaali. Mekaanisen kulumisen kannalta metallin yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on sen kovuus, joka vastaa metallin kykyä vastustaa siihen tunkeutuvaa toista materiaalia. Kovuuden lisäksi sitkeys on tärkeä tekijä metallin kulumiskestävyydessä. Tehokkain keino ehkäistä kulumista on erottaa liukuvat pinnat toisistaan esim. voiteluainekalvolla. Tällöin pintojen pinnankarheuden huiput eivät pääse vaikuttamaan toisiinsa ja pintaan kohdistuva rasitus tapahtuu nesteen välityksellä.

7.1 Materiaalin valinta

Korroosion eston kannalta yksi tärkeimmistä menetelmistä on vallitsevaan korroosioympäristöön sopivan materiaalin valinta. Eri materiaalit reagoivat hyvin eri tavoin saman korroosioympäristön kanssa. Metallien korroosioikätytymistä voidaan muokata halutuksi seostamalla muita lisäaineita metallin joukkoon. Ruostumattoman teräksen tärkein seosaine on kromi, jonka pitoisuus on standardista riippuen n. 16% - 20%. Muita korroosionkeston parantamiseksi käytettäviä seosaineita ovat mm. nikkeli, molybdeeni ja kupari. Molybdeeni suojaa korroosiolta etenkin kloridipitoisissa ympäristöissä. (Aromaa & Klarin 1999, s.262)



Kuva 30. Seosaineiden vaikutus teräksen polarisaatiokäyrään. (Muokattu Aromaa & Klarin 1999, s.270)

Kuvassa 30 on esitetty skemaattisesti eri seosaineiden vaikutus teräksen anodiseen polarisaatiokäyrään. Kuvasta nähdään, että kromi laskee passivoitumispotentiaalia ja nostaa transpassivoitumispotentiaalia, eli teräs pystyy passivoitumaan laajemmalla potentiaali-alueella. Muista seosaineista molybdeeni, nikkeli, typpi, volframi, pii ja vanadiini nostavat myös transpassivoitumispotentiaalia. Kromi laskee myös passivoitumis- ja kriittistä virrantiheyttä.

Metalliseosten korroosiokestävyyttä voidaan vertailla keskenään laskemalla PRE (Pitting Resistance Equivalent) -luku. Kaavassa 19 on esitetty kaava PRE-luvun laskemiseksi austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle. Suurempi PRE-luku tarkoittaa parempaa korroosion kestävyttä. PRE-luku on vain suuntaa antava arvo, koska sen laskennassa ei oteta huomioon korroosioympäristöä. (Koivisto et al. 2006, s. 144)

$$PRE = \%Cr + 3,3 * \%Mo + 16 * \%N \quad (19)$$

jossa

$\%i$ on i :n aineen seostusosuus

Materiaalin valinnassa on tärkeää ottaa huomioon myös taloudellinen puoli. Korroosioympäristöön hyvin soveltuvan materiaalin valinta ei ole järkevää, jos sen hankintakustan-

nukset ovat suuremmat kuin huonomman korroosiokeston omaavan materiaalin elinkaarikustannukset. Heikomman materiaalin syöpyminen tulee kuitenkin olla hallinnassa eikä se saa aiheuttaa vaaraa rakenteen toiminnalle tai ympäristölle. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.163)

Metallit ovat rakenteeltaan kiteisiä. Kiteet alkavat muodostua, kun sulan metallin lämpötila laskee jähmettymislämpötilan alapuolelle. Kiteitä muodostuu ympäri sulaa metallia ja kun kiteet kohtaavat metalli on jähmettynyt kokonaan kiteiseksi rakenteeksi. Kiteistä käytetään myös nimitystä rae ja niiden kokoa kuvataan raekoolla. Kiteen sisällä atomit järjestäytyvät hilan mukaiseen järjestykseen. Puhtaalla raudalla esiintyy pääasiassa kolme eri hilatyyppeä eli se on allotrooppinen. Raudan hilatyypit ovat ferriitti, deltaferriitti sekä austeniitti. (Koivisto et al. 2006, s. 46-50)

Metallien ominaisuudet riippuvat sen hilarakenteesta. Hilarakenteeseen voidaan vaikuttaa lämpökäsittelyillä sekä seostamalla seosaineita raudan sekaan. Teräkset ovat metalleja, joissa rautapitoisuus on vähintään 50% ja hiilipitoisuus välillä 0,03 – 2,0 % (Koivisto et al. 2006, s. 76). Teräksellä esiintyy viittä eri hilarakennetta, jotka ovat: austeniitti, ferriitti, perliitti, bainiitti sekä martensiitti. Lisäksi teräksessä voi esiintyä raudan ja hiilen yhdistettä eli rautakarbidia eli sementtiittiä. (Koivisto et al. 2006, s. 89)

Jokaisella hilarakenteella on sille ominaiset ominaisuudet. Sementtiitti sisältää runsaasti hiiltä ja on melko kovaa, mutta hyvin haurasta. Ferriitti sisältää hyvin vähän hiiltä ja se on yleensä hyvin muovattavaa ja sitkeää, mutta varsin pehmeää. Austeniittiä esiintyy teräksellä korkeissa lämpötiloissa ja se voi sisältää melko runsaasti hiiltä. Jäähdytyksen ollessa riittävän nopea austeniittiin liuennut hiili ei ehdi poistumaan hilarakenteesta ja muodostuu martensiittiä, joka on periaatteessa ferriittiä, jonka hilaan on jäänyt pakkotilaan hiiltä. Hilaan jäänyt, pakkotilassa oleva, hiili tekee martensiitistä kovaa ja tähän perustuu terästen karkaisu. (Koivisto et al. 2006, s. 89-93)

Kulumisen kannalta terästen tulisi olla kovia ja sitkeitä. Tämä on saavutettavissa yleensä pienentämällä teräksen raekoko. Raekoon pienentyessä paranevat mm. seuraavat teräksen ominaisuudet: myötölujuus suurenee, kovuus suurenee ja iskusitkeys paranee. (Koivisto et al. 2006, s. 48)

Raekoko voidaan pienentää lämpökäsittelyillä tai seosaineilla. Lämpökäsittelyistä yksi merkittävimmistä on nuorutus, jossa teräs lämmitetään ensin korkeaan lämpötilaan, jolloin kiderakenne on austeniittinen, ja sen jälkeen päästetään n. 450 – 680 °C lämpötilassa. Tällöin teräksen kiderakenteeksi muodostuu hienorakeinen ferriitti, jossa on tasaisesti jakautuneena pieniä sementtiittisulkeumia. (Koivisto et al. 2006, s. 107)

Hieman samankaltainen lämpökäsittely on normalisointi, jossa teräs lämmitetään korkeaan lämpötilaan ja annetaan jäähtyä ilmassa. Tällöin kiderakenteeksi muodostuu hienorakeinen ferriitti, ferriitti-perliitti tai perliitti. Normalisoitu teräs on hieman pehmeämpää,

kuin nuorrutettu teräs johtuen puuttuvista sementtiittisulkeumista. Teräksen kovuutta voidaan nostaa karkaisulla, jossa teräs lämmitetään jälleen korkeaan lämpötilaan ja jäädytetään hyvin nopeasti, jolloin kiderakenteeksi muodostuu kovaa martensiittia. Karkaistu teräs on kovaa, mutta yleensä hyvin haurasta. Sitkeyttä voidaan hieman parantaa päästämällä karkaistu teräs matalassa lämpötilassa, jolloin sisäiset jännitykset pienenevät. (Koivisto et al. 2006, s. 112, s. 103)

Seosaineet vaikuttavat pääosin muuttamalla terästen kiderakennetta. Oikealla seostuksella esim. austeniittia voi esiintyä huoneenlämmössä, vaikka muuten austeniittia esiintyy vain hyvin korkeissa lämpötiloissa ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kaikki teräkset sisältävät jossain määrin hiiltä, eikä sitä yleensä lasketa seosaineeksi. Hiili vaikuttaa eniten teräksen kovuuteen. Liian suuri hiilimäärä hankaloittaa teräksen hitsausta, sillä hitsauksessa syntyvä martensiitti on haurasta ja sen tilavuus on suuri, jolloin teräs halkeilee. (Koivisto et al. 2006, s. 130-131)

Kromi muodostaa herkästi hiilen kanssa kovia kromikarbideja. Nuorrutusteräksissä kromipitoisuus voi olla jopa 5%. Alumiini estää terästen rakeenkasvua muokkausten yhteydessä. Se vaikuttaa jo hyvin pieninä pitoisuuksina, tyypillinen pitoisuus on n. 0,03 %. Mangaania käytetään terästen valmistusvaiheessa hapen ja rikin haitallisten vaikutusten vähentämiseen. Seosaineena se parantaa runsashiilisten terästen kulumiskestävyyttä ja vähähiilisten terästen lujuutta. Runsaasti mangaania sisältävät teräkset ovat austeniittisia, jotka muokkauslujittuvat voimakkaasti iskumaisesta kuormituksesta muodostaen martensiittia. Tällaisia teräksiä ovat ns. Hadfieldin mangaaniteräkset. (Koivisto et al. 2006, s. 132-133)

Molybdeeni on kallis seosaine ja sitä käytetään yleensä yhdessä kromin kanssa. Molybdeeni vähentää teräksen päästöaurautta jonka vuoksi sitä käytetään yleisesti nuorrutusteräksissä. Nikkeli parantaa teräksen sitkeyttä ja lisää lievästi karkaisusyvyyttä. Vanadiini, titaani ja niobi ovat mikroseosaineita, joita käytetään pieniä määriä lisäämään teräksen lujuutta sekä pienentämään rae kokoa. Boori lisää erittäin tehokkaasti teräksen karkenevuutta. Boorin seostuspitoisuus on tyypillisesti alle 0,005 %. (Koivisto et al. 2006, s. 133-134)

7.2 Inhibiitit

Inhibiitit ovat yhdisteitä, jotka hidastavat pieninäkin pitoisuuksina metallien korroosiota. Inhibiitit voivat hidastaa korroosiota toimimalla hapettajina, muodostamalla kalvon metallin pintaan tai adsorboitumalla metallin pinnalle. Inhibiitin valinnassa on tärkeää valita materiaalille sopiva inhibiitti. Väärän inhibiitin käyttö ei välttämättä vaikuta materiaalin korroosioon ollenkaan tai voi jopa nopeuttaa korroosiota. Inhibiittien toimintaan vaikuttavat myös veden aggressiivisten ionien pitoisuus ja lämpötila sekä metallipinnan luonne. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.788)

Aggressiiviset ionit haittaavat inhibiittien toimintaa ja ionipitoisuuden noustessa nousee myös vaadittava inhibiittipitoisuus. Lämpötilan vaikutus on päinvastainen, sillä lämpötilan nousu nopeuttaa kemiallisia reaktioita ja näin edesauttaa inhibiittien toimintaa. Metallin pinnan epätasaisuus nostaa vaadittavaa inhibiittipitoisuutta. Inhibiittipitoisuuden tulee olla tietyllä välillä, jotta korrosio hidastuisi. Edellä mainittujen tekijöiden ja muiden muuttujien vuoksi oikean inhibiittipitoisuuden löytäminen on käytännössä vaikeaa. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.791) Taulukossa 2 on esitetty eri inhibiittien soveltuvuus eri materiaaleille.

Taulukko 2. Eri inhibiittien vaikutus eri metalleihin. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.789)

Metalli	Inhibiitti						
	Kromaatit	Nitriitit	Bentsoaatit	Boraatit	Fosfaatit	Silikaatit	Tanniinit
Hiiliteräs	<i>tehokas</i>	<i>tehokas</i>	<i>tehokas</i>	<i>tehokas</i>	<i>tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>
Valurauta	<i>tehokas</i>	<i>tehokas</i>	<i>tehoton</i>	<i>vaihteleva</i>	<i>tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>
Sinkki ja sinkkiseokset	<i>tehokas</i>	<i>tehoton</i>	<i>tehoton</i>	<i>tehokas</i>	---	<i>kohtalaisen tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>
Kupari ja kupariseokset	<i>tehokas</i>	<i>osittain tehokas</i>	<i>osittain tehokas</i>	<i>tehokas</i>	<i>tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>
Alumiini ja alumiiniseokset	<i>tehokas</i>	<i>osittain tehokas</i>	<i>osittain tehokas</i>	<i>vaihteleva</i>	<i>vaihteleva</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>
Lyijy-tina juotokset	---	<i>aggressiivinen</i>	<i>tehokas</i>	---	---	<i>kohtalaisen tehokas</i>	<i>kohtalaisen tehokas</i>

Katja Rouvari tutki diplomityössään (2005) kuorimon kuorimarummun korroosiota. Diplomityössä todetaan, että parhaiten kuorimon kiertoveteen soveltuu fosfaattipohjainen inhibiitti. Diplomityön kohteena ollut kuorimarumpu oli valmistettu S355-rakenneteräksestä. Lisäämällä 10mg fosfaattipohjaista inhibiittiä voitaisiin korroosionopeutta laskea 30 – 50%. Diplomityössä kuitenkin todetaan myös, että fosfaattipohjaiset inhibiitit haittaavat jätevedenpuhdistamon toimintaa ja täten lisäävät päästöjä ympäristöön. Inhibiittien vaikutusta korroosioon ei testattu diplomityössä.

7.3 Sähkökemiallinen suojaus

Sähkökemiallisen suojauksen periaatteena on hidastaa korroosioreaktiota sähkövirran avulla. Sähkövirta voidaan tuottaa joko ulkoisen virtalähteen avulla tai käyttämällä uhrautuvaa metallia, joka korrodoituu ja syöttää sähkövirtaa. Sähkökemiallisen suojaus voidaan toteuttaa anodisesti tai katodisesti. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.796)

Anodisen suojauksen periaatteena on avustaa metallin passivoitumista. Tämän vuoksi sitä voidaan käyttää vain metalleilla, jotka passivoituvat korroosioympäristössä. Anodisessa suojauksessa polarisoidaan metallia anodiseen suuntaan, eli kiihdytetään sen korroosiota, joka saa aikaan passiivikerroksen metallin pinnalle. Anodinen suojaus pyrkii aktiivisesti ylläpitämään metallin passiivikerrosta. Passiivikerroksen heikentyessä tai rikkoutuessa jollain alueella, sen alueen sähköjohtavuus elektrolyyttiin paranee, jolloin sähkövirta kulkeutuu alueelle ja passivoittaa alueen uudelleen. (Aromaa & Klarin 1999, s.317)

Anodisessa suojauksessa sähkövirta tuotetaan ulkoisen virtalähteen avulla. Anodista suojausta käytettäessä suojattava rakenne on eristettävä muista rakenteista, jotta hajavirta ei aiheuta korroosiota muissa rakenteissa. Ulkoisen virtalähteen tai kaapeloinnin pettäessä korroosionopeus suojattavassa rakenteessa saattaa nousta suureksi, koska potentiaali siirtyy aktiiviselle alueelle. Virran jakaminen tasaisesti koko suojattavalle alueelle on anodisen suojauksen suurimpia haasteita. (Aromaa & Klarin 1999, s.317)

Anodinen suojaus on melko uusi keksintö, sillä anodista suojausta pidettiin mahdottomana vielä 1900-luvun puoleen väliin asti. (Aromaa & Klarin 1999, s.316) Markku Ainalin mukaan (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.799) teollisuudesta löytyy lähes päivittäin uusia kohteita, joissa voidaan käyttää anodista suojausta. Selluteollisuudessa anodista suojausta on käytetty mm. erilaisissa säiliöissä, venttiileissä ja putkistoissa.

Katodista suojausta on käytetty paljon kauemmin kuin anodista suojausta. Katodisessa suojauksessa periaatteena on kumota korroosioreaktiosta syntyvä sähkövirta syöttämällä vastakkaisuuntaista virtaa korroosiopiiriin. Sähkövirta voidaan syöttää ulkoisen virtalähteen avulla tai käyttämällä uhrautuvaa anodia. Ulkoisen sähkövirran avulla voidaan tyydyttää katodisen reaktion virrantarve, jolloin normaalisti anodiksi muodostuvan alueen liukeneminen ja elektronien luovuttaminen hidastuvat. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.796)

Volkan Cicekin mukaan (2013, s.131) katodinen suojaus on yksi tehokkaimmista menetelmistä korroosion estoon, ja sitä voidaan käyttää kaikkien korroosionmuotojen ehkäisyyn. Katodista suojausta käytetään yleensä yhdessä pinnoitteiden kanssa. Metallipinnan pinnoittaminen suojaa metallia korroosioympäristöltä ja pienentää tarvittavan suojavirran määrää. Pinnoitteen rikkoutuessa tai heikentyessä suojavirta hakeutuu vauriokohtiin estäen korroosion muodostumista. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.796)

Galvaanista korroosiota voidaan käyttää hyväksi tuottamalla katodiseen suojaukseen tarvittava sähkövirta uhrautuvan anodin avulla. Uhrautuvan anodin tulee olla epäjalompaa kuin suojattavan metallin, jolloin syntyy korroosiopari, jossa uhrautuva anodi syöpyy ja suojattava metalli pysyy syöpymättömänä. Tyypillisiä tilanteita, joissa käytetään uhrautuvaa anodia ovat mm. laivojen pohjassa käytettävät sinkkianodit ja rautanaulan sinkitseminen. (McCafferty 2010, s.80)

Tommi Kääriäinen totesi diplomityössään, että sulatuskuljettimissa ei voida käyttää sähkökemiallista suojausta. Sähkökemiallinen suojaus vaatii elektrolyyttisen yhteyden suojattavan kohteen ja vastaelektrodin välille, joka ei ole Kääriäisen mukaan mahdollista sulatuskuljettimessa. (Kääriäinen 2001, s.167)

7.4 Pinnoitteet

Pinnoitteiden avulla metalleja voidaan käyttää ympäristöissä, joissa ne eivät muuten kestäisi. Suojapinnoitteiden ominaisuuksien ja niiden toteutuksen hallitseminen on tärkeää, koska muuten on vaarana, että suojapinnoite repeytyy irti suojattavasta materiaalista. Pinnoittamisen yhteydessä voidaan käyttää pinnoitteen alla välikerroksia, joilla parannetaan pinnoitteen tarttumista, tasoitetaan lämpölaajenemiseroja tai suojataan perusmateriaalia korroosiolta. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.163)

Pinnoite voi estää korroosiota kolmella tavalla: eristämällä perusmateriaalin fyysisesti korroosioympäristöstä, toimimalla uhrautuvana materiaalina tai toimimalla inhibiittinä. Korroosioympäristöstä eristävän pinnoitteen täytyy peittää koko suojattava alue ja, jos pinnoite rikkoutuu, pääsee korroosio syövyttämään metallia. Uhrautuvan pinnoitteen rikkoutuessa, pinnoite suojaa metallia korroosiolta samaan tapaan kuin uhrautuva anodi sähkökemiallisessa suojauksessa. Inhibiittisiä pinnoituksia, kuten mm. öljyt ja rasvat, käytetään väliaikaiseen suojaukseen. (Aromaa & Klarin 1999, s.286)

Pinnoitteiden avulla voidaan parantaa myös metallien kulutuskestävyyttä. Nitraus on teollisuudessa yleinen tapa lisätä metallin kovuutta ja kulutuskestävyyttä sekä parantaa korroosionkestävyyttä. Plasmanitraus tehdään tyhjiökammiossa, jossa on typpikaasua. Kammiion ja kappaleen välille kytketään jännite, jonka johdosta metallin pinnalla olevat typpiatomit ionisoituvat ja muodostavat rautanitridejä. (Huth 2011, s. 286) Tutkimuksen mukaan tunnin kestävä plasmanitraus antaa Hardoxille tehokkaimman suojan korroosiota ja kulumista vastaan, mutta tällöin nitridipinnan paksuus on vain n. 20 µm. (Hacısalıhoğlu et al. 2018)

Sulatuskuljettimen pohjan pinnoituksessa pinnoitteen paksuuden tulisi olla useita millimetrejä. Kaupallisista menetelmistä tällaisiin paksuuksiin yltävät terminen ruiskutus ja hitsauspinnoitus. Termisesti ruiskutetuilla pinnoitteillakin paksuus on tyypillisesti välillä 0,1 – 1 mm. Termisesti ruiskutetut pinnoitteet ovat tyypillisesti hieman huokoisia ja si-

sältävät virheitä, joiden kautta neste pääsee pinnoitteen ja perusmateriaalin väliin aiheuttamaan korroosiota, joka johtaa pinnoitteen irtoamiseen. HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) -ruiskutuksella pinnoitteesta saadaan tiivis, jolloin sen kulumis- ja korroosiokestävyys ovat erinomaisia. (Varis & Vuoristo 2015)

HVOF-ruiskutuksessa pinnoitusmateriaali syötetään jauheena polttokammioon, jossa jauhe sulaa tai lämpenee lähelle sulamispistettä ja poistuu kammioista palokaasujen mukana suurella nopeudella. HVOF-menetelmällä voidaan käyttää pinnoitusmateriaalina lähes mitä tahansa. Tyypillisesti korroosion- ja kulumisen keston parantamiseksi pinnoitusmateriaalina on käytetty kovia oksidipinnoitteita tai keraamikomposiitteja, joissa kovat partikkelit sidotaan yhteen korroosiota kestäväällä metallilla. Kromikarbideja sisältävien pinnoitteiden on todettu olevan sitkeitä eivätkä ne murru herkästi. (Wood & Wharton 2011) Kromikarbidipinnoitteet ovat melko kovia n. 600 – 1100 HV (vastaa n. 500 – 1000 HB) ja tyypillinen pinnoitteen paksuus on n. 0,1 – 0,7 mm. (Varis & Vuoristo 2015)

VTT:n tekemässä tutkimuksessa tutkittiin keraamipinnoitteiden valmistusta HVOF-ruiskutusmenetelmällä. Tutkimuksessa tehtyjen eroosiokorroosiokeiden tuloksena havaittiin, että keraamipinnoitteet kestävät eroosiokorroosiota huomattavasti huonommin kuin AISI 316 L ruostumaton teräs. Happamissa olosuhteissa kuluminen oli nopeampaa, kuin emäksisissä olosuhteissa, mutta kauttaaltaan nopeampaa kuin ruostumattomalla teräksellä. Pinnoitteet myös irtosivat herkästi pohjamateriaalista. (Korpiola & Jokinen 2000, s. 58-59)

Hitsauspinnoituksessa pinnoitemateriaali sulatetaan perusmateriaalin päälle sähkövirralla tai laserilla. Perusmateriaalin ja pinnoitteen välille syntyy sulaliitos, joten pinnoite pysyy hyvin kiinni perusmateriaalissa. Hitsauspinnoituksella on mahdollista tehdä useiden millien paksuisia pinnoituksia. Tyypillisesti pinnoitusmateriaalina käytetään metalleja ja niiden sekoituksia. (Keltamäki 2013) ESAB:n Korjaushitsauskäsikirjan mukaan kohteeseen, jossa kulumistyyppi on ”metalli metallia vastaan + korroosio” soveltuu mm. OK Tubrodur 15.73, jossa hitsiaine on 13 % Cr-seosteista martensiittista ruostumatonta terästä. (ESAB Oy, n.d.)

Pinnoitetutkimuksen uusimpia saavutuksia ovat ns. nanokomposiitti pinnoitteet. Nanokomposiitti pinnoitteet voivat olla erittäin kovia, kovuus jopa yli 40 GPa (timantin kovuus on n. 100 GPa), sekä samaan aikaan sitkeitä ja taipuisia. (Musil 2015) Tutkimuksissa on osoitettu, että hiilipohjaisilla nanokomposiitti pinnoitteilla on ylivoimaiset tribologiset ominaisuudet verrattuna aiempiin pinnoitteisiin, jopa hyvin suurilla pintapaineilla. Tällaiset pinnoitteet ovat hyvin ohuita, paksuus nanometriluokkaa. Käyttökohteina ovat mm. autoteollisuuden komponentit, joissa on suuri pintapaine. (Khadem et al. 2016)

8. SULATUSKULJETTIMIEN NYKYTILA-ANALYYSI

Sulatuskuljettimien tutkiminen aloitettiin keräämällä lähtötietoja kaikista kuudesta kuljettimesta. Diplomityön aikana käytiin tutkimassa Pietarsaaren kuljettimien kulumisjälkiä useita kertoja sekä vierailtiin Kaukaan ja Kymin tehtailla. Vierailuiden aikana keskusteltiin tehtaiden henkilöstön kanssa sulatuskuljettimien ongelmista ja kulumisesta sekä niihin vaikuttavista tekijöistä. Kaukaalla pidettiin pienimuotoinen osastoseisokki, jolloin päästiin tutkimaan kuljettimien kulumisjälkiä. Kymillä osastoseisokkia ei voitu pitää tuotannollisista syistä.

Tämän diplomityön tutkimuksen kohteena ovat UPM:n Pietarsaaren, Kymin ja Kaukaan sellutehtailla olevat sulatuskuljettimet. Sulatuskuljettimia on kaikilla kolmella tehtaalla 2kpl/tehdas, eli yhteensä 6kpl. Pietarsaassa kuljettimet ovat otettu käyttöön vuosina 2009 ja 2010, Kymillä vuosina 1989 ja 2015 sekä Kaukaalla vuosina 1996 ja 2016. Kuljettimista 4kpl on Raumasterin valmistamia, 1kpl BMH Wood Technologyn valmistama ja 1kpl Rauma-Repolan valmistama.

Ketjuina kaikissa kuljettimissa on käytetty M630-A-250 -tyypin ketjuja. Ketju on SFS 2380 -standardin mukainen, jolla murtolujuus on 630 kN ja jako on 250mm. A tarkoittaa, että ketjussa ei ole rullia. (SFS 2380) Ketjujen valmistajat ja käytetyt materiaalit sekä lämpökäsittelyt vaihtelevat tehtaiden välillä.

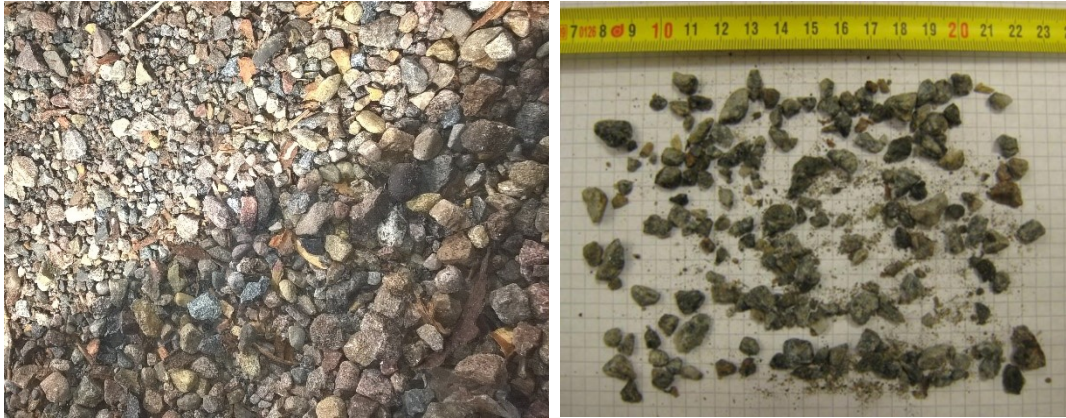
Suomessa sellun valmistukseen käytetään pääasiassa havupuuta (mänty ja kuusi) ja koivua. Pietarsaassa 2. kuljettimella ajetaan pelkästään havupuuta, 1. kuljettimella ajetaan sekä havua, että koivua. Kymillä 1. kuljettimella ajetaan molempia puulajeja, 2. kuljettimella ajetaan pelkästään koivua. Kaukaalla 1. kuljettimella ajetaan pelkästään koivua ja 2. kuljettimella ajetaan pelkästään havupuuta. Havupuun mukana on todettu tulevan enemmän hiekkaa ja kiviä kuljettimelle, kuin koivun mukana. Myös Rouvari totesi diplomityössään (2005), ”Erityisesti kuusen kuorella on paljon hiekkaa ja soraa”.

Tehtaille tulevan puun määrä ja toimitustapa jakautuu taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Tehtaille tulevan puun määrä ja toimitustapa.

Tehdas	Puulaji	Määrä	Toimitustavat
Pietarsaari	Koivu	868 212 k-m ³	66% autolla 33% junalla
	Havu	2 407 647 k-m ³	66% autolla 33% junalla
Kymi	Koivu	2 008 218 k-m ³	40 % autolla 60 % junalla
	Havu	1 018 400 k-m ³	60 % autolla 40 % junalla
Kaukas	Koivu	970 000 k-m ³	34,8 % autolla 44 % junalla 21,2 % laivalla
	Havu	1 014 473 k-m ³	26 % autolla 50,1 % junalla 7,4 % laivalla 16,4 % uitettuna

Puiden likaantuminen alkaa heti niiden kaatamisen jälkeen, kun puut varastoidaan metsäteiden varsille. Varsinkin talvella puiden pintaan jäätyy kiviä ja hiekkaa, jotka kulkeutuvat puiden mukana sellutehtaalle ja sulatuskuljettimelle (kuva 31). Rekalla tuotuna, puihin tarttuu tiestä pölyävää hiekkaa sekä jään- ja pölyämisen estoon käytettäviä suoloja. Nämä lisäävät hiekan kulkeutumista sulatuskuljettimelle sekä saattavat nostaa sulatusveden kloridipitoisuutta. Muilla tavoilla tuotuna, puiden voidaan olettaa olevan puhtaampia ja uitettuna kaikista puhtaampia. Myös tehtaan oman puukentän liukkauden torjunnassa käytetyn hiekoituksen on todettu kulkeutuvan puiden mukana sulatuskuljettimiin. Pietarsaassa liukkauden torjuntaan käytettiin aiemmin karkeaa mursketta, jonka todettiin kulkeutuvan sulatuskuljettimiin ja aiheuttavan voimakasta kulumista. Kymillä ja Kaukaalla liukkauden torjuntaan käytetään mursketta, mutta näillä tehtailla sen ei ole todettu aiheuttavan ongelmia. Puukentät ovat kaikilla tehtailla asfaltoituja.



Kuva 31. Sulatuskuljettimelle puiden mukana tulevia kiviä.

Tehtaiden henkilöstön mukaan sulatuskuljettimien pahimmat ongelmakohdat ovat lueteltu taulukossa 4.

Taulukko 4. Tehtaiden henkilöstön mukaan kuljettimien pahimmat ongelmakohdat.

Pietarsaari	<ul style="list-style-type: none"> • Uudemmallalla kuljettimella vetopäässä alapohjan nopea kuluminen • Molemmilla kuljettimilla yläpohjan ja laitalevyjen kuluminen
Kymi	<ul style="list-style-type: none"> • Ylä- ja alapohjan nopea kuluminen. • Tuotantokapasiteettia nostaneen projektin myötä muuttuneen sulatusveden kemiallisen koostumuksen aiheuttama nopea kuluminen • Ketjuissa ei ole havaittu suurempia ongelmia • Molemmilla kuljettimilla samat ongelmat
Kaukas	<ul style="list-style-type: none"> • Vanhemmalla kuljettimella rakennemateriaalin huono kunto alapohjassa • Vanhemmalla kuljettimella laitalevyt ovat paikoitelleen kulumineet puhki • Uudemmallalla kuljettimella ei ole havaittu ongelmia

Seuraavissa kappaleissa käydään tarkemmin läpi sulatuskuljettimista kerättyjä tietoja sekä niiden vaikutusta kulumiseen.

8.1 Sulatuskuljettimien kunnossapito

Kaikkien sulatuskuljettimien kunnossapito koostuu tällä hetkellä pääasiassa korjaavasta kunnossapidosta, eli korjataan vikoja silloin, kun niitä ilmaantuu. Pietarsaareissa ja Kau-

kaalla on kahden viikon välein päivän mittaisia kuorimon osastoseisokkeja, jolloin tehdään korjaavia toimenpiteitä ja visuaalisia tarkastuksia. Kymillä säännöllisiä osastoseisokkeja ei ole, vaan seisokki suunnitellaan pidettäväksi, kun havaitaan korjattava kohde.

Sulatuskuljettimien ketjuille ja pohjalevyille ei ole viime vuosien aikana tehty säännöllisiä paksuusmittauksia, lukuun ottamatta Kaukaan uudempaa kuljetinta. Kuljetin on mitattu kaksi kertaa n. kahden vuoden käyttöajan aikana. Mittauksista kerrotaan tarkemmin luvussa 8.7.

Ketjun holkissa on reikä, jonka kautta rasvaa voidaan ruiskuttaa holkin ja tapin väliin vähentämään kulumista ja korroosiota. Uudet ketjut toimitetaan yleensä rasvattuina tehtaalta, mutta jälkivoiteluja ei ole suoritettu minkään kuljettimen ketjuille.

Kuljettimien katossa olevat vesisuuttimet tukkeutuvat helposti puista irtoavista roskista ja ilman säännöllistä puhdistusta veden suihkutus häiriintyy. Suuttimet ovat mahdollista puhdistaa yläkautta kuljettimen päällä olevalta hoitotasolta. Vesisuuttimien, kuten muidenkaan kuluvien kohteiden, ennakkohuoltaminen käynnin aikana ei ole mahdollista. Vesisuuttimien puhdistaminen kuuluu Pietarsaaren kuljettimille osastoseisokeissa tehtävään ennakkohuoltoon.

Pietarsaaren kuljettimille on kaksi huoltosuunnitelmaa SAP-toiminnanohjausjärjestelmässä. 4 viikon välein suoritettava kuljettimen tarkastus ja 52 viikon välein suoritettava kuljettimen pohjan paksuusmittaus. Paksuusmittauksia ei ole viime vuosina kuitenkaan suoritettu. 4 viikon välein suoritettavaan kuljettimen tarkastukseen kuuluu seuraavat toimenpiteet:

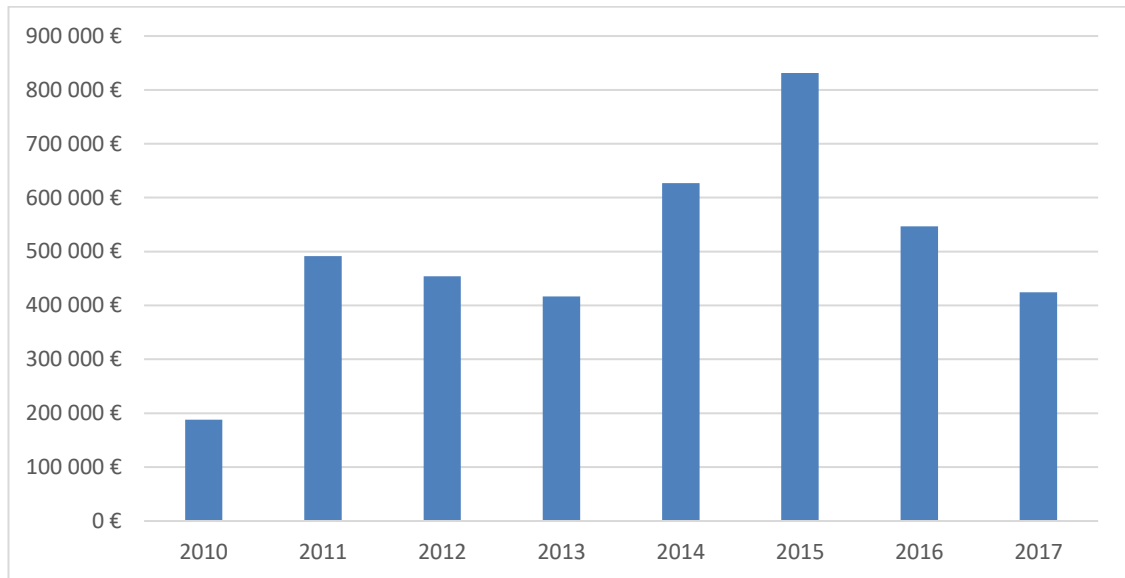
- Kuljettimen visuaalinen tarkastus
- Ketjun murtumien ja vääntymien tarkastus
- Pohja- ja laitalevyjen vahinkojen tarkastus
- Sulatusvesisuuttimien puhdistus

Kymin kuljettimille on yksi huoltosuunnitelma SAP:ssa. Uudemmalle kuljettimelle 6 kk:n välein suoritettava ja vanhemmalle kuljettimelle 12 kk:n välein suoritettava kuljettimen tarkastus. Tarkastukset koostuvat kuljettimen ja siihen liittyvien laitteiden visuaalisista tarkastuksista. Kaukaalla molemmille kuljettimille on 12 kk:n välein suoritettava kuljettimen tarkastus, johon kuuluu vastaavia toimenpiteitä, kuin Kymin huoltosuunnitelmissa.

8.2 Kunnossapitotyöt ja syntyvät kustannukset

Kuvissa 32 – 35 on esitetty SAP:sta kerätyt tiedot suoritetuista kunnossapitotöistä ja toteutuneista kunnossapitokustannuksista kaikkien kuljettimien osalta. Tiedot ovat vuosilta

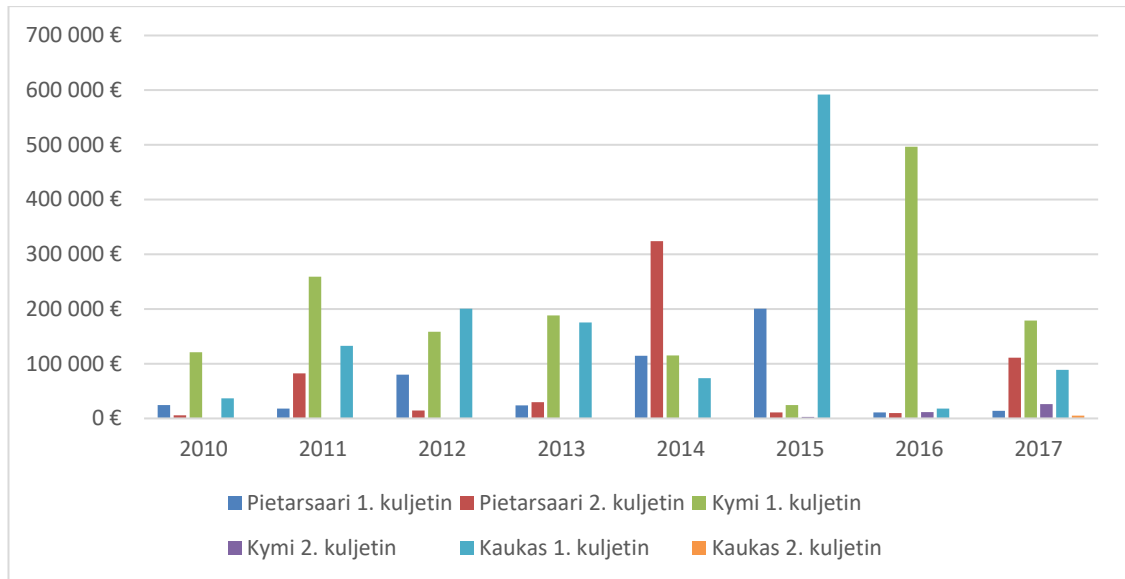
2010 – 2017. Pietarsaaren 1. kuljetin otettiin käyttöön vuonna 2010, Kymin 2. kuljetin vuonna 2015 ja Kaukaan 2. kuljetin vuonna 2016. Näin ollen kaikkien vuosien osalta ei ole kaikkien kuuden kuljettimen tietoja.



Kuva 32. Vuotuiset toteutuneet kunnossapitokustannukset nykyisten kuljettimien osalta.

Kuvassa 32 on esitetty kaikkien käytössä olleiden sulatuskuljettimien toteutuneet kustannukset vuosittain. Kuvasta nähdään, että kustannukset vaihtelevat melko paljon. Vuoden 2013 ja 2015 kunnossapitokustannuksissa on eroa n. 400 000€. Vuonna 2010 kustannukset olivat pienet, mutta silloin oli käytössä vain kolme nykyistä kuljetinta koko vuoden.

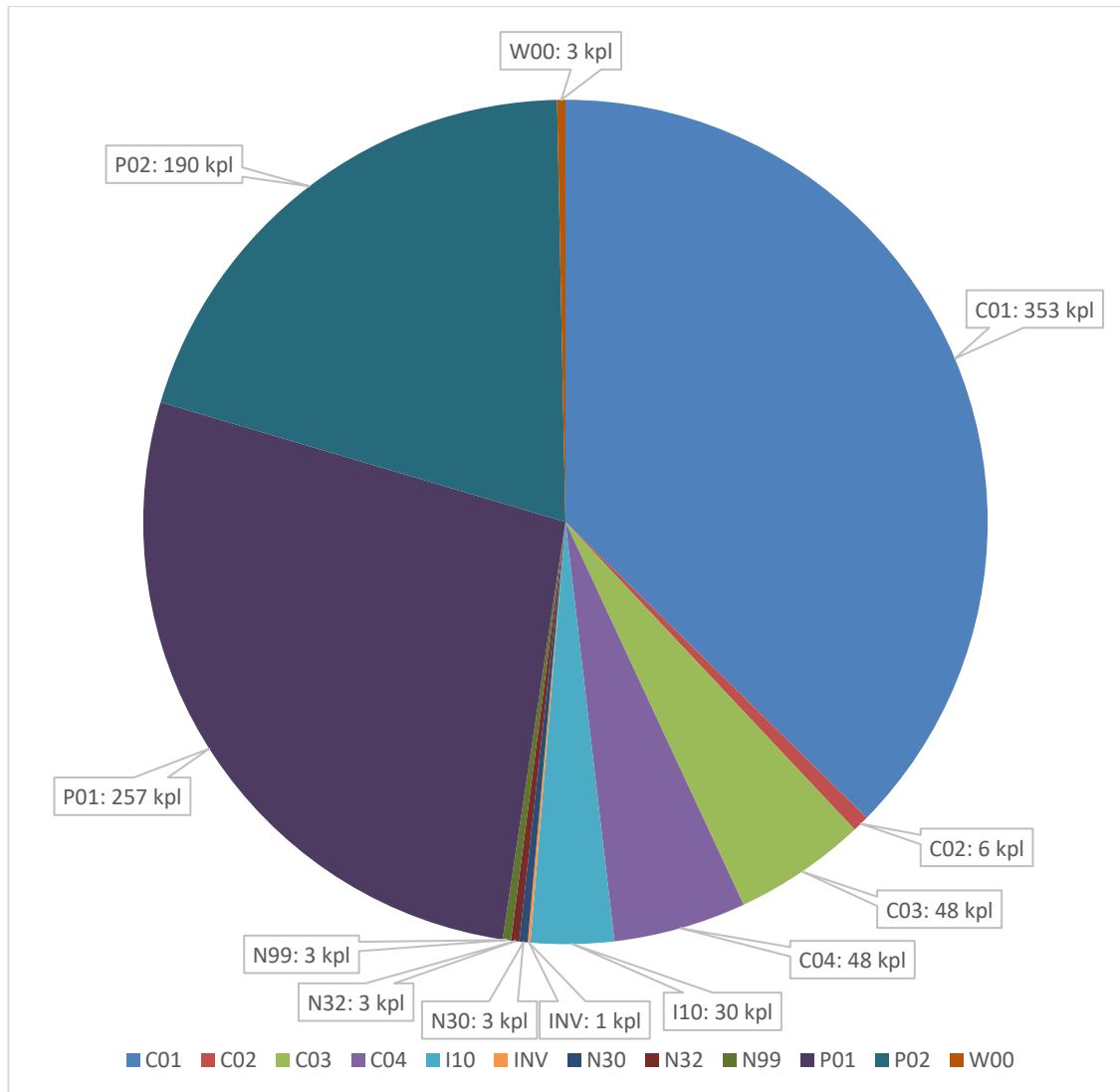
Kuvassa 33 vuotuiset kunnossapitokustannukset ovat jaoteltu kuljetinkohtaisesti. Kuvasta on havaittavissa kustannusten jaksottaisuus. Kustannuksiin syntyy luonnollisesti piikki silloin, kun tehdään suuria korjaustöitä.



Kuva 33. Kuljetinkohtaiset vuotuiset toteutuneet kunnossapitokustannukset.

Kuvassa 34 kaikki suoritettut työt ovat jaoteltu kunnossapidon toimintolajeittain. Kunnossapidon toimintalajien koodien selitykset ovat nähtävissä taulukossa 5. Kuvasta voidaan havaita, että suurin osa suoritetuista töistä on joko korjaavaa kunnossapitoa, ennakkohuoltoa tai ennakoivaa huoltoa.

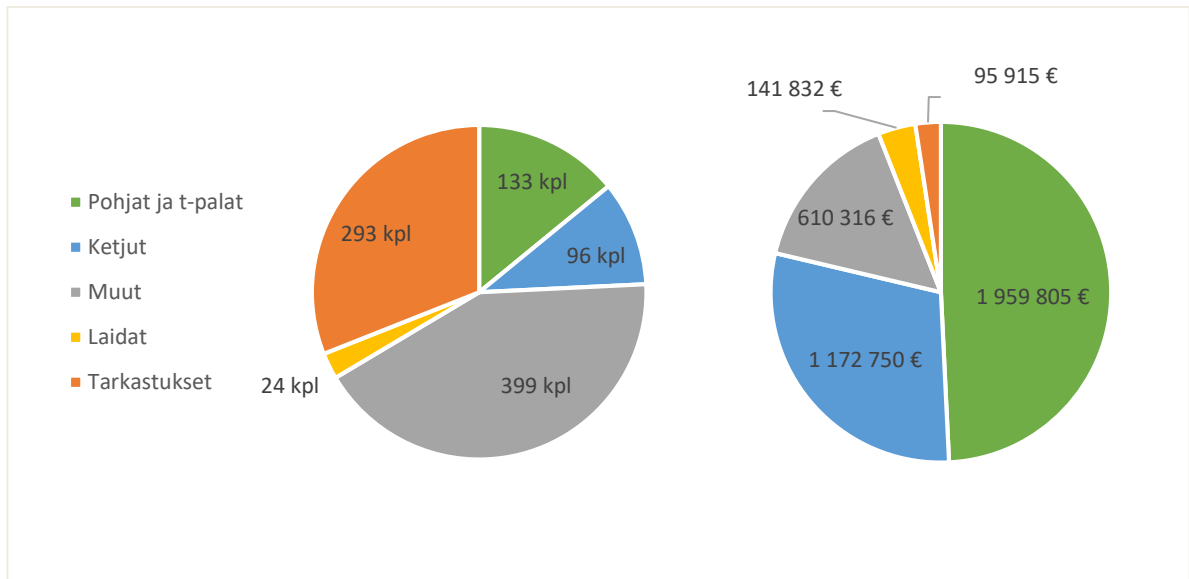
Lähes kaikki ennakko- ja ennakoivahuoltotöistä ovat Pietarsaaren tehtaalta. Pietarsaaren huoltosuunnitelmat ovat luotu SAP:iin tarkastelujakson alkupuolella, jolloin ne ovat ehtineet laukaisemaan paljon työtilauksia. Suurin osa ennakko- ja ennakoivahuoltotöistä ovat huoltosuunnitelmien laukaisemia kuljettimen tarkastuksia, kuljettimien paksuusmittauksia sekä vaihteiden öljyanalyysyjä ja huohottimien vaihtoja. Muilla tehtailla huoltosuunnitelmat ovat luotu vasta hiljattain eivätkä ne näin ollen ole ehtineet vielä laukaista monia työtilauksia. Pietarsaaren kuljettimille tarkastusten sykli on 4 viikkoa ja muiden tehtaiden kuljettimilla 6 kk tai 12 kk, joten tästäkin syystä Pietarsaaren kuljettimille kohdistuu enemmän ennakkohuoltotöitä. Korjaavaan kunnossapitoon kuuluvat kuljettimien ketjujen vaihdot, pohjien korjaukset ja vaihdot sekä muut työt, joissa korjataan havaittua vikaa.



Kuva 34. Kaikkien kuljettimien suoritettavat kunnossapitotyöt kunnossapidon toimintolajeittain.

Taulukko 5. Kunnossapidon toimintolajit.

Koodi	Selitys
C01	Korjaava kunnossapito
C02	Korjaava kunnossapito liipaistu EH:sta
C03	Korjaava kunnossapito liipaistu ennakoivasta
C04	Pikatyö
I10	Parantava kunnossapito
INV	Investointi
N30	Suunnittelu
N32	Puhdistus
N99	Muu palvelu
P01	Ennakkohuolto
P02	Ennakoivahuolto
W00	Takuunalainen työ



Kuva 35. Kaikkien kuljettimien suoritettut työt (vas.) ja toteutuneet kustannukset (oik.) jaoteltuna kohteittain.

Kuvassa 35 suoritettut työt ovat jaettu kuljettimen komponentin, johon kunnossapitotyö on kohdistettu tai toimenpiteen mukaan. Kuvassa vasemmanpuoleisessa kaaviossa näkyy jaottelu suoritettujen töiden määrän mukaan ja oikeanpuoleisessa niistä aiheutuneet kustannukset. Kuvasta nähdään, että tarkastukset ja muut työt (voitelulaitteiden tarkastukset, öljyanalyysit ja muut sekalaiset korjaustyöt) kattavat n. $\frac{3}{4}$ kaikista suoritetuista töistä, mutta niistä syntyy vain vähän kustannuksia. Oikeanpuoleisesta kaaviosta nähdään, että yli $\frac{3}{4}$ toteutuneista kustannuksista aiheutuu ketjujen ja pohjien kulumisesta.

Sulatuskuljettimista aiheutuvat kustannukset ovat suurimmaksi osaksi suoria materiaali- ja korjauskustannuksia. Hakekasat ja -siilot toimivat puskurivarastoina puunkäsittelyn ja keittämön välissä, joten puunkäsittelyn pysäytys ei heti vaikuta keittoprosessiin eikä näin ollen synny välittömiä epäkäytettävyyskustannuksia. Kuluminen on myös yleisesti ottaen hidasta, joten yllättäviä vikaantumisia tapahtuu harvoin. Yksittäiset ketjut voivat katketa, jos holkin halkeamista ei huomata ajoissa tai kuljettimen rakennemateriaalit voivat irrota aiheuttaen ongelmia kuljettimella tai myöhemmin kuorimalinjalistolla.

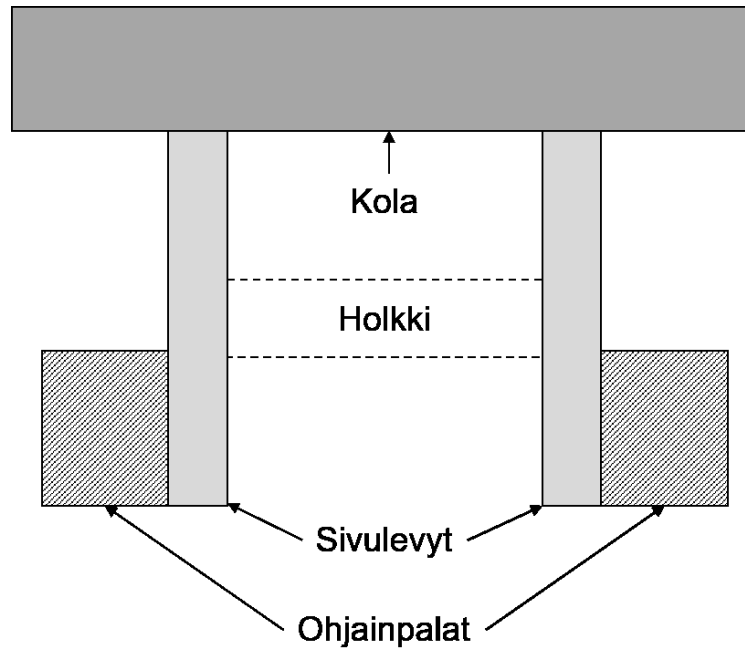
8.3 Sulatuskuljettimien konstruktio

Tutkimuksen kohteena olevat sulatuskuljettimet ovat kutakuinkin samanlaisia teknisiltä tiedoiltaan, lukuun ottamatta Kymin vanhempaa kuljetinta, joka on selvästi muita kuljettimia jyrkempi. Kuljettimista kaksi vanhinta, eli Kaukaan 1. kuljetin ja Kymin 1. kuljetin ovat hydraulimoottorikäyttöisiä. Muissa kuljettimissa käyttötapana on sähkömoottori ja vaihde. Kuljettimien tiedot ovat lueteltuna taulukossa 6. Kaikissa kuljettimissa vesisuuttimet ovat yhdessä jonossa, kuljettimen suuntaisesti, keskellä kuljettimen kattoa.

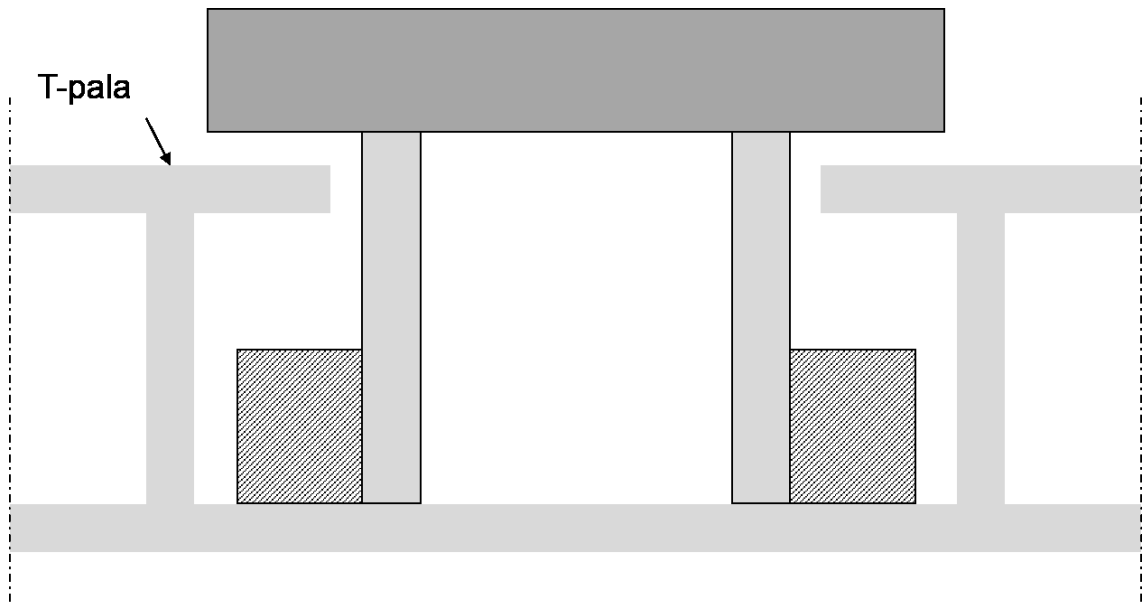
Taulukko 6. Sulatuskuljettimien tekniset tiedot.

	Lastaus- osan pituus (m)	Lastaus- osan kalte- vuus (°)	Sulatus- osan pituus (m)	Sulatus- osan kalte- vuus (°)	Käyttötapa
Pietarsaaren 1. kuljetin	18	1,2	62	5,2	Sähkö- moottori ja vaihde
Pietarsaaren 2. kuljetin	18	1,2	62	5,2	Sähkö- moottori ja vaihde
Kymin 1. kuljetin	15	0	57	14,5	Hydrauli- moottori
Kymin 2. kuljetin	16	1,0	56	8,1	Sähkö- moottori ja vaihde
Kaukaan 1. kuljetin	16	4,5	65	4,5	Hydrauli- moottori
Kaukaan 2. kuljetin	16	3,1	62	3,1	Sähkö- moottori ja vaihde

Kaukaan kuljettimissa lastaus- ja sulatusosa ovat samassa kulmassa. Pietarsaaressa ja Kyminillä lastaus- ja sulatusosat ovat eri kulmassa ja niiden välille syntyy taitoskohta. Taitoskohdassa ketju pyrkii suoristumaan eli nousemaan irti pohjasta. Tällöin ketjun ohjainpalat kuluttavat kuljettimen ”t-palan” alapintaa. Kuvassa 36 on esitelty ja nimetty ketjun komponentit. Kuvassa 37 on esitetty ketjun kulku yläpohjan ketju-urassa.



Kuva 36. Poikkileikkauskuva ketjun konstruktioista.



Kuva 37. Poikkileikkauskuva ketjusta ketju-urassa.

Uusissa kuljettimissa t-pala on mitoitettu siten, että ketjun yläpinta on samalla tasolla t-palan yläpinnan kanssa. Tällöin kola on ainoa rakenne, joka on ”näkyvässä” kuljettimen pinnalla ja voidaan olettaa, että suurin osa puiden kuormituksesta kohdistuu kolan kautta kolalenkin ja pohjan väliseen kosketukseen.

Kaukaan vanhemman kuljettimen ketjussa on pienempi kola ennen varsinaista kolaa (kuva 38), muissa kuljettimissa on yksi kola joka kymmenes lenkki. Pietarsaareissa kuljettimen pohjaan, ketjun alle, on lisätty jälkikäteen kulutuslevyä, jonka johdosta ketjun

yläpinta on koko matkaltaan selvästi t-palan yläpintaa korkeammalla (kuva 39). Tällöin puiden kuormituksen voidaan olettaa jakautuvan enemmän koko ketjun päälle.



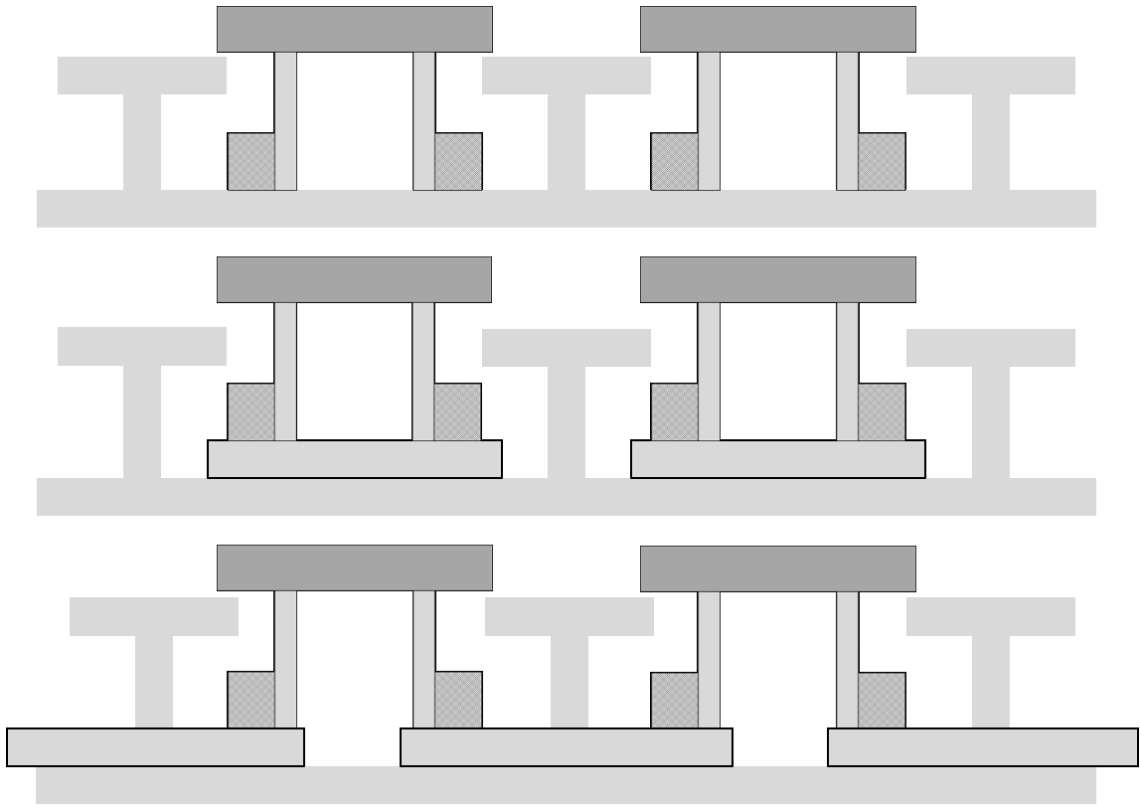
Kuva 38. Pieni kola ennen isoa kolaa Kaukaan vanhemmassa kuljettimessa.



Kuva 39. Pietarsaaren kuljettimissa (vas.) kola on selkeästi korkeammalla kuin Kaukaan kuljettimissa (oik.).

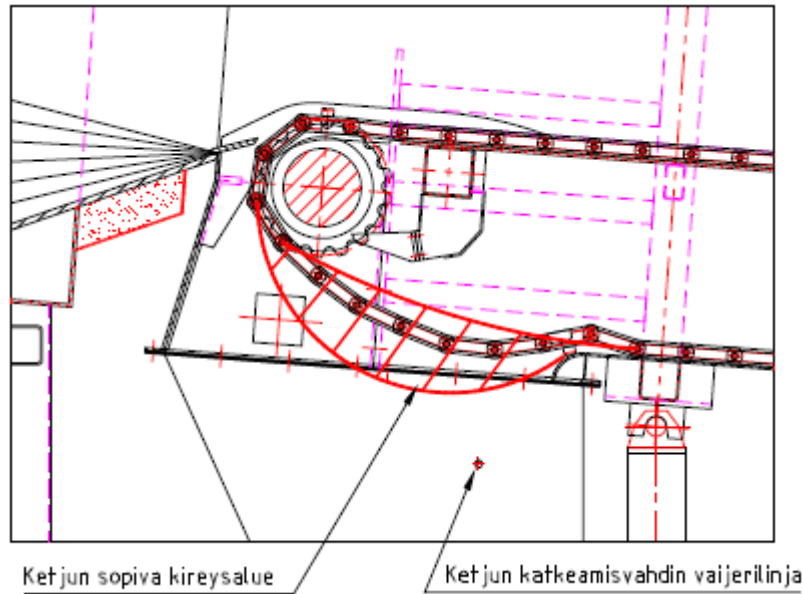
Kuljettimien pohjarakenteissa on pieniä eroja johtuen jälkikäteen tehdyistä korjauksista (kuva 40). Kuvassa ylimpänä on uusi kuljetin, jossa ketju liikuu suoraan kuljettimen pohjaa vasten. Kuvassa keskellä kuljettimen pohjalle on asennettu kulutuslevy, kuten Pietar-

saaren kuljettimissa. Kuvassa alimpana on rakenne, jossa kulutuslevy on asennettu t-palan alle, kuten Kymin vanhemman kuljettimen uusitulla lastausosuudella. Tällöin t-pala ja kulutuslevy on vaihdettava samanaikaisesti.



Kuva 40. Kuljettimien erilaiset pohjaratkaisut.

Korjauskustannusten kannalta edullisin vaihtoehto olisi tietenkin ratkaisu, jossa ketjuuran kulutuskisko olisi vaihdettavissa yksinään. Kuljettimen muut materiaalit, kuten t-palat, kuitenkin kuluvat myös käytössä. Tällöin on mahdollista, että joudutaan kuitenkin vaihtamaan kaikki kuljettimen materiaalit eikä vaihdettavasta kulutuskiskosta saada kaivattua hyötyä. Eri rakenneratkaisuihin liittyy myös paljon kysymyksiä, kuten koko kuljettimen lujuustekniset asiat, joihin ei tässä diplomityössä oteta kantaa.



Kuva 41. Ketjun roikkuminen vetopäässä. (Raumaster Oy 2015)

Kuljettimen ketju venyy käytössä ja sen oikea kireys on tarkastettava säännöllisesti. Kuvassa 41 näkyy ketjun sopiva kireysalue. Ketju on sopivan kireällä, kun se pääsee roikkumaan jonkin verran alapohjan alapuolelle. Tällöin alapohjan alkukohtaan kohdistuu suuri rasitus, joka aiheuttaa nopeaa kulumista. Pietarsaassa molempien kuljettimien alapohjien alkukohtaa on jouduttu paikkaamaan n. 4 vuoden käytön jälkeen.

8.4 Käytetyt materiaalit

Vuosien saatossa sulatuskuljettimissa on käytetty useita eri materiaaleja. Nykyisin kaikissa UPM:n sulatuskuljettimissa kulutus pohja on valmistettu SSAB:n valmistamasta Hardox 400 -kulutusteräksestä. Ketjuissa käytetty materiaali ja lämpökäsittely vaihtelevat valmistajittain, jokaisella valmistajalla on omat menetelmänsä.

8.4.1 Pietarsaassa käytetyt materiaalit

Pietarsaassa kuljettimet rakennettiin alun perin Fe52 (vastaa S355) -rakenneteräksestä. Rakenneteräksen todettiin kuluvan käytössä huomattavan nopeasti. Vuosina 2011 ja 2012 (n. 2 vuoden käytön jälkeen) molemmilla kuljettimilla ketjun sivulevyjen kuluttamaa uraa täytettiin kovahitsauksella. Kovahitsauksen todettiin myös kuluvan nopeasti ketjun sivulevyjen alla. Vanhemman kuljettimen laidoille rakenneteräksen päälle asennettiin 12 mm paksua Hardox-levyä vuonna 2015, uudemman kuljettimen laidat ovat vielä alkupeistä rakenneterästä.

Kuljettimien sulatusosuuksille pohjan kulutusmateriaaliksi asennettiin, hitsaamalla edellisten materiaalien päälle, 12mm paksua Hardox 400 -levyä vuosina 2013 ja 2014, jotka

ovat käytössä edelleen. Kuvassa 42 näkyy Hardox-levy Pietarsaaren kuljettimen yläpohjassa. Nykyisessä ketjussa kolalenkki sekä kolaa edeltävä ja seuraava lenkki on valmistettu nuorrutetusta SB27-teräksestä. Muut sivulevyt ovat valmistettu S355-rakenneteräksestä. Ketjujen tapit ovat valmistettu BM311-teräksestä, jonka kovuus on 52 HRC ja holkit ovat valmistettu nuorrutetusta ja induktiokarkaistusta SB27-teräksestä. Hardox 400:n nimellinen kovuus on 400 HB (SSAB n.d.) ja SB27:n kovuus nuorrutettuna 320 HB (FB Ketjutekniikka Oy 2014). Tällöin materiaalien kovuuksien suhde on 0,8 ja teorian mukaan ketjun sivulevyjen pitäisi kulua nopeammin kuin kuljettimen pohjan.



Kuva 42. *Hardox-levy Pietarsaaren sulatuskuljettimen sulatusosalla.*

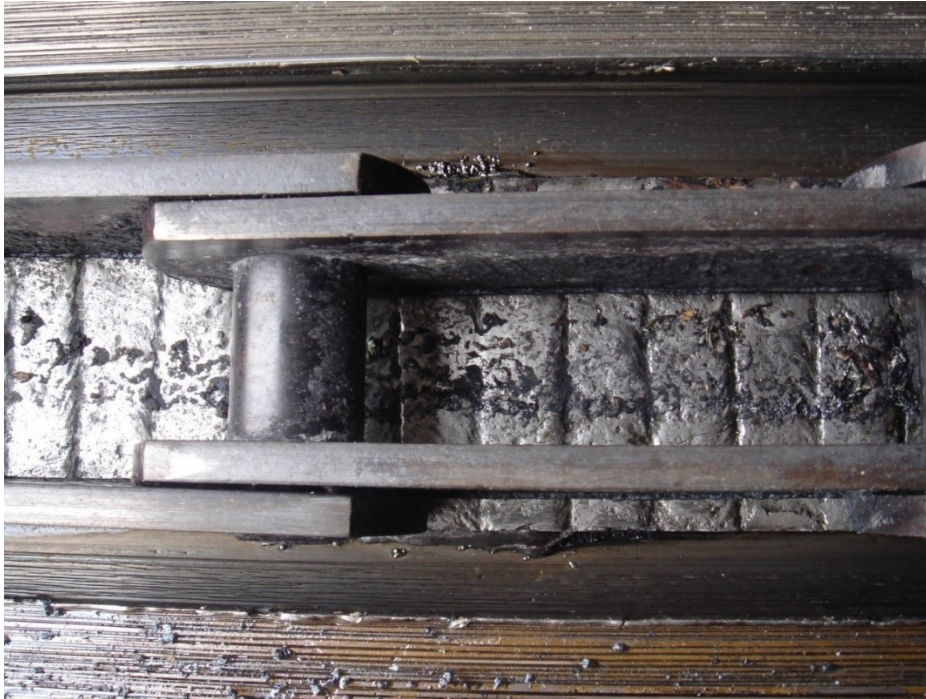
Pietarsaaren sulatuskuljettimien lastausosien pohjat ovat vuorattu CeraMetal HCCr 6+4 -levyllä, jossa 6 mm paksu St 37.2 (vastaa S235) rakenneteräs on pinnoitettu 4 mm paksulla kovilla kromikarbideja sisältävällä teräskerroksella (kuva 43). Pinnoitteen nimellinen kovuus on n. 60 HRC (CeraMetal se S.A. n.d.), joka vastaa n. 650 HB kovuutta (Dadong Fuding Engineering Machinery Co. Ltd. n.d.). Tällöin ketjun sivulevyn ja pinnoitteen kovuuksien suhde on n. 0,49. Teorian mukaan kahden kappaleen abraasiassa ketjun sivulevyn pitäisi kulua voimakkaasti.



Kuva 43. CeraMetal-levy Pietarsaaren sulatuskuljettimen lastausosalla.

8.4.2 Kaukaalla ja Kymillä käytetyt materiaalit

Kaukaan vanhemmassa kuljettimessa käytettiin pohjan kulutusmateriaalina UP Plate -levyä, joka on samankaltainen materiaali, kuin Pietarsaassa käytetty CeraMetal (kuva 44). UP Plate:n todettiin kestävän kulutusta hyvin sulatuskuljettimessa ja se oli käytössä n. 15 vuotta. Kovuutensa ja muotonsa vuoksi UP Plate kulutti ketjun sivulevyjä nopeasti ja sen ongelmana oli hauras murtuminen, joka aiheutti ongelmia myöhemmin kuorimolinjalla. Tämän vuoksi on päätetty, että UP Platea ei enää käytetä sulatuskuljettimissa.



Kuva 44. UP Plate-levy Kaukaan sulatuskuljettimessa.

Vuonna 2015 Kaukaan vanhempaan kuljettimeen vaihdettiin pohjan kulutusmateriaaliksi 12 mm paksu Hardox 400. Kuljettimen laidat tehtiin alun perin rakenneteräksestä, jota on paikkailtu tarpeen mukaan. Keväällä 2018 laidat vuorattiin 10 mm paksulla Hardox 400 -levyllä.

Kaukaan uudempaan kuljettimeen valittiin pohjan kulutusmateriaaleiksi lastausosalle 20 mm paksu ja sulatusosalle 16 mm paksu Hardox 400 sekä kuljettimen laitoihin 20 mm paksu S355-rakenneteräs. Molempien kuljettimien ketjut ovat Ketjurauman valmistamat. Ketjujen tapit ovat hiiletyskarkaistuja, joiden kovuus on HRC 60 – 65. Holkit ovat nuorutettuja ja niiden kovuus on HRC 48 – 50. Ketjujen sivulevyt ovat S355-rakenneterästä, joille ei ole tehty lämpökäsittelyjä.

Kymillä molemmissa kuljettimissa laidat ovat tehty rakenneteräksestä ja kuljettimen pohjassa kulutusmateriaalina on Hardox 400. Uudemman kuljettimen ketjut ovat Ketjurauman valmistamat ja vanhemman kuljettimen ketjut Lapuan-ketjut Oy:n valmistamat. Vanhemman kuljettimen ketjuissa tapit ovat läpikarkaistua booriterästä, kolat rakenneterästä ja ohjauspalat kulutusterästä. Uudemman kuljettimen ketjut ovat Ketjurauman valmistamat ja ne ovat pintakarkaistut.

8.4.3 Yhteenveto tällä hetkellä käytössä olevista materiaaleista

Taulukosta 7 nähdään kaikkien kuljettimien pohjien materiaalit sekä ketjujen materiaalit ja lämpökäsittelyt. Kaikista ketjuista ei ollut saatavilla täydellisiä tietoja. Kuljettimien

pohjan kulutusmateriaalina on Hardox 400. Pietarsaaren ketjuissa kolalennit ja sen viereiset lenkit ovat tehty kulutuskestävästä teräksestä. Kaukaan ketjuissa sivulevyt ovat valmistettu rakenneteräksestä, joille ei ole tehty lämpökäsittelyä. Kaukaan ketjuissa holkit ja tapit ovat hieman kovempia kuin Pietarsaaren ketjuissa.

Taulukko 7. Yhteenveto kuljettimien pohjissa ja ketjuissa käytetyistä materiaaleista.

	Pohjan kulutusmateriaali	Ketjun valmistaja	Ketjun materiaalit ja lämpökäsittelyt
Pietarsaaren 1. kuljetin	Hardox 400	FB-ketjutekniikka	Holkki: nuorrutettu, induktiokarkaistu SB27 Tappi: nuorrutettu, induktiokarkaistu BM311, kovuus 52 HRC Kolalennki ja viereiset lenkit: SB27(27MnCrB5-2), nuorrutettu, kovuus 320±20 HB Sivulevyt, kolat ja es-topalat: S355J2G
Pietarsaaren 2. kuljetin	Hardox 400	FB-ketjutekniikka	Holkki: nuorrutettu, induktiokarkaistu SB27 Tappi: nuorrutettu, induktiokarkaistu BM311, kovuus 52 HRC Kolalennki ja viereiset lenkit: SB27(27MnCrB5-2), nuorrutettu, kovuus 320±20 HB Sivulevyt, kolat ja es-topalat: S355J2G
Kymin 1. kuljetin	Hardox 400	Lapua-Ketjut	Holkit: läpikarkaistu booriteräs Kolat: rakenneterästä Ohjauspalat: kulusterästä
Kymin 2. kuljetin	Hardox 400	Ketjurauma	Materiaalit pintakarkaistuja
Kaukaan 1. kuljetin	Hardox 400	Ketjurauma	Tappi: hiiletyskarkaistu, kovuus HRC 60 – 65 Holkki: nuorrutettu, kovuus HRC 48 – 50 Sivulevyt: S355
Kaukaan 2. kuljetin	Hardox 400	Ketjurauma	Tappi: hiiletyskarkaistu, kovuus HRC 60 – 65 Holkki: nuorrutettu, kovuus HRC 48 – 50 Sivulevyt: S355

8.4.4 Hardox 400:n soveltuvuuden arviointi

SSAB:n mukaan Hardox 400 on ”kulutusta kestävä yleisteräs”(SSAB n.d.). Kovuutensa puolesta materiaali vaikuttaa sopivalta valinnalta sulatuskuljettimien pohjien kulutusmateriaaliksi. Sulatuskuljettimissa kulumiseen vaikuttava tribologinen ympäristö on kuitenkin hyvin monimutkainen ja voimakasta kulumista aiheuttava. Kuljettimen materiaaleihin syntyvistä kulumisjäljistä voidaan päätellä, että ketjun sivulevyjen ja pohjan välinen kahden kappaleen abraasio on vain pieni osa kokonaiskulumisesta. Puiden mukana tulevat kivet, hiekka ja muut kovat abrasiivit sekä korroosio kuluttavat syviä uria kuljettimen pintoihin. Tästä syystä kovempien kulutusterästen, lastausosilla käytettyjen karbideja sisältävien materiaalien tai teknisten keraamien käyttö koko kuljettimen matkalla voisi olla perusteltua. Kovemman materiaalin voidaan kuitenkin olettaa kuluttavan ketjun sivulevyjä nopeammin.

Mekaanisen kulutuksen lisäksi, korroosiolla on merkitystä materiaalien kulumiseen sulatuskuljettimissa. Hardox 400:n, kuten hiiliterästen yleisestikin, korroosiokestävyyttä voidaan pitää suhteellisen huonona (Kunnossapitoyhdistys 2008, s. 454). Hardox 400 sisältää jonkin verran korroosionkestoa parantavia seosaineita, kuten kromia, nikkeliä ja molybdeeniä. Hardox 400:n kemiallisen koostumuksen maksimi-arvot on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Hardox 400:n kemiallinen koostumus. (SSAB n.d.)

Seosaine	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
max %	0,32	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,004

Kymin uudemman kuljettimen materiaaleista tehtiin materiaalianalyysi VTT:llä, kun huomattiin kuljettimen kuluvan huomattavan nopeasti. Materiaalianalyysissä kahden näytepalan (ylä ja ala) kemiallinen koostumus määritettiin optisella emissiospektrometrillä (OES) ja kovuus mitattiin DuraScan-50 kovuusmittarilla. Materiaalianalyysin tulokset ovat esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Kymin sulatuskuljettimen materiaalianalyysin tulokset. (VTT Expert Services Ltd. 2017)

Seosaine	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
Ylä (paino-%)	0,12	0,24	1,34	0,010	0,003	0,40	0,07	0,06	0,003
Ala (paino-%)	0,090	0,22	1,30	0,009	0,003	0,40	0,08	0,03	0,002

Näytepalan Ylä mitattujen kovuuksien keskiarvo oli n. 408 HBW ja näytepalan Ala 411 HBW. Vaikka molemmat näytepalat täyttävät Hardox 400:n vaatimukset, niin materiaalianalyysin tuloksista nähdään, että kromi-, nikkeli- ja molybdeenipitoisuudet ovat huomattavasti pienemmät kuin ilmoitetut maksimiarvot. Tämän voidaan arvioida vaikuttavan heikentävästi Hardox 400:n korroosiokestävyyteen.

Tommi Kääriäinen tutki diplomityössään eri materiaalien soveltuvuutta sulatuskuljettimen kulutusmateriaaliksi. Diplomityön aikana tehtyjen tutkimuksien mukaan teräksen kulumiskestävyyteen sulatuskuljetinympäristössä vaikuttavat seuraavat ominaisuudet (Kääriäinen 2001, s. 169):

- Hienorakeinen mikrorakenne. Mikrooseosaineina alumiini, titaani, niobi ja vanaadiini estävät austeniitin rakeenkasvua ja pienentävät näin raekokoa.
- Kromiseostus. Jo 2% kromiseostuksella on korroosionkestävyyttä parantava vaikutus. 4% kromiseostuksella on jo selvä parantava vaikutus korroosionkestävyyteen, vaikka se ei täysin riitä suojaamaan terästä syöpymiseltä.
- Ferriittisen / ferriittis-perliittisen rakenteen niukkahiilisellä (C% < 0,25) teräksellä voi olla parempi kulumiskestävyys, kuin martensiittisellä rakenteella, kun teräksen kovuus on alle 400 HB.
- Martensiittisen ruostumattoman teräksen kovuus 320 HB ei riitä takaamaan riittävää kulumiskestävyyttä. Kovuuden nosto yli 500 HB lisäisi kulumiskestävyyttä, mutta hitsattavuus heikkenisi olennaisesti.

Diplomityössä sulatuskuljettimeen sopivimmaksi materiaaliksi valikoitui ferriittis-perliittinen hienorakeinen teräs. Valitun teräksen ja Hardox 400:n kemiallinen koostumus sekä ominaisuudet ovat esitetty taulukoissa 10 ja 11.

Taulukko 10. Hardox 400:n ja Kääriäisen diplomityössä valitun teräksen kemialliset koostumukset.

Seosaine (%)	Hardox 400	Diplomityössä valittu teräs	Hardox400 – diplomityössä valittu teräs (%)
C	0,32	0,08	+75,0
Si	0,70	0,4	+42,9
Mn	1,60	1,65	-3,1
P	0,025	0,03	-20,0
S	0,010	0,015	-50,0
Cr	1,40	2	-42,9
Ni	1,50	1,2	+20,0
Mo	0,60	0,2	+66,7
V		0,12	
B	0,004		

Taulukko 11. Hardox 400:n ja Kääriäisen diplomityössä valitun teräksen ominaisuudet.

	Hardox 400	Diplomityössä valittu teräs
Kovuus	370 – 430 HBW	363 HB
Myötölujuus	1100 MPa	680 (MPa)
Murtolujuus		1117 (MPa)
Iskusitkeys	45J / -40 °C	
Hiiliiekivalentti	0,31 CET / 0,47 CEV	0,90 CEV
Toimitustila	Q tai QT (karkaistu tai nuorrutettu)	Normalisoitu
Terästyyppi	Hienoraekäsitelty	Mikroseostainen hienoraeteräs
Faasi	Martensiitti / bainiitti	Ferriitti ja perliitti

Näiden ominaisuuksien valossa Hardox 400 vaikuttaa soveltuvan kohtalaisesti sulatuskuljettimen pohjamateriaaliksi kuluviin kohteisiin. Hardox sisältää jonkin verran korroosioneston kannalta tärkeitä seosaineita. Kromin nimellinen pitoisuus on pienempi kuin Kääriäisen diplomityössä valitussa teräksessä, mutta vastaavasti nikkelin ja molybdeenin nimelliset pitoisuudet ovat korkeammat. Eräässä tutkimuksessa (Krawczyk & Pawłowski 2013) todettiin Hardox 450:n olevan optimaalinen materiaali hiilikaivoksen ketjukuljettimen pohjan kulutusmateriaaliksi.

Hardox on hienoraekäsitelty, jonka todettiin lisäävän kulumiskestävyyttä. Lisäksi Hardox 400 on hieman kovempaa kuin diplomityössä valittu teräs, joten Hardox 400:n voidaan olettaa kestävän mekaanista kulutusta hieman paremmin.

8.5 Prosessitekniset asiat

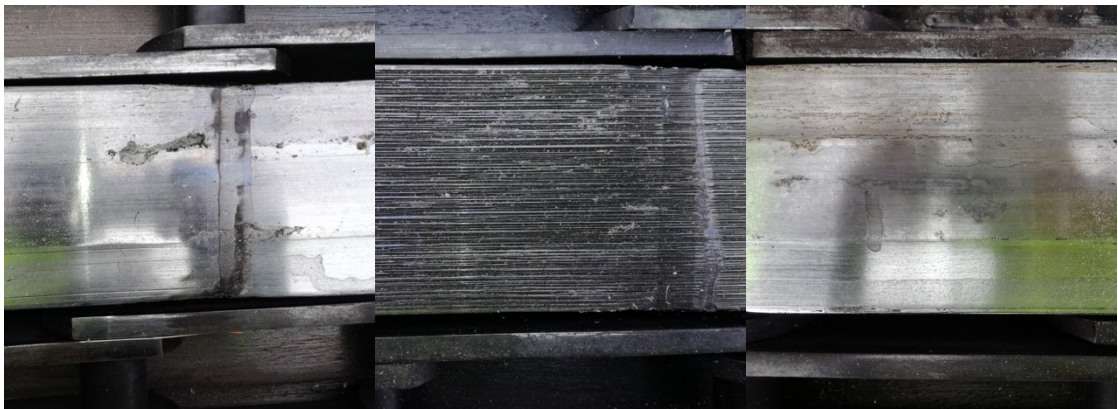
Sulatuskuljettimien lastaukseen käytetään materiaalikonetta, jolla puukuorma lasketaan kuljettimen lastausosuudelle. Puita syötetään aina täysi kauha kerrallaan ja syöttötaajuutta materiaalikoneen kuskille ohjataan liikennevaloilla. Puut liikkuvat siis suurina nippuina kuljettimessa. Kuljetintoimittajan Raumasterin tekemän selvityksen (Raumaster Oy 2012) mukaan ajettaessa puita suurina nippuina pysyvät hiekka ja pienet kivet paremmin puunipun sisässä, kuin ajettaessa pienempiä nippuja, jolloin puut leviävät laajemmalle alueelle, ja hiekka ja kivet pääsevät helpommin valumaan kuljettimen pohjalle.

Materiaalikoneella lastatessa puut lasketaan aina jotakuinkin samaan kohtaan kuljettimelle. Suurilla puunipuilla puut asettuvat kuljettimessa siten, että laitalevyjen ja laitimmaisten ketjujen ja t-palojen päälle kohdistuu suurin puukuorma. Kaukaan 1. kuljettimen ja Kymin 2. kuljettimen yhteydessä on katkaisupöytä, jolla liian pitkät puut katkaistaan ennen sulatuskuljetinta. Kuvassa 45 näkyy katkaisupöytä Kaukaalla. Kaukaan 1. kuljettimella yli 4,5 m pitkät puut (n. 1/3 kuljettimella ajettavista puista) menevät katkaisupöy-

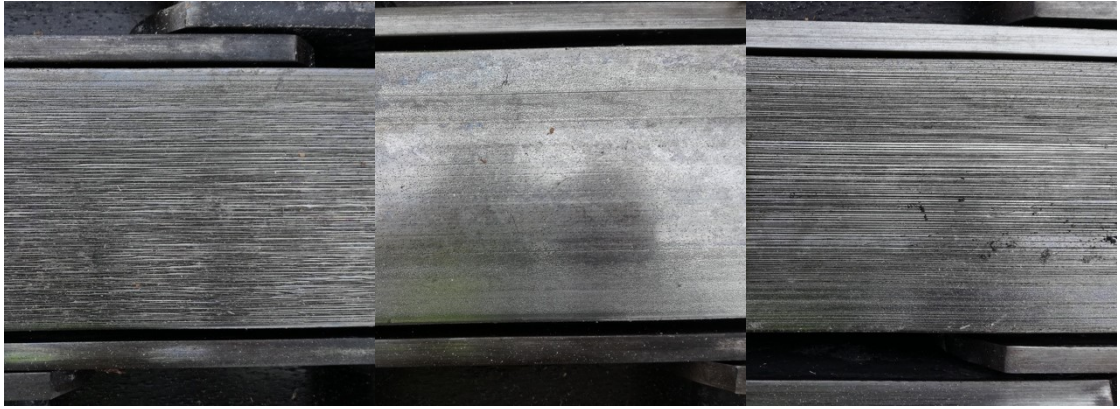
dän läpi, josta puut tippuvat aina samaan kohtaan kuljettimen keskelle. Tästä syystä Kaukaan 1. kuljettimella keskimmäiset t-palat kuluvat kaikista voimakkaimmin. Muilla kuljettimilla laitimmaisiet t-palat kuluvat voimakkaimmin (kuvat 46 ja 47).



Kuva 45. *Katkaisupöytä Kaukaan 1. kuljettimella.*



Kuva 46. *T-palojen kuluminen Kaukaan 1. kuljettimella. Kuvassa keskellä keskimäinen t-pala ja reunoilla laitimmaisiet t-palat.*



Kuva 47. T-palojen kuluminen Kaukaan 2. kuljettimella. Kuvassa keskellä keskimäinen t-pala ja reunoilla laitimmat t-palat.

Taulukossa 12 on listattu sulatuskuljettimien käyttötiedot. Kuljettimilla on erilaiset kapasiteetit eri puulajeille, kuljettimille joilla ajetaan vain yhtä puulajia, on listattu sen puulajin kapasiteetti. Kymen ja Kaukaan kuljettimien käyntiaikatieto on vuodelta 2017. Pietarsaaren järjestelmän päivityksen vuoksi alkuvuoden 2017 tietoja ei ole saatavilla, joten Pietarsaaren käyntiaikatieto on ajalta 05/2017 – 05/2018. Puumäärätiedot ovat vuodelta 2017.

Taulukko 12. Sulatuskuljettimien käyttötiedot.

	Kapasiteetti (k-m ³ /h)	Käyntiaika (h)	Puumäärä (k-m ³)	Puumäärä / käyntiaika (k-m ³ /h)	Keskimääräinen täyttöaste (%)	Keskimääräinen nopeuden asetusarvo (m/min)	Keskimääräinen mitattu nopeus (m/min)	Kuormitusindeksi (*10 ¹⁰)
Pietarsaaren 1. kuljetin	350 (havu) 230 (lehti)	7060	1300000	184,1	49	2,95	1,69	93,1
Pietarsaaren 2. kuljetin	350 (havu)	7108	1900000	267,3	50	2,47	1,65	133,7
Kymin 1. kul- jetin	350 (havu) 280 (lehti)	7950	1310689	165	29	3,96	2,88	180,1
Kymin 2. kul- jetin	230 (lehti)	8000	1715929	214	25		2,58	212,5
Kaukaan 1. kuljetin	250 (lehti)	8000	970000	121	47	2,95	1,66	77,3
Kaukaan 2. kuljetin	350 (havu)	6635	1014473	160	27	3,40	1,84	74,3

Taulukosta 12 nähdään, että Kymin molempien kuljettimien ja Kaukaan 1. kuljettimen käyntiaika on n. 8000 h vuodessa. Kaukaan 1. kuljettimella ajettu puumäärä on selvästi pienempi kuin Kymillä ajetut puumäärät, varsinkin verrattuna Kymin 2. kuljettimeen. Pietarsaaren kuljettimilla ajetut puumäärät ovat suuria, mutta käyntiaika on n. 900 h vuodessa vähemmän kuin aiemmin mainituilla.

Holmin kulumisyhtälön (kaava 5) mukaan kulunut tilavuus on suoraan verrannollinen kuormitukseen sekä liukumatkaan. Tällöin kuljettimelle aiheutuvaa kuluttavaa kuormitusta voidaan kuvata kuormitusindeksillä (kaava 20), joka on käyntiajan, keskimääräisen nopeuden ja puumäärän tulo. Indeksien arvoista nähdään, että Kymin 2. kuljettimella on selvästi suurin kuormitus. Kaukaan kuljettimien kuormitus on selvästi muita kuljettimia pienempää.

$$K = T_h * v * P \quad (20)$$

jossa

- K on kuormitusindeksi
 T_h on käyntiaika (h)
 v on keskimääräinen mitattu nopeus (m/h)
 P on ajettu puumäärä ($k-m^3$)

Kymin kuljettimien kuormitusindeksit ovat selvästi suurempia kuin muiden kuljettimien. Suuret kuormitusindeksien arvot muodostuvat suurilta osin nopeasta ajonopeudesta. Huomattavaa on Kymin ja Pietarsaaren 1. kuljettimien erot ajonopeuksissa. Kuljettimilla ajettu puumäärä on likipitään sama, mutta Kymin kuljettimella käyntiaika ja nopeus ovat huomattavasti suurempia ja sitä myöten täyttöaste on huomattavasti pienempi. Tämä johtaa Kymin kuljettimilla suureen ketjun liukumatkaan.

Yllä olevalla kaavalla kuormitusta arvioitaessa kuljettimen nopeus ja sitä myöten liukumatka vaikuttaa eniten indeksin suuruuteen. Holmin kulumisyhtälössä kulunut tilavuus on suoraan verrannollinen hetkelliseen kuormitukseen sekä liukumatkaan ja ne ovat ns. ”saman arvoisia” eli molempien tekijöiden muutos vaikuttaa kulumisnopeuteen yhtä paljon. Kuormitusindeksin laskennassa kuormituksena käytetään kuljettimilla ajettua kokonaispuumäärää, jolloin hetkellisen kuormituksen erot oletetaan merkityksettömiksi. Täyttöasteiden arvoista nähdään, että Kymin kuljettimilla hetkellinen kuormitus on pienempää kuin muilla kuljettimilla. Sulatuskuljettimissa kulumisen aiheutuu mekaanisen kulumisen ja korroosion yhteisvaikutuksesta. Tällöin liukumatkan voisi arvella olevan kuluttavampi tekijä, kun kevytkin kuormitus riittää heikentämään tai irrottamaan suojaavan korroosiotuotekerroksen.

Taulukko 13. Tehtaiden kuorimoille tulevat ja lähtevät vedet.

	Kuorimolle tuleva (l/s)	Kuorimolta lähtevä (l/s)	Kiertovesikaivon tyhjennyssykli
Pietarsaari	~25 (lämmin vesi) ~39 (raakavesi)	~45	2 vk
Kymi	~45 (lämmin vesi) ~30 (alkalisuodos)	~70	1,5 v
Kaukas	~35 (raakavesi)	~70 (kahdelta kuorimolta)	2 vk

Taulukossa 13 on nähtävissä tehtaiden kuorimoille tulevien vesien/suodoksien ja kuorimolta poistuvien vesien määrät sekä kiertovesikaivon tyhjennyssykli. Pietarsaaren kuorimolle tulee samanaikaisesti raakavettä sekä lämmintä vettä tehtaan lämminvesisäiliöstä. Kymillä kuorimon veteen on lisätty joko lämmintä vettä tai alkalisuodosta. Kaukaalla

kuorimolle tulee pelkästään raakavettä. Kuorimoilta pumpataan koko ajan vettä jätevesilaitokselle, joten järjestelmä ei ole täysin suljettu. Kuorimolta poistuu vettä myös haihtamalla sekä imeytymällä puuhun ja kuoreen.

Pietarsaaressa ja Kaukaalla kiertovesikaivo tyhjenetään pääasiassa kahden viikon välein osastoseisokkien yhteydessä. Kymillä kiertovesikaivo tyhjenetään pääasiassa tehdas-seisokkien yhteydessä tai vedenalaisten kuljettimien huoltotöiden yhteydessä.

Pietarsaaressa eri puulajeille on omat ajoreseptit ohjausjärjestelmässä (kuva 48). Resepteissä on määritetty mm. sulatuskuljettimelle nopeuden ohjearvo, sulatuskuljettimen paluuveden lämpötilan ohjearvo sekä kuoren lämpötilan ohjearvo. Kuoren lämpötilan ohjearvo on 19 °C kaikissa resepteissä, mutta nopeuden ja paluuveden lämpötilan ohjearvot eroavat toisistaan. Koivureseptissä nopeuden ohjearvo on pienempi ja paluuveden lämpötilan ohjearvo on korkeampi kuin havureseptissä.

L1 AJOSSA OLEVA RESEPTI		Tuotantoa vastaava arvo		L1 KATSOTTAVAT RESEPTIT			
Havu 5m		Koivu		Kuusi 3m		Havu 5m	
SK - Nopeuden ohjearvo	3,0 m/min	3,07	1,8 m/min	2,5 m/min	2,5 m/min	2,5 m/min	2,5 m/min
SK - Miniminopeus	2,5 m/min	2,54	1,5 m/min	2,2 m/min	2,2 m/min	2,2 m/min	2,2 m/min
SK - Maksiminopeus	3,6 m/min	3,67	2,2 m/min	3,6 m/min	3,6 m/min	3,6 m/min	3,6 m/min
SK - Ohjausväli	45 s		40 s	100 s	100 s	100 s	100 s
Rumpu - Aikaviive	15 min		15 min	15 min	15 min	15 min	15 min
Rumpu - Kierrosnopeuden ohjearvo	4,0 rpm		5,1 rpm	4,0 rpm	4,0 rpm	4,0 rpm	4,0 rpm
Rumpu - Minimikierrosnopeus	3,0 rpm		3,7 rpm	3,0 rpm	3,0 rpm	3,0 rpm	3,0 rpm
Rumpu - Maksimikierrosnopeus	4,8 rpm		6,7 rpm	4,5 rpm	4,5 rpm	4,5 rpm	4,5 rpm
Portti - Asennon ohjearvo	95 %	95	56 %	90 %	90 %	90 %	90 %
Portti - Minimiasento	70 %	70	50 %	80 %	80 %	80 %	80 %
Portti - Maksimiasento	98 %	98	62 %	95 %	95 %	95 %	95 %
Täytösaste - Ohjearvo	20 %		45 %	20 %	20 %	20 %	20 %
Täytösaste - Toleranssi	2 %		2 %	3 %	3 %	3 %	3 %
Täytösaste - Pysäytysraja	35 %		55 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Täytösaste - Käynnistysraja	30 %		50 %	22 %	22 %	22 %	22 %
Täytösaste - Optinen - Ohjearvo	20 %		45 %	20 %	20 %	20 %	20 %
Täytösaste - Optinen - Toleranssi	2 %		2 %	3 %	3 %	3 %	3 %
Täytösaste - Optinen - Pysäytysraja	35 %		55 %	30 %	30 %	30 %	30 %
Täytösaste - Optinen - Käynnistysraja	30 %		50 %	22 %	22 %	22 %	22 %
Kapasiteetti - Ohjearvo	350 m3/h		225 m3/h	350 m3/h	350 m3/h	350 m3/h	350 m3/h
Kapasiteetti - Ohjausväli	120 s		240 s	120 s	120 s	120 s	120 s
Kapasiteetti - Keskiarvoaika	120 s		90 s	120 s	120 s	120 s	120 s
Kapasiteetti - Ylitysaika	60 s		120 s	150 s	150 s	150 s	150 s
Kapasiteetti - Portti - Muutos	4,0 %		4,0 %	2,0 %	2,0 %	2,0 %	2,0 %
Puhtausaste - Ohjearvo	1,0 %		0,5 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %	1,0 %
Puhtausaste - Keskiarvoaika	90 s		70 s	90 s	90 s	90 s	90 s
Puhtausaste - Rumpu - Ohj.väli -Alas	75 s		120 s	150 s	150 s	150 s	150 s
Puhtausaste - Rumpu - Ohj.väli-Ylös	150 s		60 s	60 s	60 s	60 s	60 s
Puhtausaste - Rumpu - Muutos	0,5 rpm		0,2 rpm	0,5 rpm	0,5 rpm	0,5 rpm	0,5 rpm
Puhtausaste - Portti - Ohjausväli	60 s		150 s	120 s	120 s	120 s	120 s
Puhtausaste - Portti - Muutos	10,0 %		4,0 %	3,0 %	3,0 %	3,0 %	3,0 %
Puuhäviö - Ohjearvo	0,9 %		1,2 %	0,9 %	0,9 %	0,9 %	0,9 %
Puuhäviö - Keskiarvoaika	240 s		160 s	240 s	240 s	240 s	240 s
Puuhäviö - Rumpu - Ohj.väli (alas)	240 s		240 s	120 s	120 s	120 s	120 s
Puuhäviö - Rumpu - Muutos	0,2 rpm		0,2 rpm	0,1 rpm	0,1 rpm	0,1 rpm	0,1 rpm
Sulatus - Paluuvesi lämpöt. - Ohje	26,0 C		30,0 C	25,0 C	25,0 C	25,0 C	25,0 C
Sulatus - Kuoren lämpöt. - Ohjearvo	19,0 C		19,0 C	19,0 C	19,0 C	19,0 C	19,0 C
Puulaji - Kuorittavapuulaji (0, 1, 2, 3)	2		1	2	2	2	2

Kuva 48. Pietarsaaren puulajireseptit. (Metso, n.d.)

Pietarsaaressa kuorimolle tulevan lämpimän veden lämpötila on keskimäärin n. 75 °C. Sulatusvettä lämmitetään vielä tarvittaessa höyryllä. Sulatuskuljettimille menevän veden asetusrvo on n. 110 l/s. Sulatuskuljettimessa suihkutettava sulatusvesi on jaettu kahteen piiriin. Kuljettimen loppupäähän, lähelle kuorimarumpua suihkutetaan n. 35 l/s vettä, jonka lämpötila on kesällä n. 24 °C ja talvella n. 42 °C. Sulatuskuljettimen aiemmille

osille suihkutetaan n. 75 l/s vettä, jonka lämpötila on kesällä n. 23 °C ja talvella n. 34 °C. Kuljettimilta poistuvan veden lämpötila on kesällä n. 21 °C ja talvella n. 27 °C.

Pietarsaaren 1. kuljettimen nopeuden asetusarvo on keskimäärin 2,59 m/min ja mitattu nopeus on keskimäärin 1,69 m/min. 2. kuljettimen nopeuden asetusarvo on keskimäärin 2,47 m/min ja mitattu nopeus on keskimäärin 1,65 m/min. Mitatun nopeuden keskiarvo poikkeaa asetusarvon keskiarvosta, koska asetusarvo ei nollaannu osastoseisokkien eikä linjan pysähdyksen ajaksi. Koko kuorimalinja pysähtyy, jos puiden seassa havaitaan metallia tai linjastolle syntyy tukos. Vuoden tarkastelujaksolla Pietarsaassa 1. linja pysähtyi 4494 kertaa ja 2. linja pysähtyi 4045 kertaa.

8.6 Vesikemia

Sulatuskuljettimien sulatusvesistä tehtiin kemiallinen analyysi jokaisella tehtaalla, jonka tulokset ovat nähtävissä taulukossa 14. Pietarsaassa ja Kaukaalla vesinäyte otettiin sulatuskuljettimelle menevästä syöttölinjasta. Kymillä näytettä ei ollut mahdollista ottaa ennen sulatuskuljetinta, joten vesinäyte otettiin kuljettimen paluulinjasta. Rouvarin diplomityön (2005, s. 68) mukaan kuorimolle tulevan ja selkeyttimelle lähtevän veden pitoisuuksissa ei ole juurikaan eroja. Veden sähkönjohtavuus kasvaa huomattavasti, mutta mm. kloridi- ja sulfaattipitoisuudet pysyvät samalla tasolla. VTT:n tekemän tutkimuksen mukaan veden pH ei juurikaan muutu sulatuksen aikana. (Kuoppamäki 2001, katso Kääriäinen 2001, s. 26)

Taulukko 14. Sulatusvesien kemiallisten analyysien tulokset.

		Kaukas	Kymi	Kymi	Pietarsaari
		1/2018	1/2018	2/2018	1/2018
<i>Alkalisuudesta mukana</i>					
Analyysi					
Kloridi, Cl^-	mg/l	5,3	25,5	4,6	4,69
Sulfaatti, SO_4^{2-}	mg/l	< 0,1	35	12	14,34
Natrium, Na	mg/l	24	78,4	9,91	11,39
Kalsium, Ca	mg/l	9,57	5,9	5,9	2,61
Magnesium,	mg/l	2,93	2,6	2,4	1,22
Rauta, Fe	mg/l	2,61	2,3	6	3,99
Alumiini, Al	mg/l	0,24	0,46	4,4	0,383
Pii, Si	mg/l	1,31	3	10,1	8,02
pH		5,1	6,5	4,8	6,4
Kiintoaine	mg/l	635	72	235	335
Alkaliteetti	mg/l	118,4	48,9	< 2	0,16

Korroosion kannalta tärkeimmät arvot vesianalyyseistä ovat kloridi- ja sulfaattipitoisuudet, pH ja alkaliteetti. Kloridipitoisuus on samaa luokkaa kaikissa näytteissä, paitsi Kymin näytteessä, jossa on mukana alkalisuodosta. Sulfaattipitoisuus on selvästi pienempi Kaukaan vesianalyysissä verrattuna muihin analyysihin, joka saattaa vähentää korroosionopeutta Kaukaan kuljettimissa. Kaukaan näytteessä ja Kymin näytteessä, jossa ei ole mukana alkalisuodosta, pH on melko matala, joka saattaa nopeuttaa korroosiota. Alkaliteetti on alhainen Pietarsaaren ja Kymin alkalisuodottomassa näytteessä. Alhainen alkaliteetti saattaa kasvattaa korroosionopeutta. Vesi on myös happipitoista, joka kasvattaa korroosionopeutta hiiliteräksillä.

Pietarsaarella ja Kaukaalla sulatusveden pH:n säätöön käytetään lipeää (*NaOH*). Lisäksi Kaukaalla veden joukkoon lisätään tarvittaessa vaahdonestoainetta Bandofoam AMB600 ja homeenestoainetta Biosid Bansan 210W. Biosid Bansan 210W on metyleeni-bistiosyanaatti -pohjainen biosidi, jota käytetään teolliseen vedenkäsittelyyn ja paperin valmistuksessa käytettäviin prosessivesiin (Tukes 2014). Metyleeni-bistiosyanaatin (MBT) käyttötarkoitus on vesien limantorjunta. Se läpäisee eliöstön solukelmut ja sitoo solun sisältä raudan. MBT on tehokas kaikkia aerobisia eliöitä vastaan sekä joitain anaerobisia (mm. sulfaatinpelkistäjät) vastaan. Sitä voidaan käyttää vesissä, joiden pH on alle 8 ja jotka eivät sisällä paljoa rautaa tai klooria. Pinta-aktiivisten aineiden (vaahdonestoaineet) on todettu tehostavan biosidien vaikutusta. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s. 437)

Vesianalyysien oton yhteydessä Kaukaalla huomattiin, että ohjausjärjestelmän aktiivinen pH:n mittaus näyttää korkeampia pH-arvoja, kuin analyysissä mitattu arvo. Tällöin järjestelmä syöttää vähemmän lipeää sulatusveden joukkoon, jolloin todellinen pH voi laskea.

Kymillä pH:n säätöön on käytetty valkaisusta saatavaa alkalisuodosta. Otetussa näytteessä alkalisuodosta on lisätty sulatusveden joukkoon 4 l/s. Alkalisuodosta eli emäksistä pesusuodosta syntyy valkaisun pesuvaiheissa. Emäksiset pesusuodokset sisältävät paljon orgaanisia aineita sekä suuret kloridi- ja sulfaattipitoisuudet. (Prowledge Oy 2016) Täysvalkaistun ECF-havupuusellun pesusuodoksien koostumukset ovat esitetty kuvassa 49.

Valkaisusuodoksien koostumus

täysvalkaistu ECF-havupuusellu
valkaisimoon tulevan happidelignifoidun massan kappaluku noin 15

		Hapan suodos	Emäksinen suodos
Volyymi	m³/sellutonnei	5,0	5,0
Kuiva-ainetta	g/m³	3000	4000
Kuitua	g/m³	15	15
Haihtuvia aineita	g/m³	150	170
Kuiva-aineen tuhka	%	55	60
Happamuus	pH	3,0	11,0
Lämpötila	°C	65	75
Ionipitoisuus			
Kloridi	g/m³	600	350
sulfaatti	g/m³	300	300
Karbonaatti	g/m³	30	350
Oksalaatti	g/m³	35	100
Silikaatti	g/m³	10	20
Natrium + kalium	g/m³	500	1200
Magnesium	g/m³	40	20
Kalsium	g/m³	120	20
Barium	g/m³	1	0
Rauta	g/m³	2	1

Kuva 49. Valkaisusuodoksien koostumus. (Prowledge Oy 2016)

Kuten kuvasta 49 nähdään tyypillinen emäksinen suodos sisältää suuret pitoisuudet kloridia ja sulfaattia, jotka saattavat kiihdyttää korroosiota sulatuskuljettimessa. Kymillä valmistui vuoden 2015 lopulla Kymi700-projekti tuotantokapasiteetin kasvattamiseksi, johon uusi kuorimalinjakin liittyi. Tehtaan henkilöstön mukaan kasvaneen tuotantokapasiteetin myötä valkaisuodosten koostumus muuttui siten, että se sisälsi huomattavasti korkeampia pitoisuuksia, kuin kuvassa 49 esitetyt. Tämän arvellaan aiheuttaneen huomattavan nopeaa kulumisnopeutta sulatuskuljettimissa.

Huomattavan korkeista pitoisuuksista ei ole saatavilla analyysituloksia. Lähiaikoina Kymillä on tehty joitain vesianalyysejä, joiden tulokset ovat nähtävissä taulukossa 15. Näytteet 3 ja 5 sisältävät alkalisuodosta. Näistäkin tuloksista voidaan päätellä, että vaikka alkalisuodoksen lisäämisellä pH saadaan sopivalle tasolle, niin sen myötä muut arvot muuttuvat huonompaan suuntaan. Lisääntyneiden kloridi- ja muiden suolojen pitoisuudet kasvattavat veden sähkönjohtokykyä, joka myös yksinään kasvattaa korroosionopeutta. Rouvarin diplomityön mukaan kuorimoveden sähkönjohtavuuden ollessa yli 35 mS/m, voidaan sitä pitää korroosiota aiheuttavana (2005, s. 50).

Taulukko 15. Kymillä tehtyjen sulatusvesianalyysien tuloksia.

Näyte	pH	Johtokyky (mS/m)	Kloridi (mg/l)
1	5,8	7,8	4,0
2	5,6	7,2	4,1
3	6,6	51,5	23,1
4	5,7	7,5	5,1
5	6,5	38,9	25,5
6	4,8	10,4	4,6

Katja Rouvari (2005) ja Tommi Kääriäinen (2001) tutkivat diplomitoissään kuorimove-
den vaikutusta korroosioon. Diplomitöiden yhteydessä tehtyjen vesianalyysien tulokset
ovat nähtävissä taulukossa 16. Rouvarin diplomityössä tutkittiin märkäkuorimarummun
korroosiota, joka oli valmistettu S355-rakenneteräksestä. Kääriäisen diplomityössä tut-
kittiin korroosiota sulatuskuljettimessa ja vertailtiin eri materiaaleja.

Taulukko 16. Rouvarin ja Kääriäisen diplomitoissa tehtyjen sulatusvesianalyysien tulok-
set.

		Rouvari kuorimolle tuleva	Rouvari selkeyttimelle lähtevä	Kääriäinen
Kloridi	mg/l	15	16	32
Sulfaatti	mg/l	16	13	670
Natrium	mg/l			280
Kalsium	mg/l			140
Magnesium	mg/l			12
Rauta	mg/l	4,0	7,3	8,2
Alumiini	mg/l			1,2
Pii	mg/l			16
pH		5,5	5,9	6,0
Kuiva-aine	mg/l	8300	1280	
Johtokyky	mS/m	0,67	67,1	

Tuloksista nähdään, että Rouvarin diplomityössä saadut arvot ovat samalla tasolla kuin
nyt tämän diplomityön aikana tehdyissä vesianalyyseissä. Kääriäisen diplomityössä mi-
tatut arvot ovat huomattavasti suurempia. Rouvarin diplomityössä korroosionopeutta mi-
tattiin LPR-mittauksilla ja todettiin, että selkeytetty kuorimolle tuleva vesi aiheuttaa vain
hyvin vähän tai ei ollenkaan korroosiota kuorimarummussa käytetylle rakenneteräkselle.
Kääriäisen mukaan tutkitussa sulatuskuljettimessa suurin kulumista aiheuttava tekijä on
sulatusveden aiheuttama korroosio.

Sulatusvesianalyysien tuloksien perusteella vedelle voidaan laskea sen korrodoivuutta kuvaavia indeksejä (kts. kappale 5.3.1 ja liite 1). Indeksien ja veden kovuuden arvot ovat esitetty taulukossa 17. Kaikkien indeksien mukaan sulatusvesi on voimakkaasti korroosiota aiheuttava, lukuun ottamatta Kaukaan Larsonin indeksiä ja DIN 50930:n mukaista indeksiä. Näiden mukaan Kaukaan sulatusvedellä ei ole taipumusta aiheuttaa korroosiota eikä todennäköisyys piste- ja rakokorroosiolle ole kasvanut. Indeksit perustuvat kemiallisiin tasapainotilanteisiin, joten ne kuvaavat pelkästään reaktioiden taipumusta ja suuntaa, eivät niiden nopeutta. Näin ollen esim. Pietarsaaren suurempi RI-arvo verrattuna Kaukaaseen ei välttämättä tarkoita, että korroosio on nopeampaa Pietarsaareissa.

Taulukko 17. Sulatusvesianalyyseistä lasketut veden indeksit.

	Kaukas	Kymi <i>Alkalisuodosta mukana</i>	Kymi	Pietarsaari
Langelierin indeksi (LSI) (Lenntech BV 2018a)	-3.0 <i>voimakas korroosio</i>	-2,1 <i>voimakas korroosio</i>	-5.2 <i>voimakas korroosio</i>	-5.1 <i>voimakas korroosio</i>
Ryznarin indeksi (RI) (Lenntech BV 2018b)	11 <i>erittäin voimakas korroosio</i>	11 <i>erittäin voimakas korroosio</i>	15 <i>erittäin voimakas korroosio</i>	17 <i>erittäin voimakas korroosio</i>
Larsonin indeksi (La)	0,05 <i>ei aiheuta korroosiota</i>	1,24 <i>saattaa aiheuttaa korroosiota</i>	8,30 <i>saattaa aiheuttaa korroosiota</i>	118,94 <i>saattaa aiheuttaa korroosiota</i>
DIN 50930	0,08	1,81	11,57	165,72
Veden kovuus (mmol/l) (Lenntech BV 2018c)	0,359	0,254	0,246	0,115

Langelierin ja Ryznarin indeksit ovat veden pH:n, karbonaatti-, bikarbonaatti- ja kalsiumpitoisuuksien funktio. Larsonin indeksi ja DIN 50930:n mukainen indeksi ovat veden kloridi- ja sulfaattipitoisuuden sekä alkaliteetin funktio. DIN 50930:n mukaisen indeksin arvon ollessa suurempi kuin 1, on kasvanut todennäköisyys piste- ja rakokorroosion esiintymiselle. LSI-arvon ollessa negatiivinen ja RI-arvon ollessa suurempi kuin 7, metallin

pinnalle ei muodostu suojaavaa kerrosta. Suojaavaa kerrosta ei myöskään synny, jos veden kovuus on alle 0,36 mmol/l. Larsonin indeksin ollessa suurempi kuin 0,5 vedellä on taipumusta aiheuttaa korroosiota.

Indeksien arvoista nähdään, että mikään analysoiduista sulatusvesistä ei muodosta suojaavaa kerrosta metallin pinnalle. Kaukaan sulatusveden kovuus on rajalla, mutta muut indeksit ovat selvästi korrosoivalla puolella. Kloridi- ja sulfaattipitoisuudet huomioon otettavien indeksien mukaan Kymin ja Pietarsaaren sulatusvedet ovat vahvasti korrosoivalla puolella. Näiden indeksien mukaan Kaukaan sulatusvesi ei aiheuta korroosiota, joka johtuu erittäin pienestä sulfaattipitoisuudesta sekä korkeasta alkaliteetistä.

Indeksien arvoja voidaan pitää lähinnä suuntaa antavina. Ne ovat kehitetty arvioimaan vesijohtoveden korrodoivuutta putkistomateriaaleille ja lisäksi yhden analyysin perusteella ei voida tehdä liian pitkälle meneviä johtopäätöksiä. Kuten taulukosta 18 nähdään, Pietarsaaren tehtaalle tulevan mekaanisesti puhdistetun raakaveden pitoisuudet vaihtelevat vuoden tarkastelujaksolla melko paljon. Raakaveden arvot samalta ajanjaksolta sulatusvesianalyysin kanssa ovat: kloridi 6,4 mg/l ja sulfaatti 19,7 mg/l. Tästä nähdään siis, että sulatusveden kloridi- ja sulfaattipitoisuudet ovat jopa pienemmät kuin tehtaalle tulevassa raakavedessä.

Taulukko 18. Pietarsaaren tehtaan mekaanisesti puhdistetun raakaveden koostumus. (DNA Report)

	Keskiarvo	Vaihteluväli
pH	6,6	5,7 – 6,9
Johtokyky (mS/m)	9,6	5,6 – 17,6
Kloridi (mg/l)	7,0	4,1 – 14,3
Sulfaatti (mg/l)	15,8	10,5 – 20,6
Alumiini (mg/l)	0,418	0,046 – 0,855
Rauta (mg/l)	2,9	2,0 – 4,4
Natrium (mg/l)	5,8	3,0 – 10,2

8.7 Kulumisen sulatuskuljettimissa ja kulumisen mittaaminen

Kaikkien edellä mainittujen seikkojen voidaan olettaa vaikuttavan sulatuskuljettimen kulumistapaan ja -nopeuteen. Puiden kuljetustapa vaikuttaa puiden mukana tulevien kivien ja hiekan sekä mahdollisten suolojen määrään. Myös puulaji vaikuttaa kuljettimelle kulettuvien kivien ja hiekan määrään.

Sulatusvesisuuttimien puhdistus takaa sulatusveden pääsyn kuljettimelle. Vesi pienentää kitkaa ketjun ja pohjan välissä sekä huuhtelee kiviä ja hiekkaa pois kuljettimelta, mutta se mahdollistaa samalla sähkökemiallisen korroosion esiintymisen.

Kuljettimen konstruktio vaikuttaa t-palojen kulumiseen kappaleessa 8.3 kuvatulla tavalla. Kuljettimen nousukulman voidaan ajatella vaikuttavan siten, että loivalla nousukulmalla kuormitus kohdistuu ketjun kautta kuljettimen pohjaan ja kolan kautta ketjuun kohdistuva kuormitus syntyy puiden ja kuljettimen rakenteiden välisestä kitkasta. Jyrkemmällä nousukulmalla pohjan kuormitus vähenee ja kolan kautta ketjuun kohdistuva kuormitus kasvaa. Tässä mittakaavassa erot voidaan kuitenkin olettaa pieniksi.

Puiden kuormituksen voidaan olettaa kohdistuvan suurimmaksi osaksi kolan kautta ketjulle, t-paloille ja laitalevyjen alaosiin. Tällöin kuljettimessa, jossa ketjun korkeus on mitoitettu siten, että kola alkaa liukua t-palan pinnalla, kun pohjaan kuluu ura ketjun sivulevyjen kohdalle, pohjan kuluminen on hitaampaa. Osa kuluttavasta kuormasta kohdistuu kolan ja t-palan yläpinnan kosketukseen ja näin ollen pohjan ja ketjun välinen kuluminen hidastuu.

Kulumisen voidaan olettaa olevan suoraan verrannollinen ajettuun puumäärään sekä kuljettimen liukumatkaan. Liukumatka on kuljettimen käyntiajan ja nopeuden tulo. Rakenteisiin kohdistuva kuormitus riippuu ajetusta puumäärästä. Suomalaisen männyn tiheys on n. 550 kg/m^3 ja koivun tiheys on n. 740 kg/m^3 (Puuinfo Oy). Tällöin kuljettimen läpi liikkuu enimmillään n. 200 000 kg/h havupuuta. Havupuun sulatusaika on n. 20min (Prowledge Oy 2016). Tällöin kuljettimessa on kerralla n. 66 667 kg puuta. Jos oletetaan, että kuorma jakautuu tasaisesti kaikkien ketjujen kesken ja että, kaikki paino kohdistuu kolalle, on kolalengin alla pohjan nimellinen pintapaine n. 0,3 MPa.

8.7.1 Kulumismekanismien arviointi

Kuljettimille kulkeutuvien kivien ja muiden kuluttavien partikkelien määrä on suoraan verrannollinen ajetun puun määrään. Puissa kiinni olevien kivien ja muiden kovien partikkelien voidaan arvella olevan suurin kuluttava tekijä laitalevyjen ja t-palojen yläpintojen kulumiseen.

Kuvassa 50 näkyy t-palojen yläpinnan kulumista. Kuvassa vasemmalla oleva t-pala on kuljettimen keskivaiheilta ja kuvassa oikealla on sama t-pala kuvattuna kuljettimen loppupäästä läheltä kuorimarumpua. Kuljettimien lastauspäässä ja keskivaiheilla t-palojen kulumisjäljet ovat pääasiassa suorja ja syviä, helposti silmin havaittavia, liukusuunnan suuntaisia uria. Lähempänä kuorimarumpua urien koko pienenee ja suunta alkaa poiketa liukusuunnasta. Tämä viittaa siihen, että kuljettimen alkupäässä vallitsevana kulumismekanismina toimii, kappaleessa 4.2 esitetyn jaon mukaisesti, kahden kappaleen abraasio ja kuljettimen loppupäässä kulumismekanismi muuttuu korroosion hallitsemaksi ja mahdollisesti kolmen kappaleen abraasioksi. Talvella kivet ja puut partikkelit ovat jäätyneenä

kiinni puun pinnalla. Sulatuskuljettimessa puun pintakerros sulaa ja kivet pääsevät liikkumaan puiden ja t-palan välissä. Kuljettimen loppupäässä puut alkavat myös nousta irti t-palojen pinnasta siirtyessään kuorimarumpuun, jolloin kuluttavat partikkelit pääsevät liikkumaan.



Kuva 50. Sulatuskuljettimen t-palojen kuluminen.

Sulatuskuljettimen pohjan kuluminen eroaa t-palan kulumisesta. Kuvan 51 ylä- ja alaosassa näkyy ketjun sivulevyjen kuluttamaa uraa. Kuvassa keskellä näkyy ketjun keskilinjalla olevaa pohjaa. Ketjun keskellä mekaanisen kulutuksen pitäisi olla pientä, mutta pintaan kuluu samanlaisia uria kuin t-palan pintaankin. Puiden mukana tulevat kivet ja muut kovat partikkelit huuhtoutuvat kuljettimen pohjalle, josta ne huuhtoutuvat edelleen vesiaukkojen kautta kuljettimen alapohjaan tai kulkeutuvat puiden viemänä kohti kuorimarumpua. Pohjan keskikohdan kulumisen voidaan arvella johtuvan pääasiassa korroosion vaikutuksesta. Ketjun sivulevyjen alla kulumisjäljet ovat satunnaisia ja verkkomaisia. Tämä viittaa siihen, että vallitsevana kulumismekanismina korroosio ja voimakas abraasio.



Kuva 51. Sulatuskuljettimen pohjan kuluminen kuljettimen loppupäässä.

Pohjan kuluminen vaihtelee suuresti eri osissa kuljetinta. Kuljettimen loppupäässä, lähellä kuorimarumpua, ketjun kuluttaman uran pinta on erittäin epätasaista ja kulumisjäljet ovat ”hienojakoisia”. Lähempänä lastausaluetta (kuva 52) kulumisjäljet ovat suurempia ja ”karkeampia”, mutta kuitenkin selvästi erilaisia kuin t-palojen pinnoissa.



Kuva 52. Sulatuskuljettimen pohjan kuluminen kuljettimen alkupäässä.

Kuljettimen laitalevyissä kulumisjäljet muistuttavat hyvin paljon t-palojen kulumisjälkiä (kuva 53). Laitalevyjen kulumisjäljet ovat suurimmaksi osaksi selvästi silmillä havaittavia uria. Urien voidaan arvella syntyvän korroosion sekä puiden mukana tulevien kivien

ja muiden kovien partikkeleiden yhteisvaikutuksesta, samaan tapaan kuin t-palojen yläpintojen kuluminen. Suurinta laitalevyjen kuluminen on laidan tukirakenteiden läheisyydessä (kuva 54). Laidan voidaan olettaa taipuvan hieman puiden kuormituksesta. Tukirakenteen kohdalla laitalevy ei pääse taipumaan ja levyn kuormitus nousee suureksi, joka johtaa nopeampaan kulumiseen ja lopulta levyn murtumiseen.



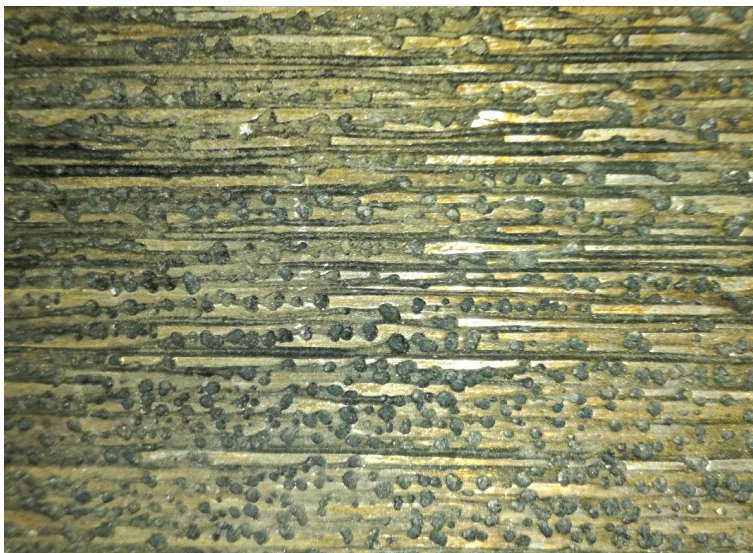
Kuva 53. Sulatuskuljettimen laitalevyn kuluminen.



Kuva 54. Laitalevyn rikkoutuminen tukirakenteen kohdalta.

Pietarsaaren ja Kaukaan kuljettimien rakenteissa ei juurikaan näy merkkejä korroosiosta muilla, kuin mekaanisen kulutuksen alaisilla alueilla. Tämä viittaa siihen, että kuljettimissa käytetyt materiaalit jossain määrin passivoituvat tai metallin pinnalle muodostuu jokin muu korroosiolta suojaava kerros. Mekaaninen kulutus rikkoo kerroksen, jolloin korrosio pääsee syövyttämään metallia. Tällöin kulumisen tapahtuu korroosion ja mekaanisen kulumisen yhteisvaikutuksen seurauksena. Pietarsaaren 2. kuljettimen yläpohjan vetopäässä, kohdassa jossa ei juurikaan ole mekaanista kulutusta, jälkikäteen asennettun Hardox-kulutuslevyn paksuus on pysynyt muuttumattomana n. 4 vuoden käytön ajan. Tämäkin viittaa siihen, että yksinään korroosionopeus ei ole kovinkaan suuri. Pienikin korroosionopeus saattaa kuitenkin nopeuttaa kulumista huomattavastikin, kuten kappaleessa 6.3 todettiin.

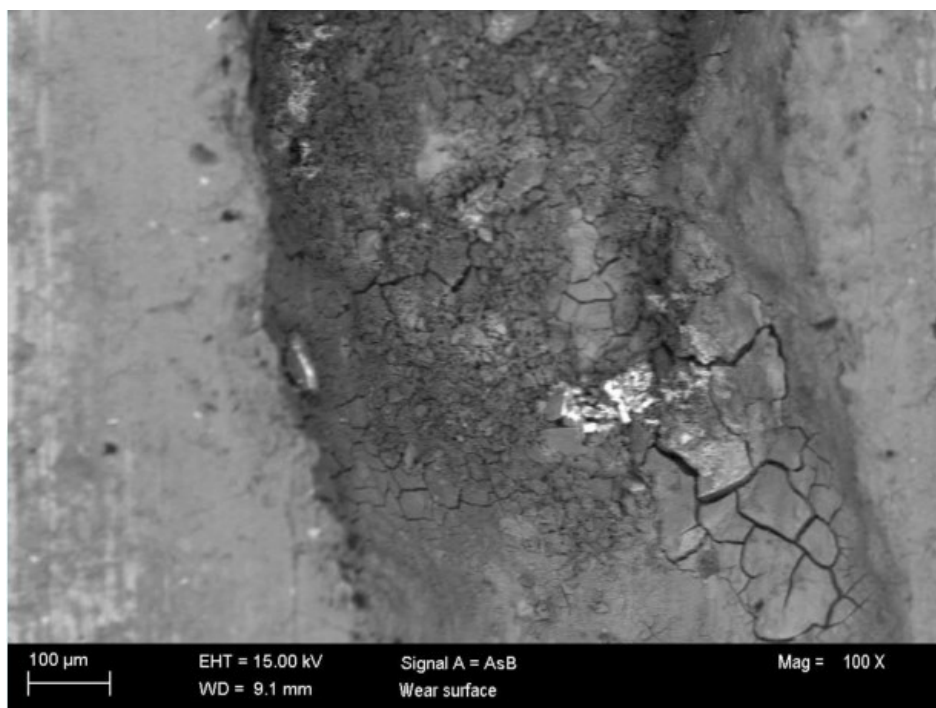
Puiden mukana kulkeutuvat ainekset sekä puista irtoavat materiaalit huuhtoutuvat vesiaukkojen kautta kuljettimen alapohjaan, johon kerääntyy näiden muodostamaa märkää sakkaa. Kääriäisen diplomityön (2001, s. 105) mukaan sakan sulfaattipitoisuus on huomattavasti korkeampi kuin sulatusveden sulfaattipitoisuus. Korkea sulfaattipitoisuus saattaa aiheuttaa pistesyöpymää alueilla, joihin kerääntyy sakkaa. Kuvassa 55 näkyy korroosion syövyttämiä kuoppia Pietarsaaren 2. kuljettimen alapohjassa.



Kuva 55. Pietarsaaren 2. kuljettimen alapohjan kuluminen.

Pietarsaaren 2. kuljettimen alapohjasta lähetettiin näytepala Tampereen teknilliseen yliopistoon tutkittavaksi. Tutkimuksen raportin (Hynnä et al. 2018) mukaan näytepalan kulumista on hallinnut korrosio ja on syytä epäillä pääasiallisen korroosiomuodon olevan mikrobikorrosio. Kuljettimien alapohjalle kerääntyvä puista irtoava orgaaninen materiaali ja lämmin vesi luovat hyvän kasvualustan mikrobieliöstölle.

Tutkimuksessa analysoitiin näytepalan pintaa pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) ja siihen liitettyllä EDS-analysaattorilla. Levyn pinnasta, urien ulkopuolelta, havaittiin pieniä abrasiiviseen kulumiseen viittaavia naarmuja. Metallin pinnalle muodostuu korroosiotuotekerros, joka on paksuin urien pohjalla. Korroosiotuotekerros on halkeillut (kuva 56), joten se ei suojaa alla olevaa metallia korroosiolta. Korroosiotuotekerroksen halkeilu saattaa johtua mekaanisesta kulutuksesta. Urien muodostuminen saattaa saada alkunsa abrasiivisen kulumisen muodostamista naarmuista. Tällöin naarmusta muodostuu anodinen alue, joka alkaa syöpyä korroosion vaikutuksesta.



Kuva 56. Mikroskooppikuva näytepalan korroosiourasta. (Hynnä et al. 2018)

Tutkimuksessa tutkittiin myös lähetetyn näytepalan kemiallinen koostumus ja kovuus. Näytteen kovuus ja kemiallinen koostumus vastasivat Hardox 400:n spesifikaatioita, mutta seosaineiden pitoisuudet olivat vastaavalla tavalla alhaisia, kuten Kymin kuljettimen näytepalastakin tehdyssä analyysissä. Näytepalasta ei havaittu merkkejä muokkauslujittumisesta. Tämä on oletettua, sillä alapohjalle ketjun keskilinjalle kohdistuu ainoastaan ketjun kolan ja yläpohjalta huuhtoutuvien kivien yms. kuormitus. Yläpohjasta ei saatu otettua näytepalaa milteään kuljettimelta tutkimuksia varten.

8.7.2 Kulumisen mittaaminen

Kuten aiemmin todettiin, kuljettimien pohjalevyjen paksuuksia ei ole viime vuosina mitattu, lukuun ottamatta Kaukaan 2. kuljetinta. Kaukaan kuljettimen kulumisen on mitattu kuvassa 57 esitetyllä tavalla syvyystömitalla ketjun päältä. Mittaus suoritettiin kuvassa näkyvällä tavalla ketjun keskeltä pohjan pintaan sekä ulko- ja sisälenkin linjasta, sivulevyn vierestä, kulmauran pohjaan, yhteensä viidestä kohdasta kuljettimen pituus-suunnassa. Tällä mittaustavalla ketjun keskeltä mitattuun tulokseen sisältyy sekä pohjan, että ketjun kuluma. Sivulevyjen vierestä mitattu tulos kertoo ainoastaan ketjun kuluman. Kuljettimelle on tehty kaksi mittausta, ensimmäinen mittausta tehtiin vuoden käytössä olon jälkeen ja toinen mittausta n. 7kk ensimmäisen jälkeen. Mittaustulokset ovat nähtävissä taulukossa 19.



Kuva 57. Ketjun ja pohjan kuluman mittaaminen Kaukaalla. (Raumaster 2018)

Taulukko 19. Kaukaan uudemman kuljettimen paksuusmittauksien tulokset. (Raumaster 2018)

	Mittapiste 1	Mittapiste 2	Mittapiste 3	Mittapiste 4	Mittapiste 5
Mittaus 10/2017					
Ketjun keskilinja	99,3	99	98,8	98,5	98
Ketjun ulkolenkin linjalta	100	99	99	99	98,3
Ketjun sisälenkin linjalta	99,5	99,5	98,5	99	98,6
Mittaus 04/2018					
Ketjun keskilinja	97,5	98,4	98,2	98	98
Ketjun ulkolenkin linjalta	98,8	98,6	98,6	98	98
Ketjun sisälenkin linjalta	98,6	98,8	98,3	98,2	98

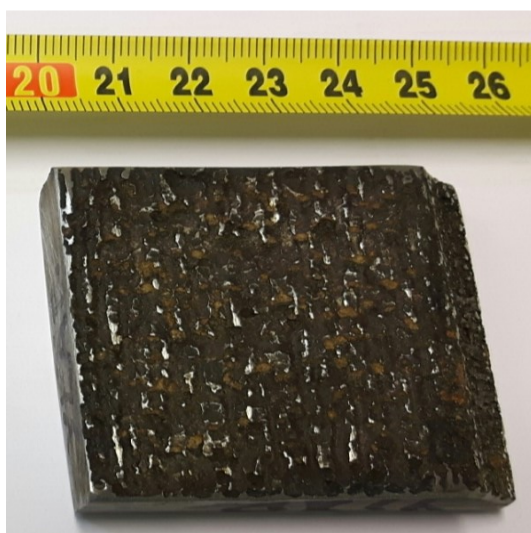
Taulukon 19 mittauksissa mittapiste 1 on lähimpänä vetopäätä ja muut pisteet tasaisin välimatkoin kohti lastausaluetta, mittapiste 5 on lastausalueella. Alkuperäinen mitta on kaikissa mittapisteissä ollut 100mm. Tuloksista voidaan päätellä, että kulumisen on ollut maltillista. Raumasterin mukaan normaali kuluma on 1 – 1,5 mm/vuosi käytettäessä Har-dox 400 -levyä. (Raumaster 2018)

Ketjun ulko- ja sisälenkin linjalta tehdyistä mittauksista nähdään ketjun kulumisen, jonka nopeus on ollut n. 1 mm/vuosi. Tällöin mittauksen mukaan pohjaan kuluneen uran syvyys olisi toisessa mittauksessa n. 0,4 mm. Mittauksista ei voida nähdä todellista pohjan kulumisnopeutta, sillä ketjun keskilinjan mittauksissa näkyvät sekä uran, että pohjan keskilinjan kulumisen. Pohjan yleisen kulumisnopeuden voidaan kuitenkin olettaa olevan tässä tapauksessa melko pieni.

Paksuusmittauksissa tulisi pyrkiä saamaan paremmin esille todellista kulumaa. Yksi mahdollisuus, ja kuljetinvalmistaja 2:n ehdottama tapa, on mitata pohjan paksuus suoraan työntömitalla yläpohjan vesireikien kohdalta. Mittaukset ovat näin helppo suorittaa uudestaan samasta kohdasta. Vesireikien kohdalta mitatessa mittaustuloksissa ei välttämättä näy suurimmat kulumakohteet, mutta mittaustuloksia seuraamalla voidaan saada jonkinlaista kuvaa kulumisnopeudesta.

Toinen mahdollisuus olisi mitata pohjan paksuus ultraäänipaksuusmittarilla. Kääriäisen diplomityössä (2001) pohjalevyn kulumista mitattiin ultraäänipaksuusmittarilla ja todettiin sen olevan epävarma mittaustapa. Käyttökohteessa tehtävissä mittauksissa mitausepävarmuutta aiheuttavat mm. mittarin kalibroinnin puute, mitattavan pinnan epätasaisuus ja olosuhteiden muutokset. Luotettavien tulosten saaminen on täten hankalaa. Useassa tämän työn tutkimuksen kohteena olevassa kuljettimessa nykyinen kulutusjohde on hitsattu vanhan materiaalin päälle. Ultraäänimittarilla mitattaessa vanha pohjamateriaali saattaa vaikuttaa tuloksiin joissain mittapisteissä. Tämä on huomattu Pietarsaareissa mitattaessa kuljettimen laital Levyjen kulumista ultraäänimittarilla. Pietarsaareissa nykyiset laitallevyt ovat hitsattu vanhojen kuluneiden levyjen päälle. Mittauksista ei ole kirjattu tuloksia talteen.

Kymin 2. kuljettimen yläpohja on kulunut paikoitellen puhki n. 2,5 vuoden käytön aikana. Pohjan kulumisesta ei ole tehty mittauksia, mutta pohjan nopea rikkoutuminen kertoo kulumisnopeuden olleen suuri. Kuormitusindeksien arvosta (taulukko 12) nähdään, että Kymin 2. kuljettimen kuormitus on samaa luokkaa Pietarsaaren 2. kuljettimen kanssa, jossa kuluminen on ollut hitaampaa. Kuvassa 58 näkyy Kymin 2. kuljettimen yläpohjasta otetun näytepalan pintaa ketjun keskilinjalta. Pinnassa näkyy selvästi korroosion vaikutus, joka on saattanut aiheuttaa suuren kulumisnopeuden.



Kuva 58. Kymin 2. kuljettimen yläpohjan näytepala ketjun keskilinjalta.

9. VALMISTAJIEN JA MAHDOLLISUUKSIEN KARTOITUS

Sulatuskuljettimien pahiten kuluvat kohteet ovat siis ketjut, ylä- ja alapohjan ketju-urat, t-palat sekä laitalevyt. Diplomityön yhteydessä tiedusteltiin laitevalmistajilta ja -toimittajilta heidän näkemyksiään sulatuskuljettimien pahimmista ongelmakohdista sekä niiden parannuskeinoista. Tavoitteena on, että pohjan käyttöikä on n. 8-10 vuotta ja ketjujen käyttöikä n. 4-5 vuotta, eli ketjut vaihdettaisiin kaksi kertaa pohjien käyttöaikana.

Valmistajilta saatujen kokemusten mukaan kuljettimen pohjan käyttöikä on n. 5-10 vuotta ja ketjun käyttöikä n. 4-7 vuotta. Tarkkaa käyttöikää on hankala arvioida, koska kulumisen riippuu niin monesta tekijästä. Pietarsaaren 2. kuljettimen hankintavaiheen sopimuspaperissa Raumaster arvioi kuljettimen ketjujen ja yläpohjan käyttöikäksi 4 – 6 vuotta, vuotuisen käyttöajan ollessa n. 7500 h. Kuljetinvalmistaja 2:n mukaan pohjan kulumisnopeuteen vaikuttavat pääasiassa ajettu puumäärä, sulatusveden kemiallinen koostumus ja puiden mukana tulevan hiekan määrä. Kuljettimen iällä ei ole kovinkaan suurta merkitystä kuljettimen kulumiseen.

Kuljetinvalmistaja 1:n mukaan sulatuskuljettimien heikoimmat kohdat ovat ketjut ja ylä- ja alapohja. Ketjujen kestävyys vaikuttaa suuresti ketjupyörän kulumisen. Jos ketjupyörän säde kuluu liian pieneksi, niin ketjun holkeille kohdistuva kuormitus nousee niin suureksi, että ne halkeavat. Kuljettimen, ja samalla myöskin koko kuorimolinjan, kulumiseen vaikuttaa sulatuskuljettimella tapahtuvan puiden pesun taso. Kuljetinvalmistaja 1:n mukaan puunipun tulisi olla tarpeeksi matala ja vesisuuttimia kahdessa rinnakkaisessa rivissä, jotta vesi huuhtelee tarpeeksi hyvin epäpuhtaudet pois puiden pinnoilta.

9.1 Ketjut

Ketjuvalmistaja 1:n mukaan nykyinen M630-A-250 -tyypin ketju on soveltuvin ja ehdottomasti yleisin ketjumalli sulatuskuljettimen ketjuksi. Heidän kokemusten mukaan parhaat materiaalit ketjuihin ovat:

- sivulevyt: FB1000, voidaan nuorruttaa levyn kulumisen hidastamiseksi
- tappi: BM311, nuorrutettuna ja induktiokarkaistuna
- holkki: C15, hiiletyskarkaistuna

Ketjuvalmistaja 1:n kokemusten mukaan sulatuskuljettimien ketjut ovat kestäneet n. 7 vuotta käytössä, mutta käyttöikä riippuu hyvin paljon olosuhteista. Ketjujen venyminen tapahtuu pääasiassa holkkien ja tappien kulumisen kautta, sivulevyt venyvät harvoin tässä

kokoluokassa. Ketjuvalmistaja 1:n ja kuljetinvalmistaja 1:n kokemusten mukaan holkkien ja tappien rasvauksen on todettu vähentävän niiden korroosiota ja kulumista, ja sillä voidaan saada vuosia lisää käyttöaika.

Ketjujen sivulevyt ovat 14 mm paksut. Paksummilla sivulevyillä pohjan kulumispinta-ala olisi suurempi ja ketjun pohjaan kohdistama paine pienempi, jolloin kulumisnopeus saattaisi olla pienempi. Ketjuvalmistaja 1:llä olisi mahdollista valmistaa ketjut paksummista sivulevyistä, mutta paksummat sivulevyt eivät enää mahtuisi normaalin valmistuslinjan läpi eikä voitaisi käyttää vakiokomponentteja. Tämän vuoksi ketjujen hinta nousisi kymmeniä prosentteja.

Kuljetinvalmistaja 2:n mukaan ketjunsivulevyjen kuluma ei ole määräävä tekijä ketjun kulumisessa, eikä sille ole määritetty minimiarvoa. Ketjun venymän raja-arvo on 30mm, joka mitataan 10 lenkin matkalta. Tällöin venymä on 3 mm/nivel, joka vastaa lähes induktiokarkaisusyvyttä. Ketjuvalmistaja 1:n mukaan, kun nivelen kulumisen ylittää karkaisusyvyden, niin ketju alkaa venyä nopeammin, koska pehmeämpi perusaine karkaisun alla kuluu nopeammin. Heidänkään mukaan ketjujen sivulevyjen kulumisen ei ole kriittinen tekijä ketjun toiminnan kannalta. Sivulevyjen kulumisen alkaa olemaan ongelma silloin, kun kolien rakenne alkaa kärsiä tai holkin hitsausseura lähestyy pohjaa.

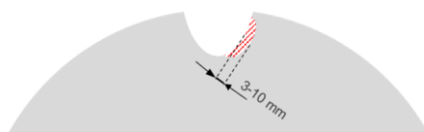
Lapua-Ketjun huolto-ohjeen (Lapua-Ketjut n.d.) ja Ketjurauman ketjuesitteen (Ketjurauma n.d.) mukaan ketjun murtolujuus on selvästi alentunut, kun ketjun sivulevyn kuluspinnasta (kuva 59) on kulunut 50%. M630-A-250 -ketjulla tämä tarkoittaa, että sivulevy saisi kulua molemmilta reunoilta 16 mm eli ketjun mitattu korkeus saisi olla 68 mm. Ketjuja mitatessa on huomioitava, että kolalankit kuluvat periaatteessa vain alapinnaltaan, koska paluupohjalla ketjulenkki on kolan kannattelemassa. Kolien välissä olevat lenkit kuluvat molemmilta pinnoilta, mutta niidenkin voidaan olettaa kuluvan hieman epätasaisesti, koska paluupohjalla niiden päällä ei ole kuormaa. 5 vuoden tavoitekäyttöäillä nämä tarkoittaisivat sivulevyille 3,2 mm/vuosi ja ketjun venymälle 6 mm/vuosi kulumisnopeuksia.



Kuva 59. Ketju on vaihtokunnossa, kun 50% sivulevyn kulumisvarasta on kulunut. (Mukaiillen Lapua-Ketjut, n.d.)

Ketjun sivulevyjen kulumisen vaikuttaa kolien toimintaan ja kulumiseen. Kun sivulevyt kuluvat tarpeeksi, niin kolat alkavat ottaa kiinni t-palan pintaan ja tällöin kola ja t-pala alkavat kulua. T-palat voitaisiin valmistaa kolia kovemmasta materiaalista, esim. Hardox 400, jolloin kolat kuluisivat t-paloja nopeammin ja ovat helpommin uusittavissa. Pohjan

kuluminen on kuitenkin osoittanut, että materiaalien kovuudet eivät välttämättä kuvasta kovinkaan hyvin kulumista sulatuskuljettimien toimintaympäristössä.



Kuva 60. Ketjupyörän kuluminen. (Mukaillen Ketjurauma, n.d.)

Kuten aiemmin todettiin ketjun holkkien kestävyys vaikuttaa ketjupyörän kulumisen. Ketjurauman ketjuesitteen mukaan ketjupyörä pitäisi vaihtaa tai kääntää, kun kulumisen on 3 – 10 mm (kuva 60). Ketjupyörän kääntämisellä saadaan uusi hammaspinta kosketuksiin ketjun holkin kanssa, sillä ketjupyörän pyörimissuunta vaihtuu.

9.2 Materiaalit

Kaikki yhteydenottoihin vastanneista laitetoimittajista suosittelevat pohjan materiaaliksi Hardox 400. Ketjuvalmistaja 1:n ja SSAB:n mukaan hieman kovempi Hardox 450 voisi olla myös varteenotettava vaihtoehto.

Kuljetinvalmistaja 1:n mukaan muilla tehtailla laitalevyjen materiaalina on käytetty S235-rakenneterästä tai Hardox 400. Hardoxin paremmuudesta laitalevyjen materiaalina ei heidän mukaansa ole aukotonta todistusaineistoa kaikissa olosuhteissa.

SSAB:n mukaan pohjan kulumiskestävyttä voidaan parantaa vaihtamalla kovempaan teräkseen. Kokonaiskulumisen kannalta vallitsevan kulumismuodon selvittäminen olisi tärkeää. Jos vallitsevana muotona on korroosio, niin kovempi teräs ei välttämättä auta. Hardox on hiiliterästä, joka ruostuu korroosiota aiheuttavissa olosuhteissa. Korroosiota paremmin kestävä kulutusteräs on suunnitteluasteella.

Kääriäisen diplomityössä (2001) valittua terästä valmisti saksalainen Dillinger. Teräs ei enää kuulu heidän valikoimaan, mutta sitä voidaan vielä valmistaa tilauksesta. Teräs on n. 2 kertaa kalliimpaa kuin tavallinen rakenneteräs. Valmistajan mukaan kyseistä teräslaatua käytettiin maatalouden kulumisalttiissa kohteissa. Heillä ei ole kokemuksia sen käytöstä voimakkaasti korrosoivissa ympäristöissä.

Ketjuista tehtyjen mittausten (kts. kappale 8.7.2 ja 10.1.1) perusteella kulumista tulisi pyrkiä siirtämään enemmän pohjasta ketjun sivulevyihin, eli toisin sanoen käyttää kovempaa materiaalia pohjissa. Murtolujuutensa puolesta ketjun sivulevyt saavat kulua reilusti käytön aikana. Kuljetinvalmistaja 2:n mukaan kuljettimen yläpohjan paksuudelle ei ole minimi raja-arvoa. Pohja on vaihtokunnossa, kun ketju kuluu pohjasta läpi.

Kuljettimen laitalevyissä ja t-paloissa voitaisiin periaatteessa käyttää erittäin kovia materiaaleja, sillä niiden tapauksessa ei tarvitse ottaa huomioon vastakappaleen kulumista.

Laitalevyissä tulee ottaa huomioon, että levyt ovat tarpeeksi paksuja, jotta ne eivät taivu liikaa, jolloin ne rikkoutuvat helposti tukirakenteiden kohdalta. Näidenkin osalta tulisi kuitenkin selvittää vallitseva kulumismekanismi, jotta voidaan valita sopiva materiaali. Silmämääräisesti vallitsevan kulumismekanismien määrittäminen on haastavaa, sillä selvätkin kulumista aiheuttaa sekä korroosio, että mekaaninen kuluminen. Kovempi materiaali saattaa auttaa kulumiskestävyudessa, jos mekaaninen kuluminen hallitsee kulumistapahtumaa, mutta jos korroosio on vallitseva mekanismi ei kovemmasta materiaalista ole välttämättä apua. Ruostumattomat teräkset taas ovat melko pehmeitä, joten vaikka korroosio olisikin vallitseva kulumismekanismi voi kulumisnopeus nousta siltikin, vaikka korroosionkesto paranisi.

9.3 Huoltotoimenpiteet

Raumasterin mukaan sulatuskuljettimien kuluvat osat, joiden kuntoa on seurattava ovat seuraavat (Raumaster Oy 2015):

- kuljetinketjut
- ketjupyörät
- ylä- ja alapohjan pintalevyt
- sulatusvesisuuttimet

Raumasterin suosittelemina ennakkohuoltotöinä tarkastetaan kerran kuukaudessa sulatusvesiputkiston ja -suuttimien kunto, vedenlämmittimien tiiveys, kuluvien osien kunto, vesirännien tukokset sekä kuljettimen anturoinnin toiminta. Pohjien kuluman mittaus tulisi suorittaa puolen vuoden tai vuoden välein sekä lastausosan ja rummun syöttöosan hiekkavaimennuksen tarkastus vuoden välein. Lisäksi sulatusveden pitoisuuksia tulisi seurata jatkuvasti. Kuljetinvalmistaja 1:n mukaan suositeltavia ennakkohuoltotöitä olisi visuaaliset tarkastukset 6 kk:n välein sekä kuluvien osien kuluman mittaus 12 kk:n välein. Sekä vetopyörien kääntö tai vaihto muutaman vuoden välein.

Ketjuvalmistaja 1 ja kuljetinvalmistaja 1 suosittelevat ketjujen tappien ja holkkien rasvausta. Sykliksi tähän riittäisi nykyinen tehdasseisokkien sykli 1,5 v. Ketjujen rasvaus on suuritöinen projekti, sillä ketjuissa on holkkeja n. 6000 kpl. Rasvaukseen tarvitaan n. 160 miestyötuntia.

9.4 Pinnoitus kulumisalueilla

Kirjallisuustutkimuksen perusteella varteenotettavin pinnoitusmenetelmä on hitsauspinnoitus. Muilla menetelmillä valmistetut pinnoitteet kestävät hyvin kulutusta ja ovat kovia, mutta ovat hyvin ohuita. Sulatuskuljettimen pohjan pinnoituksessa tulee ottaa myös huomioon ketjun sivulevyjen kuluminen, joten pinnoitemateriaali ei voi olla miten kova tahansa.

Yhteydenottoihin vastanneista pinnoitusta tekevästä yrityksistä suurin osa suositteli käytettäväksi Hardoxia pohjan materiaalina eikä heillä ollut tarjota sopivaa pinnoitetta kohteeseen. Pinnoitusyritys 1:llä olisi heidän kehittämä pinnoite, joka yhtiön edustajan mukaan sopisi sulatuskuljettimen pinnoitukseen. Yhtiö ei halua tietoja pinnoitteesta tai menetelmästä julkisuuteen.

Pinnoitusyritys 2 suositteli kulumisalueille hitsauspinnoitusta. Hitsauspinnoituksen hinta on paikan päällä tehtynä 4500 €/m² ja pinnoitusyritys 2:n tehtaalla tehtynä 3500 €/m². Sulatuskuljettimissa pinnoitettavaa pinta-alaa on n. 40-50 m², joten hitsauspinnoitus tulisi hyvin kalliiksi. Pietarsaaren kuljettimista on aiemmin huonoja kokemuksia hitsauspinnoituksista.

Pinnoitusyritys 3:n mukaan tekniset keraamit voisivat soveltua hyvin sulatuskuljettimen pohjan kulutusmateriaaliksi. Keraamit ovat kestävätkä hyvin kulutusta ja korroosiota, joiden lisäksi ne ovat hyvin sileitä, jolloin ketjun sivulevyjen kulumisen ei pitäisi muodostua ongelmaksi. Heidän toimittamissaan keraamilevyissä keraamipalat ovat kiinnitettynä alla olevaan kumiin ikään kuin mosaiikkikuviona. Tällöin keraamipalat pääsevät joustamaan eikä keraamien hauraus aiheuta ongelmia. Heidän toimittamat keraamilevyt ovat menneet pääasiassa kaivosteollisuuteen, jossa levyjen vaihtosykli on tyypillisesti kuukausia. Keraamilevyjen ja kumin kestävydestä pitkäaikaisemmassa käytössä korrosoivassa ympäristössä heillä ei ole kokemuksia.

9.5 Sulatusvesi

Laitetoimittajien mukaan sulatusvesistä otetuissa näytteissä (kts. taulukko 14) ei ole hälyttäviä arvoja. Valmistaja 1:n mukaan Kymin näytteen pH-arvo 4,8 on hieman liian alhainen, mutta heidän mukaan sillä ei pitäisi juurikaan olla vaikutusta. SSAB:n mukaan sulatusvesissä olevat kloridipitoisuudet ovat suhteellisen pieniä. Vesijohtovedessä tulisi kloridipitoisuuden olla pienempi kuin 25 mg/l korroosion ehkäisemiseksi. Hardox, kuten hiiliteräksket yleisestikin, pyrkivät passivoitumaan emäksisissä ympäristöissä. Sulatusveden ollessa liian emäksistä, se alkaa vaahtoamaan, joka aiheuttaa ongelmia kuorimolla. Kuljetinvalmistaja 2:n mukaan kuorimon kiertoveden vaatimukset ovat taulukon 20 mukaiset.

Taulukko 20. Kuorimon vesien vaatimukset.

	Suositus	Max. sallittu
pH	6,5 – 7,5	6,0 – 8,0
Kloridi	25 mg/l	50 mg/l
Sulfaatti	50 mg/l	100 mg/l
Haihdotusjäännös	200 mg/l	300 mg/l
Hehkutusjäännös	150 mg/l	200 mg/l

10. KEHITYSIDEAT JA TULOKSET

Sulatuskuljettimien kuluvien kohteiden kunnossapitokustannusten optimoimiseksi tulisi keskittyä pohjalevyistä sekä ketjuista aiheutuviin kustannuksiin. Näistä kahdesta komponentista aiheutuu n. $\frac{3}{4}$ kaikista sulatuskuljettimien kunnossapitokustannuksista. Pohjalevyjen ja ketjujen kulumiseen vaikuttavat ainakin seuraavat asiat:

- ajettu puumäärä ja puulaji
- puiden mukana tulevien kivien ja hiekan määrä
- sulatusveden aiheuttama korroosio
- kuljettimen konstruktio
- pohjan ja ketjun materiaalit
- ketjun tappien ja holkkien rasvaus

Suuri ajettu puumäärä kuluttaa pohjaa ja ketjua, mutta ajettua puumäärää ei ole kuitenkaan mielekästä vähentää. Puiden mukana tulevien kivien ja hiekan määrä riippuu hyvin monesta asiasta, kuten mm. puulajista ja toimitustavasta. Näihin ei aina pystytä itse vaikuttamaan. Yksi mahdollisuus olisi jollain tapaa käsitellä puut ennen sulatuskuljettimeen syöttämistä, jotta ne olisivat puhtaampia. Suuresta puumäärästä johtuen käsittelyn toteutus vaatisi huomattavaa suunnittelutyötä.

Kustannusten optimointi käsittää tässä yhteydessä kustannusten vähentämisen sekä ennakoitavuuden parantamisen. Kustannusten ennakoitavuus on saavutettavissa ennakkohuollon lisäämisellä. Ennakkohuollon avulla voidaan pitää laite ja sen käyttöolosuhteet toivotun mukaisina ja täten ennaltaehkäistä kulumista jossain määrin. Ennakkohuoltona tehtävien tarkastusten perusteella voidaan arvioida komponenttien kuntoa sekä mittaustulosten perusteella voidaan arvioida jäljellä olevaa käyttöaika. Mittaustuloksista saadaan tärkeää tietoa materiaalien käyttäytymisestä käyttökohteessa. Näitä tietoja voidaan hyödyntää uusien kuljettimien ja korjaustoimenpiteiden ajoituksen ja materiaaliavalintojen suunnittelussa.

Pietarsaaren 2. kuljettimen yläpohja ja ketjut mitattiin liitteessä 3 esitetyllä tavalla. Yläpohjan mittauksesta ei voida suoraan nähdä nykyisen kulutuslevyn paksuutta, sillä kulutuslevy on hitsattu vanhan pohjamateriaalin päälle. Seuraavien mittauksien tuloksien perusteella pystytään kuitenkin arvioimaan kulumisnopeutta ja sen avulla kulutuslevyn kestoikää. Ketjujen sivulevyjen ja venymien mittausten tulokset ovat esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21. Pietarsaaren 2. kuljettimen ketjujen mittaustulokset.

	1. ketju		5. ketju		10. ketju	
Keskimääräinen venymä (mm)	14,67		12,33		11,00	
Keskimääräinen venymä vuodessa (mm / v)	3,83		3,22		2,87	
-lenkki	kola	sisä	kola	sisä	kola	sisä
Keskimääräinen kuluma (mm)	3,18	7,22	2,82	7,41	3,38	7,32
Keskimääräinen kuluma vuodessa (mm / v)	0,83	1,88	0,73	1,93	0,88	1,91

Tuloksista nähdään, että ketjujen sisälenkit kuluvat hieman yli kaksi kertaa nopeammin kuin ketjujen kolalennit. Tämä on oletettua, sillä mitatut sisälenkit ovat valmistettu pehmeämmästä teräksestä, kuin kolalennit sekä kolalennit kuluvat vain toiselta sivultaan, kuten aiemmin todettiin. Tulosten perusteella näyttäisi, että toinen laitimmaisista ketjuista venyy n. 1 mm / vuosi nopeammin, kuin toinen laitimmainen ketju. Yhden mittauksen perusteella ei voida kuitenkaan tehdä varmoja johtopäätöksiä.

Näiden tulosten perusteella näyttäisi siltä, että ketjujen käyttöikä määräytyy venymän perusteella. Mitattujen arvojen perusteella ketjujen käyttöikä olisi n. 7,8 – 10,5 vuotta, jos venymän raja-arvona pidetään 30mm. Tämän perusteella ketjuja ei ole tarpeellista rasvata säännöllisesti.

10.1 Ennakkohuoltotoimenpiteet

Kuljetintoimittaja Raumasterin suosittelemat ennakkohuoltotoimenpiteet lueteltiin kapaleessa 9.3. Käyttämällä toimittajan suosituksia, tässä työssä kerättyjä huomioita ja yrityksessä hyväksi todettuja käytäntöjä voidaan suunnitella ennakkohuoltosuunnitelma sulatuskuljettimille, joka on esitetty taulukossa 22.

Taulukko 22. Sulatuskuljettimien ennakkohuoltosuunnitelma.

Sykli	Toimenpiteet
1 kk	<ul style="list-style-type: none"> • Sulatusvesisuuttimien puhdistus • Visuaaliset tarkastukset <ul style="list-style-type: none"> ○ Tarkastetaan sulatusputkiston ja -suuttimien kunto ○ Tarkastetaan vedenlämmittimien vuodot ○ Tarkastetaan kolaketjujen kireys ja kuluminen ○ Tarkastetaan, että kolaketjuissa ei ole vääntyneitä lenkkejä sekä ketjut kulkevat suorassa ○ Ylä- ja alapohjan kuluminen ○ T-palojen kuluminen ○ Laitalevyjen kuluminen ○ Ketjupyörien kuluminen ○ Vesirännien tukokset ○ Pyörintävahtien toiminta ○ Ketjun katkeamisvahdin toiminta ○ Paluuketjun ruuhkavahdin toiminta ○ Lastausosan törmäysanturin toiminta
2 kk	<ul style="list-style-type: none"> • Sulatusvesinäytteen otto ja analyysi • pH-mittauksen kalibrointi/kalibroinnin tarkastus
12 kk	<ul style="list-style-type: none"> • Lastausosan ja rummun syöttöosan mahdollisten hiekkavaimennuksien täyttöaste • Yläpohjan paksuuden mittaus • Alapohjan paksuuden mittaus • Ketjujen sivulevyjen korkeuden mittaus ja venymän mittaus • Ketjupyörän mittaus
? kk	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ketjupyörien kääntö</i>

Pietarsaaressa ja Kaukaalla ennakkohuoltotoimenpiteet voidaan suorittaa osastoseisokkien aikana. Kahden viikon välein pidettävissä osastoseisokeissa suoritetaan aina huolto-toimenpiteet toiselle kuljettimista. 12 kk:n välein tehtävät mittaukset kestävät kahdelta henkilöltä n. 6 h, joten nekin voidaan suorittaa päivän mittaisen osastoseisokin aikana.

Kymillä, jossa ei pidetä säännöllisiä osastoseisokkeja, ennakkohuoltotöiden suorittaminen vaatii enemmän suunnittelua ja aikataulutusta. Säännöllisten osastoseisokkien pitä-

misen mahdollisuutta tulisi harkita. Säännöllisen ennakkohuollon avulla pysytään paremmin selvillä kuljettimien kuluvien kohteiden kunnosta ja ehditään tekemään korjaavia toimenpiteitä ennen komponenttien rikkoutumista.

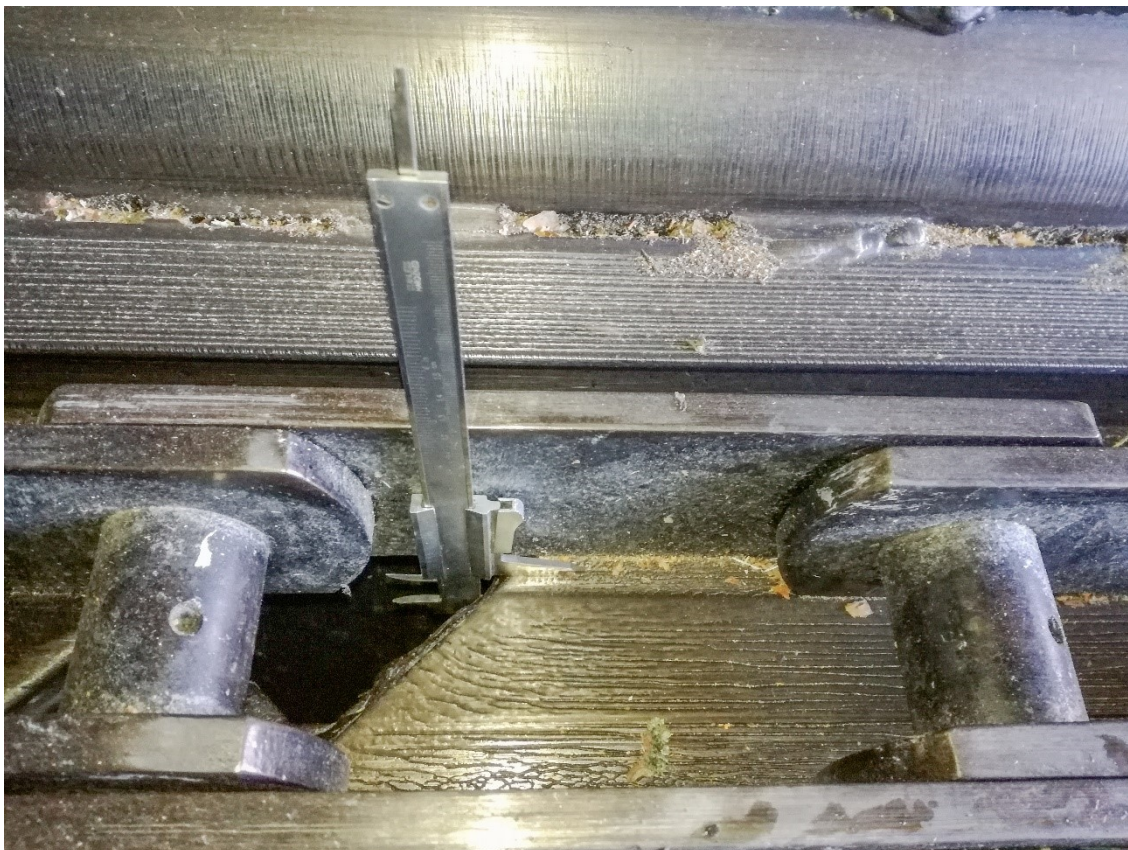
Pietarsaaressa ja Kaukaalla kiertovesikaivo tyhjenetään pääsääntöisesti osastoseisokkien yhteydessä. Kymillä kiertovesikaivo tyhjenetään pääasiassa 1,5 vuoden välein pidettävän tehdasseisokin aikana. Tiheämmän kiertovesikaivon tyhjennyksen ja uudelleen täytön voidaan olettaa estävän liian suurien pitoisuuksien kerääntymisen kiertoveteen.

Laittevalmistajat suosittelevat ketjun tappien ja holkkien rasvausta. Pietarsaaren kuljettimelle tehdyn mittauksen perusteella tälle ei kuitenkaan ole tarvetta. Ketju näyttäisi nyt jo kestävänsä toivotun käyttöiän venymän osalta. Jos mittauksissa havaitaan ketjun liian nopeaa venymää, voidaan holkkien ja tappien rasvauksen avulla saada hieman lisää käyttöaika. Ketjupyörien kääntö tehdään n. puolessa välissä ketjupyörien elinkaarta ja tämä määritetään ketjupyörien kunnan perusteella.

10.1.1 Säännölliset mittaukset

Sulatuskuljettimien kuluvien kohteiden kuluminen tulisi mitata säännöllisesti ja kirjata tulokset muistiin. Säännöllisesti mitattavia kohteita tulisi olla ainakin yläpohjan paksuus, ketjujen sivulevyjen korkeudet ja ketjun venymä sekä mahdollisesti myös alapohjan paksuus, vetopyörän kuluminen ja laitalevyjen paksuudet.

Kuljetinvalmistaja 2:n suosittama tapa on mitata yläpohjan paksuus vesiaukkojen kohdalta (kuva 61). Tällöin voidaan mitata suoraan ketjun alla olevan materiaalin paksuus. Vanhemmissa kuljettimissa, joissa alkuperäisen pohjan päälle on lisätty uutta kulutuslevyä ei tuloksista saada heti selville kulumisnopeutta. Säännöllisten mittausten perusteella voidaan arvioida kulumisnopeutta ja sitä kautta pohjan kestoikää. Vesiaukkojen kohdalta mitattaessa tuloksista ei välttämättä näy suurimmat paikalliset kulumisnopeudet, mutta tuloksista saadaan kuitenkin yleiskuvaa kulumisnopeudesta.



Kuva 61. Pohjan paksuuden mittaus vesiaukon kohdalta työntömitalla.

Ketjun venymä mitataan 10 lenkin pituudelta. M630-A-250 -ketjulla alkuperäinen pituus on 2500 mm ja ketju on vaihtokunnossa, kun venymä on 30 mm. Ketjun sivulevyjen korkeus voidaan mitata suoraan ketjun päältä (kuva 62). Mittauksissa tulee mitata kolalenkin korkeus sekä kolien välillä oleva sisempi lenkki. Tällöin nähdään paremmin ketjun yleistä kulumista, sillä kolalenkit kuluvat eri tahtiin kuten aiemmin todettiin. Pietarsaaren kuljettimien ketjuissa kolalenkit ovat vielä valmistettu kovemmasta materiaalista, kuin kolien välillä olevat lenkit.



Kuva 62. Ketjun sivulevyn korkeuden mittaaminen työntömitalla.

Mittaustulosten perusteella saatua kulumisnopeutta voidaan verrata kuljettimelle laskettuun kuormitusindeksiin (kts. taulukko 12). Tällä tavoin kuljettimien kulumisnopeuksia pystytään paremmin vertailemaan keskenään ja tekemään parempi arvio materiaalin soveltuvuudesta kuljettimen materiaaliksi. Kuormitusindeksin arvosta saadaan tarkempi arvio, jos käynti- ja puumäärätiedot kerätään monen vuoden ajalta.

Mekaaninen kuluminen riippuu suoraan kuljettimen kuormituksesta ja periaatteessa korroosio on ajan funktio. Korroosio vaikuttaa kuitenkin aiheuttavan suurta syöpymää vain niillä alueilla, joissa mekaaninen kuormituskin on suurta, eli kokonaiskulumisen riippuu korroosion ja mekaanisen kulumisen synergisestä vaikutuksesta. Tällöin voidaan arvella kokonaiskulumisen olevan myös jossain määrin riippuvainen kuormituksesta.

10.1.2 Säännölliset vesianalyysit ja pH:n kalibrointi

Säännöllisten vesianalyysien avulla voidaan seurata sulatusveden pitoisuuksia ja varmistua, että pitoisuudet eivät nouse liian korkeiksi. Vesianalyysi tulisi ottaa aina ennen kiertovesikaivon tyhjennystä, jolloin pitoisuudet ovat oletettavasti suurimmat. Analyyseissa tulisi mitata ainakin seuraavat arvot:

- Kloridipitoisuus
- Sulfaattipitoisuus

- pH
- Alkaliteetti
- Johtokyky
- Haihdutus- ja hehkutusjäännös

Pitoisuuksien raja-arvoina voidaan käyttää taulukossa 20 esitettyjä kuljetinvalmistaja 2:n vaatimuksia kuorimoveden pitoisuuksille. Taulukossa esitetyt raja-arvot ovat melko suuria ja tämän työn yhteydessä tehdyissä analyyseissa pitoisuudet olivat pääasiassa rajojen alla. Säännöllisesti tehtävistä analyyseista olisikin tärkeämpää seurata, että mitkään pitoisuudet eivät lähde kasvamaan. Pitoisuuksien kasvun yhteyttä kulumisnopeuteen voidaan selvittää, jos huomataan pitoisuuksien nousevan.

Korroosionopeus ei riipu pelkästään mitatuista arvoista vaan mm. lämpötilalla ja happipitoisuudella on vaikutusta korroosionopeuteen. Sulatuskuljetin on avoin systeemi, joten happipitoisuuteen ei voida juurikaan vaikuttaa ja talvella sulatusveden on oltava lämmintä, jotta puut saadaan sulatettua. Kesällä tulisi kuitenkin käyttää mahdollisimman viileää vettä, sillä korkea lämpötila nopeuttaa korroosiota.

Vesianalyysien yhteydessä tulisi tarkistaa, että kiertoveden jatkuva pH:n mittaus näyttää oikeita arvoja. Jos pH-mittaus ei anna oikeita lukemia, niin järjestelmän pH:n säätö ei toimi oikein ja kiertoveden todellinen pH saattaa laskea tai nousta liikaa. Kiertoveden pH:n säätöön tulisi käyttää lipeää. Alkalisuodoksen sisältämät kloridi- ja sulfaattipitoisuudet lisäävät turhaan sulatusveden korrodoivuutta.

10.2 Materiaalivalinnat

Saatavilla olevien tietojen perusteella Hardox 400 on varteenotettava materiaali sulatuskuljettimen pohjamateriaaliksi, ja lähes kaikkien toimittajien suosittama. Kymillä Hardox 400 kesti käytössä vain n. 2 vuotta, mutta siellä voidaan olettaa erittäin voimakkaan korroosion sekä ajotavan olleen syynä nopeaan kulumisnopeuteen. Kaukaalla 2. kuljetin on myös valmistettu Hardox 400:sta ja siellä kuluminen on ollut hitaampaa.

Kaukaan kuljettimen kulumisnopeudesta saadaan tietoa Hardox 400:n soveltuvuudesta sulatuskuljettimen materiaaliksi. Sovellettaessa tietoja muille tehtaille tulisi huomioida Kaukaan kuljettimien pienempi kuormitus. Täten kestoian voidaan olettaa olevan pienempi muilla tehtailla. Kuormitusindeksien arvoista (kts. taulukko 12) voidaan päätellä, että samanlaisissa olosuhteissa kulumisnopeus on nopeampaa Kymin kuljettimissa kuin Kaukaan kuljettimissa. Kymin 2. kuljettimen kuormitusindeksi on n. 2,9 kertaa suurempi kuin Kaukaan 2. kuljettimen.

Lisäksi korroosion vaikutus tulee ottaa huomioon. Samanlaisissa olosuhteissa kuljettimille laskettu sulatuskuljetinindeksi (kaava 21), joka kuvaa kulumisnopeutta tietyllä

kuormituksella, tulisi olla lähestulkoon saman suuruinen. Tällöin, jos sulatuskuljetinindeksi on huomattavasti suurempi jollain kuljettimella verrattuna muihin kuljettimiin, voidaan päätellä, että kuljettimen olosuhteet aiheuttavat nopeampaa kulumista. Nopeampaa kulumista voivat aiheuttaa mm. voimakasta korroosiota aiheuttava sulatusvesi ja suuri määrä puiden mukana tullutta hiekkaa ja kiviä. Ajettava puulaji vaikuttaa myös kuljettimen kulumisnopeuteen ja kokemusperäisesti on ajateltu havupuiden kuluttavan kuljettimia nopeammin. Tarkasteltavista kuljettimista nopeimmin kuluneella, Kymin 2. kuljettimella, ajetaan pelkästään koivua ja Kaukaan 2. kuljettimella, jonka on todettu kuluvan maltillisesti, ajetaan pelkästään havua.

$$S_i = \frac{V_a}{K} \quad (21)$$

jossa

S_i on sulatuskuljetinindeksi

V_a on keskimääräinen kulumisnopeus vuodessa (mm^3 / a)

K on kuormitusindeksi

Säännöllisten vesianalyysien avulla voidaan varmistua, että sulatusveden pitoisuudet eivät nouse liian korkeaksi aiheuttaen nopeaa korroosiota. Lisäksi Kaukaalla sulatusveteen lisättävät limantorjunta-aine sekä vaahdonestoaine ehkäisevät mikrobien aiheuttamaa korroosiota, jonka todettiin olevan suurin kulumista aiheuttava tekijä Pietarsaaren 2. kuljettimen alapohjan näytepalasta tehdyssä tutkimuksessa. Vastaavien aineiden käyttö muillakin tehtailla voisi siis olla kannattavaa.

Pohjien uusimisen yhteydessä ketju-urasta tulisi toimittaa näytepala tutkimuksiin, jotta ketjun sivulevyjen alle kuluvan uran kulumismekanismit voitaisiin selvittää tarkasti. Kulumismekanismi vaikuttaa optimaalisen materiaalin valintaan. Alapohjasta ketjun keskilinjalta otetusta näytepalasta ei havaittu merkkejä muokkauslujittumisesta, mutta ketjun sivulevyjen alla ja yläpohjalla kokonaisuudessaan kuormitus on huomattavasti suurempaa, jolloin muokkauslujittuminenkin on mahdollista. Karkeasti voidaan sanoa, että jos olosuhteet ovat kevyet ja muokkauslujittumista ei tapahdu, niin kovempi materiaali parantaa kulumiskestävyyttä. Jos olosuhteet ovat rajut ja metallissa tapahtuu muokkauslujittumista, on metallin sitkeys tärkeämpi ominaisuus, kuin kovuus.

Kuljettimen materiaalina voitaisiin käyttää kovempaa Hardox-levyä. Tällöin oletettavasti ketjun sivulevyt kuluisivat aiempaa nopeammin, mutta Pietarsaaren 2. kuljettimen ketjuille tehdyn mittauksen perusteella sivulevyillä on varaa kulua hieman nopeammin. Kovempi kulutusteräs kestää oletettavasti paremmin mekaanista kulutusta, mutta koska myös korrosio vaikuttaa kulumiseen sulatuskuljettimissa, on kokonaiskulumisnopeuden arviointi kovemmallalla kulutusteräksellä hankalaa. Hardox 450 on n. 3 – 4 % kalliimpaa ja

Hardox 500 on n. 10 % kalliimpaa kuin Hardox 400. Sulatuskuljettimen pohjien korjaustöissä työn ja materiaalien osuudet ovat olleet n. 50/50. Tällöin kalliimmista materiaalikustannuksista vain puolet tulevat korjauksen kokonaishintaan, eli Hardox 500:sta valmistettu kuljettimen pohja olisi vain n. 5 % kalliimpi.

Mittausten perusteella määritetyn kuljetinkohtaisen kulumisnopeuden perusteella levyjen paksuuksia voidaan optimoida halutun kestoian mukaan. Tällä hetkellä, kun kulumisnopeudesta ei ole tarkkaa tietoa, levyjen paksuudet ovat hyvä valita hieman varman päälle.

10.3 Yhteenveto kehitysideoista

Kaikissa kuudessa kuljettimessa on tällä hetkellä Hardox 400:sta valmistettu kulutus-pohja. Hardox 400 on kovuutensa ja mekaanisen kulutuksenkeston kannalta sopivalta vaikuttava materiaali sulatuskuljettimeen. Kaikki yhteydenottoihin vastanneet laitetoimittajat ja -valmistajat sekä suurin osa pinnoitusta tekevästä yrityksistä suosittelivat Hardoxia kulutus-pohjan materiaaliksi. Sulatuskuljettimissa voitaisiin käyttää kovempaaakin Hardox-levyä, mutta kovemman materiaalin vaikutusta kestoikään on hankala arvioida.

Hardoxin soveltuvuudesta voidaan nyt kerätä tietoja käyttöolosuhteissa. Eri kuljettimille laskettujen sulatuskuljetinindeksien vertailun avulla voidaan yrittää selvittää eri olosuhteiden vaikutusta kulumiseen. Kymillä Hardoxista valmistettu sulatuskuljettimen pohja kului puhki n. 2,5 vuodessa. Kaukaalla samasta materiaalista valmistettu pohja on kulunut huomattavasti hitaammin. Syyksi nopeaan kulumiseen Kymillä epäillään suuria kloridipitoisuuksia sulatusvedessä, mutta ilman mittaustuloksia asiasta ei ole varmuutta. Kymillä kuljettimien kuormitus on myös huomattavasti suurempaa kuin Kaukaalla, joten kulumisnopeuksien absoluuttinen vertailu ei ole mielekäästä. Tämän diplomityön yhteydessä kerätyillä puumäärillä ja ajoparametreilla kuormitus on suurinta Kymin kuljettimilla, jolloin kulumisnopeuskin on suurin. Vertailukelpoisten kulumisnopeusmittausten puuttuessa ei voida laskea vertailukelpoisia sulatuskuljetinindeksejä kuljettimille. Indeksien vertailusta voitaisiin päätellä, onko Kymin olosuhteet erityisen ankaria sulatuskuljettimien kulumisen kannalta. Puumäärä- ja ajoparametritietoja tulisi myös kerätä usealta vuodelta, jolloin vuosittaisten vaihteluiden vaikutukset tuloksiin vähenisivät.

Korroosiolla on suuri merkitys kokonaiskulumiseen sulatuskuljettimessa. Tästä syystä säännölliset sulatusvesianalyysit ovat tärkeitä, jotta voidaan varmistua, ettei mitkään korroosion kannalta haitalliset pitoisuudet pääse kasvamaan liian suuriksi. Kaukaalla sulatusveteen lisätään vaahdonestoainetta ja limantorjunta-ainetta. Näiden aineiden on todettu vähentävän mikrobien aiheuttamaa korroosiota, jonka todettiin olevan mahdollisesti suurin kulumista aiheuttava tekijä Pietarsaaren 2. kuljettimesta otetussa näytepalassa. Vastaavien aineiden käyttö Pietarsaarella ja Kymillä voisi siis olla tarpeen.

Uusien kuljettimien tai vanhojen kuljettimien korjaushankkeiden suunnittelu-/tilausvaiheessa tulisi toimittajan kanssa ottaa esille edellisistä materiaaleista kerätyt kulumistiedot

sekä sulatusveden pitoisuudet. Tällöin voidaan faktoihin perustuen valita uutta materiaalia ja arvioida niiden käyttöikä. Materiaalin valinnassa voidaan tehdä myös yhteistyötä teräsvalmistajien kanssa, kun voidaan esittää minkälaisessa korroosioympäristössä ja minkälaisella kuormituksella teräs on ja minkälaisia kulumisnopeuksia on mitattu.

Pietarsaaressa käytettyjen FB-ketjutekniikan valmistamat ketjut näyttävät soveltuvan hyvin käyttökohteeseen ja täyttävän tavoitellun käyttöiän. Kymillä ja Kaukaalla ketjut ovat eri valmistajien valmistamia ja niissä on käytetty erilaisia lämpökäsittelyjä. Tulevat mitaukset näyttävät miten ne toimivat sulatuskuljettimissa.

Tämän diplomityön tutkimuskysymyksenä oli: Voidaanko sulatuskuljettimien kuluvien kohteiden kunnossapitokustannuksia optimoida? Työn tuloksien perusteella sulatuskuljettimien kulumista voidaan ennakoida entistä paremmin ja tunnistaa muuttuneet olosuhteet, jotka vaikuttavat kulumiseen. Työn tuloksena saadaan myös paremmat eväät kuljettimissa käytettävän materiaalin valintaan.

Tämän hetken tiedoilla materiaalien kestoiän arvioiminen sulatuskuljettimissa on lähes täysin arvausta. Tästä syystä eri vaihtoehtojen elinkaarikustannusten laskeminen ei ole mielekäästä. Säännöllisten mittausten perusteella materiaalin kestävyyttä voidaan arvioida tarkemmin, jolloin kustannuslaskelmienkin tekeminen on mahdollista.

11. YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli tutkia mahdollisuuksia sulatuskuljettimien kuluvien kohteiden kunnossapitokustannusten optimointiin. Työn aikana ei päästy tekemään varsinaista optimointia, mutta työn tuloksien perusteella voidaan sulatuskuljettimien kulumista seurata aiempaa paremmin ja täten arvioida jäljellä olevaa käyttöikää sekä tunnistaa kulumiseen vaikuttavien olosuhteiden muutoksia.

Diplomityön tuloksena luotiin ennakkohuoltosuunnitelma sulatuskuljettimille, joka otettiin käyttöön Pietarsaaren kuljettimille. Suunnitelma koostuu 1 kk:n välein tehtävästä visuaalisesta tarkastuksesta sekä vesisuuttimien puhdistuksista, 2 kk:n välein tehtävästä sulatusvesianalyysistä sekä pH-mittauksen kalibroinnista ja 12 kk:n välein tehtävästä kuljettimen mittauksesta. Lisäksi ketjupyörät tulee kääntää n. puolessa välissä elinkaarta, mutta tälle ei määritetty etukäteen sykliä.

UPM:n sulatuskuljettimissa on käytetty aiemmin monia erilaisia materiaaleja, mutta nyt kaikissa kuljettimissa sulatusosalla pohjan kulutusmateriaalina on Hardox 400. Hardox on kestänyt vaihtelevasti sulatuskuljettimen pohjamateriaalina. Tällä hetkellä saatavilla olevan tiedon perusteella Hardox vaikuttaa varteenotettavimmalta materiaalilta kulutusmateriaaliksi.

Lähes kaikki laitevalmistajat/-toimittajat suosittelivat myöskin Hardoxia. Hardoxin soveltuvuudesta sulatuskuljettimen materiaaliksi voidaan nyt kerätä tietoa käyttöolosuhteissa. Kymillä Hardoxista valmistettu kuljetin kului puhki n. 2,5 vuodessa, mutta Kaukaalla Hardoxista valmistettu kuljetin on kulunut huomattavasti hitaammin.

Kymin tapauksessa vääränlaisen sulatusveden aiheuttama nopea korroosio saattaa selittää nopean kulumisen, mutta kuljettimien erilainen kuormitus aiheuttaa myös nopeampaa kulumista Kymillä. Kuljettimien käyttötiedoista laskettujen kuormitusindeksien mukaan Kymin 2. kuljettimen kuormitus on n. 2,9 kertaa suurempaa kuin Kaukaan 2. kuljettimen. Tämän johdosta kuljettimen voidaan odottaa kuluvan nopeammin Kymillä, kuin Kaukaalla.

Kuljettimille laskettujen kuormitusindeksien suuruuteen vaikuttaa eniten kuljettimen vuotuinen käyttöaika sekä kuljettimen nopeus ja sitä myöten kuljettimen ketjujen vuotuinen liukumatka. Indeksien laskennassa kuorman arvona käytetään kuljettimella ajettua kokonaispuumäärää, jolloin hetkellisten kuormitusten erot oletetaan merkityksettömiksi kuormitusindeksien kannalta. Kymillä kuljettimien täyttöasteet ovat pienemmät kuin muilla kuljettimilla, jolloin kuljettimilla pitää ajaa suuremmalla nopeudella saman puumäärän ajamiseksi. Sulatuskuljettimissa kuluminen tapahtuu mekaanisen kulumisen ja korroosion yhteisvaikutuksesta, jolloin kuljettimen ketjun liukumatkan voidaan arvioida

olevan merkittävämpi kuluttava tekijä, kuin puumäärän aiheuttama hetkellinen kuormitus.

Kuljettimien pohjien kestoikää voidaan mahdollisesti parantaa käyttämällä kovempaa materiaalia, kuten Hardox 500. Tällöin ketjujen sivulevyt kuluvat oletettavasti hieman nopeammin, mutta Pietarsaaren kuljettimen ketjuille tehdyn mittauksen perusteella sivulevyillä on varaa kulua nopeammin ilman, että se vaikuttaa ketjun käyttöikään.

Säännöllisten mittausten perusteella kuljettimien kulumisnopeutta pystytään arvioimaan paremmin kuin aiemmin. Mittausten perusteella määritetyn kulumisnopeuden avulla voidaan kullekin kuljettimelle laskea sulatuskuljetinindeksi, joita vertailemalla voidaan selvittää kunkin kuljettimen olosuhteiden vaikutusta kulumisnopeuteen. Kuljetinkohtaisen kulumisnopeuden selvittämisellä, kuljettimessa käytettyjen levyjen paksuudet voidaan myös optimoida halutun kestoian mukaan.

Tavoitteena on, että ketjut kestäisivät kaksi kertaa kauemmin kuin pohja eli ketjut vaihdettaisiin kerran pohjan elinkaaren aikana. Nykyisin ketjut ovat kestäneet hieman liian kauan ja pohja kulunut liian nopeasti. Tavoitteen mukaiseen kulumissuhteeseen voidaan mahdollisesti päästä käyttämällä pohjassa kovempaa materiaalia, jolloin pohja kestää paremmin mekaanista kulutusta ja ketjun sivulevyt kuluvat nopeammin.

Sulatuskuljettimissa kulumista aiheuttaa kuitenkin myös korroosio, joten säännöllisten vesianalyysien avulla voidaan varmistua, ettei korroosiota aiheuttavien aineiden pitoisuudet nouse liian suuriksi sulatusvedessä. Pietarsaaren kuljettimen näytepalalle tehdyssä analyysissä todettiin mikrobien aiheuttaman korroosion olevan suurin kulumista aiheuttava tekijä. Kaukaalla sulatusveden sekaan lisätään limantorjunta-ainetta sekä vaahdonestoainetta, joiden on todettu estävän tai hidastavan mikrobien aiheuttamaa korroosiota. Vastaavien aineiden käytön mahdollisuutta muillakin tehtailla tulisi harkita.

LÄHTEET

- Ammeraal Beltech. 2018. "Engineering Manual - Innovative Belt & Chain Solutions for Every Industry & Application." Saatavissa: <http://www.unichains.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=/Files/Files/TechnicalSupport/Files/EngineeringManual.pdf>. Viitattu: 05/08/2018.
- Aromaa, J & A Klarin. 1999. *Papermaking Science and Technology, Volume 15: Materials, Corrosion Prevention and Maintenance*. Fapet Oy.
- Blau, Peter J. 2014. "How Common Is the Steady-State? The Implications of Wear Transitions for Materials Selection and Design." *Wear* 332–333: 1120–28. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.11.018>.
- C. Fatah, Martin, Mokhtar C. Ismail & Bambang Ari-Wahjoedi. 2014. "Corrosion Behaviour of X52 Steel in the Presence of Sulphite." *Anti-Corrosion Methods and Materials* 61 (5): 343–52. <https://doi.org/10.1108/ACMM-03-2013-1246>.
- CeraMetal se S.A. n.d. "Wear Plates." Saatavissa: <http://www.cerametal.gr/products/wearplates.asp>. Viitattu: 05/16/2018.
- Cicek, Volkan. 2013. *Cathodic Protection : Industrial Solutions for Protecting Against Corrosion*. Somerset, UNITED STATES: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119019213.ch32>.
- Cicek, Volkan. 2014. *Corrosion Engineering*. New York, UNITED STATES: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Dadong Fuding Engineering Machinery Co. Ltd. n.d. "Rockwell Hardness (HRC, HRB) to Brinell Hardness (HB or BHN) Conversion." Saatavissa: <http://www.iron-foundry.com/hardness-hrc-hrb-hb.html>. Viitattu: 05/16/2018.
- DNA Report. n.d. "Raakaveden/Mekaanisesti Puhdistetun Veden Laatu, Sisäinen Järjestelmä."
- ESAB Oy. n.d. "Osa 3, Kovahitsaus." In *Korjaushitsauskäsikirja*.
- Ezuber, Hosni, Abdulla Alshater & Moneer Abulhasan. 2017. "Role of Thiosulfate in Susceptibility of AISI 316L Austenitic Stainless Steels to Pitting Corrosion in 3.5% Sodium Chloride Solutions." *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 53 (5): 493–500. <https://doi.org/10.3103/S1068375517050052>.
- FB Ketjutekniikka Oy. 2014. "Kuljetinketju M630-A-250, Sisäinen Dokumentti."
- Gates, J D. 1998. "Two-Body and Three-Body Abrasion: A Critical Discussion." *Wear* 214 (1): 139–46. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(97\)00188-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00188-9).
- Gore, G.J. & J.D. Gates. 1997. "Effect of Hardness on Three Very Different Forms of Wear." *Wear* 203–204 (96): 544–63. <https://doi.org/10.1016/S0043->

1648(96)07414-5.

- Hacısalıhoğlu, İlyas, Fatih Yıldız & Ayhan Çelik. 2018. "Tribocorrosion Behavior of Plasma Nitrided Hardox Steels in NaCl Solution." *Tribology International* 120 (December 2017): 434–45. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.023>.
- Huth, S. 2011. "Metallic Materials for Tribocorrosion Systems." *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*, 265–95. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-966-6.50010-5>.
- Hynnä, Antti, Jarmo Laakso & Jaakko Ronkainen. 2018. "Selvitys Sulakuljettimen Alalevyn Korroosio- Ja Kulumisvaurioista." Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, sisäinen raportti.
- IAEA. 2008. "Application of Reliability Centred Maintenance to Optimize Operation and Maintenance in Nuclear Power Plants." *IAEA - International Atomic Energy Agency*, no. May: 1–94. <https://doi.org/IAEA-TECDOC-1590>.
- Igual Muoz, A. & N. Espallargas. 2011. "Tribocorrosion Mechanisms in Sliding Contacts." In *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*, 118–52. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-966-6.50005-1>.
- Järviö, Jorma, Taina Piispa, Timo Parantainen & Thomas Åström. 2007. *Kunnossapito*. 4. painos. Hamina: Kunnossapito ry.
- Kääriäinen, Tommi Olavi. 2001. "Materiaalin Valinta Sulatuskuljettimen Kuluviin Kohteisiin." Lappeenrannan teknillinen yliopisto, diplomityö.
- Kanninen, Olli. 2013. "Kunnossapito-Ohjelman Rakentaminen RCM – Menetelmän Avulla." Lappeenrannan teknillinen yliopisto, diplomityö.
- Kappes, M., G. S. Frankel, N. Sridhar & R. M. Carranza. 2012. "Corrosion Behavior of Carbon Steel in Acidified, Thiosulfate-Containing Brines." *Corrosion* 68 (10): 872–84. <https://doi.org/10.5006/0610>.
- Keltamäki, Kimmo. 2013. "Kulumisalttiiden Kohteiden Eri Pinnoitusmenetelmiä." Kemi.
- Ketjurauma. n.d. "Esite." Saatavissa: <http://www.esitteemme.fi/ketjurauma.pdf>. Viitattu: 07/17/2018.
- Khadem, Mahdi, Oleksiy V. Penkov, Vladimir E. Pukha, Maxim V. Maleyev & Dae Eun Kim. 2016. "Ultra-Thin Carbon-Based Nanocomposite Coatings for Superior Wear Resistance under Lubrication with Nano-Diamond Additives." *RSC Advances* 6 (62): 56918–29. <https://doi.org/10.1039/c6ra06413b>.
- Kivioja, Seppo, Seppo Kivivuori & Pekka Salonen. 2004. *Tribologia : Kitka, Kuluminen Ja Voitelu*. Espoo: Otatiето.
- Koch, Gerhardus H., Michiel P.H. Brongers, Neil G. Thompson & Paul Virmani. 2002. "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States." *Summary*, 1–12. <https://doi.org/FHWA-RD-01-156>.

- Koivisto, Kaarlo, Esko Laitinen, Matti Niinimäki, Tuomo Tiainen, Pentti Tiilikka & Juho Tuomikoski. 2006. *Konetekniikan Materiaalioppi*. 10.-11. Helsinki: Edita.
- Korpiola, Kari & Petri Jokinen. 2000. "Keraamipinnoitteiden Valmistus HVOF-Ruiskutuksella." VTT Tiedotteita - Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus.
- Koskinen, Risto. 2014. "Asiantuntija: Tiesuolaa Käytetään 118 000 Tonnia Vuodessa." Yle. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-7132431>. Viitattu: 04/25/2018.
- Krawczyk, Janusz & Bogdan Pawłowski. 2013. "The Analysis of the Tribological Properties of the Armoured Face Conveyor Chain Race." *Archives of Mining Sciences*. <https://doi.org/10.2478/amsc-2013-0086>.
- Kunnossapitoyhdistys. 2008. *Korroosiokäsikirja*. 4th ed. Hamina: KP-Media 2004.
- Langelier, W F. 1936. "The Analytical Control of Anti-Corrosion Water Treatment." *Journal (American Water Works Association)* 28 (10): 1500–1521.
- Lapua-Ketjut. n.d. "Huolto- Ja Asennusohjeet." Saatavissa: http://www.lapua-ketjut.fi/tiedostopankki/33/LK_asennusohje_WEB.pdf. Viitattu: 07/02/2018.
- Larson, T E & R V Skold. 1958. "Laboratory Studies Relating Mineral Quality of Water To Corrosion of Steel and Cast Iron." *CORROSION* 14 (6): 43–46. <https://doi.org/10.5006/0010-9312-14.6.43>.
- Lenntech BV. 2018a. "Langelier Saturation Index Calculator."
- Lenntech BV. 2018b. "Ryznar Stability Index Calculator." Saatavissa: <https://www.lenntech.com/calculators/ryznar/index/ryznar.htm>. Viitattu: 05/29/2018.
- Lenntech BV. 2018c. "Water Hardness Calculator." Saatavissa: <https://www.lenntech.com/ro/water-hardness.htm>. Viitattu:
- Liu, Yueting, J. M C Mol & G. C A M Janssen. 2015. "Corrosion Reduces Wet Abrasive Wear of Structural Steel." *Scripta Materialia*. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.05.028>.
- Mäntynen, Hanna & Marjo Kalliolinna. 2013. "Luodonjärven Ja Öjanjärven Tarkkailutulokset Vuonna 2012." Pietarsaari.
- McCafferty, E. 2010. *Introduction to Corrosion Science*. Springer-Verlag New York. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. 2017. "SFS-EN 13306:2017." Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.
- Metso. n.d. "DNAUse, Sisäinen Ohjausjärjestelmä."
- Musil, J. 2015. "Flexible Hard Nanocomposite Coatings." *RSC Advances* 5 (74): 60482–95. <https://doi.org/10.1039/c5ra09586g>.

- NASA. 2008. *Reliability-Centered-Maintenace-Guide*.
<https://doi.org/doi:10.1201/9781420031843.ch6>.
- Ojala, Niko. 2017. "Application Oriented Wear Testing of Wear Resistant Steels in Mining Industry." Tampereen teknillinen yliopisto, väitöskirja.
- Ojala, Niko, Kati Valtonen, Atte Antikainen, Anu Kemppainen, Jussi Minkkinen, Olli Oja & Veli Tapani Kuokkala. 2016. "Wear Performance of Quenched Wear Resistant Steels in Abrasive Slurry Erosion." *Wear* 354–355: 21–31.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.02.019>.
- Oram, Brian. 2014. "What Is Alkalinity?" Saatavissa: <https://www.water-research.net/index.php/the-role-of-alkalinity-citizen-monitoring>. Viitattu: 04/16/2018.
- Paul, Subir. 2011. "Model to Study the Effect of Composition of Seawater on the Corrosion Rate of Mild Steel and Stainless Steel." *Journal of Materials Engineering and Performance* 20 (3): 325–34. <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9686-1>.
- Philibert, Marc, Sofia Mendaza, Flavia Zraick & Benjamin Rabaud. 2018. "Predicting the Effect of Water Quality on Water Distribution Cast Iron and Steel Pipes Using Two Novel Indices." *Water Science and Technology: Water Supply* 18 (2): 524–38.
<https://doi.org/10.2166/ws.2017.131>.
- Prowledge Oy. 2016. "KnowPulp." Saatavissa: www.knowpulp.com. Viitattu: 05/28/2018.
- PSK Standardisointiyhdistys ry. 2010. "PSK 7501."
- PSK Standardisointiyhdistys ry. 2011. "PSK 6201."
- Puuinfo Oy. n.d. "Lujuusteknisiä Ominaisuuksia." Saatavissa: <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/lujuusteknisiä-ominaisuuksia>. Viitattu: 06/08/2018.
- Quan, Bian Li, Jun Qi Li & Chao Yi Chen. 2016. "Effect of Additional Sulfide and Thiosulfate on Corrosion of Q235 Carbon Steel in Alkaline Solutions." *International Journal of Corrosion* 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8549312>.
- Rabinowicz, E., L.A. Dunn & P.G. Russell. 1961. "A Study of Abrasive Wear under Three-Body Conditions." *Wear* 4 (5): 345–55. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(61\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(61)90002-3).
- Ranne, Aulis. 2000. "Multi Supply Plant - Sähkö Ja Vesi." *VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2060*, 84.
- Raumaster. 2018. "Mittauspöytäkirja, Sisäinen Dokumentti."
- Raumaster Oy. 2012. "Sulatuskuljettimien Pohjan Kuluminen, Sisäinen Dokumentti."
- Raumaster Oy. 2015. "KYMI700 Puunkäsittely, Käyttö- Ja Huolto-Ohjeet, Sisäinen Dokumentti."

- Renold Plc. n.d. "Conveyor Chain - Designer Guide." Saatavissa: http://www.renold.com/upload/renoldswitzerland/Conveyor_Chain_-_Designer_Guide.pdf. Viitattu: 05/08/2018.
- Rouvari, Katja. 2005. "Märkäkuorimon Kiertovesien Optimipoisto Ja Korroosio." Lappeenrannan teknillinen yliopisto, diplomityö.
- Salasi, Mobin, Grazyna Stachowiak & Gwidon Stachowiak. 2015. "Triboelectrochemical Behaviour of 316L Stainless Steel: The Effects of Contact Configuration, Tangential Speed, and Wear Mechanism." *Corrosion Science* 98: 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.05.009>.
- Song, Yarong, Guangming Jiang, Ying Chen, Peng Zhao & Yimei Tian. 2017. "Effects of Chloride Ions on Corrosion of Ductile Iron and Carbon Steel in Soil Environments." *Scientific Reports* 7 (1): 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07245-1>.
- SSAB. n.d. "Hardox® 400." Saatavissa: <https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-400>. Viitattu: 05/16/2018.
- Stachowiak, G. B. & G. W. Stachowiak. 2001. "The Effects of Particle Characteristics on Three-Body Abrasive Wear." *Wear* 249 (3–4): 201–7. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00557-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00557-9).
- Stachowiak, Gwidon & Andrew W Batchelor. 2013. *Engineering Tribology*. Oxford, UNITED STATES: Elsevier Science & Technology.
- Suomen Standardisoimislautakunta. 1971. "SFS 2380."
- Szuba, Philip S. 1995. Endless Conveyor. 5388685, issued 1995. <https://doi.org/US005485919A>.
- Tang, D.-Z., Y.-X. Du, M.-X. Lu, Y. Liang, Z.-T. Jiang & L. Dong. 2015. "Effect of PH Value on Corrosion of Carbon Steel under an Applied Alternating Current." *Materials and Corrosion* 66 (12): 1467–79. <https://doi.org/10.1002/maco.201508365>.
- Trausmuth, A., M. Rodríguez Ripoll, G. Zehethofer, T. Vogl & E. Badisch. 2015. "Impact of Corrosion on Sliding Wear Properties of Low-Alloyed Carbon Steel." *Wear*. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.061>.
- Tukes. 2014. "Luettelo Sallituista Suojauskemikaaleista." Helsinki.
- UPM. n.d. "Kriittisyysluokittelu Ja Riskinarviointi, Sisäinen Esitys."
- UPM. 2012. "UPM Kunnossapitostrategia, Sisäinen Dokumentti."
- UPM. 2015. "UPM – METSÄTEOLLISUUTTA PITKÄLLÄ PERINTEELLÄ." Biofore. Saatavissa: <https://www.upmbiofore.fi/upm-fi/upm-metsateollisuutta-pitkalla-perinteella/>. Viitattu: 06/26/2018.

- UPM. 2016. "UPM in Short, Artikkeleli Sisäisessä Verkossa." Saatavissa: https://intranet.upm.com/AboutUPM/Companypresentations/UPM_in_short/Pages/default.aspx. Viitattu: 07/02/2018.
- Varis, Tommi & Petri Vuoristo. 2015. "Terminen Ruiskutus – Menetelmät, Pinnoitteet Ja Teolliset Sovellukset." Teräsrakenneyhdistys.
- VTT Expert Services Ltd. 2017. "Metallinäytteiden Analysointi, Sisäinen Dokumentti."
- Watson, S W, F J Friedersdorf, B W Madsen & S D Cramer. 1995. "Methods of Measuring Wear-Corrosion Synergism." *Wear*, 181–83.
- Woldman, M., E. van der Heide, D. J. Schipper, T. Tinga & M. A. Masen. 2012. "Investigating the Influence of Sand Particle Properties on Abrasive Wear Behaviour." *Wear* 294–295: 419–26. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.017>.
- Wood, R. J.K. & J. A. Wharton. 2011. "Coatings for Tribocorrosion Protection." In *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*, 296–333. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-966-6.50011-7>.

LIITE 1: VEDEN INDEKSIEN LASKENTA

Langelierin kyllästysindeksi voidaan laskea seuraavilla kaavalla (Langelier 1936):

$$LSI = pH + pH_s \quad (1)$$

jossa

$$pH_s = (pK_2' - pK_s') + pCa^{++} + pAlk \quad (2)$$

jossa p(i) tarkoittaa negatiivista logaritmia i:n aineen pitoisuudesta

pH_s voidaan määrittää myös käyttämällä taulukoita arvoja, jotka ovat esitetty taulukossa 23. Tällöin pH_s lasketaan kaavalla

$$pH_s = (9,3 + S + T) - (H + A) \quad (3)$$

jossa parametrit S, T, H ja A saadaan taulukosta 23.

Positiivinen LSI-arvo tarkoittaa, että metallin pinnalle saostuu korroosiolta suojaava kalsiumkarbonaattikerrostuma. Negatiivisella LSI-arvolla kalsiumkarbonaatti liukenee veteen eikä metallin pinnalle synny suojaavaa kerrosta. Suositeltu LSI-arvo on n. 0,6 – 1 (Aromaa & Klarin 1999, s.186).

Ryznarin stabiliteetti-indeksi lasketaan kaavalla (Aromaa & Klarin 1999, s.187)

$$RI = 2 * pH_s - pH \quad (4)$$

Raja-arvot ja selitykset RI-arvolle ovat esitetty taulukossa 24.

Langelierin kyllästysindeksin ja Ryznarin stabiliteetti-indeksien laskemiseen on olemassa myös verkkopohjaisia laskureita, kuten esim. vedenkäsittelyyn erikoistuneen yrityksen Lenntech:n tarjoamat laskurit (Lenntech BV 2018a, 2018b).

Larsonin indeksi lasketaan kaavalla

$$La = \frac{[Cl^-] + [SO_4^{2-}]}{Alkaliteetti} \quad (5)$$

jossa $[Cl^-]$ ja $[SO_4^{2-}]$ ovat aineiden pitoisuuksia, mg/l.

Larsonin indeksin ollessa $> 0,5$ vesi saattaa aiheuttaa korroosiota. Suomessa vesijohtoveden suositusarvo on $La < 2/3$. (Philibert et al. 2018)

Standardin DIN 50930 mukaan kloridi- ja sulfaatti-ionien vaikutusta paikalliskorroosioon voidaan arvioida seuraavan kaavan mukaan (Kääriäinen 2001 mukaan):

$$S = \frac{c(Cl^-) + 2 * c(SO_4^{2-})}{Alkaliteetti} \quad (6)$$

jossa c(i) on liuenteen ionin pitoisuus, mol/m³.

Indeksin S ollessa suurempi kuin 1, on olemassa kasvanut todennäköisyys piste- ja rako-korroosion esiintymiselle. Indeksien arvon ollessa pienempi kuin 1 on todennäköisyys piste- ja rakokorroosiolle vähentynyt.

Taulukko 23. Parametrien arvot pH_s -arvon laskemiseen. (Kunnossapitoyhdistys 2008, s.914)

Kokonais-suolapitoisuus (mg/l)	S	Kalsiumpitoisuus (mmol/l)	H	Alkali-teetti (mmol/l)	A
50 – 300	0,1	0,2	0,6	0,2	1,0
400 – 1100	0,2	0,24	0,7	0,24	1,1
Lämpötila (°C)	T	0,28	0,8	0,28	1,2
		0,36	0,9	0,36	1,3
0	2,6	0,46	1,0	0,46	1,4
2	2,5	0,56	1,1	0,56	1,5
7	2,4	0,70	1,2	0,72	1,6
10	2,3	0,88	1,3	0,90	1,7
14	2,2	1,12	1,4	1,12	1,8
18	2,1	1,40	1,5	1,40	1,9
22	2,0	1,76	1,6	1,76	2,0
28	1,9	2,22	1,7	2,22	2,1
32	1,8	2,76	1,8	2,80	2,2
38	1,7	3,50	1,9	3,54	2,3
44	1,6	4,60	2,0	4,60	2,4
51	1,5	5,60	2,1	5,60	2,5
57	1,4	7,00	2,2	7,20	2,6
64	1,3	8,80	2,3	9,00	2,7
72	1,2	11,2	2,4	11,2	2,8
82	1,1	14,0	2,5	14,0	2,9
		17,4	2,6	17,6	3,0
		21,0	2,7		

Taulukko 24. Ryznarin stabiliteetti-indeksin raja-arvot ja selitykset.

Ryznarin stabiliteetti-indeksi	Veden taipumus
4,0 – 5,0	Voimakas saostuminen
5,0 – 6,0	Kevyt saostuminen
6,0 – 7,0	Kevyt saostuminen tai korroosio
7,0 – 7,5	Merkittävä korroosio
7,5 – 9,0	Voimakas korroosio
yli 9,0	Erittäin voimakas korroosio

LIITE 2: LÄHTÖTIETOLOMAKKEET

Taulukko 25. Pietarsaaren 1. kuljettimen lähtötietolomake.

Toimintopaikka ja nimi	PIE1-M-0022001 SULATUSKULJETIN 1
Käyttömekanismi	Invertterikäyttöinen sähkömoottori & vaihde
Kuljettimen valmistaja	Raumaster Oy
Valmistusvuosi	2010
Kuljettimen nimellinen kapasiteetti	350 k-m ³ /h (havu) 230 k-m ³ /h (koivu) Ajetaan sekä lehtipuuta, että havua
Kuljettimen nousukulma (°)	1,2° / 5,2°
Kuljettimen pituus (m)	70m (sulatusosa 62m)
Kuljettimen nopeus (m/s)	0,02 – 0,08 m/s (1,2 – 4,8 m/min) Keskiarvo: me: 1,69 m/min spa: 2,59 m/min
Vuotuinen puumäärä 2017 (m ³)	1,3milj k-m ³ 1. kuljettimella (ajetaan sekä koivua, että havua) 800 k-m ³ koivu 500 k-m ³ havu Kokonaismäärä 3,2milj molemmilla kuljettimilla
Käyntiaika 2017 (h)	7060
Puumäärä / käyntiaika 2017 (m ³ /h)	184,1
Lastaustapa	Materiaalikone Täysi koura kerralla
Puukentän liukkaudentorujntatapa	Sora Aiemmin käytettiin mursketta, joka osoittautui erittäin huonoksi menetelmäksi
Puuntoimitustapa (juna/auto)	1,1 milj. m ³ juna / 2,2 milj. m ³ auto (33 % juna / 66 % auto)
Korjauskustannukset	Kts. SAP
Laidan alkuperäinen materiaali	Rakenneteräs (kts. SAP)
Laidan nykyinen materiaali	Rakenneteräs (kts. SAP)
Laidan ikä	2010 -> Vuorataan seisokissa 2018 syksyllä Hardox 400/12mm
Laidan alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	Alkuperäinen paksuus 10mm(?), mittauksia ei tehty
Alkuperäisen ketjun materiaali ja rakenne	

Nykyisen ketjun materiaali ja rakenne	10 kpl M630-A-250HTH Holkki: nuorrutettu, induktiokarkaistu SB27 Tappi: nuorrutettu, induktiokarkaistu BM311 Kolalenkki ja yksi lenkki ennen ja jälkeen: SB27(27MnCrB5-2), nuorrutettu, kovuus 320±20 HB Sivulevyt, kolat ja estopalat: S355J2G
Ketjun valmistaja	FB-ketjutekniikka
Ketjun ikä	Alkuperäinen ketju 2010 - 2015 Nykyinen syksy 2015 seisokki ->
Ketju-uran alkuperäinen materiaali	Fe 52(S355) rakenneteräs
Ketju-uran kulutuslevyn nykyinen materiaali	Pohjamateriaali Fe 52 (S355) rakenneterästä Vuorattu Hardox 400/12mm Lastausosa CeraMetal HCCr6+4, pinta hiottu
Ketju-uran kulutuslevyn ikä	Yläpohja 2014 -> Alapohja 2013 -> Alun perin pohja tasaista rakenneterästä. 2012 hitsattu kulumia umpeen. Alapohjaan lisätty 2017–2018 vetopäähän 2-3 metriä suoralle osuudelle Hardox-levyä
Ketju-uran kulutuslevyn alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	Nykyisen kulutuslevyn alkupaksuus 12mm, mittauksia ei ole tehty
Pohjan materiaali	Fe 52 (S355) rakenneteräs
Sulatusveden pH:n säätö / muut lisättävät aineet	NaOH 78 %, pH:n säätöön
Mukaan lisättävä suodos	Raakavesi Lämminvesi kattilalta lämminvesisäiliöstä Lämmintä vettä (n .75 °C) n. 25 l/s Raakavettä n. 39 l/s Poistuva vesi n. 45 l/s
Kiertovesikaivon tyhjennys-sykli	Pääsääntöisesti kahden viikon välein osastoseisokkien yhteydessä
Veden määrä	N. 110l/s (spa) N. 90 l/s (me) 75l/s yläsulatukseen 35l/s alasulatukseen (Koivu ja Havu 5m sama määrä)

Sulatusveden kemiallinen koostumus	10.1.2018	Sulatusvesi
	Analyysi	mg/l
	Kloridi	4,69
	Sulfaatti	14,34
	Natrium	11,39
	Kalsium	2,61
	Magnesium	1,22
	Rauta	3,99
	Alumiini	0,383
	Pii (Si)	8,02
	pH	6,4
	Kiintoaine	335
	Alkaliteetti m	0,16
p	0	

Taulukko 26. Pietarsaaren 2. kuljettimen lähtötietolomake.

Toimintopaikka ja nimi	PIE1-M-0022101 SULATUSKULJETIN 2
Käyttömekanismi	Invertterikäyttöinen sähkömoottori & vaihde
Kuljettimen valmistaja	Raumaster Oy
Valmistusvuosi	2009
Kuljettimen nimellinen kapasiteetti	350 k-m ³ /h (havu) 230 k-m ³ (koivu) Ajetaan pelkästään havua
Kuljettimen nousukulma (°)	1,2° / 5,2°
Kuljettimen pituus (m)	70m (sulatusosa 62m)
Kuljettimen nopeus (m/s)	0,02 – 0,08 m/s (1,2 – 4,8 m/min) Keskiarvo: Mittattu: 1,65 m/min Set Point: 2,47 m/min
Vuotuinen puumäärä 2017 (m ³)	1,9milj k-m ³ mänty/kuusi (pelkästään havu)
Käyntiaika 2017 (h)	7108
Puumäärä / käyntiaika 2017 (m ³ /h)	267,3
Lastaustapa	Materiaalikone Täysi koura kerralla
Puukentän liukkaudentorjuntatapa	Sora Aiemmin käytettiin mursketta, joka osoittautui erittäin huonoksi menetelmäksi
Puuntoimitustapa (juna/auto)	1,1 milj. m ³ juna/2,2 milj. m ³ auto (33 % juna / 66 % auto)
Korjauskustannukset	Kts. SAP
Laidan alkuperäinen materiaali	Pohjamateriaalina rakenneteräs
Laidan nykyinen materiaali	Vuorattu Hardox 400/15mm
Laidan ikä	Alkuperäinen materiaali 2009 - 2015. Vuoraus seisokki 2015 -> Pohjamateriaali alkuperäinen
Laidan alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	Alkuperäinen seinämä 10mm(?) Vuoraus 15mm, ei tehty mittauksia
Alkuperäisen ketjun materiaali ja rakenne	
Ketjun materiaali ja rakenne	10 kpl M630-A-250HTH Holkki: nuorrutettu, induktiokarkaistu SB27 Tappi: nuorrutettu, induktiokarkaistu BM311 Kolalenkki ja yksi lenkki ennen ja jälkeen: SB27(27MnCrB5-2), nuorrutettu, kovuus 320±20 HB Sivulevyt, kolat ja estopalat: S355J2G
Ketjun valmistaja	FB-ketjutekniikka

Ketjun ikä	Alkuperäinen ketju 2009 - 2014 Nykyinen kevät 2014 seisokki ->
Ketju-uran alkuperäinen materiaali	Rakenneteräs
Ketju-uran kulutuslevyn materiaali	Pohjamateriaali rakenneterästä Vuorattu Hardox 400/12mm Lastausosa CeraMetal HCCr6+4, pinta hiottu
Ketju-uran kulutuslevyn ikä	Yläpohja 2013 -> Alapohja 2014 -> Alun perin pohja tasaista rakenneterästä. 2011 ja 2012 hitsattu kulumia umpeen.
Ketju-uran kulutuslevyn alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	Nykyisen kulutuslevyn alkupaksuus 12mm, mittauksia ei tehty
Pohjan materiaali	Rakenneteräs
Sulatusveden pH:n säätö / muut lisättävät aineet	NaOH 78 %, pH:n säätöön
Kiertovesikaivon tyhjennys-sykli	Pääsääntöisesti kahden viikon välein osastoseisokkien yhteydessä
Mukaan lisättävä suodos	Raakavesi Lämminvesi kattilalta lämminvesisäiliöstä Lämmintä vettä (n. 75 °C) n. 25 l/s Raakavettä n. 39 l/s Poistuva vesi n. 45 l/s
Veden määrä	N. 110l/s (spa) N. 90 l/s (me) 75l/s yläsulatukseen 35l/s alasulatukseen (Koivu ja Havu 5m sama määrä)

Sulatusveden kemiallinen koostumus	10.1.2018	Sulatusvesi
	Analyysi	mg/l
	Kloridi	4,69
	Sulfaatti	14,34
	Natrium	11,39
	Kalsium	2,61
	Magnesium	1,22
	Rauta	3,99
	Alumiini	0,383
	Pii (Si)	8,02
	pH	6,4
	Kiintoaine	335
	Alkaliteetti m	0,16
p	0	

Taulukko 27. Kymin 1. kuljettimen lähtötietolomake.

Toimintopaikka ja nimi	KYM1-51 3351 4601 SULATUSKULJETIN 1
Käyttömekanismi	Hydraulimoottori
Kuljettimen valmistaja	Rauma-Repola
Valmistusvuosi	1989
Kuljettimen nimellinen kapasiteetti	350 k-m ³ /h (havu) 280 k-m ³ /h (koivu) Ajetaan sekä havua, että koivua
Kuljettimen nousukulma (°)	14,5°
Kuljettimen pituus (m)	72m
Kuljettimen nopeus (m/s)	0,02-0,06 m/s
Vuotuinen puumäärä 2017 (m ³)	Koivua 292289k-m ³ Havua 1018400 k-m ³ Yhteensä 1310689k-m ³
Käyntiaika 2017 (h)	7950h
Puumäärä / käyntiaika 2017 (m ³ /h)	165k-m ³ /h
Lastaustapa	Materiaalikone Täysi kauha kerrallaan
Puukentän liukaudentorjuntatapa	Murske (8-16mm jae)
Puuntoimitustapa (juna/auto)	Havu: 60 % autolla / 40 % junalla Koivu: 40 % autolla / 60 % junalla
Korjauskustannukset	
Laidan alkuperäinen materiaali	S235 tai S355 rakenneteräs
Laidan nykyinen materiaali	Rakenneteräs
Laidan ikä	Alkuperäistä laitaa korjattu tarpeen mukaan
Laidan alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	-
Alkuperäisen ketjun materiaali ja rakenne	10 kpl M630-A-250

Nykyisen ketjun materiaali ja rakenne	<p>10 kpl M630-A-250</p> <p>2008: B311 Sivulevy S355</p> <p>Nykyiset ketjut: Tapit läpikarkaistu booriteräs Kolot rakenneterästä Ohjauspalat kulutusterästä Rasvatut</p>
Ketjun valmistaja	Lapua-ketjut
Ketjun ikä	<p>Ketjut vaihdettu useaan kertaan, kestoikä ~5-6 vuotta</p> <p>Edellinen ketju 2011 - 2016</p> <p>Nykyinen ketju kevät 2016 -></p>
Ketju-uran alkuperäinen materiaali	
Ketju-uran kulu- tuslevyn nykyinen materiaali	Hardox 400
Ketju-uran kulu- tuslevyn ikä	<p>Yläpohjaa vaihdettu lohkoittain</p> <p>Rummunpää vaihdettu 2017</p> <p>Lastausosa vaihdettu 2016</p>
Ketju-uran kulu- tuslevyn alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	<p>Uusitun lastausosan paksuus 20mm</p> <p>Säännöllisiä mittauksia ei ole tehty</p>
Pohjan materiaali	<p>Lastausosan pohja s235 (kulutuskiskot Hardox)</p> <p>Kuljetinosan pohja Hardox</p>
Sulatusveden pH:n säätö / muut lisättävät aineet	pH:n säätö: Alkalivesi ja lipeä
Mukaan lisättävä suodos	<p>Alkalivaiheen suodos valkaisuusta (mänty- tai koivusuodos)</p> <p>Kuljettimille yhteensä: Suodosta n. 30l/s TAI Talteenotosta lämmintä vettä n. 45l/s (tämän hetkinen ajomalli)</p> <p>Poistuva vesi n. 70l/s</p>
Kiertovesikaivon tyhjennyssykli	Tyhjennetään pääasiassa tehdasseisokkien yhteydessä
Veden määrä	Kesällä käytetään vettä myös

Sulatusveden kemiallinen koostumus	2.2.2018	Sulatusvesi	18.1.2018	Sulatusvesi
	Analyysi	mg/l	Analyysi	mg/l
	Kloridi	4,6	Kloridi	25,5
	Sulfaatti	12	Sulfaatti	35
	Natrium	9,91	Natrium	78,4
	Kalsium		Kalsium	
	Magnesium	2,4	Magnesium	2,6
	Rauta	6	Rauta	2,3
	Alumiini	0,25	Alumiini	0,46
	Pii (Si)	10,1	Pii (Si)	3
	pH	4,8	pH	6,5
	Kiintoaine	325	Kiintoaine	72
	Alkaliteetti	<2	Alkaliteetti	48,9

Taulukko 28. *Kymin 2. kuljettimen lähtötietolomake.*

Toimintopaikka ja nimi	KYM1-51 3351 4642 SULATUSKULJETIN 2
Käyttömekanismi	Invertterikäyttöinen sähkömoottori & vaihde
Kuljettimen valmistaja	Raumaster
Valmistusvuosi	2015
Kuljettimen nimellinen kapasiteetti	350 k-m ³ /h (havu) 230 k-m ³ /h (koivu) Ajetaan pelkästään koivua
Kuljettimen nousukulma (°)	1,0° /8,1°
Kuljettimen pituus (m)	72m (sulatusosa 56m)
Kuljettimen nopeus (m/s)	0,02 – 0,08 m/s (1,2 – 4,8 m/min)
Vuotuinen puumäärä 2017 (m ³)	1715929 k-m ³
Käyntiaika 2017 (h)	n. 8000h
Puumäärä / käyntiaika 2017 (m ³ /h)	214 k-m ³ /h
Lastaustapa	Materiaalikone
Puukentän liukaudentorjuntatapa	Sama kuin sula 1
Puuntoimitustapa (juna/auto)	Havu: 60 % autolla / 40 % junalla Koivu: 40 % autolla / 60 % junalla
Korjauskustannukset	n. 20000€ vuonna 2017
Laidan alkuperäinen materiaali	Rakenneteräs
Laidan nykyinen materiaali	”
Laidan ikä	Alkuperäinen
Laidan alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	
Alkuperäisen ketjun materiaali ja rakenne	10 kpl M630-A-250, pintakarkaistut
Nykyisen ketjun materiaali ja rakenne	
Ketjun valmistaja	Ketjurauma

Ketjun ikä	Alkuperäinen
Ketju-uran alkuperäinen materiaali	HARDOX400
Ketju-uran kulumuslevyn nykyinen materiaali	HARDOX400
Ketju-uran kulumuslevyn ikä	2,5v.
Ketju-uran kulumuslevyn alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	Minimipaksuus 0mm, eli on puhki muutamasta kohtaa
Pohjan materiaali	HARDOX 400
Sulatusveden pH:n säätö / muut lisättävät aineet	pH:n säätö: Alkalivesi ja lipeä
Mukaan lisättävä suodos	Alkalivaiheen suodos valkaisuusta(mänty- tai koivusuodos) Kuljettimille yhteensä: Suodosta n. 30l/s TAI Talteenotosta lämmintä vettä n. 45l/s (tämän hetkinen ajomalli) Poistuva vesi n. 70l/s
Kiertovesikäivon tyhjennys-sykli	Tyhjennetään pääasiassa tehdasseisokkien yhteydessä
Veden määrä	Maksimikapasiteetti 200 l/s

Sulatusveden kemiallinen koostumus	2.2.2018	Sulatusvesi	18.1.2018	Sulatusvesi
	Analyysi	mg/l	Analyysi	mg/l
	Kloridi	4,6	Kloridi	25,5
	Sulfaatti	12	Sulfaatti	35
	Natrium	9,91	Natrium	78,4
	Kalsium		Kalsium	
	Magnesium	2,4	Magnesium	2,6
	Rauta	6	Rauta	2,3
	Alumiini	0,25	Alumiini	0,46
	Pii (Si)	10,1	Pii (Si)	3
	pH	4,8	pH	6,5
	Kiintoaine	325	Kiintoaine	72
	Alkaliteetti	<2	Alkaliteetti	48,9

Taulukko 29. Kaukaan 1. kuljettimen lähtötietolomake.

Toimintopaikka ja nimi	KAU1-22 3254 4601 SULATUSKULJETIN 1. (LAITTEINEEN)(Lehti)
Käyttömekanismi	2kpl Hydraulimoottori
Kuljettimen valmistaja	BMH Wood Technology
Valmistusvuosi	1996
Kuljettimen nimellinen kapasiteetti	250 k-m ³ /h
Kuljettimen nousukulma (°)	4,5°
Kuljettimen pituus (m)	81m (16m lastausosa) 65m + 16m lastausosa
Kuljettimen nopeus (m/s)	0,02 – 0,1 m/s (normaali ajonopeus ~4m/min)
Vuotuinen puumäärä 2017 (m ³)	970 000 k-m ³
Käyntiaika 2017 (h)	8000 h
Puumäärä / käyntiaika 2017 (m ³ /h)	121 k-m ³ /h (keskimääräinen ajonopeus 160)
Lastaustapa	Materiaalikone Täysi kuorma kerralla 4,5m ja yli katkaisupöydän läpi
Puukentän liukkaudentorjuntatapa	Karkea sepeli
Puuntoimitustapa (juna/auto)	Auto 34,8 % Juna 44,0 % Laiva 21,2 %
Korjauskustannukset	
Laidan alkuperäinen materiaali	Rakenneteräs
Laidan nykyinen materiaali	2018 seisokissa vuorataan Hardox 400, 10mm
Laidan ikä	Alkuperäinen, paikattu tarpeen mukaan
Laidan alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	-
Alkuperäisen ketjun materiaali ja rakenne	Alkuperäinen kolarakenne muuttunut Ennen paljon ongelmia kolien kanssa
Nykyisen ketjun materiaali ja rakenne	M630-A-250 Läpikarkaistua kaikki
Ketjun valmistaja	Ketjurauma
Ketjun ikä	2015 ->
Ketju-uran alkuperäinen materiaali	UP Plate Murtui tärinästä. Materiaali ei kulunut juurikaan, mutta kulutti ketjua
Ketju-uran kulutuslevyn nykyinen materiaali	Ylä- ja alapohja: Hardox
Ketju-uran kulutuslevyn ikä	UP Plate käytössä ~15 vuotta Hardox, ylä- ja alapohja: 2015 ->

Ketju-uran kulutuslevyn al- kupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	Kulutuslevyt 12mm Alapohjan rakenne: 6mm	
Pohjan materiaali	Rakenneterästä	
Sulatusveden pH:n säätö / muut lisättävät aineet	pH:n säätö NaOH, tavoite 6,5 Vaahdonestoaine Bandefoam AMB600 Homeenestoaine Biosid Bansan 210W	
Mukaan lisättävä suodos	Raakavettä Suljettukierto Kahdelta kuorimolta jätevesilaitokselle n. 70l/s	
Kiertovesikaivon tyhjennys- sykli	Huoltoseisokkien yhteydessä 2vk välein Upotusaltaan tyhjennys ja ruoppaus myös	
Veden määrä	Yläsulatus: 90l/s Alasulatus: 100l/s Alasulatukseen hieman viileämpää vettä	
Sulatusveden kemiallinen koostumus	Analyysiä ei tehty samana päivänä näytteenoton kanssa	
		Sulatusvesi
	Analyyysi	mg/l
	Kloridi	5,3
	Sulfaatti	<0,1
	Natrium	24
	Kalsium	9,57
	Magnesium	2,93
	Rauta	2,61
	Alumiini	0,24
	Pii (Si)	1,31
	pH	5,1
	Kiintoaine	635
Alkaliteetti (mmol/l)	1,94	

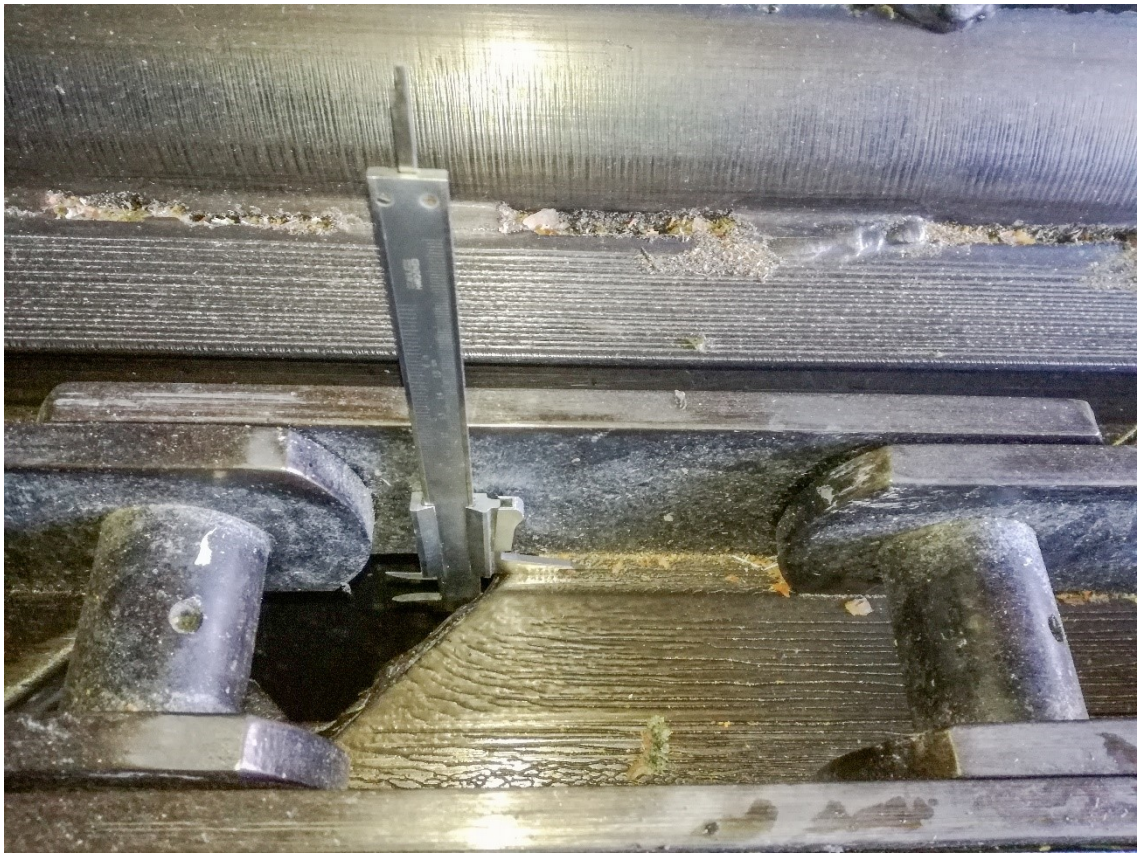
Taulukko 30. Kaukaan 2. kuljettimen lähtötietolomake.

Toimintopaikka ja nimi	KAU1-22 3253 4601 SULATUSKULJETIN 2. (LAITTEINEEN)(Havu)
Käyttömekanismi	2kpl Invertterikäyttöinen sähkömoottori & vaihde
Kuljettimen valmistaja	Raumaster
Valmistusvuosi	2016
Kuljettimen nimellinen kapasiteetti	350 k-m ³ /h (havu) 250 k-m ³ /h (koivu)
Kuljettimen nousukulma (°)	3,1°
Kuljettimen pituus (m)	78m (sulatusosa 62m)
Kuljettimen nopeus (m/s)	0,02-0,08 m/s (1,2 – 4,8 m/min)
Vuotuinen puumäärä 2017 (m ³)	1014473 k-m ³ /h
Käyntiaika 2017 (h)	6635 h
Puumäärä / käyntiaika 2017 (m ³ /h)	160 k-m ³ /h
Lastaustapa	Materiaalikone
Puukentän liukkaudentorjuntatapa	Sama kuin 1
Puuntoimitustapa (juna/auto)	Juna 50,1 % Auto 26,0 % Laiva 7,4 % Uittopuu 16,4 %
Korjauskustannukset	
Laidan alkuperäinen materiaali	S355
Laidan nykyinen materiaali	-
Laidan ikä	Alkuperäinen
Laidan alkupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	20mm/
Alkuperäisen ketjun materiaali ja rakenne	10 kpl M630-A-250 Sivulevyt S355, valssaustilassa
Nykyisen ketjun materiaali ja rakenne	-
Ketjun valmistaja	Ketjurauma
Ketjun ikä	Alkuperäinen
Ketju-uran alkuperäinen materiaali	Hardox400
Ketju-uran kulutuslevyn nykyinen materiaali	-

Ketju-uran kulutuslevyn ikä	Alkuperäinen	
Ketju-uran kulutuslevyn al- kupaksuus / minimipaksuus nyt (mm)	Lastausosa: 20mm/ Sulatusosa: 16mm/ Alapohja: 12mm/	
Pohjan materiaali	Rakenneteräs	
Sulatusveden pH:n säätö / muut lisättävät aineet	pH:n säätö NaOH, tavoite 6,5 Vaahdonestoaine Bandefoam AMB600 Homeenestoaine Biosid Bansan 210W	
Mukaan lisättävä suodos	Raakavettä lisätään n. 35l/s Suljettukierto Kahdelta kuorimolta jätevesilaitokselle n. 70l/s	
Kiertovesikaivon tyhjennys- sykli	Huoltoseisokkien yhteydessä 2vk välein Uputusaltaan tyhjennys myös	
Veden määrä	Yläsulatus: sama kuin 1 (6.3. 46l/s) Alasulatus: 60l/s	
Sulatusveden kemiallinen koostumus	Analyysiä ei tehty samana päivänä näytteenoton kanssa	
		Sulatusvesi
	Analyyysi	mg/l
	Kloridi	5,3
	Sulfaatti	<0,1
	Natrium	24
	Kalsium	9,57
	Magnesium	2,93
	Rauta	2,61
	Alumiini	0,24
	Pii (Si)	1,31
	pH	5,1
	Kiintoaine	635
Alkaliteetti (mmol/l)	1,94	

LIITE 3: OHJE KETJUN JA POHJAN MITTAUKSESTA

Sulatuskuljettimen yläpohjan paksuus mitataan vesiaukkojen kohdalta kuvassa 63 näkyvällä tavalla. Mitattavat kohteet ovat molemmat reunimmaiseth ketjut sekä 5. ketju vasemmalta, kuorimarummulle päin katsottuna, jokaisen vesiaukon kohdalta. Mittaus tehdään vesiaukon lastausalueen puoleiselta reunalta molempien ketjun sivulevyjen linjalta sekä ketjun keskilinjalta. Mittausta suoritettaessa on huomioitava, että yläpohjan alapintaan saattaa kerääntyä likaa, joka täytyy pyyhkiä pois ennen mittausta. Jos ketjun holkki sattuu jäämään vesiaukon kohdalle estäen mittauksen, voidaan ketjua ajaa eteenpäin käsiajolla. Mitatut arvot kirjataan muistiin mittauspöytäkirjaan (kuva 65) valkoisiin laatikoihin.



Kuva 63. Yläpohjan paksuuden mittaus.

Harmaisiin laatikoihin kirjataan alapohjasta mitatut arvot, jotka mitataan yläpohjan vesiaukkojen kohdalta. Alapohjassa ei ole vesiaukkoja, joten paksuutta ei voida mitata työntömitalla suoraan, vaan paksuus mitataan ultraäänipaksuusmittarilla.

Ketjujen sivulevyjen korkeus mitataan kuvassa 64 näkyvällä tavalla työntömitalla. Ketjuista mitataan kolalengin korkeus sekä kolalenkkiä välissä olevan sisemmän lenkin korkeus. Mitattavat ketjut ovat samat, kuin pohjan mittauksessa eli molemmat reunimmaisat ketjut sekä 5. ketju vasemmalta kuorimarummulle päin katsottaessa.

Ketjun venymä mitataan 10 lenkin matkalta rullamitalla. Alkuperäinen pituus M630-A-250 -ketjulla on 2500 mm. Ketjun venymän raja-arvo on 30 mm. Mittaus tulee ottaa ketjun komponenteista esim. holkista holkkiin, ei kolasta kolaan.



Kuva 64. Ketjun sivulevyn korkeuden mittaus.

	1. ketju		5. ketju		10. ketju	
1						
	Kolalenkki	Sisälenkki	Kolalenkki	Sisälenkki	Kolalenkki	Sisälenkki
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2						
	Venymä	<input type="text"/>	Venymä	<input type="text"/>	Venymä	<input type="text"/>
3						
4						
5						
	Kolalenkki	Sisälenkki	Kolalenkki	Sisälenkki	Kolalenkki	Sisälenkki
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
6						
	Venymä	<input type="text"/>	Venymä	<input type="text"/>	Venymä	<input type="text"/>
7						
8						
	Venymä	<input type="text"/>	Venymä	<input type="text"/>	Venymä	<input type="text"/>
9						
	Kolalenkki	Sisälenkki	Kolalenkki	Sisälenkki	Kolalenkki	Sisälenkki
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
10						

Kuva 65. Sulatuskuljettimen mittauspöytäkirja.

LIITE 4: OHJE SULATUSVEDEN KEMIAALLISESTA ANALYYSISTA

Sulatusvedestä otetaan sopivan suuruinen näyte mahdollisuuksien mukaan kuljettimille menevästä syöttölinjasta. Näyte tulisi toimittaa saman päivän aikana laboratorioon analysoitavaksi tai säilytettävä asianmukaisesti. Näyte tulisi ottaa ennen kierto-vesikaivon tyhjennystä, jolloin pitoisuudet ovat oletettavasti korkeimmat.

Näytteestä analysoidaan seuraavat arvot:

- Kloridipitoisuus
- Sulfaattipitoisuus
- pH
- Alkaliteetti
- Johtokyky
- Haihdutus- ja hehkutusjäännös

Analyysien tulokset kirjataan muistiin erilliseen Excel-pöytäkirjaan. Analyysien raja-arvot ovat nähtävissä alla olevasta taulukosta.

Taulukko 31. Sulatusvesianalyysien raja-arvot.

	Suositus	Max. sallittu
Kloridipitoisuus	< 25 mg/l	< 50 mg/l
Sulfaattipitoisuus	< 50 mg/l	< 100 mg/l
pH	6,5 – 7,5	6,0 – 8,0
Johtokyky	< 35 mS/m	
Haihdutusjäännös	< 200 mg/l	< 300 mg/l
Hehkutusjäännös	< 150 mg/l	< 200 mg/l