

**SAVONIA**

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# PAINELAITTEIDEN PAKSUUSMIT- TAUSTEN SEURANTATYÖKALU

TEKIJÄ: Atte Vilkkö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Konetekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Atte Vilkkö	
Työn nimi Painelaitteiden paksuusmittausten seurantatyökalu	
Päiväys 2.5.2023	Sivumäärä/Liitteet 28/1
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Metsä Fibre Oy	
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli valmistaa Metsä Fibren Joutsenon sellutehtaalle painelaitteiden paksuusmittaus seurantajärjestelmä. Työn tarkoituksena oli kehittää työkalu, jolla seurataan peruspaksuus mittaustulosten avulla putkistojen kulumista, arvioidaan putkistojen huollontarvetta ja vältetään vaurioitumisesta johtuvia tuotannonkatkoja. Työssä perehdyttiin yrityksen vanhaan paperiseen mittapöytäkirjaan, josta mallia ottamalla kehitettiin sähköinen järjestelmä. Opinnäytetyössä käydään läpi putkistojen vaurioitumisen mekanismeja, painelaitteiden materiaalivalintoja selluteollisuudessa ja seurantatyökalun kehitysprosessia.</p> <p>Opinnäytetyön tutkimusmenetelmäksi valikoitui kehitystutkimus. Työ toteutettiin suunnittelemalla yhdessä toimeksiantajan kanssa vaatimukset työkalun toiminnalle. Työkalun pohjana toimi Microsoft Excel, mihin laadittiin kohteen perustietojen taulukko, mittapöytäkirja sekä vaaditut laskennalliset toiminnot. Excel-tiedosto toimii mittapöytäkirjana, joka lisättiin Metsä Fibren M-files järjestelmään tehtaan osastokohtaisesti. Työssä keskityttiin putkistojen peruspaksuus mittauksiin, mutta työkalua pystyy hyödyntämään kaikissa painelaitteiden peruspaksuus mittausten seurannassa.</p> <p>Työn lopputuloksena syntyi onnistunut sähköinen työkalu, josta muodostettiin seurantajärjestelmä Joutsenon sellutehtaalle. Työkalu vastasi sille annettuja tavoitteita ja toimeksiantaja pystyy hyödyntämään seurantatyökalua putkistojen kulumisen seuraamiseen ja ennustaa putkiston käyttöikä. Vaatimuslistan ulkopuolisilla, lisätyillä ominaisuuksilla tehostettiin työkalun hyötyjä ja käytettävyyttä.</p>	
Avainsanat Paksuusmittaus, putkisto, käyttöikä, vaurioitumismekanismi, materiaalivalinta	

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering	
Author(s) Atte Vilkkö	
Title of Thesis Tool for Monitoring the Thickness Measurement of Pressure Equipment	
Date 2 May 2023	Pages/Appendices 28/1
Client Organisation /Partners Metsä Fibre Oy	
<p><b>Abstract</b></p> <p>The aim of this thesis was to produce a tool for monitoring the thickness measurement of the pressure equipment for Metsä Fibre's pulp factory in Joutseno. The idea was to create a tool that monitors with the help of thickness measurement the wear of pipelines and estimates pipelines need for maintenance in order to avoid unnecessary production outage. The factory's old measurement protocol was used to create a similar computer-based measurement protocol. This thesis reviews the pipelines damage mechanisms, the material choices of the pressure equipment in pulp manufacturing and the development process of the monitoring tool.</p> <p>The thesis research method was development research. The project's requirement list was designed together with the commissioner. Microsoft Excel was chosen as the base of the tool. Excel tool included basic information table, the new measurement protocol, and the required calculation functions. The Excel based tool was added to Metsä Fibre's M-files product data management system. In this thesis it was focused on pipelines thickness measurement, but the basic tool can also be used in other thickness measurements of pressure equipment.</p> <p>The result of the work was a successful monitoring tool, which was used to create a monitoring system for the pulp factory in Joutseno. The tool met the requirements set, and the tool can be used by the commissioner to monitor pipelines wear and predict the length of service life. Additional features were added to increase the benefits and usability of the monitoring tool.</p>	
<p><b>Keywords</b></p> <p>Thickness measurement, pipeline, service life, damage mechanism, Material choice</p>	

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	METSÄ FIBRE OY.....	7
2.1	Historia .....	7
2.2	Joutsenon tehdas.....	7
3	MATERIAALIVALINNAT PUTKISTOISSA .....	9
3.1	Putkiluokat PSK standardi .....	9
3.2	Materiaalit PSK standardin mukaan .....	10
3.3	Virtaavien aineiden huomiointi .....	11
4	VAURIOITUMISMEKANISMIT PUTKISTOISSA.....	13
4.1	Kulumistyytit.....	13
4.1.1	Adhesiivinen kuluminen.....	14
4.1.2	Abrasiivinen kuluminen .....	15
4.1.3	Tribokemiallinen kuluminen .....	15
4.1.4	Väsymiskuluminen .....	15
4.2	Korroosio.....	15
4.2.1	Pistesyöpyminen.....	16
4.2.2	Pintaan kohdistuvat mekaanisen rasituksen aiheuttamat syöpymät .....	16
4.2.3	Jännitystilän ja korroosion yhteisvaikutuksesta aiheutuva murtuminen .....	17
5	PAKSUUDEN MITTAAMINEN .....	18
5.1	Standardi SFS-EN ISO 16809 .....	18
5.2	Muut mittauksessa huomioitavat asiat.....	18
5.3	Paksuusmittaukset tehtaalla .....	19
6	TYÖKALUN RAKENNE JA VAATIMUKSET .....	20
6.1	Aineisto .....	20
6.2	Mittatyökalun rakenne ja toiminta .....	20
6.3	Työkalun ohjelmointi.....	20
7	LASKIN JA SEN TOIMINTAPERIAATE.....	22
7.1	Pienimmän neliösumman menetelmä .....	22
7.2	Excel laskimen toimintaperiaate .....	23
7.2.1	Lineaarinen laskenta .....	23
7.2.2	Toisen asteen polynomifunktio .....	23

8	MITTATYÖKALUN KÄYTTÖÖNOTTO .....	24
8.1	Työkalun käyttöönotto.....	24
8.2	Vanhan mittadatan siirto .....	25
9	YHTEENVETO.....	26
9.1	Työn tulokset.....	26
9.2	Pohdinta.....	26
	LÄHTEET .....	27
	LIITE 1: TYÖKALUN KÄYTTÄJÄNÄKYMÄ, MITTAPÖYTÄKIRJA, KEKSITYT ARVOT .....	28

## KUVALUETTELO

Kuva 1.	Joutsenon sellutehdas (Hannu Vallas, 2017) .....	8
Kuva 2.	PSK 4201, Putkiluokkien nimitys (PSK Standardisointi.fi).....	10
Kuva 3.	Polymeerien kemikaalikestävyys taulukko (Aromaa, Klarin 1999, 62).....	12
Kuva 4.	Mittausohje T-haarasta/venttiilin istutuksesta (Metsä Fibre Joutseno, mittaohje, 2022) .....	19
Kuva 5.	Neliösumman muodostaminen (Nummenmaa 2021, 441) .....	22

## 1 JOHDANTO

Teollisuuden kunnossapidossa nykypäivänä pyritään mahdollisimman tehokkaaseen ennakkointiin, jotta välttyttäisiin ylimääräisiltä tuotannon pysähdyksiltä ja turhalta työltä. Ennakoiva kunnossapidon suunnittelu vaikuttaa myös kestäväen kehittymisen ja taloudellisuuden tehostamiseen, sekä isojen, että myös pienten muutosten osalta.

Metsä Fibren tehtaalla Joutsenossa yksi tapa ennakoida huollon tarvetta on välttää ylimääräisiä tuotannon seisahtumisia. Tuotannon seisahtuminen voi johtua esimerkiksi putkistojen vuotamisesta, miksi on syytä valvoa ja tarkastella putkistojen kulumista. Tehtaalla erilaisia prosessiputkia valvotaan mittaamalla tietyn ajanjakson välein putkien paksuus määrättyistä mittauskohteista. Tulokset on tähän asti otettu ylös paperimuotoiselle mittapöytäkirjalle. Tämä tapa on kuitenkin ajan saatossa kerjyttyä paljon mittadataa, jota tällä hetkellä ei pystytä käsittelemään yksinkertaisia silmämääräisiä tarkasteluja pidemmälle. Myös mittapisteiden suurehko määrä luo riskin, jossa silmämääräisessä tarkastelussa huomiointia vaativa mittakohde voi jäädä huomaamatta muiden mittaustulosten joukosta. Tällaisella fyysisellä mittapöytäkirjalla on myös riski kadota, vaurioitua tai sekoittua mittauksien yhteydessä tehtaan kiireisissä huoltoseisokeissa.

Opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää mittapöytäkirja sähköiseen muotoon ja lisätä se Metsä Fibren M-files tiedostokantaan, jolloin mittadata olisi turvallisemmassa säilytyksessä ja helposti kaikkien tehtaan henkilöiden käytettävissä. Sähköisestä mittapöytäkirjasta olisi tarkoitus saada mahdollisimman selkeä työkalu Joutsenon tehtaalle, johon sisällytetään jokaisen mittakohteen tärkeimmät tiedot. Lisäksi mittapöytäkirjaan halutaan lisätä ominaisuuksia, joilla kerätystä datasta saadaan mahdollisimman paljon laskentatietoa irti ja näin ollen ennakoidaan tarkemmin putkistojen huoltotarvetta ja pystytään esimerkiksi seuraamaan olosuhteiden vaikutusta kulumisnopeuteen. Opinnäytetyössä käsitellään myös yleisesti paksuusmittauksen menetelmiä, putkiluokkia ja materiaalivalintoja prosessiputkistoissa, sekä putkistojen vaurioitumismekanismeja.

## 2 METSÄ FIBRE OY

Metsä Fibre on Suomessa johtava sellun, sahatavaran, biotuotteiden ja biokemikaalien valmistaja. Metsä Fibre osa suomalaista metsäteollisuuskonserni Metsä Groupia. Metsä Fibren omistavat emoyhtiö Metsäliitto Osuuskunta (50,1 %), Metsä Board (24,9 %) ja ITOCHU Corporation (25,0 %). (Metsagroup.com, 2022)

Metsä Fibren valmistettaviin tuotteisiin kuuluu puupohjaiset biotuotteet, kuten sellun tuotanto, sahatavaran tuotanto, biokemikaalit ja bioenergian tuotanto. Tällä hetkellä Metsä Fibrellä on Suomessa yhteensä neljä tehdasta ja viisi sahaa. Yrityksessä työskentelee noin 1600 työntekijää. (Metsagroup.com, 2022)

### 2.1 Historia

Metsä Fibre on alun perin perustettu vuonna 1973. Tuolloin yritys kulki nimellä Metsä-Botnia. Metsä-Botnian omisti tuolloin Osuuskunta Metsäliitto, M-real ja UPM-Kymmene. Metsä-Botnian ensimmäinen tehdas valmistui 1977 Kaskisiin ja tuotantolaitoksen päätuotteena tehtiin sellua. Myöhemmin rakennettiin toinen tehdas Äänekoskelle 1985. Vuonna 1983 Metsä-Botnia osti enemmistön Kasko Woodista ja lisäsi omaa sahatavaran tuotantoa ja vientiä. (Pörssitieto.fi)

Myöhemmin Metsä-Botniaan omistukseen siirtyneitä sellutehtaita on Kemi Oy vuonna 1991, Pohjan Sellu Oy vuonna 1991, Joutseno-Pulp Oy vuonna 1997 ja Oy Metsä-Rauma Ab vuonna 2000. Vuosina 2007–2009 Metsä-Botnia on myös omistanut sellutehtaan Uruguayssa. Kaskisten sellutehdas lopetettiin vuonna 2009. Vuonna 2011 tapahtuneiden omistajasuhteiden muutosten myötä, myöhemmin vuonna 2012 Metsä-Botnian nimi kuitenkin muutettiin Metsä-Fibre Oy:ksi. (Pörssitieto.fi)

### 2.2 Joutsenon tehdas

Joutsenon sellutehdas sijaitsee Etelä-Karjalassa, Lappeenrannassa, Saimaan rannalla. Tehdas tuottaa vuodessa 690 tuhatta tonnia korkealaatuista havusellua ja tuottaa sähköä omavaraisesti 164 %. Joutsenon tehtaalla työskentelee noin 170 alan ammattilaista. Pääraaka-aineina sellulle on kuusi- ja mäntypuu. Kuvassa 1. Joutsenon sellutehdas kuvattuna Saimaalta päin. (Metsagroup.com, 2022)

Selluntuotannon lisäksi tehtaalla tuotetaan erilaisia biotuotteita, joita saadaan jalostettua sellun valmistus prosessin ohella. Sellun lisäksi tuotetaan tärpähtiä, mäntyöljyä ja bioenergiaa. Näitä tuotteita voidaan hyödyntää esimerkiksi teollisuuden tuotannossa, erilaisissa puhdistusaineissa ja elintarviketeollisuudessa korvaamaan fossiiliset raaka-aineet. Uusiutuvaa bioenergiaa jää yli tehtaan oman tarpeen, jolloin ylijäämä energia siirretään sähköverkkoon myytäväksi. Tehtaalla tuotetaan myös kuoresta tehtyä tuotekaasua, jolla tehtaan meesauuni käy. Joutsenon tehdas ei käytä normaalissa ajossa ollenkaan fossiilisia polttoaineita. Joutsenon sellutehdas käyttää sellunvalmistus prosessissa polysulfidia keittomenetelmän yhteydessä, joka lisää puusta saatavaa sellun määrää. Samalla soodakattilassa poltettavien sivutuotteiden määrä laskee. (Metsagroup.com, 2022), (Yle-Uutiset, 2013)



Kuva 1. Joutsenon sellutehdas (Hannu Vallas, 2017)

### 3 MATERIAALIVALINNAT PUTKISTOISSA

Kun valitaan putkistojen materiaaleja prosessiteollisuuteen, täytyy huomioida putkistojen käyttötarkoitusta, virtaavan aineen ominaisuuksia, painetasoa ja käyttöympäristöä. Näin ollen varmistetaan oikeanlaisella materiaalivalinnalla mahdollisimman pitkä käyttöikä prosessiputkistolle ja vältytään ennenaikaisilta vaurioitumisilta ja vaaratilanteilta.

Prosessiteollisuudessa käytetään PSK Standardisointiyhdistyksen laatimia standardeja, jotka ovat varta vasten räätälöity palvelemaan Suomessa toimivia prosessiteollisuuden laitoksia. PSK Standardit ovat yksinkertaistettuja, selkeitä, luotettavia ja tehty EN-standardien mukaisesti. Kun suunnitellaan prosessiputkistoja teollisuuslaitoksiin, löytyy PSK:n standardilistasta suoraan standardi PSK 2402 (Teollisuuden putkistot. Putkistosuunnittelun perusteet, 2022), joka ohjeistaa hyvin suunnittelussa mitä asioita täytyy ottaa huomioon.

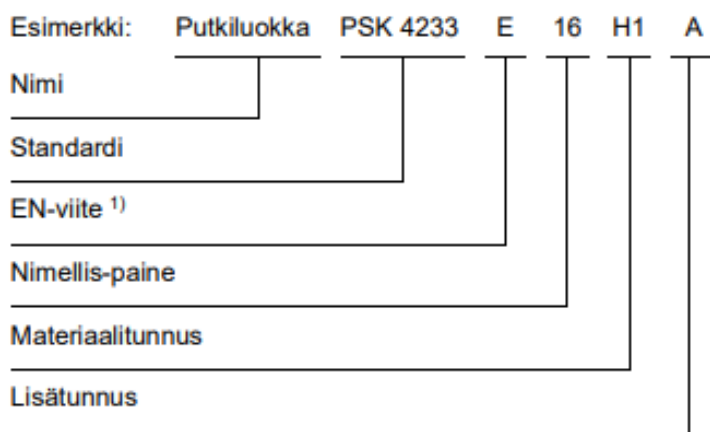
#### 3.1 Putkiluokat PSK standardi

PSK standardien mukaan putkistot voidaan valita putkiluokkien mukaan. Putkiluokat määräytyvät PSK 4201 standardin mukaan, joista selviää kyseessä olevan putkiston nimellispaine, materiaali ja tarvittavat lisätiedot.

Kuvassa 2. nähdään PSK 4201 otettu kuva, jossa on esimerkki putkiluokasta E16H1A, miten putkiluokka on nimetty. Ensimmäisenä tulevat nimi ja standardit, jotka kuitenkin yleensä jäävät pois, kun putkiluokkia käytetään esimerkiksi kaavioissa putkistoja merkittäessä. EN-viite kertoo, että kyseessä oleva putkiluokka perustuu EN-standardeihin. Numero 16 kertoo nimellispaineen eli 16 bar. Nimellispaine tarkoittaa sisäistä ylipainetta, jolle putkisto on tarkoitettu 20 °C:n lämpötilassa. Eli nimellispaineen ollessa (PN) 16 kestää putkiosa 16 bar paineen 20 °C:n lämpötilassa. Jos kyseessä olisi alipaineputkisto olisi nimellispaine merkattu arvolla 0. Materiaalitunnus H1 kertoo materiaaliksi austeniittisen ruostumattoman teräksen 1.4307 (toiselta nimeltä AISI 304 L), joka taas on SFS-EN 10217-7 standardin mukainen materiaali. Materiaalitunnus voidaan tulkita samasta putkistosuunnittelun perusteet standardista (PSK 4201, 3), joka sisältää listan materiaalitunnusten merkityksestä. Lisämerkintä ("A" esimerkissä) tunnuksen perässä, kertoo eroista saman tyyppiin putkiluokkiin verrattuna. Esimerkiksi saman nimellispaineen ja materiaalin omaavat putkiluokat on voitu valmistaa eri tavalla. Standardissa (PSK 4201, Putkiluokat. Määrittely 2022, 2) erot ovat määritetty seuraavanlaisesti:

Lisätunnusta on käytetty PSK:n teräsputkiluokissa siten, että A-lisätunnus kuvaa hitsaamalla valmistettuja putkia, B-lisätunnus kuvaa saumattomia putkia ja C-tunnuksella on merkitty putkiluokkia, joissa on sekä hitsattua että saumatonta putkea.

Jokaiselle putkiluokalle on määrätty oma PSK standardi, josta kyseisen putkiluokan tiedot ovat luetavissa. Edellisen esimerkin putkiluokka E16H1A tiedot voidaan myös lukea PSK 4233 standardista.



Kuva 2. PSK 4201, Putkiluokkien nimitys (PSK Standardisointi.fi)

### 3.2 Materiaalit PSK standardin mukaan

Materiaalit valitaan yleensä myötäillen PSK standardia, jotta on helppo hyödyntää putkiluokkia putkiliinjojen nimeämisessä. Siksi putken materiaalit määräytyvät PSK 4201 mukaan, jossa materiaalitunnukset määräytyvät seuraavanlaisesti:

- Valuraudat – A
- Seostamattomat teräkset – B
- Kuumalujat teräkset – C
- Tulenkestävät teräkset – D
- Vedyn kestävät teräkset – E
- Kylmäsitkeät teräkset – F
- Ulkopinnalta pinnoitetut teräkset – G
- Ruostumattomat teräkset – H
- Ei rautametallit – K
- Kestomuovit – L
- Betoni – M
- Keraamit – R
- Lujitemuovit – S
- Muut materiaalit – Z

Lisäksi materiaalitunnuksen perässä on yleensä numerointi, joka tarkoittaa kyseessä olevaa materiaalia. Esimerkiksi materiaalitunnus H2 tarkoittaa austeniittista ruostumatonta terästä ja A1 tarkoittaa suomugrafiittivalurautaa. Kirjaimen perässä oleva numeroinnin merkitys kannattaakin varmistaa PSK standardeista. (PSK 4201, Putkiluokat. Määrittely 2022)

Yleisimmät putkimateriaalit prosessiteollisuudessa ovat austeniittiset ruostumattomat teräkset (H1). Näiden terästen pääseosaineina on kromi ja nikkeli (CrNi-teräs). Nykypäivänä En-standardin mukaisesti teräs lajeista käytetään numerotunnusta 1.4301 ja 1.4307. Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat materiaaliominaisuuksiltaan parhaita teollisuuteen, kun halutaan välttää korroosiota, li-

sätä hitsattavuutta ja vaaditaan teräkseltä sitkeyttä. Austeniittisten ruostumattomien teräksien parhaimpina ominaisuuksina on kestää prosessiteollisuudessa käytettyjä kemikaaleja, mutta huonoina ominaisuuksina on alttius erityisesti esimerkiksi jännityskorroosiolle. Perinteiset austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat myös erikoisteräksistä kustannustehokkaimpia vaihtoehtoja. On hyvä huomioida, että austeniittisistä ruostumattomista teräksistä käytetään kaupanimeä ”ruostumattomat teräkset”. (Flinkenberg.fi, 2019), (Sorsa 2015, 139)

Austeniittisista teräksistä löytyy myös teräs, joka kulkee kauppanimellä ”haponkestävät teräkset”. Tällä nimityksellä verrataan materiaalin lisäseosaineeseen molybdeeniin, jota on lisätty nikkelin ja kromin rinnalle (CrNiMo-teräs). Tämä lisää materiaalin korroosiokestävyyttä. Mitä enemmän materiaaliin seostetaan molybdeeniä, sitä suurempi on materiaalin korroosiokestävyys erityisesti happoja ja alkaleja vastaan. Entiset teräslajit 1.4036 ja 1.4432, (jotka kuuluvat PSK standardin H2 materiaalitunnuksen alle) sisältävät noin 3 % molybdeeniä. Mutta nykypäivänä molybdeenin hintojen nousun myötä teräslaji 1.4404 (2 % molybdeeniä) on päässyt syrjäyttämään entisiä haponkestäviä teräksiä kustannussyistä. Haponkestävät teräkset ovatkin käytetyimpiä kemian-, paperi- ja selluteollisuudessa. (Flinkenberg.fi, 2019)

H3 luokkaan kuuluvat kaupallisesti niin kutsutut Duplex-teräkset. Duplex teräkset ovat austeniittisferriittistä terästä seosaineinaan nikkeli, kromi ja molybdeeni (CrNiMo-teräs). Duplex-teräkset ovat mikrorakenteeltaan erilaista, kun verrataan ruostumattomiin ja haponkestäviin teräksiin ja siksi omaavat vielä suuremman lujuuden ja korroosiokestävyyden. Duplex-terästä käytetään paljon kemian teollisuudessa, mutta sen käyttö on yleistynyt paljon rakennus- ja prosessiteollisuudessa. Duplex-terästä käyttöä kuitenkin harkitaan, sillä se on yleensä normaalia haponkestävää terästä kalliimpaa. Mutta Duplex teräksen ominaisuuksien myötä sen eduksi on osoittanut mahdollisuus vähentää materiaalin paksuutta, jolla kustannuksia saadaan laskettua. Prosessiteollisuudessa yleisimpiä käyttökohteita Duplex-teräkselle on säiliöt. Yleisimpiä Duplex-teräs lajeja on 1.4460 ja 1.4462. (Flinkenberg.fi, 2019), (Sorsa 2015, 144)

### 3.3 Virtaavien aineiden huomiointi

Selluteollisuudessa käytetään paljon erilaisia kemikaaleja, joten putkistoja suunnitellessa on huomioitava myös virtaavien aineiden vaikutukset valittuun materiaaliin. Yleensä prosessiteollisuudessa käytetään ruostumattomia ja haponkestäviä teräksiä, nikkelseosteisia teräksiä ja titaania. (Aromaa, Klarin 1999, 64)

Alkaleja sellun valmistuksessa on esimerkiksi valkolipeä ( $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$ ), mustalipeä, viherlipeä. Valkolipeä ja viherlipeä sisältävät epäorgaanisia aineita, kuten hydroksidia, sulfaattia, polysulfidia, tiosulfaattia, sulfiittia, karbonaattia ja kloridia. Mustalipeä on valkolipeää, johon on sellun valkaisu-prosessissa liuennut orgaanisia aineita sellumassasta, kuten ligniiniä. Suurin osa ruostumattomista ja haponkestävistä teräksistä ovat korroosio kestäviä selluprosessin heikkoihin alkaleihin ja happoihin. Mikäli korroosio kestävyttä vaaditaan lisää, käytetään Duplex-teräksiä. (Outokumpu Oyj 2015, 94)

Kuitenkin vahvat alkalit ja hapot voivat reagoida kemiallisesti teräsmateriaalin kanssa joko syövyttämällä materiaalia tai nopeuttamalla niiden korroosiota tai kulumista. Näissä tilanteissa täytyy putkistojen materiaaleiksi valita vaihtoehtoinen materiaali. Tällaisia vaihtoehtoisia materiaaleja on esimerkiksi polymeerit. Kuvassa 3. nähdään taulukko, joka määrittää mitkä polymeerit kestävät sääolosuhteita, heikkoja ja vahvoja alkaleja, heikkoja ja vahvoja happoja, sekä liuottimia. Myös polymeeriset materiaalit ovat usein kustannustehokkaimmat ratkaisut metallisten materiaalien korvaamiseen. Yleisimmät polymeeriset putket selluteollisuudessa on muoviset ja polymeeriset komposiittivalmisteet. Esimerkiksi sellun valkaisuun käytettyä klooridioksidia varten käytetään komposiitti putkistoja ja haastavammissa muodoissa lasikuitu vahvisteisia hartsi materiaaleja esimerkiksi pumppujen ja venttiilien osissa. Vinyyli esterisiä komposiitteja voidaan käyttää korroosiota aiheuttavien kaasujen kanssa korkeissa lämpötiloissa (jopa 170 °C). (Aromaa, Klarin 1999, 61–64)

**Table 6.** Chemical resistance of polymers where R = resistant, A = attacked, S = slight effect, and E = embrittles<sup>16, 17</sup>.

Material	Weather resistance	Weak acid	Strong acid	Weak alkali	Strong alkali	Solvent
PTFE	R	R	R	R	R	R
FEP	R	R	R	R	R	R
ETFE	R	R	R	R	R	R
PFA	R	R	R	R	R	R
PVDF (PVF2)	S	R	A H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	R	R	R
PCTFE	R	R	R	R	R	S
ECTFE	R	R	R	R	R	R
LDPE	E	R	A oxidizing	R	R	R
HDPE	E	R	R – A	R	R	R
PP	E	R	A oxidizing	R	R	R
Polybutylene	E	R	A oxidizing	R	R	R
PPO	R	R	R	R	R	R – A
PPS	R	R	A oxidizing	R	R	R
PVC	R	R	R – S	R	R	R – A
PVDC	R	R	R – S	R	R	R – A
Epoxy	R	R	A	R	R	R – S

Kuva 3. Polymeerien kemikaalikestävyys taulukko (Aromaa, Klarin 1999, 62)

## 4 VAURIOITUMISMEKANISMIT PUTKISTOISSA

### 4.1 Kulumistyytit

Kulumista voidaan luokitella erilaisin perustein luokkiin, joten luokkien jakamiseen yleensä vaikuttaa missä tilanteessa kuluminen tapahtuu. Kivioja, Kivivuori ja Salonen (2007, 100) kertovat, että kulumistyytit voidaan luokitella kahteen luokkaan. Ensimmäinen tyyppi on ”luokittelu kulumista aiheuttavan suhteellisen liikkeen pohjalta”. Toinen tyyppi on ”luokittelu kulumismekanismin pohjalta.”

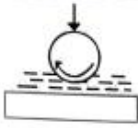
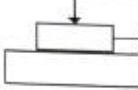
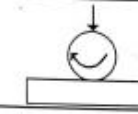
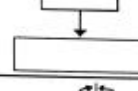

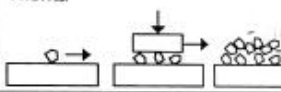

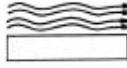



Luokittelu suhteellisen liikkeen pohjalta jaotellaan seuraavanlaisesti:

- liukuminen
- vierintä
- iskukuormitus
- värähtely
- nestevirtaus
- nestevirtaus, jossa mukana partikkeleita

Mutta kun luokitellaan kulumismekanismin perusteella, jaotellaan tyytit adheesioon, abraasioon, pinnan väsymiseen ja tribokemialliseen kulumiseen. (Kivioja, Kivivuori, Salonen 2007, 100)

Taulukkoa 1 voidaan käyttää tulkitsemaan erilaisia tilanteita, joissa kulumista tapahtuu. Esimerkki tapaukseksi voidaan ajatella tilanne, jossa putkistojen kulumista aiheuttaa virtaava-aine tai virtaava-aine, jossa on mukana partikkeleita. Taulukosta 1 nähdään edellä mainittujen rasitustyyppien kulumistyytit ja kulumismekanismit. Pelkästään virtaavan-aineen kulumistyyppinä toimivat kavitaatio ja pisaraerosio, ja kulumismekanismit voidaan määrittää pinnanväsyminen tai tribokemiallinen kuluminen. Kun virtaavaan aineeseen lisätään partikkeleita, voidaan lisätä kulumistyyppihin eroosio ja korroosioeroosio, ja kulumismekanismeihin abraasio.

Taulukko 1. Kuluminen kuluttavan rasituksen ja kulumismekanismien mukaan. (Kivioja, Kivivuori, Salonen 2007, 101)

Systeemin rakenne	Kulumisen aiheuttava rasitustyyppi	Kulumistyyppi	Kulumismekanismi			
			Adheesio	Abraasio	Pinnan väsyminen	Tribo-kemiallinen
Kiinteiden pintojen välissä voiteluaine	Liukuminen Vierintä Isku Sysäykset 				X	X
Kiinteät pinnat toisiaan vasten	Liukuminen 	Liukumis-kuluminen	X	X	X	X
	Vierintä 	Vierintä-kuluminen	X	X	X	X
	Iskukuormitus 	Isku-kuluminen	X	X	X	X
	Värähtely 	Värähtely-kuluminen	X	X	X	X
Kiinteät pinnat ja kulumispartikkeli	Hionta 			X		
Kiinteät pinnat ja partikkelit	Partikkeli-suihku 	Erosio		X	X	X
Kiinteä pinta ja kaasu	Virtaus 	Kaasu-erosio				X
Kiinteä pinta ja neste	Virtaus Värähtely 	Kavitaatio			X	X
	Virtaus Isku 	Pisara-erosio			X	X
Kiinteä pinta ja nesteessä kuluttavia partikkeita	Virtaus 	Erosio		X	X	
		Korroosio-erosio		X	X	X

#### 4.1.1 Adhesiivinen kuluminen

Adhesiivista eli tartuntakulumista syntyy, kun kahden kappaleen pintojen väliset pinnankarheuden ulokkeet liittyvät kitkaliitoksin toisiinsa ja leikkautuvat. Leikkautuneet partikkelit voivat kahden pinnan välissä hitsautua kappaleiden liikkeestä syntyvän kitkan vuoksi ja repeämällä luoda epätasaisuutta. Materiaalia siirtyy pinnalta toiselle, mutta ajan kuluessa kaikki materiaali ei aina siirry pinoilta toiselle vaan jää pintojen väliin irtonaisiksi partikkeleiksi. Irronneet partikkelit voivat jatkaa pintojen välissä aiheuttaen abrasiivista kulumista. (Kivioja, Kivivuori, Salonen 2007, 104–107)

#### 4.1.2 Abrasiivinen kuluminen

Abrasiivista eli hiontakulumista syntyy, kun kovemman pinnan omistava kappale liukuu voiman vaikutuksesta pehmeämpää pintaa vasten, jolloin pinnan karheuksien huiput uurtavat pehmeämmästä pinnasta partikkeleita irti. Ajan kuluessa partikkelit voivat kerääntyä ja muokkauslujittua pintoja kovemmaksi kappaleeksi ja synnyttää kulumistilanteen, jolloin voidaan puhua kolmen kappaleen abrasiivisesta kulumisesta. (Kivioja, Kivivuori, Salonen 2007, 108–110)

#### 4.1.3 Tribokemiallinen kuluminen

Normaalisti metallien pinnalla on oksidikerros, joka pienentää pintojen kulumisnopeutta ja kitkaa. Kun kulutuspintojen pinnankarheuksien huiput kuluttavat toisiaan, syntyy lämpöenergiaa. Koska oksidikerrokseen liittyy kemiallinen reaktio, lisää tämä reaktio metallipintojen oksidikerroksen paksumutta hyödyntäen lämpöenergiaa. Tribokemiallinen kuluminen on pääosin oksidoituneen kerroksen kulumista metallin pinnalta. Hapettunut kerros metallin pinnalla on haurastunut ja murtuu helposti paljastaen uuden puhtaan pinnan altaan, joka paljastuttuaan hapettuu nopeasti muodostaen uuden oksidikerroksen. (Kivioja, Kivivuori, Salonen 2007, 111–112)

#### 4.1.4 Väsymiskuluminen

Väsymiskulumisessa ei suoraan synny kulumispartikkeleita. Väsymiskuluminen alkaa yleensä pitkäaikaisemmasta tykytyksestä tai voimaltaan vaihtelevasta rasituksesta. Kun kappaleen pinnan ulokkeet deformoituvat plastisesti tarpeeksi moneen kertaan, irtoaa kulumispartikkeleita väsymiskulumismurtuman seurauksena. Kun kulumista ei voida määrittää adhesiiviseksi tai abrasiiviseksi kulumiseksi on yleensä kyseessä pintakerroksen väsyminen. Väsymismurtuma saa alkunsa murtumasäröstä, jonka ympärille kehittyy jännityskenttä johtuen toistuvasta rasituksesta. Murtumasäro jatkaa etenemistä aina joka kuormanvaihtoluvulla. Tämä johtaa lopulta partikkelien irtoamiseen. (Kivioja, Kivivuori, Salonen 2007, 113)

### 4.2 Korroosio

Korroosio on yksinkertaisuudessaan materiaalien tuhoutumista ympäristön vaikutuksesta. ”Korroosiolle tarkoitetaan metallien ja ympäristön välillä tapahtuvaa sähkökemiallista reaktiota, joka aiheuttaa metallien syöpymistä, pienentää materiaalin lujuutta ja muuttaa sen ulkonäköä.” (Sorsa 2015, 39). Sorsan mukaan korroosiotapahtuu metallien välillä sähkökemiallisina liukenemisina, joissa on mukana vettä. Tällöin korroosiossa metalleista epäjalompi kappale tai kappaleen osa (anodi) pyrkii liukenemaan, kun taas jalompi metalli tai sen osa (katodi) pysyy suojattuna. (SFS-EN ISO 8044:2020, 6)

Korroosio voidaan kuitenkin jakaa sähkökemiallisen korroosion esiintymismuotoihin, jotka yleisesti määritetään seuraavanlaisesti:

- yleinen syöpyminen
- pistesyöpyminen

- galvaaninen eli kontaktikorroosio
- pintaan kohdistuvan mekaanisen rasituksen aiheuttama syöpymä
- raerajakorroosio
- valikoiva liukeneminen
- jännitystilän ja korroosion yhteisvaikutuksesta aiheutuva murtuminen

Putkistoissa ilmenee kaikkia edellä mainittuja korroosiokulumisen esiintymismuotoja, mutta seuraavaksi käsitellään putkistoissa suurimmat korroosiokulumista aiheuttavat esiintyjät. (Sorsa 2015, 41)

#### 4.2.1 Pistesyöpyminen

Pistesyöpyminen on metallin kulumista, joka kohdistuu pienelle alueelle synnyttäen pieniä syvänteitä. Pistesyöpyminen saa yleensä alkunsa erilaisista pinnan muodoista tai muutoksista. Tällaisia muotoja on esimerkiksi erilaiset urat pinnoilla, jotka johtuvat pinnankarheudesta, pinnalla sijaitsevista elektrolyyttipisaroista, liuoksen voimakkaasta törmäämisestä pintaa vasten tai pintakalvojen rakennevirheistä. Pistesyöpyminen on yleinen korroosionmuoto, kun korroosionkestävyys perustuu metallissa pintaa suojaavaan passiivikerrokseen tai perusmetallia jalompaan pinnoitteeseen. Usein putkimateriaaliksi valittujen ruostumattomien terästen kulumisen pistesyöpymis mekanismilla on yleistä, kun teräs joutuu meriveden tai natriumkloridi -liuoksen kanssa tekemisiin. Tämän korroosio tyyppin nopeuteen vaikuttaa myös kosketuksissa olevan liuoksen pH-arvo, lämpötila ja virtausnopeus. (Sorsa 2015, 42), (Kunnossapitoyhdistys RY 2004, 103)

#### 4.2.2 Pintaan kohdistuvat mekaanisen rasituksen aiheuttamat syöpymät

Pintaan kohdistuvan mekaanisen rasituksen aiheuttamia syöpymä mekanismit voidaan jakaa kolmeen luokkaa: eroosiokorroosio, kavitaatiokorroosio ja hiertymiskorroosio.

Eroosiokorroosio esiintyy, kun liuoksen liikenopeus kasvaa riittävän suureksi, se pyrkii irrottamaan metallin pinnalta suojaavia korroosiotuotekerroksia, jolloin korroosionopeus kasvaa. Korroosionopeus on riippuvainen suoraan virtaavan nesteen virtausnopeudesta. Eroosiokorroosiota aiheuttaa virtauksen epäjatkuvuuskohdat, jotka aiheuttavat virtaukseen pyörteitä ja tästä johtuvaa kriittisen nopeuden ylityksiä. Putkisto virtauksissa alttiita eroosiokorroosiolle on erityisesti putkimutkat, haaraumat ja putkistojen kuristumat tai suuaukot. (Kunnossapitoyhdistys RY 2004, 111)

Kavitaatiokorroosiossa nesteen virtauksessa syntyneet kaasukuplat luhistuvat nesteen liikkeestä, jolloin nesteeseen syntyy voimakkaita paineaalloja. Nämä paineaallot voivat rikkoa metallin pintaa suojaavaa korroosiotuotekerrosta paljastaen puhdasta pintaa, joka altistuu uudelleen korroosiolle. Riittävän voimakkaat paineiskut rikkovat metallin pintaa mekaanisesti, jolloin kyseessä on kavitaatio-eroosio. (Kunnossapitoyhdistys RY 2004, 112)

Hiertymäkorroosiossa kulumista tapahtuu kahden toisiaan vastaan puristettujen pintojen välillä, silloin kun pinnat värähdellessään pääsevät hieman liikkumaan. Pintojen epätasaisuuksien huippujen kosketuskohdissa kosketusjännitykset voivat nousta erittäin suuriksi ja ne voivat hitsautua yhteen ja murtua liikkeen vuoksi. Murtuneet partikkelit voivat hapettua ja pintojen väliin jäävät oksidipartikkelit aiheuttavat abrasiivista kulumista pintojen välissä. Hiertymäkorroosiota voi esiintyä putkistoissa, putkien ja niiden kannattamien välissä. (Sorsa 2015, 46)

#### 4.2.3 Jännitystilän ja korroosion yhteisvaikutuksesta aiheutuva murtuminen

Jännitystilän ja korroosion yhteisvaikutuksesta aiheutuva murtuminen jaotellaan jännityskorroosioon ja korroosioväsymiseen. Koska korroosioväsyminen näyttää suurempaa vaikutustaan putkistojen kulumisessa käsitellään sitä seuraavaksi.

Korroosioväsymistä ilmentyy, kun rakenne joutuu värähtelyn, vaihtosuuntaisen kuormituksen tai termisten vaihteluiden alaiseksi. Tällaisessa tilanteessa määrää materiaalin väsymislujuus kestoiän. Korroosioympäristössä korroosioväsymiskestävyys on huomattavasti pienempi kuin ilman korroosioväliainetta. Korroosioväsyminen on todennäköistä esimerkiksi olosuhteissa, joissa materiaali on altis muille paikallisen korroosion muodoille, kuten pistekorroosiolle. Pistekorroosiotilanteessa pinnan paikalliset korroosioauriot toimivat jännityksen keskitys alueina. Korroosioväsymistä esiintyy kuitenkin enemmän sellaisissa olosuhteissa, joissa materiaalin syöpyminen ilman dynaamista rasitusta on tasaista syöpymistä. ”Tällöin paikalliset muodonmuutokset, joita jännitysvaihtelut aiheuttavat materiaalin pintaan, rikkovat passivaatiokerroksen tai muodostavat muuhun pintaan nähden epäjalomman alueen, joka anodisena syöpyy.” (Sorsa 2015, 50)

Korroosioväsymistä voi syntyä, kun putkistojen ja säiliöiden sisäpaine vaihtelee, venttiileissä epätaisesta höyry- tai nestevirtauksista sekä venttiilien käyttöön liittyvistä paineiskuista. Myös putkistojen ja säiliöiden lämpölaajenemiskäyttäytymisen erot ja yleisesti lämpötilavaihtelut johtavat korroosioväsymiseen. Erilaiset putkistojen komponentit, kuten pumput, venttiilit ja kompressorit aiheuttavat värähtelyjä, mitkä johtavat korroosioväsymiseen. Isoissa laitoksissa edellä mainitut korroosioväsymisen aiheuttajat ovat välttämättömiä ilmiöitä. Lisäksi tehdään ylös- ja alasajojen aikana esiintyy korroosioväsymistä, mutta normaaliin ajoon verrattuna paljon suuremmalla mittakaavalla. (Sorsa 2015, 50)

## 5 PAKSUUDEN MITTAAMINEN

Putkistojen paksuuksia mitataan rikkomattoman aineenkoetus metodilla, josta käytetään lyhennettä NDT-mittaus (tulee englannin kielen sanasta Non-Destructive Testing). NDT-mittauksen tarkoituksena on selvittää mitattavan kohteen rakennetta hajottamatta tätä. Yleisiä käyttökohteita tällaiselle koetustyylille on esimerkiksi tutkia erilaisten hitsauksien laatua, rakenteiden paksuutta tai etsiä rakenteesta poikkeamia kuten murtumia. Rikkomattoman aineenkoetusta voidaan käyttää metallisille tai ei metallisille materiaaleille.

### 5.1 Standardi SFS-EN ISO 16809

Rikkomattoman aineenkoetukselle on säädetty standardi (SFS-EN ISO 16809:2019: Rikkomaton aineen koetus. Paksuusmittaus ultraäänellä, 2019), joka määrittää NDT-mittauksen käyttämällä ultraäänipulssien kulkuajan mittausta. Kyseisen standardin mukaan ultraääni mittauksia voidaan suorittaa neljällä eri tavalla.

Ensimmäinen mittaustapa on mittaus yhdestä kaiusta, missä mitataan kulku-aikaa siitä, kun laite on lähettänyt lähtökaiun ja vastaanottaa ensimmäisen kaiun. Tämän jälkeen ajasta vähennetään kyseisen luotaimen viive, joka vastaa kytkentäaineen ja luotaimen kulutus-pinnan vaikutusta.

Mittaus yhdestä kaiusta viivekappaleen avulla. Edelliseen kohdan 5.1.1 vastaava mittaustapa, mutta käytetään mitattavan kappaleen ja luotaimen välissä viivekappaletta. Kulku-aika mitataan ensimmäisestä takaseinäkaiusta.

Kolmas tapa on mittaus monikertakaiusta. Tällä mittaustavalla mitataan lähettämällä monta kaikua peräkkäin. Takaseinäkaiujen välisestä kulkuajasta voidaan määrittää paksuus.

Standardin neljäs mittaustapa on läpäisytekniikka. Tässä mittaustavassa käytetään sekä lähetintä että vastaanotinta. Lähetin ja vastaanotin asetetaan mitattavan kappaleen ympärille osoittamaan vastakkain toisiaan. Kulku-aika saadaan äänen kulkiessa lähettimestä vastaanottiin.

### 5.2 Muut mittauksessa huomiotavat asiat

Standardi SFS-EN ISO 16809:2019 määrittää myös erilaisia huomiotavia asioita mittauksissa, jotta mittaus on standardin mukaisesti tehty.

Luotain on pystyttävä kytkemään kohteeseen akustisesti joko geelin, tai nesteen avulla. Mittauksessa käytettävä neste tai geeli ei saa vaikuttaa haitallisesti kohteeseen tai laitteistoon, eikä se saa olla mittaajalle haitallinen tai myrkyllinen. Erikoisiin mittakohteisiin on standardissa määritetty kytkentäainelista.

Mittauslaitteen tarkkuutta on säädettävä tarkistuskappaleiden avulla, jotta voidaan varmistaa mittauslaitteiston toimivuus ja tarkkuus.

Mittauskohde on määritetty standardissa niin että kohteen materiaalin on oltava ääntä johtava ja kohteen pintoihin on päästävä käsiksi. Mitattavien pintojen täytyy olla puhtaat, jotta mittauslaitteiston ja mitattavan pinnan väliin ei jää epäpuhtauksia, mitkä häiritsisivät mittauksia. Mikäli kohteessa

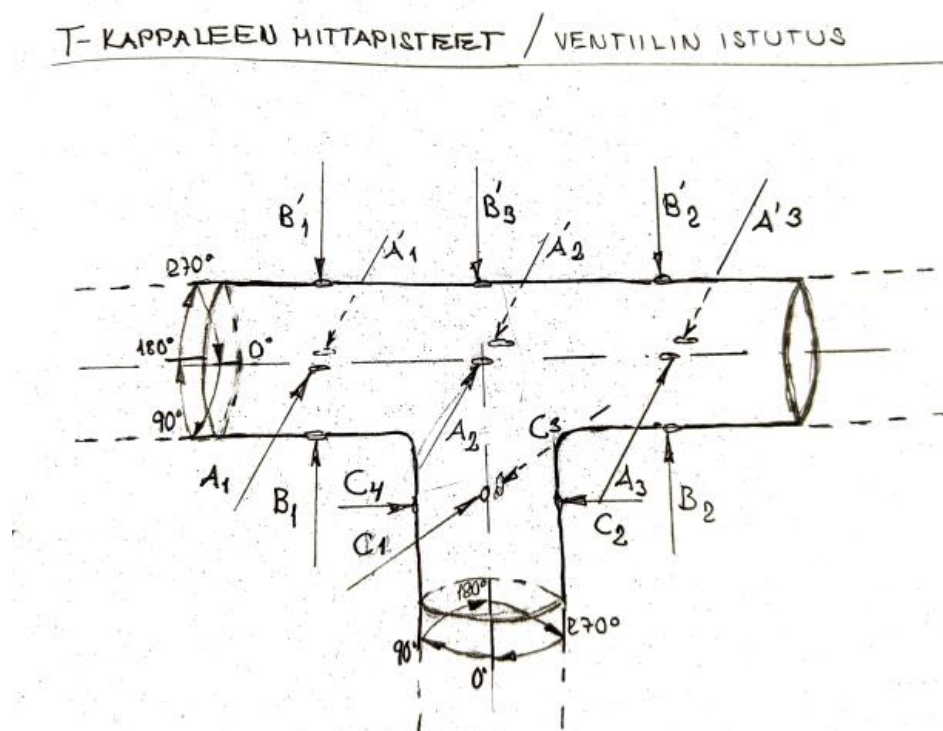
on pinnoitus, on sen oltava hyvin kiinni pinnassa, muuten standardi määrää sen poistettavaksi. Pinnoitteen ollessa paikoillaan se vaikuttaa mittaustulokseen, jolloin realistisen arvon saamiseksi on huomioitava pinnoitteen paksuus ja äänennopeus. Mikäli edellisiä arvoja ei tiedetä, voidaan käyttää monikeräkaikumittausta (kohta 5.1.3). Muita huomioon otettavia kohtia on pinnankarheus ja pinnan profiili.

### 5.3 Paksuusmittaukset tehtaalla

Joutsenon tehtaalla tutkitaan prosessiputkien kulumista suorittamalla putkistoille NDT-mittauksia määrätyn väliajoin. Paksuuksia suoritetaan joko huoltopäivien tai tehtaan huoltoseisokien aikana, riippuen siitä, mikä prosessilinja on kyseessä. Joutsenon tehtaalla paksuusmittauksia suoritetaan yleensä palkattu alihankinta yritys, jonka vuoksi epäselvyyksiä välttämiseksi on laadittu mittaohje ja mittakohteiden sijainti kartta. Näin jokainen mittauksen suorittaja osaa dokumentoida tulokset oikean kohdan alle.

Mittauskohteena olevat putkilinjat on määritetty tehtaan putkitus- ja instrumentointikaavioiden (PI-kaavio) mukaan. Putkistojen isometrisien putkilinjojen kuviin on merkitty mittauskohteet juoksevalla numeroinnilla lähtien aina linjan alusta loppuun asti. Haluttuja mittauskohteita on erilaisia ja ne on nimetty muotojen mukaan. Erilaisia mittakohteita putkistoissa on määritetyt suorat, putkistojen käyrät, erilaiset haaraumat ja keskeiset kartiot. Kuvassa 4. nähdään esimerkki T-kappaleen mittaohjeesta. Kuvassa on määritetyt mittapisteeet, joista halutaan mittaustulokset. Tarkalla mittaushje-kuvalla mahdollistetaan, että pisteiden mittaustapahtuu suorittajasta riippumatta aina samasta kohdasta, jolloin saatu data on luotettavampaa ja välttyttäisiin mittaustulosten virheiltä.

Mikäli mitattavassa putkikohdassa on huomattavasti muutoksia verrattuna edellisiin tuloksiin, määrää mittaohje tekemään laajemman tarkastelun kuluneeseen mittapisteeseen ja sen ympärille.



Kuva 4. Mittausohje T-haarasta/venttiilin istutuksesta (Metsä Fibre Joutseno, mittaohje, 2022)

## 6 TYÖKALUN RAKENNE JA VAATIMUKSET

### 6.1 Aineisto

Aineisto eli mittapöytäkirja, jonka perusteella mittatyökalu kehitetään, saatiin toimeksiantajalta. Aineisto sisältää aikaisemmin tehtaalla suoritetuista putkistojen mittaamiseen sisältyvää dataa putkistojen paksuuksista. Lisää aineistoa toimitetaan pyydettyä opinnäytetyöntekijälle. Työkalun rakenteesta muodostettiin yhdessä toimeksiantajan edustajien kanssa visio, jonka kautta työkalua on helppoa lähteä muodostamaan. Työkalulle määritettiin yhdessä halutut toiminnot ja visuaalinen rakenne.

Paksuusmittaukset ovat toimeksiantajan toimesta määritetty osastokohtaisiksi ja näiden putkistolinjojen ja mittakohteiden mukaan. Mittaustulokset on järjestetty uusimmista vanhimpiin ja saattaa sisältää suoritettuja lisämittauksia, mikäli Joutsenon tehtaalle määritetty mittausohje määrää niitä suorittamaan.

### 6.2 Mittatyökalun rakenne ja toiminta

Työkalun rakenne koostuu kolmesta osasta: etusivusta, mittapöytäkirjoista ja yhteenvetosivusta. Etusivussa määritetään kyseisen työkalun sisältö. Sisältö kertoo minkä osaston mittaustuloksista on kyse. Samalla etusivulle on listattu jokainen mittapöytäkirja linjatunnuksen mukaan. Samalla etusivu listaa jokaisen linjatunnuksen mittauspisteen oleelliset tiedot:

- Materiaali
- Käyttölämpötila
- Suunnittelupaine
- Virtaava-aine
- Putkiluokka
- Putken sallittu minimipaksuus ja lähtöpaksuus arvo
- Haarautuvat linjat (linjatunnukset)
- Linjaan liittyvä PI-kaavio numero

Mittapöytäkirjaan sisältää tietotaulukon lisäksi itse mittauspöytäkirjan, mittaustuloksista syntyvän graafisenkaavion, paksuuden ennustelaskimen sekä mittaohjeen mukaisen mittausohjekuvan.

Yhteenvetosivulle syntyy uusi lista kaikista mittapöytäkirjoista ja ilmoittaa jokaisen mittapöytäkirjan tuloksista, mikäli ne ovat hälyttävän lähellä sallittua minimi rajaa. Näin ollen käyttäjän on helppo katsoa yhteenvetosivulta mitkä putkilinjat tarvitsevat suurempaa huomiota.

### 6.3 Työkalun ohjelmointi

Työkalun pohjaksi valikoitui Microsoft Excel sen hyvän sovellettavuuden ja helpon käytettävyyden takia. Excel on työkalu, johon monella yrityksellä on mahdollisuus päästä käsiksi ja on nykypäivänä

yleinen ohjelmisto, joten jokaiselta löytyy pieni käsitys, kuinka ohjelmaa käsitellään. Se on myös työkalu, joka ei sido yritystä muuhun ulkopuoliseen toimintaan ja on yrityksen sisäisesti hallittavissa. Excel-tiedosto on helppo sisällyttää Metsä Fibren M-files tietokanta järjestelmään. Laskennan luominen onnistuu helposti ja sitä on mahdollisuus jatkossa kehittää ja parantaa entisestään.

Exceliin luotiin vanhan mittapöytäkirjan mukainen taulukkopohja, joka sisältää samat täytettävät arvot, jotta vanha mittadata saadaan siirrettyä nykyiseen Excel pohjaan. Samalla lisätään kohtia, joihin haluttuja tärkeitä arvoja voidaan lisätä. Excel pohjan etuna on luoda paljon dataa käsitteleviä toimintoja, joilla saadaan helposti tulkittua mittadataa ja näin ollen ennustamaan mitattujen putkistojen elinkaarta.

Tavoitteena Joutsenon sellutehtaalla on siirtää vanha mittadata fyysisistä pöytäkirjoista Excel muotoon, jolloin Excel hyvinä ominaisuuksina on taulukkopohjan monistaminen nopeasti ja helposti, jolloin datan siirto tapahtuu vaivattomasti. Taulukkopohja on näin helppo räätälöidä jokaisen mittakohteen mukaan, jolloin vähennetään virheitä datansiirtoprosessin aikana. Joutsenon tehtaalle haluttu työkalupohja on räätälöity yhdessä kunnossapidon ammattilaisten kanssa palvelemaan mahdollisimman hyvin tehtaan kunnossapitoa.

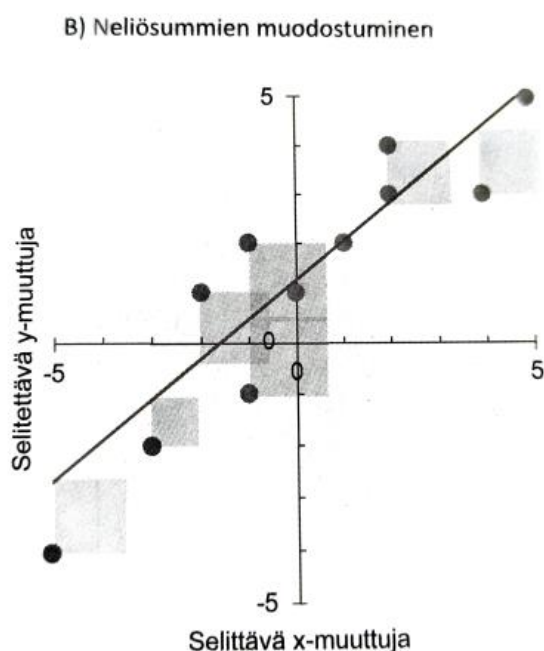
## 7 LASKIN JA SEN TOIMINTAPERIAATE

Excel pohjaiseen työkaluun sisällytetään myös putkiston ennustelaskin, jolla voidaan arvioida putken käyttöikä. Laskin ennustaa annetusta mittadatasta päivämäärän, jolloin putken paksuusarvo saavuttaa annetun miniarvon.

### 7.1 Pienimmän neliösumman menetelmä

Paksuusmittausaineiston datasta voidaan luoda kaavio, joka kokoaa graafisesti pistemäisen taulukon, jossa putkiston mitatun paksuudenarvon ja mittaus päivämäärän avulla voidaan luoda pisteelle koordinaatit. Molemmat arvot muuttuvat ajan kuluessa, eli ovat muuttujia. Aineistosta valitaan selitettävä muuttuja ja selitettävä muuttuja. Yleensä y-muuttuja on arvo, jonka arvon vaihtelu pyritään selittämään x-muuttujien avulla. Näin ollen y-muuttujia kutsutaan selitettäväksi muuttujaksi, kun taas x-muuttujia kutsutaan selittäväksi muuttujaksi. Toisin sanoen y-muuttujan arvojen ollessa mitattu paksuudenarvo, pyritään tällä menetelmällä selittämään paksuudenarvojen muutos käyttämällä hyväksi x-muuttujan eli päivämäärien arvoa. Tällä matemaattisella mallilla voidaan laskea ennuste putkiston käyttöiälle. Tätä menettelyä kutsutaan regressioanalyysiksi. (Nummenmaa 2021, 440)

Putkiston käyttöiän määrittämisessä käytetään hyödyksi pienimmän neliösumman menetelmää. Tällä menetelmällä pyritään piirtämään käyrä tai suora, joka kulkee aineistosta muodostuneiden pisteiden läheisyydestä. Aineistosta on kuitenkin mahdotonta määrittää pistemääriä kuvaavaa käyrää, jolloin tarvitaan kriteeri, jolla käyrän sopivuutta voidaan arvioida aineistoon. Kriteerinä voidaan siis hyödyntää pienimmän neliösummaa. Pienimmän neliösumman menetelmässä pyritään määrittelemään regressiosuoran kulmakerroin ja vakio-termi siten, että kaikkien jäännöstermien neliöiden yhteenlaskettu summa olisi mahdollisimman pieni. Jäännöstermi neliöidään, jotta summalausekkeeseen ei jäisi negatiivisia termejä ja näin pyritään minimoimaan lauseke. (Nummenmaa 2021, 442)



Kuva 5. Neliösumman muodostaminen (Nummenmaa 2021, 441)

## 7.2 Excel laskimen toimintaperiaate

Excel työkalussa käyttöön laskemisessa voidaan käyttää hyväksi LINREGR-funktiota, joka kokoaa pienimmän neliösumman mukaan yhtälön saaduista mittaustuloksista. Tätä funktiota hyödyntämällä voidaan määrittää arvioitu kestoikä putkistolle. Kun mittausarvoista on määritetty lineaarisen regressiion menetelmällä yhtälö, voidaan yhtälön ratkaisemalla määrittää paksuusennuste. Ennuste voidaan laskea monella eri tavalla, mutta tähän työkaluun on valittu kaksi varmintä laskutapaa. Nämä laskutavat ovat lineaarisen- ja toisen asteen polynomifunktion määrittäminen.

### 7.2.1 Lineaarinen laskenta

Yksinkertaisin laskenta tapa on muodostaa mittaustuloksista LINREGR-funktiolla lineaarinen käyrä. Lineaarinen käyrä on suora viiva, joka kulkee mahdollisimman läheltä kaikkia mittaustuloksen pisteitä. Lineaarinen käyränmuoto kuvaa parhaiten tasaisesti kuluva putkistoa. Lineaarinen käyrän funktio on esitetty kaavassa 1 ja kaavassa 2, miten lineaarisen käyrän ennuste lasketaan työkalussa.

$$y = kx + b \quad (1)$$

ja

$$x = \frac{y-b}{k} \quad (2)$$

missä  $y$  = muuttuja (paksuuden sallittu minimi)

$k$  = yhtälön kulmakerroin

$x$  = muuttuja (päivämäärä)

$b$  = yhtälön vakio

### 7.2.2 Toisen asteen polynomifunktio

Toisen asteen polynomifunktiossa on kaksi muuttujaa vakion  $x$ -muuttujan lisäksi. Tämä laskentatapa piirtää polynomisen käyrän pisteiden perusteella, joten se sopii hyvin ennustettavuuden tarkasteluun. Kuitenkin syötetty data ei aina anna tuloksia, mistä syystä on hyvä olla muita laskennallisia vaihtoehtoja. Toisen asteen polynomifunktio kaavassa 3 ja sekä siitä johdettu ennusteen ratkaisu kaava 4.

$$y = a * x^2 + b * x + c \quad (3)$$

ja

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 * a * (c - y)}}{2 * a} \quad (4)$$

missä  $y$  = muuttuja (paksuuden sallittu minimi)

$a$  = yhtälön kerroin 1

$b$  = yhtälön kerroin 2

$c$  = yhtälön vakio

$x$  = muuttuja (päivämäärä)

## 8 MITTATYÖKALUN KÄYTTÖÖNOTTO

### 8.1 Työkalun käyttöönotto

Työkalun valmistuttua, luodaan työkalusta itse seurantajärjestelmä toimeksiantajalle. Seurantajärjestelmä syntyy, kun itse työkalupohjaa monistetaan ja jaetaan Joutsenon tehtaalle osastokohtaisesti. Näin saadaan selvä järjestelmärakenne, missä tiedetään mitkä mittaustulokset kuuluvat millekin tehtaan osastoille.

Työkalu jaetaan massatehtaan, talteenoton ja jäteveden käsittelyn alle osastoittain. Taulukossa 2. nähdään tehtaan osastot alueisiin luokiteltuina, joihin työkalu sisällytetään. Jokaisen osaston alle tulee oma mittatyökalu tiedosto, jotta mittaustulokset ovat järjestyksessä. Taulukon 2. mukainen kansiorakenne luodaan Metsä Fibren M-files järjestelmään.

Taulukko 2. Joutsenon tehtaan osastot, joille työkalu kehitetty.

Alue	Osasto
<b>JOU-20 Massatehdas</b>	
	20-053 Massatehdas yhteiset
	20-054 Keittämö
	20-055 Pesemö
	20-056 Happivaihe
	20-057 Lajittelu
	20-058 Valkaisu
	20-080 Kemikaalien valkaisu
<b>JOU-40 Talteenotto</b>	
	40-070 Pumppuasema
	40-090 Kuorenkaasutus
	40-091 Saostuslaitos
	40-092 Suolanpoisto
	40-093 Soodakattila 3
	40-094 Turbiinilaitos
	40-095 Haihduttamo 3
	40-096 Mäntyöljylaitos
	40-097 Kaustisointilaitos
	40-098 Meesauuni 3
	40-099 Hajukaasujen ker. & käs.
<b>JOU-50 Jäteveden käsittely</b>	
	50-088 Jäteveden puhdistamo

## 8.2 Vanhan mittadatan siirto

Kun työkalu on monistettu ja jaettu osastokohtaisesti, se siirretään sähköiseen M-files järjestelmään. Tämän jälkeen on tarkoitus siirtää vanha arkistoitu mittadata uuteen järjestelmään Metsä Fibren toimesta. Toimeksiantaja päättää itse kuinka paljon vanhaa dataa siirretään seurantajärjestelmään. Työkalu tuottaa ennustavaa dataa toimeksiantajalle vasta kun tarpeeksi mittaus tulosten dataa on syötetty järjestelmään. Enemmän vanhaa dataa käyttämällä saadaan työkalu mahdollisimman nopeasti käyttöön ja ilmoittamaan ennuste dataa. Putkistojen paksuusmittauksien väli Joutsenon tehtaalla on noin 1–2 vuotta, joten enemmän vanhaa dataa käyttämällä ei tarvitse odottaa niin pitkään, jotta työkalu saadaan toimimaan täydellä potentiaalilla.

## 9 YHTEENVETO

### 9.1 Työn tulokset

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Metsä Fibren Joutsenon tehtaalle työkalu, jota hyödynnetään putkistojen peruspaksuusmittauksien mittadatan tallentamiseen ja tämän datan hyödyntämiseen. Erityisesti toimeksiantajan toiveena oli saada selkeä ja käytännöllinen mittadatan hallinta järjestelmä sähköiseen käyttöympäristöön. Lisäksi toiveena oli saada enemmän tietoa irti mittadatasta ja näin ollen hyödyntää työkalua tulevaisuuden huoltoja suunnitellessa.

Opinnäytetyötä varten kehitetty työkalu sisältää useat toimeksiantajan asettamat tavoitteet. Työkalu kokoaa luettelomaisen päälehden, joka ilmoittaa työkalun sisältämät mittauskohteet ja niiden oleellimmat tiedot, laskee käyttöiänennusteen mittadatasta eri tavoin ja kokoaa loppuun luettelon, joka kertoo jokaisen mittauskohteen kohdalla, tarvitseeko kohde lisähuomioita. Työkalu on suunniteltu ajatellen käyttäjäkokemuksen helppoutta ja selkeyttä. Työkalua tullaan käyttämään kenttäolosuhteissa, joten se on huomioitu työkalun ulkoasun suunnittelussa.

Työkalu toteutettiin Excel pohjaan, jolloin sen siirtäminen, kopioiminen ja sisällyttäminen Metsä Fibren M-files järjestelmään on helppoa. Lisänä Excel työkalu mahdollistaa usean mittapisteen tarkastelun yhdessä työkalupohjassa valintatyökalun ansiosta, sillä yksi putkiosa sisältää monta mittapistettä. Excel työkalu itsessään mahdollistaa laajan ja monipuolisen laskenta mahdollisuuden. Liitteessä 1 nähdään kuva työkalun käyttäjänäkymästä.

### 9.2 Pohdinta

Kehitystyön aiheena olevasta työkalusta saatiin jo opinnäytetyön alussa yhteinen käsitys toimeksiantajan kanssa, millainen käyttöliittymä ja käyttäjäkokemus työkalusta haluttiin. Toimeksiantajan kanssa rajattiin onnistuneesti kriteerit, jotka täytyi sisältyä työkaluun, jolloin kehitystyötä oli helppo lähteä viemään tehokkaasti eteenpäin.

Järjestelmä auttaa käyttäjää pysymään kartalla paremmin putkistojen kulumisnopeudesta ja putkistojen huoltotarpeista, ennekuin putkistot vaurioituvat. Näin ollen työkalu tukee sellutehtaan kunnossapidon henkilöstöä, kun suunnitellaan tulevaisuuden huoltotarpeita ja -aikatauluja. Tämän vuoksi kehitystyötä voidaan pitää onnistuneena.

Työkalun ennusteen laskenta on todella hyvä lisätoiminto, mikä kertoo käyttäjälle, milloin mittauskohteen huollettavuus on otettava tarkasteluun. Mutta koska laskenta voi häiriintyä esimerkiksi virheellisistä tai puuttuvista mitta-arvoista, on syytä tarkastella mittatuloksien ja ennusteen yhtenevyyttä tarkemmin. Ennusteeseen ei kannata luottaa täysin, mutta se voi olla tapauskohtaisesti toiminto, mikä auttaa käyttäjää varautumaan tuleviin huoltoihin mahdollisimman ajoissa. Tarpeeksi ajoissa varautuminen huoltotoimenpiteillä ennaltaehkäisee tehtaan tarpeettomia tuotannonseisauksia johtuen laitteiden rikkoutumisesta. Lisäksi työkaluun yhteenvetoon on lisätty ominaisuus, joka ilmoittaa, kun mittausarvot alkavat lähestyä sallittua minimiarvoa. Näin ollen ominaisuus varoittaa käyttäjää liian ohuesta paksuudesta ja auttaa samalla käyttäjää pysymään tietoisena laajemman koneisuuden huoltotarpeista.

## LÄHTEET

- SFS-EN ISO 16809:2019. Rikkomaton aineen koetus. Paksuusmittaus ultraäänellä, 2019. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SFS-EN ISO 8044:2020. Metallien ja metalliseosten korroosio. Termit ja määrittelyt, 2020. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- Pörssitieto. Oy Metsä-Botnia Ab. Verkkojulkaisu. Pörssitieto.fi verkkopalvelu yritys- ja pörssihistoriasta. Julkaisuaika tuntematon. <https://www.porssitieto.fi/osake/lisaa/metsabotnia.shtml>. Viitattu 14.3.2023.
- Metsä Group. Metsä Fibre. Joutsenon sellutehdas. Verkkojulkaisu Metsagroup.com yrityksen verkkosivut. Julkaisuaika tuntematon. <https://www.metsagroup.com/fi/metsafibre/metsafibre/sellun-tuotanto/joutsenon-sellutehdas/>. Viitattu 14.3.2023
- Mäntymaa, E. 2013. Joutsenon sellutehdas saa puusta nyt enemmän irti. Yle Uutiset. <https://yle.fi/a/3-6757523> Viitattu 14.3.2023.
- Sorsa, J. 2015. Materiaalitekniikka. 1. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
- Kivioja, S. Kivivuori, S. Salonen, P. 2007. Tribologia – Kitka, Kuluminen ja Voitelu. 5. korjattu painos. Helsinki: Otatieto.
- Kunnossapitoyhdistys RY 2004. Korroosiokäsikirja. 2. painos. Rajamäki: KP-Media Oy.
- PSK 4201 Putkiluokat. Määrittely 2022. Helsinki: PSK Standardointi. <https://psk-standardisointi.fi/standardit/> Viitattu 28.3.2023
- PSK 2402 Teollisuuden putkistot. Putkistosuunnittelun perusteet 2021. Helsinki: PSK Standardointi. <https://psk-standardisointi.fi/standardit/> Viitattu 28.3.2023
- Flinkenberg. Ruostumattomien terästen vertailu – niiden erot ja käyttökohteet Verkkojulkaisu Flinkenberg.fi sivustolta Julkaistu 8.1.2019 <https://www.flinkenberg.fi/ruostumattomien-terasten-vertailu/> Viitattu 29.3.2023
- Aromaa, J. Klarin, A. 1999. Papermaking Science and Technology: Book 15, Materials, Corrosion Prevention, and Maintenance. 1. painos. Helsinki: Fapet Oy.
- Outokumpu Oyj 2015. Corrosion handbook 11th Edition 2015. 11 painos. Suomi: Outokumpu Oyj.
- Nummenmaa, L. 2021. Tilastotieteen käsikirja. 1. painos. EU: Tammi.

